3



Antônio Máximo · Beatriz Alvarenga · Carla Guimarães

MANUAL DO PROFESSOR

FÍSICA

CONTEXTO & APLICAÇÕES

FÍSICA · ENSINO MÉDIO

editora scipione

FÍSICA

CONTEXTO & APLICAÇÕES

FÍSICA · ENSINO MÉDIO

MANUAL DO PROFESSOR

3

Antônio Máximo Ribeiro da Luz

Licenciado e bacharel em Ciências–Física pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

Professor adjunto do Departamento de Física da UFMG.

Beatriz Alvarenga Álvares

Engenheira civil pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

Professora emérita do Departamento de Física da UFMG.

Carla da Costa Guimarães

Licenciada e bacharela em Ciências–Física pela Universidade de São Paulo (USP).

Professora do Departamento de Engenharia da Pontifícia Universidade Católica de São Paulo (PUC-SP).

Professora do Departamento de Ciências Sociais do Instituto Presbiteriano Mackenzie, São Paulo (SP).

2ª EDIÇÃO
SÃO PAULO
2016

editora scipione

editora scipione

Diretoria editorial
Lidiane Vivaldini Olo

Gerência editorial
Luiz Tonolli

Editoria de Matemática e Física
Ronaldo Rocha

Edição
Alexandre Braga D'Avila

Gerência de produção editorial
Ricardo de Gan Braga

Arte
Andréa Dellamagna (coord. de criação),
A+ Comunicação (progr. visual de miolo),
Adilson Casarotti (progr. visual de capa),
André Gomes Vitale (coord.),
Christine Getschko (edição)
e MRS Editorial (diagram.)

Revisão
Hélia de Jesus Gonsaga (ger.),
Rosângela Muricy (coord.), Ana Curci,
Claudia Virgilio, Luís Maurício Boa Nova e Patrícia Travanca;
Brenda Morais e Gabriela Miragaia (estagiárias)

Iconografia
Sílvio Kligin (superv.), Denise Durand Kremer (coord.),
Roberta Freire Lacerda Santos (pesquisa), Cesar Wolf
e Fernanda Crevin (tratamento de imagem)

Ilustrações
Alex Argozino, Antonio Robson, Formato Comunicação,
G. Gamow, João X. de Campos, Jonatan Sarmento,
Paulo César Pereira, Paulo Manzi e Tânia Ricci

Cartografia
Eric Fuzii, Márcio Souza

Foto da capa: Detalhe de placa de circuitos impressos.
John W Banagan/Getty Images

Protótipos
Magali Prado

Direitos desta edição cedidos à Editora Scipione S.A.
Avenida das Nações Unidas, 7221, 1ª andar, Setor D
Pinheiros – São Paulo – SP – CEP 05425-902
Tel.: 4003-3061
www.scipione.com.br / atendimento@scipione.com.br

2016

ISBN 978 85 262 9923 8 (AL)
ISBN 978 85 262 9924 5 (PR)
Cód. da obra CL 713395
CAE 566 285 (AL) / 566 286 (PR)

2ª edição
1ª impressão

Impressão e acabamento

EDITORA AFILIADA

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

Luz, Antônio Máximo Ribeiro da
Física : contexto & aplicações : ensino médio /
Antônio Máximo Ribeiro da Luz, Beatriz
Alvarenga Álvares, Carla da Costa Guimarães. --
2. ed. -- São Paulo : Scipione, 2016.

Obra em 3 v.

1. Física (Ensino médio) I. Álvares, Beatriz
Alvarenga. II. Guimarães, Carla da Costa.
III. Título.

16-02953 CDD-530.07

Índices para catálogo sistemático:

1. Física : Ensino médio 530.07

Apresentação

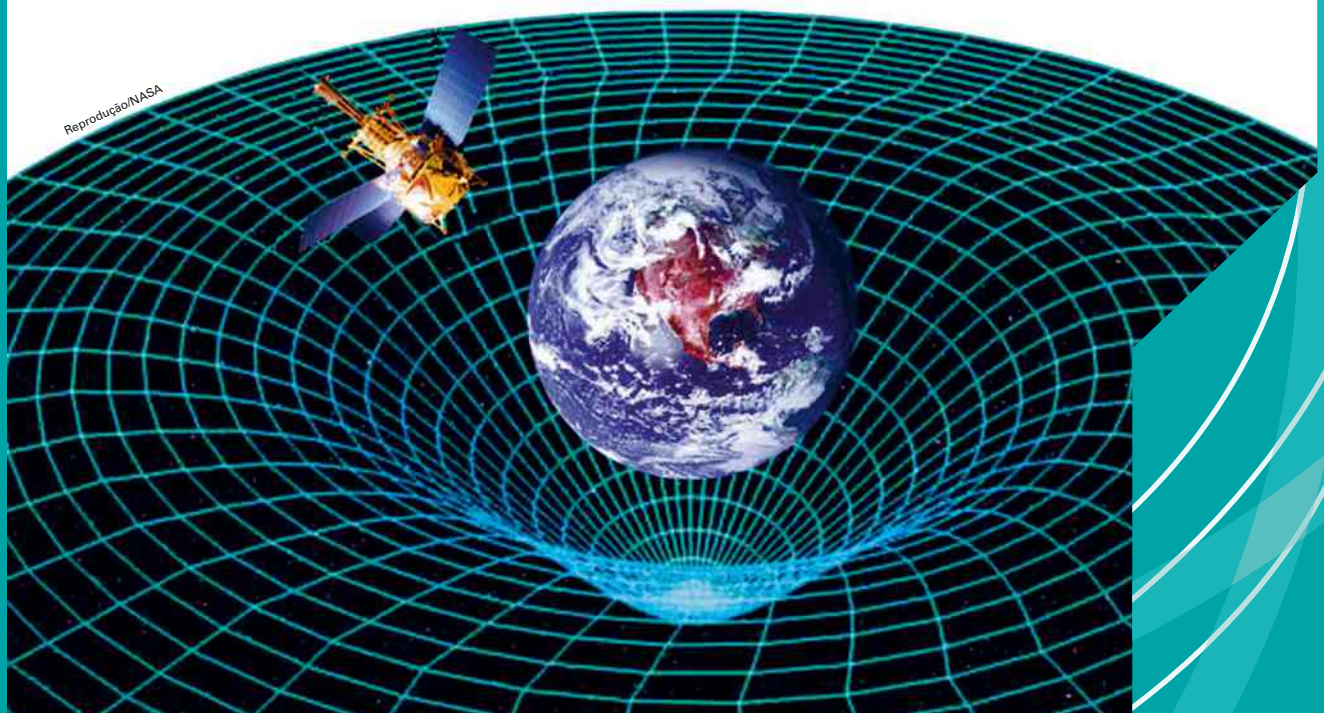
Caro aluno,

Ao elaborar esta coleção, uma de nossas maiores preocupações foi tornar o estudo da Física interessante e agradável, por isso optamos por uma linguagem que fosse acessível e que não exagerasse no formalismo matemático. Além disso, procuramos ilustrar, por meio de seções específicas e exemplos diversificados, como essa ciência se relaciona com a sua realidade. Assim, esperamos que os conteúdos estejam apresentados de uma forma atraente e motivadora, mesmo para aqueles que têm preferências por outras áreas do conhecimento.

A aprendizagem das leis e fenômenos físicos pode trazer um complemento importante para sua formação cultural e intelectual, não apenas pela relação que apresentam com o desenvolvimento tecnológico do mundo moderno, mas também porque nosso cotidiano está "repleto de Física". Ao estudar os assuntos do livro, você vai perceber que essa ciência pode ser usada para explicar muito daquilo que acontece ao nosso redor, desde coisas aparentemente simples, como a água fervendo em uma panela, até outras que parecem mais complexas, como a formação de um arco-íris ou um trem levitando sobre os trilhos.

Com a orientação de seu professor, lendo com atenção os textos de cada capítulo, discutindo com seus colegas e procurando realizar as atividades sugeridas, esperamos que, ao final do curso, você tenha conseguido compreender as leis fundamentais da Física. É possível que essa compreensão faça crescer dentro de você uma admiração pelos fenômenos naturais, bem como respeito pelos grandes cientistas que, por meio de vidas inteiras dedicadas à pesquisa, edificaram esse importante ramo do conhecimento humano.

Os autores



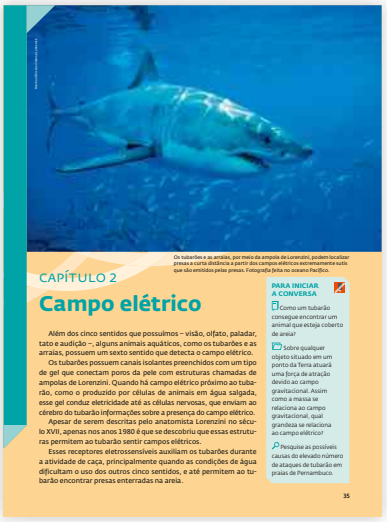
Conheça seu livro

A obra abrange os temas centrais da Física clássica e da Física contemporânea, além de suas relações com o desenvolvimento tecnológico e outras áreas do conhecimento.

PARA INICIAR A CONVERSA

Após a leitura do texto que abre o capítulo, são propostas três questões com o objetivo de:

- verificar o conhecimento de temas gerais da Física;
- avaliar os conhecimentos prévios sobre o assunto que será abordado;
- estimular a busca de informações e conteúdos.



CAPÍTULO 2

Campo elétrico

Além dos cinco sentidos que possuímos – visão, olfato, paladar, tato e audição –, alguns animais aquáticos, como os tubarões e as arraias, possuem um sexto sentido que detecta o campo elétrico.

Os tubarões possuem canais isolantes preenchidos com um tipo de gel que conectam poros da pele com estruturas chamadas de ampolas de Lorenzini. Quando há campo elétrico próximo ao tubarão, como o produzido por células de animais em água salgada, esse gel conduz eletricidade até as células nervosas, que enviam ao cérebro do tubarão informações sobre a presença do campo elétrico.

Apesar de serem descritas pelo anatomista Lorenzini no século XVII, apenas nos anos 1980 é que se descobriu que essas estruturas permitem ao tubarão sentir campos elétricos.

Esses receptores eletrossensíveis auxiliam os tubarões durante a atividade de caça, principalmente quando as condições de água dificultam o uso dos outros cinco sentidos, e até permitem ao tubarão encontrar presas enterradas na areia.

PARA INICIAR A CONVERSA

Como um tubarão consegue encontrar um animal que esteja coberto de areia?

Sobre qualquer objeto situado em um ponto da Terra atuará uma força de atração devido ao campo gravitacional. Assim como a massa se relaciona ao campo gravitacional, qual grandeza se relaciona ao campo elétrico?

Pesquise as possíveis causas do elevado número de ataques de tubarão em praias de Pernambuco.

35

LEITURAS

As leituras são apresentadas nos três boxes descritos a seguir, que aparecem intercalados com o desenvolvimento do conteúdo e que têm como objetivo ampliar os conceitos físicos vistos no capítulo.



APLICAÇÕES DA FÍSICA

Como funcionam os para-raios?

O poder das pontas encontra uma importante aplicação na construção dos para-raios, os quais foram inventados pelo cientista americano Benjamin Franklin no século XVIII. Ele observou que os relâmpagos eram muito semelhantes às centelhas elétricas que ele via saltar entre dois objetos eletrizados em seu laboratório. Surpreso, então, de que os raios fossem enormes centelhas causadas por eletricidade que, por algum processo, desenvolvia-se nas nuvens. Para verificar sua hipótese, ele realizou uma perigosa experiência, que se tornou famosa.

Conta-se que, durante uma tempestade, Franklin empinou uma pipa de seda presa em uma linha que possuía uma chave de metal na tentativa de transferir a eletricidade, que ele acreditava existir nas nuvens, para alguns aparelhos de seu laboratório.

Alguns historiadores acreditam que, devido aos riscos do experimento previamente conhecidos por Franklin, possivelmente ele não fizera o experimento exatamente do jeito que descreveu. De qualquer forma, a descoberta de Franklin sobre a natureza elétrica dos raios é fruto de seus estudos, cujos registros são anteriores à realização do experimento da pipa proposto em 1752.

O para-raios consiste essencialmente em uma ou várias pontas metálicas e deve ser colocado no ponto mais elevado do local a ser protegido (figura 2.32). O para-raios é ligado à terra por meio de um bom condutor (fio metálico grosso), que normalmente termina em uma grande placa enterrada no solo, como mostra a figura 2.33.a.

Quando uma nuvem eletrizada passa sobre o local onde o para-raios foi colocado, o campo elétrico estabelecido entre a nuvem e a terra torna-se muito intenso nas proximidades de suas pontas (figura 2.33.b). Então, o ar em torno das pontas ioniza-se, tornando-se condutor e fazendo com que a descarga elétrica se processe através dessas pontas. Em outras palavras, há maior probabilidade de o raio "cair" (como se diz popularmente) no para-raios do que em outro local da vizinhança. Naturalmente, como o para-raios está ligado ao solo, a carga elétrica que ele recebe da nuvem é transferida para a terra sem causar danos. Estudos estatísticos mostram que a ação protetora do para-raios se estende a uma distância aproximadamente igual ao dobro de sua altura.

Figura 2.32. Para-raios instalado no ponto mais alto do local a ser protegido. Nova York, Estados Unidos, 2014.

QUESTÕES

1. Baseando-se nas informações desta seção, podemos inferir que é extremamente perigoso ficar em um campo aberto ou próximo a estruturas metálicas durante uma tempestade de raios. Existe uma lenda que relata que espelhos dentro de casa atraem raios, por isso se devem manter fechadas as cortinas durante as tempestades de raios. Faz algum sentido essa preocupação?
2. Há uma crença popular segundo a qual "um raio nunca cai duas vezes em um mesmo lugar". Lembrando-se do "poder das pontas" e do que estudou nesta seção sobre a formação dos raios, você julga que essa crença tem algum fundamento científico?

Figuras 2.33. O para-raios exerce ação protetora contra os danos causados pelos raios. Representação sem escala e em cores fantasia.

CAMPO ELÉTRICO CAPÍTULO 2 55

Aplicações da Física

Seção que traz exemplos de aplicações tecnológicas que utilizam o desenvolvimento científico da Física. Além disso, apresenta propostas de pesquisas e debates.



FÍSICA NO CONTEXTO

A MAGNETOSFERA

A partir da exploração espacial foi possível descobrir a existência dos cinturões de Van Allen ao redor do planeta Terra. Esses cinturões são formados por nuvens de partículas carregadas e estão localizados, de maneira não uniforme, na faixa de 1 000 km a 60 000 km da Terra. Os satélites artificiais que foram lançados mostraram ainda que a magnetosfera terrestre (figura 7.25), região do campo magnético que envolve a Terra, cria um escudo protetor (em azul) para o planeta, pois afasta a radiação da região equatorial concentrando uma maior intensidade de partículas carregadas nos polos. A magnetosfera ainda sofre influência do movimento da própria Terra e do fluxo de partículas carregadas que emanam do Sol, conhecido como "vento" solar. Com isso, a compressão da magnetosfera pode afetar o funcionamento de satélites e sistemas GPS, além de ser responsável por blecautes de rádio, falhas em circuitos elétricos, comportamento errático de bússolas e auroras boreais e austrais.

AURORA BOREAL E AURORA AUSTRAL

A aurora boreal e a austral são belos espetáculos de luz e cores, que podem ser observados na atmosfera, nas proximidades dos polos norte e sul da Terra (figura 7.26).

Os termos "aurora boreal" e "aurora austral" significam, respectivamente, "luzes do norte" e "luzes do sul". Esses fenômenos são conhecidos desde a Antiguidade, sendo mencionados na mitologia dos esquimós e de outros povos, que lhes atribuíam origem sobrenatural. Podem apresentar-se com variadas formas (cortinas, arcos, raios, etc.) e cores.

A causa das auroras está relacionada com o campo magnético da Terra e uma explicação bem elaborada deve fenômeno só foi possível após o lançamento dos primeiros satélites artificiais. Instrumentos de observação, colocados nesses satélites, permitiram concluir que feixes de partículas eletrizadas (elétrons e prótons), emitidos pelo Sol, são "capturados" pelo campo magnético terrestre ao passarem nas proximidades da Terra e descrevem trajetórias espiraladas nesse campo, como mostra a figura 7.27.

Grande número dessas partículas são defletidas em direção aos polos magnéticos da Terra (onde o campo magnético é mais intenso).

Ao atingirem a atmosfera, as partículas colidem principalmente com os átomos e as moléculas de oxigênio e nitrogênio, fazendo com que eles emitam a luz que constitui a aurora.

Figura 7.25. Efeito do vento solar sobre a magnetosfera da Terra. Concepção artística.

Figura 7.26. A aurora boreal e a aurora austral são fenômenos atmosféricos que constituem um belo espetáculo de luz e de cores. Fotografia de aurora boreal no Alasca (Estados Unidos), 2015.

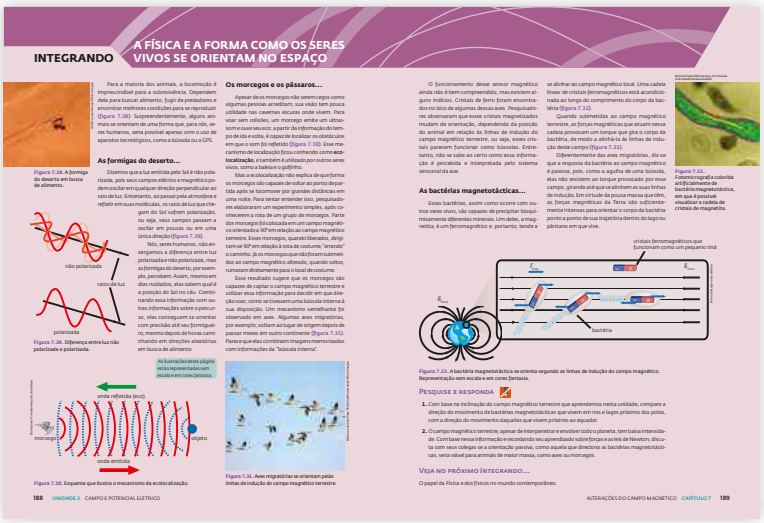
As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

Figura 7.27. Partículas eletrizadas, provenientes do Sol, são "capturadas" pelo campo magnético da Terra.

186 UNIDADE 3 CAMPO E POTENCIAL ELÉTRICO

Física no contexto

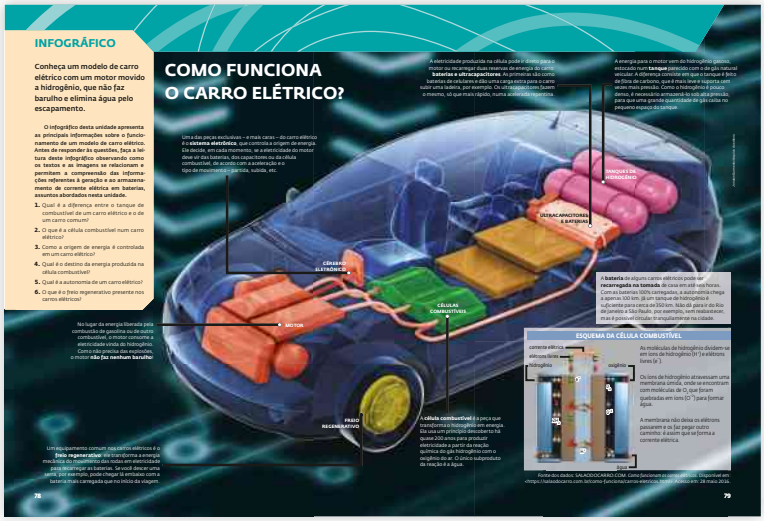
Leituras que complementam os conhecimentos abordados e mostram como a Física estudada no capítulo pode fornecer explicações para situações conhecidas do aluno. Além disso, apresenta passagens históricas, procurando relacionar esses acontecimentos com o avanço da Física e de outras ciências.



Integrando...

Tem por objetivo proporcionar uma visão mais abrangente de um assunto estudado no capítulo. Para tanto, relaciona conceitos comuns à Física e a outras áreas do conhecimento, como Matemática, Química e Biologia. Além disso, propõe questões e pesquisas relacionadas ao texto.

INFOGRÁFICO



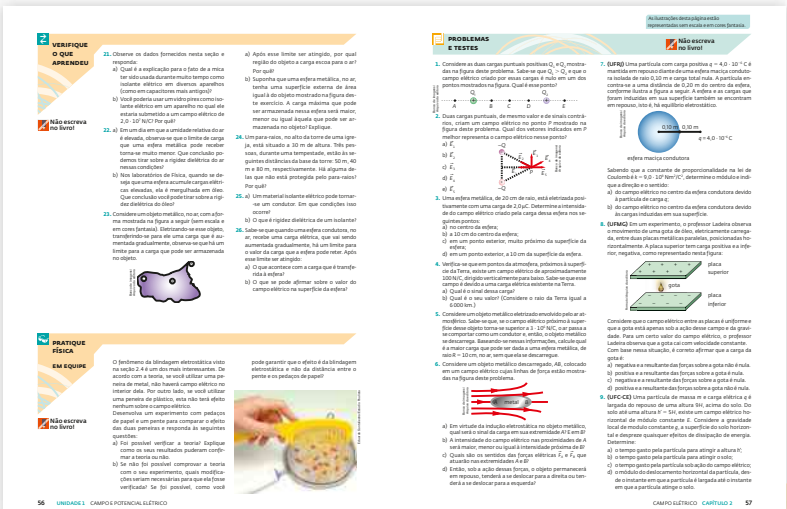
Cada Unidade é finalizada com uma proposta de leitura e análise de um infográfico que apresenta conceitos abordados em seus capítulos. As questões propostas exercitam a interpretação de imagens e textos e complementam o que foi estudado na Unidade.

ATIVIDADES

Estão divididas nas seções a seguir e distribuídas em níveis de dificuldade crescente.

Pratique Física

Seção que traz propostas de observação e de atividades experimentais de cunho investigativo. As atividades sugeridas não demandam material sofisticado nem oferecem periculosidade, por isso podem ser realizadas tanto na escola quanto em casa.



Problemas e testes

Problemas e testes variados de diferentes níveis em que o estudante terá a oportunidade de aplicar as leis e os conceitos tratados em todos os tópicos do capítulo. Inclui questões de vestibular e questões do Enem.

Verifique o que aprendeu

Exercícios propostos que têm por finalidade auxiliar a compreensão dos conceitos vistos em cada um dos tópicos do capítulo.

Sumário



UNIDADE 1

Campo e potencial elétrico

1. Carga elétrica

1.1 Eletrização, 11

1.2 Condutores e isolantes, 15

1.3 Indução e polarização, 18

1.4 Eletroscópios, 21

1.5 Lei de Coulomb, 24

Integrando... A força elétrica e a matéria, 30

Pratique Física, 32

Problemas e testes, 33

2. Campo elétrico

2.1 O conceito de campo elétrico, 36

2.2 Campo elétrico criado por cargas puntuais, 40

2.3 Linhas de força, 44

2.4 Comportamento de um condutor eletrizado, 48

2.5 Rigidez dielétrica – poder das pontas, 52

Pratique Física, 56

Problemas e testes, 57

3. Potencial elétrico

3.1 Diferença de potencial, 59

3.2 Voltagem em um campo uniforme, 62

3.3 Voltagem no campo de uma carga puntual, 64

3.4 Energia potencial elétrica, 68

3.5 Superfície equipotencial em uma carga, 70

3.6 O gerador de Van de Graaff, 71

Pratique Física, 75

Problemas e testes, 75

Infográfico, 78



UNIDADE 2

Circuitos elétricos de corrente contínua

4. Corrente elétrica

4.1 Corrente elétrica, 83

4.2 Circuitos simples, 88

4.3 Resistência elétrica, 92

4.4 A lei de Ohm, 98

4.5 Associação de resistores, 102

4.6 Potência em um elemento do circuito, 110

4.7 Instrumentos elétricos de medida, 116

Pratique Física, 121

Problemas e testes, 121

5. Força eletromotriz – Equação do circuito

5.1 Força eletromotriz, 125

5.2 A equação do circuito, 131

5.3 Diferença de potencial nos terminais de um gerador, 135

5.4 Os semicondutores e o transistor, 138

Pratique Física, 140

Problemas e testes, 141

Integrando... A pilha de Daniell e o gerador, 142

Infográfico, 144

UNIDADE

Eletromagnetismo 3



6. O campo magnético

6.1 Magnetismo, 149

6.2 Eletromagnetismo, 152

6.3 Campo magnético, 155

6.4 Movimento circular em um campo magnético, 162

6.5 Força magnética em um condutor, 164

Pratique Física, 170

Problemas e testes, 171

7. Alterações do campo magnético

7.1 Campo magnético de um condutor retilíneo, 173

7.2 Campo magnético no centro de uma espira circular, 177

7.3 Campo magnético de um solenoide, 178

7.4 Influência do meio no valor do campo magnético, 182

Pratique Física, 187

Integrando... A Física e a forma como os seres vivos se orientam no espaço, 188

Problemas e testes, 190

8. Indução eletromagnética – Ondas eletromagnéticas

8.1 Força eletromotriz induzida, 192

8.2 A lei de Faraday, 196

8.3 A lei de Lenz, 203

8.4 O transformador, 205

8.5 Ondas eletromagnéticas, 208

8.6 O espectro eletromagnético, 214

8.7 Transmissão e distribuição de energia elétrica, 222

Pratique Física, 225

Problemas e testes, 226

Apêndice F

F.1 Capacitores, 228

F.2 Energia em um capacitor, 233

Problemas e testes, 235

Infográfico, 236

UNIDADE

Física contemporânea 4



9. Teoria da relatividade e Física quântica

9.1 Relatividade: antecedentes históricos, 241

9.2 A teoria da relatividade especial, 244

9.3 A teoria da relatividade geral, 252

9.4 Problemas que levaram ao surgimento da Física quântica, 256

Pratique Física, 261

Problemas e testes, 261

Integrando... O fazer ciência ao mundo moderno, 264

Infográfico, 266

Respostas, 268

Sugestões de leitura, 278

Bibliografia, 279

Índice remissivo, 280

UNIDADE

1

Campo e potencial elétrico

A Química e a Física são duas ciências que se desenvolveram lado a lado, beneficiando-se mutuamente de suas descobertas, principalmente quando se dedicaram a estudar a teoria atômica da matéria a partir do século XIX.

A formulação e a transformação dos modelos atômicos de Thomson, Rutherford e Bohr se deram basicamente por meio dos resultados obtidos nos experimentos de descargas elétricas em gases rarefeitos e de radioatividade.

Dessa forma, ao longo dos nossos estudos sobre Eletricidade, utilizaremos conceitos comuns, como carga elementar do elétron, íons (positivos e negativos), potencial e corrente elétrica.

CAPÍTULO 1
Carga elétrica

CAPÍTULO 2
Campo elétrico

CAPÍTULO 3
Potencial elétrico



Ao tocar uma lâmpada de plasma, uma pessoa se torna um condutor elétrico, induzindo corrente elétrica na ponta dos dedos.



David Wall/Alamy/Latinstock



Smileus/Shutterstock

Antonio Robson/Arquivo da editora

Impressora a *laser* e seu esquema de funcionamento (sem escala e em cores fantasia).

CAPÍTULO 1

Carga elétrica

P Os objetos de cargas opostas se aproximam; e de cargas semelhantes se afastam.

P Esse processo é chamado de indução e, ao contrário do que acontece no atrito e no contato, neste os objetos não se tocam e é necessário o uso do fio terra.

P O documento ficaria escuro com o conteúdo reproduzido na parte clara.

O método de copiar um documento nas impressoras a *laser* monocromáticas é uma interessante forma de entender a aplicação da eletricidade estática. A superfície do cilindro fotocondutor é recoberta com material fotossensível, que é um isolante e retém carga elétrica na ausência de luz, mas ao ser iluminado se descarrega facilmente. Quando esse cilindro é posto a girar, um dos lados do cilindro encontra-se sob um fio, chamado corona, que está carregado com carga negativa e induzirá cargas positivas apenas na superfície do cilindro fotocondutor que está sob o fio. Essa região, que está carregada positivamente, será atingida pela luz *laser* que descarregará pontos específicos da superfície do cilindro correspondentes à imagem ou ao texto. Na sequência, o cilindro gira e passa pelo reservatório do *toner* e dele atrai um pó preto e fino, que está carregado com carga positiva, para as partes do cilindro que foram descarregadas superficialmente pelo *laser*. O papel, após passar pelo *toner*, passa por cilindros fusores, que aquecem o conjunto para derreter o pó, fixando-o no papel. É por isso que quando recebemos a cópia ela ainda está quente.

PARA INICIAR A CONVERSA

O que acontece quando aproximamos objetos carregados com cargas elétricas de sinais opostos? E com cargas de mesmo sinal?

Tanto o cilindro fotocondutor quanto o papel que recebe a cópia são eletrizados pelo mesmo processo. Como se chama esse processo de eletrização e no que ele difere dos outros processos?

Se o fotocondutor funcionasse de forma oposta, ou seja, não permitisse a passagem de corrente quando nele incide luz, como ficariam impressas as cópias no papel?

1.1 Eletrização

Não é possível conceber o mundo atual sem o uso da eletricidade. Desde os celulares, passando pelas pranchas para cabelos, televisores, refrigeradores, automóveis, entre outros aparelhos elétricos, nossa vida diária está intimamente relacionada com os fenômenos elétricos **(figura 1.1)**.

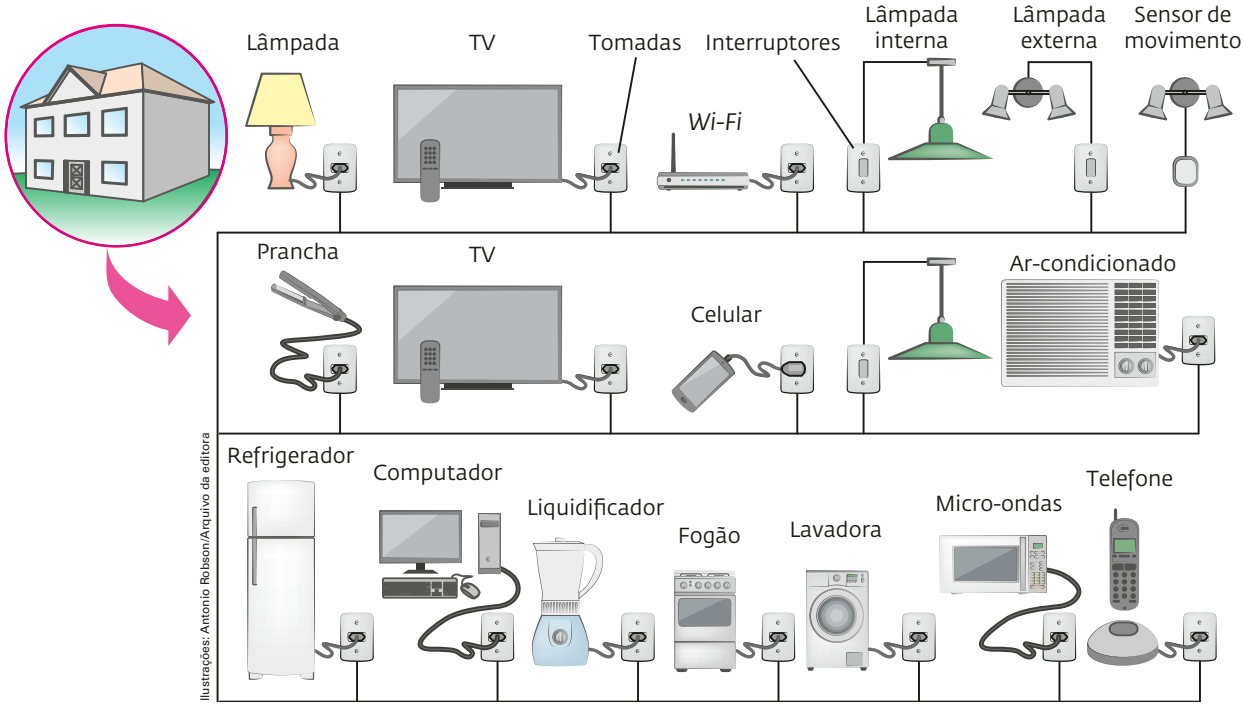


Figura 1.1. Nossa vida está intimamente relacionada com os fenômenos de natureza elétrica. Representação sem escala e em cores fantasia.

As primeiras descobertas relacionadas com fenômenos elétricos das quais se tem notícia foram feitas pelos gregos, na Antiguidade.

Desde Platão, 428-348 a.C., sabe-se que um pedaço de âmbar[1], após ser atritado, adquiria a propriedade de atrair corpos leves que estivessem ao seu redor, como palhas e plumas.

Somente em 1600 d.C. William Gilbert publica seu livro chamado *Sobre os ímãs e corpos magnéticos e sobre o grande ímã, a Terra*, que descreve diversas experiências de eletrostática associados ao âmbar com o intuito de distingui-las dos fenômenos magnéticos. Como a palavra grega correspondente a âmbar é *elektron*, Gilbert passou a usar o termo "elétrico" ao se referir aos corpos que se comportavam como o âmbar. Várias outras palavras utilizadas atualmente têm aí sua origem: "eletrização", "eletricidade", "elétron", "eletrodo", etc. Somente na década de 1770 abandonou-se a separação dos corpos entre materiais "elétricos" e "não elétricos" de Gilbert, adotando-se a classificação que conhecemos atualmente por condutores e isolantes, que abordaremos mais adiante.

Em 1733, Charles François de Cistenay Du Fay foi o primeiro a afirmar que, a partir de resultados experimentais, há dois tipos de eletricidade: positiva e negativa. Sendo assim, Du Fay separou experimentalmente os corpos eletrizados nestes dois grupos distintos.

[1] O âmbar é uma pedra amarelada que se origina da fossilização de resinas provenientes de árvores de madeira macia.

Sugestão de leitura: ASSIS, A. K. T. *Os fundamentos experimentais e históricos da eletricidade*. São Paulo: Livraria da Física, 2011.

Com o objetivo de aproximar o aluno da experimentação, a obra aborda os fundamentos da eletricidade mantendo um interessante enfoque experimental e histórico, possibilitando ao leitor realizar os experimentos sugeridos com materiais de baixo custo e fácil aquisição e manipulação.

Carga elétrica positiva e carga elétrica negativa

- **1º grupo:** é constituído pelos objetos que se comportam como uma barra de vidro atritada com seda. Verifica-se que todos os objetos eletrizados desse grupo repelem-se uns aos outros. Dizemos que esses objetos estão **eletrizados positivamente** ou que, ao serem atritados, adquiriram uma **carga elétrica positiva** (figura 1.2).
- **2º grupo:** é constituído pelos objetos que se comportam como uma barra de borracha atritada com um pedaço de lã. Verifica-se também que todos os objetos desse grupo repelem-se uns aos outros, mas atraem os objetos do grupo anterior. Dizemos que os objetos deste 2º grupo estão **eletrizados negativamente** ou que possuem **carga elétrica negativa** (figura 1.3).

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

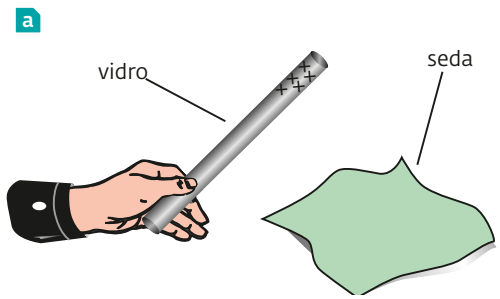
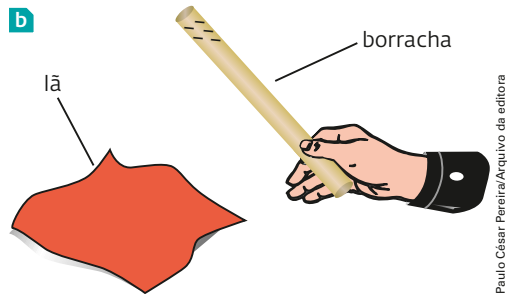


Figura 1.2. Quando uma barra de vidro é atritada com seda, fica eletrizada positivamente.



Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura 1.3. Quando uma barra de borracha é atritada com lã, fica eletrizada negativamente.

Existem dois tipos de cargas elétricas: positivas e negativas. As cargas elétricas de mesmo nome (mesmo sinal) se repelem, e as cargas de nomes contrários (sinais contrários) se atraem (figuras 1.4 e 1.5).

Ilustrações: Banco de imagens/ Arquivo da editora

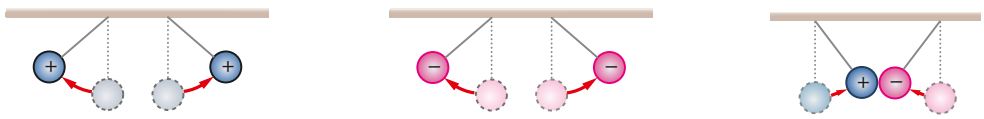
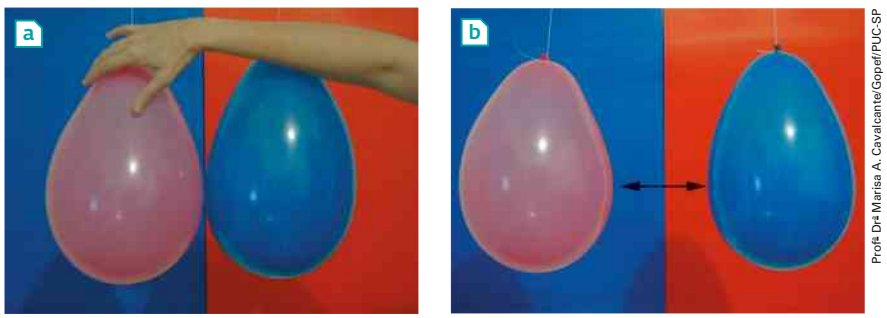


Figura 1.4. Objetos eletrizados com carga de nomes (sinais) iguais se repelem e de nomes (sinais) contrários se atraem.



Profª Drª Marisa A. Cavalcante/Gopef/PUC-SP

Figura 1.5. Os balões, após serem atritados com náilon, são aproximados um do outro (**a**). Ao serem abandonados, eles se repelem (**b**).

A carga elétrica e é a menor quantidade de carga encontrada na natureza e seu módulo é conhecido como carga elementar. A unidade da carga elétrica no SI é o Coulomb (C). Seu valor é:

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

A quantidade de carga elétrica de um corpo é dada por:

$$Q = n \cdot e$$

em que n é o número de elétrons que estão em excesso ou em falta.

Eletrização por atrito

Charles François de Cisternay Du Fay, em seus trabalhos experimentais, já sabia que todos os materiais poderiam ser eletrizados ao serem atritados com outros materiais. Por exemplo: uma régua de plástico se eletriza ao ser atritada com seda e atrai uma bola de isopor **(figura 1.6.a)**; um pente se eletriza ao ser atritado nos cabelos de uma pessoa e passa a atrair esses cabelos **(figura 1.6.b)** ou um filete de água **(figura 1.6.c)**; uma roupa de náilon se eletriza ao se atritar com o corpo; um automóvel em movimento se eletriza pelo atrito com o ar; etc.

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

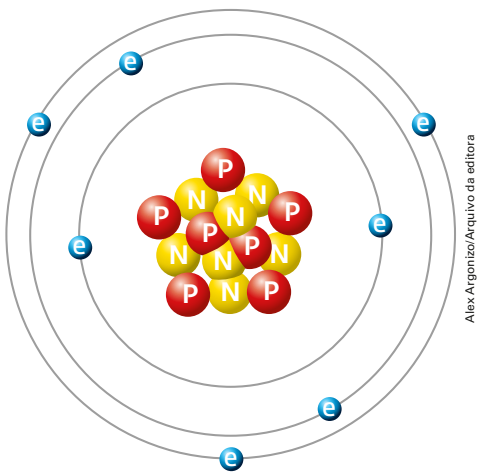


Ilustrações: Paulo César/Arquivo da editora

Figura 1.6. Qualquer material pode ser eletrizado ao ser atritado com outro.

Por que um objeto se eletriza

Para explicar por que um corpo se eletriza devemos relembrar que toda a matéria é constituída de átomos. Ao longo da história da Ciência, desde a época dos gregos, foram vários os cientistas que propuseram modelos atômicos para explicar a constituição da matéria. Consideraremos o modelo atômico de Bohr, proposto em 1913. Nesse modelo, os elétrons, portadores de carga elétrica negativa, encontram-se em órbitas circulares ao redor do núcleo **(figura 1.7)**. No núcleo, região central do átomo, estão os prótons, portadores de cargas elétricas positivas, e os nêutrons, que não têm carga elétrica.



Alex Argozino/Arquivo da editora

Figura 1.7. Modelo atômico de Bohr para um átomo de nitrogênio.

Dizemos que um corpo é neutro se ele não estiver eletrizado, ou seja, se o número de prótons for igual ao número de elétrons. Sabe-se desde a época de Du Fay que, ao atritarmos dois corpos entre si, há transferência de elétrons de um corpo para outro. Aquele que perde elétrons apresenta-se com excesso de prótons, ou seja, fica eletrizado positivamente, e aquele que ganha elétrons fica eletrizado negativamente, pois está com excesso de elétrons.

Podemos, então, destacar:

Um objeto em seu estado normal, não eletrizado, possui um número de prótons igual ao número de elétrons. Se esse objeto perder elétrons, ficará com excesso de prótons, isto é, se apresentará eletrizado positivamente. Se ele receber elétrons, possuirá um excesso dessas partículas e se apresentará eletrizado negativamente.

Comentários

1) No processo de eletrização, o número total de prótons e elétrons não se altera, havendo apenas uma separação das cargas elétricas. Não há, portanto, criação nem destruição de carga elétrica, isto é, a carga total é conservada.

2) Os prótons e os nêutrons estão localizados no núcleo do átomo **(figura 1.7)** e não podem ser deslocados de suas posições pelo simples atrito de um objeto com outro. Pelo atrito, apenas os elétrons podem ser trocados entre os dois objetos.

3) O atrito entre os objetos é uma maneira de fazer com que eles se aproximem bastante para que os átomos de um possam interagir com os átomos do outro. Perderá elétrons o átomo que exercer menor força sobre o elétron.

Assim, um mesmo objeto poderá se eletrizar positiva ou negativamente, dependendo do objeto com o qual for atritado. Por exemplo: a seda – que atritada com vidro adquire carga negativa porque retira elétrons do vidro –, quando atritada com borracha, adquire carga positiva, pois perde elétrons para a borracha.

Tabela 1.1

Série triboelétrica de Du Fay

Materiais
cabelo
vidro liso
pele humana
poliamida
algodão
seda
papel ou papelão
couro
porcelana
papel-alumínio
madeira
rolha
pano de acrílico
isopor
saco plástico
canudo plástico
acrílico rígido
tubo de PVC
borracha dura

Du Fay apresentou uma sequência chamada de série triboelétrica, cujo prefixo "tribo" vem do grego e significa atrito, que indica os tipos de eletrização obtidos por atrito. Pode-se descobrir qual dos corpos ganha ou perde elétrons durante a eletrização por atrito a partir da **tabela 1.1**, na qual um material adquire carga positiva quando atritado com os materiais que o seguem e adquire carga negativa quando atritado com os que o precedem. Quanto mais afastados estiverem na lista dessa tabela, maior será a eficiência na eletrização. Além disso, materiais idênticos e metais não se eletrizam por atrito.

É importante observar que as séries triboelétricas na literatura podem diferir ligeiramente entre si, devido às características próprias de cada material. O vidro, por exemplo, tem diferentes composições químicas na sua constituição que podem afetar sua capacidade de adquirir carga negativa e positiva.

ASSIS, A. K. T. *Os fundamentos experimentais e históricos da eletricidade*. Montreal: C. Roy Keys Inc., 2010.

Verifique o que aprendeu

1. Quando dois corpos, feitos de uma mesma substância, são atritados, não há transferência de elétrons de um para o outro; logo, eles não se eletrizam.

1. Duas folhas de um mesmo tipo de papel são atritadas entre si. Elas ficarão eletrizadas? E se atritarmos duas barras feitas de um mesmo tipo de plástico? Explique.

2. Considerando a **figura 1.3**, responda:
a) O pedaço de lã ficou eletrizado? Sim.
b) Qual é o sinal da carga no pedaço de lã? Positiva.
c) Qual dos dois objetos recebeu elétrons? A borracha.
d) Qual dos dois objetos ficou com excesso de prótons? A lã.

3. No processo de eletrização em que uma barra de vidro é atritada com seda, o número de elétrons em excesso na seda (módulo da carga na seda) é maior, menor ou igual ao número de prótons em excesso no vidro (quantidade de carga no vidro)? Igual.

4. Um pedaço de algodão é atritado com uma folha de papel.
a) Qual é o sinal da carga elétrica que cada um adquire (consulte a **tabela 1.1**)?
b) Qual deles perdeu elétrons? O algodão.

5. Uma barra de poliamida é atritada com um saco plástico e um tubo de PVC é atritado com uma folha de papel-alumínio. Consultando a **tabela 1.1**, responda se a barra de poliamida vai atrair ou repelir:
a) a folha de papel-alumínio; Repelir.
b) o tubo de PVC. Atrair.

Não escreva no livro!
4. a) O algodão ficará eletrizado positivamente e o papel ficará eletrizado negativamente.

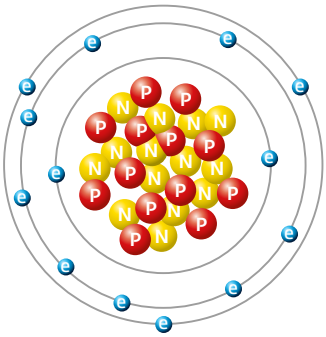
1.2 Condutores e isolantes

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

O que é um condutor de eletricidade

Conforme vimos, os objetos são constituídos de átomos e estes possuem partículas eletrizadas (prótons e elétrons).

Um átomo isolado de um metal, como o alumínio (Al), por exemplo, é eletricamente neutro. O número atômico do alumínio é 13, o que significa que o átomo tem 13 prótons no núcleo e 13 elétrons distribuídos nas camadas eletrônicas da eletrosfera **(figura 1.8)**. Quando um átomo tem um, dois ou três elétrons de valência, ou seja, elétrons na camada externa, a ligação entre esses elétrons e o núcleo é fraca e estes elétrons não permanecem ligados aos respectivos átomos. Esses elétrons são denominados elétrons livres.



Ilustrações: Alex Argozino/Arquivo da editora

Figura 1.8. Átomo de alumínio com 13 prótons e 13 elétrons. Nos metais, os elétrons das órbitas mais externas não permanecem ligados aos átomos e são denominados elétrons livres.

Quando vários átomos se reúnem para formar certos sólidos, como um bloco de metal, os elétrons de valência adquirem liberdade para se movimentar no interior do sólido **(figura 1.9)**. Nesse arranjo, os elétrons de valência têm considerável mobilidade e são capazes de conduzir eletricidade facilmente. No interior dos metais, quando um átomo perde os elétrons de valência, há falta de elétrons, e o átomo se torna um íon positivo; quando o átomo ganha elétrons, há excesso de elétrons, e o átomo é denominado íon negativo.

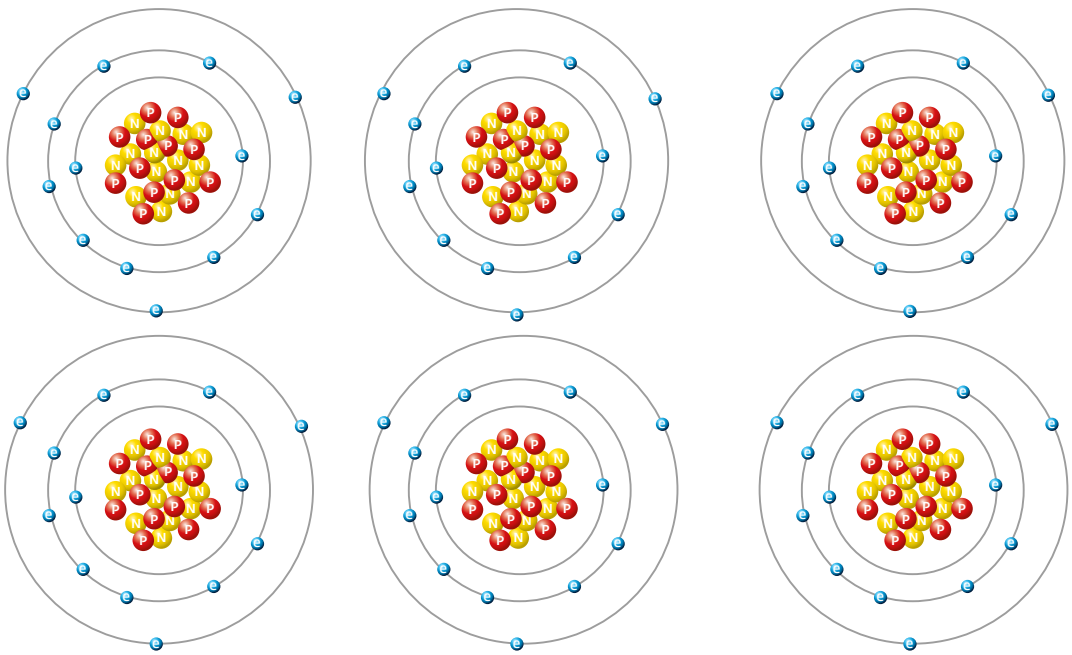


Figura 1.9. Íons de alumínio em um bloco de metal. Os elétrons livres podem se deslocar pelos espaços vazios entre os íons.

À temperatura ambiente, os íons estão em movimento oscilatório ao redor de sua posição de equilíbrio, enquanto os elétrons livres estão em movimento aleatório ou desordenado. Portanto, nos sólidos que possuem elétrons livres, é possível que a carga elétrica seja transportada através deles e, por isso, dizemos que esses materiais são condutores de eletricidade. Os metais, o carvão, o solo e o corpo humano são exemplos de materiais condutores.

Por exemplo: se ligarmos os polos de uma bateria por meio de um fio de cobre, os elétrons livres do metal, que têm movimento aleatório de origem térmica **(figura 1.10.a)**,

entrarão em movimento ordenado, deslocando-se de um polo para o outro **(figura 1.10.b)**. Assim, as cargas elétricas estarão se deslocando pelo fio, constituindo uma corrente elétrica (que estudaremos mais adiante).

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

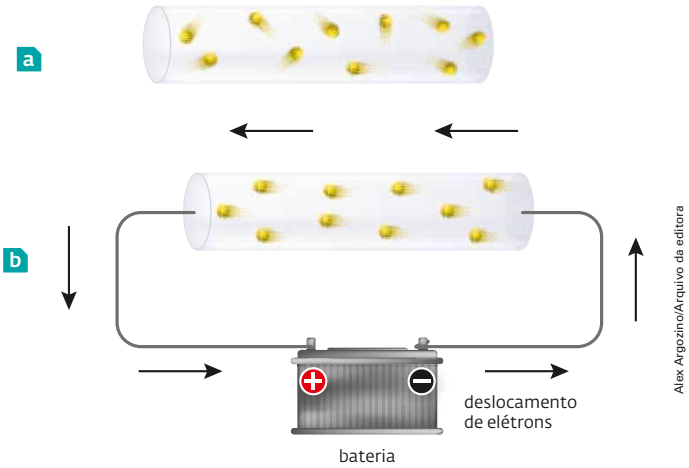


Figura 1.10. Elétrons em movimento desordenado ou aleatório dentro de um fio metálico devido à temperatura ambiente (**a**). Quando os polos de uma bateria são ligados ao fio metálico, os elétrons livres no interior do fio entram em movimento ordenado (**b**).

Os sólidos que possuem elétrons livres em seu interior permitem o deslocamento de carga elétrica através deles, sendo, por esse motivo, denominados condutores de eletricidade.

O que é um dielétrico

Como cargas de mesmo sinal se repelem, quando um condutor for eletrizado, haverá repulsão entre suas cargas, fazendo com que estas fiquem o mais distante possível umas das outras. As cargas elétricas em um condutor eletrizado se distribuem em sua superfície **(figura 1.11)**.

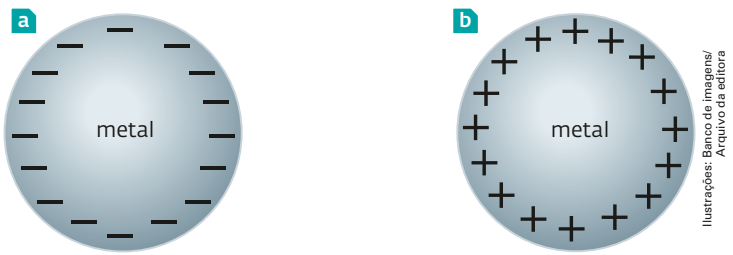


Figura 1.11. Distribuição final das cargas em um condutor carregado.

Ao contrário dos condutores, existem sólidos nos quais os elétrons estão firmemente ligados aos respectivos átomos, isto é, essas substâncias não possuem elétrons livres, ou o número de elétrons livres é relativamente pequeno. Assim, não será possível o deslocamento de carga elétrica através desses objetos, que são denominados **isolantes elétricos** ou **dielétricos**. Apesar de não haver deslocamento de carga elétrica nos isolantes, esse tipo de material pode ser eletrizado. A diferença é que nos condutores as cargas elétricas se localizam na superfície do material e, nos isolantes, elas permanecem na região em que apareceram. A porcelana, a borracha, o vidro, o plástico, o papel, a madeira, etc. são exemplos de substâncias isolantes. Assim, na **figura 1.11**, se usássemos qualquer uma dessas substâncias para ligar os polos da bateria entre si, não seria observado nenhum movimento de cargas elétricas nessa ligação, isto é, não haveria corrente elétrica através da substância. Os condutores e isolantes são velhos conhecidos dos cientistas e foram estudados inicialmente por Stephen Gray em 1729.

Comentários

1) Considere um objeto metálico, carregado negativamente, apoiado em um suporte isolante **(figura 1.12.a)**. Suponha que esse objeto seja ligado à terra por meio de um condutor, por exemplo, um fio de cobre (observe, na **figura 1.12.a**, como se representa a ligação à terra em diagramas elétricos). Nessas condições, os elétrons que estão em excesso no objeto metálico escoarão para a terra através do condutor, fazendo com que o objeto perca sua carga negativa, passando ao estado neutro.
Na **figura 1.12.b** está representado o que aconteceria se o objeto metálico estivesse eletrizado positivamente: elétrons livres da terra passariam através do condutor até que a carga positiva do objeto metálico fosse neutralizada. Vemos, portanto, que um objeto metálico eletrizado, ao ser ligado à terra por meio de um condutor, perde ou ganha elétrons, tornando-se neutro.

2) Na **figura 1.12**, se em lugar do fio condutor fosse usado um fio isolante (de plástico, por exemplo) para estabelecer a ligação com a terra, não haveria movimento de elétrons através desse fio. Dessa maneira, o objeto metálico não se descarregaria, permanecendo eletrizado.

3) Ainda na **figura 1.12**, se o suporte isolante que sustenta o objeto metálico fosse de vidro, esse objeto poderia se descarregar mesmo se não estivesse ligado à terra pelo fio condutor. Isso ocorre porque, geralmente, uma camada de vapor de água se forma sobre a superfície do vidro. Essa camada, sendo condutora, estabelece o contato elétrico do objeto metálico com a terra e, por isso, ele se descarrega.
De maneira geral, em regiões de clima úmido, um objeto metálico eletrizado, mesmo apoiado por isolantes, acaba se descarregando depois de certo tempo. Embora o ar atmosférico seja isolante, a presença de umidade faz com que ele se torne condutor. Assim, o objeto eletrizado perde sua carga para a terra através do ar.

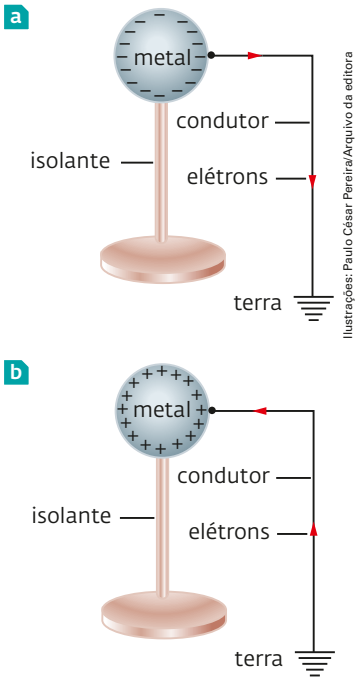


Figura 1.12. Um objeto eletrizado, ao ser ligado à terra por meio de um condutor, perde sua carga, tornando-se neutro.

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

Note que não há condutores perfeitos ou isolantes perfeitos, apenas bons condutores e maus condutores.

Além dos condutores e isolantes, existem os **semicondutores**, materiais que, dependendo do arranjo de seus átomos, podem se comportar como isolantes ou condutores. A configuração desses arranjos é obtida através de uma dopagem de materiais, e esta pode ocorrer de duas maneiras: dopagem tipo **p**, em que é inserido um material no cristal de modo que ele fique com ausência de elétrons, provocando uma lacuna (ou buraco) no cristal e permitindo que os elétrons da vizinhança migrem para ocupá-la e, dessa forma, há condução da eletricidade. E a dopagem do tipo **n**, em que um material com excesso de elétrons é inserido no cristal até que ele fique com excesso de elétrons disponíveis para se deslocar ao longo da rede cristalina e, portanto, conduzir eletricidade.

Eletrização por contato

Quando colocamos dois materiais condutores em contato, como na **figura 1.13**, um estando neutro, *A*, e outro eletrizado negativamente, *B*, o condutor neutro, após a separação dos corpos, ficará com carga de mesmo sinal do corpo carregado, ou seja, ambos estarão carregados negativamente. Caso o corpo *B* fosse carregado positivamente, quando colocado em contato com o corpo neutro *A*, os elétrons livres iriam se deslocar de *A* para *B* e ambos os corpos estariam carregados positivamente. Se *A* fosse isolante, a carga se conservaria na posição de contato.

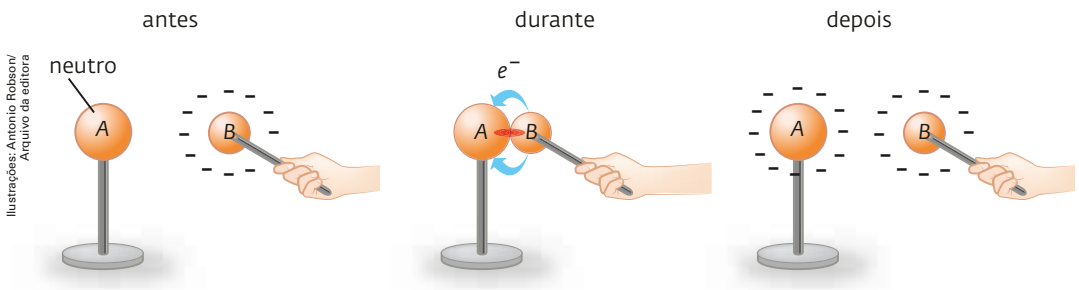


Figura 1.13. Eletrização por contato de um corpo neutro, *A*, e outro carregado negativamente, *B*.

7. a) Sim; os pneus (isolantes) impedem que o ônibus perca sua carga para a terra.
b) Porque o ônibus perde sua carga para a terra através do corpo da pessoa e isso provoca o "choque elétrico".
c) Porque nosso clima é geralmente úmido, e o ônibus não chega a adquirir carga elétrica apreciável.

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

Não escreva no livro!

6. A barra perde sua carga para a terra através do corpo da pessoa.

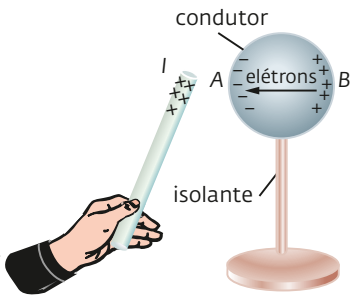
6. Sabe-se que o corpo humano é capaz de conduzir cargas elétricas. Explique, então, por que uma pessoa, segurando uma barra metálica em suas mãos, não consegue eletrizá-la por atrito.

7. Um ônibus, em movimento, adquire carga elétrica em virtude do atrito com o ar.
a) Se o clima estiver seco, o ônibus permanecerá eletrizado? Explique.
b) Ao segurar nesse ônibus para subir, uma pessoa tomará um choque. Por quê?
c) Esse fato não é comum em nosso clima. Por quê?

8. Para evitar a formação de centelhas elétricas, os caminhões transportadores de gasolina costumam andar com uma corrente metálica arrastando-se pelo chão. Explique.
Veja a resposta no Manual do Professor.

1.3 Indução e polarização

Eletrização por indução eletrostática



Ilustrações: Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura 1.14. Ao aproximarmos um objeto eletrizado de um condutor, observamos nesse condutor uma separação de cargas.

Consideremos um condutor *AB*, no estado neutro (não eletrizado), apoiado em um suporte isolante. Aproximemos do condutor, sem tocá-lo, um objeto, *I*, eletrizado positivamente **(figura 1.14)**. Os elétrons livres, existentes em grande quantidade no condutor, são atraídos pela carga positiva do objeto *I*, acumulando-se na extremidade *A*. Como consequência desse deslocamento das cargas negativas para *A*, a extremidade *B* apresentará um excesso de cargas positivas, como mostra a **figura 1.14**.

A aproximação do indutor carregado provocou, no condutor, uma separação de cargas (cargas induzidas), de forma que, se considerarmos o condutor como um todo, sua carga total seja nula. Essa separação de cargas em um condutor, induzida pela aproximação de um objeto eletrizado, é denominada **indução eletrostática**.

Suponha que, mantendo o indutor fixo em sua posição, liguemos à terra, por meio de um fio metálico, o condutor **(figura 1.15)**. Essa ligação fará com que elétrons livres passem da terra para o condutor, de maneira semelhante ao que está mostrado na **figura 1.12.b**. Esses elétrons neutralizarão a carga positiva induzida localizada na extremidade *B* do condutor **(figura 1.15)**.

Se desfizermos a ligação com a terra e, em seguida, afastarmos o indutor, a carga negativa induzida, que estava localizada na extremidade *A*, se distribuirá pela superfície do condutor, como mostra a **figura 1.16**. Observe, então, que o condutor adquire uma carga negativa, isto é, uma carga de sinal contrário ao da carga do indutor. Esse, por sua vez, não perde nem recebe carga durante o processo. Essa maneira de eletrizar um condutor é denominada **eletrização por indução**.

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

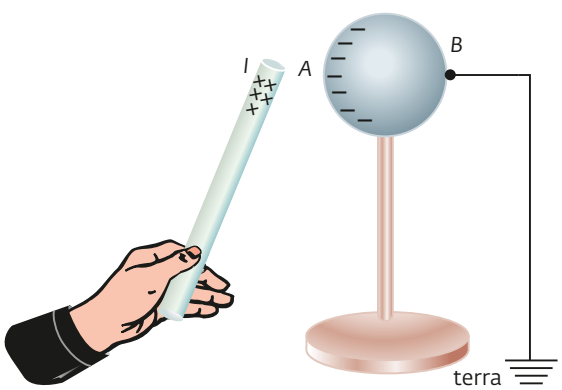


Figura 1.15. Ao ser ligado à terra, o condutor que sofreu indução fica eletrizado negativamente, porque elétrons livres da terra passam para ele, neutralizando a carga positiva repelida pelo bastão.

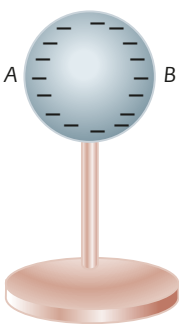
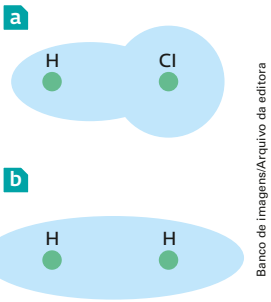


Figura 1.16. A carga negativa, induzida no condutor, distribui-se por sua superfície.

Polarização de um isolante

Como você já deve ter estudado em seu curso de Química, algumas substâncias (a água, por exemplo) apresentam moléculas denominadas **moléculas polares**. Nessas moléculas, o centro das cargas positivas não coincide com o centro das cargas negativas, havendo, portanto, um deslocamento da nuvem eletrônica, como procuramos ilustrar na **figura 1.17.a**. O conjunto de duas cargas de sinais contrários e mesmo valor absoluto também é conhecido como **dipolo elétrico**. As substâncias cujas moléculas possuem as cargas elétricas distribuídas simetricamente são denominadas **apolares (figura 1.17.b)**.

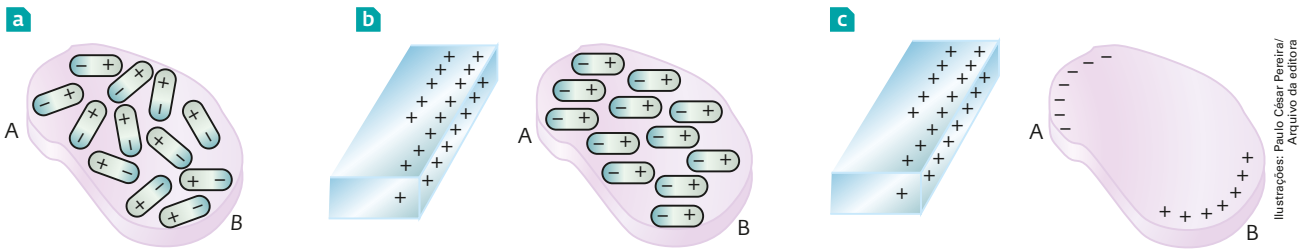
Consideremos um dielétrico *AB*, não eletrizado, cujas moléculas são polares, afastado de influências elétricas externas. Nessas condições, as moléculas dessa substância estão distribuídas ao acaso, como está representado na **figura 1.18.a**. Aproximando-se desse dielétrico um indutor eletrizado, com carga positiva, os dipolos elétricos se alinharão da maneira mostrada na **figura 1.18.b**. Quando isso ocorre, dizemos que o dielétrico está **polarizado**. Observe, na **figura 1.18.c**, que o efeito final dessa **polarização** é alinhar os dipolos elétricos sem deslocamento de elétrons. A polarização é um fenômeno que ocorre em isolantes, enquanto a indução eletrostática ocorre nos condutores.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 1.17. Representação de uma molécula polar (**a**) e de uma molécula apolar (**b**).

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



Ilustrações: Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura 1.18. A polarização no dielétrico faz com que os dipolos elétricos se alinhem (**c**).

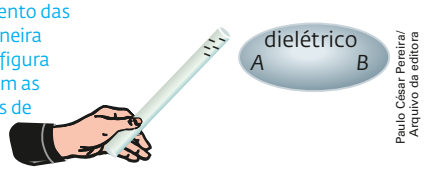
Devemos notar que, embora a carga total no dielétrico seja nula, a polarização faz aparecer cargas elétricas de sinais contrários nas extremidades *A* e *B*, de maneira semelhante ao que ocorria na indução eletrostática de um condutor.

Se o dielétrico *AB* fosse constituído por moléculas apolares, o mesmo efeito final seria observado, pois, com a aproximação do objeto eletrizado, as moléculas se tornariam polares e, consequentemente, se alinhariam da maneira mostrada na **figura 1.18.c**.

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

9. Uma barra eletrizada negativamente é colocada próxima de um dielétrico *AB* (não eletrizado), como mostra a figura abaixo.

9. b) Há alinhamento das moléculas de maneira semelhante à da figura 1.18.b, porém com as cargas orientadas de maneira inversa.



Paulo César Pereira/Arquivo da editora

a) Haverá movimento de elétrons livres no objeto *AB*? Não.

b) Descreva o que se passa com as moléculas desse dielétrico (faça um desenho no caderno ilustrando sua resposta).

c) Então, qual é o sinal da carga elétrica que aparece na extremidade *A* do isolante? E em *B*? Positiva em *A* e negativa em *B*.

d) Como se denomina esse fenômeno que ocorre no dielétrico *AB*? Polarização do dielétrico.

10. Suponha, agora, que o objeto *AB* do exercício anterior seja um metal. Considere que a extremidade *B* desse objeto seja ligada à terra por meio de um fio condutor.

a) Descreva o movimento de cargas que ocorrerá em virtude dessa ligação.

b) Desfazendo-se a ligação de *AB* com a terra e afastando-se o indutor, o objeto metálico ficará eletrizado? Qual é o sinal de sua carga? Sim; positiva.

Não escreva no livro!

10. a) Os elétrons do corpo metálico se deslocarão para a terra, através do fio condutor.

APLICAÇÕES DA FÍSICA

Pintura eletrostática a pó

Uma técnica aplicada na indústria desde a década de 1980 para colorir metais é a pintura eletrostática. Apesar de a ideia geral de seu funcionamento ser bastante simples, o principal desafio no processo de pintura é conseguir a aderência do pigmento ao material a ser pintado. Diferentemente do que ocorre com as tintas líquidas, que utilizam solventes à base de óleo ou água para fazer a aderência, a pintura eletrostática usa a propriedade de atração entre cargas elétricas opostas.

No caso das peças metálicas, após estarem limpas e secas, carrega-se eletricamente a peça a ser pintada, por exemplo, a porta de um carro ou de uma geladeira, e a seguir utiliza-se uma pistola para borrifar o pó sobre a peça **(figura 1.19)**. As partículas sólidas de tinta que saem da pistola estão carregadas com cargas de sinal oposto ao da peça. Com isso, as partículas sólidas são atraídas para o material e aderem facilmente à superfície, inclusive nos cantos muito difíceis de ser alcançados.

Posteriormente, a peça é aquecida para que as partículas de tinta, que são constituídas de diferentes tipos de materiais plásticos, derretam e permaneçam unidas à superfície do material. Com essa técnica de pintura, é possível obter camadas mais espessas sem que ocorra o aparecimento de gotas, como as que surgem quando se aplicam tintas líquidas.



Rosenfeld/Corbis/Latinstock

Figura 1.19. Porta de carro na cabina de pintura eletrostática a pó. A atração entre o pó e a peça reduz as perdas durante o processo de pintura.

QUESTÕES

1. As máquinas fotocopiadoras utilizam um sistema semelhante ao da pintura eletrostática para o desenho e a aderência do *toner* no papel. Com seus colegas, pesquise o funcionamento da tecnologia dessas máquinas e explique quais são as diferenças e semelhanças entre esses dois sistemas. Veja resposta no Manual do Professor.
2. Pesquise as vantagens que a técnica da pintura eletrostática possui em comparação com a técnica tradicional de uso de tintas líquidas. Veja resposta no Manual do Professor.

1.4 Eletroscópios

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

Por que um objeto neutro é atraído por um objeto eletrizado

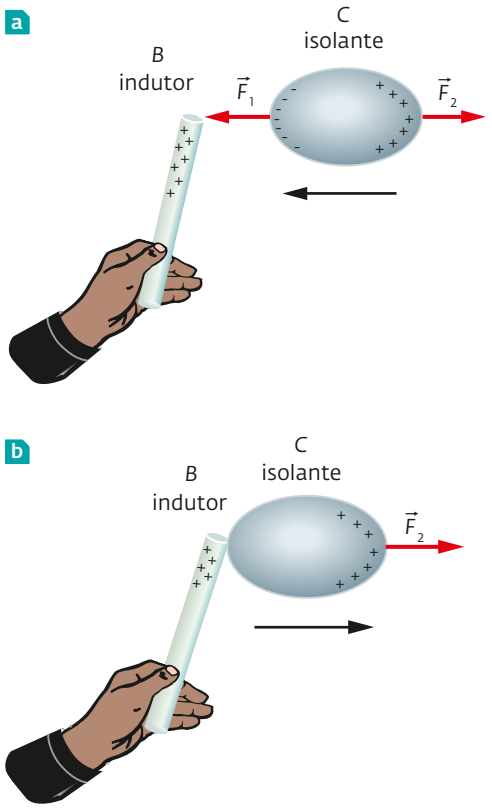
Suponha um objeto eletrizado positivamente, sendo aproximado de um objeto isolante, como um pedaço de papel, que está neutro. A presença da carga no indutor provoca polarização do isolante **(figura 1.20.a)**.

Assim, haverá entre o indutor e a extremidade negativa do isolante uma força de atração, representada por $\vec{F}_1$, e entre o indutor e a extremidade positiva do isolante, uma força de repulsão $\vec{F}_2$. Como a extremidade negativa está mais próxima do indutor, o valor de $\vec{F}_1$ é maior do que o de $\vec{F}_2$ e, consequentemente, o isolante será atraído para o indutor.

Se o isolante não for muito pesado, ele se deslocará, entrando em contato com o indutor **(figura 1.20.b)**. Quando isso ocorrer, o isolante neutralizará parte da carga positiva do isolante. Nessas condições, ambos os corpos possuirão cargas de mesmo sinal e, então, o dielétrico será repelido pelo indutor.

Uma análise semelhante nos permite concluir que, se o indutor estiver eletrizado negativamente, o isolante será, da mesma forma, atraído por ele, podendo ainda ser repelido após entrar em contato com o indutor.

Se o objeto isolante fosse substituído por um condutor (um pequeno pedaço de metal, por exemplo), os mesmos fenômenos seriam observados. Deve-se apenas salientar que a separação de cargas mostrada na **figura 1.20.a** seria, nesse caso, provocada por indução eletrostática e não por polarização.



Ilustrações: Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura 1.20. Quando um objeto eletrizado é aproximado de um pequeno objeto isolante, um pedaço de papel, por exemplo, este se polariza e é atraído pelo objeto eletrizado.

O que é um eletroscópio

O eletroscópio é um dispositivo que nos permite verificar se um objeto está eletrizado. Um tipo de eletroscópio muito simples é constituído por um pequeno objeto leve (uma bolinha de isopor, por exemplo) suspenso na extremidade de um fio. Esse eletroscópio costuma ser denominado **pêndulo elétrico**. A descrição mais antiga do pêndulo elétrico foi dada por Stephen Gray (1720).

Se aproximarmos do eletroscópio um objeto eletrizado, positiva ou negativamente, este atrairá a bolinha suspensa **(figura 1.21.b)**. O fato de a bolinha ser atraída pelo objeto nos mostra que ele está eletrizado, embora não possamos determinar qual é o sinal de sua carga elétrica.

Para que pudéssemos determinar, com esse eletroscópio, o sinal da carga de um objeto, seria necessário que a bolinha estivesse eletrizada com uma carga de sinal conhecido. Por exemplo: se a bolinha estiver eletrizada positivamente e for repelida por um certo objeto, podemos concluir que esse objeto está eletrizado também positivamente, mas, se ela for atraída, o objeto estará carregado negativamente.

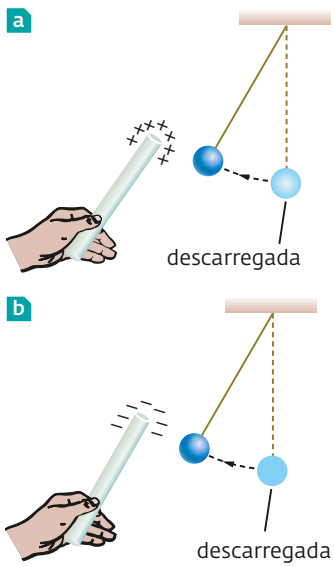


Figura 1.21. Um eletroscópio simples é constituído por uma pequena esfera leve, suspensa por um fio isolante.

Eletroscópio de folhas

Outro tipo de eletroscópio muito comum é o **eletroscópio de folhas**. Esse aparelho consiste essencialmente de uma haste metálica (condutora) tendo, em sua extremidade superior, uma esfera também metálica e, na extremidade inferior, duas folhas metálicas leves, sustentadas de modo que possam se abrir e se fechar livremente **(figura 1.22)**.



Charles D. Winters/Photoresearchers/Latinstock

Figura 1.22. Eletroscópio de folhas carregado.

O conjunto é envolvido por um recipiente de vidro, de forma que a haste não toque na superfície de vidro.

Aproximando-se da esfera do eletroscópio, sem tocá-la, um indutor eletrizado positivamente, haverá indução eletrostática na parte metálica do aparelho: os elétrons livres serão atraídos para a esfera, fazendo aparecer nas folhas um excesso de cargas positivas. A folha, estando eletrizada com cargas de mesmo sinal, se abrirá em virtude da força de repulsão entre elas.

Portanto, a abertura da folha do eletroscópio, quando aproximamos um objeto de sua esfera, indica-nos que este está eletrizado. Ao afastarmos o indutor, os elétrons da esfera serão atraídos para a folha, neutralizando a carga positiva aí existente e fazendo com que ela se feche.

Se o indutor estivesse eletrizado negativamente, observaríamos, da mesma forma, uma indução eletrostática no eletroscópio e, consequentemente, a folha também se abriria (agora, eletrizada negativamente). Então, o fato de a folha se abrir indica apenas que o indutor está eletrizado, mas não nos permite determinar o sinal da carga nele. Para que isso seja possível, é preciso que o eletroscópio esteja previamente eletrizado com uma carga de sinal conhecido, como veremos a seguir.

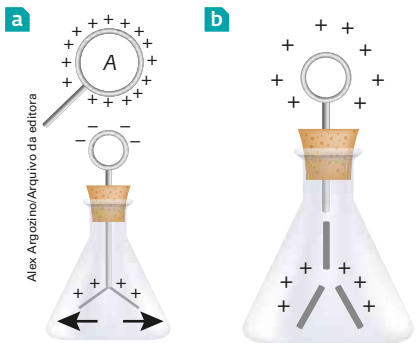
Comentários

Podemos eletrizar um eletroscópio de duas maneiras: por indução eletrostática ou por contato com um objeto eletrizado.

1) Para eletrizar o eletroscópio por indução, devemos proceder da maneira descrita na seção 1.3: um objeto eletrizado é aproximado da esfera, em seguida o eletroscópio é ligado à terra e, sendo desfeita essa ligação e afastando o objeto indutor, o eletroscópio ficará eletrizado com uma carga de sinal contrário à desse indutor.

2) A eletrização por contato é obtida encostando-se um objeto eletrizado na esfera do eletroscópio. Por exemplo: se o indutor da **figura 1.23.a** for encostado na esfera, os elétrons aí presentes serão transferidos para o indutor, neutralizando parte da carga positiva desse objeto. Como o eletroscópio perde elétrons, ele ficará eletrizado positivamente. Afastando-se o indutor, verifica-se que temos apenas a carga positiva no eletroscópio. Observe que o eletroscópio fica eletrizado com carga de sinal igual à do objeto com o qual entrou em contato e, consequentemente, suas folhas apresentam uma certa abertura **(figura 1.23.b)**.

3) Vejamos, agora, como podemos usar um eletroscópio carregado com carga de sinal conhecido para determinar qual é o sinal da carga existente em um objeto eletrizado. Suponha um eletroscópio carregado positivamente. Se, ao aproximarmos um indutor de carga desconhecida da esfera do eletroscópio, observarmos que as folhas (que estavam abertas) se aproximam, dessa forma podemos concluir que a carga do indutor é negativa. De fato, sendo negativa a carga do indutor, elétrons livres da esfera serão repelidos e se deslocarão para as folhas. Esses elétrons neutralizarão parte da carga positiva aí existente e, por isso, o afastamento entre as folhas diminuirá. Com raciocínio análogo, podemos concluir que, se o afastamento das folhas for aumentado pela aproximação do indutor, o sinal da carga nesse objeto será positivo.



Alex Argozino/Arquivo da editora

Figura 1.23. Quando um objeto eletrizado positivamente é encostado na esfera do eletroscópio, este também fica eletrizado positivamente. Representação sem escala e em cores fantasia.

11. a) Carga positiva na extremidade mais próxima de *B* e carga negativa na extremidade mais afastada.
b) A extremidade mais próxima de *B* seria atraída e a mais afastada, repelida.
c) Sim, porque a força de atração é maior do que a de repulsão.
d) A carga positiva de *C* seria neutralizada por parte da carga de *B*; então *C* seria repelido por *B*, pois ambos estariam, agora, com carga negativa.

Verifique o que aprendeu

11. Suponha que, na figura 1.20, o bastão estivesse eletrizado negativamente.
a) Faça um desenho em seu caderno mostrando as cargas que apareceriam nas extremidades do objeto *C* em virtude da aproximação do bastão eletrizado negativamente.
b) Qual extremidade de *C* seria atraída por *B*? Qual seria repelida?
c) O objeto *C* seria atraído para *B*? Por quê?
d) Descreva o que ocorreria com o objeto *C* após tocar o bastão *B*.

12. Um objeto eletrizado com carga positiva é aproximado da bolinha de um pêndulo elétrico (eletroscópio).
a) Se a bolinha for atraída pelo objeto, podemos concluir que ela está eletrizada negativamente? Não, porque ela também seria atraída se estivesse neutra.
b) Se a bolinha for repelida, podemos concluir que ela possui carga positiva? Sim.

13. Na **figura 1.23.a**, suponha que o indutor estivesse eletrizado negativamente.
a) Qual é o sinal da carga que apareceria na esfera do eletroscópio? E em suas folhas?
b) As folhas do eletroscópio se abririam? Sim.
c) Descreva a transferência de cargas que ocorreria se o indutor encostasse na esfera.
d) Afastando-se o indutor, qual seria o sinal da carga que ficaria distribuída no eletroscópio? Negativa.

14. Um eletroscópio de folhas encontra-se eletrizado negativamente. Aproximamos da esfera desse eletroscópio um indutor.
a) Se verificarmos que as folhas do eletroscópio têm sua separação aumentada, qual será o sinal da carga no indutor? Explique.
b) Se a carga do indutor fosse positiva, o que ocorreria com a separação entre as folhas do eletroscópio? Por quê?

Não escreva no livro!

13. a) Positiva na esfera e negativa nas folhas.
c) Os elétrons do indutor seriam transferidos para a esfera, neutralizando sua carga positiva.

14. a) Negativa, porque o indutor repele elétrons para as folhas.
b) Diminuiria, porque o indutor atrairia elétrons livres para a esfera, e a carga nas folhas reduziria.

1.5 Lei de Coulomb

Medida da carga elétrica



Reprodução/Arquivo da editora

CHARLES-AUGUSTIN DE COULOMB (1736-1806)

Coulomb nasceu em Angoulême, na França, e dedicou-se às pesquisas científicas, tendo inventado a balança de Coulomb, dispositivo que lhe permitiu medir as forças elétricas com precisão, levando-o a estabelecer a célebre lei que ficou conhecida como "lei de Coulomb".

Vimos que, quando um objeto está eletrizado, ele possui um excesso de prótons (carga positiva) ou um excesso de elétrons (carga negativa). Por esse motivo, o **valor da carga** de um objeto, que vamos representar por Q ou q, pode ser medido pelo número de elétrons que ele perdeu ou ganhou. Entretanto, essa maneira de expressar o valor da carga não é prática, pois se sabe que, em um processo comum de eletrização (atrito, por exemplo), o objeto perde ou ganha um número muito elevado de elétrons. Assim, os valores de Q ou q seriam expressos por números extremamente grandes.

Na prática, procura-se então usar uma unidade de carga que seja mais apropriada. No Sistema Internacional (SI), a unidade de carga elétrica é denominada **1 coulomb = 1 C**, em homenagem ao físico francês Charles A. Coulomb. Esse cientista, analisando as forças de interação entre cargas elétricas, chegou a uma importante lei, que estudaremos nesta seção.

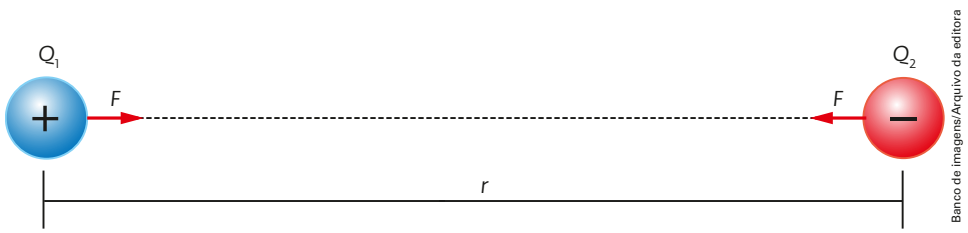
Quando dizemos que um objeto possui uma carga de 1 C, modernamente, após o estabelecimento do valor da carga fundamental, entendemos que esse objeto perdeu ou ganhou $6{,}25 \cdot 10^{18}$ elétrons, isto é:

1 C corresponde a $6{,}25 \cdot 10^{18}$ elétrons em excesso (se a carga do objeto for negativa) ou em falta (se a carga do objeto for positiva).

Na Eletrostática, geralmente lidamos com cargas elétricas muito menores do que 1 C. É costume expressar os valores das cargas dos objetos eletrizados em mC ($1\ \text{mC} = 10^{-3}\ \text{C}$) ou em μC ($1\ \mu\text{C} = 10^{-6}\ \text{C}$).

A força elétrica é proporcional às cargas

Consideremos dois objetos eletrizados com cargas Q_1 e Q_2, separados de uma distância r, como mostra a **figura 1.24**.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 1.24. Força de atração entre duas cargas puntuais, de sinais contrários, separadas pela distância r. Representação sem escala e em cores fantasia.

Vamos supor que o tamanho desses objetos eletrizados seja muito pequeno em relação à distância r entre eles. Nessas condições, consideramos as dimensões desses objetos desprezíveis e nos referimos a eles como **cargas puntuais**.

Uma carga puntual é aquela que está distribuída em um objeto cujas dimensões são desprezíveis em comparação com as demais dimensões envolvidas no problema.

No século XVIII, Coulomb realizou uma série de medidas cuidadosas das forças entre duas cargas puntuais, utilizando uma balança de torção semelhante àquela usada por Cavendish para comprovar a lei de gravitação universal. Por meio dessas medidas, Coulomb chegou a algumas conclusões, válidas tanto para forças de atração quanto para forças de repulsão, que analisaremos a seguir.

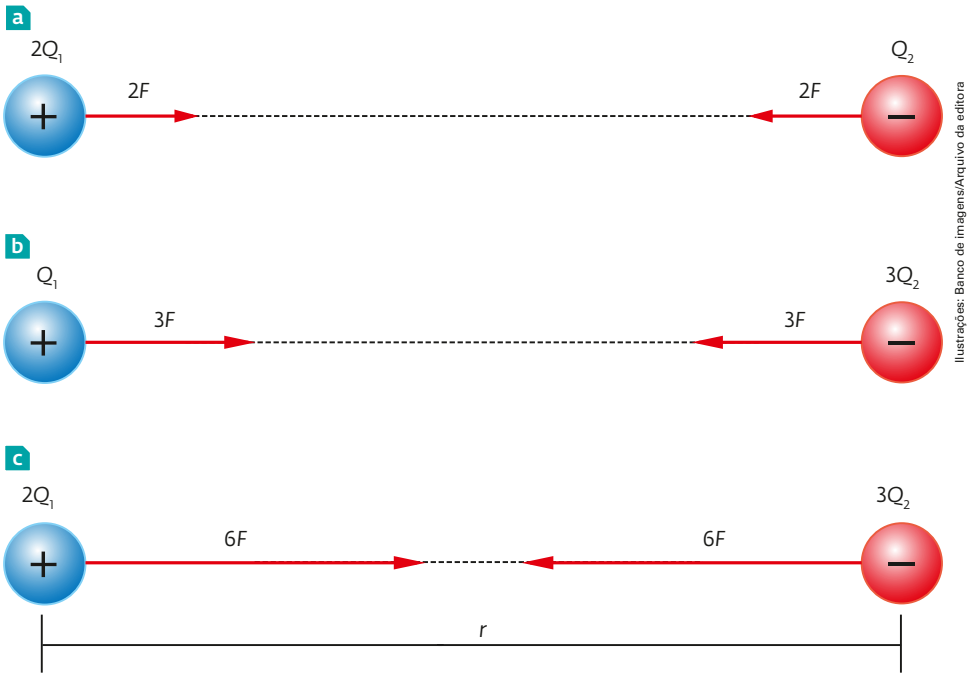


Figura 1.25. A força de interação entre duas cargas puntuais, separadas por uma distância r, é diretamente proporcional ao produto dessas cargas. Representação sem escala e em cores fantasia.

Na **figura 1.24**, designamos por F o módulo da força entre as cargas Q_1 e Q_2. Coulomb verificou que, se a carga Q_1 for duplicada (ou triplicada, quadruplicada, etc.), o valor da força entre as cargas também duplicará (ou triplicará, quadruplicará, etc.), como está mostrado na **figura 1.25.a**. Então, ele concluiu que o valor da força é proporcional à carga Q_1, isto é:

$$F \propto Q_1$$

Se o valor de Q_1 não fosse alterado e o valor de Q_2 fosse duplicado (ou triplicado, etc.), o módulo da força também duplicaria (ou triplicaria, etc.), como está representado na **figura 1.25.b**. Então, podemos escrever que também se tem:

$$F \propto Q_2$$

Logo, como $F \propto Q_1$ e $F \propto Q_2$, vem $F \propto Q_1 Q_2$, ou seja:

A força de interação entre duas cargas elétricas puntuais é proporcional ao produto dessas cargas.

Assim, supondo, por exemplo, que o valor de Q_1 fosse duplicado e o de Q_2 fosse triplicado, o valor da força entre essas cargas se tornaria 6 vezes maior **(figura 1.25.c)**.

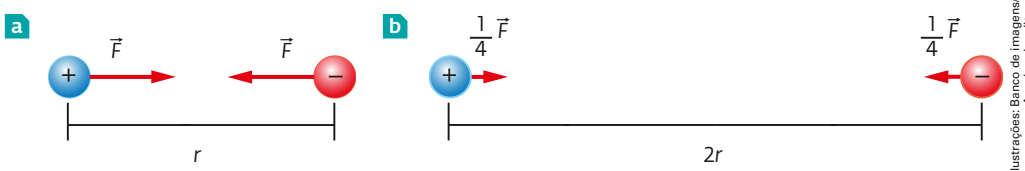
A força elétrica depende da distância entre as cargas

O fato de que a força entre objetos eletrizados diminui quando aumentamos a distância entre eles é conhecido há muitos séculos.

Entretanto, o estabelecimento da relação quantitativa entre a força F (que uma carga puntual exerce sobre outra) e r (distância entre as cargas) só veio a ser feito por Coulomb em suas experiências com a balança de torção. Ele verificou que:

- duplicando r, F torna-se 4 vezes menor;
- triplicando r, F torna-se 9 vezes menor;
- quadruplicando r, F torna-se 16 vezes menor, etc.

Assim, Coulomb observou que, quando a distância r é multiplicada por um número, a força F entre as cargas fica dividida pelo **quadrado** desse número **(figura 1.26)**.



Ilustrações: Banco de imagens/ Arquivo da editora

Figura 1.26. A lei do inverso do quadrado da distância é observada nas forças elétricas da atração e repulsão. Representação sem escala e em cores fantasia.

A força F, de atração ou repulsão entre duas cargas puntuais, é inversamente proporcional ao quadrado da distância, r, entre elas, isto é:

$$F \propto \frac{1}{r^2}$$

Lei de Coulomb

Entre a força F e as cargas Q_1 e Q_2 existe a relação:

$$F \propto Q_1 Q_2$$

e entre essa mesma força e a distância r tem-se:

$$F \propto \frac{1}{r^2}$$

podemos associar essas relações, obtendo:

$$F \propto \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

Essa relação poderá ser transformada em uma igualdade introduzindo-se nela uma constante de proporcionalidade adequada. Consideremos, inicialmente, as cargas Q_1 e Q_2 **situadas no vácuo**. Nessa situação, vamos designar por k_0 a constante de proporcionalidade a ser introduzida na relação anterior. Teremos, então, para as cargas no vácuo:

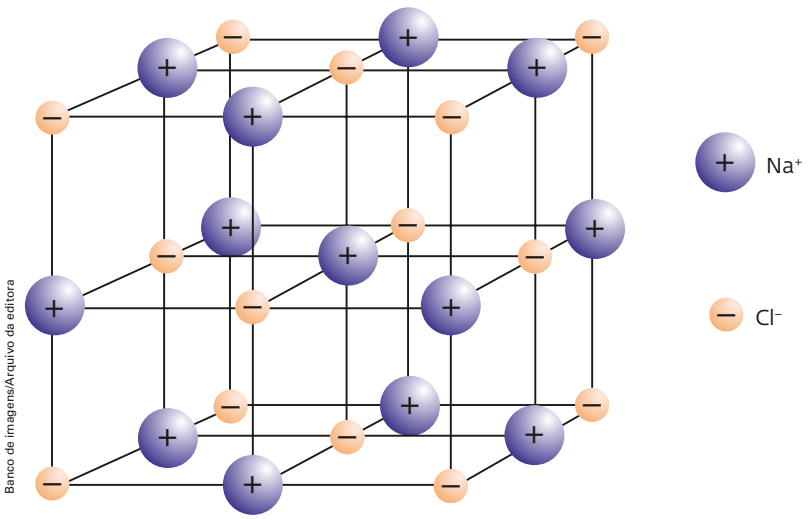
$$F = k_0 \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

Chegamos, assim, à expressão matemática da lei de Coulomb para o vácuo. O valor da constante k_0 pode ser obtido experimentalmente. No SI, em que F é medida em newtons, Q_1 e Q_2 em coulombs e r em metros, o valor de k_0 é:

$$k_0 = 9{,}0 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}$$

Influência do meio

Suponhamos, agora, que as cargas Q_1 e Q_2 fossem colocadas no interior de um meio material qualquer (água, óleo, etc.). Verifica-se, nesse caso, que a força de interação entre elas **sofre uma redução**, maior ou menor, dependendo do meio. Esse fator de redução denomina-se **constante dielétrica do meio**, representada por *k*. A **figura 1.27** ilustra a rede cristalina do cloreto de sódio; porém, quando o sal é colocado em água, a força elétrica entre os íons torna-se muito fraca (80 vezes menor) e, por isso, a rede cristalina se desfaz.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 1.27. A intensidade das forças elétricas responsáveis pela estrutura cristalina em sólidos iônicos como o cloreto de sódio (NaCl) sofre redução em presença de água. Por esse motivo, os sólidos iônicos são facilmente dissociados em água. Representação sem escala e em cores fantasia.

A **tabela 1.2** apresenta os valores da constante dielétrica, *k*, para alguns meios materiais. Observando a tabela, podemos concluir que o valor da força entre duas cargas praticamente não se altera quando elas passam do vácuo para o ar. Por outro lado, se elas forem mergulhadas em óleo, por exemplo, a força torna-se 4,6 vezes menor. Deve-se destacar o elevado valor da constante dielétrica da água: se mergulharmos Q_1 e Q_2 nesse líquido, a força de interação entre elas enfraquece acentuadamente, tornando-se 81 vezes menor do que no vácuo.

Em resumo, podemos então apresentar a lei de Coulomb do seguinte modo:

Tabela 1.2

VALORES DE *K* PARA ALGUNS MEIOS MATERIAIS

Meio material	Constante dielétrica (*k*)
Vácuo	1,0000
Ar	1,0005
Benzeno	2,3
Âmbar	2,7
Vidro	4,5
Óleo	4,6
Mica	5,4
Glicerina	43
Água	81

Lei de Coulomb

Duas cargas puntuais, Q_1 e Q_2, separadas por uma distância *r*, situadas no vácuo, se atraem ou se repelem com uma força *F* dada por:

$$F = k_0 \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}$$ **, em que k_0, no SI, tem o valor:**

$$k_0 = 9{,}0 \cdot 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2}$$

Se essas cargas forem mergulhadas em um meio material, o valor das forças entre elas será *k* vezes menor, em que *k* é a constante dielétrica desse meio.

Exemplo

Uma carga puntual positiva, $Q_1 = 0{,}23\ \mu C$, é colocada a uma distância $r = 3{,}0$ cm de outra carga também puntual, negativa, $Q_2 = -0{,}60\ \mu C$ (figura 1.28).

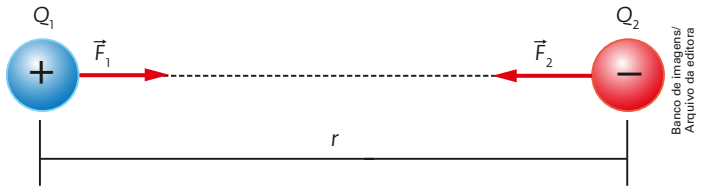


Figura 1.28. Para o exemplo da seção 1.5. Representação sem escala e em cores fantasia.

a) Supondo que as cargas Q_1 e Q_2 estejam no ar, calcule o valor da força F_1 que Q_2 exerce sobre Q_1.

Como a força entre duas cargas elétricas situadas no vácuo ou no ar é praticamente a mesma, o valor de $\vec{F}_1$ será dado por:

$$F_1 = k_0 \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}$$

em que se tem, no SI:

$$k_0 = 9{,}0 \cdot 10^9 \ \frac{N \cdot m^2}{C^2}$$

$$Q_1 = 0{,}23\ \mu C = 2{,}3 \cdot 10^{-7}\ C$$

$$Q_2 = -0{,}60\ \mu C = -6{,}0 \cdot 10^{-7}\ C$$

$$r = 3{,}0\ cm = 3{,}0 \cdot 10^{-2}\ m$$

Substituindo esses valores na expressão da lei de Coulomb, obteremos o valor de F_1 (não é necessário levar em conta o sinal das cargas, pois, desejamos calcular apenas o seu módulo).

Teremos, então:

$$F_1 = 9{,}0 \cdot 10^9 \cdot \frac{(2{,}3 \cdot 10^{-7} \cdot 6{,}0 \cdot 10^{-7})}{(3{,}0 \cdot 10^{-2})^2}$$

$$\therefore\ F_1 = 1{,}38\ N$$

b) O valor da força $\vec{F}_2$ que a carga Q_1 exerce sobre a carga Q_2 é maior, menor ou igual ao valor de $\vec{F}_2$?

Pela terceira lei de Newton sabemos que, se a carga Q_2 atrai a carga Q_1, essa carga Q_1 atrairá a carga Q_2 com uma força igual e contrária. Em outras palavras, as forças $\vec{F}_1$ e $\vec{F}_2$ mostradas na **figura 1.28** constituem um par de ação e reação e, portanto, seus módulos são iguais, isto é:

$$F_2 = 1{,}38\ N$$

c) Se as cargas Q_1 e Q_2 estivessem mergulhadas em benzeno, qual seria o módulo da força de atração entre elas?

O módulo da força de atração tornar-se-ia k vezes menor, sendo k a constante dielétrica do benzeno.

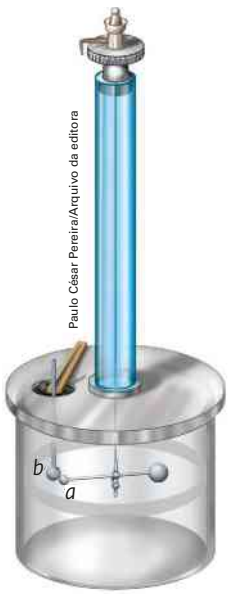
Pela **tabela 1.2** vemos que, nesse caso, temos $k = 2{,}3$. Então, no interior do benzeno, as cargas Q_1 e Q_2 se atrairiam com uma força $\vec{F}$ cujo módulo seria:

$$F = \frac{1{,}38}{2{,}3}$$

$$\therefore\quad F = 0{,}60\ N$$

FÍSICA NO CONTEXTO

As experiências de Coulomb com a balança de torção



Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura 1.29. Reprodução do desenho da balança de torção de Coulomb, feito pelo seu inventor.

Até a época dos trabalhos de Franklin e Du Fay (meados do século XVIII), apenas os aspectos qualitativos dos fenômenos elétricos tinham sido abordados. Os cientistas sentiam que, para o progresso dos estudos relacionados com a Eletricidade, era necessário estabelecer relações **quantitativas** entre as grandezas envolvidas nos fenômenos.

Em particular, houve uma preocupação em relacionar quantitativamente a força elétrica, F, entre dois objetos com a distância, r, entre eles. Joseph Priestley, percebendo que havia certa semelhança entre a atração elétrica e a gravitacional (cujo estudo já havia sido desenvolvido por Newton), no final do século XVIII lançou a hipótese de que a força elétrica poderia, também, variar com o inverso do quadrado da distância entre os objetos, isto é, $F \propto \frac{1}{r^2}$. Entretanto, era necessário que fossem realizadas medidas cuidadosas para verificar se essa hipótese era verdadeira.

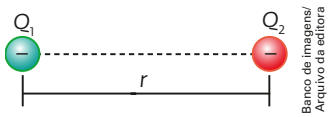
Entre os diversos trabalhos que foram desenvolvidos pelos cientistas com esse objetivo, destacam-se as experiências realizadas por Coulomb, que, em 1785, apresentou à Academia de Ciências da França um relatório de seus trabalhos. Coulomb construiu um aparelho, denominado **balança de torção**, com o qual se podia medir diretamente as forças de atração e repulsão entre objetos eletrizados. A **figura 1.29** representa uma cópia do desenho dessa balança, feito pelo próprio Coulomb no relatório enviado à Academia de Ciências. Observe, no desenho, que duas esferas estão equilibradas nas extremidades de uma haste horizontal, suspensa por um fio. A esfera a está eletrizada e a esfera b, também eletrizada, é aproximada de a. Em virtude da força elétrica que se manifesta entre a e b, a haste gira, provocando uma torção no fio. Medindo o ângulo de torção do fio, Coulomb conseguia determinar o valor da força entre as esferas.

Coulomb demonstrou que a força de atração (ou repulsão) entre dois objetos eletricamente carregados obedece a uma lei do inverso do quadrado da distância. Do ponto de vista matemático, era a mesma lei demonstrada por Newton para a gravidade.

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

Não escreva no livro!

15. Duas cargas puntuais negativas, cujos módulos são $Q_1 = 4{,}3\ \mu C$ e $Q_2 = 2{,}0\ \mu C$, estão situadas no ar, separadas por uma distância $r = 30$ cm.



Banco de imagens/Arquivo da editora

a) Desenhe, em uma cópia da figura no caderno, a força que Q_1 exerce sobre Q_2. Qual é o valor dessa força? Para a direita e igual a 0,86 N.

b) Desenhe, no caderno, a força que Q_2 exerce sobre Q_1. Qual é o valor dessa força? Para a esquerda e igual a 0,86 N.

16. Suponha que, no exercício anterior, o valor da carga Q_1 tenha se tornado 10 vezes maior, que o valor de Q_2 tenha sido reduzido à metade e que a distância entre elas tenha se mantido constante.

a) Por qual fator ficará multiplicado o valor da força entre as cargas? Multiplicado por 5.

b) Qual será o novo valor dessa força? 4,3 N.

17. Considere, ainda, o exercício 15 e suponha que os valores de Q_1 e Q_2 tenham, agora, se mantido constantes.

a) Se a distância entre essas cargas se tornar 5 vezes maior, a força entre elas aumentará ou diminuirá? Quantas vezes? Ficará 25 vezes menor.

b) Se a distância entre essas cargas for reduzida à metade, a força entre elas aumentará ou diminuirá? Quantas vezes? Ficará 4 vezes maior.

18. Suponha, agora, que as cargas elétricas do exercício 15 tenham sido mergulhadas em glicerina, conservando os valores de Q_1, Q_2 e r mencionados naquele exercício.

a) Nesse caso, o valor da força entre as cargas aumentará ou diminuirá? Quantas vezes? (Consulte a **tabela 1.2**.) Ficará 43 vezes menor.

b) Qual será o valor da força entre Q_1 e Q_2 quando mergulhadas na glicerina? $2 \cdot 10^{-2}$ N

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

INTEGRANDO A FORÇA ELÉTRICA E A MATÉRIA

A força de natureza elétrica mantém unidas as partículas do nosso corpo e dos objetos que nos rodeiam **(figura 1.30)**. É essa força que não deixa os objetos se desmancharem, ou seja, se desfazerem. Ela é a "cola" invisível de toda a matéria. Neste *Integrando* mostraremos alguns exemplos de como isso ocorre. Ao final do texto, veremos também casos em que a repulsão da força elétrica faz justamente o oposto, ou seja, mantém a matéria separada.

Tânia Ricci/Arquivo da editora



Figura 1.30. Os objetos que conhecemos têm suas partículas ligadas pela força elétrica. As imagens estão representadas fora de proporção.

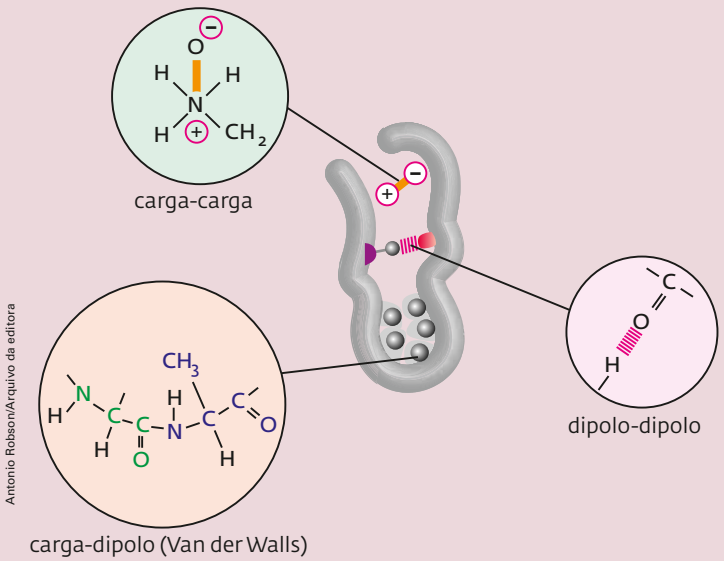
A força de natureza elétrica está presente:

- **na formação dos átomos**
  De acordo com o modelo atômico atual, a força de atração que mantém os elétrons (carga elétrica negativa) "presos" ao redor do núcleo (carga elétrica positiva) é de natureza elétrica, ou seja, é essa força que possibilita a existência de qualquer átomo.
- **na formação das moléculas**
  A ligação covalente é a ligação que ocorre entre os átomos para formar uma molécula. Sua existência se deve, em grande parte, à interação de natureza elétrica entre os átomos ligados por ela. É esse tipo de ligação que forma as moléculas de água, da maioria dos gases e de muitas moléculas orgânicas.
- **na geometria da molécula de água**
  Na molécula de água, os átomos H e O não estão alinhados, ou seja, a molécula de água não é linear, e sim angular. Essa conformação também é causada por forças de natureza elétrica.
- **na união das moléculas de água**
  A interação entre as moléculas de água também se dá por forças de natureza elétrica, que nesse caso são conhecidas por ligação de hidrogênio. As ligações de hidrogênio, bem como a conformação angular de sua molécula, conferem à água algumas de suas principais propriedades, tais como seu comportamento anômalo e sua tensão superficial elevada. A título de curiosidade, seu comportamento anômalo não existiria caso a força de natureza elétrica que dá origem às ligações de hidrogênio fosse apenas 2% mais fraca do que é.
- **na formação dos metais**
  A força de natureza elétrica também mantém unidos os átomos de um metal por meio da chamada *ligação metálica*. São essas ligações de natureza elétrica que mantêm um "mar" de elétrons livres (carga negativa), "circundando" um cristal de cátions metálicos (carga positiva).
- **na formação dos sais**
  Também é a força de natureza elétrica que mantém unidos os íons positivos e os íons negativos, formando uma ligação iônica. É esse tipo de ligação que forma os compostos iônicos, como, por exemplo, o sal de cozinha. Também os metais e não metais se ligam por meio de combinação de íons. Como exemplo, podemos citar o fluoreto de lítio (LiF), em que o metal Li perde um elétron e forma um cátion (íon) ao se juntar com o não metal flúor (F). O LiF é utilizado em vidros, cerâmica vitrificada, vernizes e esmaltes, e é matéria-prima para fabricação de lentes ópticas e prismas.
- **na união das partículas**
  As forças que mantêm os elétrons nos átomos, bem como as que mantêm os átomos nas moléculas, nos metais e nos compostos iônicos, são de origem elétrica. Uma vez que tudo ao nosso redor, como uma cadeira, o sal que usamos para temperar nossos alimentos, os fios que usamos para ligar nossos computadores, etc., é composto por átomos, podemos dizer que é a força elétrica que mantém nosso mundo "unido" como o conhecemos.
  A força elétrica só não é a força principal quando pensamos em termos subatômicos (por exemplo, a força que mantém os prótons e os nêutrons no núcleo atômico não é de origem elétrica) ou na escala galáctica, como na união de partículas para formar os planetas, as estrelas e outros corpos celestes. Apenas nesses dois casos extremos é que outras forças desempenham um papel mais importante do que a força elétrica.
- **nas forças que mantêm separados os corpos**
  Também é a interação de natureza elétrica, nesse caso de repulsão, que dá origem à força normal de contato. Por exemplo, quando um livro está apoiado em uma mesa, em nível atômico, é a repulsão de origem elétrica entre os átomos da superfície da mesa e da superfície do livro que dá origem à força que, em nível macroscópico, é chamada de *força normal de contato*.

É esse tipo de força que impede que os objetos se interpenetrem, ou seja, esse é um caso em que a força elétrica mantém os corpos separados.

- **na formação das proteínas**

  Uma proteína é formada por longas cadeias de aminoácidos (cadeia peptídica). As forças que provocam a torção de uma proteína, ou seja, as forças que determinam a estrutura, são causadas, em parte, pelas interações eletrostáticas que ocorrem entre cargas positivas e negativas nos aminoácidos da proteína. Há três tipos principais de forças eletrostáticas que atuam em proteínas: interação entre grupos iônicos de carga oposta; interação de grupos de proteínas ionizados com o dipolo da água e interação entre associações de aminoácidos não covalentes com moléculas neutras (força de Van der Waals) **(figura 1.31)**.



Antonio Robson/Arquivo da editora

Figura 1.31. Exemplos de interações eletrostáticas em proteínas. Representação sem escala e em cores fantasia.

Pesquise e responda

1. Faça uma pesquisa na internet para descobrir:
- a massa do elétron; Elétron: $9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg.
- a massa do próton; Próton: $1{,}7 \cdot 10^{-37}$ kg.
- o raio do átomo de hidrogênio. Hidrogênio: $5{,}3 \cdot 10^{-11}$ m.

2. Calcule a força de atração elétrica entre o próton e o elétron no átomo de hidrogênio.

$\left(\text{Use } k_0 = 9{,}0 \cdot 10^9 \dfrac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}^2} \text{ e } q = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\,\text{C}.\right)$ $8{,}2 \cdot 10^{-8}$ N.

3. Calcule a força de atração gravitacional na situação anterior. $\left(\text{Use } G = 6{,}7 \cdot 10^{-11} \dfrac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}^2}.\right)$
$3{,}7 \cdot 10^{-47}$ N

4. Compare as ordens de grandeza dos resultados encontrados nos exercícios 2 e 3 e decida qual deles tem real importância para manter unidos o próton e o elétron no átomo de hidrogênio.
Ordem de grandeza da força elétrica = 10^{-7}; ordem de grandeza da força gravitacional = 10^{-47}. Portanto, a força elétrica é aproximadamente 10^{40} vezes maior do que a força gravitacional.

5. Supondo que as células vermelhas do sangue (hemácias) sejam cargas puntuais, determine a força elétrica entre duas células, sabendo que ambas se repelem mutuamente devido à carga negativa ($2{,}5 \cdot 10^{-2}$ C) presente em sua superfície. Adote a distância entre duas células como sendo $20 \cdot 10^{-6}$ m.
$F = 1{,}4 \cdot 10^{-4}$.

Veja no próximo *Integrando...*

A relação entre o gerador de força eletromotriz e a pilha de Daniell.

PRATIQUE FÍSICA

EM EQUIPE

Não escreva no livro!

Observação

Antes de iniciar as experiências seguintes, você deve verificar se os objetos que vão ser utilizados estão bem limpos e secos. Essa é uma condição necessária para que eles se eletrizem e conservem sua carga. Se você perceber que isso não está ocorrendo, procure limpar e secar os objetos colocando-os próximos de um dispositivo aquecido (**tenha cuidado!**), como um forno ou uma lâmpada acesa. Além disso, em dias úmidos, para que as experiências possam dar bons resultados, elas devem ser realizadas no interior de uma caixa em que o grau de umidade seja bastante reduzido. Pode-se conseguir esse ambiente, próprio para experiências de Eletrostática, mantendo-se uma lâmpada ou um secador ligado durante algum tempo no interior da caixa.

1. Pegue um pente de plástico e passe-o algumas vezes em seus cabelos (que devem estar limpos e secos). Ele se eletrizará.

1º) Aproxime o pente de objetos leves, como pequenos pedaços de papel ou de isopor.

2º) Deixe escorrer um filete de água de uma torneira e aproxime dela o pente eletrizado.

Observe e descreva o que acontece em ambos os casos. Tente explicar o que acontece com os pedaços leves de papel e com a água. E se utilizássemos pedaços mais pesados de papel, aconteceria a mesma coisa? Por quê?

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

2. Usando papel-alumínio faça uma pequena esfera e prenda-a na extremidade de um fio de linha de costura. Suspendendo a outra extremidade desse fio em um suporte isolante (no alto do batente de madeira de uma porta ou, melhor ainda, em uma placa de isopor), você obtém um eletroscópio simples denominado **pêndulo elétrico**. Eletrizando um pente, da maneira descrita na experiência anterior, aproxime-o da bolinha do eletroscópio. Observe que a bolinha é, inicialmente, atraída pelo pente. Entretanto, após encostar nele, ela é repelida.

Responda às seguintes questões:

a) A bolinha estava inicialmente eletrizada? Então, por que ela é atraída pelo pente?

b) Por que, após encostar no pente, a bolinha é repelida por ele?

3. Procure obter um pedaço de plástico leve, desses usados na fabricação de saquinhos para embalagem de roupas ou alimentos. Corte duas tiras desse plástico, cada uma com cerca de 5 cm de largura e 25 cm de comprimento.



Ilustrações: Paulo César Pereira/Arquivo da editora

1º) Atrite essas tiras com um pedaço de lã ou com as próprias mãos. Suspenda as tiras da maneira mostrada na figura desta experiência e observe que elas se repelem. Explique por quê.

2º) Introduza, entre as tiras, um pente atritado nos cabelos. Observe o que ocorre e explique.

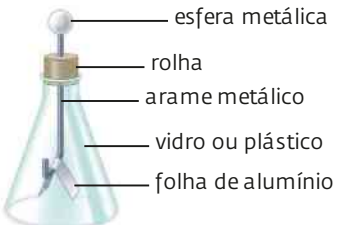
3º) Introduza, agora, entre as tiras, um objeto qualquer (não eletrizado, como uma folha de papel, por exemplo). Explique o que você observa, lembrando-se de que o objeto introduzido entre as tiras sofre indução (ou polarização). Retire o objeto e veja o que acontece com as tiras. Explique.

4. Em diversas situações, principalmente quando o ambiente está bem seco, é possível observar roupas (de náilon ou de outros tecidos sintéticos) se eletrizarem no contato com determinado objeto ou em função do atrito com o ar. Esse fenômeno é mais frequente em cidades afastadas do mar, durante o inverno ou em ambientes climatizados.

Em um quarto escuro, procure escutar os pequenos estalos e observar as pequenas centelhas que ocorrem quando tiramos a roupa feita com esses tecidos (esses estalos e centelhas ocorrem quando a carga elétrica do tecido salta da roupa para nosso corpo).

5. Orientando-se pela descrição feita na seção 1.4 e pela figura abaixo, procure construir um **eletroscópio de folhas**. Não se esqueça de limpar e secar bem todas as peças que constituem o aparelho.

Usando o eletroscópio que você construiu, faça as experiências descritas na seção 1.4.



PROBLEMAS E TESTES

Não escreva no livro!

1. Sejam $\vec{F}_1$ e $\vec{F}_2$ as forças de atração ou repulsão entre duas cargas elétricas.

É correto afirmar que os sentidos das forças $\vec{F}_1$ e $\vec{F}_2$: e

a) serão opostos somente quando as cargas tiverem sinais opostos.

b) serão iguais somente quando as cargas tiverem sinais iguais.

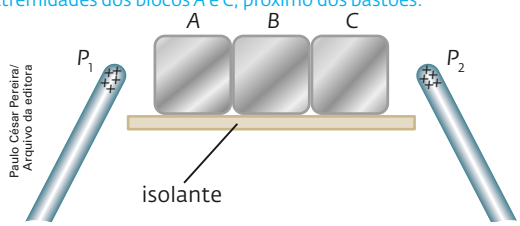
c) serão opostos somente quando as cargas tiverem sinais iguais.

d) serão iguais somente quando as cargas tiverem sinais opostos.

e) serão sempre opostos, quaisquer que sejam os sinais das cargas.

2. Considere quatro objetos eletrizados, *A*, *B*, *C* e *D*. Verifica-se que *A* repele *B* e atrai *C*. Por sua vez, *C* repele *D*. Sabendo-se que *D* está eletrizado positivamente, qual é o sinal da carga de *B*? Negativo.

3. Três blocos metálicos, *A*, *B* e *C*, encontram-se em contato, apoiados sobre uma mesa de material isolante. Dois bastões, P_1 e P_2, eletrizados positivamente, são colocados próximos às extremidades dos blocos *A* e *C*, como mostra a figura abaixo. **3. a)** Elétrons livres se deslocam para as extremidades dos blocos *A* e *C*, próximo dos bastões.



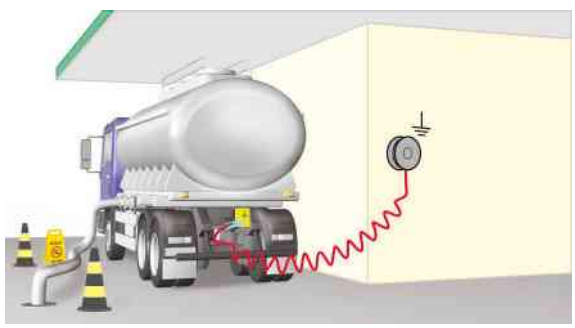
Paulo César Pereira/ Arquivo da editora

Uma pessoa (usando luvas isolantes) separa os blocos entre si e, em seguida, afasta os bastões eletrizados.

a) Descreva o movimento de elétrons livres nos blocos, causado pela aproximação dos bastões P_1 e P_2.

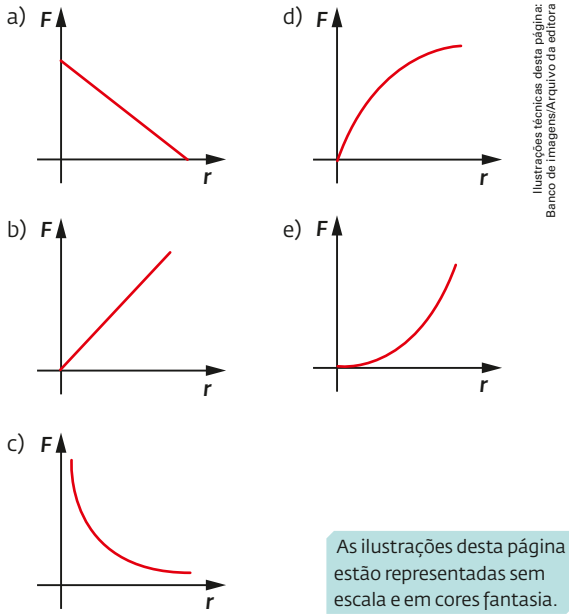
b) Diga qual é o sinal da carga de cada bloco após serem separados. *A* negativo, *B* positivo e *C* negativo.

4. Para evitar a formação de centelhas elétricas, os caminhões-tanque que transportam gasolina para os postos de combustível, antes de descarregar o combustível devem instalar cones e placas de sinalização (Perigo! Não fume! Afaste-se!) e ligar o cabo terra ao ponto de aterramento indicado do posto; em seguida, ligar a outra extremidade à placa de aterramento do caminhão, conforme figura abaixo. Explique por que esse procedimento deve ser realizado.


Antonio Robson/Arquivo da editora

4. Em virtude do atrito com o ar e da gasolina com as paredes do tanque, o caminhão pode adquirir uma carga elétrica durante o percurso até o posto. Essa carga, atingindo certo valor, poderia dar origem a uma centelha elétrica, o que teria consequências desastrosas.

5. Seja *F* o módulo da força entre duas cargas puntuais, separadas de uma distância *r*. Entre os gráficos mostrados na figura deste problema, indique aquele que melhor representa a relação entre *F* e *r*. c



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

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

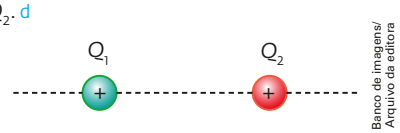
6. Duas cargas elétricas puntuais estão separadas por uma distância de $4{,}0 \cdot 10^{-2}$ m e se repelem com uma força de $27 \cdot 10^{-4}$ N. Suponha que a distância entre elas tenha sido aumentada para $12 \cdot 10^{-2}$ m.

a) Quantas vezes tornou-se maior a distância entre as cargas? 3 vezes maior.

b) A força entre as cargas aumentou ou diminuiu? Quantas vezes? Diminuiu 9 vezes.

c) Então, qual é o novo valor da força de repulsão entre as cargas? $3{,}0 \cdot 10^{-4}$ N

7. A figura deste problema mostra duas cargas puntuais, Q_1 e Q_2, ambas positivas e tais que o módulo de Q_1 é maior do que o de Q_2. d



Banco de imagens/ Arquivo da editora

Deseja-se colocar uma carga *q*, também puntual, na reta que passa por Q_1 e Q_2, de tal modo que ela fique em equilíbrio. Para isso, a carga *q* deve ser colocada:

a) à esquerda de Q_1.

b) no ponto médio entre Q_1 e Q_2.

c) entre Q_1 e Q_2 e mais próxima de Q_1.

d) entre Q_1 e Q_2 e mais próxima de Q_2.

e) à direita de Q_2.

8. (**UFSC**) A eletricidade estática gerada por atrito é fenômeno comum no cotidiano. Pode ser observada ao pentearmos o cabelo em um dia seco, ao retirarmos um casaco de lã ou até mesmo ao caminharmos sobre um tapete. Ela ocorre porque o atrito entre materiais gera

desequilíbrio entre o número de prótons e elétrons de cada material, tornando-os carregados positivamente ou negativamente. Uma maneira de identificar qual tipo de carga um material adquire quando atritado com outro é consultando uma lista elaborada experimentalmente, chamada série triboelétrica, como a mostrada abaixo. A lista está ordenada de tal forma que qualquer material adquire carga positiva quando atritado com os materiais que o seguem.

	Materiais
1	Pele humana seca
2	Couro
3	Pele de coelho
4	Vidro
5	Cabelo humano
6	Náilon
7	Chumbo
8	Pele de gato
9	Seda
10	Papel
11	Madeira
12	Latão
13	Poliéster
14	Isopor
15	Filme de PVC
16	Poliuretano
17	Polietileno
18	Teflon

Com base na lista triboelétrica, assinale a soma da(s) proposição(ões) CORRETA(S). 02 + 04 + 08 = 14

01) A pele de coelho atritada com teflon ficará carregada positivamente, pois receberá prótons do teflon.

02) Uma vez eletrizados por atrito, vidro e seda, quando aproximados, irão se atrair.

04) Em processo de eletrização por atrito entre vidro e papel, o vidro adquire carga de +5 unidades de carga, então o papel adquire carga de − 5 unidades de carga.

08) Atritar couro e teflon irá produzir mais eletricidade estática do que atritar couro e pele de coelho.

16) Dois bastões de vidro aproximados depois de atritados com pele de gato irão se atrair.

32) Um bastão de madeira atritado com outro bastão de madeira ficará eletrizado.

9. (**IFCE**) Três esferas metálicas idênticas, *A*, *B* e *C*, se encontram isoladas e bem afastadas umas das outras. A esfera *A* possui carga *Q* e as outras estão neutras. Faz-se a esfera *A* tocar primeiro a esfera *B* e depois a esfera *C*. Em seguida, faz-se a esfera *B* tocar a esfera *C*. No final desse procedimento, as cargas das esferas *A*, *B* e *C* serão, respectivamente, e

a) $\frac{Q}{2}, \frac{Q}{2}$ e $\frac{Q}{8}$.

b) $\frac{Q}{4}, \frac{Q}{8}$ e $\frac{Q}{8}$.

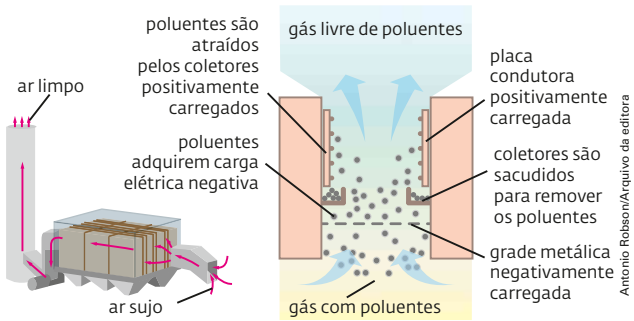
c) $\frac{Q}{2}, \frac{3Q}{8}$ e $\frac{3Q}{8}$.

d) $\frac{Q}{2}, \frac{3Q}{8}$ e $\frac{Q}{8}$.

e) $\frac{Q}{4}, \frac{3Q}{8}$ e $\frac{3Q}{8}$.

10. (**UFRGS-RS**) Um dos grandes problemas ambientais decorrentes do aumento da produção industrial mundial é o aumento da poluição atmosférica. A fumaça, resultante da queima de combustíveis fósseis como carvão ou óleo, carrega partículas sólidas quase microscópicas contendo, por exemplo, carbono, grande causador de dificuldades respiratórias. Faz-se então necessária a remoção destas partículas da fumaça, antes de ela chegar à atmosfera.

Um dispositivo idealizado para esse fim está esquematizado na figura abaixo. a



Antonio Robson/Arquivo da editora

Representação sem escala e em cores fantasia.

A fumaça poluída, ao passar pela grade metálica negativamente carregada, é ionizada e posteriormente atraída pelas placas coletoras positivamente carregadas. O ar emergente fica até 99% livre de poluentes. A filtragem do ar idealizada neste dispositivo é um processo fundamentalmente baseado na

a) eletricidade estática.

b) conservação da carga elétrica.

c) conservação da energia.

d) força eletromotriz.

e) conservação da massa.

11. (**UFRGS-RS**) Um aluno recebe um bastão de vidro e um pedaço de seda para realizar uma demonstração de eletrização por atrito. Após esfregar a seda no bastão, o aluno constata que a parte atritada do bastão ficou carregada positivamente. b

Nesse caso, durante o processo de atrito, cargas elétricas:

a) positivas foram transferidas da seda para o bastão.

b) negativas foram transferidas do bastão para a seda.

c) negativas foram repelidas para a outra extremidade do bastão.

d) negativas foram destruídas no bastão pelo calor gerado pelo atrito.

e) positivas foram criadas no bastão pelo calor gerado pelo atrito.

12. (**OBF**) Duas esferas condutoras de raios $R_1 \neq R_2$ estão carregadas com cargas Q_1 e Q_2, respectivamente. Ao conectá-las por um fio condutor fino, é correto afirmar que: d

a) suas cargas serão iguais.

b) a esfera de menor raio terá maior carga.

c) as cargas nas esferas serão proporcionais ao inverso de seus raios.

d) a diferença de potencial entre as esferas será nula.

e) o potencial é maior na esfera de raio menor.



Reinhard Dirscherl/Alamy/Latinstock

Os tubarões e as arraias, por meio da ampola de Lorenzini, podem localizar presas a curta distância a partir dos campos elétricos extremamente sutis que são emitidos pelas presas. Fotografia feita no oceano Pacífico.

CAPÍTULO 2

Campo elétrico

P Por meio da ampola de Lorenzini, localizada na região da cabeça.

P Carga elétrica.

P Especialistas destacam que a construção do porto de Suape, ao sul de Recife, causou impactos ambientais no local, assim como a recente descoberta do despejo irregular de lixo e de restos animais de um matadouro clandestino na região.

Além dos cinco sentidos que possuímos – visão, olfato, paladar, tato e audição –, alguns animais aquáticos, como os tubarões e as arraias, possuem um sexto sentido que detecta o campo elétrico.

Os tubarões possuem canais isolantes preenchidos com um tipo de gel que conectam poros da pele com estruturas chamadas de ampolas de Lorenzini. Quando há campo elétrico próximo ao tubarão, como o produzido por células de animais em água salgada, esse gel conduz eletricidade até as células nervosas, que enviam ao cérebro do tubarão informações sobre a presença do campo elétrico.

Apesar de serem descritas pelo anatomista Lorenzini no século XVII, apenas nos anos 1980 é que se descobriu que essas estruturas permitem ao tubarão sentir campos elétricos.

Esses receptores eletrossensíveis auxiliam os tubarões durante a atividade de caça, principalmente quando as condições de água dificultam o uso dos outros cinco sentidos, e até permitem ao tubarão encontrar presas enterradas na areia.

PARA INICIAR A CONVERSA

Como um tubarão consegue encontrar um animal que esteja coberto de areia?

Sobre qualquer objeto situado em um ponto da Terra atuará uma força de atração devido ao campo gravitacional. Assim como a massa se relaciona ao campo gravitacional, qual grandeza se relaciona ao campo elétrico?

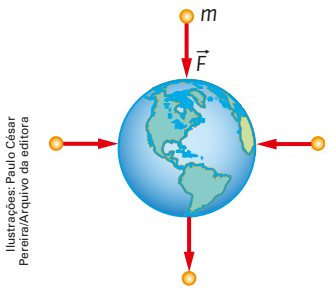
Pesquise as possíveis causas do elevado número de ataques de tubarão em praias de Pernambuco.

2.1 O conceito de campo elétrico

O que se entende por campo elétrico

O conceito de campo elétrico, apesar de abstrato, é um dos conceitos físicos de maior importância no cotidiano. Podemos entender a ideia de campo elétrico fazendo uma analogia com o campo gravitacional criado pela Terra em torno de si. Quando um corpo é colocado nas proximidades da Terra, o campo gravitacional agirá sobre ele dando origem à força gravitacional, ou peso. Assim, o peso dos objetos que estão na superfície da Terra é devido à ação do campo gravitacional terrestre **(figura 2.1)**. Quando temos cargas elétricas individuais ou um sistema de cargas elétricas em determinado ponto do espaço, estabelece-se ao redor dessas cargas um campo elétrico que preencherá todo o espaço ao seu redor. O mesmo ocorre quando ligamos um fio elétrico na tomada e todo o interior do fio é preenchido por um campo elétrico.

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



Ilustrações: Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura 2.1. Em torno da Terra (ou de qualquer objeto) existe um campo gravitacional.

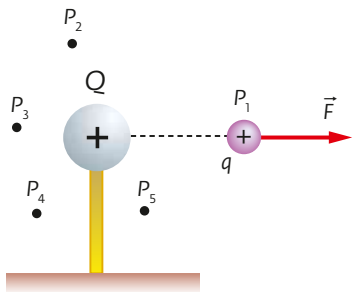


Figura 2.2. Em torno de uma carga elétrica, Q, existe um campo elétrico criado por essa carga.

Considere uma carga Q fixa em uma determinada posição, como mostra a **figura 2.2**. Se uma outra carga q, denominada carga de prova, for colocada em um ponto P_1, a certa distância de Q, aparecerá uma força elétrica $\vec{F}$ atuando sobre q **(figura 2.2)**.

Suponha, agora, que a carga q fosse deslocada, em torno de Q, para outros pontos quaisquer, tais como P_2, P_3, etc. Em cada um desses pontos estaria também atuando sobre q uma força elétrica, exercida por Q.

Dizemos que a carga Q cria um campo elétrico nos pontos do espaço em torno dela e que esse campo elétrico é o responsável pelo aparecimento da força elétrica sobre a carga q colocada naqueles pontos. Em outras palavras, consideramos que a força elétrica que atua sobre q **é devida à ação do campo elétrico** e não à ação direta de Q sobre q.

Para descrever esse fato, dizemos que em qualquer ponto do espaço em torno de Q **existe um campo elétrico** criado por essa carga. Podemos então destacar:

> **A presença de uma carga elétrica Q em uma região do espaço produz um campo elétrico em cada ponto dele, e a existência deste campo pode ser verificada através da força exercida em uma carga de prova q quando esta é colocada nesta região.**

Observe que a existência do campo elétrico se deve à presença da carga elétrica Q, não dependendo da carga de prova q. Ao ser deslocada de um ponto a outro, a carga de prova permite apenas verificar se existe ou não, nesses pontos, um campo elétrico. O mesmo aconteceria se a carga Q fosse negativa. É desejável que o valor da carga de prova seja tão pequeno quanto possível, de forma que o campo elétrico gerado pela carga de prova não altere o campo elétrico da carga Q.

De um modo geral, os valores de algumas grandezas físicas podem variar em função de outra. Por exemplo, uma propriedade que se estende por uma região do espaço e é descrita por uma função da posição pelo tempo é chamada de **campo**. Esse campo poderá ser **escalar** ou **vetorial**. Temos um **campo escalar** quando a grandeza física que o define for representada em cada ponto do espaço por um valor escalar. Nesse caso, podemos citar como exemplo o campo de temperaturas, pois para cada ponto do ambiente temos uma temperatura bem determinada, própria do ponto. Por outro lado, temos um **campo vetorial** quando a grandeza física que o define for representada em cada ponto do espaço por um vetor, ou seja, a grandeza física tem módulo, direção e sentido. O campo gravitacional e o campo elétrico são exemplos de campo vetorial.

O vetor campo elétrico

O campo elétrico pode ser representado, em cada ponto do espaço, por um vetor simbolizado por $\vec{E}$ e denominado **vetor campo elétrico**. Esse vetor possui módulo, direção e sentido.

O **módulo do vetor** $\vec{E}$, em um dado ponto, é denominado **intensidade do campo elétrico** nesse ponto e é dado pela força por unidade de carga. Vimos que uma carga Q, mostrada na **figura 2.2**, cria um campo elétrico no espaço em torno dela. Colocando-se uma carga de prova q em um ponto qualquer, como o ponto P_1, por exemplo, uma força elétrica $\vec{F}$ atuará sobre essa carga de prova. O mesmo acontecerá se q for colocada nos demais pontos P_2, P_3, etc. A intensidade do campo elétrico em P_1 será, por definição, dada pela expressão:

$$E = \frac{F}{q}$$

A unidade para a medida de E é, no SI, 1 N/C (1 newton por coulomb).

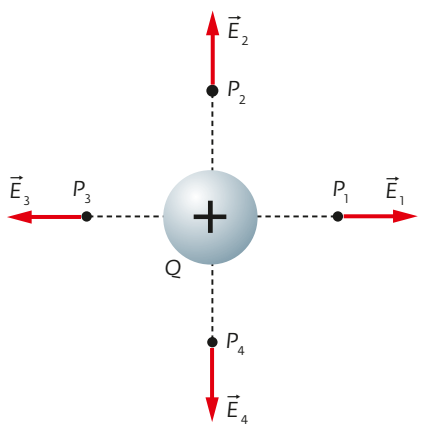
Observe que, de $E = \frac{F}{q}$, obtemos:

$$F = qE$$

Isto é, se conhecermos a intensidade, E, do campo elétrico em um ponto, poderemos calcular, usando a expressão anterior, o módulo da força que atua em uma carga qualquer, q, colocada naquele ponto.

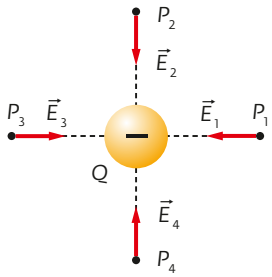
A **direção e o sentido do vetor** campo elétrico em um ponto são, por definição, dados pela direção e pelo sentido da força que atua em uma carga de prova **positiva** colocada no ponto.

Se uma carga de prova positiva fosse colocada em P_1 **(figura 2.3)**, ela seria repelida por Q com uma força horizontal para a direita. Portanto, o vetor campo elétrico $\vec{E}_1$, naquele ponto, seria também horizontal e dirigido para a direita, ou seja, o campo elétrico $\vec{E}_1$ produzido em cada ponto por uma carga Q positiva é de afastamento. A direção da força e a do campo, em um ponto qualquer, são as mesmas. Da mesma forma, podemos concluir que em P_2, P_3 e P_4, os vetores $\vec{E}_2$, $\vec{E}_3$ e $\vec{E}_4$ têm as direções e os sentidos indicados na **figura 2.3**.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 2.3. A carga Q, positiva, cria nos pontos P_1, P_2, P_3 e P_4 os vetores campos elétricos $\vec{E}_1$, $\vec{E}_2$, $\vec{E}_3$ e $\vec{E}_4$, com as direções e os sentidos indicados. Representação sem escala e em cores fantasia.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 2.4. A carga Q, negativa, cria nos pontos P_1, P_2, P_3 e P_4 os vetores campos elétricos $\vec{E}_1$, $\vec{E}_2$, $\vec{E}_3$ e $\vec{E}_4$, com as direções e os sentidos indicados. Representação sem escala e em cores fantasia.

Suponha, agora, que a carga que cria o campo seja negativa, como mostra a **figura 2.4**. Nesse caso, se colocássemos a carga de prova **positiva** em P_1, ela seria atraída por Q com uma força para a esquerda. Portanto, o vetor campo elétrico estaria agora dirigido para a esquerda (sempre no mesmo sentido da força que atua na carga de prova positiva). Seguindo essa orientação, você poderá concluir que em P_2, P_3 e P_4 o vetor campo elétrico será representado pelos vetores $\vec{E}_2$, $\vec{E}_3$ e $\vec{E}_4$ mostrados na **figura 2.4**, ou seja, o campo elétrico produzido em cada ponto por uma carga Q negativa é de aproximação.

Resumindo, temos:

Sendo *F* o módulo da força elétrica que atua em uma carga de prova *q*, colocada em um ponto do espaço, o vetor campo elétrico $\vec{E}$ nesse ponto tem uma intensidade obtida pela relação:

$$E = \frac{F}{q}$$

A direção e o sentido do vetor $\vec{E}$ são dados pela direção e pelo sentido da força que atua na carga de prova positiva colocada no ponto, ou seja:

- **se $q > 0$, o campo elétrico $\vec{E}$ e a força $\vec{F}$ têm mesmo sentido;**
- **se $q < 0$, o campo elétrico $\vec{E}$ e a força $\vec{F}$ têm sentidos opostos.**

Movimento de cargas em um campo elétrico

O comportamento de uma carga de prova *q* quando colocada em um ponto do espaço indica a existência ou não do campo. Dessa forma, se a carga *q* ficar em repouso, isso significa que a intensidade do campo naquele ponto é zero. Assim, se uma carga **positiva** *q* for colocada no ponto P_1 da **figura 2.3**, no qual existe um campo elétrico $\vec{E}_1$ criado por Q, a carga *q* será repelida por Q com uma força dirigida para a direita e tenderá a se deslocar no sentido dessa força. Já que o vetor $\vec{E}_1$ tem o mesmo sentido dessa força, concluímos que a carga positiva *q* tende a se deslocar no sentido do campo elétrico. Se essa mesma carga positiva *q* for colocada no ponto P_1 da **figura 2.4** (campo criado por carga negativa), ela será atraída pela carga Q e será deslocada no sentido do campo elétrico $\vec{E}_1$. De maneira geral podemos verificar que, em qualquer ponto que a carga positiva *q* for abandonada, ela tenderá a se deslocar no sentido do vetor campo elétrico existente naquele ponto.

Imagine, agora, que coloquemos no ponto P_1 da **figura 2.3** uma carga **negativa** *q* onde existe um campo elétrico $\vec{E}_1$ dirigido para a direita, produzido pela carga Q. A carga *q* será atraída por Q e tenderá, então, a se deslocar em sentido **contrário** ao campo $\vec{E}_1$. Se colocarmos a carga negativa *q* no ponto P_1 da **figura 2.4**, ela será repelida pela carga negativa Q e, da mesma maneira, tenderá a se deslocar em sentido contrário ao do vetor $\vec{E}_1$.

Em resumo:

Uma carga positiva colocada em um ponto onde existe um campo elétrico $\vec{E}$ tende a se deslocar no sentido desse campo, e uma carga negativa tende a se deslocar em sentido contrário ao do campo.

Exemplo

Uma pessoa verificou que, no ponto *P* da figura 2.5, existe um campo elétrico $\vec{E}$, horizontal, para a direita, criado pelo objeto eletrizado mostrado nessa figura.

a) Desejando medir a intensidade do campo em *P*, a pessoa colocou, nesse ponto, uma carga $q = 2{,}0 \cdot 10^{-7}$ C e verificou que sobre ela atuava uma força $F = 5{,}0 \cdot 10^{-2}$ N. Qual é, então, a intensidade do campo em *P*?

Como a intensidade do campo elétrico em um ponto qualquer é dada por $E = \frac{F}{q}$, temos:

$$E = \frac{F}{q} = \frac{5{,}0 \cdot 10^{-2}}{2{,}0 \cdot 10^{-7}} \quad \therefore \quad E = 2{,}5 \cdot 10^{5}\ \text{N/C}$$

b) Retirando-se a carga *q* e colocando-se em *P* uma carga positiva $q_1 = 3{,}0 \cdot 10^{-7}$ C, qual será o módulo da força $\vec{F}_1$ que atuará nessa carga e qual o sentido do movimento que ela tenderá a adquirir?

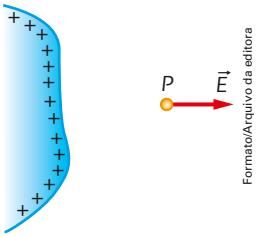
De $E = \frac{F}{q}$, temos $F = qE$. Logo:

$$F_1 = q_1 E = 3{,}0 \cdot 10^{-7} \cdot 2{,}5 \cdot 10^{5} \quad \therefore \quad F_1 = 7{,}5 \cdot 10^{-2}\ \text{N}$$

Como a carga q_1 é positiva, sabemos que ela tenderá a se deslocar no mesmo sentido do vetor $\vec{E}$, isto é, ela tenderá a se deslocar para a direita na figura 2.5.

c) Responda à questão anterior supondo que colocássemos em *P* uma carga negativa cujo módulo é $q_2 = 3{,}0 \cdot 10^{-7}$ C.

Como os valores das cargas q_1 e q_2 são iguais, o módulo da força $\vec{F}_2$ que atuará em q_2 será igual ao da força $\vec{F}_1$ que atuava em q_1, ou seja, $F_2 = 7{,}5 \cdot 10^{-2}$ N. Entretanto, sendo q_2 uma carga negativa, ela tenderá a se deslocar para a esquerda, isto é, em sentido contrário ao do campo elétrico (nesse caso a força $\vec{F}_2$ aponta para a esquerda na figura 2.5).



Formato/Arquivo da editora

Figura 2.5. Para o exemplo da seção 2.1.

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

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

Não escreva no livro!

1. Uma carga positiva Q está fixa no centro de uma mesa horizontal, como mostra a figura deste exercício. Uma pessoa, desejando verificar se existe um campo elétrico em P_1, coloca, nesse ponto, uma carga *q*.



Ilustrações: Formato/Arquivo da editora

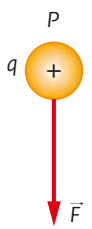
a) Por que a pessoa poderá concluir que existe um campo elétrico em P_1?
Porque atuará uma força elétrica em *q*.

b) Qual é a carga que criou o campo elétrico em P_1? Q

c) Como se denomina a carga *q* colocada em P_1? Carga de prova.

d) Retirando-se a carga *q* do ponto P_1, o campo elétrico continuará existindo nesse ponto? Sim.

2. Verifica-se que uma carga positiva $q = 1{,}5\ \mu C$, colocada em um ponto *P*, fica sujeita a uma força elétrica $F = 0{,}60$ N, vertical, para baixo (veja a figura a seguir).



a) Qual é a intensidade do campo elétrico no ponto *P*? $4{,}0 \cdot 10^{5}$ N/C

b) Mostre, em uma cópia da figura no caderno, a direção e o sentido do vetor $\vec{E}$ em *P*. Vertical para baixo.

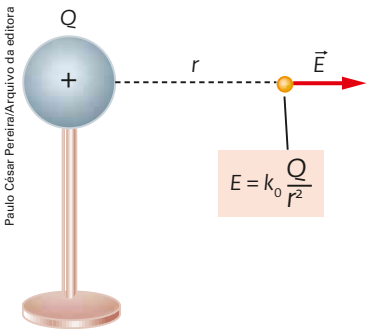
3. Em um ponto do espaço existe um campo elétrico $E = 5{,}0 \cdot 10^{4}$ N/C, horizontal, para a esquerda. Colocando-se uma carga *q* nesse ponto, verifica-se que ela tende a se mover para a direita, sujeita a uma força elétrica de módulo $F = 0{,}20$ N.

a) Qual é o sinal da carga *q*? Negativo.

b) Determine, em μC, o valor de *q*. 4,0 μC

2.2 Campo elétrico criado por cargas puntuais

Campo de uma carga puntual



Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura 2.6. Módulo, direção e sentido do vetor campo elétrico, criado pela carga puntual Q, em um ponto cuja distância à carga é igual a r. Representação sem escala e em cores fantasia.

Vamos estudar um caso particular, no qual a carga que cria o campo é puntual.

Consideremos uma carga puntual Q, no ar, e um ponto situado a uma distância r dessa carga **(figura 2.6)**. Se colocarmos uma carga de prova q nesse ponto, ela ficará sujeita a uma força elétrica $\vec{F}$, cujo módulo poderá ser calculado pela lei de Coulomb, isto é:

$$F = k_0 \frac{Qq}{r^2}$$

Como $E = \frac{F}{q}$, obteremos:

$$E = k_0 \frac{Q}{r^2}$$

em que k_0 é a constante eletrostática, ou constante de Coulomb, $9 \cdot 10^9\ N \cdot m^2/C^2$.

Portanto, essa expressão nos permite calcular a intensidade do campo em um certo ponto, quando conhecemos o valor da carga puntual Q que criou esse campo e a distância do ponto a essa carga. Observe, entretanto, que essa expressão só pode ser usada para um campo criado por uma carga puntual. Para cargas não puntuais existem expressões apropriadas a cada caso e que não serão analisadas em nosso curso.

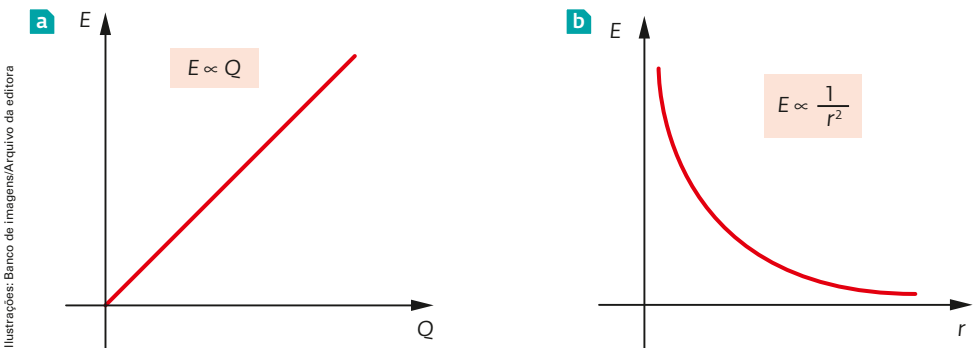
Comentários

Analisando a expressão $E = k_0 \frac{Q}{r^2}$, podemos fazer as seguintes observações:

1) Como a carga de prova q não aparece nessa expressão, concluímos que a intensidade do campo elétrico em um ponto **não** depende da carga de prova q.

2) A intensidade E, em um dado ponto, é diretamente proporcional à carga Q que cria o campo. Então, na **figura 2.7**, fazendo variar o valor de Q, a intensidade do campo, no ponto mostrado, variará de tal modo que o gráfico $E \times Q$ terá o aspecto mostrado na **figura 2.7.a**.

3) A expressão nos mostra, também, que no campo elétrico de dada carga Q o valor de E será tanto menor quanto maior for a distância r entre o ponto e a carga Q. Na realidade, tem-se $E \propto \frac{1}{r^2}$, isto é, a intensidade do campo é inversamente proporcional ao quadrado da distância r. Sendo assim, temos um gráfico $E \times r$ como o mostrado na **figura 2.7.b**.



Ilustrações: Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 2.7. Aspectos dos gráficos $E \times Q$ **(a)** e $E \times r$ **(b)**.

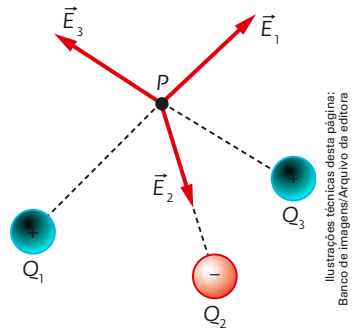
Campo de várias cargas puntuais

Consideremos várias cargas elétricas puntuais Q_1, Q_2, Q_3, etc., como mostra a **figura 2.8**. Suponhamos que queiramos calcular o campo elétrico que o conjunto dessas cargas cria em um ponto *P* qualquer do espaço. Para isso devemos calcular, inicialmente, o campo $\vec{E}_1$ criado em *P* apenas pela carga Q_1.

Como Q_1 é uma carga puntual, o valor de E_1 poderá ser calculado usando-se a expressão $E = k_0 \frac{Q}{r^2}$. A direção e o sentido de $\vec{E}_1$ estão representados na **figura 2.8**.

A seguir, de maneira análoga, determinamos o campo $\vec{E}_2$, criado por Q_2, o campo $\vec{E}_3$, criado por Q_3, etc.

Então, o campo elétrico $\vec{E}$, criado por várias cargas puntuais, é obtido por meio de uma soma vetorial.



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

Figura 2.8. As cargas Q_1, Q_2 e Q_3 criam no ponto *P* os vetores campos elétricos E_1, E_2 e E_3.

O campo elétrico $\vec{E}$, existente no ponto *P*, é dado pela resultante dos campos $\vec{E}_1$, $\vec{E}_2$, $\vec{E}_3$, etc., produzidos separadamente pelas cargas Q_1, Q_2, Q_3, etc., isto é:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \ldots$$

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

Campo de uma esfera

Imagine, agora, que tivéssemos uma esfera eletrizada, possuindo uma carga *Q* distribuída uniformemente em sua superfície. Supondo que o raio dessa esfera não fosse desprezível, teríamos uma carga *Q* **não puntual**, criando um campo elétrico no espaço em torno dela.

Para calcular o campo elétrico em um ponto *P* externo à esfera **(figura 2.9.a)**, devemos imaginar a esfera dividida em pequenas porções, de tal modo que a carga ΔQ existente em cada porção pudesse ser considerada uma carga puntual. Cada uma dessas pequenas cargas ΔQ criaria em *P* um pequeno campo $\Delta\vec{E}$ **(figura 2.9.a)**. O campo em *P*, devido à carga total, *Q*, da esfera seria obtido somando-se vetorialmente esses pequenos campos.

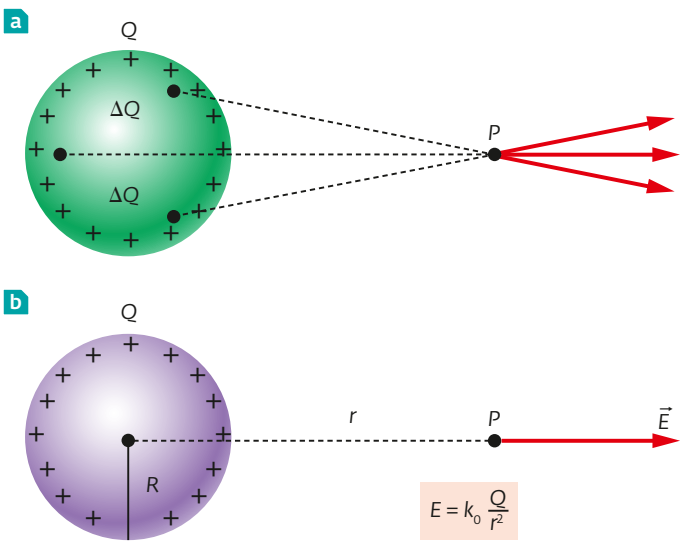


Figura 2.9. Vetor campo elétrico $\vec{E}$, criado por uma esfera eletrizada, em um ponto *P*, situado a uma distância *r* do centro da esfera.

Se na **figura 2.9.b** considerássemos um ponto situado bem próximo à superfície da esfera, sua distância ao centro dela seria praticamente igual ao raio da esfera, R.

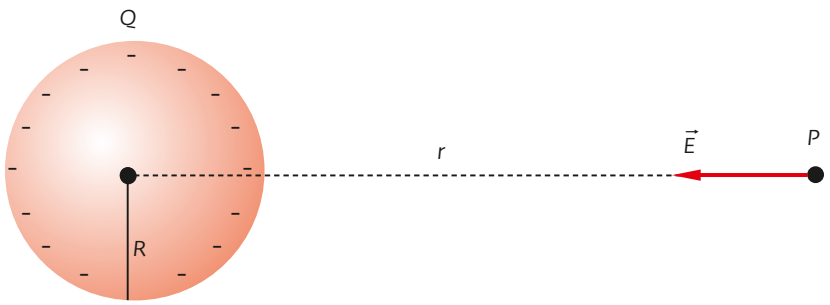
Portanto, o campo nesse ponto seria dado por:

$$E = k_0 \frac{Q}{R^2}$$

A análise que acabamos de fazer só é válida para pontos exteriores à esfera. A determinação do campo elétrico em pontos no interior da esfera será estudada na seção 2.4.

Exemplo

Uma esfera de raio $R = 8{,}0$ cm está eletrizada negativamente com uma carga de valor $Q = 3{,}2\ \mu C$, uniformemente distribuída em sua superfície (figura 2.10).



Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 2.10. Para o exemplo da seção 2.2. Representação sem escala e em cores fantasia.

Considere um ponto P situado a 4,0 cm da superfície da esfera.

a) Qual será o sentido do campo elétrico criado pela esfera no ponto P?

O campo criado por uma carga negativa está sempre voltado para essa carga. Logo, o vetor $\vec{E}$ no ponto P terá a direção e o sentido mostrados na **figura 2.10**.

b) Supondo a esfera no ar, qual será a intensidade do campo elétrico no ponto P?

A intensidade do campo elétrico criado por uma esfera será dada por $E = k_0 \frac{Q}{r^2}$, em que r é a distância do ponto ao centro da esfera. Logo, teremos:

$$r = 8{,}0\ \text{cm} + 4{,}0\ \text{cm} = 12\ \text{cm}$$

$$r = 12 \cdot 10^{-2}\ \text{m}$$

Como $Q = 3{,}2\ \mu\text{C} = 3{,}2 \cdot 10^{-6}\ \text{C}$, temos:

$$E = k_0 \frac{Q}{r^2} = 9{,}0 \cdot 10^9 \cdot \frac{3{,}2 \cdot 10^{-6}}{(12 \cdot 10^{-2})^2}$$

$$E = 2{,}0 \cdot 10^6\ \text{N/C}$$

c) Se uma carga puntual negativa, de valor $q = 3{,}5 \cdot 10^{-7}$ C, for colocada em P, quais serão o módulo, a direção e o sentido da força elétrica $\vec{F}$ que atuará sobre ela?

Como q é uma carga negativa, ela ficará sujeita a uma força em sentido contrário ao do campo elétrico existente no ponto.

Logo, quando q for colocada no ponto P da **figura 2.10**, atuará sobre ela uma força $\vec{F}$ dirigida para a direita.

O módulo dessa força poderá ser calculado por $F = qE$. Então:

$$F = qE = 3{,}5 \cdot 10^{-7} \cdot 2{,}0 \cdot 10^6$$

$$F = 0{,}70\ \text{N}$$

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

Não escreva no livro!

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

4. Uma carga elétrica puntual positiva, $Q = 4{,}5\ \mu C$, encontra-se no ar. Considere um ponto P situado a uma distância $r = 30$ cm de Q.

a) Qual é a intensidade do campo elétrico criado por Q em P? $4{,}5 \cdot 10^5$ N/C

b) Se o valor de Q fosse duplicado, quantas vezes maior se tornaria a intensidade do campo em P? 2 vezes maior.

c) Então, qual seria o novo valor do campo em P? $9{,}0 \cdot 10^5$ N/C.

5. No exercício anterior, após duplicar o valor de Q, considere um ponto P' situado a 90 cm dessa carga.

a) A distância de P' a Q é quantas vezes maior que a distância de P a Q? 3 vezes maior.

b) Então, a intensidade do campo em P' é quantas vezes menor do que em P? 9 vezes menor.

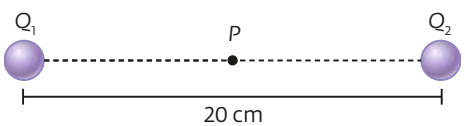
c) Logo, qual é a intensidade do campo em P'? $1{,}0 \cdot 10^5$ N/C.

6. Considerando ainda o exercício 4, após duplicar o valor de Q, imagine que essa carga e o ponto P estivessem mergulhados em água. (Considere a constante dielétrica da água igual a 80.)

a) O valor do campo elétrico em P seria maior ou menor do que no ar? Quantas vezes? 80 vezes menor.

b) Então, qual seria a intensidade do campo em P? $1{,}1 \cdot 10^4$ N/C

7. Duas cargas puntuais, $Q_1 = 8{,}0 \cdot 10^{-7}$ C e $Q_2 = -8{,}0 \cdot 10^{-7}$ C, encontram-se no ar, separadas por uma distância de 20 cm (veja a figura a seguir).



a) Desenhe, em uma cópia da figura no caderno, o vetor campo elétrico $\vec{E}_2$ criado pela carga Q_1 no ponto P, situado no meio da distância entre as duas cargas. Para a direita.

b) Qual é a intensidade desse campo $\vec{E}_2$? $7{,}2 \cdot 10^5$ N/C

8. Faça em seu caderno.

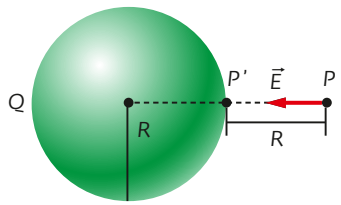
a) Na cópia da figura do exercício anterior, desenhe o vetor $\vec{E}_2$ criado por Q_2 no ponto P. Para a direita.

b) Qual é a intensidade desse campo $\vec{E}_2$? $7{,}2 \cdot 10^5$ N/C

c) Determine, então, o campo elétrico resultante criado por Q_1 e Q_2 em P. $1{,}44 \cdot 10^6$ N/C

9. Uma esfera uniformemente eletrizada cria, em um ponto P exterior a ela, um campo elétrico $E = 1{,}5 \cdot 10^4$ N/C, cuja direção e sentido estão mostrados na figura a seguir.

A distância de P à superfície da esfera é igual ao próprio raio da esfera.



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

b) 2 vezes menor.

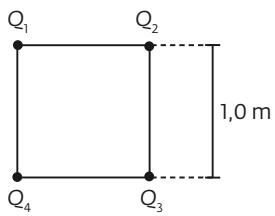
a) Qual é o sinal da carga na esfera? Negativo.

b) Considere um ponto P' muito próximo da superfície da esfera. A distância de P' ao centro da esfera é quantas vezes menor que a distância de P a esse centro?

c) Então, a intensidade do campo em P' é maior ou menor do que em P? Quantas vezes? 4 vezes maior.

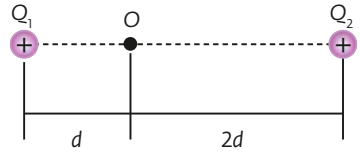
d) Logo, qual é a intensidade do campo em qualquer ponto próximo à superfície dessa esfera? $6{,}0 \cdot 10^4$ N/C

10. Nos vértices de um quadrado, de lado igual a 1,0 m, são colocadas cargas elétricas Q_1, Q_2, Q_3 e Q_4 da maneira mostrada na figura deste problema. Sabendo-se que $Q_1 = +1{,}0 \cdot 10^{-7}$ C, $Q_2 = +2{,}0 \cdot 10^{-7}$ C, $Q_3 = -1{,}0 \cdot 10^{-7}$ C e $Q_4 = -2{,}0 \cdot 10^{-7}$ C, calcule a intensidade do campo elétrico no centro do quadrado (suponha as cargas no ar). $8{,}0 \cdot 10^3$ N/C



11. Duas cargas elétricas puntuais, de mesmo módulo e com sinais opostos, encontram-se em dois dos vértices de um triângulo equilátero. No ponto médio entre esses dois vértices, o módulo do campo elétrico resultante em razão das duas cargas vale E_0. Qual é o módulo do campo elétrico, E, criado por essas cargas no terceiro vértice do triângulo? (Apresente a resposta em função de E_0.) $E = E_0/8$

12. Na figura deste problema, Q_1 e Q_2 representam duas cargas puntiformes de mesmo sinal. Sabendo-se que o vetor campo elétrico resultante produzido por essas cargas em O é nulo, determine a relação entre os valores de Q_1 e Q_2. $Q_2 = 4Q_1$



2.3 Linhas de força

O que são linhas de força

O conceito de linhas de força ou linhas de campo foi introduzido pelo físico inglês Michael Faraday, no século XIX, com a finalidade de representar o campo elétrico por meio de diagramas.

Para que possamos compreender essa concepção de Faraday, suponhamos uma carga puntual positiva, Q, criando um campo elétrico no espaço em torno dela. Em cada ponto desse espaço temos um vetor $\vec{E}$, cujo módulo diminui à medida que nos afastamos da carga. Na **figura 2.11.a** estão representados esses vetores em alguns pontos em torno de Q. Consideremos os vetores $\vec{E}_1$, $\vec{E}_2$, $\vec{E}_3$, etc., que têm a mesma direção, e tracemos uma linha passando por esses vetores e orientada no mesmo sentido deles, como mostra a **figura 2.11.b**. Essa linha é, então, tangente a cada um dos vetores $\vec{E}_1$, $\vec{E}_2$, $\vec{E}_3$, etc. Cada uma dessas linhas é denominada **linha de força** do campo elétrico. De maneira semelhante, podemos traçar várias outras linhas de força do campo elétrico criado pela carga Q, como foi feito na **figura 2.11.b**. Essa figura nos fornece uma representação do campo elétrico da maneira proposta por Faraday.

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

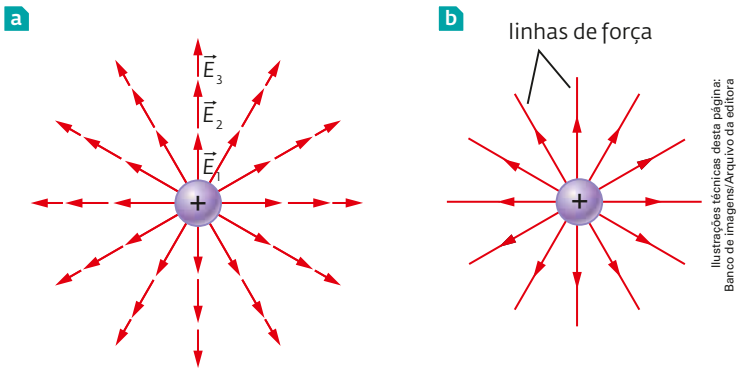


Figura 2.11. Linhas de força do campo elétrico criado por uma carga puntual positiva.

Se a carga criadora do campo for puntual negativa, o vetor $\vec{E}$, em cada ponto do espaço, estará dirigido para essa carga, como mostra a **figura 2.12.a**. Podemos traçar, também nesse caso, as linhas de força que representarão esse campo elétrico. Observe, na **figura 2.12.b**, que a configuração dessas linhas de força é idêntica àquela que representa o campo elétrico da carga positiva, diferindo no sentido de orientação das linhas de força: no campo da carga positiva, as linhas divergem a partir da carga e, no campo de uma carga negativa, elas convergem para a carga.

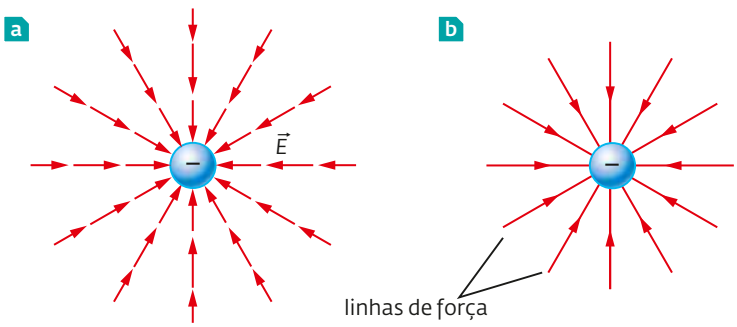


Figura 2.12. Linhas de força do campo elétrico criado por uma carga puntual negativa.

Comentários

1) As linhas de força dos campos que acabamos de estudar apresentam uma configuração relativamente simples. Outras distribuições de cargas criam campos cujas linhas de força podem apresentar formas mais complicadas. Por exemplo: na **figura 2.13.a** mostramos as linhas de força do campo elétrico criado por duas cargas puntuais de mesmo módulo, mas de sinais contrários; e na **figura 2.13.b** vemos a configuração das linhas de força para o caso em que as duas cargas têm o mesmo sinal. Em todos os casos, cada linha de força deve ser traçada de maneira tal que, em cada ponto, o vetor $\vec{E}$ seja tangente a ela.

2) As linhas de força podem ser traçadas de modo a nos dar informações não só sobre a direção e o sentido do vetor $\vec{E}$, mas também sobre o módulo desse vetor. Para isso, convenciona-se traçar as linhas de força mais próximas umas das outras nas regiões onde a intensidade do campo for maior; portanto, as linhas deverão estar mais separadas nos pontos onde a intensidade do campo for menor.
Por exemplo: observando as **figuras 2.11.b** e **2.12.b**, vemos que as linhas de força estão mais juntas nas proximidades das cargas, indicando que o campo é mais intenso nessas regiões. Observe também que, nessas figuras, à medida que nos afastamos das cargas, as linhas se apresentam mais separadas, mostrando que a intensidade do campo está diminuindo.

3) As linhas de força fornecem um diagrama capaz de representar o campo elétrico, como desejava Faraday.

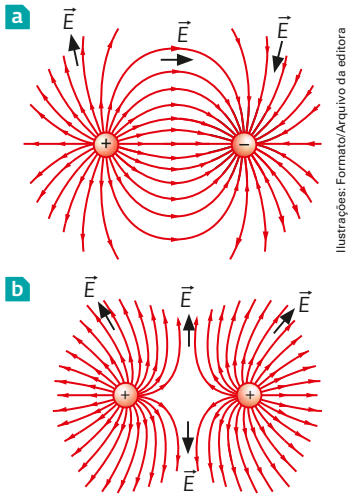


Figura 2.13. Linhas de força do campo elétrico criado por duas cargas de sinais contrários **(a)** e por duas cargas de sinais iguais **(b)**.

De fato:

- **sendo uma linha de força traçada de tal modo que, em cada ponto, o vetor $\vec{E}$ seja tangente a ela, é possível determinar a direção e o sentido do campo em um ponto quando conhecemos a linha de força que passa por esse ponto;**
- **como as linhas de força são traçadas mais próximas umas das outras nas regiões onde o campo elétrico é mais intenso, observando a separação entre essas linhas, é possível obter informações sobre o módulo do vetor, campo elétrico.**

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

Campo elétrico uniforme

Consideremos duas placas planas, paralelas, separadas por uma distância pequena em relação às suas dimensões e que estejam uniformemente eletrizadas com cargas de mesmo módulo e de sinais contrários, como mostra a **figura 2.14**.

Se colocarmos uma carga de prova positiva q em um ponto P_1 situado entre as placas **(figura 2.14)**, essa carga ficará sujeita à ação de uma força $\vec{F}$, em razão do campo elétrico criado pelas placas no espaço entre elas. A força $\vec{F}$ é perpendicular às placas e está orientada da placa positiva para a negativa. Deslocando-se a carga de prova q para outro ponto qualquer entre as placas (como o ponto P_2, ou P_3, etc.), verifica-se que atuará sobre q uma força $\vec{F}$ de mesmo módulo, mesma direção e mesmo sentido que aquela que atuava quando q se encontrava em P_1.

Concluímos, então, que o campo elétrico existente entre essas placas é um campo uniforme e, em qualquer ponto, tem o mesmo módulo (lembre-se de que $E = \frac{F}{q}$), a mesma direção e o mesmo sentido e pode ser representado por um vetor $\vec{E}$, como aquele indicado no ponto P da **figura 2.14**.

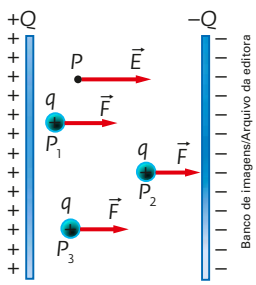
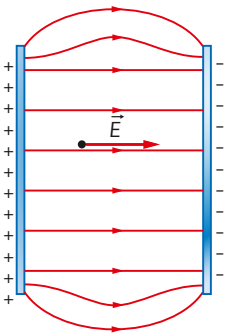


Figura 2.14. Duas placas planas, paralelas, eletrizadas uniformemente com cargas de sinais contrários, criam um campo uniforme no espaço entre elas.

Dizemos que um campo elétrico é uniforme, em uma dada região do espaço, quando ele apresenta o mesmo módulo, a mesma direção e o mesmo sentido em todos os pontos dessa região. A figura 2.14 representa uma das maneiras de obter um campo elétrico uniforme: entre as duas placas, o vetor $\vec{E}$ não varia ao passarmos de um ponto para outro, estando sempre orientado da placa positiva para a negativa.



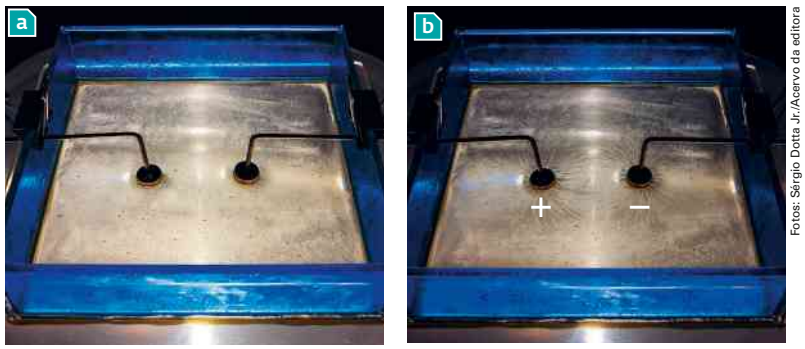
Ilustrações: Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 2.15. Linhas de força do campo uniforme existentes entre duas placas eletrizadas com cargas de sinais contrários.

Na **figura 2.15** estão traçadas as linhas de força do campo existente entre as duas placas. Observe que essas linhas são paralelas (a direção de $\vec{E}$ não varia) e igualmente espaçadas (o módulo de $\vec{E}$ é constante), indicando que o campo elétrico, nessa região, é uniforme. Note que essas considerações não são válidas para pontos muito próximos das extremidades das placas. Como representado na **figura 2.15**, nessas extremidades as linhas de força são curvas, indicando que aí o campo deixa de ser uniforme.

As fotografias da **figura 2.16** foram obtidas colocando-se partículas de fubá em uma cuba entre duas placas eletrizadas com cargas de sinais contrários. Como podemos observar, essas partículas se orientam na direção do campo elétrico, apresentando, assim, uma configuração igual à das linhas de força. Esse artifício constitui, portanto, uma "materialização" das linhas de força, possibilitando-nos "enxergar" o campo uniforme entre as placas.

Se, em vez de duas placas paralelas, tivermos duas cargas elétricas no espaço, o campo elétrico será resultante dos campos criados por cada carga individualmente, conforme **figura 2.13.a**, em que temos duas cargas de mesmo módulo e de sinais opostos, ou conforme **figura 2.13.b**, em que temos duas cargas positivas de mesmo módulo.



Fotos: Sérgio Dotta Jr./Acervo da editora

Figura 2.16. Recipiente com partículas de fubá (**a**). Os terminais estão ligados a uma fonte de alta tensão. Quando a fonte é ligada, os terminais adquirem cargas iguais com sinais opostos (**b**). O campo elétrico criado pelas cargas elétricas modifica as posições das partículas, mostrando o mapeamento das linhas do campo elétrico entre os terminais.

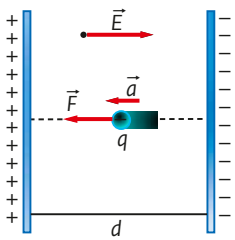


Figura 2.17. Para o exemplo da seção 2.3.

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

Exemplo

O campo elétrico entre as placas mostradas na figura 2.17 vale $E = 2{,}0 \cdot 10^4$ N/C e a distância entre elas é $d = 7{,}0$ mm. Suponha que um elétron seja liberado, a partir do repouso, nas proximidades da placa negativa.

a) Quais serão o módulo, a direção e o sentido da força elétrica $\vec{F}$ que atua no elétron?

O elétron tem carga negativa. Então, a força $\vec{F}$ que atuará sobre ele terá a mesma direção e o sentido contrário ao do campo elétrico $\vec{E}$, isto é, a força $\vec{F}$ estará orientada da placa negativa para a positiva, como mostra a **figura 2.17**.

O módulo de $\vec{F}$ será dado por $F = qE$, em que q é a carga do elétron cujo valor consta na tabela que se encontra no final deste volume: $q = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C. Logo:

$$F = qE = 1{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot 2{,}0 \cdot 10^4 \quad \therefore \quad F = 3{,}2 \cdot 10^{-15}\ \text{N}$$

b) Sabendo-se que o peso do elétron é desprezível em comparação com a força elétrica que atua sobre ele, diga qual é o tipo de movimento que essa partícula descreverá.

Como o campo entre as placas é uniforme, a força elétrica $\vec{F}$ que atua no elétron permanece constante enquanto ele se desloca. Logo, essa força imprimirá ao elétron uma aceleração também constante, isto é, o movimento do elétron será retilíneo e uniformemente acelerado.

c) Qual é o valor da aceleração adquirida pelo elétron?

Essa aceleração poderá ser calculada pela segunda lei de Newton, $F = ma$, em que m é a massa do elétron, também encontrada na tabela no final deste volume: $m = 9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg. Logo:

$$a = \frac{F}{m} = \frac{3{,}2 \cdot 10^{-15}}{9{,}1 \cdot 10^{-31}} \quad \therefore \quad a = 3{,}5 \cdot 10^{15}\ \text{m/s}^2$$

Observe que, embora a força sobre o elétron seja relativamente pequena, ele adquire uma aceleração de valor extremamente elevado.

d) Quanto tempo o elétron gastará para se deslocar da placa negativa até a placa positiva?

Como o movimento é uniformemente acelerado, o espaço percorrido pelo elétron será dado por $\Delta S = \left(\frac{1}{2}\right)at^2$ (lembre-se de que $v_0 = 0$). Em nosso caso, teremos $\Delta S = 7{,}0$ mm $= 7{,}0 \cdot 10^{-3}$ m e $a = 3{,}5 \cdot 10^{15}$ m/s^2. Então:

$$t = \sqrt{\frac{2\Delta S}{a}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 7{,}0 \cdot 10^{-3}}{3{,}5 \cdot 10^{15}}} \quad \therefore \quad t = 2{,}0 \cdot 10^{-9}\ \text{s}$$

e) Qual é a velocidade do elétron ao chegar à placa positiva?

No movimento uniformemente acelerado, com $v_0 = 0$, sabemos que $v = at$. Assim:

$$v = 3{,}5 \cdot 10^{15} \cdot 2{,}0 \cdot 10^{-9} \quad \therefore \quad v = 7{,}0 \cdot 10^{6}\ \text{m/s}$$

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

Não escreva no livro!

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

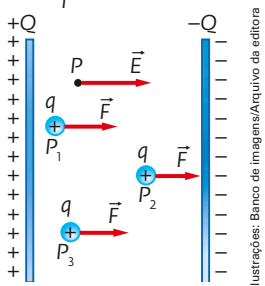
13. Na figura abaixo suponha que uma das cargas seja $+Q$ e a outra $+2Q$. Faça no caderno um esquema das linhas de força do campo elétrico criado por essas cargas.

Veja resposta no Manual do Professor.



14. a) Na figura abaixo, seja r a distância do ponto P_2 à placa positiva. O valor do campo nesse ponto poderia ser calculado usando-se a expressão $E = k_0\frac{Q}{r^2}$? Por quê?

Não, pois essa expressão só é válida para calcular o campo criado por uma carga puntual.

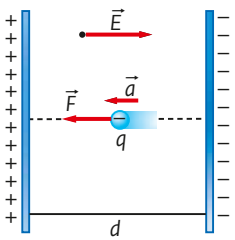


Ilustrações: Banco de imagens/Arquivo da editora

b) O valor do campo em P_2 poderia ser calculado pela relação $E = \frac{F}{q}$? Por quê?

Sim, essa relação é válida em qualquer situação.

15. Suponha que, em lugar do elétron da figura a seguir, fosse abandonado um próton nas proximidades da placa positiva.



15. a) Da placa positiva para a negativa.
b) Igual, porque o módulo da carga do próton é igual ao do elétron.
c) Permaneceria constante.
d) Retilíneo uniformemente acelerado.

a) Qual seria o sentido da força elétrica que atuaria no próton?

b) O valor da força no próton seria maior, menor que o da força que atuou no elétron ou igual a ele? Por quê?

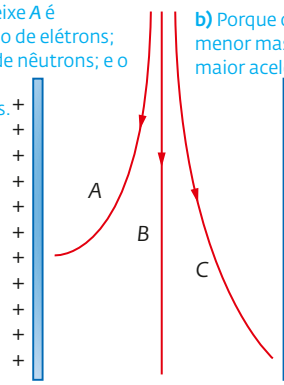
c) À medida que o próton se deslocasse, a força elétrica sobre ele aumentaria, diminuiria ou permaneceria constante?

d) Então, que tipo de movimento seria descrito pelo próton?

16. Um feixe de partículas, constituído de prótons, nêutrons e elétrons, penetra em um campo uniforme criado entre duas placas eletrizadas. Observa-se que o feixe se divide em três outros, A, B e C, como mostra a figura:

16. a) O feixe *A* é constituído de elétrons; o feixe *B*, de nêutrons; e o feixe *C*, de prótons.

b) Porque o elétron, tendo menor massa, adquire maior aceleração ao penetrar no campo.



a) Qual das partículas citadas constitui o feixe *A*? E o feixe *B*? E o feixe *C*?

b) Por que a curvatura do feixe *A* é mais acentuada que a do feixe *C*?

2.4 Comportamento de um condutor eletrizado



Westend61 GmbH/Alamy/Latinstock

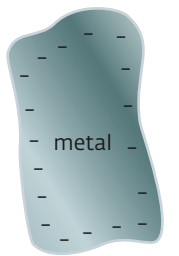
Figura 2.18. A placa metálica, ao ser atritada em um esmeril, adquire cargas negativas.

A carga se distribui na superfície do condutor

Suponha que um objeto condutor, como um bloco metálico, seja atritado em uma determinada região de sua superfície, adquirindo cargas negativas. Essas cargas aparecem na região em que o atrito ocorreu, como mostra a **figura 2.18**.

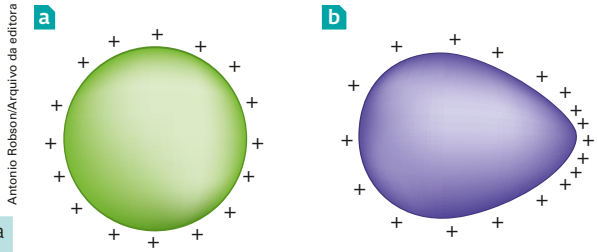
A repulsão entre essas cargas, constituídas por um excesso de elétrons, atua sobre os elétrons livres do condutor, fazendo com que eles se desloquem até atingir uma distribuição final, denominada **situação de equilíbrio eletrostático**, na qual as cargas no condutor apresentam-se em repouso. No equilíbrio eletrostático, que ocorre em um intervalo de tempo extremamente pequeno, verifica-se experimentalmente que a carga negativa adquirida pelo condutor apresenta-se distribuída em sua superfície **(figura 2.19)**.

Se o condutor é eletrizado positivamente, observamos o mesmo resultado final. A carga positiva, adquirida pelo condutor em uma dada região de sua superfície **(figura 2.20)**, atrai elétrons livres desse objeto. Esses elétrons se deslocam até ser atingido o equilíbrio eletrostático, quando, então, a carga positiva se apresentará distribuída na superfície do condutor **(figura 2.20)**.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 2.19. Distribuição de carga negativa na superfície do condutor.



Antonio Robson/Arquivo da editora

Figura 2.20. Distribuição de carga positiva na superfície do condutor. A distribuição de carga é homogênea apenas quando o objeto é regular; no caso de um objeto irregular, a concentração de carga será assimétrica devido ao poder das pontas, que estudaremos a seguir.

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

Esse comportamento é característico de um condutor. Se um isolante for atritado em uma determinada região de sua superfície, a carga por ele adquirida não se espalhará, permanecendo em equilíbrio na região onde ela foi gerada. Isso ocorre porque o isolante não possui elétrons livres e, consequentemente, as cargas elétricas não podem se deslocar nesse material.

Vimos, portanto, que:

Se um condutor eletrizado estiver em equilíbrio eletrostático, as cargas elétricas estarão distribuídas em sua superfície.

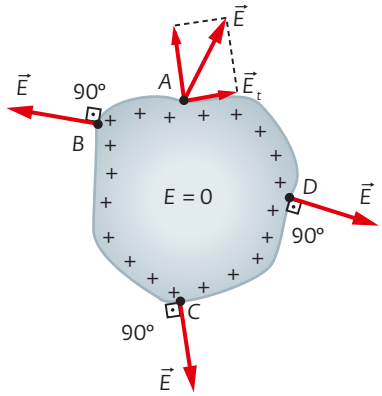
Campo no interior e na superfície do condutor

Quando o equilíbrio eletrostático é atingido, as cargas elétricas em um condutor estão distribuídas em sua superfície.

Nessas condições, como as cargas no condutor estão em repouso, o campo elétrico em qualquer ponto do interior do condutor é nulo, pois, se esse campo elétrico fosse diferente de zero, os elétrons livres existentes nele entrariam em movimento sob a ação desse campo. Como as cargas no condutor estão em equilíbrio, esse movimento não pode existir e, portanto, **o campo elétrico deve ser nulo no interior do condutor**.

Vamos analisar, agora, o que ocorre em pontos da superfície do condutor em equilíbrio eletrostático. Nesses pontos, é possível existir um campo elétrico, sem que isso altere a condição de equilíbrio eletrostático, desde que o vetor $\vec{E}$ seja perpendicular à superfície do condutor, como está mostrado nos pontos *B*, *C* e *D* da **figura 2.21**.

Se o campo elétrico não fosse perpendicular à superfície, como está desenhado no ponto *A* da **figura 2.21**, ele teria uma componente $\vec{E}_t$ tangente à superfície do condutor. Se essa componente existisse, os elétrons livres ali presentes estariam em movimento sob a ação de $\vec{E}_t$. Logo, essa componente não pode existir, pois o condutor está em equilíbrio eletrostático. Não existindo uma componente tangencial, o vetor $\vec{E}$ terá que ser perpendicular à superfície do condutor. Atuando nessa direção, o campo não poderá provocar movimento de cargas porque o condutor está envolvido pelo ar, que é um isolante.



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

Figura 2.21. O vetor campo elétrico na superfície de um condutor eletrizado, em equilíbrio eletrostático, é perpendicular à superfície desse condutor.

Se um condutor eletrizado estiver em equilíbrio eletrostático, o campo elétrico será nulo em todos os pontos do seu interior, e em pontos da superfície desse condutor $\vec{E}$ será perpendicular a ela (figura 2.21).

Blindagem eletrostática

Se um condutor oco, isto é, que apresenta uma cavidade interna, é eletrizado, as cargas elétricas tendem rapidamente a se localizar em sua superfície externa e o campo elétrico é nulo em todos os pontos do interior do condutor, quer na parte material do bloco, quer em sua cavidade, como mostra a **figura 2.22**.

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

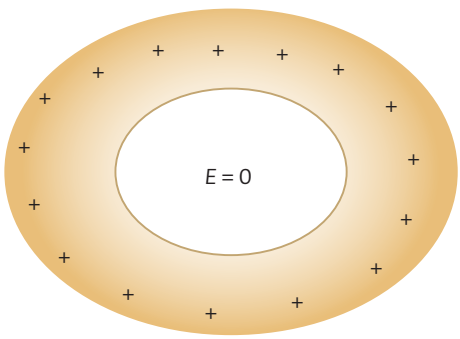


Figura 2.22. O campo elétrico no interior de um condutor oco eletrizado, em equilíbrio eletrostático, é nulo.

Dessa maneira, uma cavidade no interior de um condutor é uma região que não sofre efeitos elétricos produzidos externamente, pois o campo elétrico nessa cavidade é sempre nulo e não há carga elétrica distribuída em sua parede (a carga se localiza na superfície externa do condutor). Por esse motivo, um condutor oco pode ser usado



Dennis Hallinan/Alamy/Latinstock

Figura 2.23. Avião sendo atingido por um raio. Flórida, Estados Unidos.

As imagens desta página estão representadas fora de proporção.

para produzir uma **blindagem eletrostática**: quando queremos proteger um aparelho qualquer contra influências elétricas, nós o envolvemos com uma capa metálica, isto é, nós o colocamos em uma cavidade no interior de um condutor. Nessas condições, dizemos que o aparelho está **blindado**, porque nenhum fenômeno elétrico externo afetará o seu funcionamento. Pessoas que estejam dentro de um avião que é atingido por um raio não serão eletrocutadas, pois a carcaça metálica do avião isola o seu interior das influências externas **(figura 2.23)**.

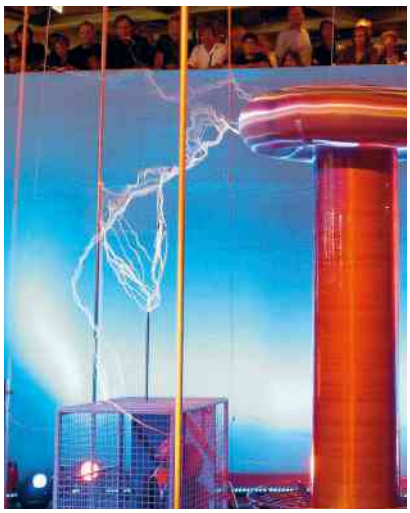
O poder de blindagem de uma capa metálica já era conhecido por Faraday, que, para comprová-lo experimentalmente, realizou uma experiência que se tornou bastante conhecida.

Tendo em suas mãos um eletroscópio, Faraday entrou no interior de uma gaiola metálica, a qual foi, a seguir, altamente eletrizada por seu auxiliar. Apesar de a superfície da gaiola não ser contínua, ela constitui uma blindagem bastante eficaz, de modo que Faraday nada sofreu nem observou qualquer deflexão nas folhas do eletroscópio **(figura 2.24)**.

A fotografia da **figura 2.24** mostra uma blindagem eletrostática. Uma máquina elétrica lança um poderoso raio sobre a gaiola, mas a pessoa, no interior, encontra-se totalmente protegida contra os efeitos desse raio artificial, pois a carga elétrica se distribui na superfície e o campo magnético é nulo em seu interior.

Sugestão de leitura: BRAGA, M.; REIS, J. C.; GUERRA, A. *Faraday e Maxwell* – Eletromagnetismo: da indução aos dínamos. São Paulo: Atual, 2004.

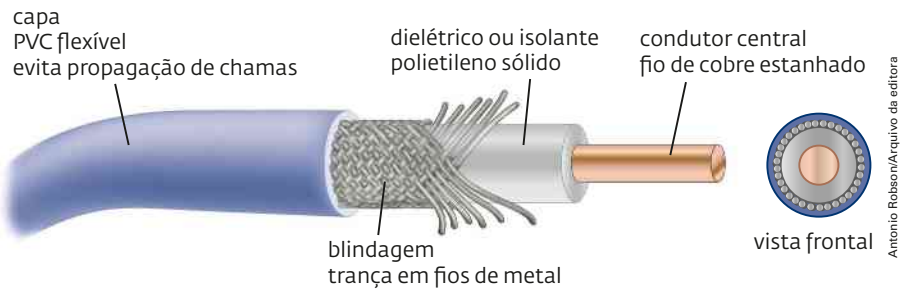
Com o objetivo de apresentar as teorias do eletromagnetismo desenvolvidas no século XIX, a obra destaca, em particular, a importância dos trabalhos de Faraday e de Maxwell no desenvolvimento de motores elétricos que seriam essenciais para permitir o desenvolvimento tecnológico nas fábricas a partir da geração de energia elétrica.



Peter Steffen/DPA/Agência France-Presse

Figura 2.24. Uma estrutura metálica isola o interior da gaiola protegendo as pessoas contra efeitos elétricos externos. Faraday foi o primeiro a comprovar esse efeito da blindagem eletrostática mantendo-se no interior de uma gaiola metálica altamente eletrizada.

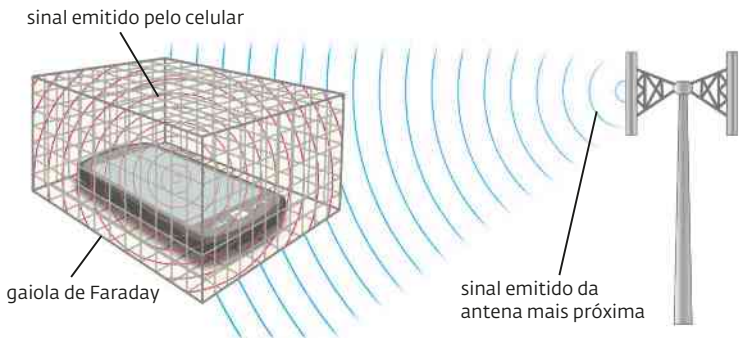
A blindagem eletrostática também é utilizada em cabos coaxiais, utilizados em transmissão de sinais de TV. O fio interno do cabo coaxial é envolvido por um tecido entremeado com finos fios metálicos, além de uma capa de alumínio **(figura 2.25)**.



Antonio Robson/Arquivo da editora

Figura 2.25. O fio interno do cabo coaxial é envolvido por um tecido entremeado com finos fios metálicos, além de uma capa de alumínio. Procura-se, assim, blindar o fio interno contra efeitos elétricos externos. Representação sem escala e em cores fantasia.

Uma gaiola de Faraday pode ser utilizada para bloquear ondas eletromagnéticas emitidas pelos celulares **(figura 2.26)**. Isso acontece porque essas ondas são constituídas de campos elétricos e magnéticos. Para que haja isolamento eletromagnético, ou seja, para que a gaiola bloqueie tanto os sinais internos emitidos quanto os externos, os comprimentos de onda devem ser superiores ao tamanho da malha da grade. Caso o comprimento de onda seja próximo do tamanho da malha da grade, o fenômeno não acontecerá, como é o caso da luz, que também é uma onda eletromagnética, mas consegue entrar na gaiola e nos permite enxergar o celular que está lá dentro.



Antonio Robson/Arquivo da editora

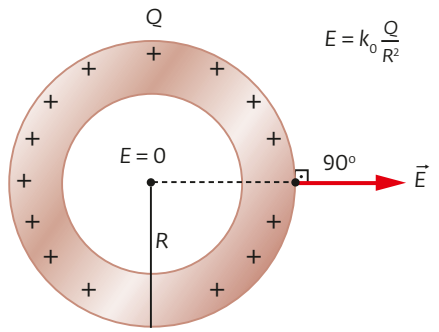
Figura 2.26. A gaiola de Faraday bloqueia o sinal emitido pelo celular e o sinal externo enviado pela antena mais próxima.

Exemplo

Uma esfera metálica oca, de raio *R*, encontra-se no ar, eletrizada positivamente com uma carga *Q*.

a) Desenhe o vetor campo elétrico em um ponto externo bem próximo da superfície dessa esfera.

O campo elétrico próximo à superfície de um condutor é perpendicular a essa superfície. Então, no caso da esfera, o vetor $\vec{E}$ deve ter a direção radial, como mostra a **figura 2.27**.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 2.27. Para o exemplo da seção 2.4.

b) Qual é a expressão que nos permite calcular a intensidade do campo elétrico em um ponto externo próximo à superfície da esfera?

Para pontos exteriores à esfera, tudo se passa como se sua carga estivesse concentrada em seu centro, isto é, para esses pontos é válida a expressão $E = k_0 \frac{Q}{r^2}$, em que *r* é a distância do ponto ao centro da esfera. Então, em um ponto próximo à superfície, temos $r = R$. Assim, nesse ponto, a intensidade do campo é:

$$E = k_0 \frac{Q}{R^2}$$

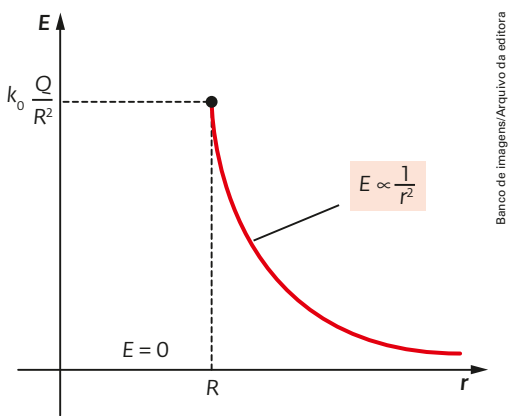
As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

c) Qual é o valor do campo elétrico em pontos do interior da esfera?

Nesses pontos, a expressão $E = k_0 \frac{Q}{r^2}$ não é mais válida, pois, no interior de um objeto metálico qualquer (em equilíbrio eletrostático), temos $E = 0$.

d) Mostre, em um diagrama, o aspecto do gráfico *E* × *r*, em que *E* é a intensidade do campo criado pela esfera e *r* é a distância do ponto ao centro da esfera.

Esse diagrama tem o aspecto mostrado na **figura 2.28**. Observe que, de $r = 0$ a $r = R$ (interior da esfera), temos $E = 0$. Para pontos exteriores, o campo tem o valor $E = k_0 \frac{Q}{R^2}$ próximo à superfície e diminui à medida que *r* aumenta (inversamente proporcional ao quadrado de *r*).



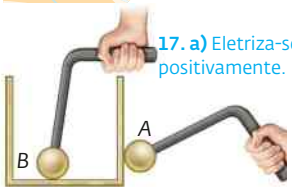
Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 2.28. Para o exemplo da seção 2.4.

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

17. b) Não, porque não há carga elétrica na superfície interna do recipiente.

17. Um recipiente metálico, de forma cilíndrica, está eletrizado positivamente. Uma pessoa, segurando por meio de um cabo isolante uma pequena esfera também metálica, encosta essa esfera nos pontos *A* e *B* do recipiente, como mostra a figura ao lado.



Paulo César Pereira/Arquivo da editora

17. a) Eletriza-se positivamente.

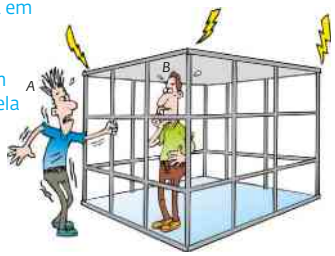
a) Quando o contato é feito em *A*, a esfera se eletriza positivamente, negativamente ou não adquire carga elétrica?

b) Quando o contato é feito em *B*, a esfera se eletriza? Por quê?

18. Uma gaiola metálica possui uma carga em equilíbrio eletrostático. Duas pessoas, *A* e *B*, encontram-se em contato com a gaiola nas posições mostradas na figura a seguir.

Não escreva no livro!

18. a) Porque A se eletriza em contato com a superfície externa da gaiola.
b) Por causa da blindagem eletrostática produzida pela gaiola, no seu interior.



João X. de Campos/Arquivo da editora

a) Por que os cabelos de *A* se apresentam eriçados?

b) Por que em *B* esse efeito não é observado?

19. Um estudante verificou que a presença de uma carga *Q* estava perturbando o funcionamento de um aparelho elétrico *P* (próximo de *Q*). Desejando evitar a perturbação, ele envolveu a carga *Q* com uma cúpula metálica, como mostra a figura deste exercício. Agindo dessa maneira, ele não conseguiu seu objetivo. Como ele deveria ter procedido (sem afastar *Q* do aparelho)?

Deveria ter envolvido *P* com a cúpula metálica.



João X. de Campos/Arquivo da editora

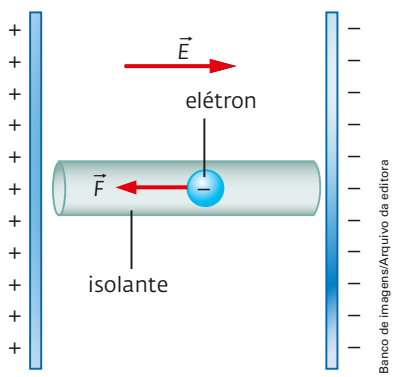
20. Um pedaço de borracha é atritado em certa região de sua superfície, adquirindo uma carga negativa naquela região. Essa carga se distribuirá na superfície de borracha? Por quê?
Não, porque a borracha é isolante.

2.5 Rigidez dielétrica – poder das pontas

Um isolante pode se tornar condutor

Os dielétricos, ou isolantes, são substâncias nas quais os elétrons estão fortemente ligados aos núcleos dos átomos, isto é, não existem cargas livres na estrutura interna desses materiais.

Suponha, entretanto, que um campo elétrico seja aplicado a um objeto isolante colocando-o, por exemplo, entre duas placas eletrizadas, como mostra a **figura 2.29**. Nessas condições, uma força elétrica atuará sobre todos os elétrons do isolante, tendendo a arrancá-los de seus átomos. Se a intensidade do campo elétrico não for muito grande, os elétrons continuarão ligados aos núcleos de seus átomos e a força elétrica provocará apenas uma polarização do dielétrico.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 2.29. Substância isolante colocada em um campo elétrico uniforme. Representação sem escala e em cores fantasia.

Aumentando-se a intensidade do campo aplicado ao isolante, o valor da força que atuará nos elétrons também aumentará. Para certo valor do campo elétrico, essa força será suficiente para arrancar um ou mais elétrons de cada átomo e eles passarão a ser elétrons livres. Então, como o material possui agora um número muito grande de elétrons livres em sua estrutura, ele terá se transformado em um bom condutor de eletricidade. Esse processo pode ocorrer com qualquer isolante, dependendo apenas do valor do campo elétrico aplicado, como veremos a seguir.

O que é rigidez dielétrica

O maior valor do campo elétrico que pode ser aplicado a um isolante sem que ele se torne condutor é denominado **rigidez dielétrica do material**. A rigidez dielétrica varia de um material para outro, pois, como era de esperar, alguns materiais suportam campos muito intensos mantendo-se ainda como isolantes, enquanto outros tornam-se condutores mesmo sob a ação de campos elétricos de intensidades relativamente baixas.

Assim, verifica-se experimentalmente que a rigidez dielétrica do vidro pirex é $14 \cdot 10^6$ N/C, enquanto a da mica (malacacheta) pode atingir $100 \cdot 10^6$ N/C. Já a rigidez dielétrica do ar é bem menor, valendo cerca de $3 \cdot 10^6$ N/C. Enquanto a intensidade do campo elétrico aplicado a uma massa de ar for inferior a $3 \cdot 10^6$ N/C, esse ar será isolante. Quando o campo aplicado ultrapassar esse valor, o ar se tornará um condutor.

A centelha elétrica

As ideias mencionadas anteriormente permitem-nos entender por que uma centelha elétrica salta de um objeto eletrizado para outro colocado próximo a ele.

Consideremos, por exemplo, um distúrbio na rede elétrica que provoque um arco elétrico, seguido da interrupção do fornecimento de energia elétrica. O arco elétrico é formado em um meio isolante, como uma camada de ar, somente se o campo elétrico criado entre os fios for superior a $3 \cdot 10^6$ N/C, isto é, se a intensidade do campo ultrapassar o valor da rigidez dielétrica do ar, este se tornará condutor. Caso o valor seja inferior, o ar entre os fios permanecerá isolante e impedirá que haja passagem de carga de um fio para outro. Quando o ar se torna um condutor, este possui um grande número de elétrons livres, apresentando íons positivos e negativos. Esses íons são atraídos pelo fio e movimentam-se através do ar fazendo com que haja uma descarga elétrica **(figura 2.30)**. Essa descarga vem acompanhada de uma centelha (emissão de luz) e de um ruído (estalo) causado pela expansão do ar, que se aquece com a descarga.

Portanto, sempre que observamos uma "faísca elétrica" saltar de um objeto para outro (do pente para o cabelo, de uma roupa de náilon para o corpo, entre os terminais de um interruptor elétrico, etc.), podemos concluir que a rigidez dielétrica do ar situado entre esses objetos foi ultrapassada e ele se tornou condutor.



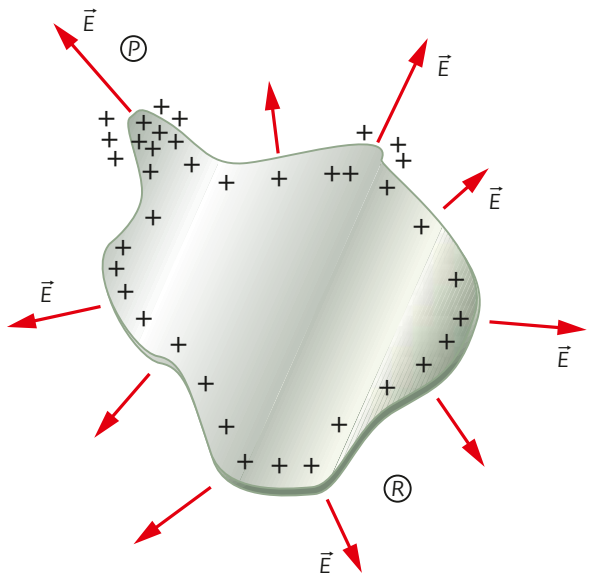
Reprodução/<http://www.planeta.coppe.ufrj.br/>

Figura 2.30. Arco elétrico formado na rede elétrica por curto-circuito.

O que é "poder das pontas"

Um fenômeno interessante, relacionado com o conceito de rigidez dielétrica, denomina-se **poder das pontas**. Há mais de duzentos anos os cientistas observaram que um condutor que apresenta em sua superfície uma região pontiaguda dificilmente se mantém eletrizado, pois a carga elétrica fornecida a ele escapa através da ponta.

O fenômeno do poder das pontas ocorre porque, em um condutor eletrizado, a carga tende a se acumular nas regiões pontiagudas. Na **figura 2.31**, temos um bloco metálico com uma carga elétrica que se distribui em sua superfície.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 2.31. O campo elétrico nas pontas de um condutor eletrizado é maior do que nas regiões mais planas. Representação sem escala e em cores fantasia.

Observe, entretanto, que essa distribuição não é uniforme: em *P*, onde há uma ponta acentuada, há um grande acúmulo de cargas elétricas e em *R*, que é uma região quase plana, a concentração de cargas é muito menor. Em virtude dessa distribuição, o campo elétrico próximo às pontas do condutor é muito mais intenso do que nas proximidades das regiões mais planas. Na **figura 2.31**, os vetores que representam o campo elétrico em cada ponto próximo ao condutor foram traçados de acordo com esse resultado.

Assim, se aumentarmos continuamente a carga elétrica no condutor, a intensidade do campo elétrico em torno dele aumentará também de forma gradativa. Na região mais pontiaguda (como *P*, na **figura 2.31**), o valor da rigidez dielétrica do ar será ultrapassado antes que isso ocorra nas demais regiões. Portanto, será nas proximidades da região pontiaguda que o ar se tornará condutor e, consequentemente, será através da ponta que a carga do bloco metálico se escoará.

Mesmo que um objeto metálico esteja pouco eletrizado, o campo elétrico próximo a uma ponta pode ser muito elevado. É por isso que, quando um condutor possui uma ponta muito acentuada, não conseguimos dar a ele uma carga apreciável, pois o campo elétrico próximo a essa ponta facilmente ultrapassa a rigidez dielétrica do ar. Para que isso não ocorra, quando desejamos acumular uma certa carga elétrica na superfície de um condutor, devemos dar a ele uma forma arredondada (sem pontas), como a bola de plasma apresentada na abertura desta unidade.

APLICAÇÕES DA FÍSICA

Como funcionam os para-raios?

O poder das pontas encontra uma importante aplicação na construção dos para-raios, os quais foram inventados pelo cientista americano Benjamin Franklin no século XVIII. Ele observou que os relâmpagos eram muito semelhantes às centelhas elétricas que ele via saltar entre dois objetos eletrizados em seu laboratório. Suspeitou, então, de que os raios fossem enormes centelhas causadas por eletricidade que, por algum processo, desenvolvia-se nas nuvens. Para verificar sua hipótese, ele realizou uma perigosa experiência, que se tornou famosa.

Conta-se que, durante uma tempestade, Franklin empinou uma pipa de seda presa em uma linha que possuía uma chave de metal na tentativa de transferir a eletricidade, que ele acreditava existir nas nuvens, para alguns aparelhos de seu laboratório.

Alguns historiadores acreditam que, devido aos riscos do experimento previamente conhecidos por Franklin, possivelmente ele não fizera o experimento exatamente do jeito que descreveu. De qualquer forma, a descoberta de Franklin sobre a natureza elétrica dos raios é fruto de seus estudos, cujos registros são anteriores à realização do experimento da pipa proposto em 1752.

O para-raios consiste essencialmente em uma ou várias pontas metálicas e deve ser colocado no ponto mais elevado do local a ser protegido **(figura 2.32)**. O para-raios é ligado à terra por meio de um bom condutor (fio metálico grosso), que normalmente termina em uma grande placa enterrada no solo, como mostra a **figura 2.33.a**.

Quando uma nuvem eletrizada passa sobre o local onde o para-raios foi colocado, o campo elétrico estabelecido entre a nuvem e a terra torna-se muito intenso nas proximidades de suas pontas **(figura 2.33.b)**. Então, o ar em torno das pontas ioniza-se, tornando-se condutor e fazendo com que a descarga elétrica se processe através dessas pontas. Em outras palavras, há maior probabilidade de o raio "cair" (como se diz popularmente) no para-raios do que em outro local da vizinhança. Naturalmente, como o para-raios está ligado ao solo, a carga elétrica que ele recebe da nuvem é transferida para a terra sem causar danos. Estudos estatísticos mostram que a ação protetora do para-raios se estende a uma distância aproximadamente igual ao dobro de sua altura.



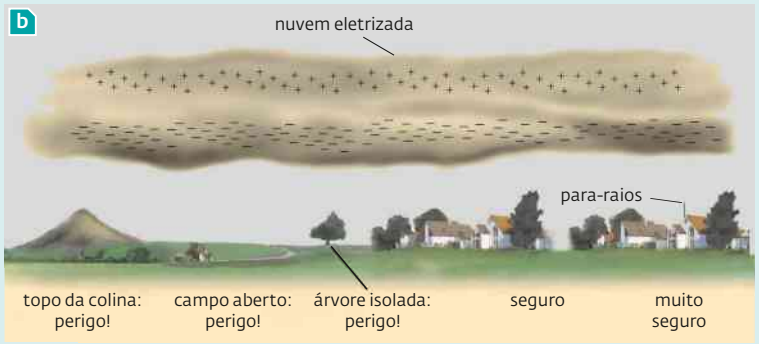
Gary Hershorn/Corbis/Latinstock

Figura 2.32. Para-raios instalado no ponto mais alto do local a ser protegido. Nova York, Estados Unidos, 2014.

QUESTÕES

1. Baseando-se nas informações desta seção, podemos inferir que é extremamente perigoso ficar em um campo aberto ou próximo a estruturas metálicas durante uma tempestade de raios. Existe uma lenda que relata que espelhos dentro de casa atraem raios, por isso se devem manter fechadas as cortinas durante as tempestades de raios. Faz algum sentido essa preocupação?
2. Há uma crença popular segundo a qual "um raio nunca cai duas vezes em um mesmo lugar". Lembrando-se do "poder das pontas" e do que estudou nesta seção sobre a formação dos raios, você julga que essa crença tem algum fundamento científico?





Ilustrações: Antonio Robson/Arquivo da editora

Figura 2.33. O para-raios exerce ação protetora contra os danos causados pelos raios. Representação sem escala e em cores fantasia.

1. Não existe indício de que espelhos atraiam raios.
2. Não; qualquer monumento alto e pontiagudo pode ser atingido inúmeras vezes por raios durante as tempestades.

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

Não escreva no livro!

21. Observe os dados fornecidos nesta seção e responda:

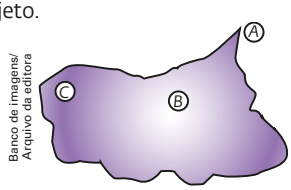
a) Qual é a explicação para o fato de a mica ter sido usada durante muito tempo como isolante elétrico em diversos aparelhos (como em capacitores mais antigos)?

b) Você poderia usar um vidro pirex como isolante elétrico em um aparelho no qual ele estaria submetido a um campo elétrico de $2{,}0 \cdot 10^7$ N/C? Por quê?

22. a) Em um dia em que a umidade relativa do ar é elevada, observa-se que o limite de carga que uma esfera metálica pode receber torna-se muito menor. Que conclusão podemos tirar sobre a rigidez dielétrica do ar nessas condições?

b) Nos laboratórios de Física, quando se deseja que uma esfera acumule cargas elétricas elevadas, ela é mergulhada em óleo. Que conclusão você pode tirar sobre a rigidez dielétrica do óleo? É maior do que a do ar.

23. Considere um objeto metálico, no ar, com a forma mostrada na figura a seguir (sem escala e em cores fantasia). Eletrizando-se esse objeto, transferindo-se para ele uma carga que é aumentada gradualmente, observa-se que há um limite para a carga que pode ser armazenada no objeto.



Banco de imagens/ Arquivo da editora

a) Após esse limite ser atingido, por qual região do objeto a carga escoa para o ar? Por quê?

b) Suponha que uma esfera metálica, no ar, tenha uma superfície externa de área igual à do objeto mostrado na figura deste exercício. A carga máxima que pode ser armazenada nessa esfera será maior, menor ou igual àquela que pode ser armazenada no objeto? Explique.

24. Um para-raios, no alto da torre de uma igreja, está situado a 30 m de altura. Três pessoas, durante uma tempestade, estão às seguintes distâncias da base da torre: 50 m, 40 m e 80 m, respectivamente. Há alguma delas que não está protegida pelo para-raios? Por quê?

25. a) Um material isolante elétrico pode tornar-se um condutor. Em que condições isso ocorre?

b) O que é rigidez dielétrica de um isolante?

26. Sabe-se que quando uma esfera condutora, no ar, recebe uma carga elétrica, que vai sendo aumentada gradualmente, há um limite para o valor da carga que a esfera pode reter. Após esse limite ser atingido:

a) O que acontece com a carga que é transferida à esfera?

b) O que se pode afirmar sobre o valor do campo elétrico na superfície da esfera?

21. a) A mica possui rigidez dielétrica elevada.
b) Não, pois ao ser submetido ao campo elétrico citado o pirex se torna condutor e não poderia ser usado como isolante.
22. a) A rigidez dielétrica do ar diminui quando aumenta a umidade do ar.
23. a) Pela ponta *A*, porque o campo elétrico é mais intenso próximo à ponta mais aguda.
b) Maior, porque a esfera não possui pontas, e para que a rigidez dielétrica do ar em torno dela seja atingida, será necessário fornecer à esfera uma carga maior.
24. Apenas a pessoa a 80 m da torre, porque a ação protetora de um para-raios se estende a uma distância aproximadamente igual ao dobro de sua altura.
25. a) Quando é aplicado a ele um campo elétrico suficiente para tornar livres alguns elétrons dos átomos de sua estrutura.
26. a) Escoa para o ar.
b) É superior à rigidez dielétrica do ar.
25. b) É o maior valor do campo elétrico que pode ser aplicado ao isolante sem que ele se torne um condutor.

PRATIQUE FÍSICA

EM EQUIPE

Não escreva no livro!

O fenômeno da blindagem eletrostática visto na seção 2.4 é um dos mais interessantes. De acordo com a teoria, se você utilizar uma peneira de metal, não haverá campo elétrico no interior dela. Por outro lado, se você utilizar uma peneira de plástico, esta não terá efeito nenhum sobre o campo elétrico.

Desenvolva um experimento com pedaços de papel e um pente para comparar o efeito das duas peneiras e responda às seguintes questões:

a) Foi possível verificar a teoria? Explique como os seus resultados puderam confirmar a teoria ou não.

b) Se não foi possível comprovar a teoria com o seu experimento, quais modificações seriam necessárias para que ela fosse verificada? Se foi possível, como você pode garantir que o efeito é da blindagem eletrostática e não da distância entre o pente e os pedaços de papel?


Eduardo Santaliestra/Estúdio Paulista

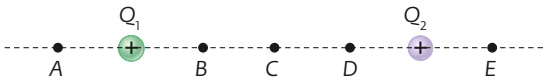
As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

PROBLEMAS E TESTES

Não escreva no livro!

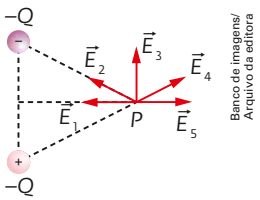
1. Considere as duas cargas puntuais positivas Q_1 e Q_2 mostradas na figura deste problema. Sabe-se que $Q_1 > Q_2$ e que o campo elétrico criado por essas cargas é nulo em um dos pontos mostrados na figura. Qual é esse ponto? Ponto *D*.

Banco de imagens/ Arquivo da editora



2. Duas cargas puntuais, de mesmo valor e de sinais contrários, criam um campo elétrico no ponto *P* mostrado na figura deste problema. Qual dos vetores indicados em *P* melhor representa o campo elétrico nesse ponto? c

a) $\vec{E}_1$
b) $\vec{E}_2$
c) $\vec{E}_3$
d) $\vec{E}_4$
e) $\vec{E}_5$



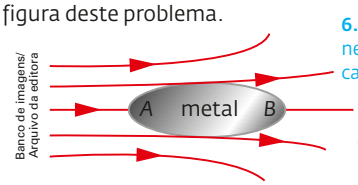
Banco de imagens/ Arquivo da editora

3. Uma esfera metálica, de 20 cm de raio, está eletrizada positivamente com uma carga de 2,0 μC. Determine a intensidade do campo elétrico criado pela carga dessa esfera nos seguintes pontos:
a) no centro da esfera; Zero.
b) a 10 cm do centro da esfera; Zero.
c) em um ponto exterior, muito próximo da superfície da esfera; $4{,}5 \cdot 10^5$ N/C
d) em um ponto exterior, a 10 cm da superfície da esfera. $2{,}0 \cdot 10^5$ N/C

4. Verifica-se que em pontos da atmosfera, próximos à superfície da Terra, existe um campo elétrico de aproximadamente 100 N/C, dirigido verticalmente para baixo. Sabe-se que esse campo é devido a uma carga elétrica existente na Terra.
a) Qual é o sinal dessa carga? Negativo.
b) Qual é o seu valor? (Considere o raio da Terra igual a 6 000 km.) $4 \cdot 10^5$ C

5. Considere um objeto metálico eletrizado envolvido pelo ar atmosférico. Sabe-se que, se o campo elétrico próximo à superfície desse objeto torna-se superior a $3 \cdot 10^6$ N/C, o ar passa a se comportar como um condutor e, então, o objeto metálico se descarrega. Baseando-se nessas informações, calcule qual é a maior carga que pode ser dada a uma esfera metálica, de raio $R = 10$ cm, no ar, sem que ela se descarregue. 3,3 μC

6. Considere um objeto metálico descarregado, *AB*, colocado em um campo elétrico cujas linhas de força estão mostradas na figura deste problema.



Banco de imagens/ Arquivo da editora

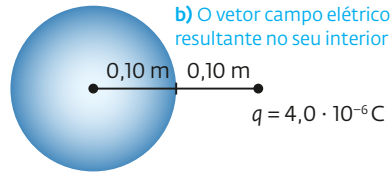
6. a) Em *A*, carga negativa e, em *B*, carga positiva.

6. c) $\vec{F}_A$ para a esquerda e $\vec{F}_B$ para a direita.

a) Em virtude da indução eletrostática no objeto metálico, qual será o sinal da carga em sua extremidade *A*? E em *B*?
b) A intensidade do campo elétrico nas proximidades de *A* será maior, menor ou igual à intensidade próxima de *B*? Maior.
c) Quais são os sentidos das forças elétricas $\vec{F}_A$ e $\vec{F}_B$ que atuarão nas extremidades *A* e *B*?
d) Então, sob a ação dessas forças, o objeto permanecerá em repouso, tenderá a se deslocar para a direita ou tenderá a se deslocar para a esquerda? Tenderá a se deslocar para a esquerda.

7. (UFRJ) Uma partícula com carga positiva $q = 4{,}0 \cdot 10^{-6}$ C é mantida em repouso diante de uma esfera maciça condutora isolada de raio 0,10 m e carga total nula. A partícula encontra-se a uma distância de 0,20 m do centro da esfera, conforme ilustra a figura a seguir. A esfera e as cargas que foram induzidas em sua superfície também se encontram em repouso, isto é, há equilíbrio eletrostático.

Banco de imagens/ Arquivo da editora



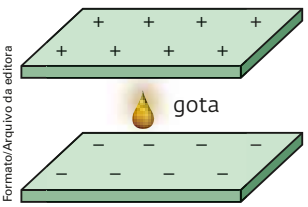
esfera maciça condutora

b) O vetor campo elétrico resultante no seu interior é nulo.

Sabendo que a constante de proporcionalidade na lei de Coulomb é $k = 9{,}0 \cdot 10^9$ Nm²/C², determine o módulo e indique a direção e o sentido:
a) do campo elétrico no centro da esfera condutora devido à partícula de carga *q*; $E = 9{,}0 \cdot 10^5$ N/C, horizontal para a esquerda.
b) do campo elétrico no centro da esfera condutora devido às cargas induzidas em sua superfície.

8. (UFMG) Em um experimento, o professor Ladeira observa o movimento de uma gota de óleo, eletricamente carregada, entre duas placas metálicas paralelas, posicionadas horizontalmente. A placa superior tem carga positiva e a inferior, negativa, como representado nesta figura:

Formato/Arquivo da editora



Considere que o campo elétrico entre as placas é uniforme e que a gota está apenas sob a ação desse campo e da gravidade. Para um certo valor do campo elétrico, o professor Ladeira observa que a gota cai com velocidade constante. Com base nessa situação, é correto afirmar que a carga da gota é: c
a) negativa e a resultante das forças sobre a gota não é nula.
b) positiva e a resultante das forças sobre a gota é nula.
c) negativa e a resultante das forças sobre a gota é nula.
d) positiva e a resultante das forças sobre a gota não é nula.

9. (UFC-CE) Uma partícula de massa *m* e carga elétrica *q* é largada do repouso de uma altura 9*H*, acima do solo. Do solo até uma altura $h' = 5H$, existe um campo elétrico horizontal de módulo constante *E*. Considere a gravidade local de modulo constante *g*, a superfície do solo horizontal e despreze quaisquer efeitos de dissipação de energia. Determine:
a) o tempo gasto pela partícula para atingir a altura *h'*; $t' = \sqrt{\frac{8H}{g}}$
b) o tempo gasto pela partícula para atingir o solo; $t_T = \sqrt{\frac{18H}{g}}$
c) o tempo gasto pela partícula sob ação do campo elétrico; Igual a *t'*.
d) o módulo do deslocamento horizontal da partícula, desde o instante em que a partícula é largada até o instante em que a partícula atinge o solo. $D = 8\sqrt{\frac{qEH}{mg}}$



Rogério Reis/Pulsar Imagens

Os eletricistas que fazem reparos nas redes elétricas trabalham com equipamentos de segurança apropriados para evitar choques elétricos.

CAPÍTULO 3

Potencial elétrico

Infelizmente, um tipo específico de crime comumente recebe destaque na imprensa nacional: o roubo de fios e cabos das redes elétricas e telefônicas. Os fios e cabos são feitos de cobre, metal de grande valor no mercado.

Segundo as reportagens, só na cidade de São Paulo, mais de 700 mil quilômetros de fios e cabos são roubados por ano. Quem rouba, vende esse produto nos comércios de sucata e ferro-velho. Por sua vez, esses comerciantes repassam o cobre para as indústrias de pequeno e médio portes.

Nessa atividade ilícita há sempre o risco de os criminosos, principalmente aqueles que roubam fios elétricos energizados, morrerem eletrocutados, pois, sem utilizar equipamentos de segurança, como luvas e botas de borracha, além de ferramentas adequadas, a probabilidade de ocorrer um acidente é muito grande, em razão da diferença de potencial elétrico dos fios e cabos.

PARA INICIAR A CONVERSA

Qual é o metal utilizado na fabricação de fios e cabos elétricos?

Cobre.

Por que é obrigatória a utilização de luvas, botas de borracha e ferramentas adequadas para os profissionais que exercem atividades que envolvam eletricidade?

Pelo fato de esses materiais serem isolantes elétricos, diminuindo assim os riscos de um possível acidente mais grave.

Além da rede elétrica, onde mais é possível medir a diferença de potencial?

Em baterias, pilhas, geradores, etc.

3.1 Diferença de potencial

O que é voltagem

Suponha um objeto eletrizado criando um campo elétrico no espaço à sua volta. Considere dois pontos, *A* e *B*, nesse campo elétrico, como mostra a **figura 3.1**. Se colocarmos uma carga de prova positiva q em *A*, atuará sobre ela uma força elétrica $\vec{F}$ de repulsão devida ao campo que deslocará a carga de *A* para *B*.

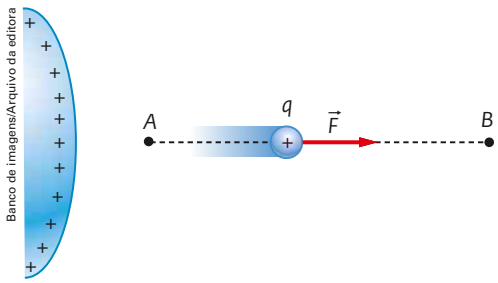


Figura 3.1. A diferença de potencial entre os pontos *A* e *B* é dada pela expressão $V_A - V_B = \frac{\mathcal{C}_{AB}}{q}$. Representação sem escala e em cores fantasia.

Nesse deslocamento a força elétrica estará **realizando um trabalho**, que vamos designar por $\mathcal{C}_{AB}$. Em outras palavras, o trabalho, $\mathcal{C}_{AB}$, representa uma certa quantidade de energia que a força elétrica $\vec{F}$ transfere para a carga q em seu deslocamento de *A* para *B*.

Uma grandeza muito importante no estudo dos fenômenos elétricos está relacionada com esse trabalho. Essa grandeza é denominada **diferença de potencial entre os pontos *A* e *B***, sendo representada por $V_A - V_B$ e definida pela seguinte relação:

$$V_A - V_B = \frac{\mathcal{C}_{AB}}{q}$$

A diferença de potencial ddp também é denominada **voltagem** ou **tensão** entre dois pontos, podendo ser representada por V_{AB} ou simplesmente por V. Assim, quando se diz que a voltagem V_{AB} entre dois pontos é muito grande (alta voltagem) significa que o campo elétrico realiza um grande trabalho sobre uma dada carga que se desloca entre esses pontos, ou seja, a carga recebe do campo grande quantidade de energia em seu deslocamento. Entre os terminais de uma bateria, por exemplo, temos ddp de 12 volts, enquanto a tomada de uma residência pode ter 110 ou 220 volts.

Observe que, como $\mathcal{C}_{AB}$ e q, a diferença de potencial V_{AB} é também uma grandeza escalar.

Da equação $V_{AB} = \frac{\mathcal{C}_{AB}}{q}$, podemos afirmar que, no SI, a unidade de medida da voltagem é 1 J/C. Essa unidade é denominada 1 volt = 1 V, em homenagem ao físico italiano Alessandro Volta, que desenvolveu a primeira pilha. Portanto:

$$1\ \text{V} = 1\ \frac{\text{J}}{\text{C}}$$

Em resumo:

Quando um campo elétrico realiza um trabalho $\mathcal{C}_{AB}$ sobre uma carga de prova positiva q, que se desloca de um ponto *A* para um ponto *B*, a diferença de potencial (ou voltagem) V_{AB} entre esses pontos é obtida dividindo-se o trabalho realizado pelo valor da carga que foi deslocada, isto é:

$$V_{AB} = \frac{\mathcal{C}_{AB}}{q}$$

Na **figura 3.1**, suponha que a carga q se deslocasse de A para B seguindo uma trajetória qualquer, diferente daquela mostrada na figura. Se calculássemos o trabalho que a força elétrica realiza sobre a carga ao longo desse novo caminho, verificaríamos que esse trabalho seria o mesmo que o realizado na primeira trajetória. Portanto, o trabalho realizado pela força elétrica entre dois pontos é o mesmo, qualquer que seja a trajetória seguida pela carga; quando isso acontece, dizemos que a força é conservativa (como é o caso do peso de um objeto e da força elástica de uma mola). Logo, a força elétrica é um exemplo de força conservativa.

Consequentemente, a diferença de potencial entre dois pontos, em um dado campo elétrico, tem um valor único, qualquer que seja a trajetória seguida pela carga de prova usada para calcular essa diferença.

Comentário

O conceito de voltagem está muito relacionado com nossa vida diária. Você já deve ter ouvido falar, por exemplo, que nas residências existem tomadas elétricas de 110 V ou 220 V. Assim, sendo 110 V = 110 J/C, se um aparelho elétrico for ligado nessa tomada **(figura 3.2.a)**, cada carga de 1 C que se deslocar de um terminal para outro (de A para B) receberá 110 J de energia do campo elétrico existente na tomada (a carga, por sua vez, transfere ao aparelho essa energia que recebeu do campo elétrico).

Se a tomada for de 220 V, podemos concluir que cada 1 C receberá 220 J de energia ao se deslocar de um terminal para outro. Do mesmo modo, quando dizemos que a bateria de um automóvel apresenta uma voltagem de 12 V, teremos uma energia de 12 J transferida para cada 1 C que se desloca de um polo para outro dessa bateria **(figura 3.2.b)**.

As imagens desta página estão representadas fora de proporção.



aimy27feb/Shutterstock



Slavoljub Pantelic/Shutterstock

Figura 3.2. Em **a**, uma tomada de 110 V e outra de 220 V, identificada em vermelho para evitar problemas ao ligar os equipamentos à rede elétrica. Em **b**, uma bateria de 12 V utilizada em automóveis.

Sentido do movimento de uma carga

Consideremos dois pontos A e B dentro de um campo elétrico criado por um objeto eletrizado **(figura 3.1)**. Abandonando uma carga positiva em A, a força elétrica $\vec{F}$ que atua sobre ela estará dirigida para B. Logo, quando essa carga se deslocar de A para B, a força elétrica $\vec{F}$ realizará, sobre ela, um trabalho positivo, isto é, $\mathcal{T}_{AB} > 0$. Como $V_A - V_B = \frac{\mathcal{T}_{AB}}{q}$, concluímos que a diferença de potencial entre A e B também é positiva, ou seja, $V_A - V_B > 0$. Nessas condições, dizemos que "o potencial de A é maior que o de B".

Portanto, podemos observar, na **figura 3.1**, que a carga positiva se desloca, sob a ação da força elétrica, do ponto A, onde o potencial é maior, para o ponto B, onde o potencial é menor. Se abandonássemos uma carga negativa entre os pontos A e B da **figura 3.1**, ela se deslocaria, sob a ação da força elétrica (atraída pelo objeto eletrizado), no sentido de B para A. Em outras palavras, a carga negativa tende a se deslocar de pontos onde o potencial é menor para pontos onde ele é maior.

Assim, podemos destacar:

Uma carga positiva abandonada em um campo elétrico tende a se deslocar de pontos onde o potencial é maior para pontos onde ele é menor. Uma carga negativa tenderá a se mover em sentido contrário, isto é, de pontos onde o potencial é menor para pontos onde ele é maior.

Exemplo

a) Suponha que, na figura 3.1, uma carga positiva $q = 2{,}0 \cdot 10^{-7}$ C se deslocasse de *A* para *B* e que o trabalho realizado pela força elétrica sobre ela fosse $\mathcal{C}_{AB} = 5{,}0 \cdot 10^{-3}$ J. Qual seria a diferença de potencial V_{AB} entre *A* e *B*?

A diferença de potencial entre *A* e *B* é dada por:

$$V_{AB} = \frac{\mathcal{C}_{AB}}{q} = \frac{5{,}0 \cdot 10^{-3}}{2{,}0 \cdot 10^{-7}}$$

$$V_{AB} = 2{,}5 \cdot 10^{4}\ \text{V}$$

Observe que, como $\mathcal{C}_{AB}$ foi expresso em joule e q em coulomb, temos V_{AB} expresso em volt (lembre-se de que 1 V = 1 J/C).

b) Se uma carga positiva $q = 6{,}0 \cdot 10^{-6}$ C for abandonada no ponto *A* da figura 3.1, qual será o trabalho que a força elétrica realizará sobre essa carga ao deslocá-la de *A* para *B*?

Da expressão $V_{AB} = \frac{\mathcal{C}_{AB}}{q}$, obtemos: $\mathcal{C}_{AB} = q\,V_{AB}$

Como já determinamos o valor de V_{AB}, teremos:

$$\mathcal{C}_{AB} = q\,V_{AB} = 6{,}0 \cdot 10^{-6} \cdot 2{,}5 \cdot 10^{4}$$

$$\mathcal{C}_{AB} = 0{,}15\ \text{J}$$

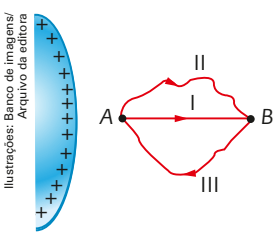
c) Ainda na figura 3.1, considere uma carga negativa deslocando-se, sob a ação da força elétrica, de *B* para *A*. O trabalho realizado por essa força sobre a carga será positivo ou negativo?

A força elétrica que atua nessa carga negativa está dirigida de *B* para *A* e o deslocamento da carga também se efetua nesse sentido. Então, como a força e o deslocamento têm o mesmo sentido, o trabalho realizado será positivo.

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

Não escreva no livro!

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



Ilustrações: Banco de imagens/ Arquivo da editora

1. Considere uma lâmpada ligada à tomada elétrica de uma residência. Verifica-se que um trabalho de 44 J é realizado sobre uma carga de 0,20 C que passa, através da lâmpada, de um terminal a outro dessa tomada.

a) Qual é a diferença de potencial entre os terminais da tomada? 220 volts

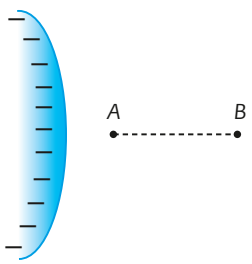
b) Um aparelho é ligado a essa tomada durante um certo tempo, recebendo 1 100 J de energia das cargas elétricas que passam através dele. Qual é o valor total dessas cargas? 5,0 C

2. a) Quando uma carga q se desloca de *A* para *B* ao longo da trajetória I mostrada na figura, o campo elétrico realiza sobre ela um trabalho de $1{,}5 \cdot 10^{-3}$ J. Se essa carga q se deslocasse de *A* para *B* ao longo da trajetória II, o trabalho realizado pelo campo elétrico sobre ela seria maior, menor ou igual a $1{,}5 \cdot 10^{-3}$ J? Igual.

b) Se a carga q fosse transportada de *B* para *A*, ao longo da trajetória III (veja a figura), qual trabalho seria realizado sobre ela pelo campo elétrico? $-1{,}5 \cdot 10^{-3}$ J

c) Então, qual é o trabalho que o campo elétrico realiza sobre uma carga que sai de um certo ponto e volta novamente a ele após percorrer uma trajetória qualquer (trajetória fechada)? Zero.

3. Considere os pontos *A* e *B* no campo elétrico criado por um objeto eletrizado negativamente, como mostra a figura.



3. b) Menor, porque uma carga positiva tende sempre a se deslocar para regiões onde o potencial é menor.

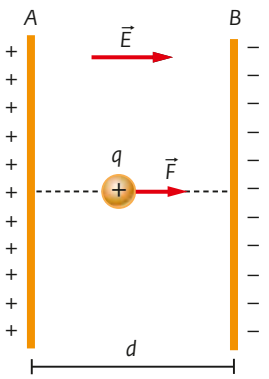
a) Uma carga positiva q é abandonada em um ponto situado entre *A* e *B*. Sob a ação da carga criadora do campo, a carga q tende a se deslocar para *A* ou para *B*? Para *A*.

b) Então, podemos concluir que o potencial de *A* é maior ou menor que o de *B*? Explique.

3.2 Voltagem em um campo uniforme

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

Cálculo de V_{AB} em um campo uniforme



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

Figura 3.3. No campo elétrico uniforme, a diferença de potencial é dada por $V_{AB} = Ed$.

A **figura 3.3** representa duas placas paralelas, separadas por uma distância d e eletrizadas com cargas iguais e de sinais contrários. Entre elas existe um campo uniforme $\vec{E}$, dirigido da placa positiva A para a placa negativa B.

Para calcularmos a diferença de potencial entre essas duas placas, abandonamos uma carga de prova positiva q junto à placa A e determinamos o trabalho $\mathcal{T}_{AB}$ que o campo realiza sobre essa carga ao deslocá-la até a placa B. A voltagem procurada será dada por $V_{AB} = \dfrac{\mathcal{T}_{AB}}{q}$.

Quando o campo é uniforme, a força elétrica $\vec{F}$ que atua em q permanece constante enquanto essa carga se desloca. Como $\vec{F} = q\vec{E}$ e $\vec{E}$ não varia, concluímos que $\vec{F}$ também será constante. Nessas condições, como a força $\vec{F}$ tem a mesma direção e o mesmo sentido do deslocamento, temos:

$$\mathcal{T}_{AB} = Fd \quad \text{ou} \quad \mathcal{T}_{AB} = qEd$$

Então, a voltagem V_{AB} entre as placas será:

$$V_{AB} = \frac{\mathcal{T}_{AB}}{q} = \frac{qEd}{q} \quad \therefore \quad V_{AB} = Ed$$

No SI, a grandeza V_{AB} é dada em volts, q em Coulomb, d em metros e F em newtons.

Essa expressão nos permite calcular a diferença de potencial entre dois pontos quaisquer de um campo uniforme. Deve-se observar, entretanto, que a distância d entre os dois pontos deve ser tomada na direção paralela ao vetor $\vec{E}$. Assim, na **figura 3.4.a**, para calcularmos a diferença de potencial entre os pontos M e N, usamos a expressão $V_{MN} = Ed$, em que d é a distância indicada nessa figura.

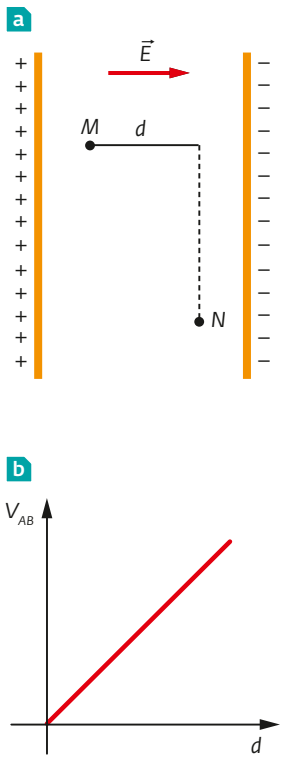


Figura 3.4. Diferença de potencial entre dois pontos, M e N, de um campo elétrico uniforme (**a**) e diagrama $V_{AB} \times d$ (**b**).

Comentários

1) A expressão $V_{AB} = Ed$ nos mostra que a voltagem entre dois pontos em um campo uniforme será tanto maior quanto maior for a intensidade desse campo. Além disso, para um dado valor de $\vec{E}$, vemos que V_{AB} será diretamente proporcional à distância d entre os dois pontos (distância medida na direção de $\vec{E}$). Nesse caso, o gráfico $V_{AB} \times d$ será como aquele mostrado na **figura 3.4.b**.

2) Da relação $V_{AB} = Ed$, obtemos:

$$E = \frac{V_{AB}}{d}$$

que nos permite obter o valor do campo elétrico através da medida da voltagem V_{AB}. A voltagem pode ser obtida no laboratório, por meio de medidas diretas com aparelhos apropriados (voltímetros). Por outro lado, não existem aparelhos que nos permitem medir diretamente a intensidade do campo.

3) Vimos no capítulo anterior que, no SI, a unidade de campo elétrico é 1 N/C. Entretanto, pela expressão $E = \dfrac{V_{AB}}{d}$, vemos que é possível medir o valor de E usando a unidade 1 V/m. Essas unidades são equivalentes, isto é, 1 V/m = 1 N/C.

Assim, quando dizemos que a intensidade de um certo campo elétrico é, por exemplo, $E = 500$ V/m, significa que temos $E = 500$ N/C.

Exemplo

Usando um voltímetro, mediu-se a diferença de potencial entre as placas mostradas na figura 3.3, encontrando-se $V_{AB} = 300$ V. Verificou-se, também, que a distância entre *A* e *B* era $d = 5{,}0$ mm.

a) Calcule a intensidade do campo entre as placas.

Temos $E = \frac{V_{AB}}{d}$. Como $V_{AB} = 300$ V, vem:

$$d = 5{,}0 \text{ mm} = 5{,}0 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Logo:

$$E = \frac{V_{AB}}{d} = \frac{300}{5{,}0 \cdot 10^{-3}} \quad \therefore \quad E = 6{,}0 \cdot 10^4 \text{ V/m}$$

Poderíamos, também, escrever $E = 6{,}0 \cdot 10^4$ N/C.

b) Suponha que a carga *q* mostrada na figura 3.3 tenha o valor $q = 2{,}0 \cdot 10^{-7}$ C. Qual é o valor da força elétrica $\vec{F}$ que atua nessa carga?

A força elétrica que atua sobre uma carga *q*, colocada em um campo elétrico $\vec{E}$, é dada por:

$$F = qE = 2{,}0 \cdot 10^{-7} \cdot 6{,}0 \cdot 10^4 \quad \therefore \quad F = 1{,}2 \cdot 10^{-2} \text{ N}$$

c) Qual o trabalho $\mathcal{C}_{AB}$ que o campo elétrico realiza sobre a carga *q* ao deslocá-la da placa *A* para a placa *B*?

Para o trabalho:

$$\mathcal{C}_{AB} = Fd = 1{,}2 \cdot 10^{-2} \cdot 5{,}0 \cdot 10^{-3} \quad \therefore \quad \mathcal{C}_{AB} = 6{,}0 \cdot 10^{-5} \text{ J}$$

ou $V_{AB} = \frac{\mathcal{C}_{AB}}{q}$:

$$\mathcal{C}_{AB} = qV_{AB} = 2{,}0 \cdot 10^{-7} \cdot 300 \quad \therefore \quad \mathcal{C}_{AB} = 6{,}0 \cdot 10^{-5} \text{ J}$$

Em ambos os casos obtemos o mesmo valor para $\mathcal{C}_{AB}$.

Potencial em um ponto

O potencial em um ponto é a diferença de potencial entre esse ponto e um outro, tomado como referência. Por exemplo, para calcularmos o potencial em um ponto *A* devemos escolher, arbitrariamente, um outro ponto *P*, denominado nível de potencial, ao qual se atribui um potencial nulo ($V_P = 0$). Em seguida, calcula-se a diferença de potencial entre *A* e *P* e obtemos o potencial de *A* (V_A) em relação a *P*.

Exemplo

Consideremos que entre as duas placas da figura 3.3 existe uma diferença de potencial $V_A = V_B = 300$ V. Qual o potencial de *A* em relação a *B*? E o potencial de *B* em relação a *A*?

Se escolhermos a placa *B* como nível de potencial, teremos $V_B = 0$ e, então, $V_A = 300$ V, isto é, o potencial de *A* é 300 V em relação a *B* (o potencial de *A* está 300 V acima do potencial de *B*). Poderíamos, contudo, ter escolhido a placa *A* como referência para cálculo dos potenciais. Nesse caso, teríamos $V_A = 0$ (nível) e, então, $V_B = -300$ V, isto é, o potencial de *B*, em relação à placa *A*, é −300 V (o potencial de *B* está 300 V abaixo do nível).

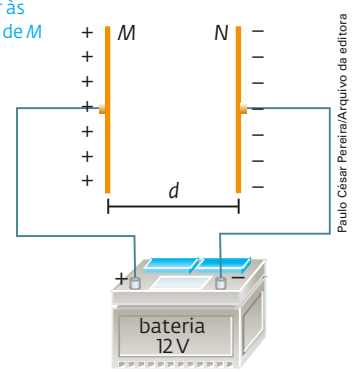
Observe que o potencial em um ponto não tem um valor único. Esse valor depende do nível escolhido como referência.

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

Não escreva no livro!

4. Ligando-se os polos de uma bateria a duas placas metálicas paralelas *M* e *N* (veja a figura a seguir), ficará estabelecida, entre essas placas, uma voltagem $V_{MN} = 12\,V$.

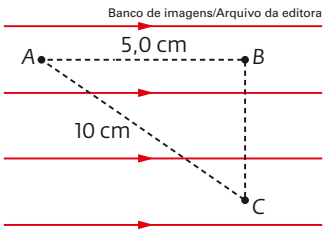
a) Perpendicular às placas e dirigido de *M* para *N*.
b) $6{,}0 \cdot 10^3\,N/C$



Paulo César Pereira/Arquivo da editora

a) Desenhe no caderno uma cópia da figura deste exercício e o vetor $\vec{E}$, que representa o campo entre as placas.

b) Supondo que a distância entre *M* e *N* seja $d = 2{,}0$ mm, calcule a intensidade do campo entre elas.



Banco de imagens/Arquivo da editora

5. A figura ao lado mostra as linhas de força de um campo elétrico uniforme, cuja intensidade vale $E = 1{,}5 \cdot 10^4\,N/C$. Observe a figura e determine:

a) V_{AB} 750 V b) V_{BC} Zero. c) V_{AC} 750 V

6. Verifica-se que, aumentando a distância *d* entre duas placas metálicas eletrizadas (de tal modo que o valor de *d* permaneça pequeno em relação ao tamanho das placas), o campo elétrico entre elas não se altera. Entretanto, a relação $V_{AB} = Ed$ nos mostra que V_{AB} cresce à medida que *d* aumenta.
No quadro seguinte são apresentados valores de V_{AB} entre duas placas metálicas, medidos em um laboratório, enquanto a distância *d* entre as placas era aumentada:

d (mm)	V_{AB} (V)
2,0	100
4,0	200
6,0	300

a) Com os dados da tabela, construa no caderno o gráfico $V_{AB} \times d$. O aspecto do gráfico que você obteve era o esperado? Sim.

b) Qual é a grandeza representada pela inclinação desse gráfico? A intensidade do campo.

7. a) Calcule, em V/mm, a inclinação do gráfico obtido no exercício anterior. 50 V/mm

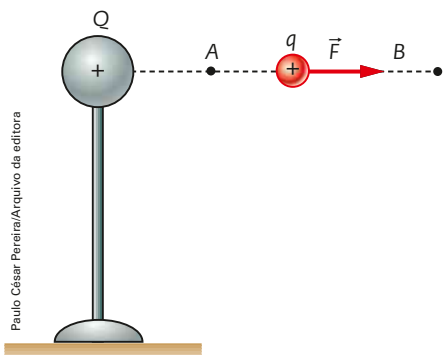
b) Expresse, em V/m e em N/C, a intensidade do campo entre as placas.
$5{,}0 \cdot 10^4\,V/m = 5{,}0 \cdot 10^4\,N/C$

3.3 Voltagem no campo de uma carga puntual

Valor do potencial criado por uma carga puntual

Suponhamos que desejássemos calcular a voltagem V_{AB} entre dois pontos *A* e *B* do campo criado por uma carga puntual *Q* (**figura 3.5**). Isso poderia ser feito usando-se a expressão $V_{AB} = \frac{\mathcal{T}_{AB}}{q}$, que é a equação que define a diferença de potencial entre dois pontos, sendo válida, portanto, em qualquer situação.

Ao tentarmos calcular o trabalho $\mathcal{T}_{AB}$ realizado pela força elétrica sobre a carga de prova, encontraremos uma dificuldade: essa força elétrica varia enquanto a carga de prova se desloca de *A* para *B*, pois o campo criado pela carga puntual *Q* **não é** um campo uniforme. Quando $\vec{F}$ não é constante, o cálculo do trabalho $\mathcal{T}_{AB}$ só pode ser feito usando-se métodos matemáticos que serão estudados apenas em cursos mais avançados.



Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura 3.5. O valor da força $\vec{F}$ que atua na carga *q* varia ao longo de *AB*. Representação sem escala e em cores fantasia.

Fazendo uso de tais métodos, podemos mostrar que uma carga puntual Q, no ar, estabelece em um ponto P, situado a uma distância r dessa carga, um potencial V dado por **(figura 3.6)**:

$$V = k_0 \frac{Q}{r}$$

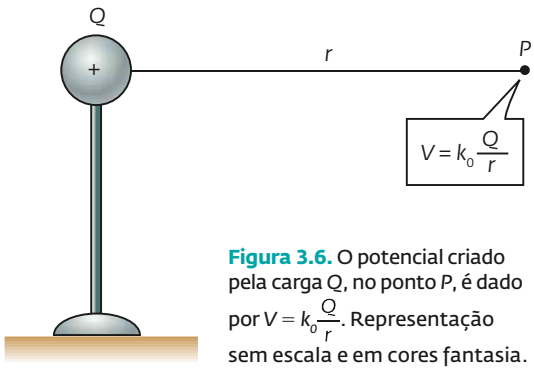


Figura 3.6. O potencial criado pela carga Q, no ponto P, é dado por $V = k_0 \frac{Q}{r}$. Representação sem escala e em cores fantasia.

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

Essa expressão para o valor do potencial foi obtida considerando-se como referência um ponto muito afastado da carga Q ou, como costumamos dizer, essa expressão fornece o valor do potencial em relação a um nível no infinito.

Ao usarmos a expressão $V = k_0 \frac{Q}{r}$, é importante observar que o sinal da carga Q deve ser levado em consideração. Assim, quando Q é positiva, o potencial em P será também positivo e, se Q for uma carga negativa, o valor de V em P será negativo.

No SI a unidade do potencial elétrico é o volt (V), mas existe outra unidade de energia, que não pertence ao SI, chamada elétron-volt (eV) que costuma ser empregada.

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

Um elétron-volt corresponde à energia que um elétron adquire ao atravessar uma ddp de 1 V, no vácuo.

O potencial elétrico pode ser representado graficamente. Veja o gráfico de V em função da carga Q positiva ($Q > 0$) **(figura 3.7.a)** e em função da carga Q negativa ($Q < 0$) **(figura 3.7.b)**.

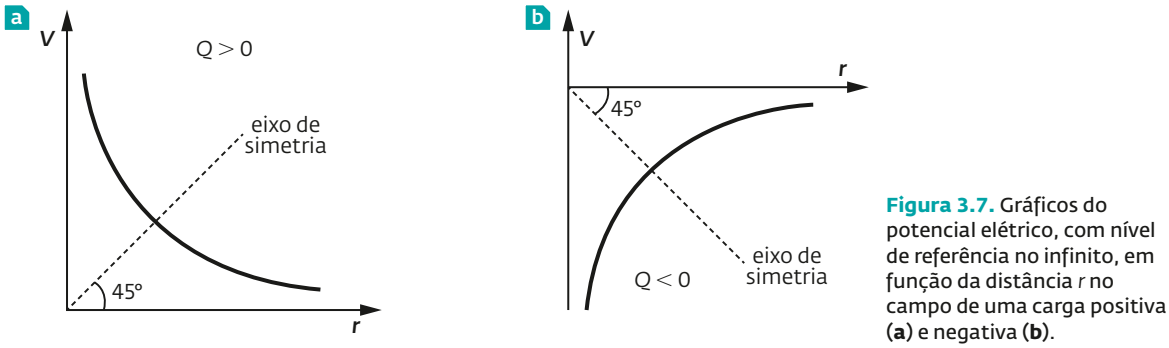


Figura 3.7. Gráficos do potencial elétrico, com nível de referência no infinito, em função da distância r no campo de uma carga positiva (**a**) e negativa (**b**).

Exemplo

Suponha que na figura 3.6 o valor da carga Q seja 2,0 μC. Suponha, ainda, que as distâncias da carga Q aos pontos A e B sejam $r_A = 20$ cm e $r_B = 60$ cm. Calcule a diferença de potencial V_{AB}.

Como vimos, devemos inicialmente calcular, usando a expressão $V = k_0 \frac{Q}{r}$, os potenciais V_A e V_B dos pontos A e B. Trabalhando com unidades do SI, temos $Q = 2{,}0 \cdot 10^{-6}$ C, $r_A = 0{,}20$ m e $r_B = 0{,}60$ m. Então:

$$V_A = k_0 \frac{Q}{r_A} = 9{,}0 \cdot 10^9 \cdot \frac{2{,}0 \cdot 10^{-6}}{0{,}20} \quad \therefore \quad V_A = 9{,}0 \cdot 10^4\ \text{V}$$

$$V_B = k_0 \frac{Q}{r_B} = 9{,}0 \cdot 10^9 \cdot \frac{2{,}0 \cdot 10^{-6}}{0{,}60} \quad \therefore \quad V_B = 3{,}0 \cdot 10^4\ \text{V}$$

Portanto, a diferença de potencial entre A e B será:

$$V_{AB} = V_A - V_B = 9{,}0 \cdot 10^4 - 3{,}0 \cdot 10^4 \quad \therefore \quad V_{AB} = 6{,}0 \cdot 10^4\ \text{V}$$

Potencial estabelecido por várias cargas puntuais

O potencial elétrico em um ponto P, V_P, quando temos vários campos elétricos originados por várias cargas puntuais, Q_1, Q_2 e Q_3, é a soma algébrica dos potenciais V_1, V_2 e V_3 produzidos separadamente por cada carga. Logo:

$$V_P = V_1 + V_2 + V_3$$

Para calcular o potencial V_1 que a carga Q_1 estabelece em P, usamos a expressão $V_1 = k_0 \frac{Q_1}{r_1}$. De modo análogo, calculamos os potenciais V_2 e V_3 que as cargas Q_2 e Q_3 estabelecem em P.

Observe que devemos realizar uma soma algébrica porque o potencial é uma **grandeza escalar**. Como vimos no capítulo anterior, se desejássemos calcular o campo elétrico E no ponto P da **figura 3.8**, deveríamos efetuar uma **soma vetorial**, que é uma operação mais trabalhosa do que a soma algébrica.

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

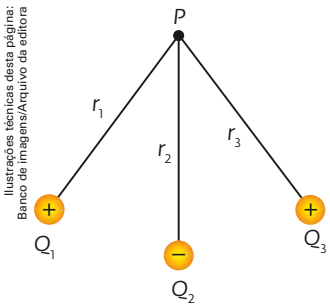


Figura 3.8. O potencial no ponto P, estabelecido simultaneamente pelas cargas Q_1, Q_2 e Q_3, é igual à soma algébrica dos potenciais que cada carga produz naquele ponto.

Potencial de uma esfera eletrizada

No cálculo do campo elétrico criado por uma esfera uniformemente eletrizada, em pontos exteriores a ela, tudo se passa como se a carga da esfera estivesse concentrada em seu centro. Por esse motivo, quando vamos calcular o potencial estabelecido por uma esfera eletrizada, em um ponto exterior a ela, usamos também a expressão que nos fornece o potencial criado por uma carga puntual.

Assim, na **figura 3.9**, a carga Q, distribuída na esfera, estabelece no ponto P um potencial (em relação a um nível no infinito) dado por:

$$V = k_0 \frac{Q}{r}$$

em que r é a distância de P ao centro da esfera.

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

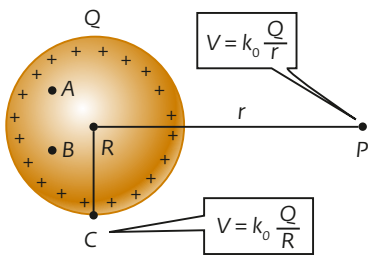


Figura 3.9. O potencial estabelecido pela esfera eletrizada com carga Q, no ponto P, externo a ela, é dado por $V = k_0 \frac{Q}{r}$.

Se o ponto estiver situado bastante próximo da superfície da esfera, como o ponto C mostrado na **figura 3.9**, teremos $r = R$, sendo R o raio da esfera.

Dessa maneira, o potencial de qualquer ponto da superfície dessa esfera será dado pela expressão:

$$V = k_0 \frac{Q}{r}$$

Vejamos agora o que se passa com o potencial de pontos interiores à esfera. Supondo que a esfera seja metálica (em equilíbrio eletrostático), o campo elétrico é nulo em seu interior. Então, se imaginarmos uma carga de prova sendo deslocada de A para B, o trabalho τ_{AB}, realizado pelo campo elétrico sobre ela, será nulo, pois não há força elétrica atuando na carga. Portanto, como $\tau_{AB} = 0$, virá:

$$V_A - V_B = \frac{\tau_{AB}}{q} \quad \therefore \quad V_A - V_B = 0 \quad \text{ou} \quad V_A = V_B$$

isto é, os pontos situados no interior de uma esfera metálica eletrizada estão todos no mesmo potencial.

Se uma carga de prova fosse deslocada de *A* para *C*, não haveria, pelo mesmo motivo, realização de trabalho, ou seja, $\mathcal{T}_{AC} = 0$ e, então, $V_A = V_C$. Podemos assim concluir que **todos** os pontos da esfera, quer estejam em seu interior, quer estejam em sua superfície, estão em um mesmo potencial. Portanto, como a expressão:

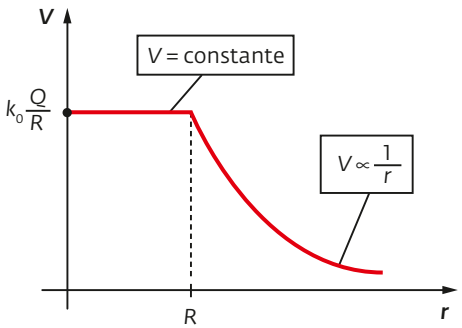
$$V = k_0 \frac{Q}{R}$$

nos fornece o potencial em um ponto da superfície, poderemos usá-la para calcular o potencial em **qualquer** ponto da esfera.

Exemplo

Considere uma esfera metálica, de raio *R*, eletrizada com uma carga positiva *Q*. Sendo *V* o potencial estabelecido pela carga da esfera e *r* a distância de um ponto qualquer ao seu centro, faça um desenho mostrando o aspecto do gráfico $V \times r$ para pontos do interior e do exterior da esfera (de $r = 0$ até $r \to \infty$).

Todos os pontos do interior e da superfície da esfera têm o mesmo potencial, dado por $V = k_0 \frac{Q}{R}$. Portanto, quando *r* varia de 0 até *R*, o potencial *V* permanece constante, como está mostrado no gráfico da **figura 3.10**. Para pontos exteriores à esfera ($r > R$), o potencial é dado por $V = k_0 \frac{Q}{r}$, isto é, *V* é inversamente proporcional a *r*, enquanto *r* cresce, *V* diminui na mesma proporção. Então, para $r > R$, o gráfico $V \times r$ será uma curva com o aspecto mostrado na **figura 3.10** (essa curva é denominada **hipérbole**).



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

Figura 3.10. Para o exemplo da seção 3.3.

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

Não escreva no livro!

8. Considere um ponto situado a uma distância *r* de uma carga puntual positiva *Q*. Sendo *V* o valor do potencial estabelecido por *Q* nesse ponto, faça o que se pede.

a) Duplicando-se *r*, quantas vezes menor torna-se o potencial *V*? 2 vezes menor.

b) E se o valor de *r* for triplicado? 3 vezes menor.

c) Então, faça um desenho no caderno mostrando o aspecto do gráfico $V \times r$. Como se denomina essa curva? Veja resposta no Manual do Professor.

9. A carga puntual *Q*, mostrada na figura abaixo, vale $Q = 3{,}0\ \mu C$, e as distâncias dos pontos *A* e *B* a essa carga são $r_A = 15$ cm e $r_B = 45$ cm.



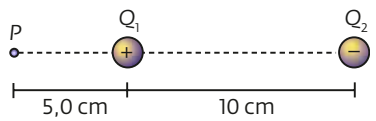
Suponha a carga no ar e determine:

a) o potencial em *A*; $V_A = -18 \cdot 10^4$ V

b) o potencial em *B*; $V_B = -6{,}0 \cdot 10^4$ V

c) a diferença de potencial V_{BA}. $V_{BA} = 12 \cdot 10^4$ V

10. Considere as cargas puntuais Q_1 e Q_2, tendo ambas módulo igual a 5,0 μC, porém de sinais contrários.



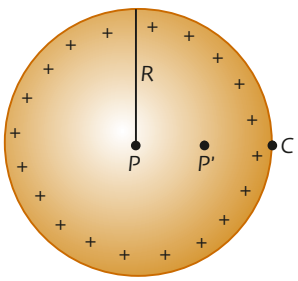
a) Qual é o potencial V_1 que Q_1 estabelece em *P*? $V_1 = 9{,}0 \cdot 10^5$ V

10. b) $V_2 = -3{,}0 \cdot 10^5$ V
c) $V = 6{,}0 \cdot 10^5$ V

b) Qual é o potencial V_2 que Q_2 estabelece em *P*?

c) Então, qual o valor do potencial *V* no ponto P?

11. A figura representa uma esfera metálica eletrizada, em equilíbrio eletrostático.



Considerando os pontos *P* e *P'* mostrados na figura, responda:

a) Qual é o valor da intensidade do campo elétrico em *P*? Zero.

b) O potencial em *P* é nulo ou diferente de zero? Diferente de zero.

c) E a diferença de potencial entre *P* e *P'*, é nula ou diferente de zero? Nula.

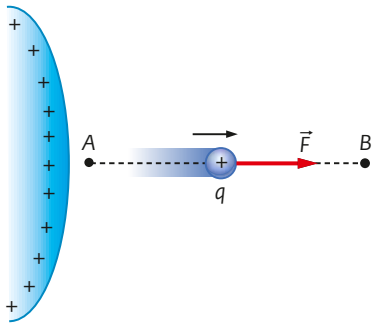
12. Suponha que o valor da carga na esfera do exercício anterior seja $Q = 1{,}5\ \mu C$ e que o seu raio seja $R = 30$ cm. Considerando a esfera no ar:

a) Calcule o potencial do ponto *C*, situado na superfície da esfera. $V_C = 4{,}5 \cdot 10^4$ V

b) Então, qual é o potencial do ponto *P*? E do ponto *P'*? $V_P = V_{P'} = 4{,}5 \cdot 10^4$ V

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

3.4 Energia potencial elétrica



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

Figura 3.11. Carga q se deslocando de A para B.

A diferença de potencial entre dois pontos em um campo elétrico é dada por:

$$V_A - V_B = \frac{\mathcal{T}_{AB}}{q}$$

O trabalho que o campo realiza sobre a carga q, deslocando-se de A para B, como na **figura 3.11**, é:

$$\mathcal{T}_{AB} = qV_A - qV_B$$

Esse trabalho não depende do caminho que a carga percorrerá de A para B, isto é, o campo elétrico é um campo conservativo. E, quando uma força é conservativa, existe sempre associada a ela uma energia potencial E_p que se relaciona com o trabalho dessa força da seguinte maneira:

$$\mathcal{T}_{AB} = E_{pA} - E_{pB}$$

Essa relação é verdadeira para a força gravitacional, para a força elástica e para qualquer força conservativa. Como a energia potencial em cada ponto tem um valor bem definido, identificando as expressões:

$$\mathcal{T}_{AB} = qV_A - qV_B \quad \text{e} \quad \mathcal{T}_{AB} = E_{pA} - E_{pB} \quad \therefore \quad E_{pA} = qV_A \quad \text{e} \quad E_{pB} = qV_B$$

De modo geral, podemos dizer que:

Se uma carga q é colocada em um ponto onde o potencial elétrico é V, ela possui nessa posição uma energia potencial elétrica:

$$E_p = qV$$

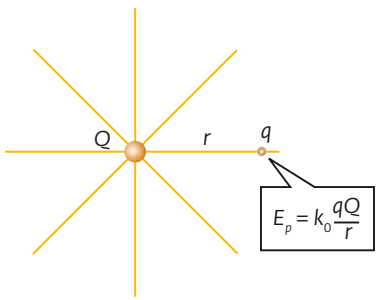


Figura 3.12. Representação da distância r entre as cargas Q e q.

Analisaremos a situação representada na **figura 3.12**. Consideremos uma carga puntual Q, estabelecendo um campo elétrico, no qual é colocada uma carga, também puntual, q, a uma distância r de Q. O potencial estabelecido por Q à distância r é $V = k_0 \frac{qQ}{r}$. Portanto, a energia potencial de q, naquele ponto, é dada por:

$$E_p = qV \quad \therefore \quad E_p = k_0 \frac{qQ}{r}$$

Essa é, então, a expressão que fornece a energia potencial elétrica (em relação ao infinito) de uma carga puntual q, no campo criado por uma carga puntual Q, a uma distância r dessa carga.

Ao usar essa equação, os sinais de Q e q precisam ser levados em consideração. Por exemplo, supondo $Q = +5{,}0\ \mu C$, $q = +2{,}0\ \mu C$ e $r = 10$ cm, temos:

$$E_p = k_0 \frac{qQ}{r} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{5{,}0 \cdot 10^{-6} \cdot 2{,}0 \cdot 10^{-6}}{0{,}10} \quad \therefore \quad E_p = 0{,}9\ J$$

Esse resultado significa que a carga q possui uma E_p de 0,9 J acima do valor em pontos muito distantes (infinito, em que $E_p = 0$). Portanto, se q for abandonada daquela posição e Q for mantida fixa, a carga q será repelida e alcançará um ponto no infinito com energia cinética $E_c = 0{,}9$ J (supondo desprezíveis outras forças que atuam em q).

Se o sinal da carga q for negativo, teremos $E_p = -0{,}9$ J. Então, a energia dessa carga será menor do que a que ela teria no infinito (em que $E_p = 0$). Essa carga, sendo atraída por Q, só poderá ser transportada para um ponto muito afastado se uma força externa realizar sobre ela um trabalho mínimo igual a 0,9 J (nesse caso, ela alcançaria o infinito com $E_c = 0$).

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

FÍSICA NO CONTEXTO

Napoleão Bonaparte e o conde Alessandro Volta

Pávia: localização



Banco de imagens/Arquivo da editora

Atlante geografico metodico De Agostini 2008-2009. Novara: Istituto Geografico De Agostini, 2008. Adaptado.

Figura 3.13. Região da Lombardia, com destaque para o local onde está a cidade de Pávia.

Desde épocas remotas observa-se que existe uma relação entre ciência e poder. Os avanços científicos advindos de uma guerra, por exemplo, frequentemente tiveram sua origem nas ideologias de cientistas que colaboraram direta ou indiretamente para o avanço da tecnologia.

As condições históricas por que passou o italiano Alessandro Volta não foram diferentes. Além de inventar diversos instrumentos para medição da eletricidade, é notório que a invenção de Volta que mais lhe trouxe crédito foi a pilha. O primeiro informe de sua invenção foi feito na Royal Society, britânica, em 1800. Sem dúvida a pilha elétrica era um instrumento fantástico, que produzia corrente elétrica de forma contínua, o que a diferia da tradicional forma de produção de corrente através de descargas elétricas que era utilizada naquela época. Nessa época, Volta era professor da Universidade de Pávia, que está situada na Lombardia **(figura 3.13)**, e a Áustria, aliada dos britânicos, havia recuperado momentaneamente o controle da região na Guerra Revolucionária Francesa.

Em 1801, Volta apresentou seus resultados experimentais no Institut de France, em Paris. O próprio Napoleão Bonaparte **(figura 3.14)**, que naquele momento era o primeiro cônsul da França, assistiu entusiasmadamente às apresentações de Volta e, além de pagar as despesas pessoais da viagem, lhe outorgou medalha de ouro em reconhecimento a seus méritos científicos. Mais tarde, Volta viria a receber de Napoleão outras condecorações, como as cruzes da Legião de Honra e da Coroa de Ferro e o título de conde. Com isso, Napoleão deixou a marca na História de ser um homem da cultura e um benfeitor da ciência. E, mesmo após sua queda em 1815, Volta ainda se manteve em evidência entre a ciência e a política. Em 1881, por exemplo, a unidade elétrica volt recebeu este nome em sua homenagem.



Akg-Images/Latinstock

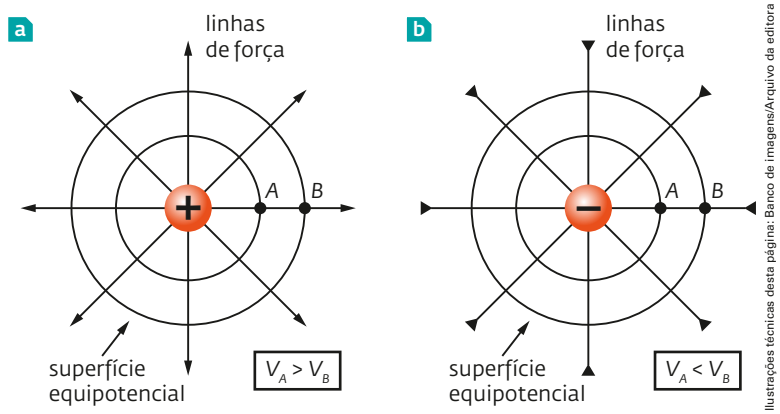
Figura 3.14. Alessandro Volta apresenta a pilha a Napoleão Bonaparte (1801).

3.5 Superfície equipotencial em uma carga

O que é uma superfície equipotencial

Em um campo elétrico, uma superfície equipotencial é toda superfície em que seus pontos se encontram em um potencial elétrico constante. As superfícies equipotenciais são perpendiculares às linhas de força em qualquer campo elétrico e, consequentemente, são perpendiculares ao vetor campo elétrico. Em campos elétricos de uma carga puntual, positiva ou negativa, as superfícies equipotenciais são superfícies esféricas concêntricas, conforme **figura 3.15**. Para a carga elétrica positiva, o potencial elétrico V_A no ponto A **(figura 3.15.a)** é maior do que o potencial elétrico V_B no ponto B, isto é, $V_A > V_B$. Se a carga elétrica for negativa, o potencial de cada superfície diminui à medida que se afasta da carga, ou seja, $V_A < V_B$ **(figura 3.15.b)**.

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



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

Figura 3.15. Superfícies equipotenciais esféricas no campo de uma carga puntual positiva (**a**) e negativa (**b**).

Superfícies equipotenciais em um campo uniforme

Consideremos um ponto P na **figura 3.16**, em um campo elétrico uniforme criado pelas placas A e B. A diferença de potencial entre a placa A e o ponto P é dada por:

$$V_A - V_P = Ed$$

O potencial do ponto P, em relação à placa A, depende apenas de sua distância d à placa (lembre-se de que a intensidade do campo é constante). Assim, os pontos P, P', P'', etc., situados à mesma distância da placa A, possuem o mesmo potencial, pois uma superfície plana paralela às placas, como a S_1 mostrada na **figura 3.16**, será uma superfície equipotencial. Da mesma forma, S_2 (ou S_3) também será uma superfície equipotencial, cujo potencial, entretanto, é diferente do de S_1.

Algumas linhas de força do campo uniforme, criado pelas placas, estão representadas na **figura 3.16**. Observe que essas linhas são perpendiculares às superfícies equipotenciais, em concordância com o que afirmamos anteriormente.

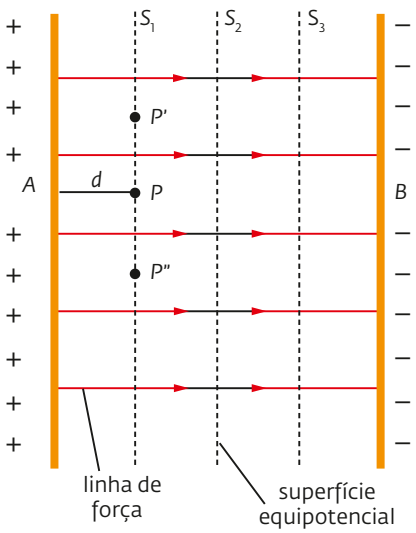
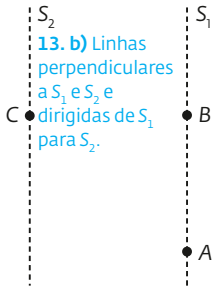


Figura 3.16. As superfícies equipotenciais, S_1, S_2, S_3, são perpendiculares às linhas de força do campo elétrico.

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

Não escreva no livro!



13. b) Linhas perpendiculares a S_1 e S_2 e dirigidas de S_1 para S_2.

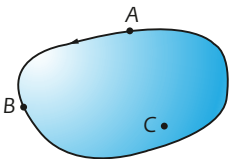
13. Na figura ao lado, S_1 e S_2 representam duas superfícies equipotenciais em uma região onde existe um campo elétrico uniforme. Sabe-se que o potencial de S_1 é $V_1 = 500\ V$ e o de S_2 é $V_2 = 300\ V$ (ambos em relação a um mesmo nível).

a) Abandonando-se uma carga de prova positiva em um ponto situado entre S_1 e S_2, qual é o sentido de movimento dessa carga? De S_1 para S_2.

b) Desenhe no caderno a figura ao lado e algumas linhas de força do campo elétrico existente na região (não se esqueça de indicar o sentido dessas linhas).

c) Qual é a diferença de potencial entre os pontos *A* e *B*? E entre *A* e *C*? $V_{AB} = 0$ e $V_{AC} = 200\ V$.

14. Considere um bloco metálico, eletrizado positivamente, em equilíbrio eletrostático. Os pontos *A* e *B* estão situados na superfície desse bloco e *C* é um ponto de seu interior (veja a figura abaixo).



Sabendo-se que o potencial de *A*, em relação a um certo nível, vale $V_A = 800\ V$, responda:

a) Qual é o potencial do ponto *B* (em relação ao mesmo nível)? $V_B = 800\ V$

b) E o potencial do ponto *C* (considere ainda o mesmo nível)? $V_C = 800\ V$

c) Se uma carga de prova for transportada de *A* para *B*, qual será o trabalho τ_{AB} realizado pelo campo elétrico sobre ela? $\tau_{AB} = 0$

3.6 O gerador de Van de Graaff

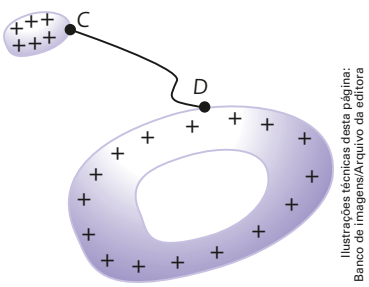
Princípio de funcionamento do gerador de Van de Graaff

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

Um dispositivo que permite obter voltagens muito elevadas para serem usadas nas experiências de Física contemporânea, como as que aceleram partículas atômicas eletrizadas (prótons, elétrons, íons, etc.), fazendo com que elas adquiram grandes velocidades, é o gerador de Van de Graaff. A seguir, apresentaremos os princípios físicos nos quais se baseia seu funcionamento.

Um objeto metálico, *C*, eletrizado e colocado em contato com outro objeto, *D*, também metálico, inicialmente descarregado, transfere apenas parte da carga de *C* para *D* (veja a **figura 3.17**). A transferência de carga é parcial porque ela será interrompida quando os potenciais dos dois objetos se igualarem.

Suponha agora que, na cavidade do objeto *D*, fosse introduzido o objeto *C* **(figura 3.18)**. Nessas condições, a carga de *C* induziria cargas elétricas nas superfícies interna e externa de *D*. No caso da **figura 3.18**, a superfície interna fica eletrizada negativamente e a superfície externa, positivamente. Verifica-se que a carga induzida nas paredes tem o mesmo módulo da carga no objeto *C* (que provocou a indução).



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

Figura 3.17. Quando o objeto metálico *C* eletrizado, externo a *D*, é colocado em contato com o condutor *D* (descarregado), apenas parte da carga de *C* passa para *D*.

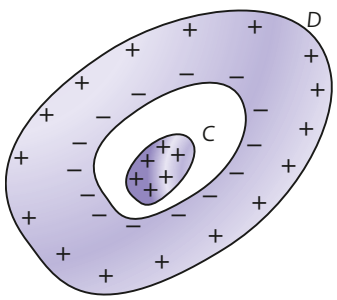


Figura 3.18. Um condutor eletrizado *C*, no interior do condutor inicialmente descarregado *D*, faz aparecer cargas induzidas nas superfícies interna e externa de *D*.



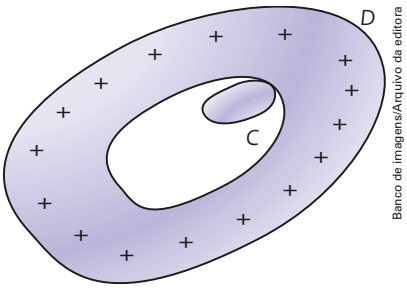
Reprodução/Arquivo da editora

ROBERT J. VAN DE GRAAFF (1901-1967)

Engenheiro estadunidense que, após assistir a conferências de Marie Curie, passou a se dedicar à pesquisa no campo da Física atômica. Para desenvolver suas pesquisas, sentiu a necessidade de uma fonte de partículas subatômicas de alta energia. Criou então o gerador de Van de Graaff, um acelerador de partículas que encontrou larga aplicação na Física atômica, na Medicina e na indústria. Depois de se dedicar à pesquisa durante certo tempo, montou nos Estados Unidos uma indústria para fabricar exemplares de seu gerador.

Então, se esse objeto for colocado em contato com a parede interna de *D* **(figura 3.19)**, a carga induzida nessa parede será neutralizada pela carga de *C*. Podemos ver, pela **figura 3.19**, que, como consequência disso, o objeto *D* fica eletrizado com uma carga de mesmo sinal e de mesmo módulo que a carga inicial do objeto *C*. Em outras palavras, tudo se passa como se a carga de *C* fosse **integralmente** transferida para *D*.

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



Banco de imagens/Arquivo da editora

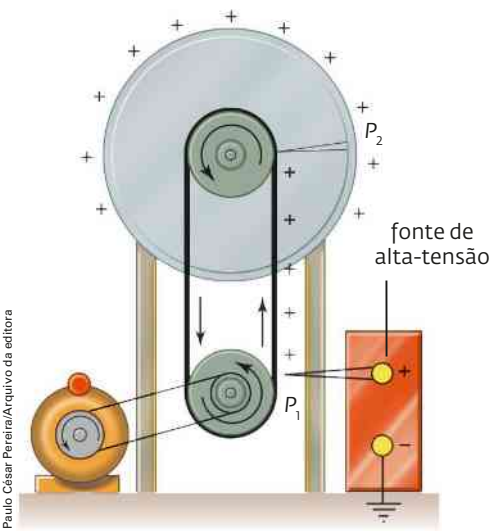
Figura 3.19. Quando o objeto metálico *C* eletrizado, no interior de *D*, é posto em contato com *D*, toda a carga de *C* passa para *D*.

Portanto, quando um objeto metálico eletrizado é colocado em contato interno com outro, da maneira mostrada na **figura 3.19**, toda sua carga é transferida para esse outro. Lembre-se de que isso não acontece quando o contato é feito externamente **(figura 3.17)**.

Quando há contato interno, a transferência de carga do objeto que está dentro da cavidade para o objeto externo é integral, mesmo que este já possua uma carga inicial. Assim, na **figura 3.19**, se o objeto *C* for novamente eletrizado e outra vez ligado internamente ao objeto *D*, sua carga se transferirá totalmente para *D*.

Essa operação pode ser repetida várias vezes e, assim, é possível acumular em *D* uma quantidade de carga cada vez maior. A quantidade de carga em *D*, naturalmente, é limitada pela rigidez dielétrica do ar que o envolve. Se a rigidez dielétrica do ar for ultrapassada, parte da carga acumulada em *D* tende a escoar e, portanto, a carga máxima que pode existir em *D* é aquela que cria um campo igual à rigidez dielétrica do ar.

Como funciona o gerador de Van de Graaff



Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura 3.20. Esquema do gerador de Van de Graaff. As cargas transportadas pela correia para o interior da esfera metálica são totalmente transferidas para ela, acumulando-se em sua superfície externa.

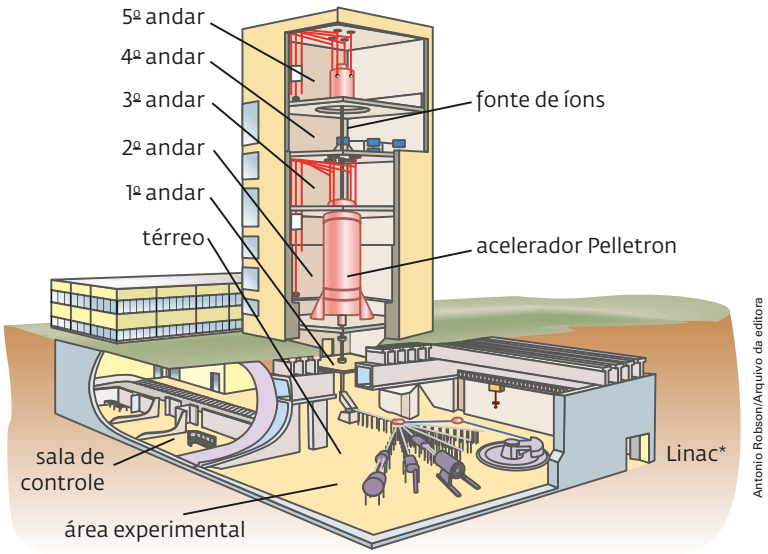
O fato de a carga elétrica se transferir integralmente de um objeto para outro, quando há contato interno, constitui o princípio básico de funcionamento do gerador de Van de Graaff.

Esse aparelho, representado esquematicamente na **figura 3.20**, é constituído por uma correia que passa por duas polias, uma delas acionada por um motor elétrico que faz a correia se movimentar. A segunda polia encontra-se no interior de uma esfera metálica oca, que está apoiada em duas colunas isolantes.

Enquanto a correia se movimenta, ela recebe carga elétrica por meio de uma ponta, P_1, ligada a uma fonte de alta-tensão (cerca de 10 000 V). Essa carga é transportada pela correia para o interior da esfera metálica. Uma ponta, P_2, ligada a essa esfera **(figura 3.20)** recolhe a carga transportada pela correia. Em virtude do contato interno, essa carga se transfere integralmente para a superfície externa da esfera do gerador.

Como as cargas são transportadas continuamente pela correia, elas vão se acumulando na esfera até que a rigidez dielétrica do ar seja atingida.

Existem variações do gerador de Van de Graaff **(figura 3.21)**, como o Pelletron, que é um acelerador eletrostático de 8 MV, que foi construído no Instituto de Física da Universidade de São Paulo (USP) em 1972. Esse acelerador de partículas produz feixes de íons (átomos que perderam ou ganharam elétrons) que são acelerados por campos eletromagnéticos, aumentando sua velocidade até colidirem contra um alvo, onde existem detectores que registrarão as informações provenientes da colisão entre o íon e o material do alvo. A partir dessas colisões é possível, por exemplo, estudar a constituição do núcleo dos átomos e produzir elementos químicos radioativos para serem empregados nas áreas de medicina, biologia e agricultura.



Antonio Robson/Arquivo da editora

*Sigla em inglês de *Linear Particle Accelerator* (Acelerador de Partículas Linear).

Figura 3.21. Esquema do acelerador Pelletron, construído no Instituto de Física da Universidade de São Paulo (SP) em 1972 e que funciona até os dias de hoje. Representação sem escala e em cores fantasia.

FÍSICA NO CONTEXTO

Por que os pássaros não tomam choque ao pousar nos fios?

Você já deve ter se perguntado por que os pássaros pousam sobre os fios e não são eletrocutados. O choque é a sensação causada pela passagem da corrente elétrica (que estudaremos a seguir) pelo corpo. Os pássaros não sentem o choque elétrico, pois são pequenos e ao pousarem na rede elétrica tocam em apenas um fio **(figura 3.22.a)**. Para sentirem o choque, deve existir uma diferença de potencial elétrico (ddp) entre dois pontos do corpo do pássaro. Quando o pássaro está sobre um fio, os dois (pássaro e fio) estão submetidos ao mesmo potencial elétrico.

Mas, infelizmente, para alguns pássaros de maior porte não é possível ocupar uma posição com mesmo potencial elétrico, devido ao tamanho do espaço que ocupam. Por exemplo, as asas do tuiuiú **(figura 3.22.b)**, ave-símbolo do Pantanal, podem atingir 1,4 metro de comprimento fazendo com que durante o pouso ou o voo próximo da rede elétrica, ele toque dois fios da rede elétrica ao mesmo tempo provocando uma ddp e sua eletrocussão.

As imagens desta página estão representadas fora de proporção.



Dario Lo Presti/Shutterstock



Inacio Teixeira/Pulsar Imagens

Figura 3.22. Em **a** os pássaros se apoiam lado a lado em fios elétricos. Em **b**, tuiuiú, ave do Pantanal brasileiro.

APLICAÇÕES DA FÍSICA

Diferença de potencial na medicina

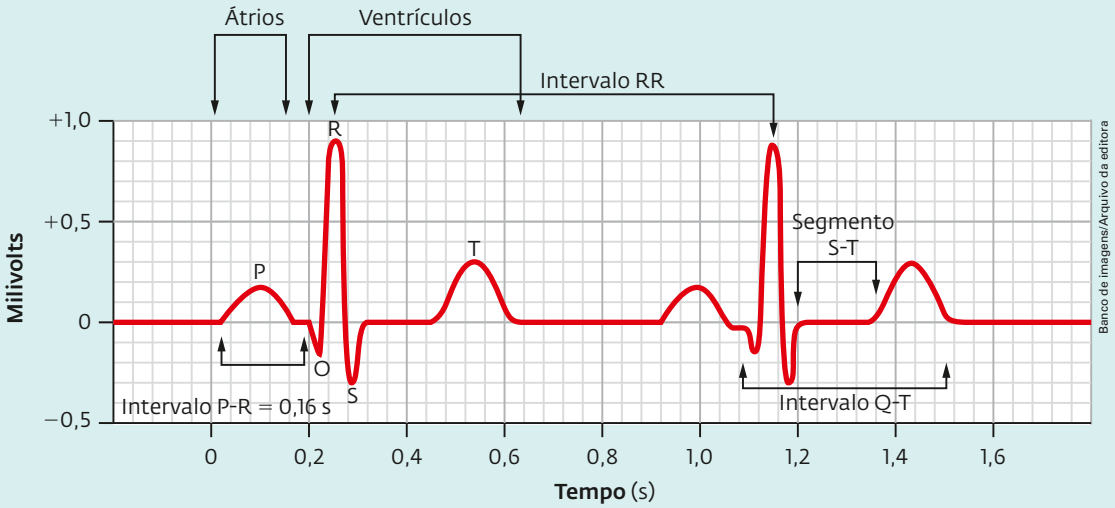
Os médicos avaliam a saúde cardíaca através de um exame chamado eletrocardiograma (ECG), que estuda os sinais elétricos resultantes das cargas que estão distribuídas no tecido muscular do coração, resultantes das diferenças na composição iônica desse tecido. As fibras cardíacas quando estão em repouso apresentam diferença de potencial (ddp) através de sua membrana, chamado de potencial de repouso transmembrana (PRT).



BSIP SA/Alamy/Latinstock

Figura 3.23. Pessoa realizando um eletrocardiograma (ECG).

Os eletrodos podem detectar os sinais elétricos que são conduzidos pela superfície do corpo e, quando colocados ambos do lado de fora ou ambos do lado de dentro da membrana, não haverá ddp; entretanto, quando os eletrodos são posicionados um do lado de fora e outro do de dentro, haverá uma ddp, ou seja, teremos o sinal PRT que é comparado com um sinal padrão normal. O ECG é utilizado para detectar arritmias, aumento de cavidades cardíacas, patologias coronarianas, infarto do miocárdio, entre outros diagnósticos. Este exame é realizado em um eletrocardiógrafo, aplicando-se eletrodos condutores em posições específicas do corpo (punhos, tornozelos e superfície torácica), conforme **figura 3.23**, que registrarão alterações de potencial elétrico entre dois pontos do coração dentro do campo elétrico gerado pelos músculos cardíacos ao longo do ciclo cardíaco.



Banco de imagens/Arquivo da editora

GUYTON, A.C.; HALL, J.E. *Tratado de fisiologia médica*. 12. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2011.

QUESTÕES Este procedimento melhora a fixação dos eletrodos na pele e consequentemente melhora a condução dos impulsos elétricos no eletrocardiógrafo.

1. O ECG é um exame que não exige previamente nenhum cuidado específico, como, por exemplo, jejum do paciente. Entretanto, em todos os pacientes é necessário fazer assepsia com álcool na região onde serão aplicados os eletrodos, aplicar gel no local ou utilizar ventosas que são fornecidas junto com o aparelho. Além disso, em alguns pacientes do sexo masculino poderá ser necessário raspar os pelos do tórax (tricotomia). Explique quais as razões desse procedimento.
2. Na figura acima temos um eletrocardiograma normal realizado em um papel milimetrado, no qual cada quadradinho corresponde a 1 mm. Sabendo que cada intervalo RR corresponde a um batimento cardíaco e o pico máximo representa a fase final da diástole, encontre a frequência cardíaca, em batimentos por minuto, deste paciente. 67 batimentos/minuto

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

Não escreva no livro!

15. Para que um próton consiga penetrar no núcleo de um átomo de ouro, ele deverá ter uma energia cinética mínima próxima de $E_c = 8 \cdot 10^{-12}$ J. Essa energia cinética é fornecida ao próton por dispositivos conhecidos como **aceleradores de partículas**, que aplicam a ele uma diferença de potencial V_{AB}. Determine o valor de V_{AB}. $V_{AB} = 5 \cdot 10^7$ V (50 milhões de volts).

16. Dez pequenas esferas metálicas, cada uma com carga de 0,1 μC, são usadas para eletrizar uma esfera metálica oca maior. Isso é feito tocando-a sucessivamente com cada uma das pequenas esferas. Diga se a carga final na esfera grande será menor ou igual a 1 μC, supondo que os contatos sucessivos foram feitos:

a) internamente; Igual.

b) externamente. Menor.

17. Os geradores de Van de Graaff permitem obter potenciais de até 10 milhões de volts. Suponha que a esfera de um certo gerador tenha um raio $R = 1{,}8$ m. $2 \cdot 10^{-3}$C

a) Qual carga deve ser fornecida a essa esfera para que ela adquira aquele potencial?

b) Se a esfera estivesse no ar, em condições normais, seria possível que ela adquirisse aquele potencial? Explique. Não.

18. Suponha que a correia do gerador de Van de Graaff do exercício anterior transporte cargas para sua esfera com uma taxa de 50 μC/s. Quanto tempo seria necessário para o gerador de Van de Graaff atingir o potencial considerado de $10 \cdot 10^6$ V? 40 s

19. No exercício anterior, considere que o potencial da esfera do gerador de Van de Graaff tenha atingido $10 \cdot 10^6$ V e que, em virtude de "fugas de cargas" para o ar, esse potencial se mantenha constante, apesar de a correia continuar a transportar cargas para a esfera. Qual deve ser a potência do motor que movimenta a correia para manter a situação descrita? (Despreze as forças de atrito.) 500 W

PRATIQUE FÍSICA

EM EQUIPE

Não escreva no livro!

Veja comentários desta seção no Manual do Professor.

Para realizar esta experiência você precisará de uma lâmpada de lanterna (1,5 V ou 3 V), três pedaços de fios de cobre com 15 cm cada descencapados nos terminais, uma régua de plástico, um pedaço de madeira, uma placa de metal e uma pilha AA (ou qualquer outra de 1,5 V).

Observação: você pode testar outros materiais como grampos, clipes, suco de limão (sem açúcar), água pura, água com bastante sal e vinagre, moedas, etc.

1. A primeira atividade é acender a lâmpada. Faça combinações possíveis entre a lâmpada, dois dos fios de cobre e a pilha. Desenhe essa combinação no caderno.

2. Após descobrir como acender a lâmpada, vamos montar um novo arranjo experimental no qual a régua, a madeira e a placa de metal (um de cada vez) e o fio de cobre, que não havia sido utilizado, devem estar presentes; ou seja, você deve montar um novo arranjo experimental com esses materiais de forma que a lâmpada novamente acenda. Após ter sucesso, desenhe a combinação que acende a lâmpada no caderno.

Responda: Quais desses materiais são condutores e quais são isolantes?

PROBLEMAS E TESTES

Não escreva no livro!

1. (UEM-PR) Assinale o que for correto. 01; 04; 08 e 16.

01) Cargas elétricas positivas, abandonadas em repouso em uma região do espaço, onde existe um campo elétrico uniforme, deslocam-se para a região de menor potencial elétrico.

02) Cargas elétricas negativas, abandonadas em repouso em uma região do espaço, onde existe um campo elétrico uniforme, movem-se na direção e no sentido do campo.

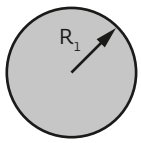
04) Linhas de força de campo elétrico são sempre perpendiculares às superfícies equipotenciais.

08) Aos campos de forças conservativas, como o campo elétrico, associa-se o conceito de potencial.

16) Em um campo conservativo, como o campo elétrico, o trabalho realizado por uma força conservativa para deslocar uma partícula de um ponto a outro do campo independe da trajetória da partícula.

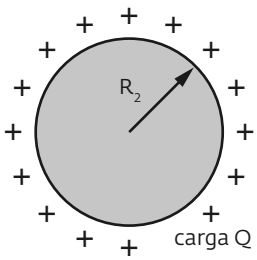
2. **(Unesp-SP)** Uma esfera condutora descarregada (potencial elétrico nulo), de raio $R_1 = 5{,}0$ cm, isolada, encontra-se distante de outra esfera condutora, de raio $R_2 = 10{,}0$ cm, carregada com carga elétrica $Q = 3{,}0\ \mu C$ (potencial elétrico não nulo), também isolada.

$Q_1 = 1\ \mu C$ e $Q_2 = 2\ \mu C$.



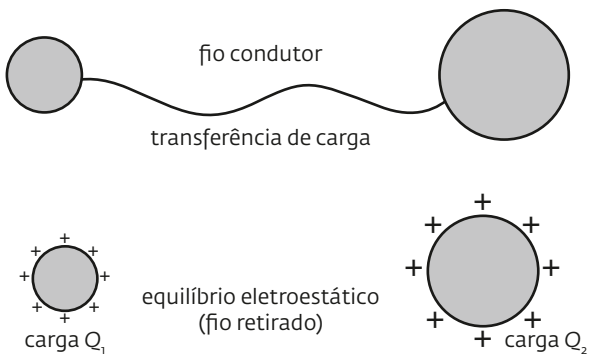
descarregada

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



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

Em seguida, liga-se uma esfera à outra, por meio de um fio condutor longo, até que se estabeleça o equilíbrio eletrostático entre elas. Nesse processo, a carga elétrica total é conservada e o potencial elétrico em cada condutor esférico isolado descrito pela equação $V = k \cdot \frac{q}{R}$, onde k é a constante de Coulomb, q é a sua carga elétrica e r o seu raio.

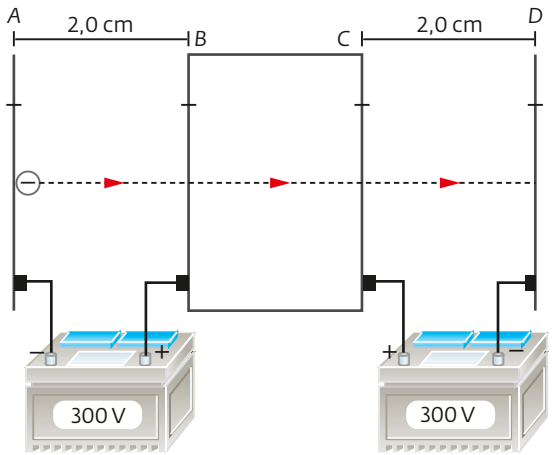


Supondo que nenhuma carga elétrica se acumule no fio condutor, determine a carga elétrica final em cada uma das esferas.

3. **(UCS)** O transistor MOSFET é um componente muito importante na eletrônica atual, sendo o elemento essencial, por exemplo, na composição dos processadores de computador. Ele é classificado como um transistor de Efeito de Campo, pois, sobre uma parte dele, chamada porta, atua um campo que provoca uma diferença de potencial cujo papel é regular a intensidade da passagem de corrente elétrica entre as duas outras partes do MOSFET, a fonte e o dreno. O campo em questão é o e

a) magnético.
b) de frequências.
c) gravitacional.
d) nuclear.
e) elétrico.

4. A figura a seguir mostra duas grandes placas metálicas, A e D, e uma caixa metálica oca cujas faces B e C são paralelas às placas. Duas baterias, de 300 V cada uma, são ligadas às placas e à caixa, da maneira mostrada na figura.



Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Considerando a placa A como nível de potencial, indique, entre as afirmativas seguintes, aquelas que estão corretas:

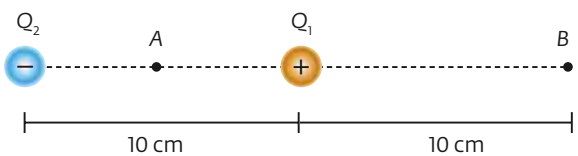
a) O campo elétrico entre A e B está dirigido de B para A e vale $1{,}5 \cdot 10^4$ V/m. Todas estão corretas.
b) O campo elétrico entre B e C é nulo.
c) O campo elétrico entre C e D está dirigido de C para D e vale $1{,}5 \cdot 10^4$ V/m.
d) Os potenciais das faces B e C são ambos iguais a 300 V.
e) O potencial da placa D é zero.

5. Um elétron, abandonado (em repouso) próximo à placa A, segue a trajetória mostrada na figura do problema anterior, passando através de pequenos orifícios existentes em B e C. Analise as afirmativas seguintes e indique aquelas que estão **incorretas**: a; e.

a) Entre A e B o movimento do elétron é retilíneo uniforme.
b) Entre B e C a energia cinética do elétron não varia.
c) Entre C e D o movimento do elétron é uniformemente retardado.
d) Ao atingir a placa D a velocidade do elétron é nula.
e) A velocidade do elétron aumenta continuamente desde A até D.

6. Se o valor do potencial é constante em todos os pontos de uma certa região do espaço, o que se pode concluir sobre a intensidade do campo elétrico $\vec{E}$ nessa região? $E = 0$ nessa região.

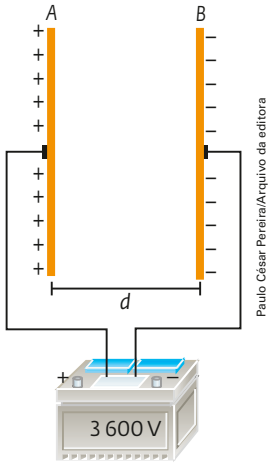
7. Duas cargas puntuais $Q_1 = 5{,}0\ \mu C$ e $Q_2 = 2{,}0\ \mu C$, colocadas no ar, estão separadas por 10 cm (veja a figura abaixo).



Sabendo-se que o ponto A está situado no meio do segmento que une Q_1 a Q_2 e que o ponto B dista 10 cm de Q_1, calcule:

a) o potencial do ponto A; $V_A = 5{,}4 \cdot 10^5$ V
b) o potencial do ponto B; $V_B = 3{,}6 \cdot 10^5$ V
c) a diferença de potencial entre A e B. $V_{AB} = 1{,}8 \cdot 10^5$ V

8. Um conjunto de baterias especiais está ligado a duas placas metálicas, estabelecendo entre elas uma diferença de potencial $V_{AB} = 3\,600$ V.



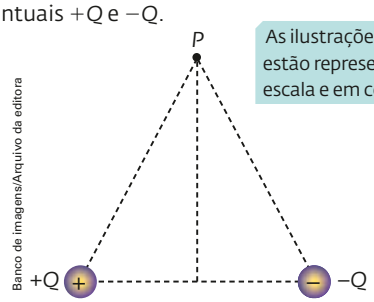
representação de um conjunto de baterias

Sabe-se que a voltagem mantida pelas baterias é sempre a mesma, qualquer que seja a distância entre as placas.

a) Se aproximarmos uma placa da outra, o que ocorrerá com a intensidade do campo entre elas? Aumentará.

b) Verifica-se que, se o campo entre as placas alcança o valor de $3 \cdot 10^6$ N/C, o ar entre elas se torna condutor e observa-se que uma faísca elétrica salta de uma placa para a outra. Então, aproximando-se a placa *A* da placa *B*, para qual valor de *d* uma faísca elétrica saltará entre elas? 1,2 mm

9. Um ponto *P* encontra-se à mesma distância de duas cargas puntuais $+Q$ e $-Q$.



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

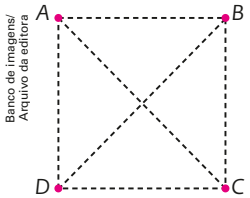
Sendo *E* a intensidade do campo criado por essas cargas em *P* e *V* o potencial que elas estabelecem nesse ponto, é correto afirmar que: b

a) $E = 0$ e $V = 0$.
c) $E = 0$ e $V \neq 0$.
b) $E \neq 0$ e $V = 0$.
d) $E \neq 0$ e $V \neq 0$.

10. Uma esfera metálica encontra-se eletrizada positivamente, em equilíbrio eletrostático. Sabe-se que o potencial de um ponto da superfície dessa esfera vale 800 V e que seu raio é $R = 10$ cm. Podemos, então, concluir que a intensidade do campo *E* e o potencial *V* no centro da esfera valem: a

a) $E = 0$ e $V = 800$ V.
b) $E = 0$ e $V = 0$.
c) $E = 80$ V/cm e $V = 800$ V.
d) $E = 8{,}0 \cdot 10^3$ V/m e $V = 0$.
e) $E = 800$ V/m e $V = 800$ V.

11. Consideremos quatro cargas puntuais, todas de mesmo módulo *Q*, sendo duas positivas e duas negativas. Descreva como devemos distribuir essas cargas nos vértices do quadrado *ABCD*, mostrado na figura abaixo, de tal modo que a intensidade do campo e o potencial no centro do quadrado sejam ambos nulos.



As cargas positivas em vértices opostos e as cargas negativas também (por exemplo, cargas positivas em *A* e *C* e negativas em *B* e *D*).

12. Ao se carregar uma bateria, uma carga elétrica total de $2 \cdot 10^5$ C é transportada de um polo para o outro, entre os quais existe uma diferença de potencial de 12 V.

a) Qual é a quantidade de energia armazenada nessa bateria? $2{,}4 \cdot 10^6$ J

b) Sabendo-se que a massa da bateria é de 20 kg, a que altura ela poderia ser elevada se toda a energia que armazena fosse usada para realizar esse trabalho? (Considere $g = 10$ m/s^2.) 12 km

13 (Unesp-SP) Modelos elétricos são frequentemente utilizados para explicar a transmissão de informações em diversos sistemas do corpo humano. O sistema nervoso, por exemplo, é composto por neurônios (figura 1), células delimitadas por uma fina membrana lipoproteica que separa o meio intracelular do meio extracelular. A parte interna da membrana é negativamente carregada e a parte externa possui carga positiva (figura 2), de maneira análoga ao que ocorre nas placas de um capacitor.

Figura 1

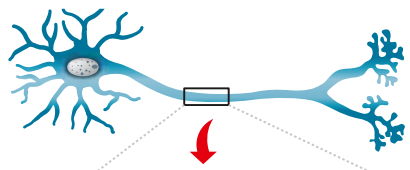


Figura 2

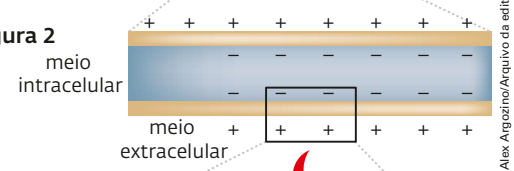
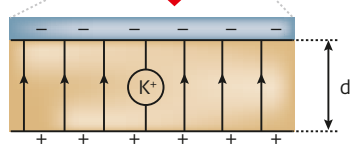


Figura 3



A figura 3 representa um fragmento ampliado dessa membrana, de espessura *d*, que está sob a ação de um campo elétrico uniforme, representado na figura por suas linhas de força paralelas entre si e orientadas para cima. A diferença de potencial entre o meio intracelular e o extracelular é *V*. Considerando a carga elétrica elementar como e, o íon de potássio K^+, indicado na figura 3, sob a ação desse campo elétrico, ficaria sujeito a uma força elétrica cujo módulo pode ser escrito por e

a) $e \cdot V \cdot d$
c) $\frac{V \cdot d}{e}$
e) $\frac{e \cdot V}{d}$
b) $\frac{e \cdot d}{V}$
d) $\frac{e}{V \cdot d}$

INFOGRÁFICO

Conheça um modelo de carro elétrico com um motor movido a hidrogênio, que não faz barulho e elimina água pelo escapamento.

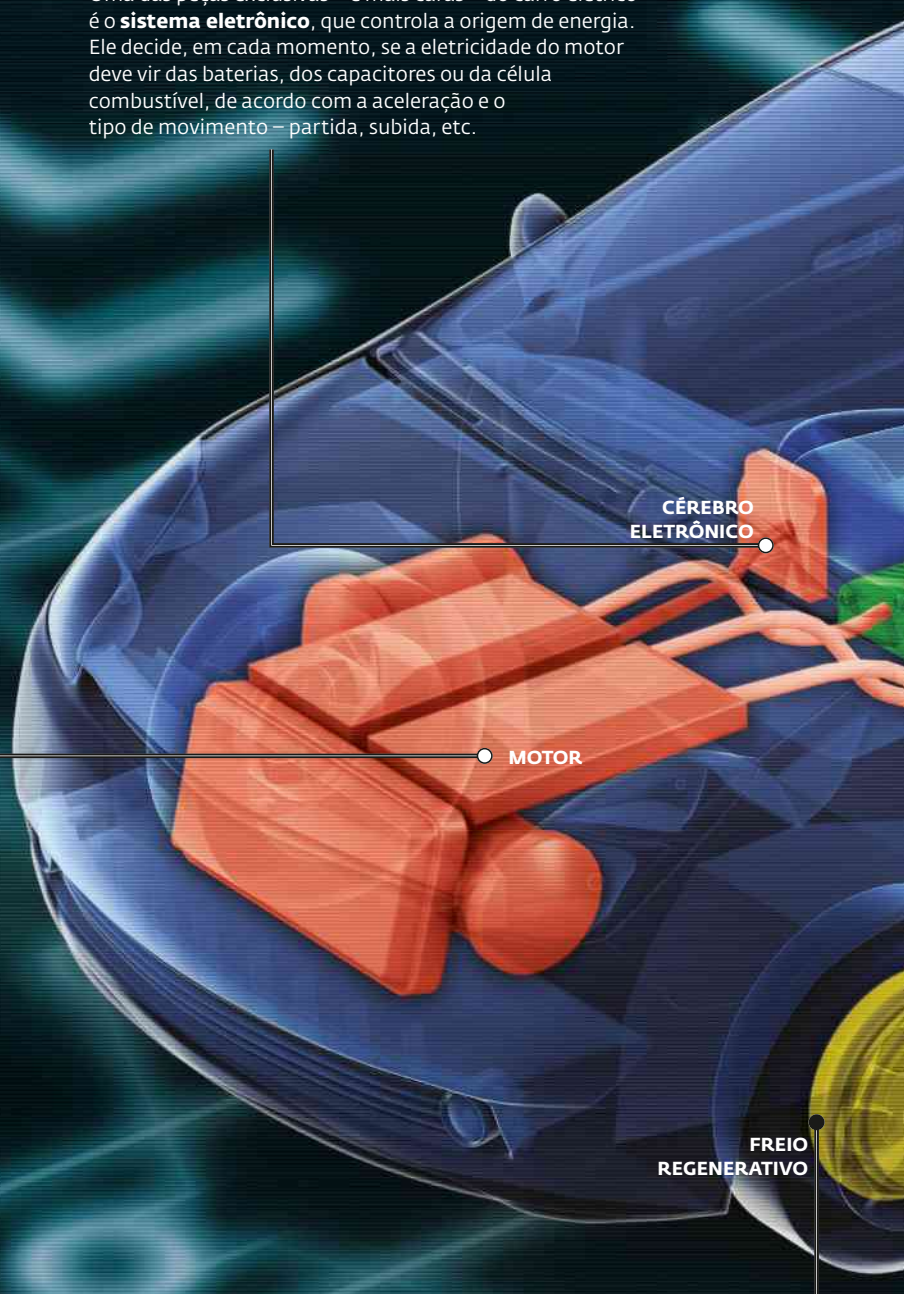
O infográfico desta unidade apresenta as principais informações sobre o funcionamento de um modelo de carro elétrico. Antes de responder às questões, faça a leitura deste infográfico observando como os textos e as imagens se relacionam e permitem a compreensão das informações referentes à geração e ao armazenamento de corrente elétrica em baterias, assuntos abordados nesta unidade.

1. Qual é a diferença entre o tanque de combustível de um carro elétrico e o de um carro comum?
2. O que é a célula combustível num carro elétrico?
3. Como a origem de energia é controlada em um carro elétrico?
4. Qual é o destino da energia produzida na célula combustível?
5. Qual é a autonomia de um carro elétrico?
6. O que é o freio regenerativo presente nos carros elétricos?

Veja respostas no Manual do Professor.

COMO FUNCIONA O CARRO ELÉTRICO?

Uma das peças exclusivas – e mais caras – do carro elétrico é o **sistema eletrônico**, que controla a origem de energia. Ele decide, em cada momento, se a eletricidade do motor deve vir das baterias, dos capacitores ou da célula combustível, de acordo com a aceleração e o tipo de movimento – partida, subida, etc.

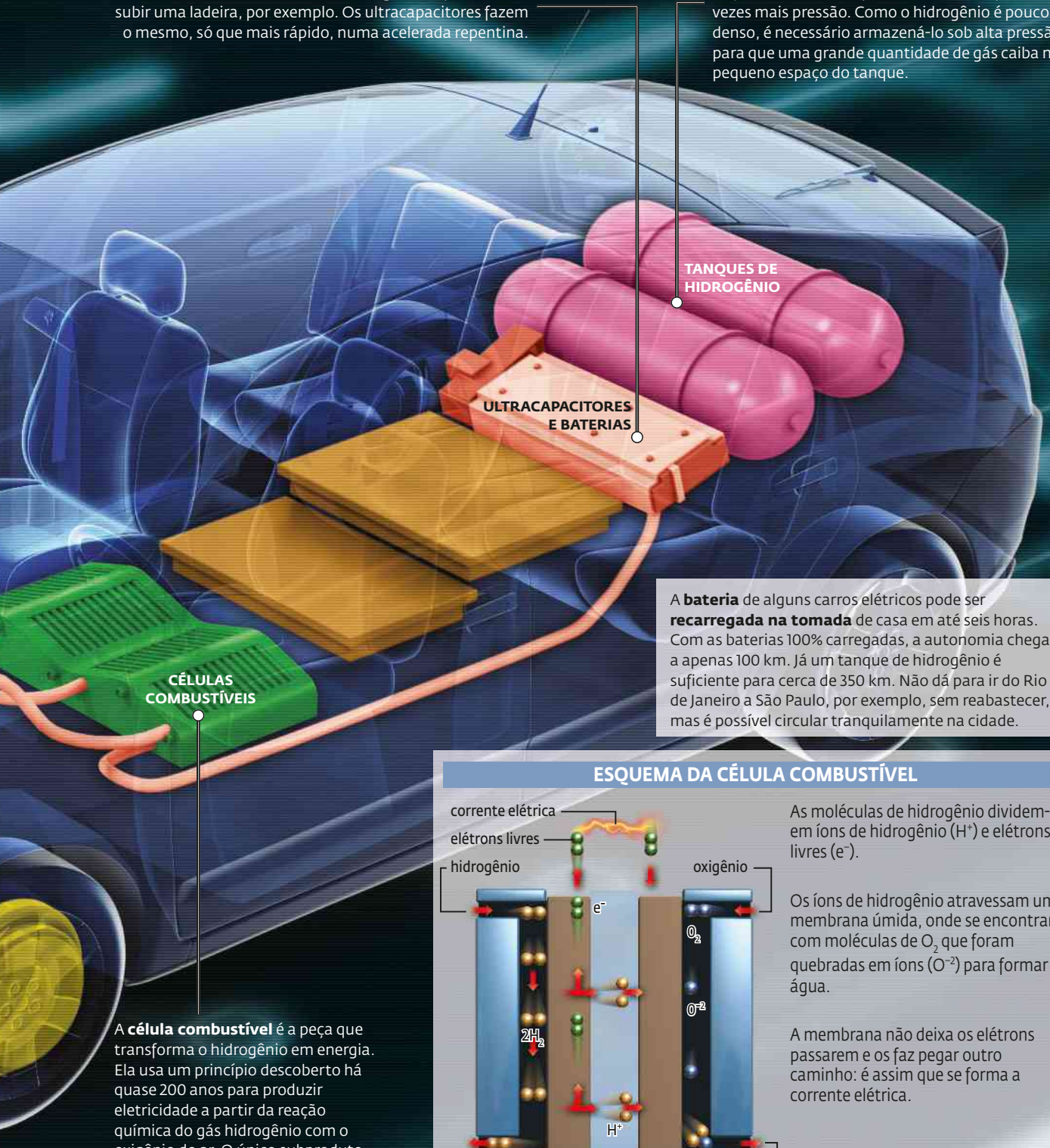


No lugar da energia liberada pela combustão de gasolina ou de outro combustível, o motor consome a eletricidade vinda do hidrogênio. Como não precisa das explosões, o motor **não faz nenhum barulho**!

Um equipamento comum nos carros elétricos é o **freio regenerativo**: ele transforma a energia mecânica do movimento das rodas em eletricidade para recarregar as baterias. Se você descer uma serra, por exemplo, pode chegar lá embaixo com a bateria mais carregada que no início da viagem.

A eletricidade produzida na célula pode ir direto para o motor ou recarregar duas reservas de energia do carro: **baterias e ultracapacitores**. As primeiras são como baterias de celulares e dão uma carga extra para o carro subir uma ladeira, por exemplo. Os ultracapacitores fazem o mesmo, só que mais rápido, numa acelerada repentina.

A energia para o motor vem do hidrogênio gasoso, estocado num **tanque** parecido com o de gás natural veicular. A diferença consiste em que o tanque é feito de fibra de carbono, que é mais leve e suporta cem vezes mais pressão. Como o hidrogênio é pouco denso, é necessário armazená-lo sob alta pressão, para que uma grande quantidade de gás caiba no pequeno espaço do tanque.

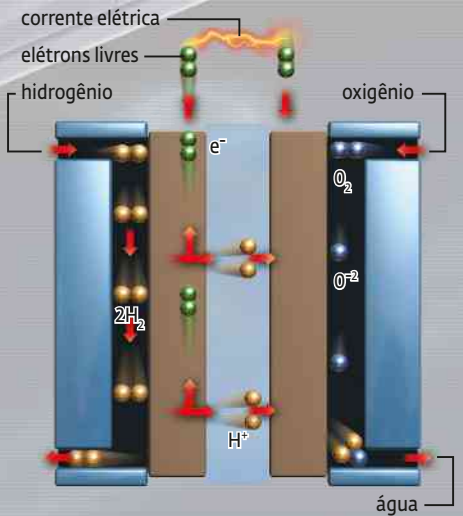


Jonatan Sarmento/Arquivo da editora

A **célula combustível** é a peça que transforma o hidrogênio em energia. Ela usa um princípio descoberto há quase 200 anos para produzir eletricidade a partir da reação química do gás hidrogênio com o oxigênio do ar. O único subproduto da reação é a água.

A **bateria** de alguns carros elétricos pode ser **recarregada na tomada** de casa em até seis horas. Com as baterias 100% carregadas, a autonomia chega a apenas 100 km. Já um tanque de hidrogênio é suficiente para cerca de 350 km. Não dá para ir do Rio de Janeiro a São Paulo, por exemplo, sem reabastecer, mas é possível circular tranquilamente na cidade.

ESQUEMA DA CÉLULA COMBUSTÍVEL



As moléculas de hidrogênio dividem-se em íons de hidrogênio (H^+) e elétrons livres (e^-).

Os íons de hidrogênio atravessam uma membrana úmida, onde se encontram com moléculas de O_2 que foram quebradas em íons (O^{-2}) para formar água.

A membrana não deixa os elétrons passarem e os faz pegar outro caminho: é assim que se forma a corrente elétrica.

Fonte dos dados: SALAODOCARRO.COM. *Como funcionam os carros elétricos*. Disponível em: <https://salaodocarro.com.br/como-funciona/carros-eletricos.html>. Acesso em: 28 maio 2016.

UNIDADE

2

Circuitos elétricos de corrente contínua

No início da modernização das cidades, as modificações da infraestrutura urbana passaram a ser impulsionadas por eletricidade e delineavam o avanço pelo qual passava a sociedade.

Atualmente, a eletricidade pode ser considerada um bem essencial e indispensável. Portanto, para além da possibilidade de criação dos mais diversos dispositivos eletrônicos aos quais temos acesso, a compreensão e a manipulação dos circuitos de tais aparelhos se apresentam como uma das mais proeminentes características da revolução tecnológica de nossa era.

CAPÍTULO 4
Corrente elétrica

CAPÍTULO 5
Força eletromotriz – Equação do circuito



Fios condutores transportam correntes elétricas alternadas entre uma usina geradora de eletricidade e os consumidores. São Paulo (SP), 2014.



Alexandre Cappi/Pulsar Imagens



Archives du 7ème Art/Photos 12/ Alamy/Other Images

Cena do filme *Apollo 13*. O filme mostra a história real da falha elétrica na espaçonave.

CAPÍTULO 4

Corrente elétrica

P Porque ligar o ar-condicionado significaria usar uma quantidade de ampères que poderia fazer falta para o resgate.

P Com elétrons livres presentes no metal que formam os fios.

P Ambos vão interromper a passagem da corrente elétrica.

O filme *Apollo 13* conta a história verídica da difícil missão de trazer de volta à Terra, após um grave problema técnico, três astronautas estadunidenses que fariam o terceiro pouso lunar da história. O enorme esforço combinado da equipe terrestre com a lunar fez com que tudo terminasse bem, e os astronautas foram resgatados com vida.

No filme, um dos maiores desafios entre os envolvidos era usar sabiamente a reserva de energia elétrica que a nave possuía. Por exemplo, nos diálogos sobre a temperatura no interior da nave, o chefe da missão, Jim Lovell (interpretado pelo ator Tom Hanks), é categórico: "Nós vamos precisar desses ampères! E o ar-condicionado permanece desligado."

Em sua fala, o ator utiliza o termo "ampère", que é a unidade de corrente elétrica. No filme, a preocupação em economizar energia elétrica era fundamental para manter em funcionamento o computador que gerenciava a trajetória e a reentrada da nave na atmosfera terrestre, bem como o acionamento do paraquedas que faria a frenagem final para o pouso.

Isso nos faz pensar em como usamos a energia elétrica no nosso cotidiano. Se fôssemos limitados a usar alguns ampères por dia, quais seriam as nossas reais prioridades?

PARA INICIAR A CONVERSA

Durante o resgate da tripulação da Apollo 13, ligar o ar-condicionado não era uma opção. Por quê?

Como é formada a corrente elétrica nos fios e nos cabos elétricos?

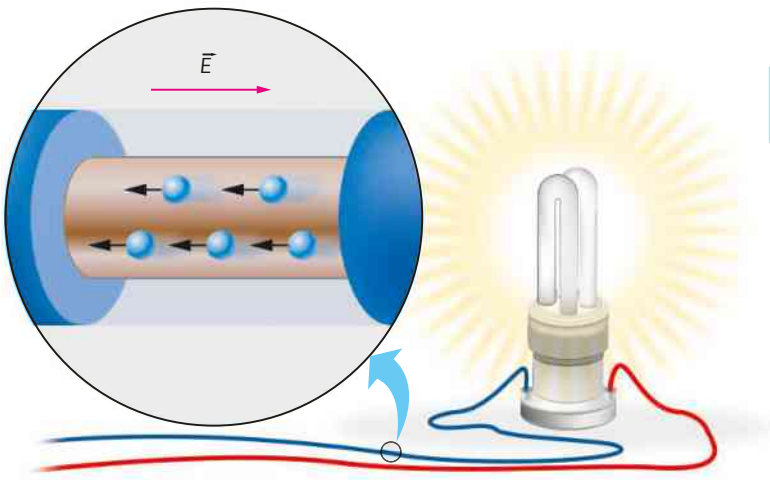
Nas residências existem disjuntores ou fusíveis ligados em série aos circuitos elétricos das tomadas e interruptores. Qual é a função desses dispositivos?

4.1 Corrente elétrica

O que é corrente elétrica?

Em um fio metálico existe grande número de elétrons que estão fracamente ligados ao núcleo do átomo. Os átomos de cobre, por exemplo, tipo de fio amplamente utilizado nas redes elétricas, têm o total de 29 prótons no núcleo, rodeados por 29 elétrons quando estão eletricamente neutros. No interior do fio de cobre, cada átomo pode formar um íon positivo ao perder um ou dois elétrons. Esses elétrons podem se deslocar por todo o interior do fio sendo chamados de elétrons livres. À temperatura ambiente, os elétrons livres estão em movimento desordenado dentro do fio. Quando é estabelecido um campo elétrico sobre o fio, ligando-o às extremidades de uma pilha ou bateria, os elétrons livres, sob a ação de uma força elétrica devida ao campo, entram imediatamente em movimento ordenado, formando a **corrente elétrica**.

Como os elétrons possuem carga negativa, esse movimento terá sentido contrário ao do campo aplicado, como representado na **figura 4.1**. Os íons positivos também sofrem a influência do campo elétrico, mas devido à interação entre si e à sua grande massa, eles praticamente não se movem.



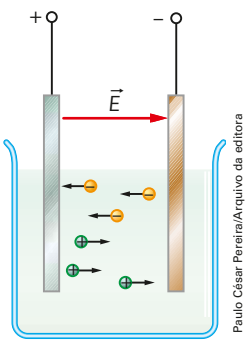
Antonio Robson/Arquivo da editora

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

Figura 4.1. Representação de um metal percorrido por uma corrente elétrica constituída por elétrons que se movem em sentido contrário ao do campo aplicado.

Uma corrente elétrica pode ser estabelecida também em condutores líquidos. Consideramos, por exemplo, uma solução de NaCl em água que dá origem a íons positivos (Na^+) e íons negativos (Cl^-) que ficam livres, podendo se deslocar no interior do líquido. Estabelecendo-se um campo elétrico na solução (isso pode ser obtido introduzindo-se nela duas placas metálicas ligadas a uma bateria), os íons positivos passam a se deslocar no sentido do vetor $\vec{E}$ e os íons negativos em sentido contrário **(figura 4.2)**. Portanto, a corrente elétrica em um condutor líquido é constituída pelo movimento de íons positivos e negativos, deslocando-se em sentidos contrários.

É possível, ainda, estabelecer correntes elétricas nos gases, como acontece nas lâmpadas de vapor de mercúrio, presentes nos postes de iluminação pública, por exemplo, ou quando uma faísca elétrica salta de um objeto para outro através do ar. Nesses casos, a corrente é constituída pelo movimento de íons positivos, de íons negativos e também de elétrons livres.



Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura 4.2. Em um condutor líquido, temos íons positivos movimentando-se no sentido do campo e íons negativos em sentido contrário.

Em resumo, podemos então dizer:

Quando um campo elétrico é estabelecido em um condutor qualquer, as cargas livres aí presentes entram em movimento sob a ação desse campo. Dizemos que esse deslocamento de cargas constitui uma corrente elétrica. Nos metais, a corrente elétrica é constituída por elétrons fracamente ligados, denominados elétrons livres em movimento. Nos líquidos, as cargas livres que se movimentam são íons positivos e negativos, enquanto, nos gases, são íons positivos, íons negativos e também elétrons livres.

Sentido da corrente elétrica

Em um condutor sólido, o sentido real da corrente elétrica corresponde ao sentido dos elétrons que estão se movendo com certa velocidade. Essa corrente é do polo negativo (potencial menor) para o polo positivo (potencial maior). Entretanto, quando estudamos corrente elétrica, adotamos o sentido convencional da corrente elétrica, que corresponde ao movimento de uma carga positiva, de mesmo valor, deslocando-se com a mesma velocidade, porém em sentido contrário. Isso se deve ao fato de que, historicamente, o sentido convencional foi estabelecido antes da descoberta de qual das cargas, positiva ou negativa, se deslocava dentro dos condutores sólidos. Os cientistas consideraram que seria uma complicação desnecessária adotar o sentido real para a corrente nos sólidos, pois teriam que modificar todas as leis estabelecidas até então. Assim, em um condutor metálico, apesar de sabermos que a corrente real é constituída por elétrons em movimento, vamos imaginá-la composta pela corrente convencional, de cargas positivas, movendo-se no sentido do campo elétrico **(figura 4.3)**.

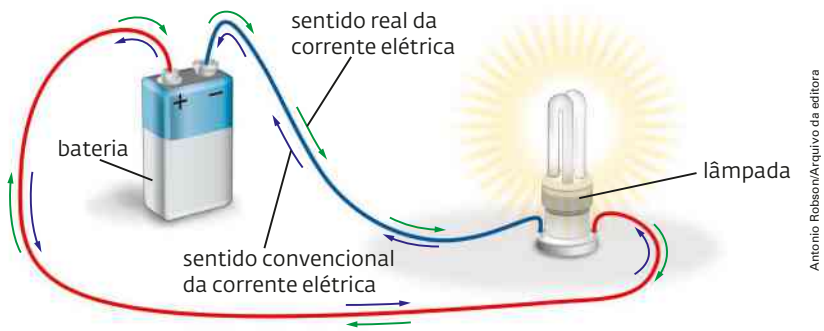


Figura 4.3. Corrente real em um fio metálico e corrente convencional equivalente.

A **figura 4.4** mostra a corrente elétrica real em um líquido, na qual temos íons positivos e negativos em movimento, e a corrente convencional (imaginária) equivalente à real, constituída apenas por cargas positivas em movimento.

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

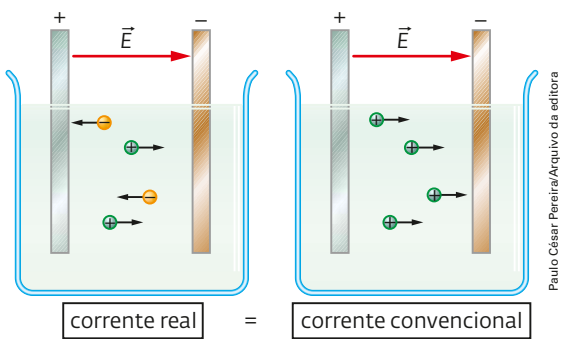
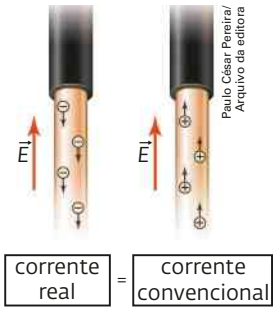


Figura 4.4. Corrente real em um líquido e corrente convencional equivalente.

Em um condutor metálico, sabemos que a corrente real é constituída por elétrons em movimento. Entretanto, vamos imaginá-la substituída pela corrente convencional, de cargas positivas, movendo-se no sentido do campo elétrico, como mostra a **figura 4.5**.

Assim, fica estabelecido que, quando nos referirmos a uma corrente elétrica, estaremos tratando da corrente convencional, a não ser que seja especificado o contrário.



Paulo César Pereira/ Arquivo da editora

Figura 4.5. Corrente real em um sólido metálico e corrente convencional equivalente.

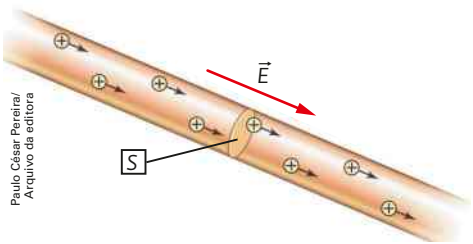
As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

Intensidade da corrente

Na **figura 4.6** está representado um fio condutor no qual foi estabelecida uma corrente elétrica (na figura está representada a corrente convencional).

Considere uma seção S qualquer do condutor e suponha que uma pessoa observe, durante um intervalo de tempo Δt, a quantidade de carga que passa através dessa seção. Representemos por ΔQ essa quantidade de carga. Denomina-se **intensidade da corrente** através da seção S a relação entre a quantidade de carga ΔQ e o intervalo de tempo Δt. Designando por i essa grandeza, temos, então:

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



Paulo César Pereira/ Arquivo da editora

Figura 4.6. A intensidade da corrente elétrica é a medida da quantidade de carga que passa, por unidade de tempo, através de uma seção S do condutor.

Observe que quanto maior for a quantidade de carga que passar através da seção, durante um certo tempo, maior será a intensidade da corrente naquela seção. Em outras palavras, a intensidade da corrente nos informa sobre a quantidade de carga que passa na seção por unidade de tempo.

No SI, a unidade de intensidade da corrente será 1 C/s. Essa unidade é denominada 1 ampère = 1 A, em homenagem ao físico francês André-Marie Ampère, que viveu no século XIX e contribuiu significativamente para o desenvolvimento do Eletromagnetismo. Assim, temos:

$$1\,\frac{C}{s} = 1 \text{ ampère} = 1 \text{ A}$$

Portanto, se em uma seção de um condutor tivermos uma corrente de 1 A, significa que, nessa seção, estará passando uma carga de 1 C durante 1 s.

É importante, pois, destacar:

Quando uma quantidade de carga ΔQ passa através da seção de um condutor, durante um intervalo de tempo Δt, a intensidade i da corrente nessa seção é a relação entre ΔQ e Δt, ou seja:

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


Pixtal/Arquivo da editora

ANDRÉ-MARIE AMPÈRE (1775--1836)

Físico francês, nascido em Lyon, foi um dos precursores do Eletromagnetismo. Tornou-se professor de Matemática, além de também lecionar Física e Química em escolas superiores de seu país. Embora não fosse um estudioso sistemático, Ampère desenvolveu uma grande obra. Além de estabelecer uma lei fundamental para o Eletromagnetismo (a lei de Ampère), realizou várias experiências que permitiram desenvolver a teoria matemática dos fenômenos eletromagnéticos já observados e a previsão de outros fenômenos. Foi o primeiro a utilizar técnicas de medidas elétricas, tendo construído um instrumento que foi o precursor dos aparelhos de medida hoje conhecidos.

Corrente contínua e corrente alternada

A aplicação de um campo elétrico $\vec{E}$ em um fio condutor estabelece nesse fio uma corrente elétrica, cujo sentido (convencional) é o mesmo do vetor $\vec{E}$. Então, se o sentido do campo elétrico aplicado permanecer sempre o mesmo, o sentido da corrente também se manterá inalterado, isto é, as cargas se deslocarão sempre em um mesmo sentido ao longo do fio. Uma corrente elétrica como essa é denominada **corrente contínua (C. C.)** (figura 4.7.a).

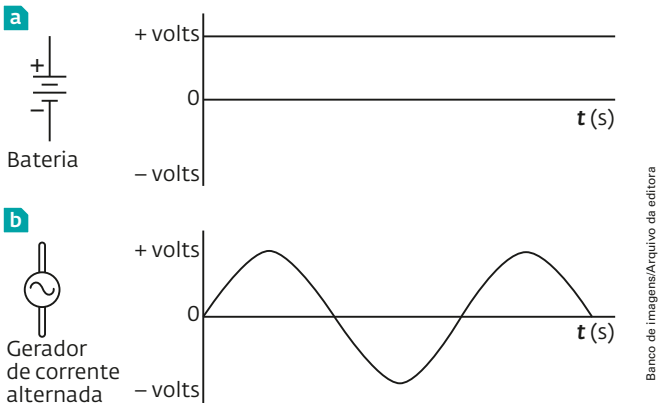


Figura 4.7. Gráfico da corrente contínua (**a**) e da corrente alternada (**b**) em função do tempo. Na lateral esquerda, temos os símbolos utilizados para representar uma bateria e um gerador de corrente alternada. Note que no símbolo da bateria o polo positivo é representado pelo traço maior, enquanto o traço menor representa o polo negativo.

As correntes contínuas são fornecidas, por exemplo, pelas pilhas (usadas em lanternas, rádios, etc.) ou pelas baterias de automóvel.

Entretanto, as correntes elétricas distribuídas pelas concessionárias de distribuição de energia elétrica, em quase todas as cidades do mundo, são **correntes alternadas (C. A.)**. Quando você liga um aparelho elétrico em uma tomada de sua casa, o campo elétrico estabelecido no fio condutor muda periodicamente de sentido (figura 4.7.b).

Consequentemente, as cargas elétricas no fio oscilam, deslocando-se ora em um sentido, ora em sentido contrário. Então, tanto a corrente elétrica como o campo elétrico mudam periodicamente de sentido.

A frequência de uma corrente alternada em vários países é igual a 60 hertz, o que equivale a dizer que as cargas elétricas no condutor executam 60 vibrações completas (60 ciclos) em cada segundo, sendo 30 em um sentido e 30 em outro.

No capítulo 8 veremos por que a distribuição de energia pelas companhias de eletricidade é feita por meio de correntes alternadas e aprenderemos como esse tipo de corrente é produzido nos geradores das grandes usinas (geradores de corrente alternada).

Uma corrente alternada pode ser transformada em corrente contínua por meio de dispositivos especiais, denominados **retificadores**. Esses dispositivos são representados pelo símbolo mostrado na figura 4.8 e, quando são introduzidos em um fio condutor no qual existe uma corrente alternada, esta se transforma em uma corrente contínua.

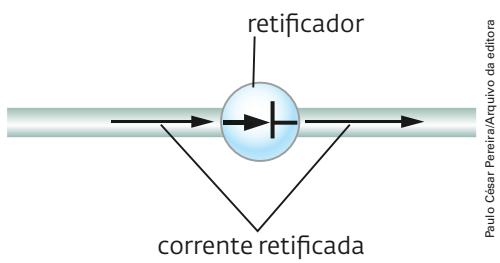


Figura 4.8. Representação esquemática de um retificador de corrente.

FÍSICA NO CONTEXTO

EFEITOS DA CORRENTE ELÉTRICA

Quando uma corrente elétrica atravessa um condutor, ela pode provocar efeitos térmico, químico, magnético e fisiológico.

O **efeito térmico**, também chamado de efeito Joule, é provocado por colisões entre os elétrons livres e os átomos do condutor. Esse efeito está presente principalmente nos aparelhos resistivos, como chuveiros, pranchas de cabelo e ferros de passar roupa.

O **efeito químico** ocorre quando a corrente elétrica atravessa soluções eletrolíticas, provocando reações químicas. Um exemplo de aplicação desse efeito é o processo de eletrólise, muito utilizado na galvanoplastia, em que objetos são recobertos com uma fina camada de metal (cromo, prata, níquel, etc.).

O **efeito magnético** corresponde ao campo magnético que é criado na região em torno da corrente elétrica. Esse efeito está presente nos transformadores e motores e será estudado mais adiante.

O **efeito fisiológico** ocorre quando a corrente elétrica atravessa o corpo humano. Esse processo é conhecido como choque elétrico. O choque elétrico pode ocorrer devido à descarga elétrica de um corpo carregado colocado em contato com o corpo humano. Em dias secos, os veículos podem acumular cargas em sua lataria devido ao atrito entre o veículo e o ar. No instante em que uma pessoa toca o veículo poderá haver produção de faísca ou choque.

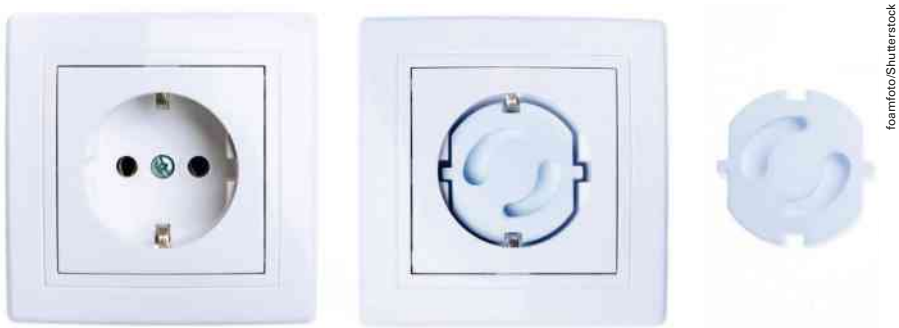
O choque elétrico pode ocorrer quando uma pessoa toca acidentalmente uma parte de um condutor energizado (**figura 4.9**). O choque elétrico também pode ocorrer quando uma pessoa é atingida por uma descarga elétrica como um raio.

Os efeitos causados no corpo humano dependem do trajeto da corrente elétrica nele, da intensidade, do tempo de duração do choque, entre outros fatores. Na **tabela 4.1** temos alguns efeitos fisiológicos.

Tabela 4.1

EFEITO FISIOLÓGICO DA CORRENTE ELÉTRICA	
Corrente elétrica	**Efeito fisiológico**
Menos de 1 mA	Não percebido.
1 mA a 2 mA	Limiar de percepção. Ligeiro formigamento.
2 mA a 4 mA	Choque brando.
4 mA a 10 mA	Choque grave com dor.
10 mA a 20 mA	Incapacidade de movimentar-se.
20 mA a 50 mA	Paralisação da respiração.
Mais de 50 mA	Fibrilação ventricular do músculo cardíaco. (Movimento desordenado das paredes do coração.)

TOOLEY, M. *Circuitos eletrônicos:* fundamentos e aplicações. Rio de Janeiro. Elsevier, 2008.



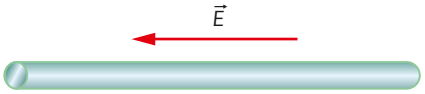
foamfoto/Shutterstock

Figura 4.9. Tocar nas partes internas de tomadas com os dedos ou objetos pontiagudos pode provocar choque. Casas com crianças devem ter as tomadas protegidas para evitar choque elétrico.

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

Não escreva no livro!

1. Um campo elétrico $\vec{E}$, apontando para a esquerda, é aplicado em um fio condutor, como mostra a figura.



a) Qual é o sentido da corrente de elétrons no fio? Para a direita.

b) Qual é o sentido da corrente convencional nesse fio? Para a esquerda.

2. Suponha que seja possível contar o número de elétrons que passam através de uma seção de um condutor no qual se estabeleceu uma corrente elétrica. Se durante um intervalo de tempo $\Delta t = 10$ s passam $2{,}0 \cdot 10^{20}$ elétrons nessa seção, determine:

a) a quantidade de carga ΔQ, em coulombs, que corresponde a esse número de elétrons (carga do elétron: $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C); $\Delta Q = 32$ C

b) a intensidade da corrente (em ampère) que passa na seção do condutor. $i = 3{,}2$ A

3. A intensidade da corrente que foi estabelecida em um fio metálico é $i = 400$ mA (1 mA = 1 miliampère = 10^{-3} A). Supondo que essa corrente foi mantida no fio durante 10 minutos, calcule:

a) a quantidade total de carga que passou através de uma seção do fio; 240 C

b) o número de elétrons que passou através dessa seção. $1{,}5 \cdot 10^{21}$ elétrons

4.2 Circuitos simples

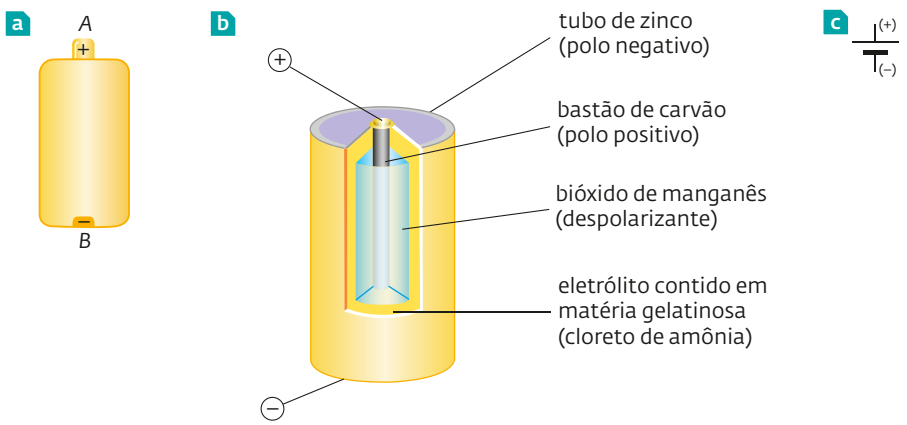
Pilha seca

Dissemos, na seção anterior, que um campo elétrico pode ser estabelecido no interior de um fio condutor ligando-se as extremidades desse fio aos polos de uma pilha. Isso ocorre porque a pilha é um dispositivo capaz de manter uma diferença de potencial entre esses polos, devido a reações químicas que se processam em seu interior.

Por exemplo, em uma pilha seca comum, usada em lanternas, rádios, etc., a extremidade *A* mostrada na **figura 4.10.a** encontra-se em um potencial mais alto do que a base *B* dessa pilha. A diferença de potencial entre esses pontos, nessa pilha, é cerca de 1,5 V. A extremidade *A* é denominada **polo positivo** (potencial mais alto), enquanto a base *B* é o **polo negativo** (potencial mais baixo). Na representação da **figura 4.10.b**, temos um "corte" de uma pilha seca, no qual destacamos alguns de seus componentes. Observe que o polo positivo é um bastão de carvão e o polo negativo é o invólucro de zinco.

Na **figura 4.10.c** mostramos o símbolo usado para representar uma pilha qualquer: o polo positivo é representado pelo traço maior, enquanto o traço menor representa o polo negativo.

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



Ilustrações: Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura 4.10. A representação da pilha seca mostrada em **a** e **b** está ilustrada em **c**.

As pilhas, que obtêm energia elétrica a partir de reações químicas espontâneas, tiveram origem nas pesquisas de Luigi Galvani, Alessandro Volta, Giovanni Valentino e John Frederic Daniell. A pilha química é apenas um dos tipos de geradores de eletricidade, dispositivos que transformam alguma outra forma de energia em energia elétrica.

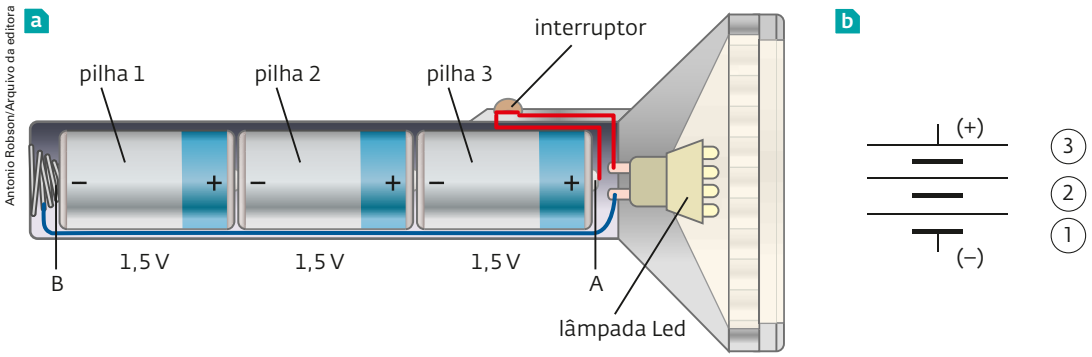
Associação de pilhas

A diferença de potencial fornecida por uma pilha seca é 1,5 V. Entretanto, é possível associar várias pilhas secas de modo a obter uma diferença de potencial mais elevada. Essa associação é obtida ligando-se as pilhas da maneira mostrada na **figura 4.11.a**: o polo positivo da pilha 1 é ligado ao polo negativo da pilha 2; o polo positivo desta é, por sua vez, ligado ao polo negativo da pilha 3, e assim sucessivamente. Quando várias pilhas são ligadas dessa maneira, dizemos que elas estão **associadas em série**.

Com essa associação, conseguimos obter diferenças de potencial mais elevadas. Na **figura 4.11.a**, ao passarmos do polo (−) da pilha 1 para o seu polo (+), o potencial se eleva de 1,5 V. Como esse polo está em contato com o polo (−) da pilha 2, eles estarão no mesmo potencial. Assim, ao passarmos para o polo (+) da pilha 2, teremos uma elevação adicional de 1,5 V no potencial. Do mesmo modo, o polo (+) da pilha 2 está no mesmo potencial que o polo (−) da pilha 3 (estão em contato). Como o potencial se eleva de 1,5 V ao atravessarmos a pilha 3, a diferença de potencial entre os pontos *A* e *B* da **figura 4.11.a** será:

$$V_{AB} = 1{,}5\ \text{V} + 1{,}5\ \text{V} + 1{,}5\ \text{V} \quad \therefore \quad V_{AB} = 4{,}5\ \text{V}$$

Uma associação em série de pilhas é representada em um circuito elétrico como o da **figura 4.11.b**. Você certamente já teve oportunidade de montar uma associação desse tipo em lanternas, rádios, brinquedos elétricos, etc., cujo funcionamento exige uma diferença de potencial superior a 1,5 V.



Antonio Robson/Arquivo da editora

Figura 4.11. Associação de pilhas em série em uma lanterna para obter voltagem mais elevada (**a**) e o símbolo utilizado para representar a associação de pilhas em série em um circuito elétrico (**b**). Representação sem escala e em cores fantasia.

Bateria de automóvel

As baterias de automóvel são associações semelhantes àquela que acabamos de analisar. Entretanto, os polos das pilhas usadas nessa associação são placas de chumbo mergulhadas em uma solução de ácido sulfúrico. A diferença de potencial entre esses polos é aproximadamente igual a 2 V. Pode-se construir uma bateria associando-se, em série, algumas dessas pilhas e colocando-as no interior de um invólucro resistente.

Na **figura 4.12.a** representamos, esquematicamente, uma bateria constituída por três pilhas com voltagem de 2 V cada uma, e na **figura 4.12.b** temos uma bateria que contém seis pilhas, fornecendo voltagem de 12 V, associadas de maneira semelhante ao que foi feito na **figura 4.12.a**.

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

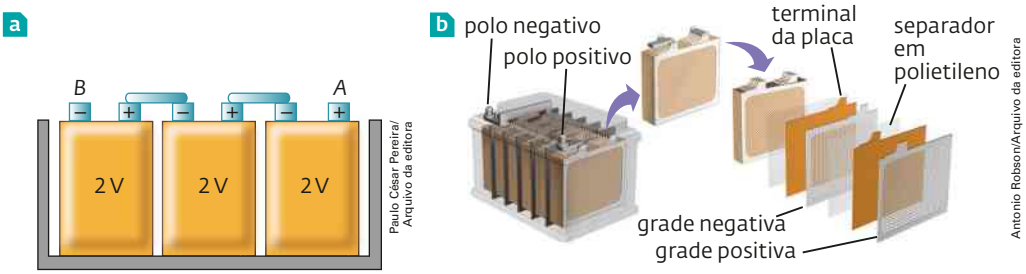


Figura 4.12. A bateria usada nos automóveis é uma associação de pilhas de chumbo.

Circuito elétrico simples

Na **figura 4.13.a** apresentamos uma bateria cujos polos foram ligados por meio de um fio condutor. Quando fazemos uma ligação como essa, dizemos que construímos um **circuito elétrico**, cuja representação esquemática está mostrada na **figura 4.13b**.

Como existe uma diferença de potencial entre os polos da bateria, essa diferença de potencial será estabelecida nas extremidades do fio. Nessas condições, um campo elétrico será criado dentro do condutor, gerando uma corrente elétrica no fio. O sentido (convencional) dessa corrente no fio será aquele indicado na **figura 4.13.b**, pois as cargas positivas tendem a se deslocar de onde o potencial é maior para onde ele é menor. Portanto, sempre que ligamos os polos de uma pilha ou bateria por meio de um condutor, é estabelecida, nesse condutor, uma corrente, cujo sentido (convencional) é do polo positivo para o polo negativo.

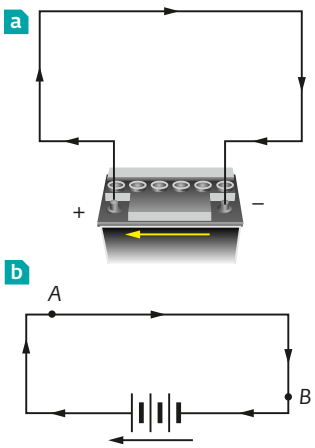


Figura 4.13. Quando ligamos os polos de uma bateria por um fio condutor, uma corrente elétrica é estabelecida nesse fio.

Quando a corrente chega ao polo negativo, as cargas são forçadas, em virtude de reações químicas, a se deslocar no interior da bateria, passando para o polo positivo, o que completa o circuito. Prosseguindo em seu movimento, as cargas continuam a se deslocar no fio, indo novamente do polo positivo para o negativo. Enquanto as reações químicas mantiverem a diferença de potencial entre os polos da bateria, teremos uma corrente circulando continuamente da maneira que acabamos de descrever.

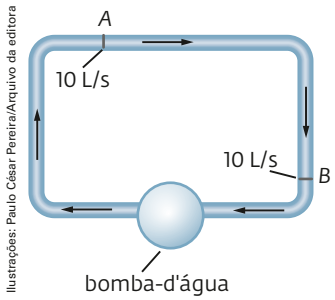


Figura 4.14. A vazão de água no cano é a mesma em qualquer seção do condutor.

Comentários

1) Consideremos, no circuito mostrado na **figura 4.13b**, duas seções quaisquer, *A* e *B*, do fio. Designando por i_A e i_B a intensidade da corrente nessas seções, verifica-se que elas são iguais, isto é:

$$i_B = i_A$$

Esse resultado é justificado, uma vez que, no deslocamento de *A* para *B*, não há desvio nem acúmulo de cargas. Logo, o número de elétrons que passa em *A*, durante 1 segundo, deve ser igual ao número de elétrons que passa em *B* nesse mesmo intervalo de tempo. Pode-se entender melhor essa afirmação fazendo-se uma analogia com o escoamento de água em uma tubulação. Suponha uma bomba produzindo uma circulação de água em um tubo, como mostra a **figura 4.14**. Se em uma certa seção *A* do tubo tivermos um fluxo de água igual a 10 L/s, o valor do fluxo desse líquido nesse mesmo instante, através da seção *B*, terá que ser também igual a 10 L/s (a não ser que o tubo esteja furado).
Portanto, retornando à **figura 4.13**, podemos concluir que a intensidade da corrente tem o mesmo valor em qualquer seção do circuito.

2) Algumas pessoas costumam dizer que um aparelho elétrico em funcionamento "consome corrente elétrica". Podemos perceber que essa afirmação não está correta. De fato, se uma lâmpada, por exemplo, for ligada a uma bateria **(figura 4.15)**, a corrente terá um valor único em todas as seções do fio. Logo, a intensidade da corrente será a mesma, antes e depois de atravessar a lâmpada. Portanto, a lâmpada não "consome" corrente elétrica. Na realidade, ao passar pela lâmpada, a corrente perde **energia**, que se converte em outras formas de energia (como estudaremos no final deste capítulo). Assim, quando uma corrente elétrica passa por um aparelho, há uma variação na energia dessa corrente, mas sua intensidade não se modifica.

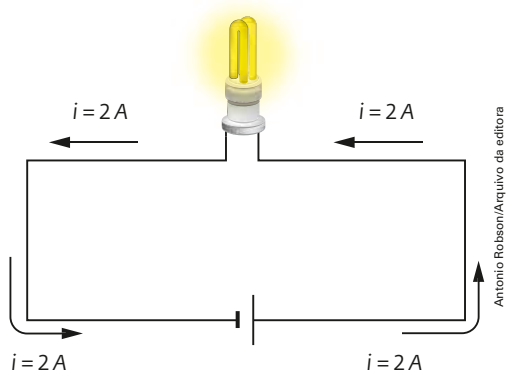


Figura 4.15. A intensidade da corrente é a mesma em qualquer ponto do fio.

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

Não escreva no livro!

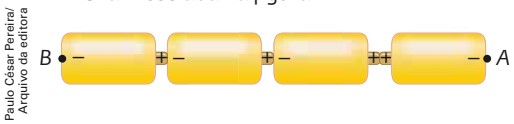
4. Um estudante possui um rádio que funciona com uma diferença de potencial constante de 6 V.

a) Quantas pilhas secas o estudante deve associar em série para fazer funcionar o seu rádio? 4 pilhas.

b) Faça um desenho no caderno mostrando como deve ser a disposição das pilhas na associação feita pelo estudante.

b) De maneira semelhante à da figura 4.11.a.

5. Suponha que o estudante do exercício anterior tivesse associado suas pilhas secas da maneira mostrada na figura.

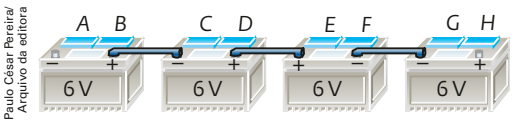


a) Com essa montagem ele conseguiria obter a diferença de potencial desejada? Não.

b) Qual a diferença de potencial V_{AB} entre os pontos *A* e *B* da figura? $V_{AB} = 3{,}0\ V$

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

6. Na associação de baterias mostrada na figura abaixo, os polos *B* e *C*, *D* e *E* e *F* e *G* estão ligados por chapas metálicas espessas (tudo se passa, então, como se esses polos estivessem em contato um com o outro).



Analisando a associação, responda:

a) Qual é a diferença de potencial entre *B* e *C*? E entre *D* e *E*? E entre *F* e *G*?

b) Ao passarmos de *C* para *D*, o valor do potencial aumenta ou diminui? De quanto?

c) Ao passarmos de *E* para *F*, o valor do potencial aumenta ou diminui? De quanto?

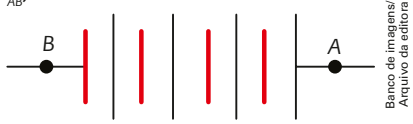
6. a) $V_{BC} = 0$; $V_{DE} = 0$ e $V_{FG} = 0$
b) Aumenta 6 V.
c) Diminui 6 V.

7. Considerando a associação do exercício anterior, diga qual é o valor da diferença de potencial:

a) entre *A* e *E*; $V_{AE} = 12\ V$

b) entre *A* e *H*. $V_{AH} = 12\ V$

8. Na bateria esquematizada na figura abaixo, a diferença de potencial entre os pontos *A* e *B* (V_{AB}) vale 12 V.



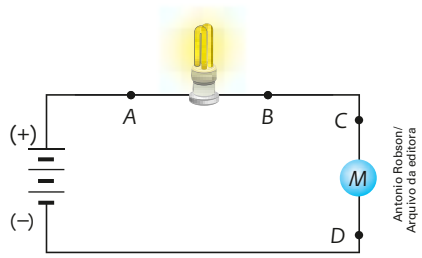
Lembre-se do início do capítulo 3, quando vimos que a diferença de potencial entre os pontos *A* e *B* é definida como $V_{AB} = V_A - V_B$. Com base nas informações acima, calcule:

a) V_{BA}; $V_{BA} = -12\ V$

b) V_A, no caso em que $V_B = 10\ V$; $V_A = 22\ V$

c) V_A, no caso em que $V_B = 0\ V$. $V_A = 12\ V$

9. Uma lâmpada e um motor elétrico foram ligados a uma bateria, originando o circuito mostrado na figura abaixo.



Indique, em uma cópia da figura no seu caderno, o sentido da corrente no circuito e responda:

a) O sentido da corrente na lâmpada é de A para B ou de B para A? de *A* para *B*

b) O sentido da corrente no motor é de C para D ou de D para C? de C para *D*

c) E qual é o sentido da corrente no interior da bateria? do polo negativo para o positivo

10. Sabendo-se que, no circuito do exercício anterior, a intensidade da corrente que passa pela seção A do fio é 1,2 A, diga qual é a intensidade da corrente:

a) que passa por B; 1,2A

b) que passa através do motor; 1,2A

c) que passa no interior da bateria. 1,2A

4.3 Resistência elétrica

O que é resistência elétrica?

Resistência elétrica é a capacidade de oposição que um condutor oferece à passagem de corrente elétrica através dele, mesmo quando uma diferença de potencial é aplicada sobre ele. Na **figura 4.16** temos um trecho de um fio condutor *AB* ligado a uma bateria, que vai estabelecer uma diferença de potencial V_{AB} nas extremidades desse condutor.

Suponha um condutor *AB* ligado a uma bateria, como mostra a **figura 4.16**. Sabemos que a bateria estabelece uma diferença de potencial V_{AB} nas extremidades desse condutor e, consequentemente, uma corrente *i* passará através dele.

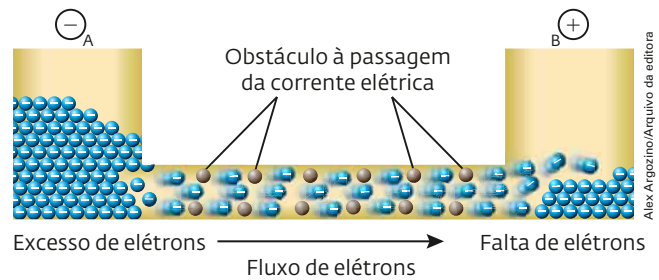


Figura 4.16. A intensidade da corrente que passa por um condutor, nos extremos do qual é estabelecida uma diferença de potencial V_{AB}, depende da resistência desse condutor. A figura representa, sem escala e em cores fantasia, um trecho de um fio condutor que é estável.

As cargas móveis que constituem a corrente elétrica, aceleradas pela diferença de potencial V_{AB}, realizarão colisões contra os átomos ou moléculas do condutor, havendo uma oposição oferecida pelo fio à passagem da corrente elétrica através dele. Essa oposição poderá ser maior ou menor, dependendo da natureza do condutor que foi ligado entre *A* e *B*. A corrente *i* no condutor será maior ou menor dependendo dessa oposição.

Para caracterizar a oposição que um condutor oferece à passagem de corrente através dele, define-se uma grandeza, denominada **resistência elétrica**, *R*, do condutor, por:

$$R = \frac{V_{AB}}{i}$$

Vemos que, para um dado valor de V_{AB}, quanto maior o valor de *R*, menor será o valor da corrente *i*, isto é, maior será a oposição que o condutor oferece à passagem de corrente através dele.

A unidade dessa grandeza, no SI, será 1 volt/ampère = 1 V/A. Essa unidade é denominada 1 ohm (representa-se pela letra grega ômega, Ω), em homenagem ao físico alemão do século XIX, Georg Ohm, que colaborou no estudo de fenômenos relacionados com a corrente elétrica. Logo, temos:

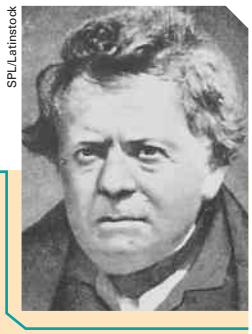
$$1\,\frac{\text{V}}{\text{A}} = 1 \text{ ohm} = 1\ \Omega$$

Em resumo, podemos destacar:

Quando uma diferença de potencial V_{AB} é aplicada nas extremidades de um condutor, estabelecendo nele uma corrente elétrica *i*, a resistência desse condutor é dada pela relação:

$$R = \frac{V_{AB}}{i}$$

Quanto maior for o valor de *R*, maior será a oposição que o condutor oferecerá à passagem da corrente.


SPL/Latinstock

GEORG SIMON OHM (1787-1854)

Em 1827, Ohm publicou o resultado de seu trabalho mais importante em um folheto *"O circuito galvânico examinado matematicamente"*. Nessa publicação ele apresentava a lei sobre a resistência dos condutores, que mais tarde foi denominada lei de Ohm. Embora esses estudos tenham sido uma colaboração importante na teoria dos circuitos elétricos e suas aplicações, na época eles foram recebidos com frieza pela comunidade científica. Esse fato levou Ohm a se demitir do cargo que ocupava em Colônia. Em 1833, entretanto, ele se reintegrou nas atividades científicas aceitando um cargo na Escola Politécnica de Nuremberg, Alemanha. Seu trabalho foi finalmente reconhecido, tendo, então, recebido uma medalha da Real Sociedade de Londres, na Inglaterra.

Exemplo

Ligando-se uma lâmpada à tomada de uma residência, uma diferença de potencial de 120 V será aplicada às extremidades do filamento da lâmpada. Verifica-se, então, que uma corrente de 2,0 A passa pelo filamento.

a) Qual é o valor da resistência desse filamento?

O valor de R será dado por $R = \frac{V_{AB}}{i}$, em que temos $V_{AB} = 120\,V$ e $i = 2{,}0\,A$. Assim:

$$R = \frac{V_{AB}}{i} = \frac{120}{2{,}0} \quad \therefore \quad R = 60\,\Omega$$

b) Se essa lâmpada for ligada aos polos de uma bateria que aplica, no filamento, uma diferença de potencial de 12 V, qual será a corrente que passará através dele? (Suponha que a resistência do filamento permaneça constante.)

Da relação $R = \frac{V_{AB}}{i}$, obtemos:

$$i = \frac{V_{AB}}{R} = \frac{12}{60} \quad \therefore \quad i = 0{,}20\,A$$

c) Quando a lâmpada é ligada a uma outra bateria, verifica-se que uma corrente de 1,5 A passa pelo filamento. Qual é a diferença de potencial que essa bateria está aplicando à lâmpada?

De $R = \frac{V_{AB}}{i}$, temos:

$$V_{AB} = Ri = 60 \cdot 1{,}5 \quad \therefore \quad V_{AB} = 90\,V$$

Comentários

1) Quando um condutor apresenta uma resistência elétrica, ele é denominado um **resistor**. Entretanto, é comum usar-se o termo "resistência" como sinônimo de "resistor". Nos diagramas de circuitos elétricos, um resistor é representado como na **figura 4.17**.

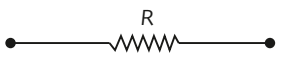
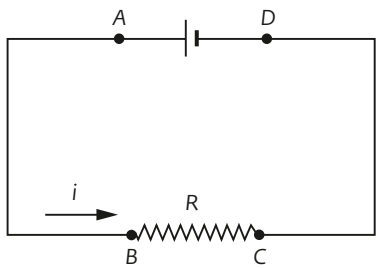


Figura 4.17. Um resistor de resistência R é representado, em diagramas de circuitos elétricos, da maneira representada na figura.

2) Se um trecho de um circuito possuir uma resistência elétrica muito pequena (desprezível), será representado, nos diagramas, por linhas cheias (não quebradas), como os trechos AB e CD da **figura 4.18**. Nessa figura, as resistências R_{AB} e R_{CD} dos fios que ligam as extremidades da resistência R à bateria são desprezíveis. Então, podemos considerar $R_{AB} = 0$ e $R_{CD} = 0$. Deve-se observar que a resistência R ligada entre B e C tem um valor apreciável, que não pode ser desprezado.



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

Figura 4.18. Os fios de ligação cuja resistência é desprezível são representados por linhas retas.

3) Na **figura 4.18**, designemos por i a corrente que está passando no circuito. Lembrando da definição de resistência elétrica, podemos escrever, para o trecho AB do circuito, a seguinte relação:

$$V_{AB} = R_{AB}i \quad \text{ou} \quad V_A - V_B = R_{AB}i$$

Como $R_{AB} = 0$, teremos $V_A - V_B = 0$ ou $V_A = V_B$. Logo, dois pontos situados sobre um trecho de resistência desprezível possuem o mesmo potencial.

Ao passarmos de B para C, haverá uma queda no potencial, pois a resistência R do trecho BC não é desprezível. A diferença de potencial entre B e C será dada por:

$$V_B - V_C = Ri$$

Logo, teremos $V_B > V_C$, isto é, o potencial decrescerá ao longo da resistência, desde o valor V_B até o valor V_C.

Do mesmo modo que no trecho AB, no trecho CD não haverá variação no potencial porque $R_{CD} = 0$. Então, teremos $V_C = V_D$.

Podemos concluir que o gráfico da variação do potencial V, ao longo do circuito, desde A até D, terá o aspecto mostrado na **figura 4.19**.

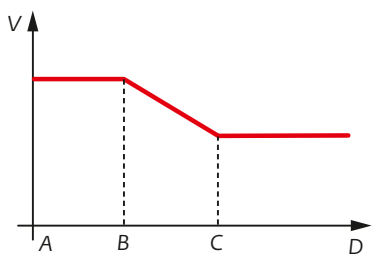
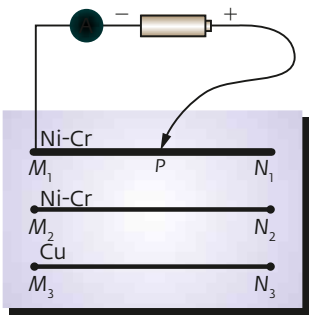


Figura 4.19. Gráfico da variação do potencial ao longo do circuito mostrado na **figura 4.18**.

Fatores que influenciam no valor de uma resistência de um condutor



Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura 4.20. Esquema de montagem que nos permite identificar os fatores que influenciam na resistência elétrica de um condutor.

Para analisar os fatores que influem no valor da resistência de um fio metálico, consideremos a montagem mostrada na **figura 4.20**: três fios, de mesmo comprimento, são fixados sobre um suporte de madeira, sendo M_1N_1 e M_2N_2 feitos de um mesmo material (uma liga de níquel e cromo) e M_3N_3, de cobre. Além disso, a área da seção reta de M_1N_1 é maior que as áreas de M_2N_2 e de M_3N_3, que são iguais entre si (isto é, M_1N_1 é mais grosso que os outros dois).

Se ligarmos uma pilha e um amperímetro A ao fio M_1N_1 (**figura 4.20**), apenas a resistência do trecho M_1P será percorrida pela corrente fornecida pela pilha e indicada pelo amperímetro. Se deslocarmos o contato móvel P ao longo de M_1N_1, aproximando-o de N_1, observaremos que a leitura do amperímetro vai tornar-se cada vez menor. Como a diferença de potencial da pilha é sempre a mesma, concluímos que a resistência do trecho M_1P aumenta à medida que aumentamos seu comprimento. Esta experiência nos mostra uma propriedade válida para qualquer condutor:

A resistência de um condutor é tanto maior quanto maior for seu comprimento.

Suponha, agora, que a pilha e o amperímetro sejam ligados às extremidades M_1 e N_1 e que anotemos a indicação do amperímetro. Se, em seguida, essa ligação fosse feita em M_2 e N_2, isto é, nas extremidades do fio mais fino de níquel-cromo, observaríamos uma diminuição na leitura do amperímetro. Portanto, a resistência de M_2N_2 é maior que a de M_1N_1. Lembrando que esses dois fios têm o mesmo comprimento, vemos que eles diferem apenas pela área de sua seção reta. Assim, chegamos à seguinte propriedade, válida para os condutores em geral:

A resistência de um condutor é tanto maior quanto menor for a área de sua seção reta, isto é, quanto mais fino for o condutor.

Por fim, se ligarmos o amperímetro e a pilha às extremidades do fio de cobre M_3N_3, perceberemos que a indicação do amperímetro é maior que a da ligação feita em M_2N_2, isto é, a resistência do fio M_3N_3 é menor que a de M_2N_2. Como esses fios têm o mesmo comprimento e a mesma área da seção reta, concluímos que:

A resistência de um condutor depende do material de que ele é feito.

Portanto, alguns materiais são melhores condutores que outros. Na experiência que acabamos de descrever, concluímos que o cobre é melhor condutor que o níquel-cromo. Na **tabela 4.2**, mostramos alguns metais, colocados em ordem do melhor condutor (prata) para o pior (níquel-cromo).

Tabela 4.2

CONDUTIVIDADE ELÉTRICA
Prata
Cobre
Alumínio
Tungstênio
Ferro
Chumbo
Mercúrio
Níquel-cromo

melhor condutor

pior condutor

FÍSICA NO CONTEXTO

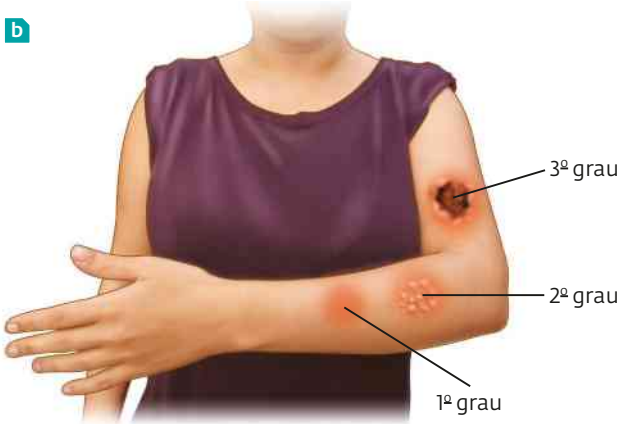
O EFEITO JOULE NO COTIDIANO DO SER HUMANO

Existem diversos dispositivos elétricos que facilitam as nossas atividades diárias. Quando perguntado aos usuários desses dispositivos, raramente eles responderão que os responsáveis pelos efeitos dos quais fazemos uso são os resistores. Isso ocorre porque na maioria das vezes nós não percebemos o quanto os resistores fazem parte do nosso cotidiano. A função básica de um resistor é oferecer uma oposição à passagem de corrente elétrica, que é chamada de resistência. Como uma consequência direta dessa função, os resistores transformam energia elétrica em energia térmica, conhecido como efeito térmico ou **efeito Joule**. Essa elevação de temperatura do condutor por onde passa a corrente elétrica ocorre devido às colisões dos elétrons do condutor, que se deslocam vibrando intensamente. Com esse tipo de resistor em aparelhos elétricos é possível, por exemplo, grelhar carnes, tostar fatias de pão, usar secador de cabelos, tomar banho quente, ferver a água usando um ebulidor, usar aquecedor de ar, passar roupa, etc.

O corpo humano também é um condutor elétrico e sua resistência elétrica varia conforme o tipo e as condições em que a pele de cada pessoa se encontra (caso ela esteja seca ou molhada). O efeito Joule é um dos principais efeitos térmicos utilizado em tratamentos estéticos e de fisioterapia. A eletrolipoforese ou eletrolipólise **(figura 4.21.a)**, por exemplo, emprega correntes de baixa frequência (5 a 50 Hz) que atuam no corpo humano nas células de gordura (adipócitos) e lipídios. O efeito Joule provoca o aumento do fluxo sanguíneo na região através da vasodilatação do tecido, com consequente melhora na oxigenação local e no aumento do metabolismo celular. Entretanto, o efeito Joule também pode provocar queimaduras por meio de choque elétrico **(figura 4.21.b)** quando a corrente elétrica que percorrer o corpo humano for muito intensa ou o tempo de contato for muito longo. Nesse caso, os danos causados ao corpo humano podem ser devastadores e vão desde dormência da pele até perda dos sentidos ou até mesmo a morte.



Reprodução/<http://www.movimentocorporal.com.br/>



Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura 4.21. Fotografia de eletrolipoforese ou eletrolipólise com agulhas (**a**). Representação artística de queimadura por choque elétrico (**b**).

Sugestão de leitura: Texto complementar 3: Choque elétrico no corpo humano. In: *Física 3*: eletromagnetismo. GREF. São Paulo: Editora da USP, 2005.

Resistividade de um material

Georg Simon Ohm (1789-1854), físico e matemático alemão, comprovou que se tomarmos um fio condutor, como o da **figura 4.22**, o valor de sua resistência dependerá de seu comprimento e da área de sua seção reta.

Realizando-se medidas cuidadosas, verifica-se que a resistência, R, do fio é diretamente proporcional ao seu comprimento, L, isto é:

$$R \propto L$$

Por outro lado, verifica-se que a resistência do fio é inversamente proporcional à área, A, de sua seção reta, ou seja:

$$R \propto \frac{1}{A}$$

Portanto, quanto mais grosso for o fio, menor será a sua resistência. Associando-se esses dois resultados, podemos escrever que:

$$R \propto \frac{L}{A}$$

Vemos que, se quisermos obter um fio condutor de baixa resistência, ele deve ser de pequeno comprimento e possuir grande área de seção reta (ser grosso). Introduzindo uma constante de proporcionalidade apropriada, podemos transformar a relação anterior em uma igualdade. Essa constante, que se representa pela letra grega ρ (lê-se rô), é denominada **resistividade**. Virá, então:

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

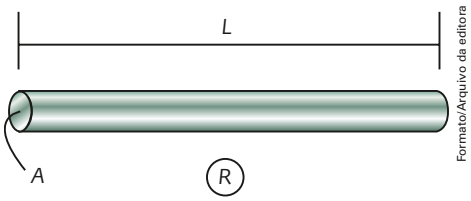


Figura 4.22. A resistência de um condutor é dada por $R = \rho \frac{L}{A}$, em que ρ é a resistividade do material.

Tabela 4.3

RESISTIVIDADE À TEMPERATURA AMBIENTE	
Material	**ρ** (ohm · metro)
Prata	$1{,}5 \cdot 10^{-8}$
Cobre	$1{,}7 \cdot 10^{-8}$
Alumínio	$2{,}6 \cdot 10^{-8}$
Tungstênio	$5{,}5 \cdot 10^{-8}$
Ferro	$10 \cdot 10^{-8}$
Chumbo	$22 \cdot 10^{-8}$
Mercúrio	$94 \cdot 10^{-8}$
Níquel-cromo	$100 \cdot 10^{-8}$

A resistividade é uma grandeza característica do material que constitui o fio, isto é, cada substância possui um valor diferente para a resistividade ρ. Na **tabela 4.3** são apresentados os valores das resistividades de algumas substâncias.

Pela relação $R = \rho \frac{L}{A}$, podemos ver que, tomando-se vários fios de mesmo comprimento e de mesma área, porém feitos de materiais diferentes, apresentará menor resistência aquele que possuir menor resistividade. Concluímos, então, que, quanto menor for a resistividade ρ de um material, menor será a oposição que esse material oferecerá à passagem de corrente através dele. Assim:

Uma substância será tanto melhor condutora elétrica quanto menor for o valor de sua resistividade.

Observando a **tabela 4.3**, vemos que todas as substâncias nela apresentadas são boas condutoras elétricas, pois possuem resistividades muito pequenas. Essa constatação poderia ser prevista, pois as substâncias apresentadas na tabela são metálicas e os metais são bons condutores elétricos.

O que é um reostato

Às vezes é necessário variar a resistência de um circuito, por exemplo, quando queremos aumentar o volume do rádio ou obter um maior aquecimento da água nos chuveiros elétricos. Nesses casos devemos utilizar um **reostato**, que são resistores que permitem aumentar ou diminuir a intensidade da corrente em um circuito.

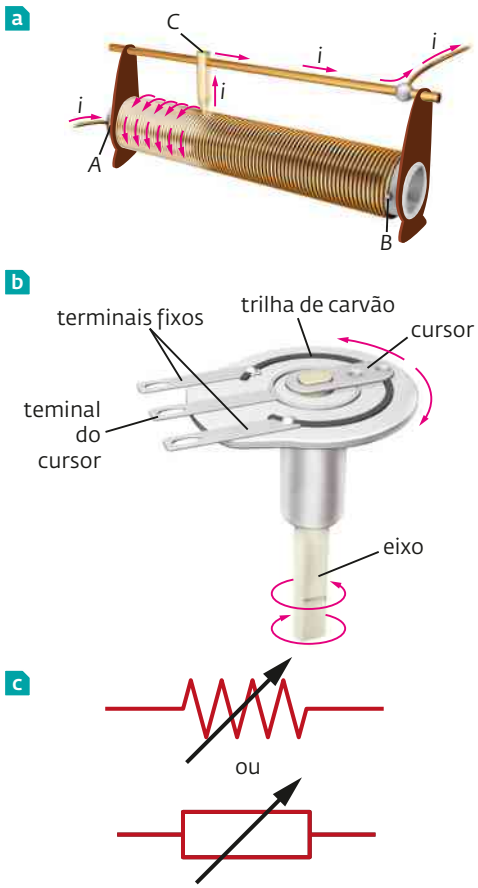
Existem diversos tipos de reostato.

Na **figura 4.23.a** apresentamos um tipo muito comum de reostato, constituído por um comprido fio *AB*, de resistência variável, e um cursor *C*, que pode ser deslocado ao longo desse fio, estabelecendo contato em qualquer ponto entre *A* e *B*. Observe que a corrente que sai do polo positivo da bateria percorre o trecho *AC* do reostato, prosseguindo através do cursor até o polo negativo da bateria. Não há corrente passando no trecho *CB*, pois estando o circuito interrompido em *B*, a corrente não poderá prosseguir através desse trecho.

A resistência elétrica pode assumir valores entre zero e o valor total da resistência do fio. À medida que o cursor segue para o ponto *A*, o valor da resistência vai diminuindo e, quando atingir zero, terá um valor de corrente elétrica tendendo ao infinito. Nessa situação, temos uma **corrente de curto-circuito**.

Na **figura 4.23.b** temos um potenciômetro. Note que a diferença entre o reostato e o potenciômetro se deve ao número de conexões. O reostato tem duas conexões **(figura 4.23.a)** e o potenciômetro, três **(figura 4.23.b)**. Ao girar o volante do potenciômetro, o cursor se desloca ao longo de um fio condutor, variando seu comprimento e, assim, fazendo variar a resistência do circuito. Na **figura 4.23.c** temos o símbolo que representa um reostato em um diagrama de circuito elétrico.

A **figura 4.24** é uma fotografia de um reostato de cursor muito usado nos laboratórios de eletricidade. A **figura 4.25** mostra o esquema e a fotografia de outro modelo comum de reostato.



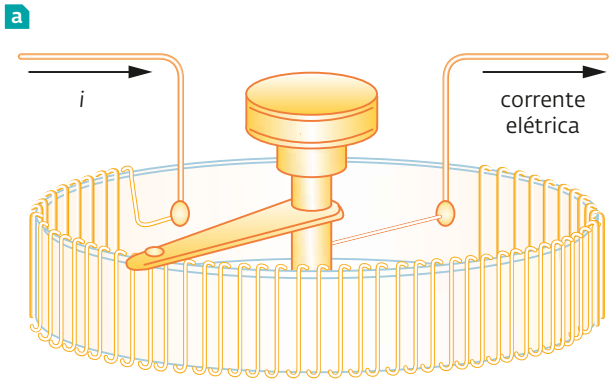
Ilustrações: Antonio Robson/Arquivo da editora

Figura 4.23. Reostato de cursor (**a**), potenciômetro (**b**) e símbolo do reostato em circuitos elétricos (**c**).



Sérgio/Quim/SOI Studios

Figura 4.24. Fotografia de um reostato de cursor.





Eduardo Santaliestra/Estúdio Paulista

Figura 4.25. Esquema (**a**) e fotografia (**b**) de um reostato muito usado em circuitos elétricos. Ao girar o volante do dispositivo, o cursor se desloca ao longo de um fio condutor, variando seu comprimento e, assim, fazendo variar a resistência do circuito.

As imagens desta página estão representadas fora de proporção.

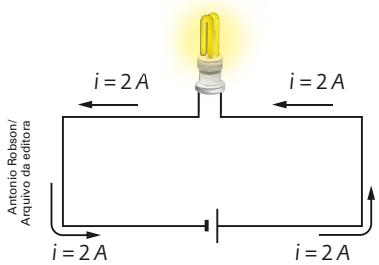
As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

Não escreva no livro!

13. a) 0,30 A em ambas.
14. a) 4 vezes menor.
15. a) O cobre.

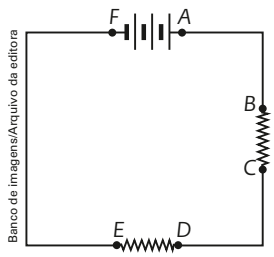
11. Quando uma dada lâmpada é ligada a uma bateria que lhe aplica uma diferença de potencial $V_{AB} = 6{,}0$ V, verifica-se que o filamento dessa lâmpada é percorrido por uma corrente $i = 2{,}0$ A.



Antonio Robson/Arquivo da editora

a) Qual é a resistência, R, desse filamento? 3,0 Ω
b) Se essa lâmpada for ligada a uma pilha, que lhe aplica uma diferença de potencial de 1,5 V, qual será a corrente que passará em seu filamento? (Suponha que a resistência do filamento não se modifica.) 0,50 A
c) Quando essa lâmpada é ligada a certa bateria, uma corrente de 1,5 A passa por seu filamento. Qual é a diferença de potencial que essa bateria aplica na lâmpada? 4,5 V

12. Observe o circuito mostrado na figura.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Lembrando-se da convenção para representar resistências elétricas, responda:
a) Quais trechos do circuito têm resistências desprezíveis? *AB*, *CD* e *EF*.
b) Quais os trechos cujas resistências não podem ser desprezadas? *BC* e *DE*
c) Quais os valores das diferenças de potencial V_{AB}, V_{CD} e V_{EF}? $V_{AB} = V_{CD} = V_{EF} = 0$

13. No circuito do exercício anterior, suponha que a corrente que passa pela seção A seja de 0,30 A e que as resistências de BC e DE sejam $R_{BC} = 15\ \Omega$ e $R_{DE} = 25\ \Omega$.
a) Qual é a intensidade da corrente que passa na resistência BC? E na resistência DE?
b) Determine os valores das voltagens V_{BC} e V_{DE}. $V_{BC} = 4{,}5$ V; $V_{DE} = 7{,}5$ V
c) Quais são os valores das diferenças de potencial V_{AD} e V_{AF}? $V_{AD} = 4{,}5$ V; $V_{AF} = 12$ V

14. Uma bateria mantém uma diferença de potencial constante em um fio de cobre no qual é estabelecida uma corrente de 2,0 A. Esse fio é substituído por outro, também de cobre, de mesmo comprimento, mas de diâmetro duas vezes maior que o primeiro.
a) A resistência do segundo fio é maior ou menor do que a do primeiro? Quantas vezes?
b) Qual é a intensidade da corrente que passará no segundo fio? 8,0 A

15. Consultando a tabela ilustrada abaixo, responda:
a) Considerando o cobre e o tungstênio, qual deles é melhor condutor de eletricidade?
b) Suponha que o único critério para a escolha do material a ser usado na confecção dos fios de ligação seja o fato de ele ser bom condutor.
Nesse caso, qual é o material da fiação elétrica de nossas residências? A prata.

Material	ρ (ohm · metro)
Alumínio	$2{,}6 \cdot 10^{-8}$
Cobre	$1{,}7 \cdot 10^{-8}$
Níquel-cromo	$100 \cdot 10^{-8}$
Chumbo	$22 \cdot 10^{-8}$
Ferro	$10 \cdot 10^{-8}$
Mercúrio	$94 \cdot 10^{-8}$
Prata	$1{,}5 \cdot 10^{-8}$
Tungstênio	$5{,}5 \cdot 10^{-8}$

4.4 A lei de Ohm

O que é um condutor ôhmico?

Consideremos um condutor, como o da **figura 4.16**, ao qual foi aplicada uma certa diferença de potencial V_{AB}. Essa diferença de potencial estabelecerá, no condutor, uma corrente i. Variando o valor da diferença de potencial aplicada ao condutor, verificamos que a corrente que passa por ele também se modifica.

Por exemplo, uma diferença de potencial $(V_{AB})_1$ provoca uma corrente i_1; uma diferença de potencial $(V_{AB})_2$ provoca uma corrente i_2; uma voltagem $(V_{AB})_3$ provoca uma corrente i_3; etc.

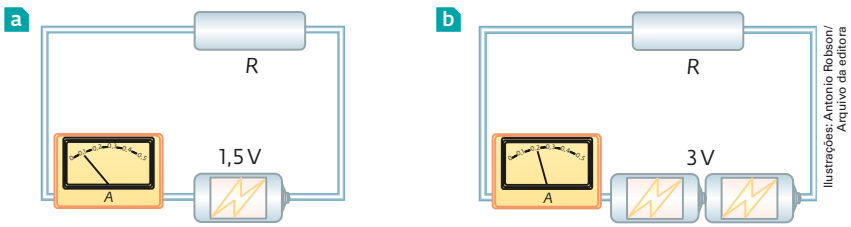
O cientista alemão Georg Ohm realizou várias experiências, medindo cada diferença de potencial (e as correntes correspondentes) quando aplicadas em diversos condutores feitos de substâncias diferentes. Verificou então que, para muitos materiais, principalmente os metais, a relação entre a diferença de potencial e a corrente mantinha-se constante, isto é:

$$\frac{(V_{AB})_1}{i_1} = \frac{(V_{AB})_2}{i_2} = \frac{(V_{AB})_3}{i_3} = \ldots$$

ou seja,

$$\frac{V_{AB}}{i} = \text{constante}$$

Mas $\frac{V_{AB}}{i}$ representa o valor da resistência R do condutor. Então, Ohm concluiu que para aqueles condutores tinha-se R = constante **(figura 4.26)**.



Ilustrações: Antonio Robson/Arquivo da editora

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

Figura 4.26. A resistência R obedece à lei de Ohm.

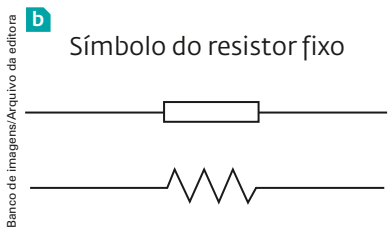
Esse resultado é conhecido como **lei de Ohm** e pode ser sintetizado da seguinte maneira:

Para um grande número de condutores (principalmente os metais), o valor da resistência permanece constante, não dependendo da diferença de potencial aplicada ao condutor.

Os resistores para os quais a resistência se mantém constante são denominados resistores ôhmicos. Os demais resistores são chamados de resistores não ôhmicos. Na **figura 4.27** estão alguns resistores **(figura 4.27.a)** e o símbolo que é utilizado nos circuitos elétricos **(figura 4.27.b)**.



Francisco Javier Gil/Shutterstock



Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 4.27. Resistores fixos comercializados (**a**) e símbolo do resistor nos circuitos elétricos (**b**).

Comentários

1) Os condutores que obedecem a essa lei são denominados **condutores ôhmicos**. Não devemos nos esquecer, porém, de que existem materiais que não obedecem à lei de Ohm, isto é, modificando-se a diferença de potencial que é aplicada a um dado condutor, feito com material desse tipo, modifica-se o valor da resistência desse condutor (a resistividade do material é alterada pela modificação na diferença de potencial).

2) A expressão $V_{AB} = Ri$ é válida, quer o condutor obedeça ou não à lei de Ohm. Se o condutor for ôhmico, o valor de R nessa expressão será sempre o mesmo, enquanto, para um condutor não ôhmico, o valor de R variará conforme a diferença de potencial V_{AB} aplicada. Em nosso curso, salvo se for dito o contrário, vamos lidar apenas com os condutores que obedecem à lei de Ohm.

O gráfico $V_{AB} \times i$

Para os condutores ôhmicos, a expressão $V_{AB} = Ri$ nos mostra que $V_{AB} \propto i$, pois o valor de R permanece constante. Portanto, se construirmos o gráfico $V_{AB} \times i$ para um condutor ôhmico, obteremos uma reta passando pela origem **(figura 4.28.a)**. A inclinação desse gráfico nos fornece o valor da resistência R do condutor.

Se o condutor não obedecer à lei de Ohm, o gráfico $V_{AB} \times i$ não será retilíneo, podendo apresentar diversos aspectos, dependendo da natureza do condutor. Na **figura 4.28.b** apresentamos duas formas possíveis do gráfico $V_{AB} \times i$ para dois condutores, (1) e (2), que não obedecem à lei de Ohm.

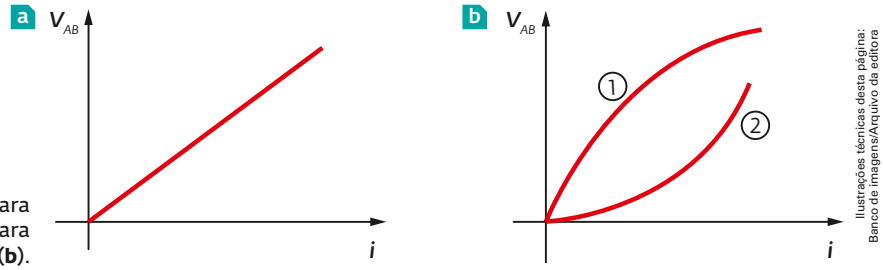


Figura 4.28. Gráfico $V_{AB} \times i$ para um condutor ôhmico (**a**) e para condutores não ôhmicos (**b**).

Exemplo

Em um laboratório, um fio condutor foi submetido a diversas diferenças de potencial. Medindo-se os valores dessas diferenças de potencial e da corrente que cada uma delas estabeleceu no condutor, obteve-se a tabela seguinte:

V_{AB} (V)	5,0	10	15	20
i (A)	0,20	0,40	0,60	0,80

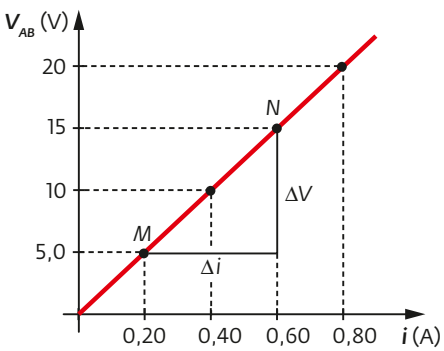


Figura 4.29. Gráfico para o exemplo da seção 4.4.

a) Construa o gráfico $V_{AB} \times i$ para esse condutor.

Usando os dados da tabela, obtemos o gráfico mostrado na **figura 4.29**.

b) Esse condutor obedece à lei de Ohm?

Sim, pois o gráfico $V_{AB} \times i$ é uma reta passando pela origem, portanto, $V_{AB} \propto i$. Isso poderia ser constatado, também, pelos valores da tabela, pois vemos aí que, dobrando V_{AB}, o valor de i também dobra, etc. Logo, a resistência R do fio é constante, então, ele é um condutor ôhmico.

c) Qual é o valor da resistência R desse condutor?

O valor de R pode ser obtido pela inclinação do gráfico $V_{AB} \times i$. Considerando os pontos M e N da **figura 4.29**, temos:

$$\Delta V = 10\ \text{V} \quad \text{e} \quad \Delta i = 0{,}40\ \text{A}$$

Logo, a inclinação do gráfico é:

$$\frac{\Delta V}{\Delta i} = \frac{10}{0{,}40} = 25$$

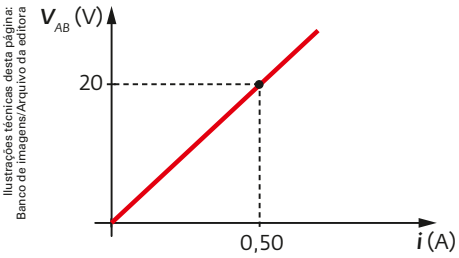
Então, o valor da resistência do fio é $R = 25\ \Omega$. Deve-se observar que o valor de R poderia ser obtido também a partir da tabela fornecida, dividindo qualquer valor de V_{AB} pelo correspondente valor de i, isto é:

$$R = \frac{V_{AB}}{i} = \frac{5{,}0}{0{,}20} = \frac{10}{0{,}40} = \frac{15}{0{,}60} = \frac{20}{0{,}80} \text{ ou } R = 25\ \Omega$$

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

Não escreva no livro!

16. A figura deste exercício mostra o gráfico $V_{AB} \times i$ para um certo resistor.



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

a) Esse resistor é ôhmico? Sim.

b) Qual é o valor de sua resistência quando submetido a uma voltagem de 20 V? 40 Ω

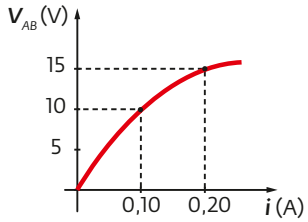
17. Considerando o resistor do exercício anterior, responda:

a) Duplicando-se a voltagem nele aplicada, o que ocorre com o valor da corrente que passa no resistor? Também duplica.

b) Duplicando-se a voltagem nele aplicada, o que ocorre com o valor de sua resistência?

c) Qual voltagem deve ser aplicada no resistor para que ele seja percorrido por uma corrente de 2,0 A? 80 V

18. Para um certo resistor, obtivemos o gráfico $V_{AB} \times i$ mostrado na figura deste exercício.



a) Esse resistor é ôhmico? Não.

b) Qual é o valor de sua resistência quando submetido a uma voltagem de 10 V? 100 Ω

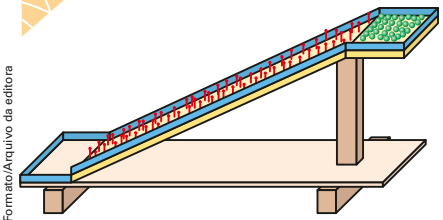
c) E qual é o valor de sua resistência quando a voltagem é de 15 V? 75 Ω

19. Diferenças de potencial, mesmo que pequenas, podem causar graves danos, dependendo da resistência do corpo humano. O valor dessa resistência pode variar entre, aproximadamente, 100 000 Ω, para pele seca, e cerca de 1 000 Ω, para pele molhada. Qual é a corrente que atravessará o corpo da pessoa em cada caso e quais serão as possíveis consequências fisiológicas (consulte a **tabela 4.1**)?

17. b) Não se altera.
19. Com a pele seca, 1,2 mA, e com a pele molhada 120 mA, ou seja, há risco de morte se uma pessoa tocar uma rede elétrica com a pele molhada.

FÍSICA NO CONTEXTO

Analogia mecânica para a Primeira Lei de Ohm



Formato/Arquivo da editora

Figura 4.30. Bolinhas de gude (elétrons) que irão descer uma rampa (condutor). Representação sem escala e em cores fantasia.

Nesta analogia, a **rampa** corresponde ao **condutor metálico**. As **bolinhas de gude** representam os **elétrons livres** da corrente elétrica. Os **pregos** representam os íons da rede que formam o próprio condutor e que oferecem oposição à passagem das bolinhas, assim, os pregos estão associados à **resistência elétrica** *R* do condutor **(figura 4.30)**. Quanto maior a velocidade de descida das bolinhas, maior o número de elétrons livres que passam por uma seção da rampa (condutor), deste modo, **a velocidade de descida** é proporcional à intensidade da **corrente elétrica** *i*. Nesta analogia, a **altura vertical** da rampa é proporcional à **diferença de potencial elétrico** V_{AB}.

Vamos testar a analogia para a Lei de Ohm: $R = \frac{V_{AB}}{i} = \text{constante}$.

Para R constante (supondo condutor ôhmico), as grandezas V_{AB} e *i* são diretamente proporcionais, ou seja, o aumento de V_{AB} implica o aumento de i. Isto concorda com nossa analogia, pois aumentar V_{AB} significa aumentar a altura da rampa. Maior altura, maior inclinação. Maior inclinação, maior velocidade de descida, portanto, maior corrente elétrica i.

Atente, no entanto, para os limites da analogia! Apenas para que conste um de seus limites, chamamos a atenção para o fato de os pregos estarem parados, o que não é análogo ao movimento oscilatório real dos íons do metal.

4.5 Associação de resistores

Resistores ligados em série

Muitas vezes, nos circuitos elétricos, aparecem resistores ligados um em seguida do outro. Quando isso acontece, dizemos que os resistores estão **associados em série**. As lâmpadas usadas na decoração das árvores de Natal, por exemplo, geralmente são associadas dessa maneira **(figura 4.31)**.

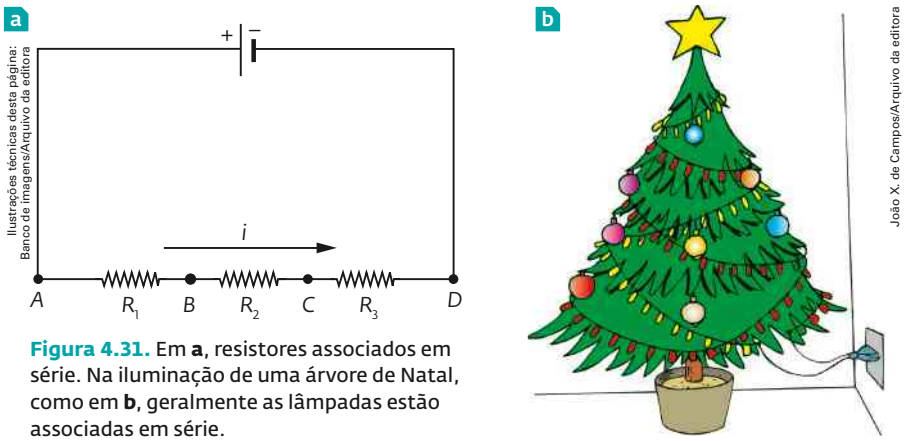


Figura 4.31. Em **a**, resistores associados em série. Na iluminação de uma árvore de Natal, como em **b**, geralmente as lâmpadas estão associadas em série.

Se uma diferença de potencial for aplicada às extremidades *A* e *D* da associação apresentada na **figura 4.31**, uma corrente elétrica passará pelos resistores dessa associação. Como a intensidade *i* dessa corrente terá o mesmo valor em qualquer seção do circuito, os resistores de resistências R_1, R_2 e R_3 serão percorridos pela mesma corrente mesmo que R_1, R_2 e R_3 tenham valores diferentes.

Designando por V_{AB}, V_{BC} e V_{CD} as diferenças de potencial em R_1, R_2 e R_3, respectivamente, temos, pela **figura 4.31**:

$$V_{AB} + V_{BC} + V_{CD} = V_{AD}$$

Como o valor de *i* é igual nos três resistores, podemos escrever:

$$V_{AB} = R_1 i \qquad V_{BC} = R_2 i \qquad V_{CD} = R_3 i$$

Podemos concluir que no resistor de resistência de maior valor será observada a maior queda de potencial. No caso particular da foto da **figura 4.32**, as lâmpadas são idênticas; portanto, experimentam a mesma queda de potencial.

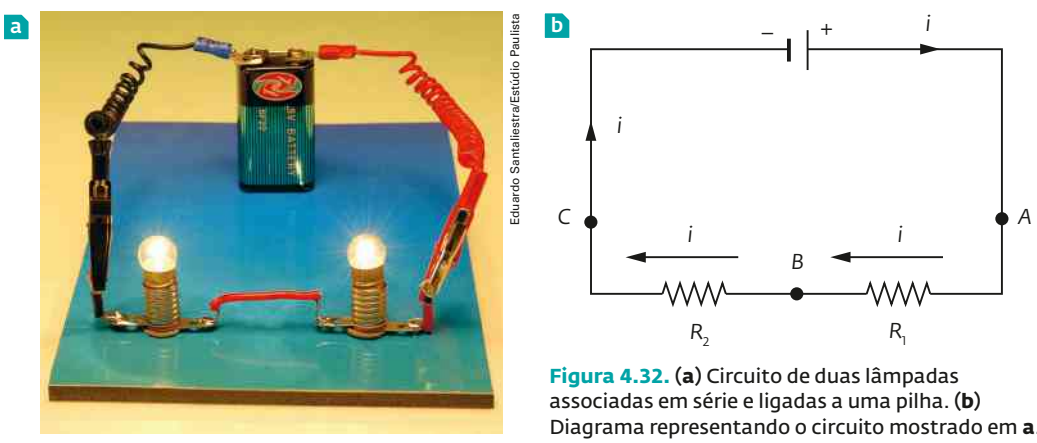
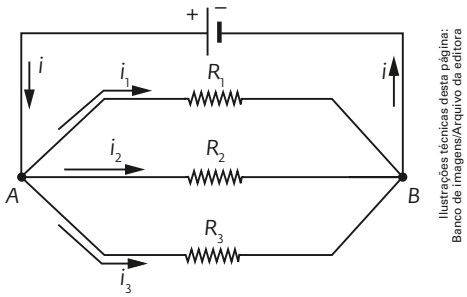


Figura 4.32. **(a)** Circuito de duas lâmpadas associadas em série e ligadas a uma pilha. **(b)** Diagrama representando o circuito mostrado em **a**.

Resistores ligados em paralelo

Os resistores elétricos podem também ser ligados, em um circuito, da maneira mostrada na **figura 4.33**. Nesse tipo de ligação, dizemos que os resistores estão **associados em paralelo**. Os dois faróis de um automóvel e as lâmpadas em uma residência são exemplos de resistores ligados em paralelo.



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

Figura 4.33. Resistores associados em paralelo.

Pela **figura 4.33** observamos que os resistores de R_1, R_2 e R_3 estão ligados, cada um, entre os mesmos pontos *A* e *B*. Dessa maneira, a mesma diferença de potencial V_{AB} estará aplicada em cada um desses resistores. Por exemplo, se a diferença de potencial V_{AB} fornecida pela bateria for de 12 V, teremos tanto R_1 quanto R_2 e R_3 submetidas, cada uma, a essa diferença de potencial. Note que a corrente total *i*, fornecida pela bateria, se distribui pelos resistores, passando uma corrente i_1 em R_1, i_2 em R_2 e i_3 em R_3. Observe, pela figura acima, que $i_1 + i_2 + i_3 = i$ e, além disso (lembrando-se da relação $i = \frac{V_{AB}}{R}$), teremos:

$$i_1 = \frac{V_{AB}}{R_1} \qquad i_2 = \frac{V_{AB}}{R_2} \qquad i_3 = \frac{V_{AB}}{R_3}$$

Como nas três equações acima a diferença de potencial V_{AB} é a mesma, concluímos que, nesse tipo de ligação, quanto menor o valor de *R*, maior será o valor de *i*.

Imagine a situação que propusemos anteriormente, ou seja, $V_{AB} = 12$ V. Imagine ainda que $R_1 = 2\ \Omega$, $R_2 = 3\ \Omega$ e $R_3 = 6\ \Omega$. Pelas equações acima, teremos: $i_1 = 6$ A; $i_2 = 4$ A; $i_3 = 2$ A. Assim, $R_1 < R_2 < R_3$, porém, $i_1 > i_2 > i_3$.

Quando vários resistores estão ligados em paralelo, o resistor de menor resistência será percorrido pela corrente de maior intensidade.

No caso particular da foto da **figura 4.34**, as lâmpadas são idênticas, e suas resistências elétricas *R* têm o mesmo valor. Esse é um caso em que as resistências são percorridas por correntes elétricas de mesma intensidade, ainda que estejam em paralelo.



Eduardo Santaliestra/Estúdio Paulista

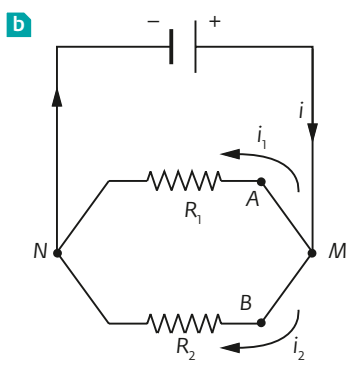


Figura 4.34. (**a**) Circuito de duas lâmpadas associadas em paralelo e ligadas a uma pilha. (**b**) Diagrama representando o circuito mostrado em **a**.

Resistência equivalente para resistores em série

Na **figura 4.31** podemos trocar o conjunto de resistores com resistências R_1, R_2 e R_3 por um resistor de resistência única, R, capaz de substituir a associação. Essa resistência é denominada **resistência equivalente** da associação.

A seguir, obteremos uma relação que nos permite calcular o valor da resistência equivalente da ligação em série. Para isso, observemos que na **figura 4.31** a resistência equivalente, R, deve ser tal que, sendo ligada entre os pontos A e D, isto é, sendo submetida à diferença de potencial V_{AD}, ela seja percorrida pela mesma corrente i que passa pela associação.

Portanto, podemos escrever para a resistência equivalente R:

$$R = \frac{V_{AD}}{i}$$

Lembrando dos conceitos que vimos na associação em série, temos:

$$R = \frac{V_{AD}}{i} \Rightarrow R = \frac{V_{AB} + V_{BC} + V_{CD}}{i} \Rightarrow R = \frac{R_1 i + R_2 i + R_3 i}{i} \Rightarrow R = \frac{(R_1 i + R_2 i + R_3)\cancel{i}}{\cancel{i}}$$

$$\therefore \quad R = R_1 + R_2 + R_3$$

Assim, concluímos que a resistência equivalente a um conjunto de resistores ligados em série é dada pela soma das resistências que constituem a associação.

Em resumo:

Quando vários resistores de resistência R_1, R_2, R_3, etc. são associados em série, todos eles são percorridos pela mesma corrente, e a resistência equivalente da associação é dada por:

$$R + R_1 + R_2 + R_3 + \ldots$$

Uma consequência importante desse resultado é que, quanto **maior** for o número de resistores que associamos em série, **maior** será o valor da resistência total ou equivalente.

Portanto, no caso de a **diferença de potencial se manter inalterada**, quanto mais resistores em série associarmos, **menor** será o valor da corrente elétrica i que percorre o circuito. O esquema da **figura 4.35** ilustra esse raciocínio.

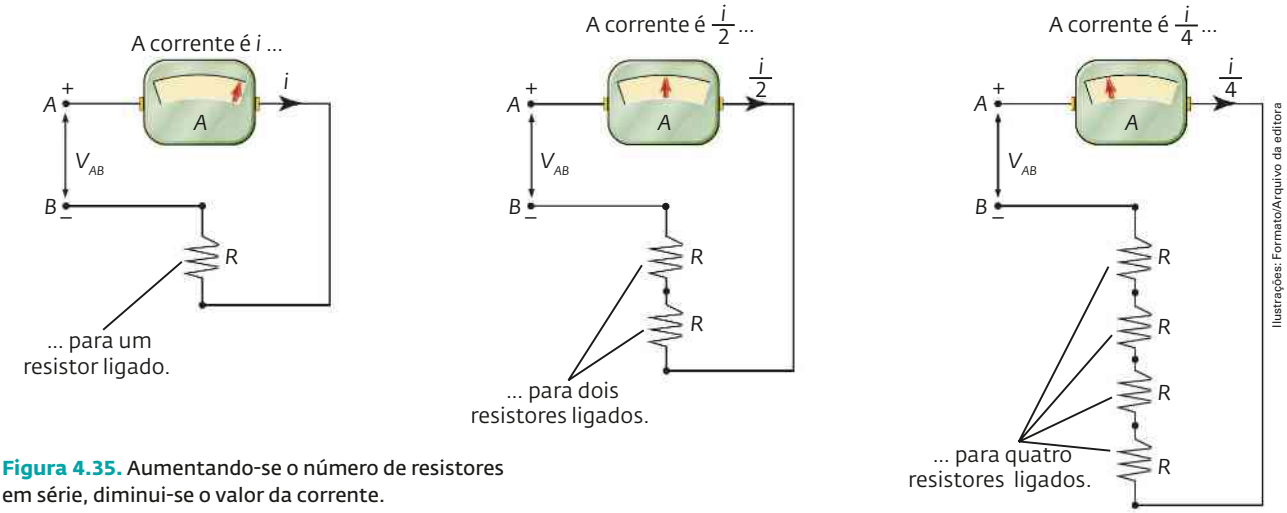
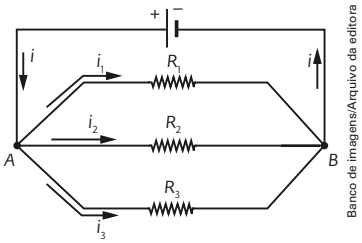


Figura 4.35. Aumentando-se o número de resistores em série, diminui-se o valor da corrente.

Resistência equivalente para resistores em paralelo

Da mesma forma que fizemos para o caso dos resistores em série, também podemos substituir resistores ligados em paralelo por um resistor com **resistência equivalente**. Observe a **figura 4.36** e lembre-se de que os resistores em paralelo estão todos ligados aos mesmos pontos *A* e *B* e, portanto, estão todos submetidos à mesma diferença de potencial V_{AB}.

Podemos mostrar, com um procedimento semelhante àquele que fizemos no caso da associação em série, que, para um conjunto de resistores ligados em paralelo **(figura 4.36)**, a resistência equivalente, *R*, é dada pela expressão:



Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 4.36. Associação de resistores em paralelo.

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

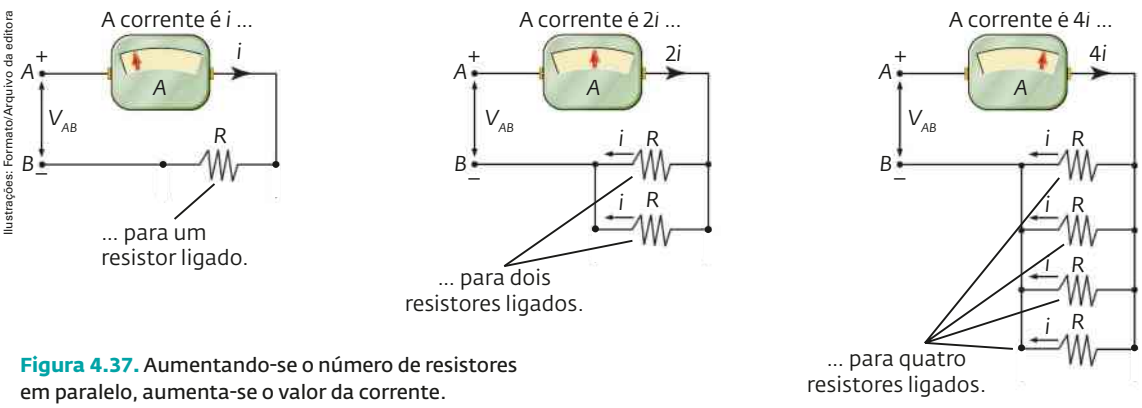
Isto é, o inverso da resistência equivalente é igual à soma dos inversos das resistências associadas.

Em resumo:

Quando vários resistores de resistência R_1, R_2, R_3, etc. são associados em paralelo, todos eles ficam submetidos à mesma diferença de potencial, e a resistência equivalente da associação é dada por:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \ldots$$

Uma consequência importante desse resultado é que, quanto **maior** for o número de resistores que associamos em paralelo, **menor** será o valor da resistência total ou equivalente. Portanto, no caso de a **diferença de potencial se manter inalterada**, quanto mais resistores em paralelo associarmos, **maior** será o valor da corrente elétrica *i* que percorre o circuito. O esquema da **figura 4.37** ilustra esse raciocínio.



Ilustrações: Formato/Arquivo da editora

Figura 4.37. Aumentando-se o número de resistores em paralelo, aumenta-se o valor da corrente.

Exemplo

Suponha que os resistores ligados em paralelo na figura 4.33 tenham os seguintes valores de resistência elétrica: $R_1 = 40\ \Omega$, $R_2 = 60\ \Omega$ e $R_3 = 120\ \Omega$.

a) Qual é o valor da resistência equivalente dessa associação?

Vimos que, na associação em paralelo, a resistência equivalente, *R*, é dada por:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

Então, temos:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{40} + \frac{1}{60} + \frac{1}{120} = \frac{3 + 2 + 1}{120} = \frac{6}{120} \therefore R = 20\ \Omega$$

b) Considerando que a diferença de potencial estabelecida pela bateria seja $V_{AB} = 12\ V$, calcule a corrente que passa em cada um dos resistores.

Como os resistores estão ligados em paralelo, cada um deles está submetido a uma diferença de potencial $V_{AB} = 12\ V$. Os valores de i_1, i_2 e i_3 são, assim, dados por:

$$i_1 = \frac{V_{AB}}{R_1} = \frac{12}{40} \quad \therefore \quad i_1 = 0{,}30\ A$$

$$i_2 = \frac{V_{AB}}{R_2} = \frac{12}{60} \quad \therefore \quad i_2 = 0{,}20\ A$$

$$i_3 = \frac{V_{AB}}{R_3} = \frac{12}{120} \quad \therefore \quad i_3 = 0{,}10\ A$$

c) Qual é o valor da corrente total *i* fornecida pela bateria?

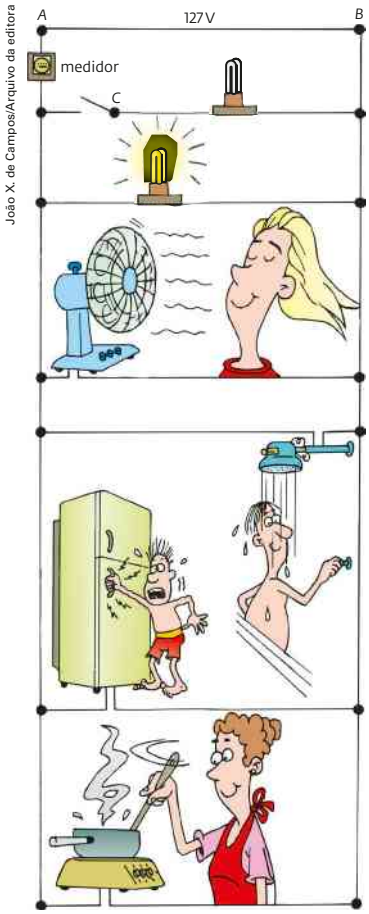
O valor dessa corrente total é:

$$i = i_1 + i_2 + i_3 = 0{,}30 + 0{,}20 + 0{,}10 \quad \therefore \quad i = 0{,}60\ A$$

Outra maneira de calcular essa corrente total seria supor que os resistores em paralelo fossem substituídos por um único resistor de resistência equivalente, isto é, imaginar que entre os pontos *A* e *B* tivéssemos um resistor de 20 Ω de resistência (resistência equivalente). Nesse resistor passaria a corrente total *i* dada por:

$$i = \frac{V_{AB}}{R} = \frac{12}{20} \quad \therefore \quad i = 0{,}60\ A$$

Observe que as duas maneiras de calcular a corrente total conduziram ao mesmo resultado.



João X. de Campos/Arquivo da editora

Quando os elementos de um circuito elétrico estão todos ligados em série, a interrupção da corrente em qualquer ponto fará com que essa corrente seja interrompida em todos os elementos do circuito.

As lâmpadas de uma árvore de Natal, por exemplo, são ligadas em série; por isso, quando qualquer uma delas se queima, todas as demais se apagam, pois a corrente deixará de circular em todas elas.

Entretanto, em nossas residências, sabemos que é possível apagar uma lâmpada qualquer sem que os demais aparelhos elétricos sejam desligados. Isso ocorre porque esses aparelhos estão ligados **em paralelo**.

A **figura 4.38** mostra, de maneira simplificada, o esquema da rede elétrica de uma residência. Entre os fios *A* e *B* é mantida uma diferença de potencial cujo valor, normalmente, é de 127 V ou de 220 V.

Vemos, pela figura, que os aparelhos elétricos são ligados em paralelo entre esses dois fios e estão, portanto, todos eles submetidos à mesma diferença de potencial.

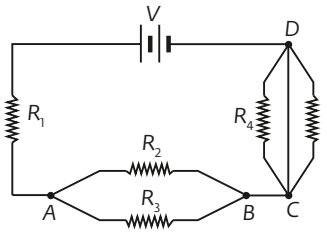
Observe que uma das lâmpadas está apagada (a chave C está aberta) e, no entanto, todos os demais aparelhos estão funcionando normalmente.

Devemos notar que, quanto maior for o número de aparelhos elétricos ligados, menor será a resistência equivalente do conjunto, pois eles estão associados em paralelo. Consequentemente, maior será a corrente total que passará pelo medidor de energia elétrica situado na "entrada" da residência.

Figura 4.38. Os aparelhos elétricos em uma residência são ligados em paralelo. Observe que todos eles são submetidos à mesma diferença de potencial.

Associação mista de resistores

Um circuito pode apresentar, ao mesmo tempo, resistores associados em série e em paralelo. Quando isso ocorre, dizemos se tratar de uma associação mista de resistores. Na **figura 4.39** apresentamos um exemplo de associação mista de resistores. A análise de um circuito desse tipo pode ser entendida acompanhando-se o exemplo a seguir.



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

Figura 4.39. Associação mista de resistores.

Exemplo

Considere os seguintes valores de resistência para os resistores do circuito da figura 4.39: $R_1 = 30\ \Omega$; $R_2 = 30\ \Omega$; $R_3 = 60\ \Omega$; $R_4 = 20\ \Omega$; $R_5 = 15\ \Omega$. Os pontos *C* e *D* estão ligados por um fio de resistência desprezível (resistência nula).

a) Determine a resistência equivalente desse circuito.

Como R_2 e R_3 estão ligados em paralelo, a resistência R_{AB}, entre *A* e *B*, é dada por:

$$\frac{1}{R_{AB}} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{30} + \frac{1}{60} \quad \therefore \quad R_{AB} = 20\ \Omega$$

Os resistores R_4, R_5 e o fio de ligação entre *C* e *D* estão também em paralelo. Como o fio de ligação não oferece nenhuma resistência à passagem da corrente, toda a corrente que chegar a *C* passa por esse fio, isto é, não há corrente nos resistores R_4 e R_5. Então, a resistência total entre *C* e *D* é nula e o circuito da **figura 4.39** é equivalente ao mostrado na **figura 4.40**. Vemos, então, que a resistência total desse circuito é:

$$R = R_1 + R_{AB} + R_{CD} = 30 + 20 \quad \therefore \quad R = 50\ \Omega$$

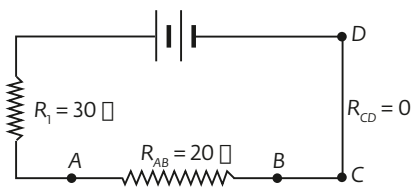


Figura 4.40. Circuito equivalente da associação mista de resistores da **figura 4.39**.

b) Calcule a corrente em cada um dos resistores do circuito original, supondo que a bateria aplique ao circuito uma diferença de potencial $V = 12$ V.

A corrente total *i*, fornecida pela bateria, é a mesma que passa pelo resistor R_1. Seu valor é:

$$i = \frac{V}{R} = \frac{12}{50} \quad \therefore \quad i = 0{,}24\ \text{A}$$

Para calcular as correntes i_2, em R_2, e i_3, em R_3, devemos determinar, inicialmente, a diferença de potencial V_{AB} entre *A* e *B*. Na **figura 4.40**, temos:

$$V_{AB} = R_{AB} \cdot i = 20 \cdot 0{,}24 \quad \therefore \quad V_{AB} = 4{,}8\ \text{V}$$

Então, pela **figura 4.39**, temos:

$$i_2 = \frac{V_{AB}}{R_2} = \frac{4{,}8}{30} \quad \therefore \quad i_2 = 0{,}16\ \text{A} \qquad\qquad i_3 = \frac{V_{AB}}{R_3} = \frac{4{,}8}{60} \quad \therefore \quad i_3 = 0{,}08\ \text{A}$$

O valor de i_3 poderia, também, ter sido obtido da seguinte maneira:

$$i = i_2 + i_3 \Rightarrow 0{,}24 = 0{,}16 + i_3 \quad \therefore \quad i_3 = 0{,}08\ \text{A}$$

Os valores das correntes em R_4 e R_5, como já vimos, são nulos.

Comentário

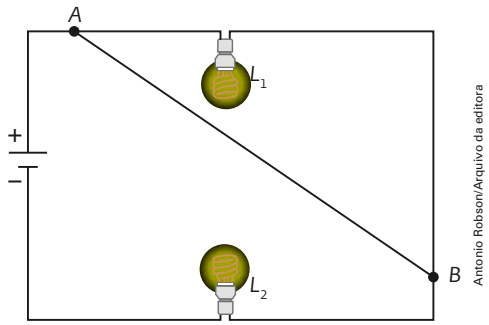
Toda vez que dois pontos de um trecho de circuito estiverem ligados por um fio de resistência desprezível, como ocorre no trecho *CD* da **figura 4.40**, a resistência equivalente **desse trecho** será nula, e dizemos que esse trecho do circuito está em curto-circuito. Tudo se passa como se não existissem outros resistores ligados entre esses pontos. Apesar de não existirem fios de resistência exatamente nula no dia a dia, os fios de cobre, por terem baixa resistividade elétrica, ρ, podem apresentar resistências bem menores do que as resistências de outros elementos do circuito.

FÍSICA NO CONTEXTO

Curto-circuito

Um curto-circuito acontece quando dois pontos de um circuito são ligados por um condutor de resistência desprezível, o que equivale a dizer que os dois pontos do circuito têm o mesmo potencial.

Observe na **figura 4.41**, que no instante em que o condutor metálico é ligado nos pontos *A* e *B*, em paralelo com a lâmpada L_1, a lâmpada entra em curto-circuito, apagando. A corrente que percorre o circuito aumentará abruptamente, aumentando a temperatura dos condutores. Esse acréscimo da temperatura pode derreter o isolamento plástico que envolve os condutores e, caso o circuito não tenha proteção, pode desencadear um incêndio. Além disso, o brilho da lâmpada L_2 vai aumentar quando a intensidade da corrente elétrica aumentar.



Antonio Robson/Arquivo da editora

Figura 4.41. A lâmpada L_1 está em curto-circuito.

Para evitar os transtornos que um aquecimento indesejado dos condutores poderia causar, é usual empregar dispositivos de segurança como um **fusível** **(figura 4.42)** ou um **disjuntor** **(figura 4.43)**. O fusível é colocado em série com os aparelhos de um circuito elétrico; em caso de excesso de corrente elétrica no circuito, o fusível se funde, interrompendo a passagem da corrente elétrica.


Eduardo Santaliestra/Estúdio Paulista

Figura 4.42. Exemplo de fusível que funciona por efeito Joule.



Eduardo Santaliestra/Estúdio Paulista

Figura 4.43. Exemplo de disjuntor encontrado nas caixas de força das residências.

As imagens desta página estão representadas fora de proporção.

Atualmente, a maior parte dos fusíveis foi substituída pelos disjuntores, que é uma chave magnética que desliga automaticamente quando há aumento excessivo da corrente elétrica.

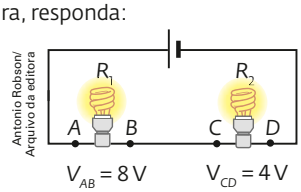
A vantagem do disjuntor é que, caso ele seja acionado, desligando-se, à medida que o motivo que provocou o seu desligamento for solucionado, basta ligá-lo novamente para que a corrente elétrica se restabeleça. Por outro lado, se tivéssemos um fusível queimado no circuito, deveríamos comprar um novo para substituí-lo.

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

Não escreva no livro!

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

20. A figura abaixo mostra duas lâmpadas, cujos filamentos possuem resistências R_1 e R_2, ligadas aos polos de uma bateria. Observando a figura, responda:

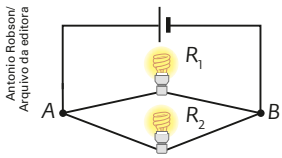


a) A corrente que passa em R_1 é maior, menor que a que passa em R_2 ou igual a ela? igual

b) O valor da resistência R_1 é maior, menor que o da resistência R_2 ou igual a ele? maior

c) Qual é o valor da voltagem entre os polos da bateria? 12 V

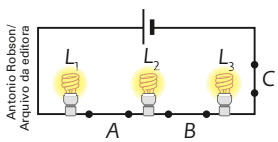
21. As duas lâmpadas do exercício anterior foram ligadas, da maneira mostrada na figura abaixo, a uma bateria que mantém entre seus polos uma diferença de potencial de 6 V.



a) Qual a voltagem que está aplicada em R_1? E em R_2? 6 V em ambas

b) A corrente que passa em R_1 é maior, menor que a que passa em R_2 ou igual a ela? menor

22. Considerando o circuito mostrado na figura abaixo, dizer quais das lâmpadas L_1, L_2 e L_3 se apagarão ao desligarmos:

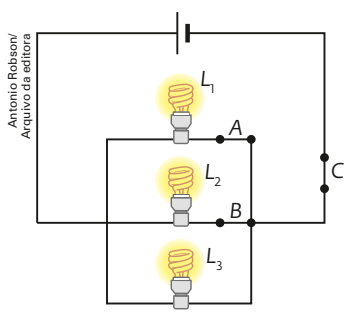


a) apenas a chave A; As três lâmpadas se apagam.

b) apenas a chave B; As três lâmpadas se apagam.

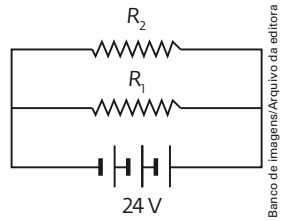
c) apenas a chave C. As três lâmpadas se apagam.

23. Responda às questões do exercício anterior supondo que as lâmpadas L_1, L_2 e L_3 tenham sido ligadas, agora, da maneira mostrada na figura abaixo.



23. a) Apenas L_1 se apaga.
b) Apenas L_2 se apaga.
c) As três lâmpadas se apagam.

24. Dois resistores R_1 e R_2, sendo $R_1 = R_2 = 12\ \Omega$, são ligadas em paralelo a uma bateria que estabelece, na associação, uma voltagem de 24 V, como pode ser visto na figura abaixo.



a) Qual é a resistência equivalente da associação? 6 Ω

b) Qual é a corrente que passa em R_1? E em R_2? 2 A em cada uma

c) Qual é a corrente total fornecida pela bateria? 4 A

25. Suponha que, em uma residência, cuja instalação elétrica é de 120 V, esteja acesa apenas uma lâmpada de resistência igual a 240 Ω.

a) Qual é o valor da corrente que passa nessa lâmpada? 0,50 A

b) Se acendermos uma segunda lâmpada, idêntica à primeira, a resistência elétrica da instalação da residência aumentará ou diminuirá? Diminuirá.

c) Com as duas lâmpadas acesas, qual é o valor da corrente que está passando pelo medidor na entrada de eletricidade da residência? 1,0 A

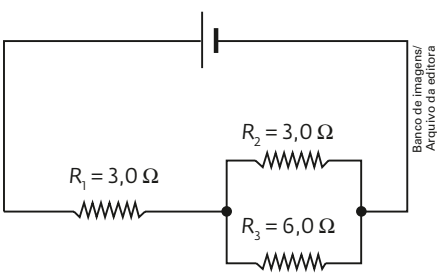
d) Sabe-se que a chave automática existente na entrada de eletricidade da residência é de 30 A, isto é, ela se desliga se for percorrida por uma corrente superior a 30 A. Então, quantas lâmpadas (idênticas àquela citada), no máximo, poderão ser ligadas simultaneamente nessa residência? 60 lâmpadas.

26. Considerando o circuito mostrado na figura deste exercício e sabendo-se que a voltagem entre os polos da pilha é de 1,5 V, determine:

a) a resistência equivalente à associação das resistências R_2 e R_3; 2,0 Ω

b) a resistência total equivalente à associação de R_1, R_2 e R_3; 5,0 Ω

c) a corrente que a pilha está fornecendo ao circuito. 0,30 A



4.6 Potência em um elemento do circuito

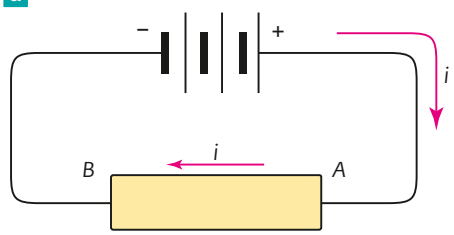
Transformação de energia elétrica

Os aparelhos elétricos são dispositivos que transformam energia elétrica em outra forma de energia. Em um motor elétrico, a energia elétrica é transformada em energia mecânica de rotação; em um aquecedor, a energia elétrica é transformada em calor; em uma lâmpada, a energia elétrica é transformada em energia luminosa, etc.

Para melhor entender essas transformações, consideremos o circuito mostrado na **figura 4.44**, no qual uma bateria estabelece uma diferença de potencial V_{AB} entre os pontos *A* e *B*. Suponha que entre esses pontos esteja ligado um aparelho elétrico como representado na **figura 4.44**. Sendo $V_A > V_B$, uma corrente elétrica *i* passará, de *A* para *B*, através do aparelho. As cargas elétricas que constituem a corrente estarão, então, passando de um ponto no qual elas possuem maior energia elétrica (ponto *A*) para outro onde elas possuem menor energia (ponto *B*). Em outras palavras, as cargas elétricas **estarão perdendo energia elétrica** ao passarem de *A* (potencial maior) para *B* (potencial menor). Essa energia que as cargas perdem não desaparece: ela é transferida para o aparelho, aparecendo sob outra forma de energia. A forma de energia na qual a energia elétrica é transformada dependerá do aparelho que estiver intercalado entre *A* e *B*.

As imagens desta página estão representadas fora de proporção.

a



Antonio Robson/Arquivo da editora

b



Evgeny Karandaev/Shutterstock



Alexey Boldin/Shutterstock



jordache/Shutterstock

Figura 4.44. Em **a**, as cargas passam de ***A*** para ***B***, perdendo energia elétrica, que aparece sob outra forma de energia no aparelho **(b)** intercalado entre ***A*** e ***B***.

Potência desenvolvida em um aparelho elétrico

Vamos calcular a quantidade de energia elétrica que é transferida ao aparelho ligado entre os pontos *A* e *B* da **figura 4.44**. Considerando a corrente *i* que passa no aparelho durante um intervalo de tempo Δt, teremos uma carga $\Delta q = i\Delta t$ deslocando-se de *A* para *B*. O campo elétrico existente entre *A* e *B* realizará, sobre a carga Δq, um trabalho $\mathcal{T}_{AB} = \Delta q \cdot V_{AB}$. Portanto, a carga Δq receberá, do campo elétrico, uma quantidade de energia ΔE igual a esse trabalho, isto é, $\Delta E = \Delta q \cdot V_{AB}$. Como não há aumento na energia cinética da carga, concluímos que a energia ΔE recebida por Δq será transferida para o aparelho. Então, a quantidade de energia que aparece no aparelho ligado entre *A* e *B*, durante o intervalo de tempo Δt, é dada por:

$$\Delta E = \Delta q \cdot V_{AB}$$

A **potência**, *P*, desenvolvida pelo aparelho elétrico, que é dada por $P = \frac{\Delta E}{\Delta t}$, pode ser obtida dividindo-se, então, os dois membros da equação $\Delta E = \Delta q \cdot V_{AB}$ por Δt:

$$\frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{\Delta q}{\Delta t} \cdot V_{AB}$$

ou $P = i V_{AB}$

Chegamos, portanto, ao seguinte resultado:

Se um aparelho elétrico, ao ser submetido a uma diferença de potencial V_{AB}, for percorrido por uma corrente *i*, a potência desenvolvida nesse aparelho será dada por:

$$P = iV_{AB}$$

Exemplo

A bateria de um automóvel aplica uma diferença de potencial V_{AB} = 12 V nos terminais do seu motor de arranque, o qual, ao ser acionado, é percorrido por uma corrente *i* = 50 A. Qual é, então, a potência desenvolvida por esse motor elétrico?

Essa potência será:

$$P = i V_{AB} = 50 \cdot 12$$

$$P = 600\ \text{W}$$

Como *i* e V_{AB} foram expressas em unidades do SI, evidentemente o valor de *P* será expresso em watts. Podemos verificar que isso realmente ocorre, lembrando que:

$$1\ \text{A} = 1\ \frac{\text{C}}{\text{s}} \quad \text{e} \quad 1\ \text{V} = 1\ \frac{\text{J}}{\text{C}}$$

Então:

$$1\ \text{A} \cdot 1\ \text{V} = 1\ \frac{\text{C}}{\text{s}} \cdot \frac{\text{J}}{\text{C}} = 1\ \frac{\text{J}}{\text{s}} = 1\ \text{watt} = 1\ \text{W}$$

Portanto, o resultado $P = 600$ W significa que, a cada 1 s, 600 J de energia elétrica são transformados em energia mecânica de rotação do motor. Note que estamos desprezando as perdas por aquecimento no motor.

APLICAÇÕES DA FÍSICA

Medida da energia elétrica usada em uma residência

Na entrada de eletricidade de uma residência, existe um medidor, instalado pela companhia de eletricidade (observe o medidor de sua residência). A **figura 4.45** mostra a foto de um medidor desse tipo. O objetivo desse aparelho é medir a quantidade de energia elétrica usada na residência durante um certo tempo (normalmente 30 dias). Sendo:

$$\text{Potência} = \frac{\text{energia}}{\text{tempo}}$$

$$\text{energia} = \text{potência} \cdot \text{tempo, isto é:}$$

$$E = P \cdot t$$



Reprodução/<http://mlb-s1-p.mlstatic.com/>

Figura 4.45. Medidor de energia elétrica de uma residência.

Portanto, quanto maior for a potência de um aparelho eletrodoméstico e quanto maior for o tempo que ele permanecer ligado, maior será a quantidade de energia elétrica que ele utilizará (transformando-a em outras formas de energia). O valor registrado no medidor equivale à soma das energias utilizadas, durante um certo período, pelos diversos aparelhos instalados na casa.

Essa energia poderia ser medida em joules (unidade do SI). Em praticamente todos os países do mundo, entretanto, as companhias de eletricidade usam medidores calibrados em kWh (quilowatt-hora). Sabe-se que 1 kWh é uma unidade de energia equivalente a 3 600 000 J.

QUESTÕES

2. b) Banhos com menor duração e não ligar o chuveiro na potência máxima.

1. a) Em uma casa há um aquecedor elétrico de água, cuja potência é $P = 500$ W e que permanece ligado durante um tempo $t = 4$ h diariamente. Determine, em kWh, a quantidade de energia elétrica que esse aquecedor utiliza por dia. 2 kWh

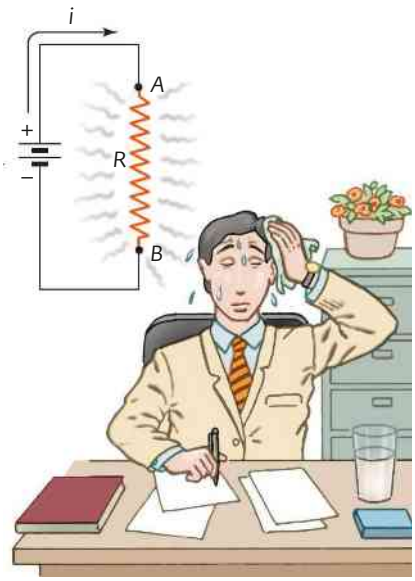
b) Sabendo-se que o custo de 1 kWh de energia elétrica é R$ 0,50, quanto deveria ser pago à companhia de eletricidade pelo funcionamento desse aquecedor, nas condições mencionadas, durante 30 dias? R$ 30,00

2. a) Considere um chuveiro elétrico com potência de 5 000 W que fica ligado 1 hora por dia. Nessas condições qual seria o consumo mensal de energia e o valor pago mensalmente à companhia de energia elétrica? (Consulte em sua "conta de luz" o valor do kWh da concessionária de energia de sua região e considere R$ 0,50 o custo de 1 kWh.) Consumo mensal de 150 kWh; R$ 75,00.

b) Quais medidas poderiam ser adotadas para reduzir o consumo mensal de energia do chuveiro elétrico?

Efeito Joule

Se o aparelho ligado entre os pontos *A* e *B* da **figura 4.44** fosse uma resistência elétrica *R*, a energia elétrica perdida pelas cargas, ao passarem de *A* para *B*, se transformaria integralmente em **energia térmica**, isto é, a resistência se aqueceria, podendo-se observar uma transferência de energia na forma de calor do resistor para o meio ambiente **(figura 4.46)**. Esse fenômeno foi estudado, no século XIX, por Joule e, em homenagem a ele, é denominado **efeito Joule**.



Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura 4.46. Ao passar por um resistor, as cargas perdem energia elétrica, que se transforma totalmente em calor. Esse fenômeno é denominado efeito Joule.

Houve uma grande e gradativa substituição dos tipos de lâmpadas disponíveis para consumo, as lâmpadas do tipo incandescente foram substituídas por lâmpadas mais econômicas, como as fluorescentes **(figura 4.47.a)** e as LED (do inglês *Light Emitting Diode* que significa 'diodo emissor de luz') **(figura 4.47.b)**. As lâmpadas fluorescentes possuem um par de eletrodos dentro de um tubo de vidro selado. A parte interna do tubo é revestida de um material à base de fósforo. O tubo contém uma pequena quantidade de mercúrio e gás inerte, mantidos a baixa pressão. Quando a lâmpada é acesa, os elétrons em movimento colidem com os átomos dos gases do tubo, aumentando a energia de vibração desses átomos e emitindo luz. A lâmpada LED é formada por um conjunto de diodos emissores de luz. O LED é um semicondutor que, ao ser percorrido por corrente elétrica, emite luz em uma dada frequência. Apesar de ter maior durabilidade em ambientes onde se acende e apaga com frequência, o rendimento das lâmpadas incandescentes é muito baixo quando comparado com os novos tipos de lâmpada.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 4.47. Lâmpada fluorescente (**a**) e lâmpada LED (**b**). Símbolos empregados nos circuitos elétricos para representar a lâmpada fluorescente (**c**) e a lâmpada LED (**d**).

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

A potência desenvolvida em um aparelho, pela passagem de uma corrente elétrica através dele, é dada por $P = iV_{AB}$. No caso particular do efeito Joule, temos $V_{AB} = Ri$, uma vez que é um resistor de resistência *R* que está intercalado entre *A* e *B*. Então, a potência poderá ser também expressa da seguinte maneira:

$$P = iV_{AB} = i \cdot Ri \quad \text{ou} \quad P = Ri^2$$

Em resumo, podemos escrever:

O efeito Joule consiste na transformação de energia elétrica em energia térmica (calor) em um resistor percorrido por uma corrente elétrica. Sendo *R* o valor da resistência, V_{AB} a diferença de potencial nela aplicada e *i* a corrente que a percorre, a potência desenvolvida, por efeito Joule, nesse resistor, pode ser calculada pelas expressões:

$$P = iV_{AB} \quad \text{ou} \quad P = Ri^2$$

É importante observar que as expressões $P = i\,V_{AB}$ e $P = Ri^2$ fornecem a **potência** desenvolvida no aparelho, isto é, a quantidade de energia produzida por **unidade de tempo**. Se o aparelho permanecer ligado durante um intervalo de tempo Δt e desejarmos calcular a energia total ΔE nele desenvolvida durante esse tempo, devemos multiplicar a potência P pelo intervalo de tempo Δt, isto é, $\Delta E = P \cdot \Delta t$.



Roman Samokhin/Shutterstock

Figura 4.48. Lâmpada fluorescente de 20 W e 120 V.

Exemplo

Em uma lâmpada encontramos as seguintes especificações do fabricante: 20 W; 120 V (figura 4.48).

a) Qual é o significado dessas especificações?

A especificação 120 V indica que a lâmpada deverá ser submetida a uma diferença de potencial com esse valor.

Nessas condições, a lâmpada dissipará uma potência de 20 W, como indica a outra especificação.

Se a lâmpada for ligada em uma diferença de potencial superior a 120 V (por exemplo, em uma tomada de 220 V), ela dissipará uma potência maior do que 20 W e, provavelmente, se queimará.

Por outro lado, se a diferença de potencial aplicada à lâmpada for inferior a 120 V, ela apresentará um brilho inferior ao normal, pois estará dissipando uma potência menor do que 20 W.

b) Supondo que essa lâmpada esteja ligada a uma diferença de potencial adequada (120 V), determine a intensidade da corrente que passa por ela.

A expressão $P = i\,V_{AB}$ nos permite determinar o valor de i, pois conhecemos $P = 20\,\text{W}$ e $V_{AB} = 120\,\text{V}$. Então:

$$i = \frac{P}{V_{AB}} = \frac{20}{120}$$

$$i = 0{,}17\ \text{A}$$

c) Qual é a resistência dessa lâmpada?

Lembrando da definição de resistência, teremos:

$$R = \frac{V_{AB}}{i} = \frac{120}{0{,}17}$$

$$R = 706\ \Omega$$

d) Se essa lâmpada for ligada a uma diferença de potencial tal que a corrente que a atravessa seja $i = 0{,}08$ A, qual será a potência que ela dissipará?

Supondo constante a resistência, a expressão $P = Ri^2$ nos fornecerá essa potência:

$$P = Ri^2 = 706 \cdot (0{,}08)^2$$

$$P = 4{,}5\ \text{W}$$

Observe que o fato de a corrente ter sido reduzida à metade (de 0,17 A para 0,08 A) fez com que a potência da lâmpada se tornasse cerca de 4 vezes menor (de 20 W para 4,5 W).

Esse resultado já era esperado porque a potência dissipada em uma resistência constante é proporcional ao quadrado da corrente ($P = Ri^2$).

FÍSICA NO CONTEXTO

Riscos e cuidados nas instalações elétricas

Os fios de cobre **(figura 4.49)** utilizados nas instalações elétricas residenciais e comerciais (fios de ligação) são encontrados nas lojas especializadas com diferentes seções retas. Cada um deles costuma ser identificado por um número, como está mostrado na **tabela 4.4**. Essa numeração não é fixa, pois cada país adota o próprio código.



Sérgio Dotta/Arquivo da editora

Figura 4.49. Observe na tarja preta de cada uma das embalagens a indicação da seção de cada um dos fios. O fio preto é de seção 1,5 mm², o azul é de 2,5 mm² e o verde é de 4 mm².

No Brasil, atualmente, os fios são identificados pelos valores de suas seções retas. Entretanto, os técnicos e engenheiros ainda se referem aos números que aparecem na tabela, os quais correspondem aproximadamente àqueles de um código muito difundido nos Estados Unidos. Observe que o número de um fio é tanto menor quanto maior for sua seção reta (por exemplo, o fio 14 é mais fino do que o fio 12).

Quando um engenheiro projeta a instalação elétrica de uma residência conhecendo a corrente que vai passar em cada aparelho e, consequentemente, a corrente total na ligação principal, ele deverá escolher adequadamente a seção (ou número) de cada fio que vai usar. Se o fio escolhido para a linha principal for muito fino (resistência grande), quando a corrente que por ele passa for aumentando, em virtude de vários aparelhos serem ligados à rede, a queda de tensão nesse fio poderá não ser desprezível. Isso costuma acarretar um mau funcionamento dos aparelhos, pois eles ficarão submetidos a uma voltagem inferior àquela para a qual foram projetados.

Você já deve ter observado esse efeito, em uma residência, quando o brilho das lâmpadas diminui, ao ser ligado um chuveiro elétrico, por exemplo. Quando a escolha é bem-feita, sendo usado um fio de ligação com seção maior (menor resistência), a queda de tensão nele torna-se desprezível, e não há alteração sensível em um aparelho quando outros são ligados à rede. Evidentemente, esses cuidados devem ser tomados em qualquer instalação elétrica, incluindo os fios que ligam uma residência à rede elétrica da rua.

A **tabela 4.4** apresenta também o valor máximo da corrente que cada fio pode transportar, sem aquecimento excessivo que possa comprometer seu isolamento, isto é, sem danificar a capa de plástico que o envolve. A danificação desse isolamento pode trazer sérias consequências (curto-circuitos, com possibilidades de incêndios).

Não escreva no livro!

Tabela 4.4

Corrente máxima para fios de cobre de diferentes seções retas

Nº do fio	Seção (mm²)	$i_{máx.}$ (A)
14	1,5	15
12	2,5	20
10	4,0	30
8	6,0	40

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

Não escreva no livro!

27. Uma bomba-d'água é ligada a uma tomada que lhe aplica uma diferença de potencial $V_{AB} = 120\,V$. Sabe-se que, em funcionamento, o motor da bomba é percorrido por uma corrente $i = 2{,}5\,A$.

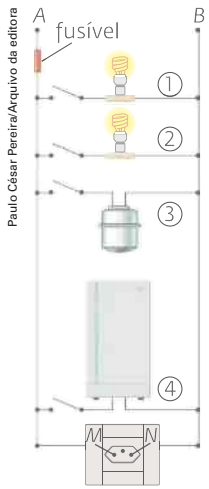
a) As cargas elétricas, ao atravessarem o motor da bomba, perdem ou ganham energia elétrica? Perdem.

b) Para onde se transfere essa energia perdida pelas cargas? Para o motor da bomba.

c) Qual é a potência desenvolvida nesse motor? 300 W.

d) Se a bomba funcionar durante 10 minutos, qual é a quantidade de energia que será desenvolvida nessa bomba? $1{,}8 \cdot 10^5\,J$

Considere a ilustração a seguir para as resoluções dos exercícios 28 e 29.



Paulo César Pereira/Arquivo da editora

28. No circuito mostrado na figura, o fusível instalado é de 30 A, isto é, ele queima se for percorrido por uma corrente superior a 30 A. Suponha que as correntes que passam nos aparelhos mostrados sejam as seguintes:
lâmpadas: 2,0 A em cada uma / chuveiro: 25 A/ geladeira: 2,5 A

a) À medida que aumentamos o número de aparelhos ligados na instalação, a resistência total do circuito aumenta ou diminui? Diminui.

b) Nessas condições, a corrente que passa no fusível aumenta ou diminui? Aumenta.

c) O fusível queimará se ligarmos apenas o chuveiro e uma das lâmpadas? Não.

d) O fusível queimará se todos os aparelhos forem ligados simultaneamente? Sim.

29. Suponha que a diferença de potencial entre os pontos *A* e *B* na figura seja $V_{AB} = 120\,V$ e que o fusível seja de 30 A. Qual é o menor valor que pode adquirir a resistência total dos aparelhos ligados sem que o fusível queime? $4{,}0\,\Omega$

30. Uma pessoa verifica que o chuveiro elétrico de sua residência não está aquecendo suficientemente a água. Sabendo-se que a diferença de potencial V_{AB} aplicada ao chuveiro é constante e lembrando-se da relação $P = i\,V_{AB}$, responda:

a) Para aumentar a potência do chuveiro, a corrente que passa através dele deve ser aumentada ou diminuída? Aumentada.

b) Então, para que haja maior aquecimento da água, a pessoa deverá aumentar ou diminuir o resistor do chuveiro? Diminuir.

c) Assim, quando a chave de um chuveiro é deslocada da indicação inverno para verão, estamos aumentando ou diminuindo sua resistência? Aumentando.

31. Um certo chuveiro elétrico funcionando a uma diferença de potencial constante de 220 V dissipa, na posição inverno, uma potência elétrica de 4 400 W. Supondo que o mês tenha 30 dias e que o chuveiro seja utilizado diariamente por 20 minutos, determine:

a) a resistência elétrica do chuveiro nesta posição; $R = 11\,\Omega$

b) a energia consumida pelo chuveiro, em kWh, em um mês de inverno. $\Delta E = 44\,kWh$

32. Duas resistências, R_1 e R_2, tais que $R_1 > R_2$, são ligadas em série. Lembre-se da relação $P = Ri^2$ e responda:

a) A corrente que passa em R_1 é maior, menor que a corrente em R_2 ou igual a ela? igual

b) Então, em qual das duas resistências haverá maior dissipação de calor pelo efeito Joule? em R_1

4.7 Instrumentos elétricos de medida

Trabalhando com circuitos elétricos nos laboratórios, temos frequentemente necessidade de conhecer valores de várias grandezas neles envolvidas. A seguir, aprendemos como medir, usando aparelhos apropriados, três grandezas importantes em um circuito elétrico: a intensidade da corrente, a diferença de potencial e a resistência elétrica.

Medida de corrente elétrica

Qualquer aparelho que indique a presença de corrente elétrica em um circuito é denominado **galvanômetro**. Quando a escala desse aparelho for graduada de tal maneira que seja possível medir uma corrente elétrica mais intensa, o aparelho receberá o nome de **amperímetro**. Para medir esse tipo de grandeza nos laboratórios, normalmente utiliza-se um aparelho chamado **multímetro**. Trata-se de um instrumento multiteste que dispõe de um amperímetro para medir corrente elétrica, um voltímetro para medir tensão contínua ou alternada, um ohmímetro para medir resistência elétrica, etc. Nas **figuras 4.50.a** e **4.50.b** vemos um multímetro analógico e um multímetro digital usados em laboratórios de ensino, de pesquisa e de trabalhos técnicos em eletricidade.

A **figura 4.51** mostra os símbolos do amperímetro, do voltímetro e do ohmímetro nos circuitos elétricos. Existem amperímetros destinados a medir correntes de valores mais elevados. Nesse caso, a escala do aparelho é graduada em ampères. Outros amperímetros são mais sensíveis e podem medir correntes de menor valor, sendo, então, suas escalas graduadas em miliampères ($1\ mA = 10^{-3}\ A$). Esses aparelhos costumam ser denominados **miliamperímetros**.

Quando desejamos medir a corrente que passa, por exemplo, em certo resistor, devemos ligar o amperímetro no circuito da maneira mostrada na **figura 4.52**: o amperímetro é ligado **em série** com a resistência e, portanto, toda a corrente que passa nela passará através do aparelho. Nessas condições, o ponteiro se deslocará ao longo da escala, indicando diretamente o valor dessa corrente.

A **figura 4.53** representa dois amperímetros sendo usados para mostrar que a intensidade da corrente elétrica tem o mesmo valor antes e depois da lâmpada.

No interior do amperímetro existem fios condutores que devem ser percorridos pela corrente elétrica, para que o aparelho indique o valor dessa corrente. Esses fios apresentam certa resistência elétrica, que é denominada **resistência interna** do amperímetro. Assim, ao introduzirmos um amperímetro em um circuito (como na **figura 4.52**), sua resistência interna será acrescentada à resistência do circuito. Para que a perturbação causada por essa introdução seja desprezível, o amperímetro deve ser construído de tal modo que sua resistência interna seja **a menor possível**.

a



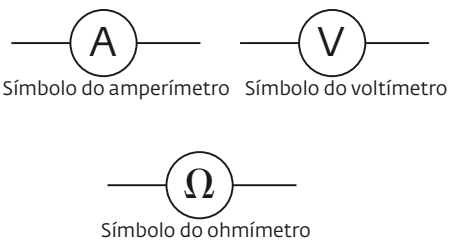
Antonio Gravante/Shutterstock

b



a_v_d/Shutterstock

Figura 4.50. Foto de um multímetro analógico (**a**) e um multímetro digital (**b**).



Símbolo do amperímetro Símbolo do voltímetro

Símbolo do ohmímetro

Figura 4.51. Representação simbólica dos medidores amperímetro, voltímetro e ohmímetro em circuitos elétricos.

Ilustrações: Paulo César Pereira/Arquivo da editora

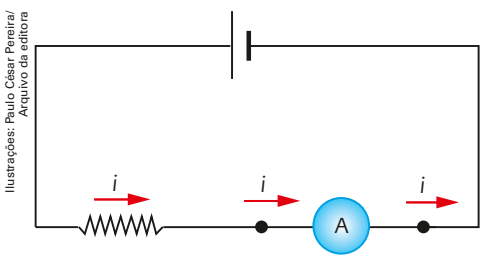


Figura 4.52. O amperímetro deve ser colocado em série no circuito para indicar a corrente que o atravessa.

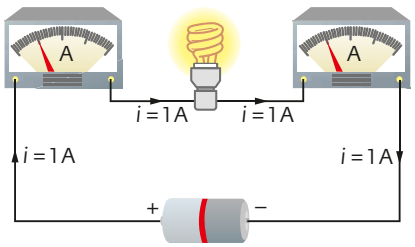


Figura 4.53. Lâmpada intercalada por dois amperímetros em série.

As imagens desta página estão representadas fora de proporção.

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

Medida da diferença de potencial

A medida da diferença de potencial entre dois pontos é feita por aparelhos denominados **voltímetros**. A **figura 4.54** mostra a maneira de representar esse aparelho nos diagramas de circuitos elétricos.

Se desejarmos medir a diferença de potencial que existe, por exemplo, entre as extremidades de uma resistência, devemos ligar um voltímetro da maneira mostrada na **figura 4.54**. O voltímetro deve ser ligado **em paralelo** com a resistência. Assim, parte da corrente que chega ao ponto *A* (veja a **figura 4.54**) se desvia, passando pelo voltímetro, o que faz com que o ponteiro se desloque ao longo da escala do aparelho e indique diretamente o valor da diferença de potencial V_{AB}.

Assim como o amperímetro, o voltímetro possui também uma **resistência interna**. É desejável que a corrente que se desvia para o voltímetro seja a menor possível, para que a perturbação causada no circuito, pela introdução do aparelho, seja desprezível. Essa corrente será tanto menor quanto maior for a resistência do voltímetro. Por esse motivo, esse aparelho deve ser fabricado de tal modo que sua resistência interna seja **a maior possível**.

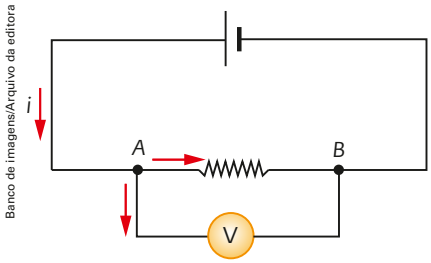


Figura 4.54. O voltímetro ligado em paralelo nos extremos da resistência fornece a voltagem aplicada a ela.

Medida de resistência

A medida direta do valor de uma resistência elétrica *R* pode ser feita por meio de aparelhos denominados **ohmímetros**. Quando o multímetro está posicionado para operar como um ohmímetro, basta ligar o resistor de resistência *R* desconhecida aos terminais *A* e *B* do aparelho (como mostra a **figura 4.55**) para obter o seu valor. A simples leitura da posição do ponteiro sobre a escala nos fornecerá o valor de *R*.

A medida de uma resistência poderá também ser feita usando-se um voltímetro e um amperímetro. Nesse caso, esses aparelhos devem ser ligados da maneira representada na **figura 4.56**. O voltímetro nos fornece o valor da diferença de potencial V_{AB} entre os extremos da resistência *R*. No caso da corrente desviada para o voltímetro ser desprezível em relação à corrente que percorre a resistência, o amperímetro indicará o valor da corrente *i* que passa por essa resistência. Nessa situação, o valor de *R* será obtido pela relação $R = \frac{V_{AB}}{i}$.

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

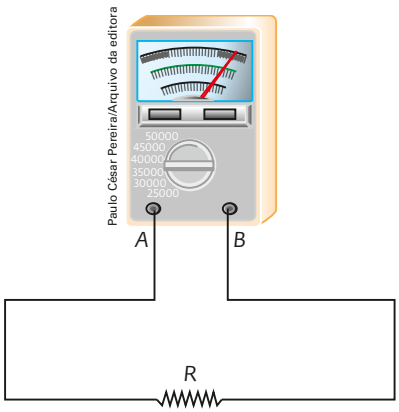


Figura 4.55. Esquema de um multímetro sendo usado como ohmímetro.

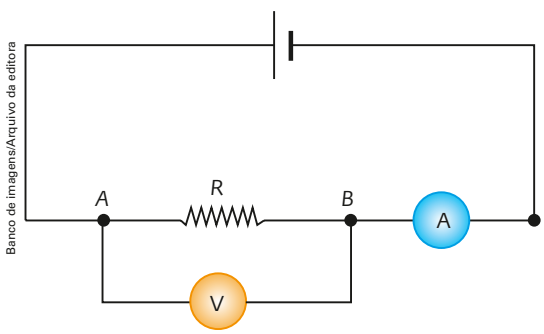


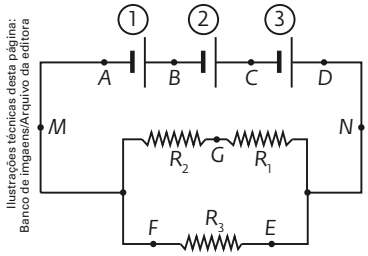
Figura 4.56. Montagem de um circuito com amperímetro e voltímetro. Conhecendo-se a diferença de potencial V_{AB} e a corrente *i* que passa na resistência, podemos calcular o seu valor pela relação $R = \frac{V_{AB}}{i}$.

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

Não escreva no livro!

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

33. As questões seguintes referem-se ao circuito mostrado na figura abaixo.



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

a) Reproduza a figura acima no caderno e desenhe nela como você deverá ligar um voltímetro para medir a diferença de potencial entre os polos da pilha 1.

b) Desenhe, agora, a ligação que deve ser feita com o voltímetro para medir a voltagem que a associação de pilhas está aplicando no circuito.

c) Entre os pontos assinalados na figura, indique aqueles em que deveria ser ligado um amperímetro para medir a corrente que passa na resistência R_1 e na resistência R_2.

d) Considerando os pontos *A*, *E*, *F*, *G*, *M* e *N*, em quais deles poderia ser colocado um amperímetro para medir a corrente que passa em R_3? Em *E* ou em *F*.

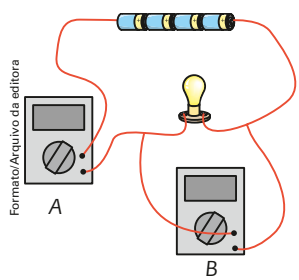
e) Considerando os pontos da questão anterior, em quais deles poderia ser colocado um amperímetro para medir a corrente total fornecida pelas pilhas ao circuito? Em *A*, *M* ou *N*.

34. Suponha que você tenha uma pilha, um amperímetro, um voltímetro e um resistor de resistência desconhecida *R*.

a) Faça um desenho no caderno mostrando como você ligaria esses elementos para obter dados que lhe permitam determinar o valor de *R*. Veja resposta no Manual do Professor.

b) Ligando-se corretamente os elementos, se a leitura do voltímetro fosse 1,5 V e a do amperímetro 0,10 A, qual seria o valor de *R*? $R = 15\ \Omega$

35. A figura abaixo mostra quatro pilhas, uma lâmpada e dois multímetros.



Formato/Arquivo da editora

Supondo que os multímetros estejam ligados corretamente e que a lâmpada desempenhe o papel da resistência do circuito:

a) determine a função do multímetro *A* no circuito; Amperímetro.

b) determine a função do multímetro *B* no circuito; Voltímetro.

c) faça um diagrama representativo deste circuito em seu caderno. Veja resposta no Manual do Professor.

36. Em um ebulidor são encontradas as seguintes especificações: 960 W, 120 V. Sua resistência elétrica é, então, de 15 Ω. Uma pessoa, usando uma pilha seca, aplicou uma tensão de 1,5 V a esse ebulidor (evidentemente, desligado da tomada) e verificou que, nessa experiência, ele era percorrido por uma corrente de 0,30 A.
Que valor da resistência do ebulidor a pessoa encontrou nessa experiência? 5,0 Ω

37. A temperatura de transição do chumbo é 7,2 K. Então, se um fio de chumbo estiver em temperatura inferior a esse valor:

a) Qual será o valor de sua resistência elétrica? Zero.

b) Como se denomina um material qualquer em condições semelhantes à do chumbo nessa situação? Material supercondutor.

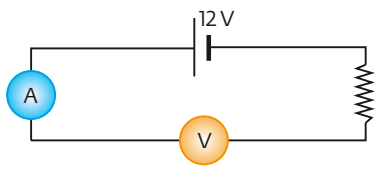
38. Considere uma usina hidrelétrica gerando uma potência de 700 000 kW. Essa potência é levada, por uma extensa rede de transmissão, até uma cidade, onde é utilizada.

a) Explique por que a potência elétrica que chega à cidade é inferior a 700 000 kW.

b) Qual a potência que chegaria à cidade, se a rede de transmissão fosse feita com cabos supercondutores?

c) Qual é a grande dificuldade que existe, na atualidade, para que possam ser instaladas as redes supercondutoras?

39. Uma pessoa, desejando medir a diferença de potencial e a corrente em uma resistência, ligou o voltímetro de maneira incorreta, como mostra a figura. Nessas condições, qual será a leitura do amperímetro? Por quê?



40. Considere duas resistências R_1 e R_2, tais que $R_1 > R_2$, ligadas em paralelo. Lembrando-se da relação $P = iV_{AB}$, responda:

a) A diferença de potencial aplicada em R_1 é maior, menor que a aplicada em R_2 ou igual a ela? Igual.

b) A corrente que passa em R_1 é maior, menor que a corrente em R_2 ou igual a ela? Menor.

c) Então, em qual das duas resistências haverá maior dissipação de calor pelo efeito Joule? Em R_2.

33. a) Em paralelo com a pilha, entre *A* e *B*.
b) Em paralelo com a associação, entre *A* e *D*.
c) O amperímetro colocado em *G* medirá tanto a corrente que passa em R_1 quanto em R_2.

38. a) Há perdas, por efeito Joule, na rede de transmissão.
b) Praticamente 700 000 kW.
c) Manter os cabos abaixo de sua temperatura de transição (temperaturas muito baixas).

39. Será praticamente zero, porque a resistência do voltímetro é muito grande.

44. a) Igual.
b) Menor.
c) Em R_2.

FÍSICA NO CONTEXTO

SUPERCONDUTIVIDADE A ALTAS TEMPERATURAS

As imagens desta página estão representadas fora de proporção.

Desde a descoberta de Kamerlingh Onnes em 1911, os cientistas se preocuparam em descobrir novas substâncias que pudessem apresentar supercondutividade a temperaturas mais elevadas do que aquelas com as quais se viam obrigados a trabalhar no início desses estudos. Apesar desses esforços, até o início da década de 1980, as temperaturas de transição mais elevadas que conseguiram obter estavam em torno de 25 K. Assim, para tornar os fios dos materiais descobertos supercondutores, eles deveriam ser mantidos imersos em hélio líquido, cuja temperatura de ebulição é de apenas 4 K. Essa era a única maneira de manter os fios naquelas baixas temperaturas exigidas para a supercondutividade. A **figura 4.57**, por exemplo, é uma fotografia da década de 1960 que mostra dois recipientes cilíndricos, contendo hélio líquido, nos quais estão mergulhadas duas bobinas de material supercondutor. Os fios dessas bobinas são percorridos por correntes de intensidade muito elevada, sem dissipação de calor, já que sua resistência, nessas condições, é nula (deve-se observar que, se esses fios estivessem à temperatura ambiente, eles se fundiriam ao serem percorridos por correntes tão intensas). Essas bobinas comportam-se, então, como poderosos eletroímãs, que são capazes de orientar grandes pregos de ferro, colocados sobre a mesa (o efeito magnético da corrente será analisado no Capítulo 7). Em virtude de o processo de obtenção do hélio líquido ser complexo e apresentar custo elevado, experiências como essa só podiam ser realizadas em laboratórios de pesquisas sofisticados.

Bettmann/Corbis/Latinstock



Figura 4.57. No interior dos cilindros há bobinas de material supercondutor mergulhadas em hélio líquido.

Em 1986, uma nova classe de materiais supercondutores foi descoberta: uma **cerâmica**, em cuja composição estão presentes óxidos de cobre, misturados com lantânio ou ítrio, e cuja temperatura de transição é de 125 K. Essa descoberta se apresentou como uma grande surpresa para os cientistas, pois as cerâmicas, de maneira geral, não são boas condutoras de eletricidade.

A grande vantagem dessa cerâmica é possuir uma temperatura de transição superior à temperatura de ebulição do nitrogênio (78 K). O nitrogênio, além de ser muito abundante, pode ser liquefeito com relativa facilidade, possibilitando manter a cerâmica no estado supercondutor com poucos gastos e com equipamentos acessíveis a laboratórios mais modestos. No Brasil existem muitas pesquisas sendo feitas nessa área, como também na produção e nos estudos de novos materiais e supercondutores. O grande objetivo dessas pesquisas, ainda remoto, é obter materiais que apresentem supercondutividade a temperaturas próximas da temperatura ambiente, que possam ser alcançadas pelos processos comuns de refrigeração.

Gabe Palmer/Corbis/Latinstock



Figura 4.58. Um pequeno ímã, em forma de disco, levitando sobre um material mantido no estado supercondutor pelo resfriamento propiciado por nitrogênio líquido (envolvendo o material).

Se esse objetivo for alcançado, as perdas nas transmissões de energia elétrica serão anuladas, o que traria um grande aumento (em torno de 30%) da energia elétrica disponível em todo o mundo. Além dessa vantagem, outras aplicações podem ser pensadas para os supercondutores. Uma delas é baseada na propriedade desses materiais de repelirem o polo de um ímã que deles é aproximado. A **figura 4.58**, que mostra um ímã suspenso em equilíbrio (no ar), a uma certa altura acima de uma placa de cerâmica supercondutora, é uma ilustração dessa propriedade. Esse efeito poderá ser usado, no futuro, para a construção de trens de alta velocidade, nos quais os vagões, providos de fortes ímãs, são mantidos em levitação sobre trilhos supercondutores. No Japão, já existe protótipo desse trem, que chega a alcançar velocidade de aproximadamente 530 km/h.

PRATIQUE FÍSICA

EM EQUIPE

Veja comentários desta seção no Manual do Professor.

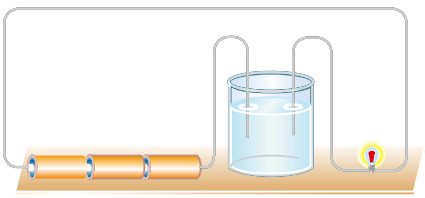
1. Nesta montagem experimental vamos investigar a condutibilidade elétrica de algumas misturas. Para isso, realizem a montagem ilustrada a seguir.



Eduardo Santaliestra/Estúdio Paulista

Primeiro, você deve testar a água pura. Posteriormente, água e sal e por último água e açúcar. Descreva o que aconteceu com a lâmpada em cada uma das situações e apresente as explicações. A quantidade de sal ou açúcar em cada uma das misturas pode alterar os resultados? Por quê?

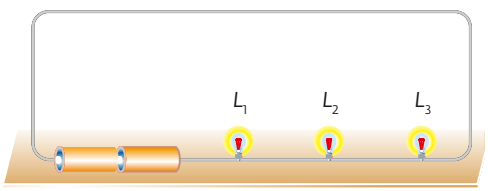
Não escreva no livro!



Ilustrações: Paulo César Pereira/Arquivo da editora

2. Para realizar esta experiência, você vai necessitar de duas pilhas secas comuns, três lâmpadas de lanterna (de 3 V cada uma) e fios de ligação.

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



1º) Associe as pilhas em série, como mostra a figura desta experiência. Ligue uma das lâmpadas (L_1 apenas) diretamente às pilhas e observe seu brilho.

2º) Abra o circuito e introduza uma outra lâmpada, L_2, em série com L_1 e, fechando novamente o circuito, observe o brilho de ambas as lâmpadas. Tendo em vista suas observações, responda: a corrente fornecida pelas pilhas aumentou, diminuiu ou não se alterou quando a lâmpada L_2 foi introduzida no circuito? Então, a resistência do circuito aumentou ou diminuiu quando a lâmpada L_2 foi associada em série com L_1?

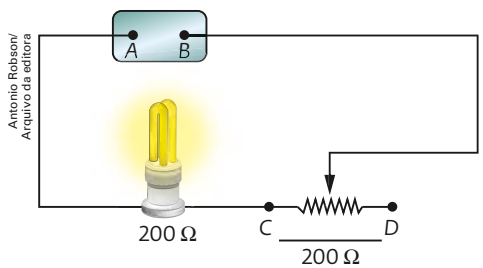
3º) Introduza, agora, uma terceira lâmpada, L_3, em série com L_1 e L_2 (veja a figura desta experiência). Observe novamente o brilho das lâmpadas e diga o que aconteceu com o valor da corrente fornecida pelas pilhas e com o valor da resistência total do circuito devido à introdução de L_3.

4º) Desligue a lâmpada L_3 e observe o que ocorre com L_1 e L_2. Repita sua observação desligando apenas L_2 e, em seguida, apenas L_1. Então, quando temos vários aparelhos ligados em série, se a corrente em um deles for interrompida, o que acontecerá com a corrente nos demais?

PROBLEMAS E TESTES

Não escreva no livro!

1. Entre os pontos *A* e *B* da tomada mostrada na figura é mantida uma diferença de potencial $V_{AB} = 120\ V$.



Antonio Robson/Arquivo da editora

Calcule a corrente que passa na lâmpada para as seguintes posições do cursor do reostato:

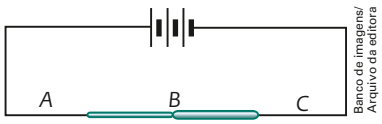
a) Cursor em C. 0,60 A

b) Cursor no meio de *CD*. 0,40 A

c) Cursor em *D*. 0,30 A

2. Um fio tem 10,0 m de comprimento e 3,0 mm² de área da seção reta. Medindo-se a resistência elétrica desse fio, verificou-se que seu valor é $5{,}7 \times 10^{-2}\ \Omega$. De que material você julga ser feito esse fio? De cobre.

3. Os fios *AB* e *BC* mostrados na figura são feitos do mesmo material e têm o mesmo comprimento, mas *BC* é mais grosso do que *AB*.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Entre as afirmativas seguintes, indique aquela que está correta: c

a) A resistividade de *AB* é maior do que a de *BC*.

b) A resistência elétrica de *AB* é igual à de *BC*.

c) A corrente elétrica que passa em *AB* é igual à que passa em *BC*.

d) A tensão V_{AB} é menor do que a tensão V_{BC}.

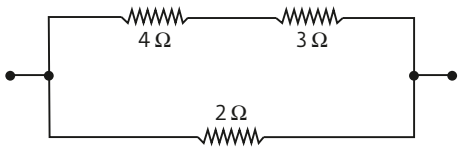
e) O campo elétrico é nulo no interior dos condutores *AB* e *BC*.

4. Uma lâmpada de filamento comum apresenta as seguintes especificações: 330 W; 220 V. Supondo que essa lâmpada esteja ligada na voltagem especificada, determine:

a) o valor da corrente que passa em seu filamento; 1,5 A

b) o valor da resistência desse filamento. 147 Ω

5. Analise a associação de resistências mostrada na figura:



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

Sem calcular a resistência equivalente dessa associação, podemos afirmar que o seu valor: b

a) está compreendido entre 7 Ω e 2 Ω.

b) é menor do que 2 Ω.

c) está compreendido entre 9 Ω e 7 Ω.

d) é igual a 9 Ω.

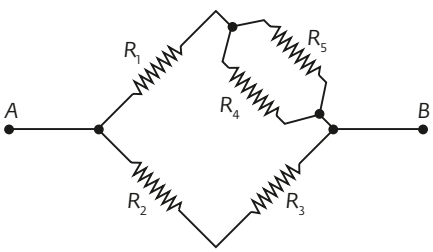
e) é maior do que 9 Ω.

6. Considere o circuito elétrico analisado no exercício 26 da seção *Verifique o que aprendeu* deste capítulo.

a) Calcule a voltagem a que está submetida cada uma das resistências do circuito. 0,90 V em R_1; 0,60 V em R_2 e R_3.

b) Qual é o valor da corrente que passa em cada uma dessas resistências? 0,30 A em R_1; 0,20 A em R_2; 0,10 A em R_3.

7. Na associação de resistências mostrada na figura, temos: $R_1 = 3{,}0\ \Omega$ e $R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = 6{,}0\ \Omega$. A tensão aplicada entre *A* e *B* é de 24 V.



Calcule: **7. c)** $i_1 = 4{,}0$ A; $i_2 = i_3 = i_4 = i_5 = 2{,}0$ A

a) a resistência equivalente da associação; 4,0 Ω

b) a corrente total que passa de *A* para *B*; 6,0 A

c) a corrente que passa em cada resistência.

8. Em uma residência, na qual a voltagem é de 120 V, está instalado um fusível de 25 A. Nessa residência são utilizados eventualmente diversos aparelhos eletrodomésticos, nos quais encontra-se especificada a potência de cada um: b, d.

- chuveiro: 2 400 W
- televisor: 120 W
- liquidificador: 240 W
- ebulidor: 840 W
- lâmpadas: 60 W (cada uma)

O fusível queimará se forem ligados simultaneamente:

a) o chuveiro, o televisor e o liquidificador.

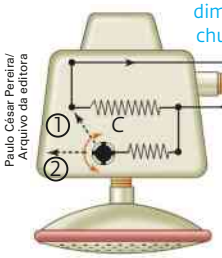
b) o chuveiro e o ebulidor.

c) o ebulidor, o liquidificador e o televisor.

d) dez lâmpadas, o televisor e o chuveiro.

e) o ebulidor, o televisor, o liquidificador e cinco lâmpadas.

9. A figura a seguir representa o circuito utilizado em determinados tipos de chuveiro elétrico. A chave C pode ser deslocada da posição (1) para a posição (2) e vice-versa. Para qual posição da chave o chuveiro está no inverno? Explique. Posição (1), pois a resistência inferior fica ligada em paralelo com a superior. Assim, temos uma diminuição na resistência total do chuveiro e isto acarreta um aumento de sua potência.



Paulo César Pereira/ Arquivo da editora

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

10. O proprietário de uma cantina verificou que os alimentos colocados no interior de uma estufa elétrica não eram suficientemente aquecidos.

Para aumentar a temperatura dessa estufa, ele poderá fazer várias modificações no resistor que a aquece.

Entre as opções seguintes, indique aquela que **não** o levará a obter o resultado desejado. c

a) Cortar um pedaço da resistência.

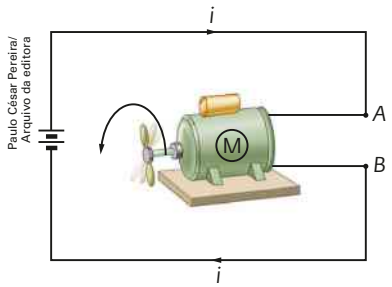
b) Ligar outra resistência em paralelo com a primeira.

c) Ligar outra resistência em série com a primeira.

d) Substituir a resistência por outra de mesmo comprimento e mesma seção, feita com um material de menor resistividade.

e) Substituir a resistência por outra de mesmo material e mesmo comprimento e de maior área de seção reta.

11. A figura abaixo mostra um motor elétrico *M*, ligado a uma bateria que lhe aplica uma diferença de potencial $V_{AB} = 12$ V, fornecendo-lhe uma corrente $i = 5{,}0$ A. O motor possui uma resistência interna $R = 0{,}20\ \Omega$. Em virtude dessa 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.



Paulo César Pereira/ Arquivo da editora

Baseando-se nessas informações, determine:

a) a potência total desenvolvida no motor; 60 W

b) a potência dissipada por efeito Joule no interior do motor; 5 W

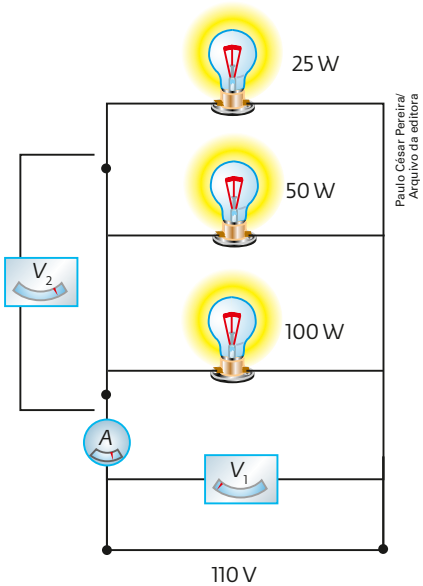
c) a potência mecânica de rotação do motor. 55 W

12. Analisando o circuito representado na figura abaixo, responda no caderno:

a) Qual é a leitura do voltímetro V_1? E de V_2? $V_1 = 110\,V$; $V_2 = 0$.

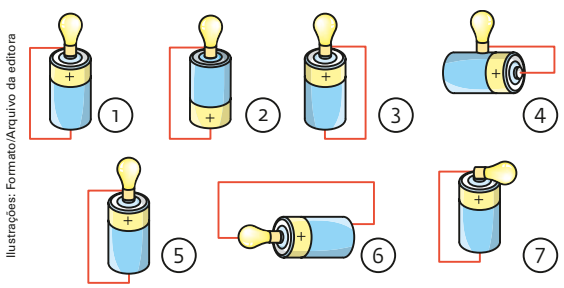
b) Em qual das lâmpadas passa a maior corrente? Na de 100 W.

c) Retirando-se do circuito a lâmpada de 25 W, a leitura do amperímetro aumenta, diminui ou não se altera? E a resistência total do circuito? Diminui; aumenta.



Paulo César Pereira/ Arquivo da editora

13. **(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: Formato/Arquivo da editora

GONÇALVES 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? d

a) (1), (3), (6)

b) (3), (4), (5)

c) (1), (3), (5)

d) (1), (3), (7)

e) (1), (2), (5)

14. **(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.


Posição I Posição II

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

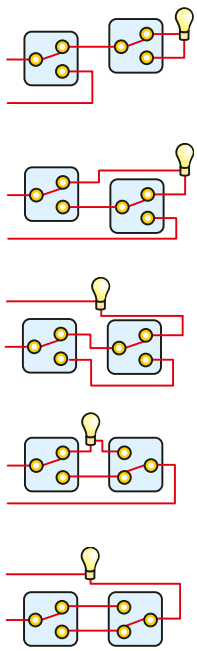
a)

b)

c)

d)

e)


Ilustrações: Formato/ Arquivo da editora

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

15. **(Uece)** Uma corrente elétrica de 3,0 A percorre um fio de cobre. Sabendo-se que a carga de um elétron é igual a $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C, o número de elétrons que atravessa, por minuto, a seção reta desse fio é, aproximadamente: a

a) $1{,}1 \cdot 10^{21}$ c) $2{,}0 \cdot 10^{10}$

b) $3{,}0 \cdot 10^{6}$ d) $1{,}8 \cdot 10^{11}$

16. **(Udesc)** A tabela a seguir fornece os comprimentos, as áreas da seção transversal e as resistividades para fios de cinco materiais diferentes. A resistência desses fios não depende da tensão aplicada.

Material	Comprimento	Área	Resistividade
A	*L*	*3A*	ρ
B	*3L*	*A*	2ρ
C	*2L*	*2A*	3ρ
D	*L*	*3A*	3ρ
E	*L*	*4A*	2ρ

A partir desses dados, indique a alternativa que contém o fio referente ao material que transforma mais energia por unidade de tempo quando todos estão individualmente submetidos à mesma diferença de potencial em suas extremidades. c

a) *C* b) *B* c) *A* d) *D* e) *E*



Imaginechina/Corbis/Latinstock

O desenvolvimento de novos modelos de bateria possibilita aos usuários explorarem diferentes funções dos celulares, além de proporcionar intervalos maiores entre as recargas.

CAPÍTULO 5

Força eletromotriz – Equação do circuito

P Resposta pessoal.

P Os componentes que oferecem resistência à passagem de corrente elétrica se aquecem devido ao efeito joule.

P Os metais que formam a bateria de celular, depositados em lugares inapropriados como lixões públicos, podem contaminar o solo e a água.

O telefone celular pode ser considerado a invenção do século XX que mais sofreu transformações. A tecnologia empregada nesse equipamento fez com que ele se tornasse cada vez menor, mais leve e incorporasse funções que não eram atribuídas inicialmente aos telefones, como câmeras de foto e vídeo, jogos, música e processamento de dados.

A bateria do telefone celular também precisou ser melhorada para prover energia elétrica para todas essas funções. As principais queixas dos usuários eram de que as baterias dos modelos antigos descarregavam muito rapidamente, demoravam a carregar, esquentavam em excesso e tornavam o equipamento pesado. Algumas opções foram testadas e hoje o mercado conta com novos recursos que solucionam esses problemas e garantem às baterias maior vida útil e menor impacto ambiental ao serem descartadas.

À medida que os usuários vão entendendo as funções de seus equipamentos, também vão aprendendo formas para economizar a energia de suas baterias: desligar as funções de compartilhamento de arquivos e dados quando não há necessidade, não utilizar em conjunto a função de toque com a de vibração, reduzir a intensidade luminosa de tela e teclado durante o dia, entre outras.

PARA INICIAR A CONVERSA

Compare a configuração atual do seu celular, ou o de algum colega, com as dicas que o texto oferece de como poupar energia. Quais delas você já adota e quais adotará para economizar bateria?

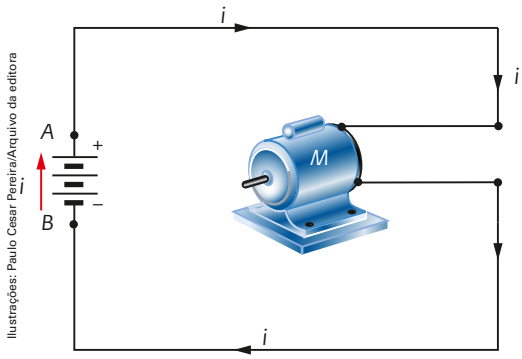
Por que as baterias dos celulares esquentam?

Pesquise como as baterias dos celulares podem impactar o meio ambiente.

5.1 Força eletromotriz

O que é um gerador de força eletromotriz

Já vimos que uma pilha ou uma bateria estabelecem e mantêm uma diferença de potencial entre seus polos. Por exemplo, temos uma diferença de potencial entre os pontos *A* e *B*, que são os polos positivo e negativo da bateria **(figura 5.1)**. Portanto, se ligarmos um motor elétrico *M* a esses polos, uma corrente elétrica circulará no circuito de *A* para *B*, como mostra a figura, fazendo funcionar o motor.



Ilustrações: Paulo Cesar Pereira/Arquivo da editora

Figura 5.1. A bateria é um dispositivo que consome energia química para realizar um trabalho sobre as cargas elétricas, elevando o potencial destas.

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

No exterior da bateria, as cargas elétricas que constituem a corrente deslocam-se naturalmente do polo positivo (potencial maior) para o polo negativo (potencial menor). Entretanto, ao chegarem a *B*, para completar o circuito, essas cargas devem ser transportadas no interior da bateria de *B* para *A*. Esse deslocamento de cargas **não** se faz naturalmente, pois o potencial de *B* é menor que o de *A*. O deslocamento de *B* para *A* ocorre porque, no interior da bateria, devido a reações químicas, as cargas são forçadas a se deslocar de *B* para *A*, completando o circuito e voltando a circular, de *A* para *B*, no exterior da bateria. Em outras palavras, a bateria é um dispositivo que, consumindo energia química, realiza um trabalho sobre as cargas, entregando a elas uma certa quantidade de energia (energia elétrica) ao elevar o potencial dessas cargas no deslocamento do polo negativo para o positivo.

O funcionamento de uma bateria pode ser comparado ao de uma bomba-d'água. Considerando o circuito hidráulico mostrado na **figura 5.2**, sabemos que a água passa naturalmente do alto do edifício (maior energia potencial) para sua base (menor energia potencial), realizando certo trabalho (mover uma roda-d'água, por exemplo). Isso equivale, no caso do circuito da **figura 5.1**, ao deslocamento da corrente de *A* para *B*, movimentando o motor. Na **figura 5.2**, para que a água se desloque de *B* para *A*, atingindo o alto do edifício e voltando a circular, é necessária uma bomba-d'água. Essa bomba desempenha um papel semelhante ao da bateria, pois realiza um trabalho sobre a água, aumentando sua energia potencial no deslocamento de *B* para *A*.

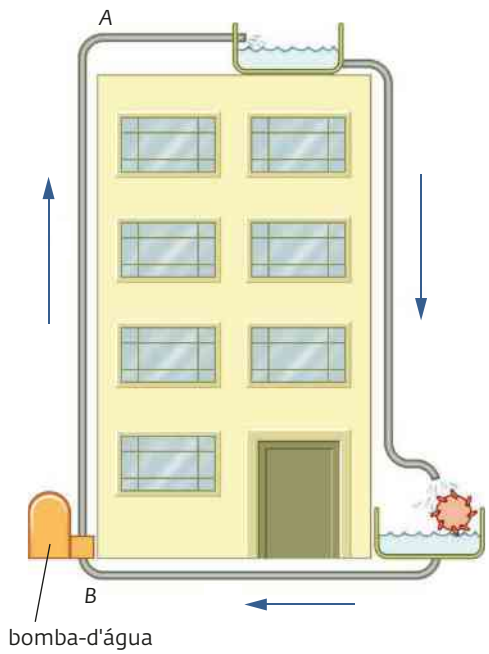


Figura 5.2. O funcionamento de uma bateria pode ser comparado ao de uma bomba-d'água.

Existem vários outros dispositivos elétricos que, como uma bateria, são capazes de realizar um trabalho sobre as cargas elétricas que passam através deles, aumentando o potencial dessas cargas. Tais dispositivos são denominados **geradores de corrente** ou **geradores de força eletromotriz** (geradores de f.e.m.). Assim, uma pilha (ou uma bateria) é um gerador de f.e.m., pois utiliza energia química, que é transferida para as cargas sob a forma de energia elétrica.

Do mesmo modo, um dínamo, uma termopilha, uma bateria solar, etc. são geradores de f.e.m., pois, utilizando outras formas de energia (mecânica, térmica, etc.), realizam trabalho sobre as cargas, aumentando sua energia elétrica **(figura 5.3)** e sendo, portanto, capazes de gerar uma corrente elétrica.

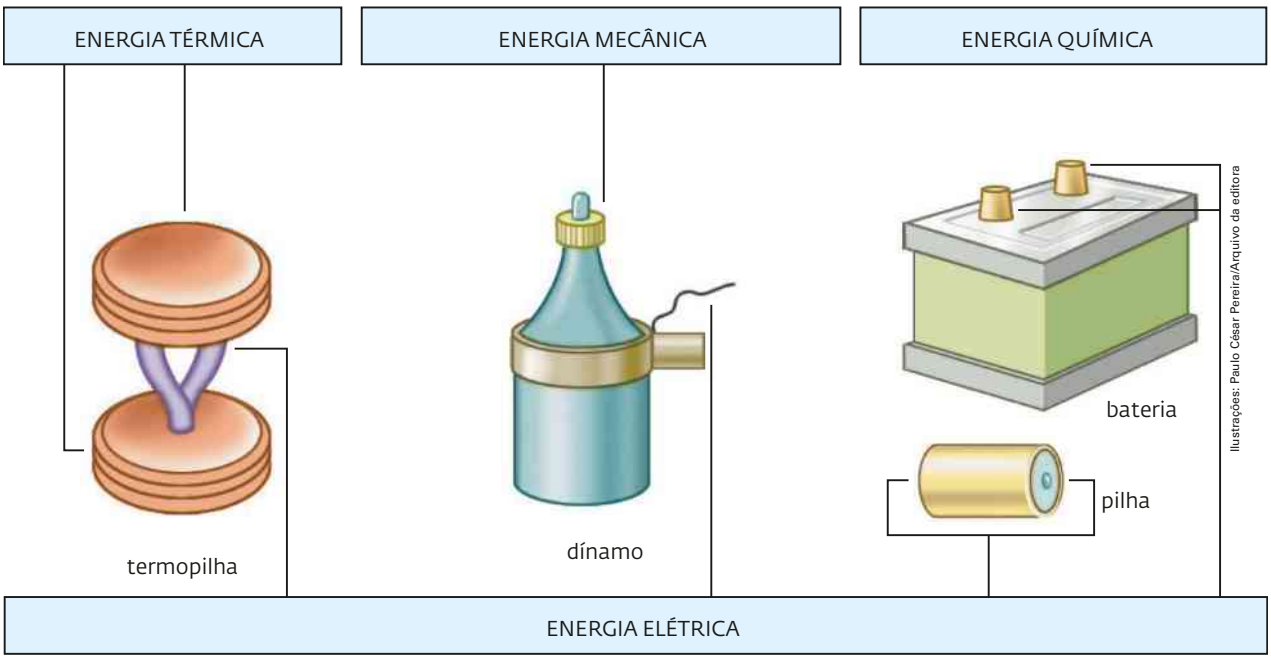


Figura 5.3. Nos geradores de força eletromotriz, diversas formas de energia são utilizadas para realizar trabalho sobre as cargas elétricas que passam através deles. Representação sem escala e em cores fantasia.

Expressão matemática da força eletromotriz

Voltando à **figura 5.1**, consideremos uma carga Δq sendo transportada de B para A no interior da bateria. Seja $\mathcal{C}$ o trabalho que a bateria realiza sobre essa carga, elevando o valor de sua energia potencial elétrica. Em outras palavras, $\mathcal{C}$ representa a energia que é transferida à carga Δq pela bateria.

A relação entre essas duas grandezas é denominada **força eletromotriz** (f.e.m.) ou **eletromotância** da bateria, e é representada por ε. Portanto, temos:

$$\varepsilon = \frac{\mathcal{C}}{\Delta q}$$

Por meio dessa relação, percebemos que a unidade de medida da f.e.m., no SI, será:

$$1\,\frac{\text{J}}{\text{C}} = 1 \text{ volt} = 1 \text{ V}$$

Note que, apesar de a unidade de f.e.m. ser a mesma usada para a medida de diferença de potencial, os conceitos de diferença de potencial e de f.e.m. são diferentes.

Assim, quando dizemos que a f.e.m. de uma bateria vale, por exemplo, $\varepsilon = 12$ V (isto é, $\varepsilon = 12$ J/C), significa que essa bateria realiza um trabalho de 12 J sobre cada 1 C que se desloca de seu polo negativo para seu polo positivo.

Podemos, então, generalizar:

Se um gerador realizar um trabalho $\mathcal{C}$ ao transportar uma carga Δq de seu polo negativo para o seu polo positivo, a força eletromotriz (ou eletromotância) desse gerador será dada por:

$$\varepsilon = \frac{\mathcal{C}}{\Delta q}$$

O que é um gerador de força contraeletromotriz

Quando as cargas elétricas passam através do **motor** da figura 5.1, elas **perdem** energia elétrica, que se transforma em energia mecânica. Portanto, um motor elétrico, ao contrário de um gerador de f.e.m., **retira** energia das cargas elétricas e, por esse motivo, é denominado um **receptor** ou um **gerador de força contraeletromotriz** (f.c.e.m.).

De maneira geral, qualquer aparelho no qual a energia elétrica se transforma em outro tipo de energia, que não seja a energia térmica, é denominado um gerador de f.c.e.m. (receptor) (figura 5.4). A transformação de energia elétrica em calor ocorre nas resistências elétricas (efeito Joule), que já estudamos anteriormente.

A definição de f.c.e.m. de um receptor é dada pela mesma expressão que define a f.e.m. de um gerador $\left(\varepsilon = \frac{\mathcal{C}}{\Delta q}\right)$. Deve-se apenas observar que, no caso de um receptor, $\mathcal{C}$ representa a energia **retirada** da carga Δq que atravessou o aparelho.

Então, em resumo, temos:

Um gerador de f.e.m. transfere energia às cargas que passam através dele, transformando um tipo qualquer de energia em energia elétrica. Um gerador de f.c.e.m. (um receptor) recebe energia das cargas que passam através dele, transformando energia elétrica em outro tipo de energia (exceto energia térmica).



Iara Venanzi/kino.com.br



Superstock/Keystone

As imagens desta página estão representadas fora de proporção.

Figura 5.4. Exemplos de receptores elétricos acionados por motores elétricos: batedeira e furadeira.

Uma bateria recebendo carga

O motor elétrico é um gerador de f.c.e.m. Outro exemplo de receptor é uma bateria sendo carregada. Nesse caso, a energia elétrica das cargas que passam através da bateria é transformada em energia química, que fica armazenada na própria bateria.

Devemos notar que, quando uma bateria funciona como gerador de corrente, isto é, quando ela está se descarregando, a corrente dentro da bateria passa do polo negativo para o positivo. Observe que isso ocorre, por exemplo, na bateria da **figura 5.1**, que está gerando a corrente que aciona o motor. No entanto, para dar carga a uma bateria, ela deve ser ligada a um gerador que faça uma corrente passar, dentro dela, do polo positivo para o negativo (ao contrário do que acontece quando a bateria está gerando a corrente).

Na prática, isso é feito comumente através de um carregador de baterias. Esse dispositivo é um gerador que produz corrente contínua quando ligado em uma tomada elétrica comum. Observe, na **figura 5.5**, que a corrente fornecida pelo carregador penetra no polo positivo da bateria, passa através dela e sai pelo polo negativo. Portanto, essa bateria está recebendo carga (o reostato na figura é usado simplesmente para controlar a intensidade da corrente). Na **figura 5.6** mostramos o diagrama do circuito da **figura 5.5**, em que ε representa a f.e.m. do gerador (carregador) e ε', a f.c.e.m. do receptor (bateria recebendo carga).

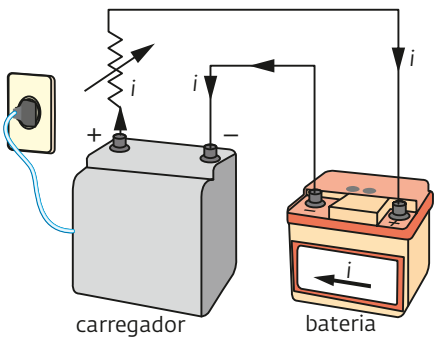
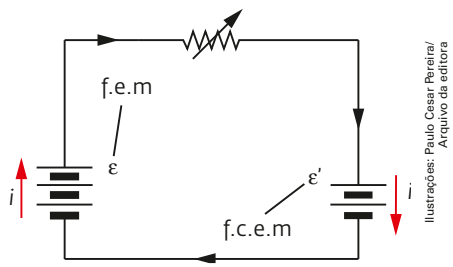


Figura 5.5. Quando uma bateria está sendo carregada, ela está funcionando como um aparelho de força contraeletromotriz. Representação sem escala e em cores fantasia.



Ilustrações: Paulo Cesar Pereira/ Arquivo da editora

Figura 5.6. Diagrama do circuito elétrico mostrado na **figura 5.5**.

Potência fornecida por um gerador

Da expressão $\varepsilon = \frac{\mathcal{E}}{\Delta q}$, que define a f.e.m. de um gerador, obtemos:

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

Essa expressão nos fornece o trabalho $\mathcal{E}$ realizado por um gerador de f.e.m. ε ao transportar uma carga Δq de seu polo negativo para seu polo positivo. Dividindo os dois membros dessa equação pelo intervalo de tempo Δt, durante o qual o trabalho $\mathcal{E}$ foi realizado pelo gerador, temos:

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

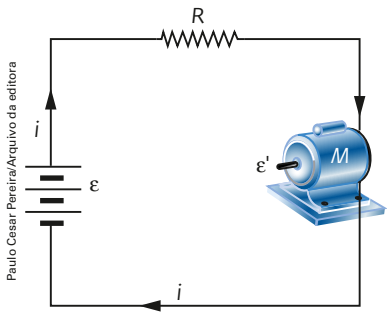
Como $\frac{\mathcal{E}}{\Delta q}$ é a potência P desenvolvida pelo gerador e $\frac{\Delta q}{\Delta t}$ representa a intensidade da corrente fornecida por ele, vem:

$$P = \varepsilon i$$

Portanto, a potência desenvolvida por um gerador é obtida multiplicando-se sua f.e.m. pela corrente que ele fornece. Essa mesma expressão nos permite calcular a potência desenvolvida em um receptor. Nesse caso, ε representa a f.c.e.m. do receptor e i representa a corrente que passa através dele.

Exemplo

No circuito da figura 5.7, uma bateria de f.e.m. $\varepsilon = 12$ V estabelece uma corrente $i = 0{,}40$ A, que passa através de um resistor de resistência $R = 10\ \Omega$ e coloca em movimento um motor cuja f.c.e.m. é $\varepsilon' = 8{,}0$ V.



Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura 5.7. Para o exemplo da seção 5.1. Representação sem escala e em cores fantasia.

a) Qual é a energia que a bateria transfere a uma carga $\Delta q = 20$ C que passa através dela?

Essa energia é fornecida pelo trabalho $\mathcal{C}$ que a bateria realiza sobre a carga Δq.

De $\varepsilon = \dfrac{\mathcal{C}}{\Delta q}$, obtemos:

$$\mathcal{C} = \varepsilon \Delta q = 12 \cdot 20 \quad \therefore \quad \mathcal{C} = 240\ \text{J}$$

b) Quando a carga $\Delta q = 20$ C passa através do motor, qual é a quantidade de energia elétrica que se transforma em energia mecânica?

Representando por $\mathcal{C}'$ essa quantidade de energia, sabemos que $\varepsilon' = \dfrac{\mathcal{C}'}{\Delta q}$. Logo:

$$\mathcal{C}' = \varepsilon' \Delta q = 8{,}0 \cdot 20 \quad \therefore \quad \mathcal{C}' = 160\ \text{J}$$

c) Baseando-se no princípio de conservação da energia, determine a quantidade de calor ΔQ que é desenvolvida na resistência R quando a carga Δq passa por ela.

A quantidade de energia que a carga Δq recebe na bateria deve ser igual à soma da quantidade de calor desenvolvida em R com a quantidade de energia que essa carga perde ao passar pelo motor. Então:

$$240 = \Delta Q + 160 \quad \therefore \quad \Delta Q = 240 - 160 \quad \text{ou} \quad \Delta Q = 80\ \text{J}$$

d) Calcule a potência P desenvolvida pela bateria e a potência P' do motor.

Temos:

$$P = \varepsilon i = 12 \cdot 0{,}40 \quad \therefore \quad P = 4{,}8\ \text{W}$$

$$P' = \varepsilon' i = 8{,}0 \cdot 0{,}40 \quad \therefore \quad P' = 3{,}2\ \text{W}$$

e) Determine a potência dissipada, por efeito Joule, na resistência R.

Pela conservação da energia, essa potência, P_R, deve ser igual à diferença entre P e P', isto é:

$$P_R = P - P' = 4{,}8 - 3{,}2 \quad \therefore \quad P_R = 1{,}6\ \text{W}$$

Por outro lado, P_R pode também ser obtida pela expressão $P_R = Ri^2$, que estudamos no capítulo anterior. Então:

$$P_R = Ri^2 = 10 \cdot (0{,}40)^2 \quad \therefore \quad P_R = 1{,}6\ \text{W}$$

Observe que em ambos os processos obtivemos o mesmo valor de P_R, como não podia deixar de ser.

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

Não escreva no livro!

As informações seguintes se referem aos exercícios 1, 2, 3 e 4.

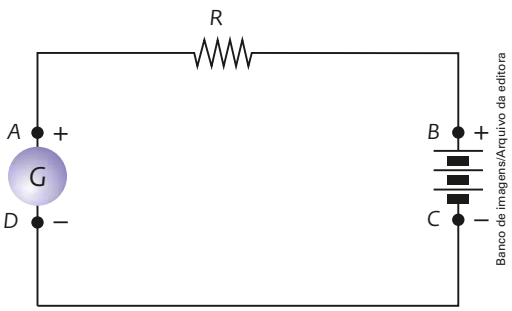
Nos automóveis existe um gerador (dínamo) que, acionado pelo motor do carro, produz uma corrente contínua usada para manter a bateria constantemente carregada.



Sérgio Dotta Jr./Arquivo da editora

Dínamo

A figura abaixo representa um gerador desse tipo, *G*, estabelecendo uma corrente em um circuito em que existe uma resistência *R* e uma bateria recebendo carga.



Banco de imagens/Arquivo da editora

1. a) Indique, em uma cópia da figura no caderno, o sentido da corrente no circuito.

b) Ao passarem no interior do gerador, as cargas elétricas perdem ou ganham energia?

c) E ao passarem no interior da bateria?

2. a) No gerador, qual é o tipo de energia que se transforma em energia elétrica?

b) Qual é a transformação de energia que ocorre na bateria?

3. Suponha que a f.e.m. do gerador seja $\varepsilon = 15\ V$ e a f.c.e.m. da bateria seja $\varepsilon' = 12\ V$. Considerando uma carga de 1 C passando pelo circuito, responda:

a) Qual é a quantidade de energia que essa carga recebe ao passar no gerador? 15 J

b) Qual é a quantidade de energia que essa carga perde ao passar na bateria? 12 J

c) Qual é a quantidade de energia que essa carga perde ao passar pela resistência? (Lembre-se do princípio de conservação da energia.)? 3 J

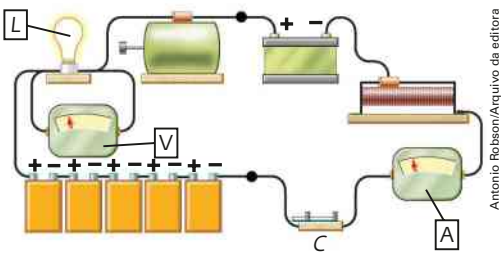
4. Sabe-se que a intensidade da corrente no circuito é $i = 5{,}0\ A$. Nessas condições:

a) Qual é a potência que o gerador fornece às cargas? 75 W

b) Qual é a potência que a bateria retira da corrente? 60 W

c) Então, qual é a potência dissipada por efeito Joule na resistência? 15 W

5. Usando as convenções para representar os diversos elementos que constituem um circuito elétrico, faça em seu caderno um diagrama que corresponda ao circuito desenhado na figura abaixo.



Antonio Robson/Arquivo da editora

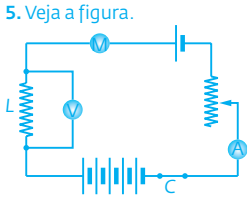
6. Até agora vimos alguns exemplos de dispositivos que funcionam com eletricidade. Os geradores transformam algum tipo de energia não elétrica em energia elétrica e a direcionam para os resistores e receptores do circuito. Já os resistores transformam toda a energia elétrica que recebem de um gerador em energia térmica. Os receptores, por sua vez, transformam a energia elétrica que recebem dos geradores em energia não elétrica e não térmica. Associe os aparelhos elétricos listados a seguir à função (elétrica) que geralmente desempenham no dia a dia: liquidificador, ventilador, pilha alcalina, bateria de celular, chuveiro elétrico, ferro elétrico de passar roupa.

7. Na montanha-russa dos parques de diversão existe uma esteira, ligada a um motor, que eleva um carrinho a muitos metros de altura. O carrinho abandonado do topo da montanha-russa desce a pista, espontaneamente, pela ação da gravidade. Ao chegar à base da pista, a esteira motorizada ergue novamente o carrinho até o topo da montanha-russa, e a descida veloz é retomada. Imagine que a pista completa dessa montanha-russa represente um circuito elétrico. Nessa analogia, responda:

a) O carrinho representa que elemento de circuito?

b) A esteira motorizada representa que elemento de circuito?

5. Veja a figura.



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

1. a) No sentido *ABCD*.
b) Ganham.
c) Perdem.

2. a) Energia mecânica.
b) Energia elétrica se transforma em energia química.

6. Geradores: pilha e bateria; resistências: chuveiro e ferro de passar; receptores: liquidificador e ventilador.

7. a) Os portadores de carga elétrica da corrente do circuito.
b) O gerador de eletricidade.

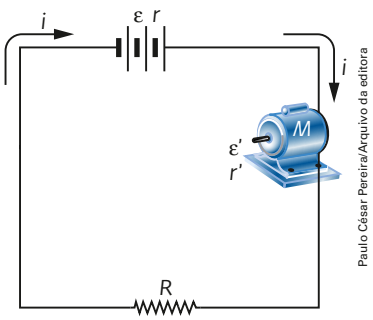
5.2 A equação do circuito

Resistência interna

Sempre que uma corrente elétrica passa por um condutor, ele oferece uma certa oposição à essa passagem. Em outras palavras, todo condutor possui uma certa **resistência elétrica**. Quando uma corrente elétrica passa através de um motor, por exemplo, ela é obrigada a percorrer vários fios existentes no interior desse motor. Então, esses fios apresentam uma certa resistência à passagem da corrente, que é denominada **resistência interna** do motor. É por esse motivo que, quando um motor está em funcionamento, percebe-se um aquecimento do aparelho em virtude do calor que é gerado por efeito Joule em sua resistência interna. Assim, uma bateria ou outro gerador qualquer oferecem uma oposição à passagem da corrente através deles, isto é, esses aparelhos também possuem uma resistência interna. Quando uma bateria é bem construída e possui pouco tempo de uso (bateria nova), sua resistência interna é muito pequena. Entretanto, à medida que ela vai sendo usada, a resistência interna aumenta, podendo alcançar valores bastante elevados. Nessas condições, o calor gerado por efeito Joule no interior da bateria torna-se apreciável, fazendo com que ela perca sua utilidade como gerador de corrente.

Análise de um circuito série

O circuito elétrico mostrado na **figura 5.8** contém uma bateria de f.e.m. ε e cuja resistência interna vamos designar por r. Essa bateria está ligada a um motor de f.c.e.m. ε', que apresenta resistência interna r', e a uma resistência externa R (uma lâmpada ou um aquecedor, por exemplo). Observe que todos os elementos desse circuito estão ligados **em série** entre si, e, por isso, ele é denominado **circuito série**. No lugar da bateria poderíamos ter um outro gerador qualquer e, no lugar do motor, poderia existir um receptor qualquer de f.c.e.m. (uma bateria recebendo carga, por exemplo). Pela polaridade da bateria, podemos concluir que há uma corrente elétrica passando no circuito no sentido mostrado na **figura 5.8**. Então, no interior dessa bateria, as cargas elétricas recebem energia ao passarem do polo negativo para o positivo, isto é, há transformação da energia química da bateria em energia elétrica das cargas. À medida que essas cargas circulam, transferem essa energia recebida aos diversos elementos do circuito. Assim, quando as cargas passam através do motor, parte de sua energia se transforma em energia mecânica de rotação do motor (força contraeletromotriz) e parte se transforma em calor, por efeito Joule, em sua resistência interna r'. Na resistência externa R há também transformação de parte da energia das cargas em calor. Isso ocorre, ainda, no interior da própria bateria, em virtude de sua resistência interna r. Em resumo, temos então:



Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura 5.8. Diagrama de um circuito em série simples. Representação sem escala e em cores fantasia.

- Na bateria, as cargas:
  recebem energia (energia química se transforma em energia elétrica);
  perdem energia (energia elétrica se transforma em calor na resistência interna).
- No motor, as cargas:
  perdem energia (energia elétrica se transforma em energia mecânica);
  perdem energia (energia elétrica se transforma em calor na resistência interna).
- Na resistência R, as cargas:
  perdem energia (energia elétrica se transforma em calor).

A equação do circuito série

Observando que, em um intervalo de tempo Δt, uma carga Δq passa em qualquer elemento do circuito, vamos expressar matematicamente as quantidades de energia que a carga Δq ganha ou perde ao longo do circuito.

Para isso, vamos lembrar das expressões que vimos no capítulo 4 e no início deste capítulo:

$$\varepsilon = \frac{\mathcal{C}}{\Delta q}, P = \frac{\Delta E}{\Delta t} \text{ e } P = Ri^2$$

Note que, nas equações acima, o trabalho $\mathcal{C}$ representa a quantidade de energia perdida ou recebida pela carga Δq. Portanto, teremos que:

- energia recebida na bateria: $\varepsilon \Delta q$;
- energia perdida na resistência interna da bateria: $ri^2\Delta t$;
- energia perdida para fazer girar o motor: $\varepsilon' \Delta q$;
- energia perdida na resistência interna do motor: $r'i^2\Delta t$;
- energia perdida na resistência externa: $Ri^2\Delta t$.

Pelo princípio de conservação da energia, a quantidade de energia que a carga ganha na bateria deve ser igual à soma das energias que ela transfere aos elementos do circuito (estamos desprezando a energia perdida nos fios de ligação, pois eles possuem resistência praticamente nula).

Podemos, então, escrever:

$$\varepsilon \Delta q = ri^2\Delta t + \varepsilon' \Delta q + r'i^2\Delta t + Ri^2\Delta t$$

Sendo $i = \frac{\Delta q}{\Delta t}$, temos $\Delta q = i\Delta t$, e substituindo essa relação na expressão anterior, vem:

$$\varepsilon i\Delta t = ri^2\Delta t + \varepsilon' i\Delta t + r'i^2\Delta t + Ri^2\Delta t \quad \therefore \quad \varepsilon = ri + \varepsilon' + r'i + Ri \quad \text{ou} \quad \varepsilon - \varepsilon' = i(r + r' + R)$$

Portanto, obtemos o valor da intensidade da corrente no circuito:

$$i = \frac{\varepsilon - \varepsilon'}{r + r' + R}$$

Observe que o numerador dessa expressão representa a soma algébrica das f.e.m. que aparecem no circuito (considerando negativa a f.c.e.m.) e o denominador, a soma de todas as resistências (internas e externas) desse circuito.

De modo geral, podemos então destacar:

Quando em um circuito existem vários geradores de f.e.m., ligados em série a vários receptores (aparelhos que apresentam f.c.e.m.) e a várias resistências elétricas, a intensidade da corrente nesse circuito é dada por:

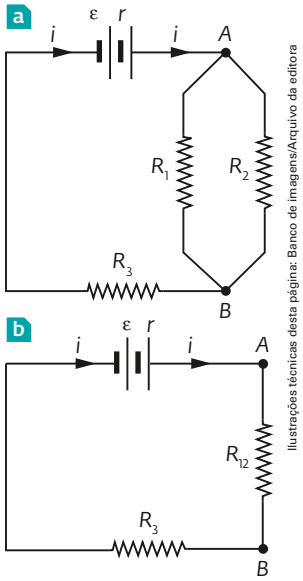
$$i = \frac{\Sigma\varepsilon}{\Sigma R}$$

em que $\Sigma\varepsilon$ representa a soma algébrica das f.e.m. e f.c.e.m. (sendo essas últimas tomadas com sinal negativo) e ΣR representa a soma de todas as resistências internas e externas. A equação $i = \frac{\Sigma\varepsilon}{\Sigma R}$ é denominada "equação do circuito série".

Comentários

1) A equação do circuito é de grande utilidade porque nos permite calcular o valor da corrente que passa em um circuito série, quando conhecemos os valores da f.e.m., f.c.e.m. e resistências existentes nesse circuito. Conhecendo o valor de i, podemos facilmente obter os valores de várias outras grandezas envolvidas no circuito, tais como a diferença de potencial entre dois pontos ($V_{AB} = Ri$), a potência desenvolvida por efeito Joule ($P = Ri^2$), etc.

2) A equação $i = \frac{\Sigma\varepsilon}{\Sigma R}$ aplica-se apenas aos circuitos de elementos ligados em série. Entretanto, existem certos circuitos, como o da **figura 5.9.a**, que, embora possuam resistores dispostos em paralelo, podem facilmente ser reduzidos a um circuito série. Para o circuito da **figura 5.9.a**, por exemplo, calculamos a resistência R_{12} equivalente às resistências dos resistores R_1 e R_2 e obtemos o circuito série da **figura 5.9.b**, que é equivalente ao anterior. Para esse circuito da **figura 5.9.b**, a equação $i = \frac{\Sigma\varepsilon}{\Sigma R}$ pode ser aplicada.



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

Figura 5.9. O circuito mostrado em **a** é equivalente ao circuito série apresentado em **b**.

Exemplo

No circuito mostrado na figura 5.10, temos duas baterias cujas f.e.m. são $\varepsilon_1 = 6{,}0\ V$ e $\varepsilon_2 = 24\ V$ e cujas resistências internas de seus resistores são $r_1 = 1{,}0\ \Omega$ e $r_2 = 2{,}0\ \Omega$. Existe, ainda, nesse circuito um resistor de resistência externa $R = 6{,}0\ \Omega$.

a) Qual é o sentido da corrente que passa no circuito?

De modo geral, um gerador tende a produzir uma corrente que sai de seu polo positivo. Então, a bateria ε_1 tende a produzir uma corrente no sentido horário e a bateria ε_2, no sentido anti-horário. O sentido da corrente é determinado pela f.e.m. de maior valor. Como $\varepsilon_2 > \varepsilon_1$, temos, no circuito, uma corrente no sentido anti-horário **(figura 5.10)**.

b) Qual das duas baterias está funcionando como gerador de corrente? E qual está funcionando como receptor?

Vimos que o sentido da corrente é determinado pela bateria ε_2, isto é, no seu interior a corrente está passando do polo negativo para o positivo. Logo, essa bateria é o gerador de f.e.m. do circuito (bateria descarregando).

Observe, na **figura 5.10**, que no interior da bateria ε_1 a corrente está passando do polo positivo para o negativo. Sabemos que, nessas condições, ε_1 está recebendo carga, isto é, ela está funcionando como um receptor (gerador de f.c.e.m.).

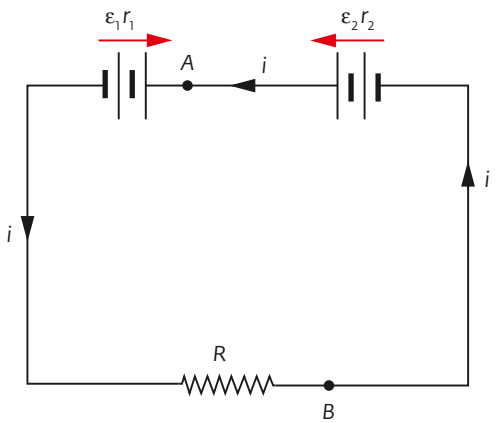


Figura 5.10. Para o exemplo da seção 5.2.

c) Calcule a intensidade da corrente no circuito.

A intensidade da corrente é dada pela equação do circuito série. Como ε_2 é uma f.e.m. e ε_1 é uma f.c.e.m., temos:

$$i = \frac{\Sigma\varepsilon}{\Sigma R} = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{R + r_1 + r_2} = \frac{24 - 6{,}0}{6{,}0 + 1{,}0 + 2{,}0} \quad \therefore \quad i = 2{,}0\ A$$

d) Verifique se a potência transferida às cargas pelo gerador de f.e.m. é igual à soma das potências que as cargas transferem aos elementos do circuito.

A potência é transferida às cargas pela bateria ε_2. Essa potência vale:

$$P_2 = \varepsilon_2 i = 24 \cdot 2{,}0 \quad \therefore \quad P_2 = 48\ W$$

As cargas transferem uma potência P_1 ao receptor de f.c.e.m. ε_1 e uma potência P_R a todas as resistências do circuito (efeito Joule). Temos:

$$P_1 = \varepsilon_1 i = 6{,}0 \cdot 2{,}0 \quad \therefore \quad P_1 = 12\ W$$

$$P_R = (R + r_1 + r_2) i^2 = (6{,}0 + 1{,}0 + 2{,}0) \cdot (2{,}0)^2 \quad \therefore \quad P_R = 36\ W$$

Portanto, $P_2 = P_1 + P_R$, isto é, como não podia deixar de ser, o princípio de conservação da energia foi verificado.

Cálculo de diferença de potencial entre dois pontos de um circuito

Suponha que queiramos calcular a diferença de potencial entre dois pontos, *A* e *B*, de um circuito qualquer (considere, por exemplo, o circuito mostrado na **figura 5.10**).

Para obter esse valor, devemos imaginar que estamos nos deslocando de *A* para *B*, ao longo do circuito, tanto no sentido da corrente quanto no sentido contrário a ela. Nesse deslocamento, ao passarmos por elementos do circuito, o potencial pode aumentar, diminuir ou não variar, dependendo dos dispositivos presentes no circuito. Podem ocorrer, então, as seguintes situações:

1ª) Ao passarmos por um gerador, de seu polo negativo para o positivo, o potencial aumentará de um valor igual a ε. Se a passagem ocorrer em sentido contrário, o potencial diminuirá da mesma quantidade ε.

2ª) Ao passarmos por uma resistência *R* (incluindo a resistência interna do gerador), no mesmo sentido da corrente *i*, o potencial diminuirá de um valor que corresponde a *Ri*. Se a passagem ocorrer em sentido contrário, o potencial aumentará da mesma quantidade *Ri*.

3ª) Ao passarmos por um fio de resistência desprezível (fio de ligação), não haverá variação do potencial.

O valor da diferença de potencial entre dois pontos quaisquer, *A* e *B*, será obtido somando-se algebricamente ao potencial de *A* (V_A) as variações de potencial que ocorrem no percurso de *A* para *B*, tomando-se os aumentos com sinal positivo e as diminuições com sinal negativo e igualando-se essa soma ao potencial de *B* (V_B). O exemplo seguinte ilustrará esse procedimento.

Exemplo

Na figura 5.10, vamos percorrer o circuito de *A* para *B*, inicialmente no sentido da corrente.

Temos as seguintes variações do potencial:

- na bateria ε_1, o potencial **diminui** de $\varepsilon_1 = 6{,}0\ V$;
- na resistência interna r_1 (da bateria), o potencial **diminui** de $r_1 i = 1{,}0 \cdot 2{,}0$ ou $r_1 i = 2{,}0\ V$;
- na resistência *R*, o potencial **diminui** de $Ri = 6{,}0 \cdot 2{,}0$ ou $Ri = 12\ V$.

Podemos, portanto, escrever:

$$V_A - 6{,}0 - 2{,}0 - 12 = V_B$$

e obtemos:

$$V_A - V_B = 20\ V$$

Alternativamente, podemos percorrer o circuito de *A* para *B* em sentido contrário ao da corrente, e o mesmo resultado para o valor de $V_A - V_B$ é obtido.

Temos:

- na bateria ε_2, o potencial diminui de $\varepsilon_2 = 24\ V$;
- na resistência interna r_2, o potencial aumenta de $r_2 i = 2{,}0 \cdot 2{,}0$ ou $r_2 i = 4{,}0\ V$.

Logo:

$$V_A - 24 + 4{,}0 = V_B$$

e obtemos:

$$V_A - V_B = 20\ V$$

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

Não escreva no livro!

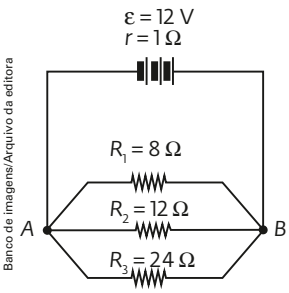
8. Uma bateria, cuja f.e.m. é $\varepsilon = 6{,}0\ V$ e cuja resistência interna vale $r = 0{,}20\ \Omega$, está ligada a uma lâmpada, fornecendo-lhe uma corrente $i = 5{,}0\ A$.

a) Qual é a potência que a bateria transfere às cargas que passam através dela? 30 W

b) Qual é a potência dissipada por efeito Joule no interior da bateria? 5,0 W

c) Então, qual é a potência que a bateria está fornecendo à lâmpada? 25 W

9. Observe o circuito mostrado na figura ao lado e determine:



Banco de imagens/Arquivo da editora

a) a resistência R equivalente à associação de R_1, R_2 e R_3 (faça um desenho no caderno do circuito série correspondente ao apresentado); 4,0 Ω

b) a intensidade da corrente fornecida pela bateria; 2,4 A

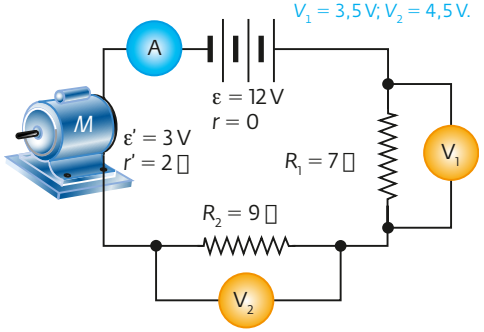
c) a diferença de potencial entre os pontos A e B; 9,6 V

d) as correntes i_1, i_2 e i_3 que passam nas resistências R_1, R_2 e R_3. $i_1 = 1{,}2\ A$; $i_2 = 0{,}80\ A$; $i_3 = 0{,}40\ A$.

10. A figura abaixo mostra um circuito no qual uma bateria está ligada em série com duas resistências, R_1 e R_2, e com um motor elétrico M. Observando os valores indicados na figura, determine:

a) a leitura do amperímetro; 0,5 A

b) a leitura de cada um dos voltímetros. $V_1 = 3{,}5\ V$; $V_2 = 4{,}5\ V$.



Ilustrações: Paulo César Pereira/Arquivo da editora

5.3 Diferença de potencial nos terminais de um gerador

Consideremos um gerador qualquer, de f.e.m. ε e resistência interna r; por exemplo, a bateria mostrada na **figura 5.11**.

Ligando-se esse gerador a um circuito externo (uma resistência R, por exemplo), ele fará passar no circuito uma corrente i.

Essa corrente é estabelecida porque existe uma diferença de potencial entre os polos (ou terminais) do gerador.

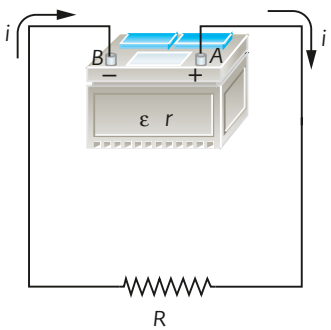


Figura 5.11. A diferença de potencial V_{AB} nos polos da bateria é dada pela expressão $V_{AB} = \varepsilon - ri$, em que r é a resistência interna da bateria e ε, sua f.e.m.

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

No circuito mostrado na **figura 5.11**, a bateria estabelece uma diferença de potencial V_{AB} entre seus polos (o polo positivo A e o polo negativo B), isto é, V_{AB} representa a diferença de potencial que a bateria aplica no circuito externo.

Nessas condições, o gerador transfere ao circuito externo uma potência, cuja expressão é $P = iV_{AB}$.

Algumas pessoas costumam confundir os conceitos de f.e.m. e diferença de potencial, acreditando que a diferença de potencial V_{AB}, existente entre os polos de um gerador, é sempre igual à sua f.e.m., ε. Entretanto, isso não é verdade, como veremos na análise a seguir.

Expressão da diferença de potencial entre os polos de um gerador

As cargas elétricas que passam no interior da bateria, deslocando-se do polo negativo *B* para o polo positivo *A* **(figura 5.11)**, recebem, em virtude da f.e.m. do gerador, uma potência εi.

Entretanto, em consequência da resistência interna, parte dessa potência é dissipada, por efeito Joule, no interior do próprio gerador.

Essa potência dissipada é expressa por ri^2.

Portanto, a potência disponível, que será entregue pelo gerador ao circuito externo, é igual à diferença $\varepsilon i - ri^2$.

Mas a potência transferida ao circuito externo é também dada por iV_{AB}. Então, temos:

$$iV_{AB} = \varepsilon i - ri^2 \quad \therefore \quad V_{AB} = \varepsilon - ri$$

Observando essa expressão, vemos que a diferença de potencial nos polos de um gerador nem sempre é igual ao valor de sua f.e.m.

Na expressão de V_{AB}, o termo ri aparece para explicar a potência dissipada no interior do gerador, o que torna o valor da diferença de potencial **menor** do que sua f.e.m.

Comentários

1) Verifica-se que, nas baterias e pilhas, o valor da f.e.m. é uma característica do aparelho, dependendo apenas dos elementos químicos que entram em sua composição. Uma pilha seca comum, por exemplo, possui uma f.e.m. cujo valor é $\varepsilon = 1{,}5$ V, quer ela esteja nova, quer já tenha sido usada durante um tempo qualquer. Com o uso prolongado, o que se observa é um aumento na resistência interna *r* da pilha ou da bateria. A relação $V_{AB} = \varepsilon - ri$ nos mostra, então, que a diferença de potencial V_{AB} diminui e, portanto, a potência que a pilha ou bateria é capaz de fornecer ao circuito externo também diminui, apesar de sua f.e.m. não se modificar.

2) Se um gerador não estiver fornecendo corrente, isto é, se seus polos não estiverem ligados por um condutor, dizemos que ele está em circuito aberto. Então, sendo $i = 0$, a expressão $V_{AB} = \varepsilon - ri$ nos mostra que, nessa situação, temos:

$$V_{AB} = \varepsilon$$

Portanto, nesse caso particular, a diferença de potencial entre os polos de um gerador é igual ao valor de sua f.e.m.

Uma maneira simples, usada na prática, para se medir a f.e.m. de um gerador, é baseada nesse fato. Quando ligamos apenas um voltímetro diretamente aos terminais de um gerador **(figura 5.12)**, sua leitura nos fornece o valor de V_{AB}. Entretanto, como a resistência do voltímetro é muito grande, a corrente fornecida pelo gerador é praticamente nula. Então, temos $V_{AB} = \varepsilon$, ou seja, a leitura do voltímetro nos fornece diretamente a f.e.m. do gerador.

3) Quando uma pilha ou bateria está nova, sua resistência interna é muito pequena, podendo-se considerar $r = 0$. A expressão $V_{AB} = \varepsilon - ri$ nos mostra que, também nesse caso, temos:

$$V_{AB} = \varepsilon$$

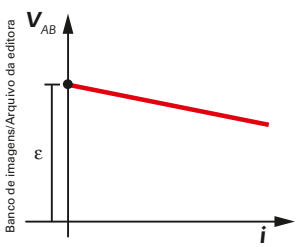
Portanto, uma bateria nova ($r = 0$) mantém constante a diferença de potencial entre seus polos (igual a ε), mesmo que esteja fornecendo correntes muito intensas ao circuito.

4) Após certo tempo de uso, a resistência interna da bateria adquire um valor que não pode mais ser desprezado. Nesse caso, a diferença de potencial V_{AB} entre os polos da bateria será tanto menor quanto maior for a corrente que ela estiver fornecendo ao circuito (conforme se percebe pela relação $V_{AB} = \varepsilon - ri$). O gráfico $V_{AB} \times i$ terá o aspecto mostrado na **figura 5.13**. No exemplo discutido a seguir você encontrará uma análise dessa situação.



João X. de Campos/Arquivo da editora

Figura 5.12. Quando um voltímetro de grande resistência é ligado aos polos de uma bateria, sua leitura V_{AB} é igual à f.e.m. da bateria.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 5.13. Gráfico $V_{AB} \times i$ para uma bateria de resistência interna não desprezível.

Exemplo

Em um laboratório, uma bateria foi ligada a um reostato, como mostra a figura 5.14. Um voltímetro, ligado entre os polos *A* e *B*, fornecia o valor da diferença de potencial V_{AB} entre esses polos e um amperímetro permitia determinar o valor da corrente *i* fornecida pela bateria. Diminuindo-se gradativamente a resistência externa por meio do reostato, o amperímetro acusava um aumento em *i*, enquanto o voltímetro mostrava que V_{AB} diminuía. O gráfico da figura 5.15 apresenta alguns valores de *i* e V_{AB} obtidos dessa maneira. Observe que sua forma é semelhante ao gráfico da figura 5.13, mostrando que V_{AB} diminui linearmente à medida que aumenta a corrente fornecida pela bateria.

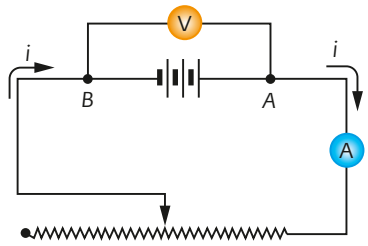


Figura 5.14. Para o exemplo da seção 5.3.

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

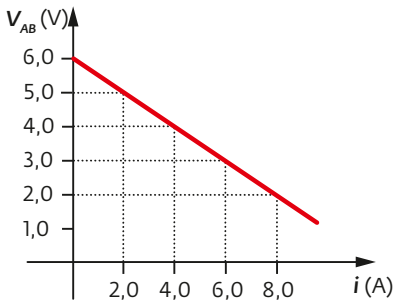


Figura 5.15. Para o exemplo da seção 5.3.

a) Qual é o valor da f.e.m. da bateria?

A f.e.m. ε de uma bateria é igual ao valor da diferença de potencial V_{AB} entre seus polos quando ela não está fornecendo corrente (circuito aberto). Pelo gráfico, vemos que, quando $i = 0$, temos $V_{AB} = 6{,}0\ \text{V}$. Logo, $\varepsilon = 6{,}0\ \text{V}$.

b) Qual é o valor da resistência interna da bateria?

Pelo gráfico vemos, por exemplo, que, quando $i = 8{,}0\ \text{A}$, temos $V_{AB} = 2{,}0\ \text{V}$. Lembrando que $\varepsilon = 6{,}0\ \text{V}$ e substituindo esses valores em $V_{AB} = \varepsilon - ri$, vem:

$$2{,}0 = 6{,}0 - r \cdot 8{,}0 \quad \therefore \quad r = 0{,}50\ \Omega$$

Esse mesmo resultado seria obtido qualquer que fosse o par de valores de *i* e V_{AB} que usássemos na expressão $V_{AB} = \varepsilon - ri$.

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

Não escreva no livro!

11. Uma pilha de lanterna possui uma f.e.m. $\varepsilon = 1{,}5\ \text{V}$ e sua resistência interna vale $r = 0{,}1\ \Omega$.

a) Qual é a diferença de potencial entre os polos dessa pilha quando ela se encontra em circuito aberto? 1,5 V

b) Qual será a diferença de potencial entre os polos dessa pilha se ela fornecer uma corrente de 2,0 A a uma lâmpada? 1,3 V

c) Ligando-se à pilha uma lâmpada de menor resistência, ela passa a fornecer uma corrente de 4,0 A a essa lâmpada. Qual é, nesse caso, a diferença de potencial entre os polos da pilha? 1,1 V

12. a) Usando os valores obtidos no exercício anterior, construa o gráfico da diferença de potencial entre os polos da pilha em função da corrente que ela fornece.

12. a) e **b)** Veja respostas no Manual do Professor.

b) Faça um desenho no caderno mostrando como seria o aspecto do gráfico da questão **a** se a resistência interna da pilha fosse nula.

13. Uma lâmpada ligada a uma pilha apresentava uma certa intensidade luminosa. Verificou-se, com o decorrer do tempo, que a intensidade da lâmpada diminuiu gradualmente. Baseando-se nessa informação, diga se cada uma das seguintes grandezas aumentou, diminuiu ou não se alterou com o decorrer do tempo:

13. d) Diminuiu.

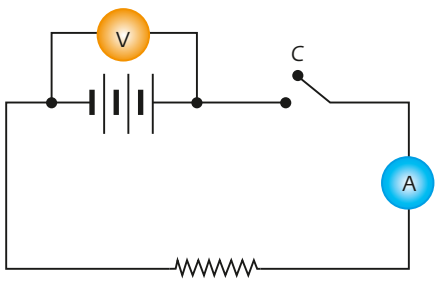
a) A f.e.m. da pilha. Não se alterou.

b) A resistência interna da pilha. Aumentou.

c) A diferença de potencial que a pilha aplicava à lâmpada. Diminuiu.

d) A corrente que a pilha fornecia à lâmpada.

14. No circuito mostrado na figura abaixo, verifica-se que, quando a chave C está aberta, a leitura do voltímetro é 4,5 V.



Ligando-se a chave C, o amperímetro indica 1,5 A e o voltímetro passa a indicar 4,2 V. A partir desses dados, determine:

a) a f.e.m. da bateria; $\varepsilon = 4{,}5\ \text{V}$

b) a resistência interna da bateria. $r = 0{,}2\ \Omega$

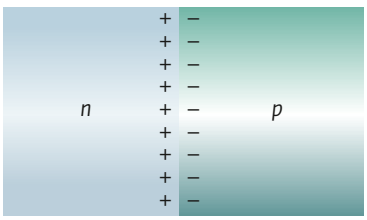
5.4 Os semicondutores e o transistor



Spbphoto/Dreamstime.com/Isuzu Imagens

Figura 5.16. Válvulas eletrônicas utilizadas entre os anos 1930 e 1960.

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



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

Figura 5.17. Junção de um semicondutor de tipo *n* com um de tipo *p*.

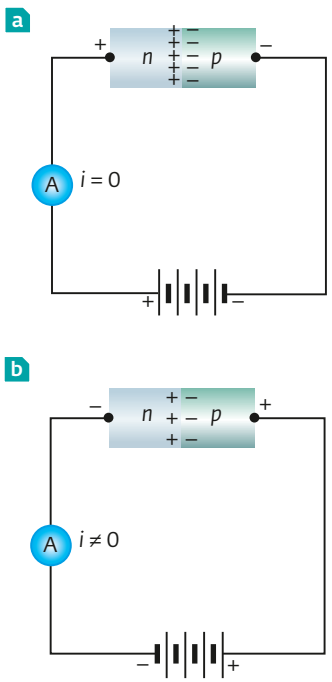


Figura 5.18. No circuito da figura **a** a corrente é nula e, em **b**, há passagem de corrente.

Semicondutores tipos *n* e *p*

As válvulas eletrônicas da **figura 5.16** são dispositivos que foram bastante usados entre os anos 1930 e 1960 para controlar a tensão, por meio de um eletrodo, em rádios, TV e em outros aparelhos elétricos. Elas foram substituídas por dispositivos muito menores, mais econômicos e mais duráveis, construídos com o auxílio de materiais semicondutores.

Um semicondutor é uma substância cuja resistência diminui rapidamente à medida que aumentamos sua temperatura. O silício, como dissemos, é um exemplo típico de material semicondutor.

Os cientistas verificaram que, adicionando a um semicondutor quantidades muito pequenas de certas substâncias (chamadas impurezas), as propriedades elétricas dele sofrem consideráveis modificações. Assim, adicionando-se uma pequena quantidade de arsênio a uma amostra de silício, obtém-se um condutor elétrico semelhante a um metal, isto é, a condução elétrica nessa substância é feita por meio de elétrons livres. Dizemos que um semicondutor como esse é do tipo *n* (condução feita por cargas negativas).

Por outro lado, se uma pequena quantidade de boro é adicionada ao silício puro, verifica-se que ele também conduz eletricidade, mas tudo se passa como se a corrente elétrica fosse constituída pelo movimento de cargas positivas. Por esse motivo, dizemos que o silício dopado com boro é um semicondutor do tipo *p* (condução por cargas positivas).

Junções *n-p* e *p-n* usadas como retificadores

Suponha que um cristal fosse obtido fazendo-se a junção de um semicondutor do tipo *n* com outro do tipo *p*, como representado na **figura 5.17**. É possível verificar que haverá uma troca de cargas elétricas entre eles, fazendo com que, de um lado e de outro da superfície de contato, apareçam cargas positivas e negativas, distribuídas da maneira apresentada na **figura 5.17**.

Ligando-se uma bateria a um cristal *n-p*, de modo que o contato do polo positivo dessa bateria seja feito com o lado *n* e o do polo negativo, com o lado *p*, obtemos o circuito mostrado na **figura 5.18.a**. Ao ser estabelecida essa ligação, observa-se um grande aumento das cargas positivas e negativas da junção. Esse fato impede que a corrente passe através do cristal *n-p* (ele se comporta como se fosse um material de resistência muito elevada) e, consequentemente, não há corrente no circuito.

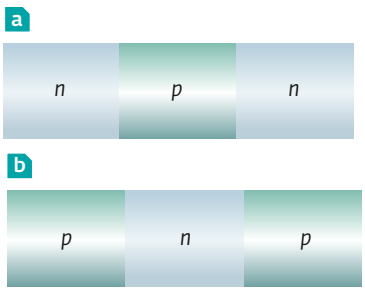
Invertendo-se a polaridade da bateria (o polo positivo ligado ao lado *p* e o negativo, ao lado *n*) haverá uma diminuição considerável das cargas elétricas na junção **(figura 5.18.b)**. Nessas condições, a corrente elétrica pode passar facilmente pelo cristal *n-p* e o amperímetro acusará a existência de uma corrente no circuito.

Essa análise mostra que um cristal de junção *n*-*p* se comporta como uma válvula diodo: deixa a corrente elétrica fluir através dele em um sentido (de *p* para *n*), mas impede a passagem no sentido contrário (de *n* para *p*). Então, um cristal *n*-*p*, do mesmo modo que uma válvula diodo, poderá ser usado como retificador de corrente, isto é, ele é um diodo semicondutor. Em virtude de não necessitarem de aquecimento, os diodos semicondutores são bem mais econômicos do que as válvulas comuns, não provocam aquecimentos inconvenientes dos aparelhos e começam a funcionar prontamente quando são ligados (observe que os aparelhos a válvula, ao serem ligados, somente começam a funcionar depois de um certo tempo, necessário para os filamentos se aquecerem). Além disso, eles apresentam uma série de outras vantagens (custo, tamanho, durabilidade, etc.) que os torna muito mais convenientes do que a válvula de filamento.

O que é um transistor

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

Não são apenas as válvulas diodo que foram substituídas, com grandes vantagens, por dispositivos construídos à base de semicondutores. Também a válvula triodo, usada com o objetivo de amplificar sinais elétricos, está sendo substituída por um cristal constituído por junções de semicondutores. Em 1948, três cientistas americanos descobriram que um cristal de semicondutores apresentando duas junções (como mostra a **figura 5.19**) é capaz de produzir amplificações semelhantes àquelas obtidas com uma válvula triodo. Essas junções podem ser do tipo *n*-*p*-*n* **(figura 5.19.a)** ou *p*-*n*-*p* **(figura 5.19.b)**.



Ilustrações: Banco de imagens/ Arquivo da editora

Figura 5.19. Um transistor pode ser obtido por uma junção ***n*-*p*-*n*** **(a)** ou ***p*-*n*-*p*** **(b)**.

Em qualquer um desses casos, o cristal obtido é denominado transistor, constituindo-se em um dos dispositivos mais empregados nos modernos circuitos eletrônicos. Graças ao grande avanço tecnológico possibilitado pelo transistor, seus inventores receberam o Prêmio Nobel de Física em 1956 **(figura 5.20)**.


Emilio Segrè Visual Archives/American Institute of Physics/SPL/Latinstock

Figura 5.20. Os cientistas americanos W. Shockley, W. Brattain e J. Bardeen em um laboratório (1948).

O uso de cristais retificadores (junção *n*-*p*) e de transistores nos circuitos de rádios, TVs, gravadores, computadores, etc. permitiu uma redução considerável no tamanho e no peso desses aparelhos. Os antigos rádios a válvula, por exemplo, eram muito maiores do que os modernos rádios transistorizados **(figura 5.21)**.

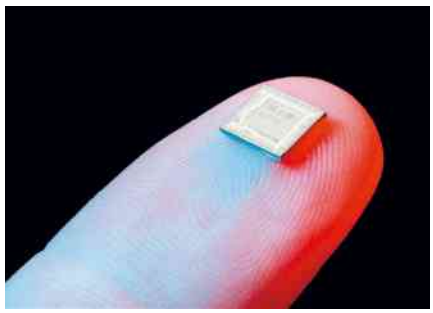
Mesmo com válvulas em miniatura, o máximo que se conseguia ligar em circuitos eletrônicos era 1 elemento por centímetro cúbico. Com o uso dos cristais semicondutores, ligados em um circuito impresso, conseguiu-se colocar uma média de até 3 elementos por centímetro cúbico (nos circuitos impressos, os fios de ligação são substituídos por conexões metálicas impressas em uma chapa isolante, na qual os elementos são soldados).

O avanço da eletrônica fez com que a densidade de elementos ligados em um circuito se tornasse cada vez maior. Atualmente, com o uso dos modernos circuitos integrados (vários elementos, como resistências, transistores, etc., agrupados em uma única peça muito pequena), foi possível atingir a fantástica cifra de 30 000 elementos por centímetro cúbico. Sem esse desenvolvimento tecnológico, que permitiu tal miniaturização dos circuitos eletrônicos, um computador moderno teria dimensões tão exageradas que sua construção seria inviável.



Paulo Cesar Pereira/ Arquivo da editora

Figura 5.21. Os rádios transistorizados **(b)** são muito menores do que os antigos rádios a válvula **(a)**.



Icefront/Dreamstime.com/Isuzu

Figura 5.22. *Microchip* de silício na ponta do dedo de uma pessoa.

O circuito integrado costuma ser designado, na linguagem dos técnicos em eletrônica, pelo termo *chip*, palavra de origem inglesa que significa "pequena lasca". Essa denominação tem sua origem na maneira pela qual se obtém um *chip*: uma pequena placa (lasca) é cortada de um cristal de silício e mínimas quantidades de impurezas são colocadas em determinadas posições dessa placa. Essas impurezas são dispostas de maneira que deem origem a diodos, transistores, resistores e, até mesmo, capacitores e indutores (componentes do circuito, que serão analisados posteriormente). Assim, os componentes tradicionais dos circuitos são substituídos por seus equivalentes criados na própria placa do *chip*, tornando possível a miniaturização dos circuitos eletrônicos. Um *chip* de apenas 1 cm de lado pode conter centenas de milhares de transistores e seu custo é praticamente igual ao de um único transistor isolado **(figura 5.22)**.

PRATIQUE FÍSICA

EM EQUIPE

Não escreva no livro!

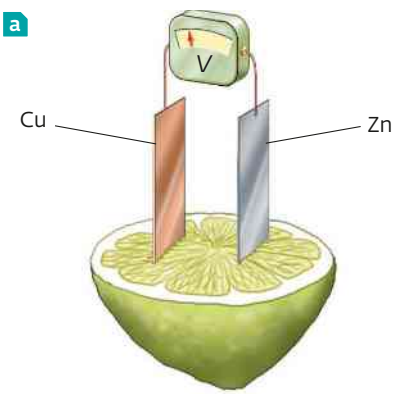
As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

O primeiro dispositivo com o qual se conseguiu obter uma corrente elétrica de duração apreciável foi a pilha de Volta, inventada, em 1800, pelo cientista italiano Alessandro Volta. Essa pilha era constituída por duas placas, uma de zinco e outra de cobre, separadas por tecido embebido em uma solução de ácido sulfúrico.

Nesta experiência, vamos construir algumas pilhas semelhantes à de Volta, mas usaremos outras substâncias em lugar do ácido sulfúrico, uma vez que esse ácido exige certo cuidado em seu manuseio.

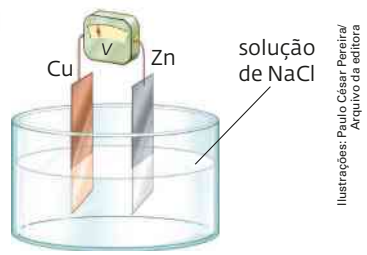
1º) Para verificar que a f.e.m. da pilha depende da solução na qual as placas estão mergulhadas, introduza as placas de cobre e zinco em um limão, como mostra a figura **a** abaixo. Usando um voltímetro, meça e anote a f.e.m. dessa pilha.

a



2º) Em seguida, introduza as placas de cobre e zinco em uma solução de sal de cozinha (NaCl), como mostra a figura **b**. Meça, com o voltímetro, a f.e.m. dessa pilha e verifique se ela, de fato, é diferente da f.e.m. obtida no 1º item.

b



Ilustrações: Paulo César Pereira/Arquivo da editora

3º) Verifique, agora, que a f.e.m. depende também do material que constitui cada placa. Para isso, substitua a placa de zinco por uma de ferro (na solução de NaCl) e meça a f.e.m. dessa nova pilha. Compare com os resultados anteriores.

4º) Você pode construir uma bateria, semelhante àquela feita por Volta, empilhando pequenos discos de ferro (arruelas, por exemplo) e cobre, separados por um papel poroso embebido em água com sal de cozinha (solução de NaCl). Esse empilhamento deve ser feito na ordem indicada na figura **c** desta experiência. Usando um voltímetro, meça a f.e.m. de cada elemento (ferro, papel e cobre) e também a f.e.m. do conjunto que constitui a bateria.

5º) Agora que você já fez uma bateria ligada em série, tente ligar um relógio digital, desses que funcionam com uma pilha de 1,5 V apenas, utilizando as placas de zinco e de cobre e um limão. Quantos limões foram necessários para que o relógio funcionasse?

c



1. Em uma pequena lanterna é usada uma pilha de f.e.m. 1,5 V, que fornece à lâmpada uma corrente constante de 200 mA.

Supondo que a lâmpada permaneça acesa durante 5,0 horas, determine:

a) a potência que a pilha transfere às cargas que passam em seu interior; $P = 0{,}30\ W$

b) a energia química da pilha que se transforma em energia elétrica durante esse tempo. $T = 5{,}4 \cdot 10^3\ J$

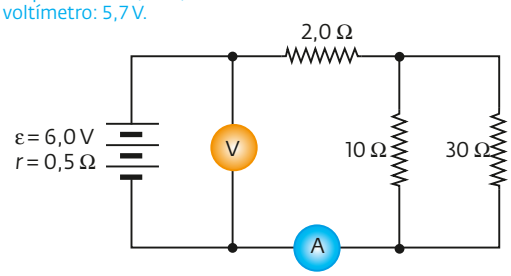
2. Uma pessoa possui duas pilhas secas comuns, uma pequena e uma grande. Os elementos empregados na construção dessas pilhas, como você sabe, são os mesmos.

a) A f.e.m. da pilha grande é maior, menor ou igual à da pilha pequena? Igual.

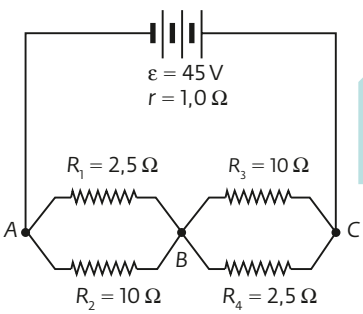
b) Ligando-se uma lâmpada à pilha grande, o brilho que ela apresentará será maior, menor ou igual ao que ela apresenta quando é ligada à pilha pequena? (Considere desprezíveis as resistências internas das pilhas.) Igual.

c) Qual das duas pilhas será capaz de manter a lâmpada brilhando durante mais tempo? A pilha grande.

3. Considerando os dados apresentados na figura, determine as leituras do amperímetro e do voltímetro mostrados.
Amperímetro: 0,60 A;
voltímetro: 5,7 V.



4. As afirmativas seguintes estão relacionadas com o circuito apresentado na figura abaixo.



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

Indique aquelas que estão corretas. Todas estão corretas.

a) A resistência equivalente do circuito externo é 4,0 Ω.

b) A corrente que passa pela bateria vale 9,0 A.

c) A diferença de potencial V_{AB} é igual à diferença de potencial V_{BC}.

d) A corrente em R_1 é igual à corrente em R_4.

e) A corrente em R_1 é quatro vezes a corrente em R_3.

5. (Uece) Uma pilha de f.e.m. igual a 3,6 V tem uma carga inicial de 600 mAh. Supondo que a diferença de potencial entre os polos da pilha permaneça constante até que a pilha esteja completamente descarregada, o tempo (em horas) que ela poderá fornecer energia à taxa constante de 1,8 W é de: b

a) 2,4. b) 1,2. c) 3,6. d) 7,2.

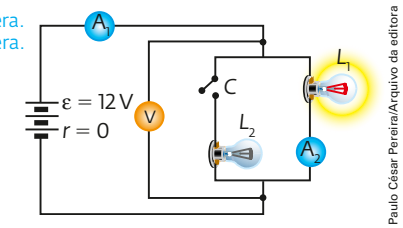
6. Observe com atenção o circuito apresentado na figura. Ligando-se a chave C para acender a lâmpada L_2, responda:

a) A leitura de V aumenta, diminui ou não se altera?

b) A leitura de A_2 aumenta, diminui ou não se altera?

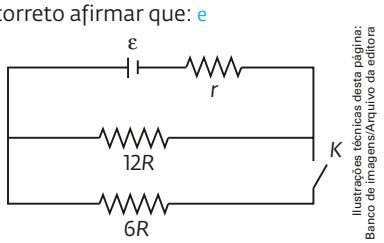
c) A leitura de A_1 aumenta, diminui ou não se altera?

a) Não se altera.
b) Não se altera.
c) Aumenta.



Paulo César Pereira/Arquivo da editora

7. (UFMS) O circuito a seguir apresenta um gerador de força eletromotriz ε e resistência interna *r*, associado a dois resistores de resistências 12*R* e 6*R*, controlados por uma chave *K*. É correto afirmar que: e



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

a) a resistência elétrica do circuito será igual a $6R + r$, com a chave *K* aberta.

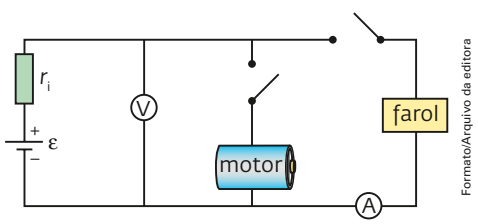
b) a resistência elétrica do circuito será igual a $2R + r$, com a chave *K* fechada.

c) a máxima intensidade de corrente no circuito será igual a $\varepsilon/6r$.

d) a intensidade de corrente na chave *K* fechada será igual a $\varepsilon/(4R + r)$.

e) a potência dissipada na associação das resistências 12*R* e 6*R* será máxima se $R = r/4$, com a chave *K* fechada.

8. (ITA-SP) Quando se acendem os faróis de um carro cuja bateria possui resistência interna $r(i) = 0{,}050\ \Omega$, um amperímetro indica uma corrente de 10 A e um voltímetro, uma voltagem de 12 V. Considere desprezível a resistência interna do amperímetro. Ao ligar o motor de arranque, observa-se que a leitura do amperímetro é de 8,0 A e que as luzes diminuem um pouco de intensidade. Calcule a corrente que passa pelo motor de arranque quando os faróis estão acesos. 50 A



Formato/Arquivo da editora

INTEGRANDO A PILHA DE DANIELL E O GERADOR

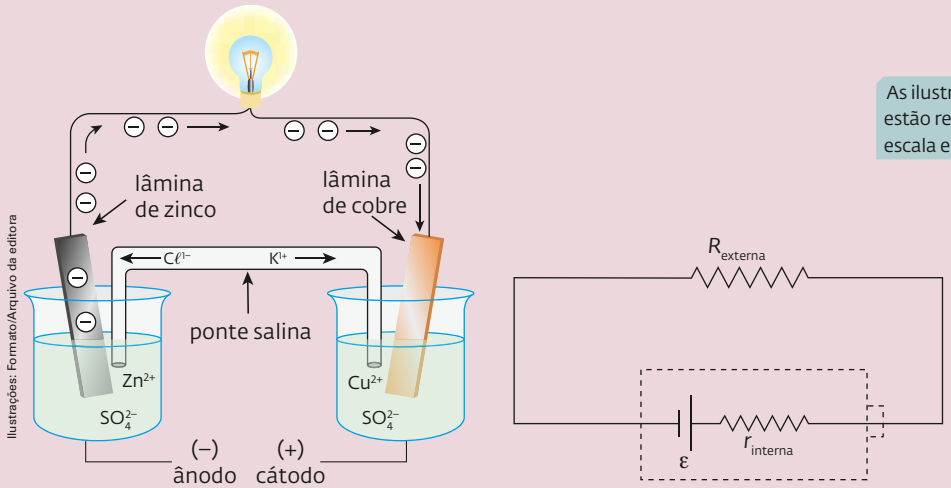
As pilhas são estudadas nas aulas de Física como exemplo de gerador de força eletromotriz. Elas também aparecem nas aulas de Química, durante o estudo da Eletroquímica. Você já parou para pensar nas diferenças e semelhanças entre elas? Na realidade, trata-se da mesma pilha, mas a diferença está na abordagem que cada ciência usa para descrever o mesmo fenômeno.

Para entender como podemos relacionar essas duas abordagens, vamos comparar o modelo de gerador descrito neste capítulo com o modelo de pilha de Daniell visto nas aulas de Química. Para essa comparação, usaremos a pilha de Daniell com os eletrodos de cobre e zinco.

Na **figura 5.23**, a pilha de Daniell, à esquerda, é formada pelas soluções e pela ponte salina, que corresponde, à direita, à região delimitada pelo pontilhado. Os fios e a lâmpada são externos à pilha e, na figura da direita, correspondem aos fios e à resistência externa que o gerador alimenta.

Vimos que gerador de força eletromotriz é qualquer dispositivo que transforma energia não elétrica em energia elétrica. A pilha de Daniell é um gerador desse tipo, já que, em seu interior, energia química (não elétrica) é transformada em energia elétrica. Isso explica por que as pilhas aparecem nas duas disciplinas: em Química a ênfase é dada às reações de oxirredução que liberam energia; em Física, nos preocupamos em entender e quantificar as diferenças de potencial e corrente associadas a essa energia.

Vejamos a seguir algumas relações entre essas abordagens.



Ilustrações: Formato/Arquivo da editora

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

Figura 5.23. Pilha de Daniell com eletrodos de cobre e zinco acendendo uma lâmpada e um gerador alimentando um resistor externo.

A pilha de Daniell zinco-cobre e o gerador de força eletromotriz

	Abordagem na Química	Abordagem na Física
Corrente elétrica (*i*)	– Movimento dos elétrons originados a partir das reações abaixo. $Zn^0 \rightarrow Zn^{2+} + \boxed{2\,e^{2+}}$ (ânodo) $\boxed{2\,e^{2+}} + Cu^{2+} \rightarrow Cu^0$ (cátodo)	– Movimento dos portadores de carga elétrica.
Diferença de potencial (*U*)	– Tem o mesmo valor da força eletromotriz (ε).	– Diferença entre o potencial elétrico do polo positivo e do polo negativo. – Pode ser calculado como: $U = \varepsilon - r \cdot i$

A pilha de Daniell zinco-cobre e o gerador de força eletromotriz

	Abordagem na Química	Abordagem na Física
Força eletromotriz (ε)	– Depende dos metais, da concentração das soluções e da temperatura. – Diminui em função do tempo de uso. – Medida experimental indireta.	– Valor teórico que coincide com o valor da diferença de potencial estabelecida entre os polos da pilha quando não existe passagem de corrente elétrica ($i = 0$): $U = \varepsilon - r \cdot i \Rightarrow U = \varepsilon - r \cdot 0 \Rightarrow U = \varepsilon$
Resistência interna (r)	– Não é levada em consideração.	– Grandeza que expressa oposição da passagem da corrente elétrica pelo interior da pilha.

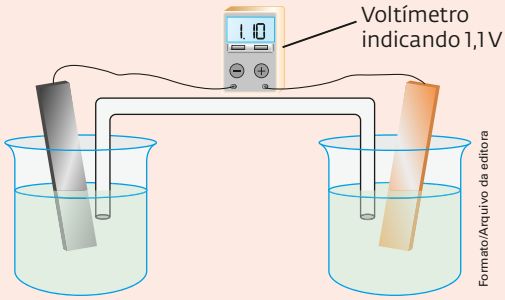


Figura 5.24. O valor indicado pelo voltímetro é de 1,1 V (soma dos potenciais-padrão do zinco e do cobre). Representação sem escala e em cores fantasia.

Mas será que o valor da força eletromotriz obtido experimentalmente é numericamente igual ao obtido aplicando as fórmulas deduzidas em Física?

Definimos a força eletromotriz como a razão entre o trabalho realizado pela pilha por unidade de carga elétrica que ela transporta entre seus polos: $\varepsilon = \frac{\mathcal{T}}{\Delta q}$. Portanto, se uma pilha apresenta força eletromotriz de 9 V, por exemplo, isso quer dizer que cada 1 C de carga elétrica, que é transportada do polo negativo para o positivo, teria sua energia aumentada em 9 J.

Mas por que "teria" em vez de "tem"?

Porque quando a carga elétrica é de fato transportada entre os polos da pilha, ela "perde" parte dessa energia em razão da resistência que o próprio material da pilha oferece à sua passagem (resistência interna). Essa energia "perdida" é, na realidade, transformada em energia térmica pelo efeito Joule (por isso a pilha esquenta durante o uso) e é então dissipada na forma de calor.

Quando a força eletromotriz é obtida experimentalmente **(figura 5.24)**, existe carga elétrica se movimentando e perdendo energia no interior da pilha, pois a corrente elétrica não é nula. Desse modo, a diferença de potencial medida pelo voltímetro é um pouco menor do que a força eletromotriz da abordagem da Física. Matematicamente, essa perda é expressa pelo produto ri da equação $U = \varepsilon - r \cdot i$.

No estudo da pilha feito com a abordagem química, a resistência interna é desprezada. Sendo assim, essa abordagem considera que, no caso da pilha de Daniell visto acima, o valor de 1,1 J é o máximo que 1 C de carga elétrica pode ganhar de energia ao ser transportada entre os polos. É curioso notar, portanto, que, utilizando os cálculos que vimos em Física, a força eletromotriz da pilha zinco-cobre seria ligeiramente superior a 1,1 V. Cada 1 C de carga elétrica que transita no interior da pilha de zinco-cobre, em princípio, poderia receber um pouco mais do que 1,1 J de energia.

Pesquise e responda

Os valores encontrados na internet para resistência interna variam de 0,1 a 0,5 Ω. Assumindo $r = 0,5\ \Omega$, o termo $r \cdot i$ teria valor de $0,5 \cdot 50,005\ \Omega$.

Pesquise na internet valores típicos para a resistência interna de pilhas comuns ou de pilhas alcalinas comerciais. Supondo que a corrente elétrica que circula no interior dessas pilhas seja aproximadamente 10^{-2} A, calcule o produto ri e compare ao valor da indicação da força eletromotriz na pilha. Decida se seria válido dizer que, nessa situação, $U \cdot \varepsilon$.

Veja no próximo *Integrando...*

Como o campo magnético terrestre auxilia a orientação espacial de alguns seres vivos.

INFOGRÁFICO

Veja respostas no Manual do Professor.

O infográfico desta unidade apresenta as principais informações sobre como funciona o computador. Antes de responder às questões, faça a leitura deste infográfico observando como os textos e as imagens se relacionam e permitem a compreensão de algumas informações referentes aos tópicos abordados nesta unidade.

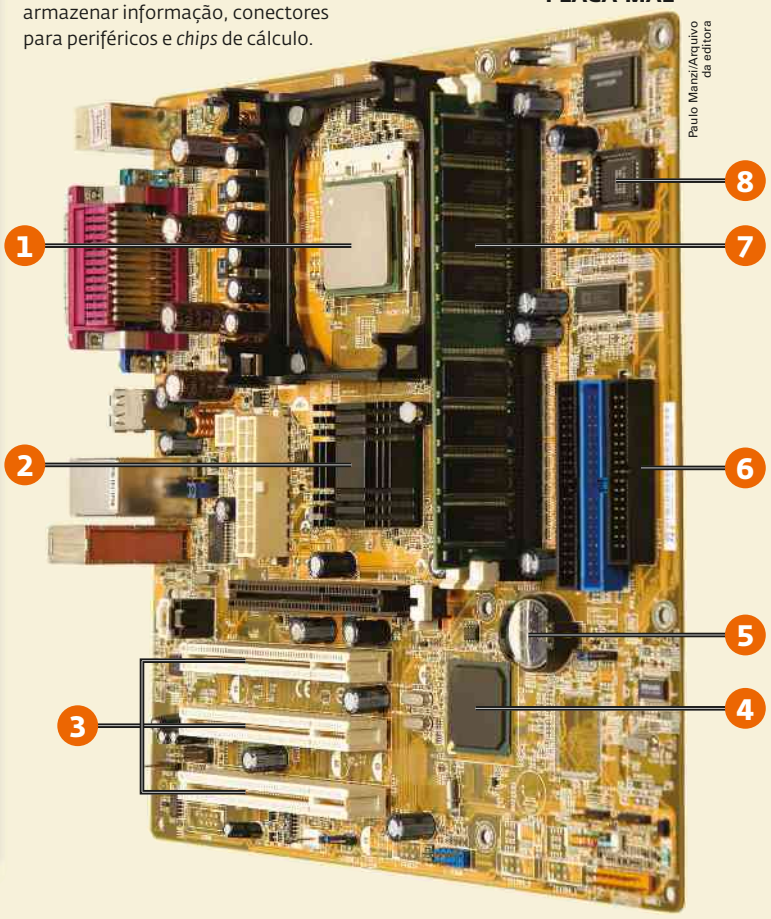
1. A placa-mãe é uma placa de circuito impresso que tem como finalidade básica a conexão dos componentes de um computador. Cite alguns componentes que fazem parte da placa-mãe de um computador e sua respectiva finalidade.
2. Que unidade do computador é responsável pelo armazenamento de dados e informações, além de conter o sistema operacional (*software* indispensável para o correto funcionamento do computador)?
3. Qual é a função do processador no computador?
4. Qual é o papel da memória RAM no computador?
5. Quais são os dispositivos que permitem a entrada de dados no computador?
6. De que modo os dispositivos externos, como impressoras, teclado, *mouse* e monitor, são ligados a um computador?
7. Os componentes internos, as placas e a fonte de energia são dispositivos eletroeletrônicos que ficam acondicionados no interior do gabinete. Enquanto um computador está funcionando, é possível sentir a ventoinha em funcionamento. Explique qual é a função desse dispositivo.

COMO FUNCIONA O COMPUTADOR?

NÃO É MAGIA, É TECNOLOGIA

Caixa tem dispositivos para armazenar informação, conectores para periféricos e *chips* de cálculo.

PLACA-MÃE



Paulo Manzi/Arquivo da editora

1 PROCESSADOR

Também conhecido como CPU (*central processing unit* ou unidade central de processamento), este *chip* de silício é o "cérebro" do computador: ele faz cálculos e determina a capacidade de processamento e os programas que a máquina é capaz de executar.

2 *CHIPSET NORTHBRIDGE*

Este componente liga o processador ao resto do micro. É formado por dois *chips*. Este aqui, o *northbridge*, controla a velocidade com que o processador se comunica com os outros componentes. É um trabalho pesado, por isso, o *northbridge* aquece muito e precisa de um dissipador de calor.

3 BARRAMENTOS DE EXPANSÃO

São componentes que permitem a interligação entre a placa-mãe e as placas de vídeo, som, escâner e *fax modem*. A quantidade de informação que eles transmitem é proporcional à quantidade de pinos.

4 *CHIPSET SOUTHBRIDGE*

Segunda parte da conexão entre o processador e os outros componentes, o *southbridge* controla as ligações com os chamados "dispositivos de entrada ou saída": HD, *driver* de CD-ROM, *driver* de DVD-ROM, teclado, *mouse*, portas seriais e saídas paralelas.

5 BATERIA DO BIOS

Esta fonte de energia é exclusiva do bios. É ela que mantém a configuração do programa com todos os dados necessários para inicializar o computador corretamente, inclusive a hora e a data.

6 ENTRADAS DE HD, DVD E USB

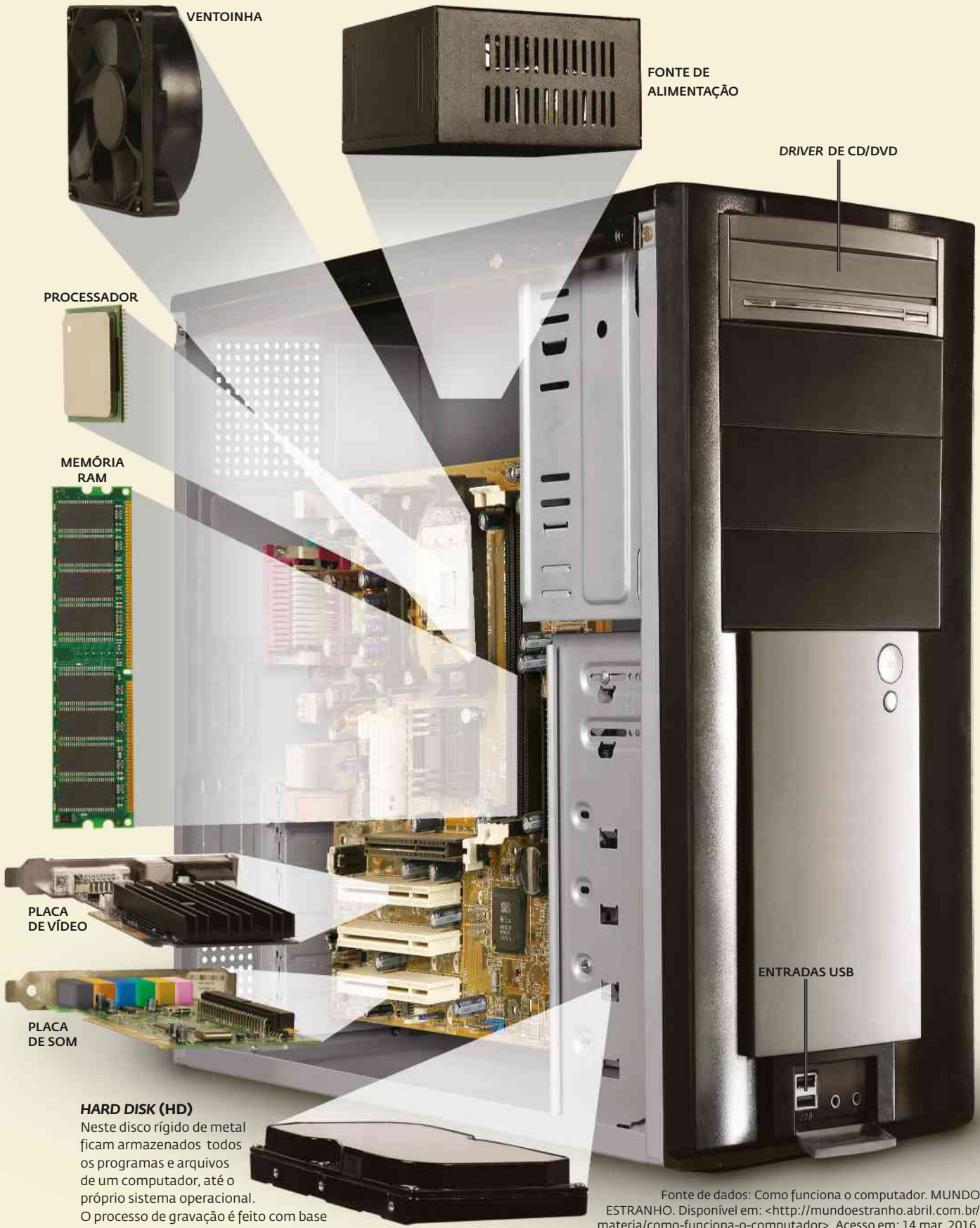
São conectores cheios de pinos onde se encaixam os cabos que ligam o HD e os *drivers* de CD e DVD à placa-mãe.

7 MEMÓRIA RAM

Armazena os dados mais acessados, dando rapidez às operações. Por exemplo, quando entramos em algum programa ao ligar o micro, o processador "puxa" o programa do HD para a memória RAM. Da segunda vez que entramos no programa, o acesso é muito mais rápido, pois ele já está na RAM, e lá fica até o desligamento, quando a RAM é apagada.

8 BIOS

Gravado em uma memória permanente, o *basic input-output system* (sistema básico de entrada e saída) é o programa que inicializa o computador, checando se está tudo em ordem com o HD, com a memória RAM, o vídeo, etc. O "bip" na hora de ligar é o bios informando que a máquina está em boas condições.



Paulo Manzi/Arquivo da editora

***HARD DISK* (HD)**
Neste disco rígido de metal ficam armazenados todos os programas e arquivos de um computador, até o próprio sistema operacional. O processo de gravação é feito com base em alterações do campo magnético gerado por microímãs que revestem o HD.

Fonte de dados: Como funciona o computador. MUNDO ESTRANHO. Disponível em: <http://mundoestranho.abril.com.br/materia/como-funciona-o-computador>. Acesso em: 14 mar. 2016.

UNIDADE

3 Eletromagnetismo

Conhece-se por Eletromagnetismo a relação mútua existente entre os efeitos elétricos e magnéticos. A aplicação tecnológica dos conhecimentos dessa área é muito ampla, desde aplicações diretas na vida das pessoas, como na medicina (por exemplo, no diagnóstico de doenças através de exames de ressonância magnética) e em tratamentos que utilizam técnicas de Estimulação Magnética Transcraniana (EMT ou TMS), até aplicações indiretas, como nos mais complexos sistemas de aceleradores de partículas e usinas hidrelétricas.

Nas ramificações da informática e telefonia móvel, o Eletromagnetismo também está presente, seja no sistema de gravação de dados no disco rígido ou na memória dos *chips*, seja nas comunicações entre aparelhos via *bluetooth*, infravermelho ou *wi-fi*.

CAPÍTULO 6
O campo magnético

CAPÍTULO 7
Alterações no campo magnético

CAPÍTULO 8
Indução eletromagnética – Ondas eletromagnéticas



A EMT é uma técnica de tratamento que estimula a atividade elétrica no cérebro por meio de um campo magnético. É indicada para tratamentos de diversas doenças, entre elas depressão, reabilitação do Acidente Vascular Cerebral (AVC), ansiedade e doença de Parkinson. Concepção artística.



agsandrew/iStock/Getty Images



Rafael Ben-Ari/Alamy/Latinstock

O *Shangai Maglev Transrapid* opera em Xangai, China. Sua velocidade máxima comercial pode alcançar 431 km/h. Fotografia de 2015.

CAPÍTULO 6

O campo magnético

Muitas vezes o conhecimento científico é tão extraordinário que se confunde com o universo da ficção científica e da fantasia. Um exemplo é a levitação.

Sem entrar em detalhes sobre como os mágicos realizam seus truques de levitação, fisicamente é possível fazer um objeto levitar. Para isso é necessário empregar conhecimentos de um ramo da Física: o Eletromagnetismo. O Maglev é um trem que levita por meio de campos magnéticos.

Por se manter afastado do chão a uma distância de aproximadamente 10 cm, o Maglev tem o ar como único agente dissipador de energia. Isso faz com que ele atinja altas velocidades com baixo consumo de energia. Sua propulsão se dá através de forças de atração e repulsão magnéticas, o que minimiza o impacto ambiental comparado aos outros tipos de transporte coletivo.

PARA INICIAR A CONVERSA

Alguns países utilizam o Maglev em seu sistema viário. Enumere algumas vantagens de possuir esse meio de transporte, do ponto de vista tecnológico e ambiental.

O Maglev levita sobre os trilhos. Como é possível explicar essa levitação por meio dos conceitos magnéticos?

Se houver queda de energia elétrica, o Maglev funcionará?

P Baixo consumo de energia e ausência de emissão de gases poluentes; geração de emprego com mão de obra especializada, baixo custo de manutenção, uso de energia renovável, exploração do turismo, entre outros.

P Por repulsão de polos magnéticos idênticos ou atração de polos magnéticos opostos.

P Não.

6.1 Magnetismo

As primeiras observações de fenômenos magnéticos são muito antigas. Acredita-se que essas observações foram realizadas pelos gregos, em uma região da Ásia Menor denominada Magnésia. Eles verificaram que nessa região existia um tipo de pedra capaz de atrair pedaços de ferro. Sabe-se atualmente que essas pedras, denominadas **ímãs naturais**, são constituídas por certo óxido de ferro.

O termo "magnetismo" foi usado para designar o estudo das propriedades desses ímãs, por causa do local onde foram descobertos.

A propriedade magnética de atrair pedaços de ferro foi mencionada pelos gregos Tales de Mileto, Platão, Sócrates, entre outros. Os fenômenos magnéticos sempre foram confundidos com os fenômenos elétricos, por seus efeitos semelhantes. O primeiro a diferenciá-los foi Girolano Cardano (1501-1576), que estudou as propriedades magnéticas de atração e repulsão do âmbar **(figura 6.1)**.



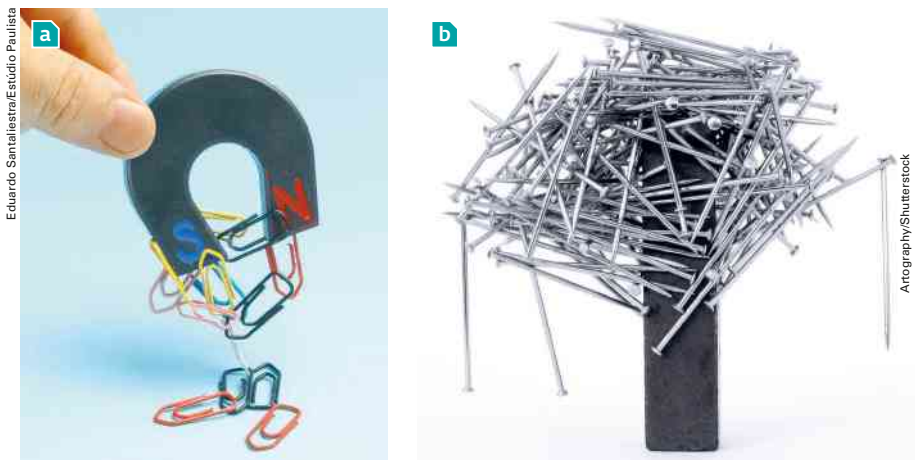
© Universal Images Group North America LLC/Alamy/Latinstock

Figura 6.1. Rocha típica de âmbar da região báltica, na Europa. Tales de Mileto atribuía as propriedades dessa rocha ao fato de ela ter "alma".

Observou-se que um pedaço de ferro, colocado nas proximidades de um ímã natural, adquiria as mesmas propriedades desse ímã. Assim, foi possível obter ímãs não naturais (ímãs artificiais) de várias formas e tamanhos utilizando pedaços de ferro de formas e tamanhos variados **(figura 6.2)**.

As imagens desta página estão representadas fora de proporção.

Com o decorrer do tempo, várias outras propriedades dos ímãs foram sendo descobertas, algumas das quais descreveremos a seguir.



Eduardo Santaliestra/Estúdio Paulista

Artography/Shutterstock

Figura 6.2. Independentemente do seu formato, se em formato de U (**a**) ou formato de barra (**b**), todo ímã possui dois polos: norte e sul.

Polos de um ímã

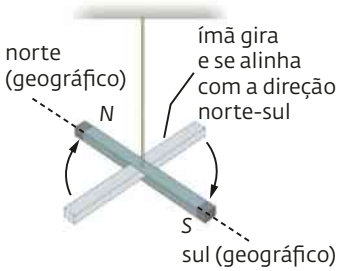


Figura 6.3. Um ímã (ou agulha magnética) suspenso orienta-se na direção norte-sul.



StockPhotosArt/Alamy/Latinstock

Figura 6.4. As bússolas possuem uma agulha magnética que também se orienta na direção norte-sul.

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

Verificou-se que os pedaços de ferro eram atraídos com maior intensidade por certas partes do ímã, as quais foram denominadas **polos do ímã**. Se tomarmos, por exemplo, um ímã em forma de barra e aproximarmos pregos ou pequenos pedaços de ferro dele, notaremos que esses objetos se acumularão nas extremidades da barra **(figura 6.2.b)**, isto é, eles serão atraídos com maior intensidade para essas extremidades. Portanto, um ímã em forma de barra possui dois polos, situados em suas extremidades.

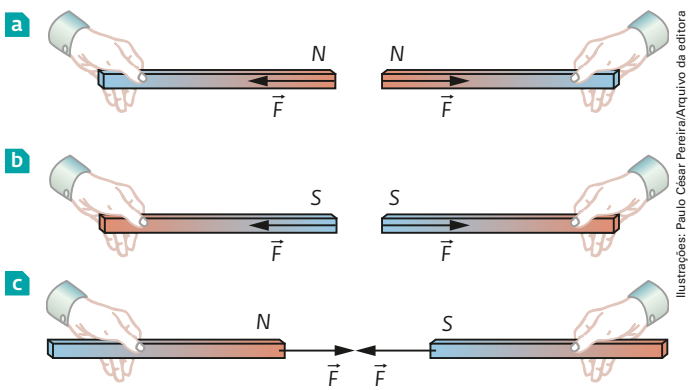
Suspendendo-se um ímã em forma de barra de modo que ele possa girar livremente em torno de seu centro, observa-se que ele se orienta sempre ao longo de uma mesma direção **(figura.6.3)**. Tal direção coincide aproximadamente com a direção norte-sul da Terra. Essa propriedade dos ímãs foi utilizada na construção das bússolas magnéticas **(figura 6.4)**, as quais tornaram possível a realização de viagens marítimas desde tempos remotos. Esses instrumentos continuam sendo amplamente empregados até os dias atuais.

Os polos de um ímã recebem as denominações de "polo norte magnético" e "polo sul magnético" de acordo com a seguinte convenção:

Polo norte de um ímã é aquela extremidade que, quando o ímã pode girar livremente, aponta para o norte geográfico da Terra. A extremidade que aponta para o sul geográfico da Terra é o polo sul do ímã (figura 6.3).

Se tentarmos aproximar o polo norte de um ímã do polo norte de outro ímã, notaremos que há uma força magnética de repulsão entre esses polos **(figura 6.5.a)**. Do mesmo modo, há uma força de repulsão entre os polos sul de dois ímãs **(figura 6.5.b)**. Por outro lado, se aproximarmos o polo norte de um ímã e o polo sul de outro, veremos que há uma força de atração magnética **(figura 6.5.c)**. Em resumo:

Polos magnéticos iguais se repelem e polos magnéticos diferentes se atraem.



Ilustrações: Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura 6.5. Polos magnéticos iguais se repelem e polos magnéticos diferentes se atraem.

A Terra é um grande ímã

Durante muitos anos, vários filósofos e cientistas tentaram encontrar uma explicação para o fato de a agulha magnética de uma bússola se orientar na direção norte-sul da Terra. Entretanto, a explicação que hoje conhecemos só veio a ser formulada no século XVII, por William Gilbert, cientista cujos trabalhos no campo da Eletricidade já nos

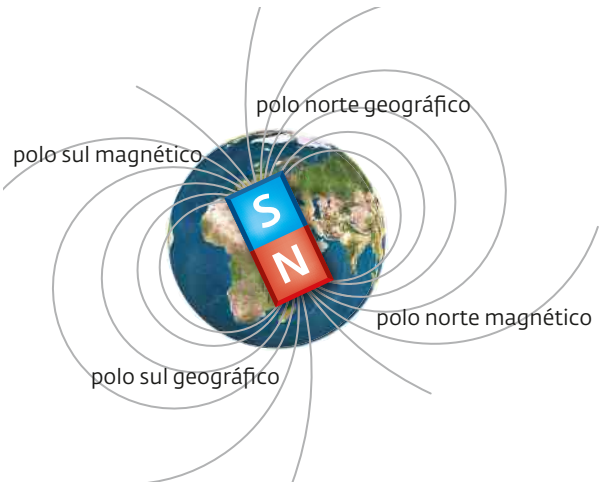
referimos no Capítulo 1. Em sua obra, denominada *De magnete, magneticisque corporibus et de magno magnete tellure* (Sobre os ímãs, os corpos magnéticos e o grande ímã terrestre) e publicada em 1600, Gilbert descreve um grande número de propriedades dos ímãs, observadas experimentalmente por ele, e formula hipóteses procurando explicar essas propriedades.

Uma das principais ideias que ele apresenta em sua obra é a de que a orientação de uma agulha magnética se deve ao fato de a Terra se comportar como um grande ímã. Com base em seus estudos, convencionou-se que a extremidade da agulha magnética da bússola que é atraída para o norte geográfico da Terra seria chamada de *polo norte da bússola*, enquanto sua outra extremidade, que é atraída para o sul geográfico da Terra, seria chamada de *polo sul da bússola*. Mas a atração magnética se dá por polos opostos, portanto a convenção acima se torna correta somente se o polo norte magnético da Terra estiver localizado em seu polo sul geográfico, pois é para essa direção que aponta o polo sul da bússola. Resumindo:

No polo sul geográfico da Terra encontra-se seu polo norte magnético e vice-versa.

No entanto, como pode ser observado na **figura 6.6**, as posições dos polos geográficos e magnéticos não são exatamente coincidentes, o que acaba determinando uma ligeira inclinação entre as direções norte-sul geográfica e norte-sul magnética da Terra.

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



Alex Argozino/Arquivo da editora

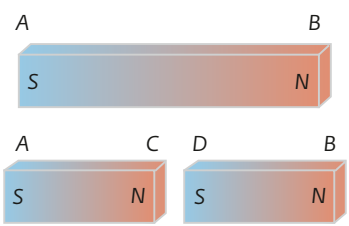
Figura 6.6. O norte geográfico da Terra é um polo sul magnético, e o sul geográfico da Terra é um polo norte magnético.

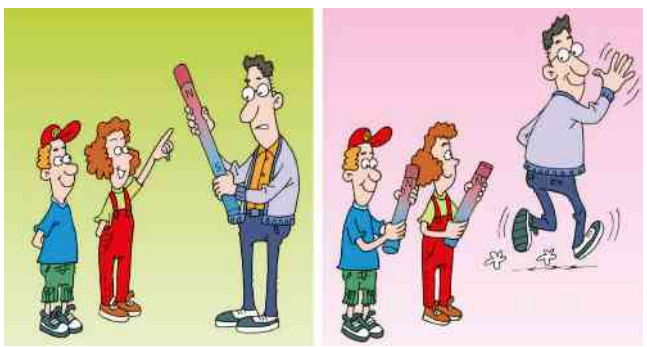
Inseparabilidade dos polos

Outra propriedade interessante dos ímãs consiste na inseparabilidade de seus polos. Verificou-se experimentalmente que não se consegue obter um polo magnético isolado, ou seja, qualquer ímã apresenta sempre, no mínimo, dois polos.

Se tomarmos um ímã em forma de barra, como o ímã *AB* da **figura 6.7**, e o partirmos em dois pedaços, obteremos dois novos ímãs, como mostra a figura. Observe que as extremidades *A* e *B* continuam a se comportar como um polo sul e um polo norte, respectivamente. Na região em que o ímã foi cortado, aparecerão dois novos polos: em *C* um polo norte (originando um ímã *AC*) e em *D* um polo sul (originando um ímã *DB*).

Apesar de não haver experimentos que comprovem a existência de monopólios magnéticos, desde 1931, quando Dirac, um físico de renome da época, propôs sua existência teórica, há cientistas que buscam monopólios magnéticos.





Ilustrações: João X. de Campos/Arquivo da editora

Figura 6.7. Quando partimos ao meio um ímã em barra, obtemos dois novos ímãs, ambos com polos norte e sul.

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

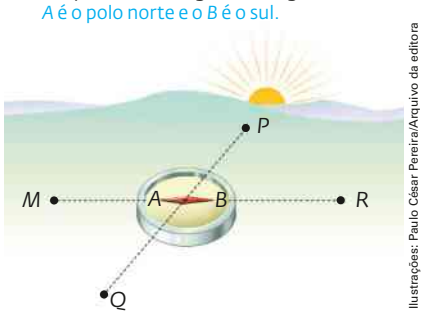
Não escreva no livro!

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

1. Sabendo que o Sol mostrado na figura deste exercício está nascendo, responda:

a) Entre os pontos *M*, *P*, *Q* e *R*, qual indica o sentido do norte geográfico? *M*

b) Observe os pontos *A* e *B* indicados na bússola e diga qual deles é o polo norte e qual é o polo sul da agulha magnética.
A é o polo norte e o *B* é o sul.

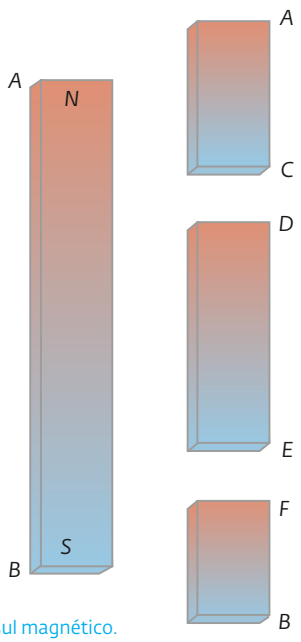


Ilustrações: Paulo César Pereira/Arquivo da editora

2. Suponha que você possua alguns ímãs nos quais assinalou quatro polos com as letras *A*, *B*, *C* e *D*. Você verifica que:
– o polo *A* repele o polo *B*;
– o polo *A* atrai o polo *C*;
– o polo *C* repele o polo *D*.
Sabendo que o polo *D* é um polo norte, você pode concluir que *B* é um polo norte ou um polo sul? Polo sul.

3. Um ímã *AB* é partido em três pedaços (figura a seguir), originando os ímãs *AC*, *DE* e *FB*.
Indique, no caderno, em uma cópia da figura deste exercício, o nome (norte ou sul) de cada um dos polos *A*, *C*, *D*, *E*, *F* e *B* assim obtidos.

3. *A*: norte; *C*: sul; *D*: norte; *E*: sul; *F*: norte; *B*: sul.



4. b) Polo sul magnético.

4. a) O polo norte de uma agulha magnética é atraído ou repelido pelo polo norte geográfico da Terra? Atraído.

b) Então, o polo norte geográfico da Terra é um polo norte ou um polo sul magnético?

5. Uma bússola está apoiada sobre uma mesa horizontal. Na posição em que se encontra, ela é atravessada pela linha do equador. Qual o valor aproximado do ângulo formado entre o ponteiro da bússola e a linha do equador? Aproximadamente 90°.

6.2 Eletromagnetismo

O Magnetismo foi se desenvolvendo com o estudo das propriedades dos ímãs, algumas das quais já descrevemos na seção anterior. Não se suspeitava, no entanto, que pudesse existir qualquer relação entre os fenômenos magnéticos e os fenômenos elétricos. Em outras palavras, o Magnetismo e a Eletricidade eram considerados dois ramos da Física totalmente independentes e distintos um do outro.

Um dos motivos para considerá-los fenômenos distintos devia-se ao fato de, apesar de os fenômenos magnéticos também apresentarem propriedades de atração e repulsão, todos os fenômenos magnéticos estarem relacionados apenas com os ímas naturais, enquanto as atrações e repulsões elétricas apareciam em várias situações distintas. O âmbar, por exemplo, quando atritado, atraía diversos materiais leves ao seu redor, enquanto os fenômenos magnéticos eram observados para uma pequena categoria de materiais. Além disso, não havia como isolar um polo magnético, o que era possível fazer com cargas elétricas.

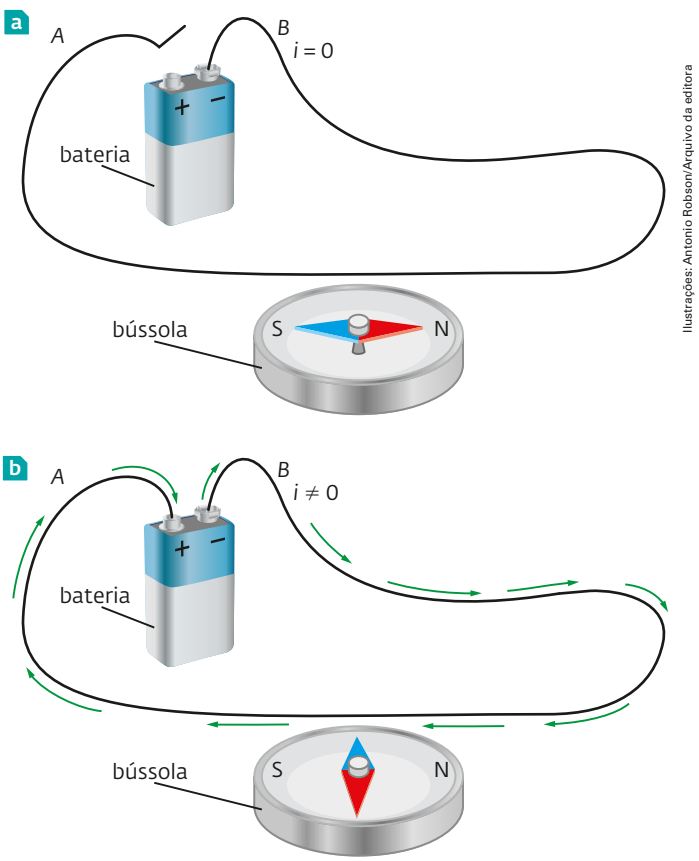
Entretanto, no início do século XIX, um fato notável determinou uma mudança radical nesse ponto de vista. Esse fato, observado pelo professor dinamarquês H. C. Oersted, mostrou que há uma íntima relação entre a Eletricidade e o Magnetismo, ao contrário do que se pensava até então.

A experiência de Oersted

Em 1820, trabalhando em seu laboratório, Oersted montou um circuito elétrico e colocou perto dele uma agulha magnética. Não havendo corrente no circuito (circuito aberto), a agulha magnética se orientava na direção norte-sul. A montagem representada na **figura 6.8.a** é semelhante à feita por Oersted. Observe que um dos ramos do circuito (o fio *AB*) deve ser colocado paralelamente à agulha, isto é, deve ser orientado também na direção norte-sul.

Ao estabelecer uma corrente no circuito, Oersted observou que a agulha magnética se desviava, tendendo a se orientar em uma direção perpendicular ao fio *AB* **(figura 6.8.b)**. Interrompendo-se a corrente, a agulha retornava à sua posição inicial, ao longo da direção norte-sul. Essas observações realizadas por Oersted mostravam que uma corrente elétrica podia atuar como se fosse um ímã, provocando desvios em uma agulha magnética. Verificava-se, assim, pela primeira vez, que existe uma relação entre a Eletricidade e o Magnetismo: **uma corrente elétrica é capaz de produzir efeitos magnéticos**.

Oersted divulgou sua descoberta, atraindo a atenção de grandes cientistas da época. Alguns deles passaram a desenvolver pesquisas relacionadas com o fenômeno, destacando-se o trabalho de Ampère. Em pouco tempo verificou-se que qualquer fenômeno magnético era provocado por correntes elétricas, isto é, conseguia-se a unificação do Magnetismo e da Eletricidade, originando o ramo da Física denominado Eletromagnetismo.



Ilustrações: Antonio Robson/Arquivo da editora

Figura 6.8. Uma agulha magnética colocada nas proximidades de um fio que conduz uma corrente elétrica tende a se posicionar perpendicularmente ao fio (**b**). Representações sem escala e em cores fantasia.



SPL/Latinstock

HANS CHRISTIAN OERSTED (1777-1851)

Físico dinamarquês que, em 1806, se tornou professor da Universidade de Copenhague, Dinamarca, onde desenvolveu várias pesquisas no campo da Física e da Química. Em um ensaio publicado em 1813, previu que deveria existir uma ligação entre a Eletricidade e o Magnetismo. Em 1820, durante uma aula, descobriu que uma agulha magnética é desviada quando colocada nas proximidades de um condutor de corrente elétrica, assim confirmando experimentalmente sua previsão. Oersted foi professor e conferencista conceituado, dedicando-se, ainda, a escrever alguns artigos sobre filosofia. Em 1824, fundou uma sociedade para divulgar os conhecimentos científicos para o povo.

A relação entre a eletricidade e o magnetismo

Como resultado dos estudos de Oersted, foi possível estabelecer que: **quando duas cargas elétricas estão em movimento, aparece entre elas uma força que é denominada força magnética.**

Quando duas cargas elétricas estão em repouso, existe entre elas uma força, denominada força eletrostática, que pode ser calculada pela lei de Coulomb. Quando as duas cargas estão se movendo, além da força eletrostática, aparece entre elas a força magnética.

Uma carga Q em movimento exerce sobre a carga q, também em movimento, além da força eletrostática, uma força magnética $\vec{F}$, como está indicado na **figura 6.9**.

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

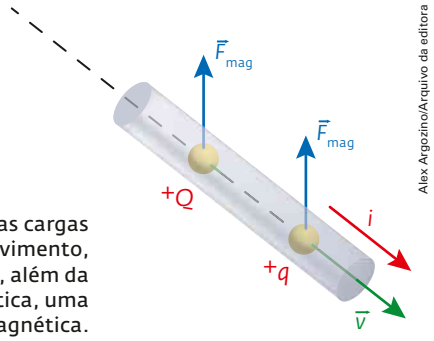


Figura 6.9. Quando duas cargas elétricas estão em movimento, manifesta-se entre elas, além da força eletrostática, uma força magnética.

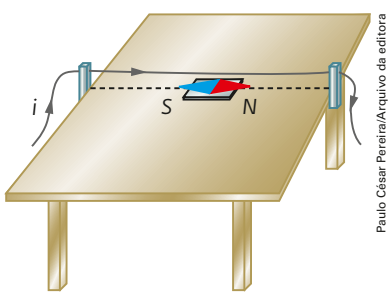
Todas as manifestações de fenômenos magnéticos são explicadas por meio dessa força entre cargas em movimento. Assim, o desvio da agulha na experiência de Oersted é causado pela existência dessa força. Ela também é a responsável pela orientação da agulha magnética na direção norte-sul e pela atração e repulsão entre os polos de ímãs. Conforme veremos no capítulo seguinte, existem cargas em movimento na estrutura atômica de um ímã que são responsáveis pelas propriedades magnéticas que ele apresenta.

Em resumo:

Quando duas cargas elétricas estão em movimento, manifesta-se entre elas, além da força eletrostática, uma outra força, denominada força magnética.

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

6. Na figura a seguir, uma corrente de grande intensidade está passando por um fio, situado acima de uma agulha magnética. Há um erro nessa figura. Qual é esse erro?



7. Uma pessoa está usando uma bússola magnética para se orientar. Entretanto, existe nas proximidades um fio no qual passa uma corrente contínua de grande intensidade. Você acha que a bússola indicará à pessoa a orientação correta?

8. Um fio condutor de eletricidade está embutido em uma parede. Uma pessoa deseja saber se existe, ou não, uma corrente contínua passando pelo fio. Explique como ela poderá verificar esse fato usando uma agulha magnética.

9. Considere duas cargas elétricas Q_1 e Q_2, próximas uma da outra. Diga se existirá entre elas uma força eletrostática e uma força magnética em cada um dos seguintes casos:

a) Q_1 e Q_2 estão em repouso.

b) Q_1 está em movimento e Q_2 está em repouso. Existirá apenas a força eletrostática.

c) Q_1 e Q_2 estão em movimento. Existirá uma força eletrostática e uma força magnética.

Não escreva no livro!

6. A agulha deveria estar orientada perpendicularmente ao fio e não paralelamente a ele, como mostra a figura.

7. Não, pois a corrente no fio fará a agulha se desviar da direção norte-sul.

8. Verificando se a agulha se desvia ao ser aproximada da região da parede onde está o fio.

9. a) Existirá apenas a força eletrostática.

6.3 Campo magnético

O que se entende por campo magnético

Vimos que uma carga elétrica em movimento exerce uma força magnética sobre outra carga que também esteja se movendo. Podemos ainda descrever esse fato dizendo que uma carga em movimento cria no espaço em torno dela um **campo magnético**, o qual atua sobre a outra carga também em movimento **(figura 6.9)**.

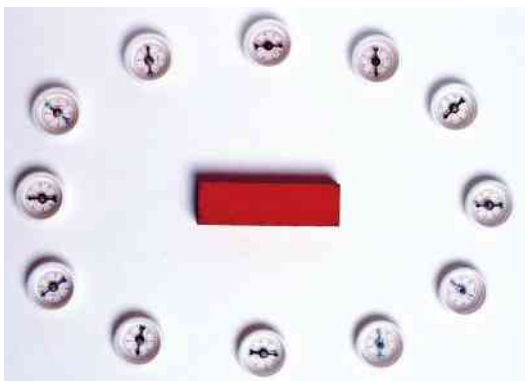
Quando estudamos o **campo elétrico** e analisamos a interação eletrostática entre duas cargas Q e q, vimos que a carga Q cria um campo elétrico, o qual exerce uma força eletrostática sobre q.

Assim, na **figura 6.9**, podemos dizer que a carga Q, em movimento, cria um campo magnético no espaço em torno dela e esse campo atua sobre a carga q, também em movimento. Portanto, dentro desse ponto de vista, a força magnética em q é causada pela existência do campo magnético criado por Q.

Podemos, pois, destacar:

Uma carga em movimento cria, no espaço em torno dela, um campo magnético que atuará sobre outra carga, também em movimento, exercendo sobre ela uma força magnética.

Deve-se observar então que, se existir uma corrente elétrica passando por um fio, haverá um campo magnético no espaço em torno desse fio, pois uma corrente elétrica é constituída por cargas elétricas em movimento. Da mesma forma, no espaço em torno de um ímã também existe um campo magnético, pois no interior dos átomos que constituem um ímã temos cargas elétricas em movimento que estabelecem esse campo **(figura 6.10)**.



sciencephotos/Alamy/Latinstock

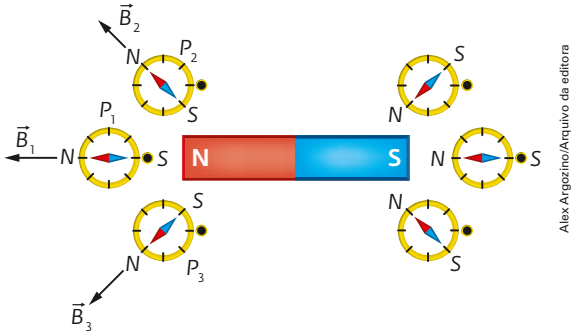
Figura 6.10. A agulha magnética da bússola indica, em cada posição, a direção e o sentido do campo magnético criado pelo ímã.

O vetor campo magnético

Consideremos uma região do espaço na qual existe um campo magnético. Esse campo pode ter sido criado tanto por uma corrente em um fio quanto por um ímã.

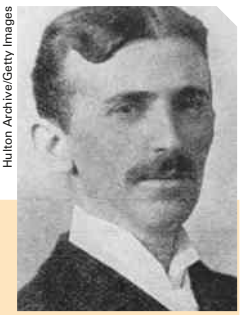
Vamos definir um vetor, representado por $\vec{B}$ e denominado **vetor campo magnético** (ou **vetor indução magnética**), que será usado para caracterizar o campo magnético em cada ponto do espaço. O campo magnético $\vec{B}$ será definido em termos da força que ele deriva, de maneira análoga à maneira como definimos o campo elétrico.

1) **Direção e sentido de $\vec{B}$** — O ímã cujo polo norte está mostrado na **figura 6.11** cria um campo magnético no espaço em torno dele. Colocando-se no ponto P_1 uma pequena agulha magnética, o campo magnético aí existente atuará sobre as cargas móveis dessa agulha, fazendo com que ela tome uma certa orientação. A direção do vetor campo magnético $\vec{B}_1$ nesse ponto é, por definição, a direção na qual a agulha se orienta, e o seu sentido é aquele para o qual aponta o polo norte da agulha. Observe então, na figura, o vetor $\vec{B}_1$, que representa o campo magnético existente em P_1.



Alex Argozino/Arquivo da editora

Figura 6.11. O polo norte do ímã cria um campo magnético cuja direção e cujo sentido podem ser observados pela orientação de pequenos ímãs colocados em diversos pontos do campo magnético. Representação sem escala e em cores fantasia.



Hulton Archive/Getty Images

NIKOLA TESLA (1856-1943)

Nasceu no então império Austro-Húngaro, atual Croácia, mas de etnia sérvia. Foi educado na Universidade Técnica da Áustria e posteriormente na Universidade de Praga. Em 1883, trabalhando na Companhia Edison, em Paris, França, construiu o primeiro motor elétrico. Em 1885, tendo emigrado para os Estados Unidos, Tesla patenteou suas invenções: dínamo de corrente alternada, transformador e motores, estabelecendo, então, seu próprio laboratório. Daí por diante Tesla, que era uma pessoa muito dinâmica, teve oportunidade de desenvolver várias outras invenções, entre elas a **bobina de Tesla**, um barco guiado por controle remoto e outros dispositivos controlados a distância.

De maneira análoga podemos colocar pequenas agulhas magnéticas nos pontos P_2, P_3, etc. e assim obter a direção e o sentido dos vetores campo magnético $\vec{B}_2$, $\vec{B}_3$, etc. em cada um desses pontos.

2) **Módulo do vetor $\vec{B}$** — Suponhamos que no ponto P, mostrado na **figura 6.12**, exista um campo magnético $\vec{B}$ com a direção e o sentido indicados. Se uma partícula, eletrizada com uma carga positiva q, for lançada de maneira a passar no ponto P com uma velocidade $\vec{v}$, o campo magnético exercerá sobre essa carga uma força magnética $\vec{F}$. Essa força é perpendicular ao plano determinado pelos vetores $\vec{v}$ e $\vec{B}$, como está representado na **figura 6.12**, e sua magnitude é proporcional à carga e à intensidade do campo magnético $\vec{B}$, conforme estudos de Hendrik Lorentz, no século XIX.

Realizando medições cuidadosas, Lorentz verificou que o módulo da força magnética $\vec{F}$ depende do valor da carga q, do módulo da velocidade $\vec{v}$ e do ângulo θ formado pelos vetores $\vec{v}$ e $\vec{B}$ **(figura 6.12)**, tendo sido obtidas as seguintes relações:

$$F \propto q \qquad F \propto v \qquad F \propto \operatorname{sen}\theta$$

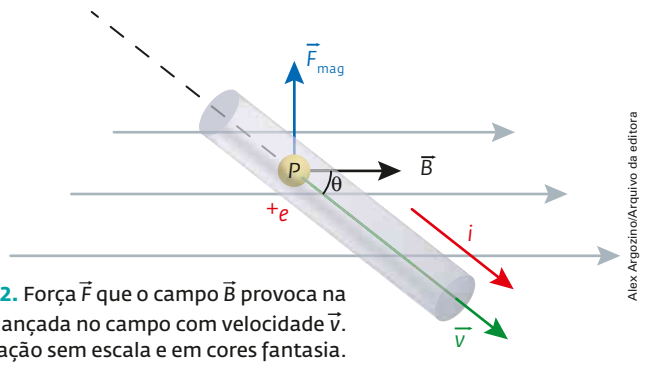
Foi possível, então, concluir que:

$$F \propto qv \operatorname{sen}\theta \quad \therefore \quad \frac{F}{qv \operatorname{sen}\theta} = \text{constante}$$

O valor dessa constante foi tomado, por definição, como sendo o módulo de $\vec{B}$ no ponto P, isto é:

$$\frac{F}{qv \operatorname{sen}\theta} = B \quad \text{ou} \quad F = Bqv \operatorname{sen}\theta$$

Deve-se observar que o valor de $\vec{B}$ é constante para um dado ponto, mas para pontos diferentes teremos, em geral, valores diferentes de $\vec{B}$. Em outras palavras, o módulo do campo magnético é bem determinado para um dado ponto, podendo, entretanto, apresentar valores diferentes em diversos pontos do espaço, da mesma forma que ocorre com a intensidade de um campo elétrico.



Alex Argozino/Arquivo da editora

Figura 6.12. Força $\vec{F}$ que o campo $\vec{B}$ provoca na carga q, lançada no campo com velocidade $\vec{v}$. Representação sem escala e em cores fantasia.

Da definição do módulo do vetor $\vec{B}$:

$$B = \frac{F}{qv \operatorname{sen}\theta}$$

podemos obter sua unidade de medida no SI. A partir dessa expressão e lembrando que sen θ é adimensional (não possui unidades), teremos:

$$1\ \frac{\text{N}}{\text{C} \cdot (\text{m/s})} = 1\ \frac{\text{N}}{(\text{C/s}) \cdot \text{m}} = 1\ \frac{\text{N}}{\text{A} \cdot \text{m}}$$

Essa unidade é denominada 1 tesla = 1 T, em homenagem ao cientista sérvio Nikola Tesla, responsável por importantes descobertas tecnológicas no campo do Eletromagnetismo.

FÍSICA NO CONTEXTO

RECURSO DE INCLUSÃO SOCIAL PARA DEFICIENTES AUDITIVOS

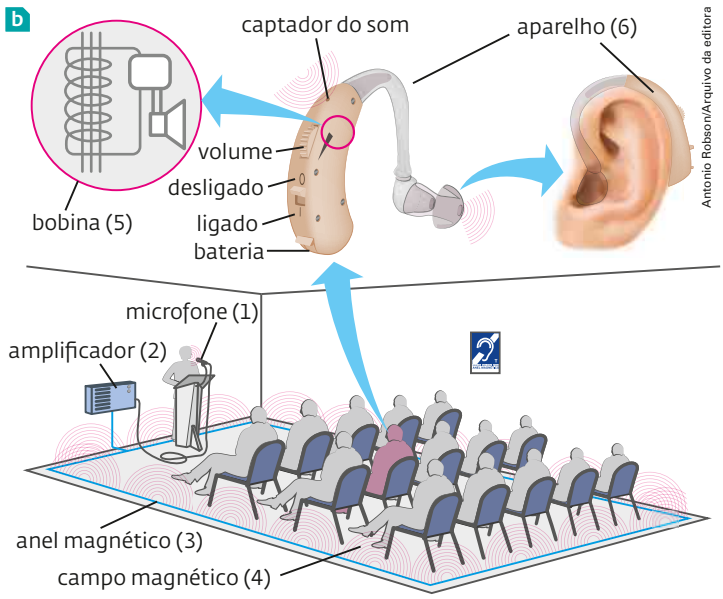
Uma das desvantagens dos aparelhos auditivos utilizados por deficientes auditivos que fazem uso de próteses e implantes é a dificuldade em compreender palestras, ouvir uma peça de teatro ou comunicados feitos por sistemas de alto-falantes em espaços públicos com ruído do ambiente elevado. Os ruídos de fundo e a reverberação reduzem o entendimento da pessoa com deficiência. O amplificador de indução magnética, mais conhecido como anel ou aro magnético, é um sistema de transmissão sonora composto de uma bobina condutora, um amplificador e um microfone, comumente instalado em espaços públicos em países como Austrália, Inglaterra, Alemanha, Holanda e França para captar o som na fonte e transmiti-lo diretamente para os aparelhos auditivos do usuário. Recentemente instalado em alguns ambientes no Brasil, como salas de espetáculos e na Câmara dos Deputados (Brasília), esse dispositivo oferece às pessoas com dificuldades auditivas as mesmas oportunidades das pessoas com uma audição normal. Em lugares onde existe o sistema de anel magnético, usualmente coloca-se o símbolo internacional da surdez **(figura 6.13.a)**. A **figura 6.13.b** apresenta um exemplo da instalação do aparelho em uma sala de conferência. Um microfone (1) instalado próximo ao orador converte um sinal sonoro em um sinal elétrico e o envia para um amplificador (2) que controla a corrente transmitida para o anel magnético (3). Essa corrente transmitida vai induzir um campo magnético (4) no espaço, que será captado por uma bobina (5) que costuma fazer parte de aparelhos e implantes (6). O circuito no aparelho ou implante auditivo converte a variação de corrente novamente em som de boa qualidade, sem ruídos de fundo e sem a necessidade de utilizar um receptor extra.

a



Reprodução/<https://media.npr.org/>

b



Antonio Robson/Arquivo da editora

Figura 6.13. Símbolo internacional da surdez **(a)** e representação (sem escala e em cores fantasia) de um ambiente onde o anel magnético foi instalado **(b)**.

QUESTÕES

1. Explique o funcionamento do anel magnético relacionando-o com a lei de indução de Faraday.

2. Qual a vantagem de utilizar o anel magnético?

1. Um receptor instalado no ambiente capta as ondas sonoras por um microfone e a transforma em sinal elétrico. Esse sinal vai gerar um campo magnético no anel resultando na variação do fluxo magnético através da bobina no aparelho auditivo. O aparelho, por sua vez, converterá a variação da corrente novamente em som.

2. A diminuição de interferências e ruídos do ambiente externo, que muitas vezes prejudicam a compreensão do surdo.

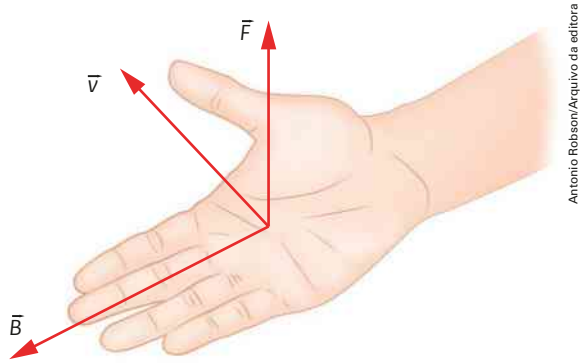
Direção e sentido da força magnética

Na **figura 6.12** vimos que a direção da força que um campo magnético exerce sobre uma carga em movimento é perpendicular ao plano determinado pelos vetores $\vec{v}$ e $\vec{B}$. Logo, a força magnética $\vec{F}$ é perpendicular a cada um desses vetores, isto é:

$$\vec{F} \perp \vec{v} \quad \text{e} \quad \vec{F} \perp \vec{B}$$

Quanto ao sentido da força $\vec{F}$, existem várias regras práticas que nos permitem determiná-lo. Vamos descrever uma delas.

Para obtermos o sentido da força magnética que atua em uma carga positiva em movimento, devemos proceder da seguinte maneira: dispomos a mão direita aberta da maneira mostrada na **figura 6.14**, com o dedo polegar dirigido ao longo do vetor $\vec{v}$ e os demais dedos orientados ao longo do campo magnético $\vec{B}$; o sentido de $\vec{F}$ é aquele para onde fica voltada a palma da mão, isto é, o sentido do movimento que deveria ser feito para empurrar a palma da mão direita para cima **(figura 6.14)**.



Antonio Robson/Arquivo da editora

Figura 6.14. Disposição da mão direita para obter o sentido da força magnética. Representação sem escala e em cores fantasia.

Se a carga lançada no campo magnético for negativa, o sentido da força será contrário ao da força que atua na carga positiva. Nesse caso, você pode ainda usar a disposição representada na **figura 6.14**, mas não deve se esquecer de inverter o sentido indicado por ela.

Resumindo o que estudamos sobre a força magnética, temos:

Quando uma partícula eletrizada positivamente com uma carga q passa com uma velocidade $\vec{v}$ em um ponto onde existe um campo magnético $\vec{B}$, ela fica sob a ação de uma força magnética $\vec{F}$ com as seguintes características:

- **módulo: $F = Bqv \operatorname{sen} \theta$, onde θ é o ângulo de $\vec{v}$ com $\vec{B}$**
- **direção: $\vec{F}$ é perpendicular a $\vec{v}$ e $\vec{B}$**
- **sentido: dado pela regra ilustrada na figura 6.14**

Se a carga q for negativa, o sentido da força magnética será contrário àquele que é observado para a carga positiva.

Exemplo

Sabe-se que no ponto P da figura 6.15.a existe um campo magnético $\vec{B}$ na direção da reta CD. Quando um próton passa nesse ponto P com uma velocidade $v = 2{,}0 \cdot 10^6$ m/s, mostrada na figura (sem escala e em cores fantasia), atua sobre ele uma força magnética $F = 4{,}8 \cdot 10^{-15}$ N, perpendicular ao plano da folha do desenho e penetrando nela.

a) Determine o sentido do campo magnético $\vec{B}$ existente no ponto *P*.

Para determinar o sentido de $\vec{B}$ usaremos a regra representada na **figura 6.15.b**, em que o polegar da mão direita aponta ao longo do vetor $\vec{v}$ e a palma da mão está voltada na direção e no sentido da força (penetrando no papel). Nessas condições, os demais dedos indicarão o sentido do campo magnético. Logo, o vetor $\vec{B}$ tem o sentido de *P* para *D*, como está representado na figura.

b) Determine o módulo de $\vec{B}$.

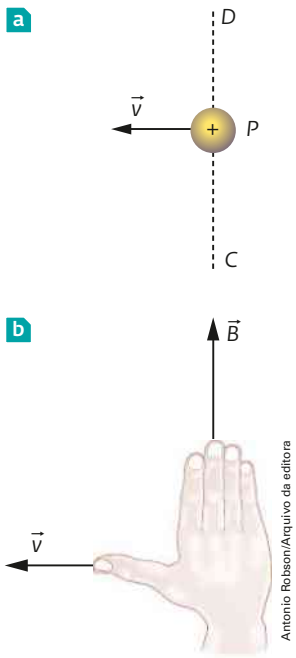
A expressão $F = Bqv \operatorname{sen} \theta$ nos permitirá determinar o módulo de $\vec{B}$, isto é:

$$B = \frac{F}{qv \operatorname{sen} \theta}$$

Observando, na **figura 6.15.b**, que $\vec{v}$ é perpendicular a $\vec{B}$, temos $\theta = 90°$ e, então, $\operatorname{sen} \theta = 1$. Substituindo os valores $q = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C (carga do próton), $v = 2{,}0 \cdot 10^{6}$ m/s e $F = 4{,}8 \cdot 10^{-15}$ N (todos já estão expressos no SI), virá:

$$B = \frac{F}{qv} = \frac{4{,}8 \cdot 10^{-15}}{1{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot 2{,}0 \cdot 10^{6}} \quad \therefore \quad B = 1{,}5 \cdot 10^{-2}\,\text{T}$$

Suponha que uma carga *q* seja lançada em um campo magnético de tal modo que a direção de sua velocidade $\vec{v}$ coincida com a direção de $\vec{B}$. Se o sentido de $\vec{v}$ for o mesmo de $\vec{B}$ **(figura 6.16.a)**, teremos $\theta = 0$ e, se $\vec{v}$ tiver sentido contrário a $\vec{B}$ **(figura 6.16.b)**, teremos $\theta = 180°$. Em ambos os casos tem-se $\operatorname{sen} \theta = 0$, e a expressão $F = Bqv \operatorname{sen} \theta$ nos mostra que a força magnética sobre a partícula será nula. Portanto, um campo magnético não atua em uma carga quando ela está se movendo paralelamente ao vetor $\vec{B}$.



Antonio Robson/Arquivo da editora

Figura 6.15. Para o exemplo da seção 6.3.

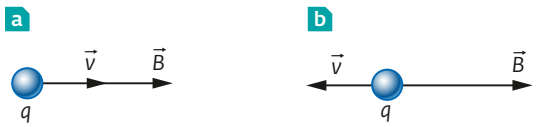
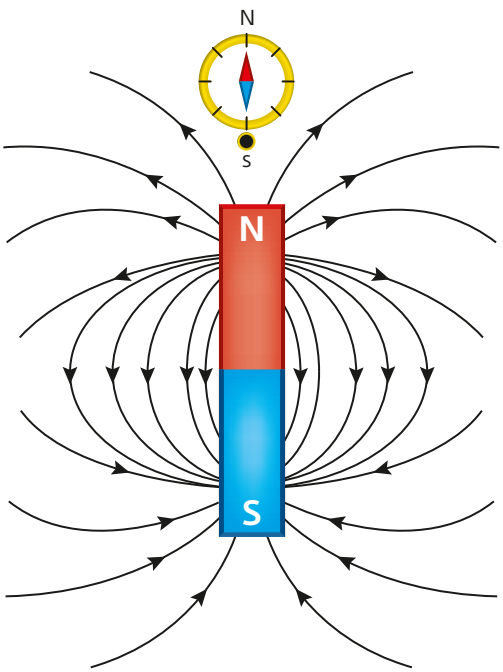


Figura 6.16. Um campo magnético não atua em uma carga que se move paralelamente a $\vec{B}$.

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

Linhas de indução

De maneira semelhante ao que foi feito no Capítulo 2, quando representamos o campo elétrico por meio de linhas de força, também é comum traçar linhas para representar o campo magnético. Essas linhas, denominadas **linhas de indução**, devem ser traçadas de tal modo que o vetor $\vec{B}$ seja sempre tangente a elas em qualquer um de seus pontos **(figura 6.17)**. Além disso, nas regiões onde o campo magnético é mais intenso, as linhas de indução devem ser traçadas mais próximas umas das outras. Lembre-se de que essas mesmas convenções eram adotadas para se traçar as linhas de força de um campo elétrico.

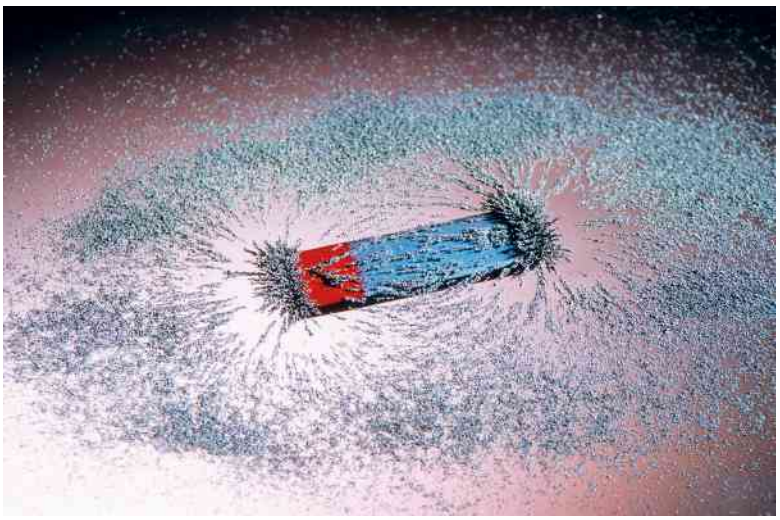


Alex Argozino/Arquivo da editora

Figura 6.17. A direção e o sentido das linhas de indução de um campo magnético são indicados pela orientação de agulhas magnéticas colocadas em diversos pontos do campo.

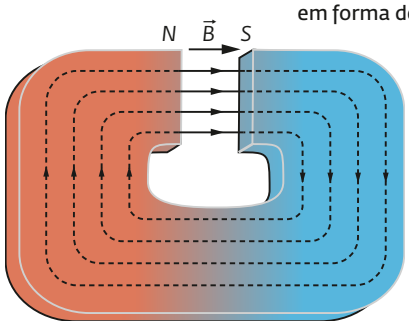
Na **figura 6.18** mostramos as linhas de indução do campo magnético criado por um ímã em forma de barra. Deve-se observar que, ao contrário das linhas de força, as linhas de indução são fechadas: elas emergem do polo norte, penetram no polo sul e se fecham passando pelo interior do ímã. Observe, ainda, que elas estão mais juntas umas das outras nas regiões próximas aos polos do ímã, indicando que o campo magnético é mais intenso nessas regiões.

É possível obter experimentalmente a configuração das linhas de indução de um campo magnético espalhando-se limalha de ferro nas regiões onde o campo atua. Cada uma das pequenas partículas de ferro da limalha se orienta na direção do vetor $\vec{B}$ **(figura 6.18)**, e assim, em conjunto, elas adquirem a configuração das linhas de indução.



Ted Foxx/Alamy/Latinstock

Figura 6.18. Linhas de indução do campo magnético criado por um ímã em forma de barra.



Banco de imagens/ Arquivo da editora

Figura 6.19. Entre os polos deste ímã, o campo magnético é praticamente uniforme. Representação sem escala e em cores fantasia.

Se o vetor $\vec{B}$ apresentar, em todos os pontos, o mesmo módulo, a mesma direção e o mesmo sentido, dizemos que o campo magnético é **uniforme**. Um ímã com a forma mostrada na **figura 6.19** nos fornece um campo magnético praticamente uniforme na região entre seus polos. Observe que, para isso, os polos do ímã devem ser formados por planos paralelos e separados por uma distância não muito grande em relação aos seus tamanhos. Observe também que as linhas de indução de um campo magnético uniforme são paralelas e igualmente espaçadas.

Linhas de indução do campo magnético terrestre

Sabemos que uma agulha magnética, colocada em qualquer ponto da superfície terrestre, orienta-se na direção norte-sul. Assim, podemos concluir que existe um campo magnético em todos os pontos da superfície da Terra, orientado do sul geográfico para o norte geográfico. Esse campo, denominado campo magnético terrestre, existe pelo fato de a Terra se comportar como um grande ímã.

O valor do campo magnético criado pela Terra é pequeno, comparado com o da maioria dos ímãs com os quais geralmente lidamos. O campo magnético terrestre tem módulos diferentes em diversas regiões, apresentando um valor em torno de 10^{-5} tesla. Apesar de não ser muito intenso, não devemos nos esquecer de que o campo magnético da Terra é suficiente para atuar sobre as agulhas magnéticas, orientando-as na direção norte-sul.

Como a Terra se comporta como um grande ímã que está ligeiramente desalinhado com a direção norte-sul geográfica, é comum que se represente suas linhas de indução **(figura 6.20)** da mesma maneira que as linhas de indução de um ímã. O uso da bússola para navegação pode levar alguém a acreditar que as linhas de indução do campo magnético terrestre seriam paralelas à superfície do globo. No entanto, não é isso que ocorre. Pela **figura 6.20** nota-se que, em geral, o vetor campo magnético terrestre (em vermelho) é inclinado em relação à horizontal na maior parte da superfície terrestre. O ângulo de inclinação com a horizontal é denominado **inclinação magnética**. Por essa figura ainda é possível perceber que, à medida que nos afastamos do equador em direção aos polos, o módulo desse ângulo aumenta, tornando-se praticamente 90° quando chegamos aos polos.

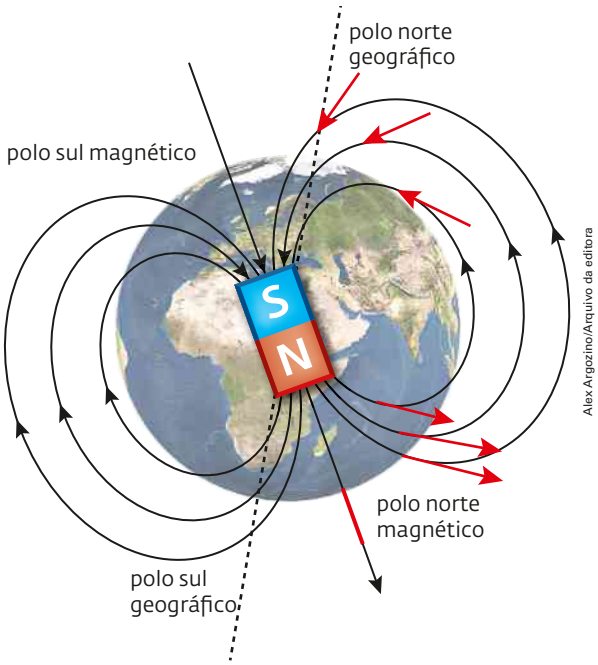
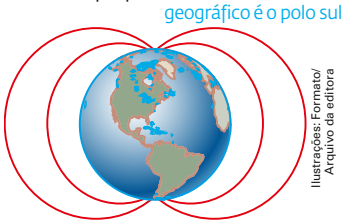


Figura 6.20. Representação da inclinação do campo magnético terrestre.

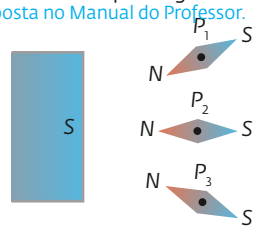
VERIFIQUE O QUE APRENDEU

Não escreva no livro!

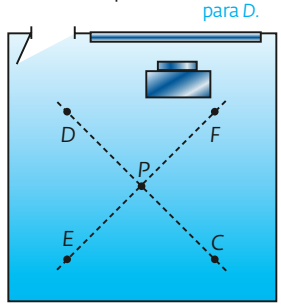
10. A figura abaixo apresenta algumas linhas de indução do campo magnético terrestre. Mostre, em uma cópia da figura, o sentido dessas linhas e responda: no polo norte geográfico elas estão entrando na superfície da Terra ou saindo dela? Explique. Entrando, porque o norte geográfico é o polo sul magnético.



11. Nos pontos P_1, P_2 e P_3 existe um campo magnético criado pelo ímã cujo polo sul está mostrado na figura abaixo. Observe as orientações das pequenas agulhas magnéticas colocadas nesses pontos e desenhe, em uma cópia da figura, no caderno, o vetor que representa o campo magnético em P_1, em P_2 e em P_3. Despreze o campo magnético da Terra.
Veja resposta no Manual do Professor.



12. Suponha que no chão de uma sala estejam traçadas duas linhas perpendiculares, *CD* e *EF*, e que *EF* indique a direção oeste-leste (veja a figura). Desenhe, em uma cópia da figura, no caderno, o vetor que representa o campo magnético da Terra no ponto *P*. Vetor orientado de *P* para *D*.



13. Uma partícula é lançada em um campo magnético uniforme com uma velocidade $\vec{v}$, formando um ângulo θ com o vetor $\vec{B}$. Diga qual deve ser o valor de θ para que a força magnética na partícula seja:
a) nula; $\theta = 0°$ ou $\theta = 180°$
b) máxima. $\theta = 90°$

14. Uma partícula de carga $q = 2{,}0 \cdot 10^{-6}$ C é lançada em um campo magnético uniforme $B = 0{,}30$ T, com uma velocidade $v = 5{,}0 \cdot 10^{3}$ m/s, que forma um ângulo θ com $\vec{B}$. Calcule o valor da força magnética $\vec{F}$ que atuará na partícula supondo que o valor de θ seja:
a) 0°; $F = 0$
b) 30°; $F = 1{,}5 \cdot 10^{-3}$ N
c) 90°; $F = 3{,}0 \cdot 10^{-3}$ N
d) 180°. $F = 0$

15. Compare os campos elétricos e magnéticos quanto às características abaixo:
a) como são gerados;
b) configuração das linhas de força do campo elétrico e das linhas de indução do campo magnético. As primeiras podem ser abertas; as segundas são sempre fechadas.

15. a) O primeiro é gerado por cargas elétricas, enquanto o segundo é gerado por cargas elétricas em movimento.

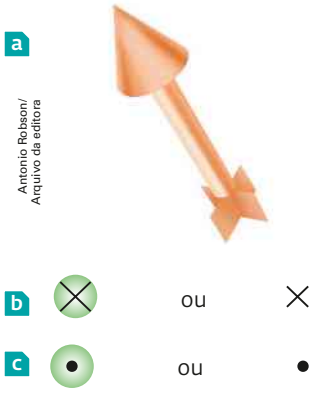


Figura 6.21. Em **a**, seta que representa os vetores campo magnético perpendiculares à folha de papel; em **b** penetrando na folha e em **c** saindo dela.

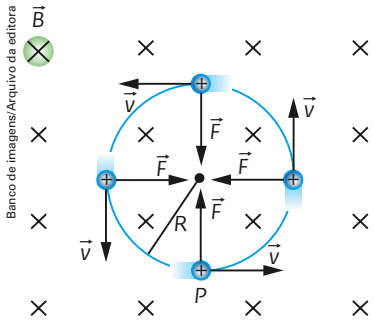
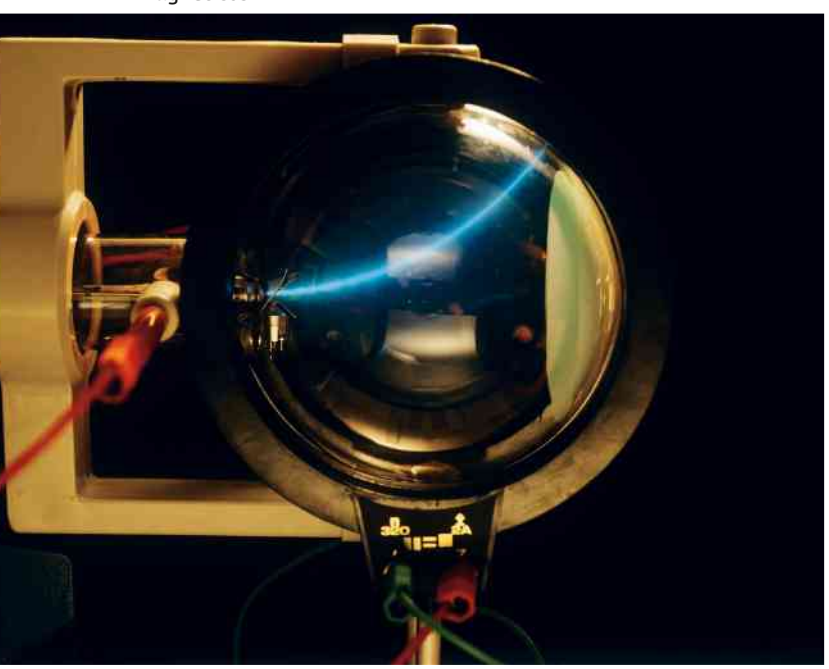


Figura 6.22. Partícula eletrizada descrevendo trajetória circular no campo magnético.

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

Figura 6.23. Feixe de elétrons sendo manipulados por campos magnéticos.


SPL/Latinstock

6.4 Movimento circular em um campo magnético

Frequentemente trabalhamos com vetores perpendiculares a um certo plano que podem estar penetrando nele ou saindo dele. Na seção anterior, encontramos situações nas quais ora um vetor, ora uma força, ora uma velocidade, ora um campo magnético se apresentava perpendicular ao plano da folha de papel.

Nessas condições, os vetores costumam ser representados da maneira indicada na **figura 6.21**. A **figura 6.21.b** está representando um vetor perpendicular ao plano da folha de papel e penetrando nela. Essa maneira de representar procura dar a ideia de uma flecha vista pela sua parte posterior **(figura 6.21.a)**, isto é, se afastando do leitor. Na **figura 6.21.c** está representado um vetor saindo da folha de papel, isto é, procura-se dar a ideia da ponta de uma flecha que está voltada para o leitor **(figura 6.21.a)**.

Carga lançada com $\vec{v}$ perpendicular a $\vec{B}$

Na **figura 6.22** representamos um campo magnético uniforme $\vec{B}$ usando a convenção que acabamos de descrever. Observe que esse campo está penetrando na folha de papel.

Uma partícula eletrizada positivamente com uma carga q é lançada, do ponto P, no interior do campo, com uma velocidade $\vec{v}$. Como mostra a **figura 6.22**, essa velocidade, estando no plano do papel, é perpendicular ao campo magnético, isto é, o vetor $\vec{v}$ é perpendicular ao vetor $\vec{B}$.

Usando a regra descrita na seção anterior, verifica-se que a força magnética $\vec{F}$ que atua sobre a partícula no ponto P tem o sentido mostrado na figura. Essa força é sempre perpendicular ao vetor $\vec{v}$. Então, a força $\vec{F}$ provocará uma modificação na direção da velocidade da partícula sem, entretanto, alterar o seu módulo. Assim, a partícula descreverá uma trajetória curva e a força magnética atuará continuamente sobre ela, mantendo-se sempre perpendicular à sua velocidade. Como consequência disso, sob a ação apenas da força magnética, a trajetória da partícula será uma circunferência, isto é, o movimento dessa partícula, dentro do campo magnético, será um **movimento circular uniforme (figura 6.22)**.

Na **figura 6.23** vemos um feixe de elétrons lançados por um dispositivo especial denominado "canhão eletrônico".

Se aplicarmos, na região onde existe o feixe, um campo magnético uniforme, perpendicular ao plano da fotografia, o feixe se curvará, e os elétrons passarão a descrever um movimento circular.

Raio da trajetória descrita pela carga

Podemos calcular o raio R da trajetória circular que a partícula eletrizada descreve dentro de um campo magnético uniforme. Para isso, basta observar que a força magnética $\vec{F}$ proporciona a força centrípeta necessária para a partícula descrever o movimento circular. Então, podemos escrever:

$$F = m\frac{v^2}{R}$$

em que m é a massa da partícula.

Sabemos que a força magnética é dada por $F = Bqv \operatorname{sen}\theta$. Como nesse caso tem-se $\theta = 90°$, pois $\vec{v}$ é perpendicular a $\vec{B}$, virá:

$$F = Bqv$$

Igualando essas duas expressões de F, teremos:

$$m\frac{v^2}{R} = Bqv \quad \therefore \quad R = \frac{mv}{Bq}$$

Isolando-se v, temos:

$$v = \frac{Rqb}{m}$$

A velocidade em um movimento circular uniforme pode ser calculada pela expressão $v = \frac{2\pi R}{T}$, em que T é o período do movimento circular, ou seja, o tempo transcorrido para se completar uma volta.

Igualando as duas expressões, temos:

$$\frac{Rqb}{m} = \frac{2\pi R}{T} \Rightarrow \frac{R\not{q}B}{m} = \frac{2\pi\not{R}}{T} \Rightarrow \mathrm{T} = \frac{2\pi m}{qB}$$

As equações acima representam o raio e o período do movimento circular uniforme executado por uma carga lançada perpendicularmente a um campo magnético de intensidade B. Por elas podemos notar que, **para valores constantes de m, B e q**, o raio da trajetória aumenta linearmente com a velocidade; no entanto, o mesmo não ocorre com o período, que permanece inalterado qualquer que seja o valor da velocidade.

Exemplo

Suponha que o raio da trajetória descrita pelos elétrons na figura 6.23 seja $R = 5{,}0$ cm. Sabendo-se que o módulo do campo magnético aplicado ao feixe é $B = 6{,}0 \cdot 10^{-4}$ T, determine a velocidade com que os elétrons são emitidos pelo canhão eletrônico.

Essa velocidade é a mesma que os elétrons possuem ao descrever o movimento circular. Assim, da expressão:

$$R = \frac{mv}{Bq} \quad \text{temos} \quad v = \frac{BqR}{m}$$

Considerando os valores da carga q e a massa m do elétron:

$$q = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\,\mathrm{C} \quad \text{e} \quad m = 9{,}1 \cdot 10^{-31}\,\mathrm{kg}$$

Teremos, então:

$$v = \frac{BqR}{m} = \frac{6{,}0 \cdot 10^{-4} \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot 5{,}0 \cdot 10^{-2}}{9{,}1 \cdot 10^{-31}} \quad \therefore \quad v = 5{,}2 \cdot 10^{6}\,\mathrm{m/s}$$

Note que a velocidade dos elétrons, nessa experiência, é muito elevada.

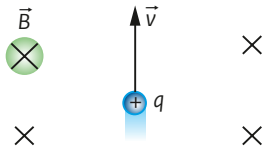
VERIFIQUE O QUE APRENDEU

Não escreva no livro!

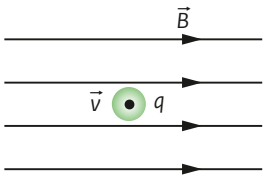
As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

16. Analise os diagramas apresentados na figura abaixo e respo nda:

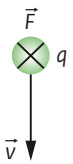
a



b



c



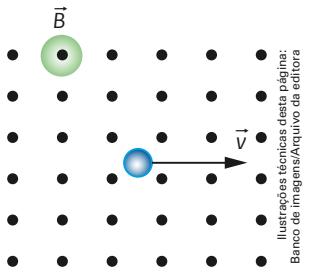
a) Quais são a direção e o sentido da força magnética que atua na carga q positiva, movendo-se com a velocidade $\vec{v}$ no campo magnético $\vec{B}$ mostrado no diagrama **a**?

b) Quais são a direção e o sentido da força magnética que atua na carga q negativa, movendo-se com a velocidade $\vec{v}$ no campo magnético $\vec{B}$ mostrado no diagrama **b**?

c) Quais são a direção e o sentido do campo magnético que exerce na carga positiva q a força magnética $\vec{F}$ mostrada no diagrama **c**?

Sabe-se que $\vec{B}$ é perpendicular à velocidade $\vec{v}$ da carga q.

17. Uma partícula eletrizada positivamente, colocada em um campo magnético uniforme, é lançada para a direita com uma velocidade $\vec{v}$, como mostra a figura. Desenhe, em uma cópia da figura, no caderno, a trajetória que a partícula descreverá. Veja a resposta no Manual do Professor.



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

18. No desenho feito no caderno para o exercício anterior, desenhe a trajetória da partícula supondo que sua carga seja negativa.

19. Uma partícula de carga q e massa m é lançada com velocidade de módulo v perpendicularmente a um campo magnético de intensidade B. Nessa situação, ela descreve um movimento circular uniforme de raio R e período T. Expresse, em função de R e T, os novos valores do raio e do período para as seguintes situações:

a) a velocidade de lançamento dobra de valor sem alterações em m, q ou B; $R' = 2R; T' = T$

b) a intensidade de B dobra de valor sem alterações em m, q ou v. $R' = \frac{R}{2}$; $T' = \frac{T}{2}$

16. a) Perpendicular a $\vec{v}$ para a esquerda.
b) Perpendicular a $\vec{B}$ para baixo.
c) Perpendicular a $\vec{v}$ para a esquerda.

18. Veja a resposta no Manual do Professor.

6.5 Força magnética em um condutor

Fio condutor em um campo magnético

Consideremos um fio retilíneo, de comprimento L, percorrido por uma corrente i, colocado em um campo magnético em uma direção perpendicular ao vetor $\vec{B}$, como mostra a **figura 6.24**. Sabemos que a corrente elétrica no fio pode ser considerada, para todos os efeitos, como sendo constituída por cargas positivas em movimento.

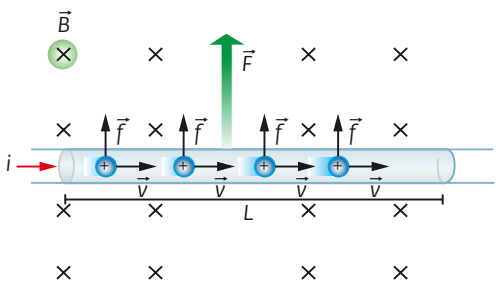
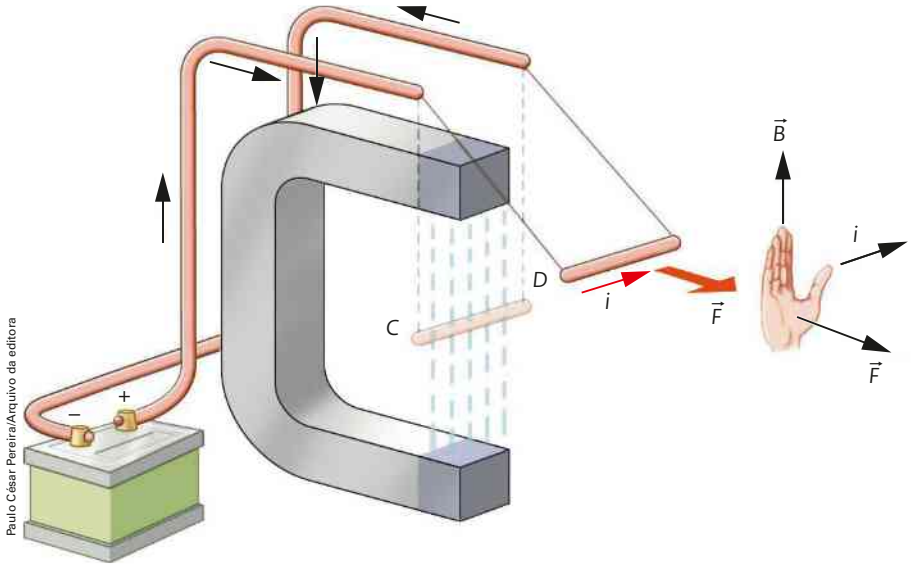


Figura 6.24. Fio conduzindo corrente elétrica colocado em um campo magnético.

Então, o campo magnético $\vec{B}$ atuará sobre essas cargas móveis, cuja velocidade $\vec{v}$ está representada na **figura 6.24**, exercendo em cada uma a pequena força $\vec{f}$. Usando a regra descrita nas últimas seções, você poderá encontrar o sentido de $\vec{f}$. Aplicando essa regra à situação mostrada na **figura 6.24**, você verificará que a força que atua em cada carga móvel da corrente tem o sentido ali indicado.

Como consequência dessa ação do campo magnético sobre as cargas que constituem a corrente, atuará sobre o condutor uma força $\vec{F}$, que é a resultante das forças $\vec{f}$. Observe a força $\vec{F}$, também indicada na **figura 6.25**.



Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura 6.25. A regra descrita pode ser utilizada para determinar o sentido da força que atua sobre uma barra metálica que conduz uma corrente elétrica, colocada em um campo magnético. Representação sem escala e em cores fantasia.

A **figura 6.25** apresenta uma experiência simples que ilustra a existência dessa força magnética sobre o condutor: *uma barra metálica CD*, suspensa entre os polos de um ímã, ao ser percorrida por uma corrente, é deslocada lateralmente pela força magnética $\vec{F}$. Observe que o sentido dessa força pode ser determinado, como está indicado na figura (o dedo polegar deve apontar no sentido da corrente convencional, isto é, no sentido do movimento das cargas positivas).

Cálculo da força que atua no condutor

Na **figura 6.24**, seja q a carga de cada partícula móvel da corrente e $\vec{v}$ a sua velocidade. Como o fio foi colocado perpendicularmente ao campo $\vec{B}$, o valor da força $\vec{f}$ que atua em cada partícula será:

$$f = Bqv \quad (\text{pois } \theta = 90^\circ)$$

Sendo N o número de cargas móveis existentes no comprimento L do fio, temos que o valor de $\vec{F}$ será:

$$F = Nf \quad \text{ou} \quad F = NBqv = B(Nq)v$$

Deve-se observar que Nq representa a carga móvel total, Δq, existente no comprimento L. Então, sendo Δt o tempo que essa carga gasta para se deslocar de uma distância L, podemos concluir que a intensidade da corrente no fio é dada por:

$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t} \quad \therefore \quad Nq = i\,\Delta t$$

Mas, sendo $\vec{v}$ a velocidade de cada partícula, temos que o comprimento do fio L, onde encontram-se as Nq cargas, é dado por:

$$L = v\Delta t \quad \therefore \quad v = \frac{L}{\Delta t}$$

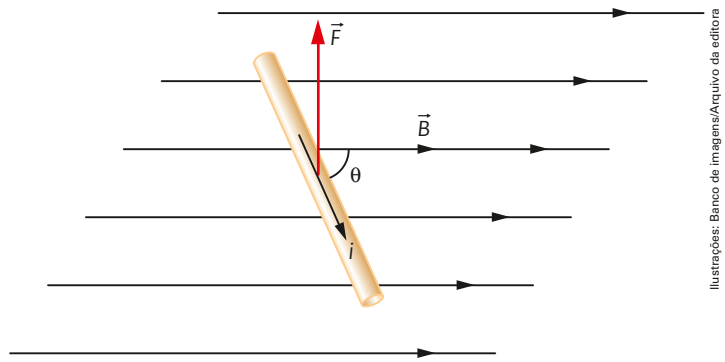
Levando as expressões de Nq e v na equação $F = B(Nq)v$, teremos:

$$F = B(i\Delta t)\frac{L}{\Delta t} \quad \therefore \quad F = BiL$$

Essa expressão foi obtida para o caso em que o condutor se encontra perpendicular ao campo magnético. Se o fio estiver formando um ângulo θ com $\vec{B}$ **(figura 6.26)**, teremos a seguinte expressão para a força no condutor:

$$F = BiL \operatorname{sen} \theta$$

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



Ilustrações: Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 6.26. Fio percorrido por corrente elétrica i, formando um ângulo θ com o campo magnético $\vec{B}$. A força magnética $\vec{F}$ é perpendicular ao plano que contém o fio e o vetor $\vec{B}$.

Assim, em resumo, podemos dizer que:

Se um fio retilíneo, de comprimento L, percorrido por uma corrente i, for colocado em um campo magnético uniforme $\vec{B}$, sobre esse fio atuará uma força magnética $\vec{F}$ dada por:

$$F = BiL \operatorname{sen} \theta$$

onde θ é o ângulo formado pelo fio condutor com o vetor $\vec{B}$. A força $\vec{F}$ é perpendicular ao fio.

Exemplo

Um fio CD, de 30 cm de comprimento, está suspenso horizontalmente, por meio de uma mola, dentro de um campo magnético uniforme $B = 0{,}10$ T, como mostra a figura 6.27.

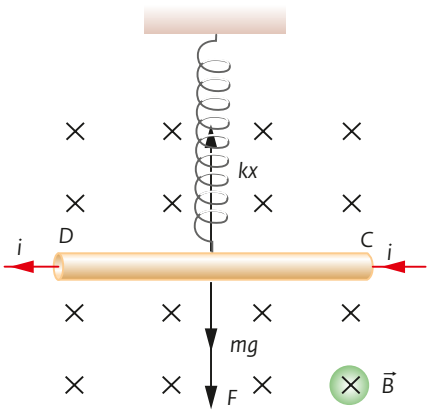


Figura 6.27. Para o exemplo da seção 6.5.

a) Fazendo-se passar no fio uma corrente $i = 10$ A, dirigida de C para D, qual será o sentido e o valor da força magnética $\vec{F}$ que atuará sobre o fio?

Usando a regra descrita ao longo do capítulo, verificamos que a força magnética $\vec{F}$ está dirigida verticalmente para baixo, como está indicado na figura.

Observando que a direção do fio é perpendicular a $\vec{B}$ ($\theta = 90°$), teremos o seguinte valor para a força $\vec{F}$:

$$F = BiL = 0{,}10 \cdot 10 \cdot 0{,}30 \quad \text{ou} \quad F = 0{,}30 \text{ N}$$

b) Sabendo que a massa do fio é $m = 20$ g e que a constante elástica da mola é $k = 20$ N/m, determine a deformação apresentada pela mola. (Considerar $g = 10$ m/s^2.)

Como o peso do fio e a força magnética sobre ele estão ambos dirigidos para baixo, a mola sofrerá um alongamento x. Na posição de equilíbrio, a força exercida pela mola (kx) estará equilibrando o peso do fio (mg) e a força magnética (F).

Logo, poderemos escrever:

$$kx = mg + F$$

Mas:

$$mg = (20 \cdot 10^{-3}) \cdot 10 = 20 \cdot 10^{-2} \text{ ou } mg = 0{,}20 \text{ N}$$

Então, lembrando que $F = 0{,}30$ N, teremos:

$$20x = 0{,}20 + 0{,}30 \quad \therefore \quad x = 2{,}5 \cdot 10^{-2} \text{ m} = 2{,}5 \text{ cm}$$

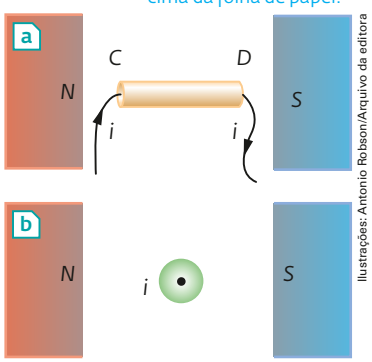
VERIFIQUE O QUE APRENDEU

Não escreva no livro!

20. Um fio CD, cujo comprimento é $L = 25$ cm, percorrido por uma corrente $i = 3{,}0$ A, está colocado em um campo magnético uniforme $B = 0{,}20$ T existente entre os polos de um ímã. Determine o valor e o sentido da força magnética $\vec{F}$ que atua no fio nos seguintes casos:

a) O fio está colocado na posição mostrada na figura **a**. $F = 0$

b) O fio está colocado na posição mostrada na figura **b** (a corrente está saindo da folha de papel). $F = 0{,}15$ N dirigida para o lado de cima da folha de papel.



Ilustrações: Antonio Robson/Arquivo da editora

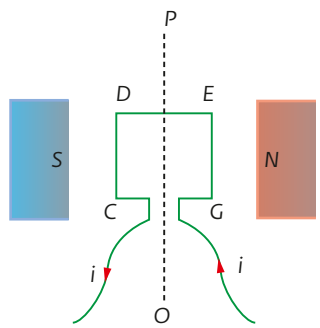
21. Na **figura 6.28**, diga o que ocorrerá com a rotação do motor, em cada item, se fizermos as seguintes modificações:

a) Trocarmos as posições dos polos N e S.

b) Invertermos o sentido da corrente de modo que ela passe a penetrar pela escova E'.

c) Efetuarmos simultaneamente as duas modificações descritas em **a** e **b**.

22. A figura a seguir mostra uma espira retangular $CDEG$, situada no plano da folha de papel, colocada entre os polos de um ímã.



Observando o sentido da corrente que está passando na espira, faça o que se pede:

a) Qual é o sentido da força que atua em cada um dos lados GE, ED e DC da espira?

b) Descreva o movimento que a espira tende a adquirir. Tende a girar em torno do eixo.

23. Considere o exemplo desta seção, mas suponha que o campo magnético $\vec{B}$, na **figura 6.27**, esteja saindo da folha de papel. Nessas condições, responda:

a) Qual o módulo da força resultante que estaria atuando na mola? 0,10 N.

b) A mola seria esticada ou comprimida? Comprimida.

c) Qual seria o valor da deformação x da mola? 5,0 mm do eixo OP.

21. a) O sentido de rotação será invertido.
b) O sentido de rotação será invertido.
c) O sentido de rotação não se modificará.

22. a) Em GE a força está saindo da folha; em ED a força é nula; em DC a força está penetrando na folha.

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

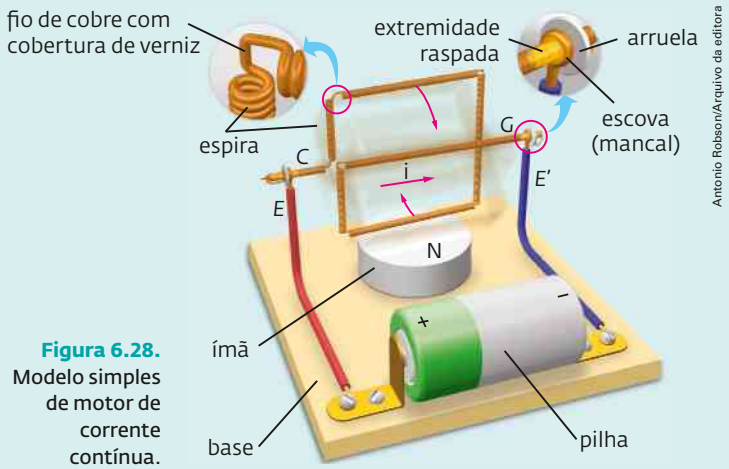
APLICAÇÕES DA FÍSICA

O motor de corrente contínua

Grande parte dos motores elétricos que são usados atualmente funciona tendo por base o efeito de rotação das forças que atuam em espiras colocadas em um campo magnético. Vamos nos preocupar aqui em descrever apenas os de corrente contínua, como os motores de arranque dos automóveis ou os motores a pilha usados em carrinhos de brinquedo.

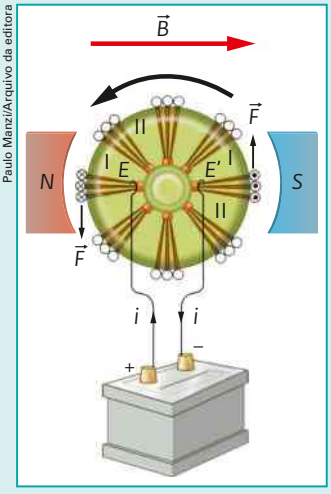
A **figura 6.28** é um modelo muito simples de um motor de corrente contínua. Entretanto, os fios *E* e *E'* que conduzem a corrente estão apenas encostados nas extremidades *C* e *G* da espira. Os fios *E* e *E'* são denominados **escovas do motor**. Quando a espira começa a girar, suas extremidades *C* e *G* perdem contato com as escovas, até que ela complete meia-volta. Nesse momento, a extremidade *C* entra em contato com a escova *E'*, e a extremidade *G* entra em contato com a escova *E*. Assim, a cada contato da espira com as escovas, as forças magnéticas atuam nela de modo que continue a girar sempre no mesmo sentido.

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



Antonio Robson/Arquivo da editora

Figura 6.28. Modelo simples de motor de corrente contínua.



Paulo Manzi/Arquivo da editora

Figura 6.29. Motor de corrente contínua, construído com vários conjuntos de espiras.

Devemos observar, na **figura 6.29**, que só há corrente passando na espira quando suas extremidades entram em contato com as escovas; assim, as forças magnéticas só impulsionam a espira nesses momentos. Para aumentar a potência dos motores, eles geralmente são construídos com vários conjuntos de espiras, como mostra a **figura 6.29** (vista de frente do motor). Na posição mostrada na figura, as escovas *E* e *E'* estão em contato com as espiras I, sobre as quais estão atuando, então, as forças magnéticas que impulsionam o motor no sentido indicado. Logo em seguida, essas espiras perdem o contato com as escovas, sendo substituídas pelas espiras II, que recebem um impulso no mesmo sentido, e assim sucessivamente. Dessa maneira, em um motor como esse haverá maior continuidade no movimento de rotação.

A **figura 6.30** é uma fotografia de algumas partes de um pequeno motor de corrente contínua usado para demonstrações experimentais em aulas práticas de Física.



Paulo Manzi/Arquivo da editora

Figura 6.30. Partes internas que compõem um motor a pilha usado em carrinho de brinquedo: contatos metálicos, rotor e ímãs. É por meio dos contatos metálicos que a energia elétrica alimenta as bobinas do rotor.

FÍSICA NO CONTEXTO

Os cíclotrons

Ernest O. Lawrence (1901-1958), físico americano, passou boa parte de sua vida dedicando-se à construção de uma série de cíclotrons e outos aceleradores de partículas que foram utilizados inicialmente na área de Física e de Química. O primeiro cíclotron, construído em 1929 com a colaboração de N. E. Edlefsen, tinha 11 centímetros de diâmetro, cabia na palma da mão **(figura 6.31.a)** e era utilizado para acelerar íons de hidrogênio com energia de 80 keV.

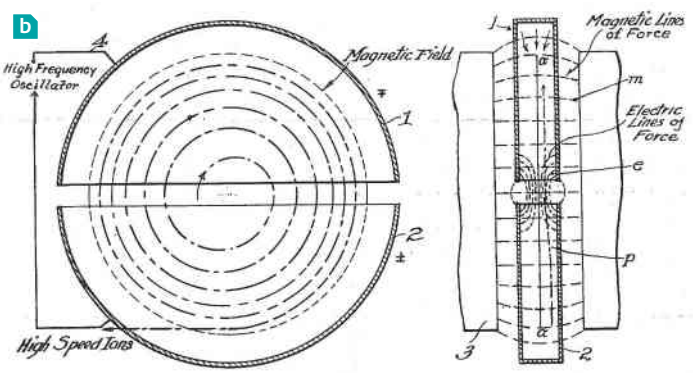
O princípio básico de um cíclotron consiste no movimento de partículas carregadas que, quando submetidas a um campo magnético perpendicular à sua trajetória, descrevem um círculo. Os campos elétricos aceleram as partículas que percorrem um semicírculo em formato de D, conforme pode ser visto na **figura 6.31.b**. A cada volta que o íon atravessa o espaço que separa os semicírculos, o campo elétrico inverte sua polaridade, fornecendo novo incremento de energia que acelera a partícula. Após diversas voltas, o íon colide com um alvo, produzindo partículas de altas energias.

Curiosamente, na época em que esse equipamento estava sendo desenvolvido a Europa estava à beira da guerra e Lawrence, ao contrário dos físicos europeus que tinham ido para os Estados Unidos fugindo de Hitler e Mussolini, não acreditava que a energia atômica poderia ser utilizada para fins bélicos. Em seu laboratório, Lawrence e seus colaboradores continuavam a construir novos cíclotrons, cujas dimensões foram aumentando (consequentemente, os valores de energia empregados também). Somente após os Estados Unidos sofrerem com o ataque direto a Pearl Harbor, em 1941, Lawrence iria modificar radicalmente sua posição e colocaria seu laboratório para trabalhar no esforço de guerra. Sua principal contribuição foi a construção dos cálutrons, nome dado aos espectrômetros de massa que fizeram a separação do isótopo de urânio e que seriam empregados no triste episódio da bomba lançada sobre Hiroshima. No período pós-guerra, Lawrence, tendo M.S. Livingston como parceiro, voltaria a trabalhar na construção de cíclotrons gigantescos, como o da **figura 6.31.c**. Atualmente, os cíclotrons são usados em diversos países para a produção de materiais radioativos utilizados nas mais diversas áreas, como esterilização de materiais cirúrgicos, diagnóstico e terapia de doenças, conservação de alimentos, entre outros.

Randse/Alamy/Latinstock



Reprodução/Wikimedia Commons



SPL/Latinstock



Figura 6.31. Primeiro cíclotron desenvolvido por Ernest O. Lawrence, em 1929 (**a**). Esquema de funcionamento do cíclotron patenteado por Lawrence, em 1934 (**b**). Um dos maiores cíclotrons construídos por Lawrence e inaugurado em 1946(**c**); tinha 184 polegadas (cerca de 4,7 metros).

PRATIQUE FÍSICA

EM EQUIPE

Não escreva no livro!

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

1. Para determinar os pontos cardeais, basta se posicionar de tal modo que o seu lado direito esteja voltado para o local onde o Sol surge, isto é, para o leste. Nessas condições, o seu lado esquerdo indicará o oeste, a sua frente estará voltada para o norte e o sul estará às suas costas.

1º) Seguindo essa orientação, determine o norte e o sul do local onde você se encontra.

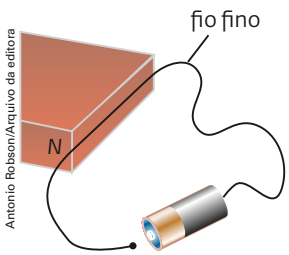
2º) Pegue uma pequena bússola e observe a orientação adquirida pela agulha magnética. Indique, então, qual é a extremidade onde se localiza o polo norte da agulha.

3º) Se você possuir um ímã cujos polos sejam desconhecidos, aproxime dele a agulha da bússola e determine qual dos polos do ímã é o polo norte e qual é o polo sul.

2. Você pode obter a configuração das linhas de indução de um campo magnético, como a mostrada na **figura 6.18**. Para isso, coloque uma folha de cartolina (ou mesmo de papel) sobre um ímã em forma de barra. Em seguida, espalhe cuidadosamente (salpicando) limalha de ferro sobre a cartolina. Observe a configuração assim obtida e compare com a da **figura 6.18**. (Você pode conseguir limalha de ferro em uma serralharia ou oficina mecânica.)

Com um ímã em forma de U (semelhante ao da **figura 6.19**), procure mapear as linhas de indução do campo desse ímã usando o mesmo processo.

3. Vimos, na seção 6.5, que um fio percorrido por uma corrente, colocado em um campo magnético, fica sob a ação de uma força perpendicular a esse fio. É possível comprovar esse fato com a seguinte montagem: passe um fio bem fino horizontalmente entre os polos de um ímã (ou em frente a um dos polos de um ímã forte) e ligue uma de suas extremidades a um dos polos de uma pilha (veja a figura à esquerda). Faça o contato da outra extremidade do fio com o outro polo da pilha, estabelecendo uma corrente elétrica no condutor. Uma força magnética atuará sobre o fio e você poderá observar que ele se deslocará (para cima ou para baixo) sob a ação dessa força. Verifique se o deslocamento que você observou está de acordo com a regra do tapa estudada neste capítulo.



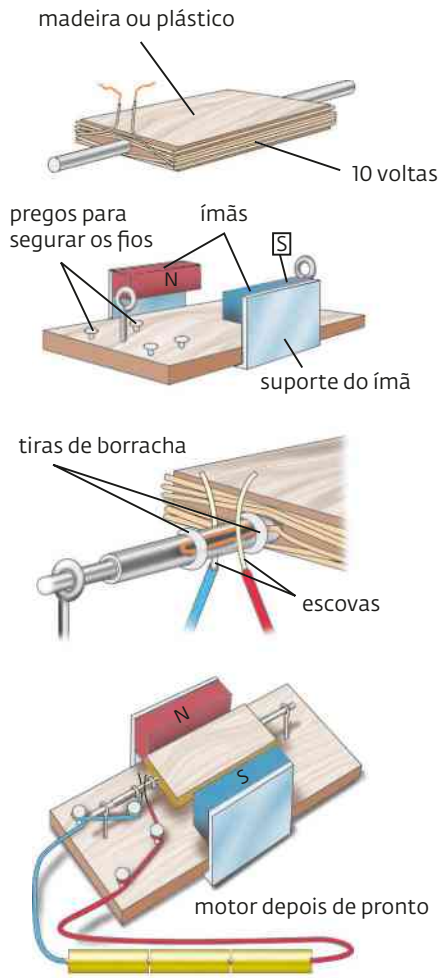
Antonio Robson/Arquivo da editora

Procure prever, usando a regra do tapa, qual deve ser o sentido do deslocamento do fio, se o sentido da corrente nele for invertido. Faça a experiência (inverta a polaridade da pilha) e verifique se a previsão estava correta. Invertendo, agora, o sentido do campo magnético (inverta as posições dos polos do ímã), refaça sua previsão usando a regra do tapa e verifique-a experimentalmente.

4. Na experiência anterior foi observada a força magnética exercida por um ímã sobre uma corrente elétrica.

É possível também observar essa força atuando sobre o filamento de uma lâmpada elétrica comum. Para isso, basta aproximar do bulbo da lâmpada acesa um dos polos de um ímã. Como a corrente que passa no filamento é alternada, isto é, como ela muda periodicamente de sentido, a força magnética sobre o filamento atua ora em um sentido, ora em sentido contrário. Por esse motivo, o filamento oscila, vibrando de maneira semelhante à corda de um violão. Se o bulbo da lâmpada for transparente, você poderá observar essas vibrações. Caso as vibrações não sejam visíveis com uma lâmpada comum, use um tipo de lâmpada de filamento reto, isto é, não espiralado.

5. As figuras desta experiência mostram um pequeno motor de corrente contínua e alguns detalhes que devem ser observados em sua montagem. Orientando-se por essas figuras, procure construir um motor semelhante. Para criar o campo magnético, poderão ser empregados ímãs do tipo utilizado para fechar portas de armários. Fornecendo corrente a esse motor por meio de uma ou mais pilhas, você verá que ele entrará em rotação muito rapidamente.



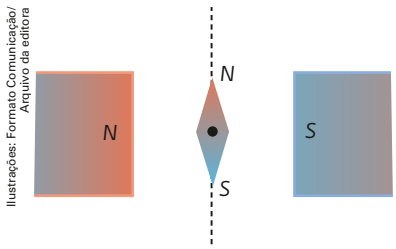
Ilustrações: Paulo César Pereira/Arquivo da editora

3. Porque elas não são tangentes às forças magnéticas que atuam nas cargas elétricas em movimento.
4. a) Movimento retilíneo uniformemente acelerado. **b)** Movimento retilíneo uniforme.

PROBLEMAS E TESTES

Não escreva no livro!

1. Uma agulha magnética é colocada entre os polos de um ímã. A figura abaixo mostra a orientação que a agulha teria se não existisse o ímã.



Ilustrações: Formato Comunicação/ Arquivo da editora

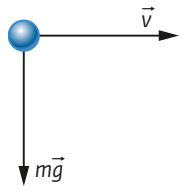
As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

Em uma cópia dessa figura, desenhe no caderno a orientação que a agulha vai adquirir nos seguintes casos:

a) O campo magnético da Terra é desprezível em relação ao do ímã. Veja resposta no Manual do Professor.

b) O campo magnético da Terra não é desprezível em relação ao do ímã. Veja resposta no Manual do Professor.

2. Uma partícula eletrizada positivamente é lançada horizontalmente para a direita, com uma velocidade $\vec{v}$, como mostra a figura abaixo. Deseja-se aplicar à partícula um campo magnético $\vec{B}$, perpendicular a $\vec{v}$, de tal modo que a força magnética equilibre o peso da partícula.



a) Quais devem ser a direção e o sentido do vetor $\vec{B}$ para que isso aconteça? Perpendicular à folha de papel, penetrando nela.

b) Supondo que a massa da partícula seja $m = 4{,}0$ mg, que sua carga seja $q = 2{,}0 \cdot 10^{-7}$ C e que sua velocidade seja $v = 100$ m/s, determine qual deve ser o módulo do vetor $\vec{B}$. (Considere $g = 10$ m/s^2.) $B = 2{,}0$ T

3. Explique por que as linhas de indução não devem ser chamadas de linhas de força do campo magnético.

4. Uma partícula de massa m, eletrizada negativamente, é lançada com velocidade $\vec{v}$ em um campo uniforme, cujas linhas estão representadas na figura deste problema ($\vec{v}$ é paralela às linhas do campo). Suponha que nenhuma outra força, além daquela que poderia ser exercida pelo campo, atue sobre a partícula. Diga o tipo de movimento que a partícula terá, supondo que as linhas representem um:

a) campo elétrico;
b) campo magnético;
c) campo gravitacional.

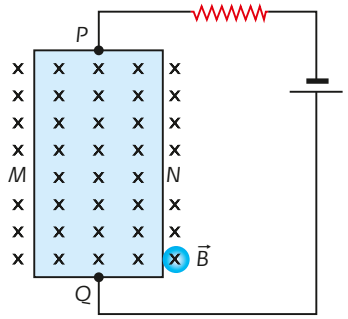
c) Inicialmente o movimento será retilíneo uniformemente retardado e, depois, retilíneo uniformemente acelerado.

5. Uma placa metálica é ligada, nos pontos P e Q, aos polos de uma bateria (veja a figura deste problema). Aplicando-se à placa o campo magnético uniforme $\vec{B}$, verifica-se que uma diferença de potencial VMN aparece entre as laterais, M e N, da placa. Analise a situação apresentada e responda:

a) Qual é o sentido do movimento dos elétrons na placa em virtude da voltagem aplicada pela bateria? De P para Q.

b) Qual é o sentido do deslocamento dos elétrons causado pelo campo magnético $\vec{B}$? De N para M.

c) O potencial de M é maior ou menor do que o de N? Menor.



6. (**UFRGS**) Indique a alternativa que preenche corretamente o texto a seguir.

A figura 1 representa um anel condutor, em repouso, sobre o plano xyz de um sistema de coordenadas, com seu centro coincidindo com a origem O do sistema, e um ímã em forma de barra que é movimentado sobre o eixo dos x, entre o anel e o observador.

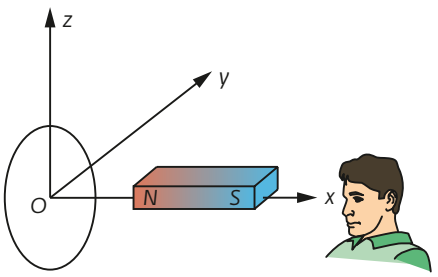


figura 1

O gráfico a seguir (figura 2) representa a velocidade v desse ímã em função do tempo t, em três intervalos consecutivos, designados por I, II e III.

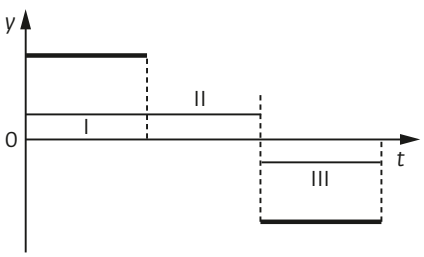


figura 2

(Nesse gráfico, $v > 0$ significa movimento no sentido $+x$ e $v < 0$ significa movimento no sentido $-x$.)

Com base nas informações apresentadas anteriormente, é correto afirmar que, durante o intervalo //////////////////, o campo magnético induzido em O tem o sentido ////////////////// e a corrente elétrica induzida no anel tem, para o observador, o sentido //////////////////. a

a) I; $-x$; horário
b) I; $+x$; anti-horário
c) II; $-x$; anti-horário
d) III; $+x$; horário
e) III; $-x$; anti-horário



bilickvinkel/Alamy/Latinstock

As abelhas da espécie *Apis mellifera* possuem dois diferentes tamanhos de partículas de magnetita em seu abdômen.

P A saúde era restabelecida pelo equilíbrio das funções vitais.

P A magnetobiologia estuda os efeitos produzidos por campos magnéticos, enquanto o biomagnetismo pretende quantificar os campos gerados por seres vivos.

P A corrente elétrica pode ser estabelecida em condutores líquidos, imantando a barra de ferro, criando assim um ímã artificial.

Capítulo 7
Alterações do campo magnético

A Física se relaciona com outras áreas do conhecimento, tendo inúmeras aplicações na área da saúde (raios X, radioterapia, *laser*, etc.) e, também, ao comportamento de animais, como o da abelha da foto acima.

As abelhas da espécie *Apis mellifera* possuem partículas de magnetita em seu abdômen. Isso levou cientistas de renome, como Karl von Frisch (prêmio Nobel em 1973), a estudar seu comportamento.

O magnetismo também foi aplicado na área médica: em 1778, em Paris, o médico austríaco Franz Mesmer ofereceu como tratamento para doenças como a paralisia e o escorbuto imersões em fluidos magnéticos (para Mesmer todos os seres vivos seriam constituídos por um "fluido magnético"). A intenção era "equilibrar" um fluido humano que tinha propriedades magnéticas iguais às do ímã (cabeça – norte; pés – sul) por meio de um campo magnético gerado por uma cuba contendo ácido sulfúrico diluído e barras de ferro.

As técnicas de "cura pelo magnetismo" existem até hoje: colchões, jarras de água com ímãs, aplicação direta de objetos imantados sobre a região doente, entre outras, mas são consideradas terapias de medicina alternativa, ficando a critério de quem as procura avaliar os benefícios de sua aplicação.

PARA INICIAR A CONVERSA

Na concepção médica de Mesmer – e também na de outros médicos contemporâneos e anteriores –, a doença era vista como um "desequilíbrio" das funções vitais. Como, então, a saúde era restabelecida?

Franz Mesmer em seu tempo não poderia imaginar que seres vivos são capazes de gerar minúsculos campos magnéticos. Existem duas áreas da Biologia que estudam esses fenômenos: magnetobiologia e biomagnetismo. Pesquise qual a diferença entre elas.

Como seria possível criar um campo magnético com uma cuba contendo ácido sulfúrico diluído e barras de ferro?

7.1 Campo magnético de um condutor retilíneo

No capítulo anterior vimos que a experiência de Oersted levou à conclusão que uma corrente elétrica cria um campo magnético no espaço em torno dela. Agora, vamos analisar a relação entre o campo magnético e a corrente elétrica que o origina.

Direção e sentido do vetor $\vec{B}$

Consideremos um condutor retilíneo *AC*, bastante comprido, percorrido por uma corrente, como mostra a **figura 7.1**. Em torno desse condutor existe um campo magnético $\vec{B}$. Para isso, vamos colocar uma agulha magnética em diversas posições em torno de *AC*. A orientação da agulha nos indicará a direção e o sentido do campo magnético em cada ponto.

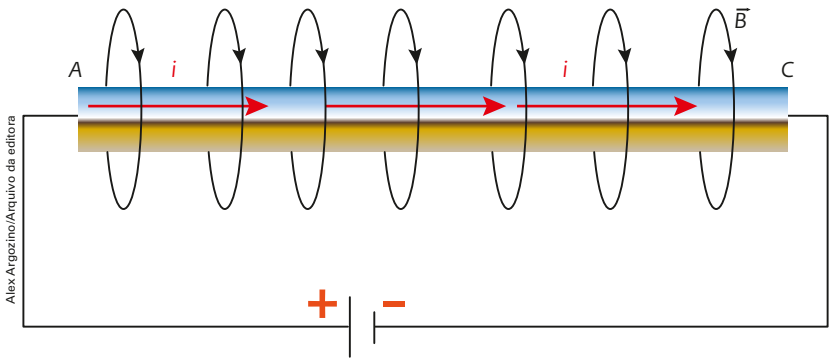


Figura 7.1. Fio retilíneo, comprido, conduzindo uma corrente elétrica de intensidade *i*. Representação sem escala e em cores fantasia.

Na **figura 7.2.a** vemos um corte transversal do condutor *AC*, com a corrente *i*, que o percorre, saindo da placa de madeira, e agulhas magnéticas colocadas em alguns pontos próximos ao condutor. Observando a orientação que a agulha toma em cada ponto, podemos traçar o vetor $\vec{B}$ que representa o campo magnético criado pelo condutor naqueles pontos. Assim, a experiência nos mostra que a corrente no fio cria um campo magnético cujas linhas de indução envolvem o condutor, apresentando uma forma circular, com centro sobre ele **(figura 7.2.b)**.

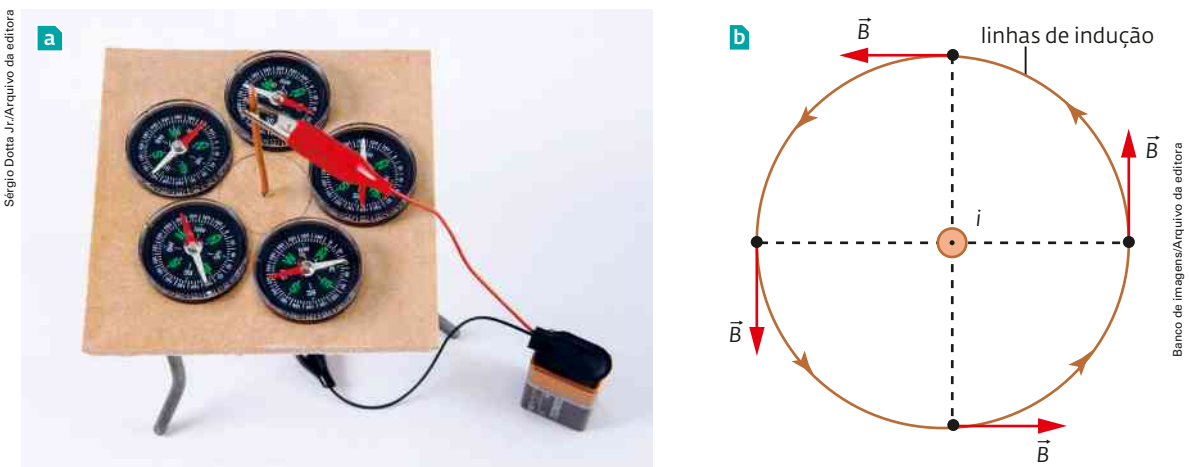
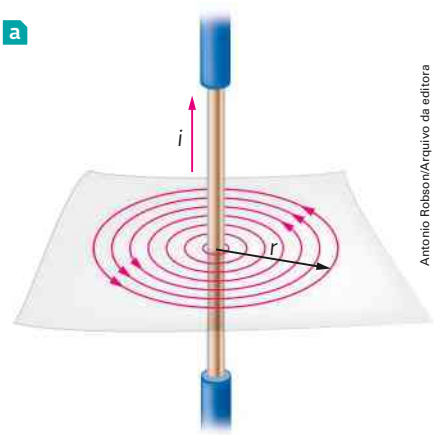


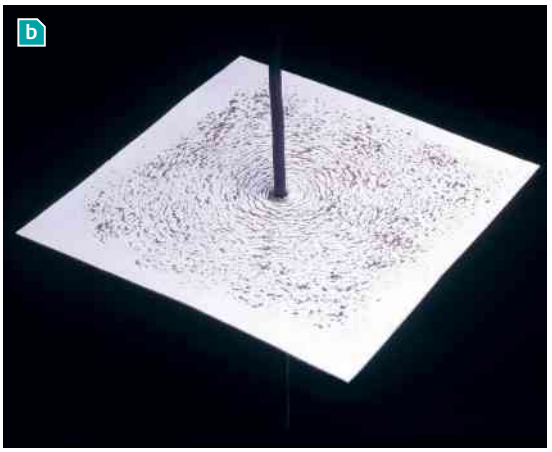
Figura 7.2. Em **a** um condutor visto em direção perpendicular à placa de madeira. Em **b** os vetores $\vec{B}$ que a corrente cria em torno do fio.

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

Podemos traçar várias linhas de indução para representar o campo magnético a diversas distâncias do condutor, como mostra a **figura 7.3.a**. Para enxergar essas linhas de indução, podemos usar limalha de ferro. A **figura 7.3.b** é uma fotografia das linhas de indução do campo criado por um fio reto e comprido, obtidas dessa maneira.



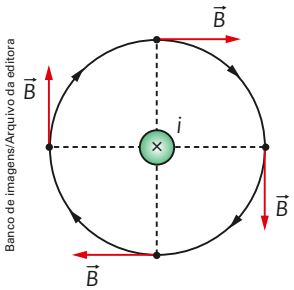
Antonio Robson/Arquivo da editora



sciencephotos/Alamy/Latinstock

Figura 7.3. Linhas de indução do campo magnético criado por um condutor retilíneo, perpendicular à folha de papel e saindo dela (**a**). Fotografia das linhas de indução gerada por um fio reto e comprido (**b**).

A **figura 7.4** nos mostra o que acontece quando o sentido da corrente (penetrando na folha de papel) no condutor é invertido. Podemos observar que, nessas condições, as linhas de indução continuam com a mesma forma, porém o sentido do vetor $\vec{B}$ se inverte (compare a **figura 7.4** com a **figura 7.2.b**).



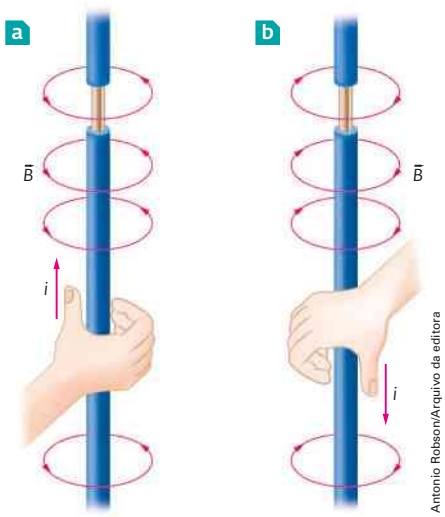
Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 7.4. Linhas de indução do campo magnético criado por um condutor retilíneo, perpendicular à folha de papel e penetrando nela.

Regra de Ampère para determinar o sentido de $\vec{B}$

As linhas de indução em torno de um condutor retilíneo são sempre circulares, mas o seu sentido (o sentido de $\vec{B}$) depende do sentido da corrente no fio. Uma regra prática muito usada, denominada **regra de Ampère**, nos permite obter o sentido do campo magnético em torno do fio.

A **figura 7.5.a** ilustra o uso dessa regra: dispondo o polegar da **mão direita** ao longo do condutor, no sentido da corrente, e os demais dedos envolvendo o condutor, esses dedos nos indicarão o sentido das linhas de indução (observe a figura). Na **figura 7.5.b**, a mesma regra está sendo usada com a corrente no condutor em sentido contrário ao da **figura 7.5.a**. Observe que a regra de Ampère nos indica que a orientação das linhas de indução é contrária àquela da **figura 7.5.a**.



Antonio Robson/Arquivo da editora

Figura 7.5. Aplicação da regra de Ampère para obter o sentido do campo magnético criado em torno de um fio que conduz uma corrente elétrica.

Fatores que influenciam o módulo de $\vec{B}$

Uma vez conhecida a maneira de determinar a direção e o sentido do campo magnético criado por um condutor retilíneo, os cientistas procuraram realizar experiências que lhes fornecessem informações sobre o **módulo** desse campo.

Para apresentar as conclusões, consideremos a **figura 7.6**. Sendo B o módulo do campo magnético que a corrente i estabelece a uma distância r do condutor, eles verificaram que:

1º) B é diretamente proporcional a i:

$$B \propto i$$

2º) B é inversamente proporcional a r:

$$B \propto \frac{1}{r}$$

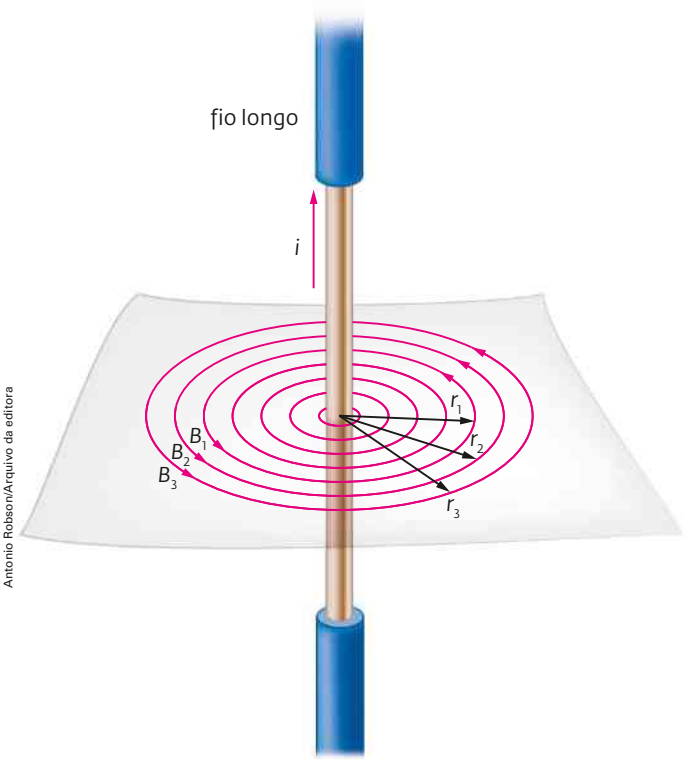
Logo, podemos escrever:

$$B \propto \frac{i}{r}$$

Assim, em resumo, temos:

As linhas de indução do campo magnético criado pela corrente em um fio condutor reto e comprido são círculos com centro sobre o condutor e orientadas com um sentido que pode ser determinado pela regra de Ampère (figura 7.5). O módulo B desse campo, em um ponto, é diretamente proporcional à intensidade da corrente i no fio e inversamente proporcional à distância do ponto ao condutor, isto é:

$$B \propto \frac{i}{r}$$



Antonio Robson/Arquivo da editora

Figura 7.6. O campo magnético $\vec{B}$, criado por uma corrente i, a uma distância r do fio é tal que $B \propto i$ e $B \propto \left(\frac{1}{r}\right)$. À medida que r aumenta ($r_1 < r_2 < r_3$), o campo magnético diminui ($B_1 > B_2 > B_3$).

Exemplo

Um fio retilíneo transporta uma corrente *i* com o sentido indicado na figura 7.7.a.

a) Indique, na figura, a direção e o sentido do campo magnético criado pelo fio nos pontos *M* e *N*.

Aplicando a regra de Ampère, concluímos que em *M* temos um campo magnético perpendicular à folha de papel e penetrando nela, como mostra a figura 7.7.b. Vemos, ainda, que no ponto *N* o vetor $\vec{B}$ está saindo da folha de papel.

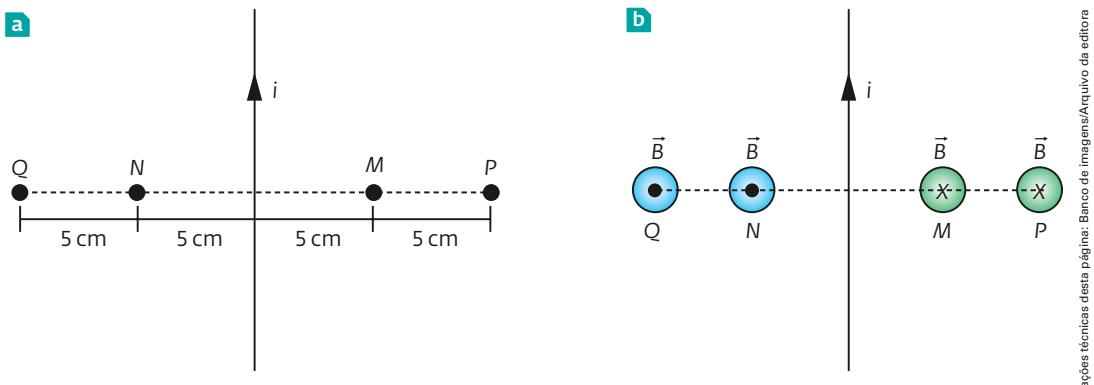
b) Sabendo-se que o módulo do campo magnético nos pontos *M* e *N* é $B = 4{,}0 \cdot 10^{-4}$ T, quais serão o módulo, a direção e o sentido do campo magnético nos pontos *P* e *Q*?

A própria regra de Ampère nos mostra que em *P* e *Q* teremos o vetor $\vec{B}$ com as orientações mostradas na figura 7.7.b.

Observemos, agora, que os pontos *P* e *Q* estão situados a uma distância do fio duas vezes maior do que os pontos *M* e *N*. Como $B \propto \frac{1}{r}$, concluímos que em *P* e *Q* o módulo de $\vec{B}$ será duas vezes menor do que em *M* e *N*. Logo, em *P* e *Q* teremos:

$$B = \frac{4{,}0 \cdot 10^{-4}}{2} \quad \text{ou} \quad B = 2{,}0 \cdot 10^{-4}\ \text{T}$$

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



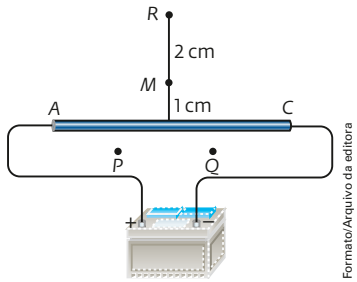
Ilustrações técnicas desta página: Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 7.7. Para o exemplo da seção 7.1.

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

1. Em *P* e *Q*: entrando na folha de papel; em *M* e *R*: saindo da folha de papel.

1. Considerando a figura deste exercício, indique a direção e o sentido do campo magnético criado pelo fio *AC* nos pontos *P*, *Q*, *M* e *R*.



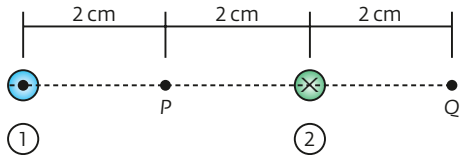
Formato/Arquivo da editora

2. No exercício anterior, considere que o valor do campo magnético em *M* seja $B_M = 6{,}0 \cdot 10^{-4}$ T. Supondo que a intensidade da corrente no fio *AC* tenha sido duplicada, responda qual será, então:

a) o valor do campo magnético em *M*. $1{,}2 \cdot 10^{-3}$ T

b) o valor do campo magnético em *R*. $4{,}0 \cdot 10^{-4}$ T

3. A figura deste exercício representa dois condutores retilíneos horizontais, (**1**) e (**2**), vistos em corte, transportando as correntes $i_1 = 30$ A e $i_2 = 15$ A com os sentidos ali indicados. Considerando o ponto *P* da figura:



a) Indique a direção e o sentido de cada um dos campos magnéticos $\vec{B}_1$ e $\vec{B}_2$ criados pelos fios (**1**) e (**2**) nesse ponto.

b) Sabendo-se que $B_1 = 3{,}0 \cdot 10^{-4}$ T, qual será, então, o módulo de $\vec{B}_2$?

c) Determine o módulo, a direção e o sentido do campo magnético resultante, $\vec{B}$, estabelecido pelos dois fios no ponto *P*.

3. a) Ambos são verticais, para cima.
b) $B_2 = 1{,}5 \cdot 10^{-4}$ T
c) $B = 4{,}5 \cdot 10^{-4}$ T, vertical, para cima.

Não escreva no livro!

7.2 Campo magnético no centro de uma espira circular

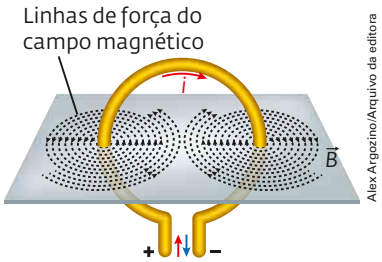
As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

Direção e sentido do vetor $\vec{B}$

Consideremos um fio condutor ao qual foi dada a forma de uma circunferência, denominada **espira circular**. Se essa espira for percorrida por uma corrente elétrica, como mostra a **figura 7.8**, essa corrente irá estabelecer um campo magnético no espaço em torno da espira. Entretanto, vamos examinar apenas o campo magnético em seu centro.

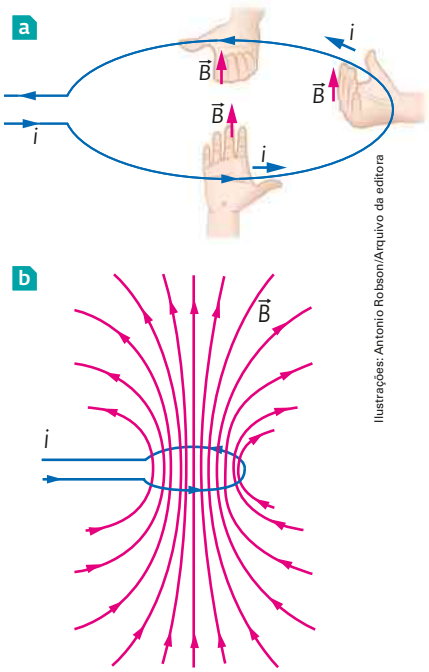
Para fazer esse estudo, coloquemos uma pequena agulha magnética no centro da espira. Observando sua orientação, verificamos que o vetor $\vec{B}$ nesse ponto é perpendicular ao plano da espira e tem o sentido indicado na **figura 7.8**.

A regra prática de Ampère pode ser usada também aqui para determinar o sentido do campo magnético. Na **figura 7.9**, usando essa regra, vemos que ela nos fornece corretamente o sentido do vetor $\vec{B}$, que coincide com o sentido indicado na **figura 7.8**. Se invertermos o sentido da corrente, verificaremos que o vetor $\vec{B}$ continua perpendicular ao plano da espira, porém tem o seu sentido invertido.



Alex Argozino/Arquivo da editora

Figura 7.8. Campo magnético criado no centro de uma espira circular na qual passa uma corrente elétrica.



Ilustrações: Antonio Robson/Arquivo da editora

Figura 7.9. A regra de Ampère pode ser usada para determinar o sentido de $\vec{B}$ também neste caso (**a**) e para mapear a disposição das linhas de indução (**b**).

Fatores que influenciam o módulo de $\vec{B}$

Analisando o módulo B do campo magnético, no centro de uma espira circular, verificou-se que o seu valor é proporcional à intensidade da corrente na espira, como acontecia no caso de um condutor retilíneo. Além disso, constatou-se que, quanto maior é a espira, menor é o valor do campo magnético em seu centro, ou seja, verificou-se que B é inversamente proporcional ao raio R da espira. Assim, em resumo, temos:

1º) B é diretamente proporcional a i: $B \propto i$.

2º) B é inversamente proporcional a R: $B \propto \frac{1}{R}$.

Assim, podemos concluir que a seguinte relação é válida para o valor do campo magnético no centro de uma espira circular:

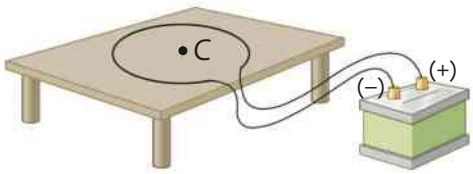
$$B \propto \frac{i}{R}$$

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

4. Observe a figura para solucionar os itens abaixo.

a) Uma espira circular, colocada sobre uma mesa horizontal, está ligada a uma bateria, como mostra a figura deste exercício. Usando a regra de Ampère, determine a direção e o sentido do campo magnético no centro C da espira. Vertical, para cima.

b) Suponha que o módulo do campo magnético no ponto C fosse $B = 2{,}0 \cdot 10^{-4}$ T. Qual seria o valor desse campo se a intensidade da corrente no fio fosse duplicada e o raio da espira fosse reduzido à metade? $8{,}0 \cdot 10^{-4}$ T



Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Não escreva no livro!

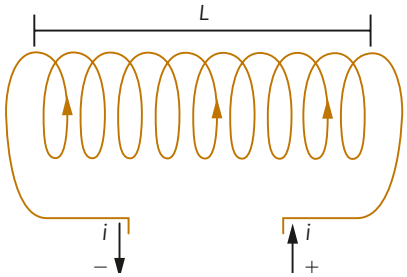
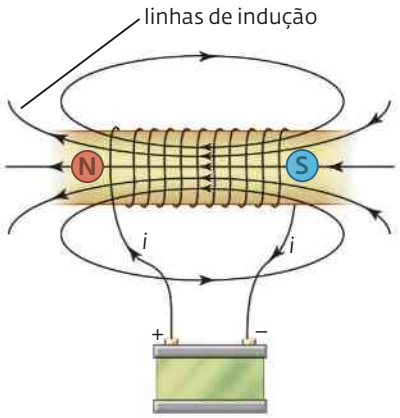
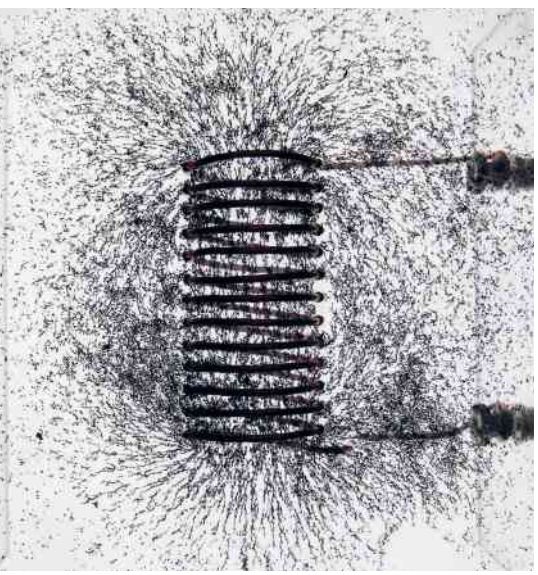


Figura 7.10. Um solenoide é constituído por um condutor enrolado de modo que forme espiras sucessivas.



Ilustrações: Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura 7.11. Linhas de indução do campo magnético criado por uma corrente que passa por um solenoide.



Reprodução/<https://sharepoint.umich.edu>

Figura 7.12. Materialização das linhas de indução do campo magnético criado por um solenoide, usando limalhas de ferro.

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

7.3 Campo magnético de um solenoide

O que é um solenoide

Um condutor enrolado de modo que forme um conjunto de *N* espiras sucessivas, praticamente circulares, como o mostrado na **figura 7.10**, é denominado **solenoide**. A palavra "bobina" pode ser usada como sinônimo de solenoide, embora, na realidade, bobina seja um termo mais geral, que designa qualquer tipo de enrolamento.

Ligando-se o solenoide a uma bateria, uma corrente elétrica circulará por suas espiras, estabelecendo um campo magnético em pontos tanto do interior quanto do exterior da bobina. Na **figura 7.11** estão apresentadas algumas linhas de indução desse campo magnético.

Na fotografia mostrada na **figura 7.12** podemos observar essas linhas de indução, obtidas por meio de limalhas de ferro distribuídas no campo magnético.

Comparando as **figuras 7.11** e **6.18**, observamos que o campo magnético de um solenoide apresenta uma configuração muito semelhante à de um ímã em forma de barra. Portanto, um solenoide possui praticamente as mesmas propriedades magnéticas de um ímã. Por exemplo, um solenoide percorrido por uma corrente, suspenso de maneira que possa girar livremente, orienta-se na direção norte-sul.

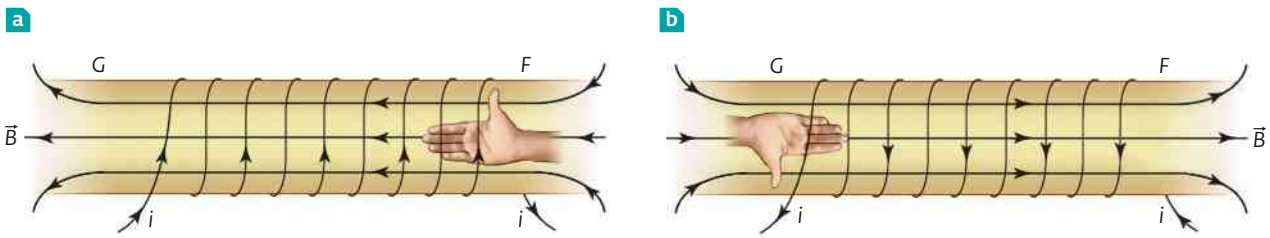
Além disso, suas extremidades se comportam como os polos de um ímã, como está representado na **figura 7.11**; a extremidade da qual as linhas de indução estão emergindo se comporta como um polo norte e a extremidade na qual elas penetram no solenoide se comporta como um polo sul. Por esse motivo, podemos dizer que o solenoide constitui um **eletroímã**, isto é, um ímã obtido por meio de uma corrente elétrica.

Direção e sentido de $\vec{B}$ no interior do solenoide

Conforme podemos perceber pela fotografia da **figura 7.12**, as linhas de indução no interior do solenoide são paralelas ao seu eixo, isto é, o vetor $\vec{B}$, em qualquer ponto do interior do solenoide, tem aquela direção.

Para determinar o sentido de $\vec{B}$ nesses pontos, podemos usar a regra de Ampère. Considerando a espira de uma das extremidades da bobina e dispondo o polegar no sentido da corrente, os demais dedos indicarão se as linhas de indução, nessa extremidade, estão entrando no solenoide ou saindo dele.

Por exemplo, na **figura 7.13.a** os dedos indicam que as linhas de indução estão penetrando na extremidade *F* da bobina e, portanto, o campo magnético no interior do solenoide está dirigido de *F* para *G*. Invertendo-se o sentido da corrente nas espiras, o sentido do campo magnético no interior do solenoide também se inverterá, como nos mostra a aplicação da regra de Ampère feita na **figura 7.13.b**.



Antonio Robson/Arquivo da editora

Figura 7.13. Aplicação da regra de Ampère para determinação do sentido das linhas de indução do campo magnético de um solenoide. Representação sem escala e em cores fantasia.

Fatores que influenciam o módulo de $\vec{B}$

Consideremos um solenoide bastante comprido em comparação com o diâmetro de suas espiras. Verifica-se que em pontos do interior desse solenoide, não muito próximos de suas extremidades, o campo magnético é uniforme, isto é, o vetor $\vec{B}$ é praticamente o mesmo em qualquer um desses pontos.

Como ocorre com os campos magnéticos estudados nas seções anteriores, observamos que o módulo de $\vec{B}$ no interior do solenoide é proporcional à intensidade da corrente que circula em suas espiras. Além disso, um outro fator importante tem influência no valor de $\vec{B}$: o número de espiras por unidade de comprimento, que vamos representar por n. Esse número é obtido dividindo-se o número total, N, de espiras pelo comprimento, L, do solenoide **(figura 7.10)**, isto é, $n = N/L$. Verifica-se que o valor de $\vec{B}$ no interior do solenoide é proporcional a n. Então, temos:

1º) B é diretamente proporcional a i: $B \propto i$.

2º) B é diretamente proporcional a n: $B \propto n$.

Logo, podemos escrever:

$$B \propto ni$$

Chamamos a atenção para o fato de que o valor de $\vec{B}$ no interior de um solenoide comprido não é influenciado pelo raio de suas espiras.

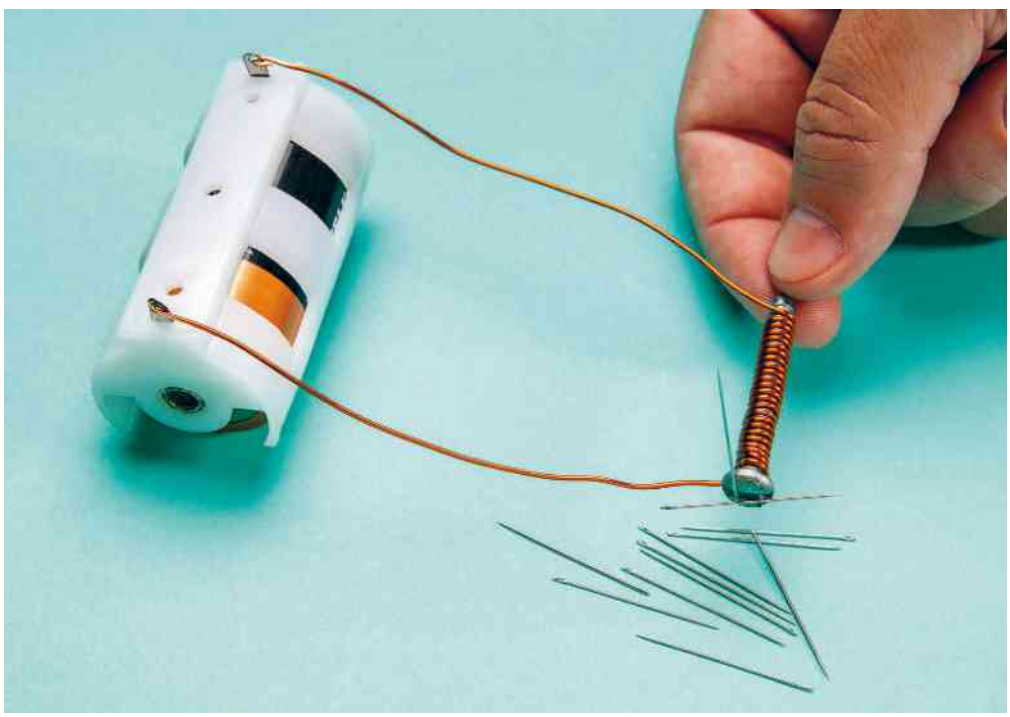

Sérgio Dotta Jr./Arquivo da editora

Figura 7.14. Podemos construir um solenoide enrolando um fio de cobre em um prego de ferro, que será o núcleo da bobina. Ao ligarmos o circuito, a corrente elétrica atravessa o fio transformando-o em um ímã que atrai objetos metálicos.

Em resumo, podemos destacar:

O campo magnético no interior de um solenoide comprido (em pontos afastados de suas extremidades) é uniforme, paralelo ao eixo do solenoide e orientado com um sentido que pode ser obtido pela regra de Ampère (figura 7.13). O módulo, *B*, desse campo é proporcional à intensidade da corrente, *i*, nas espiras e ao número de espiras por unidade de comprimento, *n*, do solenoide, isto é:

$$B \propto ni$$

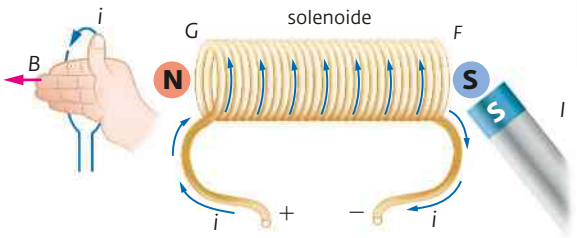
As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

Exemplo

Um solenoide *FG* é percorrido por uma corrente elétrica no sentido indicado na figura 7.15. Aproximando-se da extremidade *F* do solenoide o polo sul de um ímã *I*, esse polo será atraído ou repelido por aquela extremidade?

Aplicando a regra de Ampère a uma espira da extremidade do solenoide, determinaremos o sentido do campo magnético em seu interior.

Na figura 7.15, essa regra foi aplicada à espira da extremidade *G*, mostrando que as linhas de indução estão saindo desta extremidade. Então, *G* se comporta como um polo norte e, consequentemente, *F* se comportará como um polo sul. Nessas condições, concluímos que o ímã será repelido ao ter o seu polo sul aproximado de *F*.



Antonio Robson/Arquivo da editora

Figura 7.15. Para o exemplo da seção 7.3.

Verifique o que aprendeu

Não escreva no livro!

5. Um solenoide *FG*, percorrido por uma corrente elétrica, foi suspenso para poder girar livremente. Observou-se que ele se orientava na direção norte-sul, com sua extremidade *F* voltada para o norte geográfico da Terra.

a) A extremidade *F* desse eletroímã está se comportando como um polo norte ou como um polo sul? Polo norte.

b) Então, o campo magnético no interior do solenoide está dirigido de *G* para *F* ou de *F* para *G*? De *G* para *F*.

6. Duas bobinas, (1) e (2), cada uma com 100 espiras e cujos comprimentos são $L_1 = 20$ cm e $L_2 = 40$ cm, são ligadas em série aos polos de uma bateria. Igual.

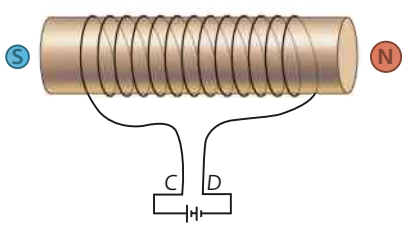
a) A corrente que passa na bobina (1) é maior, menor ou igual à que passa na bobina (2)?

b) O campo magnético B_1, no interior da bobina (1), é maior, menor ou igual ao campo magnético B_2 no interior da bobina (2)?

b) Maior.

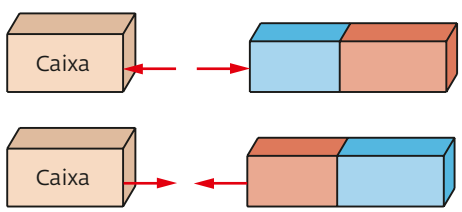
c) Sabendo-se que $B_1 = 6{,}0 \times 10^{-3}$ T, qual é o valor de B_2? $B_2 = 3{,}0 \times 10^{-3}$ T

7. Uma mola metálica foi ligada aos polos *C* e *D* de uma bateria, verificando-se que suas extremidades se comportavam como polos norte e sul, como está indicado na figura deste exercício. Determine, então, qual é o polo positivo da bateria. *D*



Paulo César Pereira/Arquivo da editora

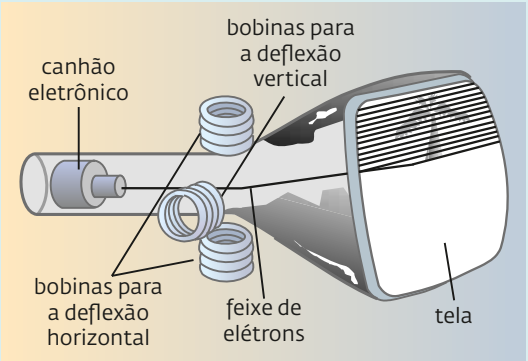
8. Quando aproximamos um ímã da caixa mostrada na figura, o ímã e a caixa se atraem ou se repelem, dependendo do polo do ímã que estiver perto da caixa. Qual (ou quais) componente(s) magnético(s) pode(m) existir no interior da caixa? Um ímã, uma bobina ou um solenoide.



APLICAÇÕES DA FÍSICA

Como se forma a imagem em um tubo de TV

Em breve as futuras gerações só ouvirão falar das TVs de tubo nos livros e museus. Entretanto, as TVs de tubo com imagens em preto e branco já foram um dos objetos de consumo mais cobiçados pela sociedade brasileira. Inventadas na década de 1920, as TVs de tubo comandariam a vida das famílias brasileiras por meio de sua programação e dos intervalos comerciais nas décadas de 1960 e 1970, quando os preços se tornaram acessíveis devido à expansão e à produção em larga escala dos eletrodomésticos. A **figura 7.16** mostra o esquema de um desses tubos, que é constituído essencialmente das seguintes partes:



Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura 7.16. A imagem, em um aparelho de TV, é formada em virtude do impacto de elétrons sobre a tela fluorescente. Representação sem escala e em cores fantasia.

- um canhão eletrônico, situado no extremo posterior do tubo, que é um dispositivo que emite um feixe de elétrons, acelerados por uma alta-tensão de vários milhares de volts;
- um par de bobinas, que cria um campo magnético horizontal, e outro par, que cria um campo magnético vertical. O feixe de elétrons **(figura 7.16)** passa entre essas bobinas, sendo, então, defletido horizontal e verticalmente pelas forças exercidas por esses campos magnéticos (quando não há corrente nas bobinas, o feixe atinge o centro da tela);
- uma tela, coberta com material fluorescente, que é atingido pelo feixe de elétrons, após ser defletido pelos campos magnéticos.

O impacto dos elétrons contra a tela produz uma pequena mancha luminosa em cada ponto atingido.

Os campos magnéticos das bobinas defletoras mudam periodicamente de sentido, fazendo o feixe de elétrons percorrer, com enorme velocidade, toda a tela, de cima para baixo e da direita para a esquerda (dizemos que o feixe de elétrons varre toda a tela). Quando o aparelho de TV não está sintonizado em nenhum canal, essa varredura dá origem a um brilho praticamente uniforme na tela.

Ao sintonizarmos um determinado canal, os sinais captados pela antena modificam a varredura, fazendo com que certas partes da tela fiquem mais claras (recebam mais elétrons) e outras fiquem mais escuras (recebam menor número de elétrons). Com essas gradações de intensidade luminosa sobre a tela, são formadas as imagens em preto e branco, emitidas pelo canal sintonizado.

Com a evolução tecnológica, as TVs de tubo foram substituídas por aparelhos mais modernos. Atualmente as TVs são de tela plana de cristal líquido e LED (do inglês *Light Emitting Diode*), que utilizam técnicas diferentes para compor a imagem na tela. Em vez de criar a imagem linha por linha, essas TVs possuem uma grade com pontos que se acendem ou apagam um de cada vez, como as das TVs de tubo, porém sem a necessidade de uma varredura completa da tela. Com isso, é possível obter uma qualidade de imagem muito superior.

QUESTÕES

1. Explique a diferença entre a formação da imagem em um aparelho de TV com tubo e nas TVs de LCD, plasma e LED. **1.** Veja resposta no Manual do Professor.

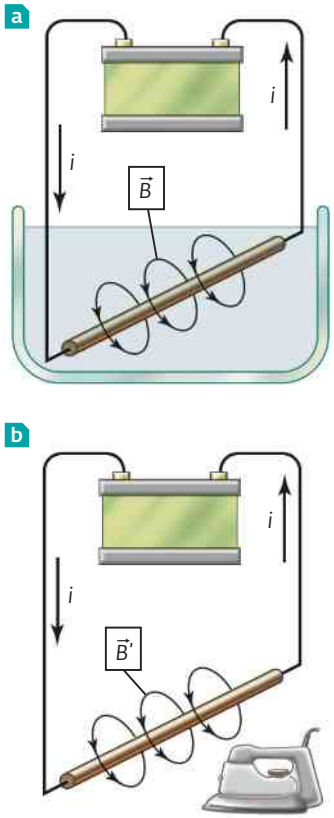
2. No sistema digital, toda a informação é transformada em código binário (interpretado por 0 e 1), e depois decodificada pelo aparelho de TV transmissor. Com essa mudança, os aparelhos que possuem somente um decodificar analógico necessitam de um decodificar digital. Pesquise a finalidade e o funcionamento desse decodificador. **2.** Veja resposta no Manual do Professor.

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

7.4 Influência do meio no valor do campo magnético

Nas seções anteriores analisamos os campos magnéticos criados por condutores de formas diversas sem, entretanto, nos referirmos ao **meio** no qual esses fios condutores estavam inseridos. O estudo foi feito supondo os condutores situados no ar (rigorosamente falando, os condutores deveriam estar no vácuo, mas a diferença entre as duas situações – ar e vácuo – é insignificante).

Suponhamos, agora, que o condutor esteja mergulhado em um meio material **(figura 7.17.a)** ou que um objeto qualquer seja aproximado dele **(figura 7.17.b)**. Verifica-se que, nesses casos, o valor do campo magnético em torno do fio é diferente daquele que existiria se o condutor estivesse situado no ar. Portanto, a presença de um meio material provoca modificações no campo magnético criado por uma corrente elétrica. A seguir, faremos uma análise dessas modificações, procurando entender como e por que elas ocorrem.



Ilustrações: Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura 7.17. A presença de um meio material (**a**) ou de um objeto (**b**) provoca alterações no valor do campo magnético criado por uma corrente elétrica.

Imantação de um material

Quando um campo magnético atua em um meio material qualquer, esse meio sofre uma modificação e dizemos que ele se magnetiza ou se **imanta**.

Para entendermos em que consiste essa magnetização, sob uma perspectiva semiclássica, supõe-se a existência de correntes elétricas elementares internas à estrutura da matéria. Essas correntes elétricas seriam responsáveis pela origem do campo magnético, em um modelo em que se admitisse a possibilidade de ímãs elementares; similarmente à proposição de Ampère no século XIX.

No interior de um material em seu estado normal (não magnetizado), esses ímãs elementares encontram-se orientados inteiramente ao acaso **(figura 7.18.a)**, de modo que os campos magnéticos criados pelos átomos da substância tendem a se anular. Sendo nulo o campo magnético resultante estabelecido pela totalidade desses ímãs elementares, a substância não apresentará nenhum efeito magnético.

Entretanto, se esse material for colocado dentro de um campo magnético $\vec{B}$, este atuará sobre os ímãs elementares, tendendo a orientá-los, como está mostrado na **figura 7.18.b**. Em virtude dessa orientação, os campos magnéticos elementares dos átomos se reforçam e o material passa a apresentar efeitos magnéticos externos perceptíveis.

Nessas condições, dizemos que a substância está imantada ou magnetizada, isto é, o material passa a ser um ímã com os polos norte e sul localizados nas posições indicadas na **figura 7.18.b**. Assim, a transformação de um pedaço de ferro comum em um ímã ocorre em razão da orientação dos ímãs elementares constituídos pelos átomos do pedaço de ferro.

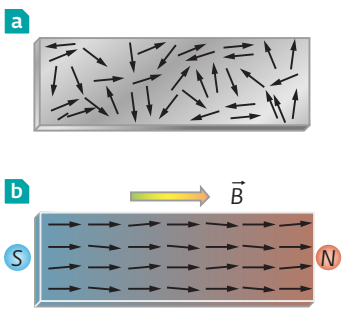


Figura 7.18. Em uma barra não imantada os ímãs elementares estão orientados ao acaso (**a**). Se a barra é colocada em um campo magnético, esses ímãs elementares se orientam paralelamente ao campo (**b**).

Podemos, agora, entender por que, nas duas situações apresentadas na **figura 7.17**, o campo magnético em torno do fio foi alterado pela presença dos meios materiais. De fato, o campo magnético criado pela corrente provoca magnetização do meio material.

Consequentemente, o campo magnético em torno do fio passa a ser uma superposição do campo criado pela corrente e o criado pelo material magnetizado. Como no vácuo (ou no ar) o campo magnético se deve apenas à corrente elétrica, fica entendido por que a presença do meio material modifica o campo magnético em torno do fio.

Materiais paramagnéticos e diamagnéticos

Experiências realizadas mostraram que a presença de grande parte das substâncias existentes na natureza provoca alteração muito pequena no campo magnético. Isso ocorre porque, ao serem colocadas em um campo magnético, essas substâncias se magnetizam fracamente. Materiais como o papel, o cobre, o alumínio, o chumbo, etc. comportam-se dessa maneira, e é por isso que não conseguimos construir ímãs com esses materiais.

Uma análise mais cuidadosa permitiu verificar que essas substâncias podem ser separadas em dois grupos distintos:

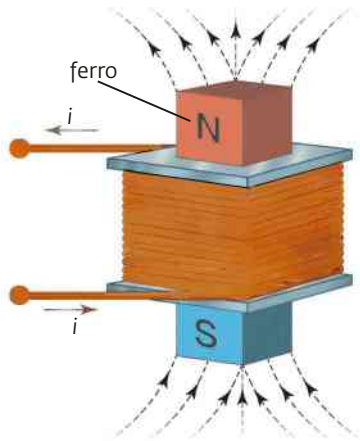
1º) **Substâncias paramagnéticas** — são aquelas que, ao serem colocadas em um campo magnético, magnetizam-se de maneira a provocar um pequeno **aumento** no valor desse campo em um ponto qualquer. Nessas substâncias, os ímãs elementares tendem a se orientar no mesmo sentido do campo aplicado **(figura 7.18.b)**. Portanto, o campo magnético estabelecido por elas terá o mesmo sentido desse campo aplicado, fazendo com que o campo resultante tenha um valor um pouco **maior** do que o inicial. O alumínio, o magnésio, a platina, o sulfato de cobre, etc. são exemplos conhecidos de substâncias paramagnéticas.

2º) **Substâncias diamagnéticas** — essas substâncias, ao serem colocadas em um campo magnético, têm seus ímãs elementares orientados em sentido **contrário** ao do campo aplicado. Dessa maneira, elas estabelecem um campo magnético em sentido contrário ao desse campo aplicado, fazendo com que o campo resultante tenha um valor um pouco **menor** do que o inicial. Podemos citar, como exemplos típicos de substâncias diamagnéticas, o bismuto, o cobre, a água, a prata, o ouro, o chumbo, etc.

Materiais ferromagnéticos

Um pequeno grupo de substâncias na natureza apresenta um comportamento bastante diferente daqueles que acabamos de descrever. Essas substâncias, denominadas substâncias ferromagnéticas, ao serem colocadas em um campo magnético, se magnetizam fortemente, de modo que o campo magnético que elas estabelecem é muitas vezes maior do que o campo aplicado. Verifica-se que, em virtude da presença de uma substância ferromagnética, o campo magnético resultante pode se tornar centenas e até mesmo milhares de vezes maior do que o inicial.

Exemplos de substâncias ferromagnéticas são o ferro, o cobalto, o níquel e as ligas que contêm esses elementos. Essa propriedade das substâncias ferromagnéticas é aproveitada quando desejamos obter campos magnéticos de valores elevados. Por exemplo: é comum colocar um pedaço de ferro no interior de uma bobina, como está mostrado na **figura 7.19**.



Paulo César Pereira/Arquivo da editora

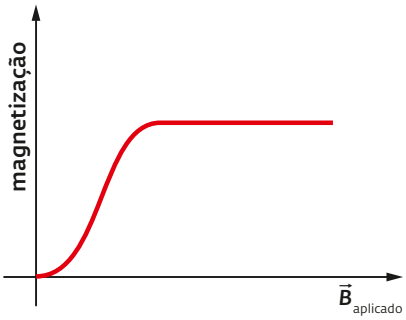
Figura 7.19. Uma bobina com núcleo de ferro constitui um eletroímã. Representação sem escala e em cores fantasia.

Em virtude da magnetização desse pedaço de ferro, o campo magnético resultante é muitas vezes maior do que o criado apenas pela corrente que passa na bobina. Esse conjunto (bobina + pedaço de ferro) constitui, então, um eletroímã muito forte, sendo o pedaço de ferro denominado **núcleo do eletroímã**.



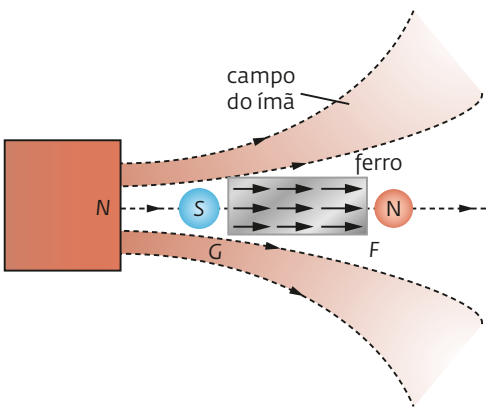
Paul Ridsdale pictures/Alamy/Latinstock

Figura 7.20. Um guindaste de eletroímã pode transportar cargas muito pesadas.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 7.21. Diagrama mostrando o aumento da magnetização de uma substância ferromagnética em razão do aumento do campo magnético $\vec{B}$.



Formato/Arquivo da editora

Figura 7.22. Pedaço de ferro colocado nas proximidades do polo norte de um ímã. Representação sem escala e em cores fantasia.

Os eletroímãs encontram uma série de aplicações na ciência e na tecnologia. Uma dessas aplicações é mostrada na fotografia da **figura 7.20**: este guindaste, constituído por um poderoso eletroímã, é usado no transporte de cargas muito pesadas.

O grande aumento que uma substância ferromagnética provoca no campo magnético ao se magnetizar é causado pelo elevado grau de alinhamento que ocorre em seus ímãs elementares. Esse alinhamento, isto é, a magnetização da substância, é tanto maior quanto maior for o campo aplicado nela, podendo chegar a uma situação na qual praticamente todos os seus ímãs elementares fiquem alinhados.

Nesta situação, a magnetização da substância atinge seu valor máximo; a partir daí, ela permanece constante, mesmo que seja aumentado o valor do campo magnético aplicado. Esse comportamento de uma substância ferromagnética está ilustrado no gráfico da **figura 7.21**.

A magnetização de um material ferromagnético é tanto menor quanto maior for a sua temperatura. A elevação da temperatura do material provoca um aumento na agitação térmica de seus átomos, dificultando, então, o alinhamento dos ímãs elementares por eles constituídos. Portanto, a elevação da temperatura de um material ferromagnético dificulta a sua magnetização.

Podemos resumir o comportamento magnético das substâncias da seguinte maneira:

A grande maioria das substâncias na natureza é paramagnética ou diamagnética:
substâncias paramagnéticas — são aquelas que, na presença de um campo magnético, se magnetizam muito fracamente, fazendo com que o valor desse campo seja ligeiramente aumentado.

substâncias diamagnéticas — são aquelas que, em presença de um campo magnético, se magnetizam também fracamente, fazendo, porém, com que o valor desse campo se torne ligeiramente menor.

O ferro, o cobalto, o níquel e suas ligas são substâncias ferromagnéticas — sob a ação de um campo magnético, essas substâncias se magnetizam fortemente, fazendo com que o campo magnético resultante seja muitas vezes maior do que o aplicado.

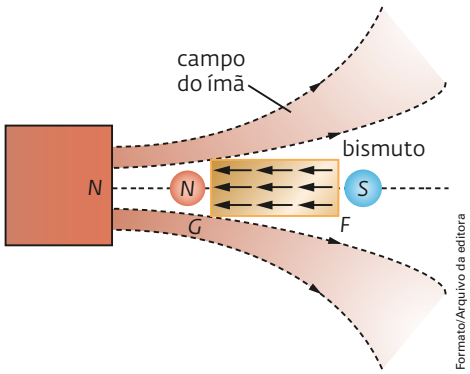
Atração entre um ímã e um pedaço de ferro

Um pedaço de ferro qualquer, como um prego, por exemplo, é atraído pelos polos de um ímã. Para entender por que isso ocorre, considere que um pedaço de ferro *FG*, inicialmente não magnetizado, seja colocado próximo ao polo norte de um ímã, como mostra a **figura 7.22**.

O campo magnético do ímã magnetiza esse pedaço de ferro de tal modo que seus ímãs elementares ficam alinhados no sentido do campo aplicado (**figura 7.22**). Em outras palavras, o pedaço de ferro se transforma em um ímã, cujos polos norte e sul estão localizados, respectivamente, nas extremidades *F* e *G*. Assim, o pedaço de ferro é atraído pelo polo norte do ímã porque sua extremidade *G*, situada mais próxima desse polo, é um polo sul.

Suponha, agora, que uma barra de uma substância diamagnética fosse aproximada do polo norte do ímã. Nesse caso, a substância se magnetizaria com seus ímãs elementares orientados em sentido contrário ao do campo aplicado, como mostram as **figuras 7.23** e **7.24**. Assim, a extremidade *G* se comportaria como um polo norte e a barra seria **repelida** pelo ímã.

Esse comportamento foi observado pela primeira vez por Michael Faraday, no século XIX. Aproximando uma amostra de bismuto (substância diamagnética) de um dos polos de um ímã, Faraday verificou que ela era **repelida** por esse polo, ao contrário do que acontecia com pedaços de ferro, como ele estava acostumado a observar.



Formato/Arquivo da editora

Figura 7.23. Amostra de bismuto colocada nas proximidades do polo norte de um ímã.


Phil Degginger/Alamy/Latinstock

Figura 7.24. Por ação do campo magnético do ímã, os clipes situados próximo a seu polo norte se magnetizam e seus ímãs elementares se orientam. Então, eles se comportam como ímãs, com os polos na sequência indicada, cada um atraindo o seguinte, e permanecendo suspensos na barra magnética.

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

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

Não escreva no livro!

9. a) Semelhante à figura 7.22, mas as linhas entram no polo sul do ímã.

9. Um pedaço de ferro *FG* é colocado próximo ao polo sul de um ímã, como mostra a figura deste exercício.

a) Trace, em uma cópia da figura, no caderno, algumas linhas de indução do campo magnético criado pelo ímã.

b) Desenhe no caderno alguns ímãs elementares do pedaço de ferro, mostrando sua orientação. Orientados de *F* para *G*.

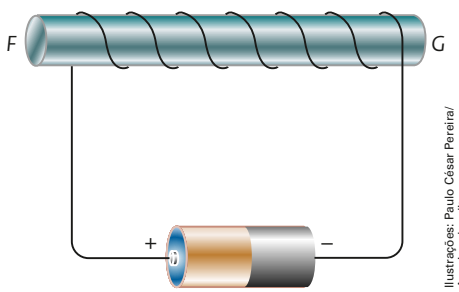
c) Então, a extremidade *G* do pedaço de ferro será um polo norte ou um polo sul? Polo norte.

d) O pedaço de ferro será atraído ou repelido pelo ímã? Atraído.

10. Responda às questões **b**, **c** e **d** do exercício anterior, supondo, agora, que a barra *FG* seja feita de um material diamagnético.

10. b) Orientado de *G* para *F*.
c) Polo sul.
d) Repelida.

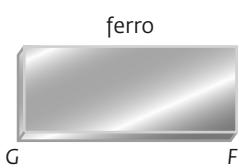
11. Como vimos, podemos obter um eletroímã se enrolarmos um fio condutor em torno de uma barra de ferro e fizermos passar uma corrente contínua nesse fio. Na figura deste exercício, que apresenta um eletroímã assim obtido, diga onde se localizam os seus polos norte e sul. Polo norte em *G* e polo sul em *F*.



Ilustrações: Paulo César Pereira/Arquivo da editora

12. Porque a elevação de temperatura provoca um aumento da agitação térmica, desfazendo a orientação dos ímãs elementares.





12. Um ímã permanente pode perder totalmente sua imantação se for muito aquecido. Por quê?

FÍSICA NO CONTEXTO

A MAGNETOSFERA

A partir da exploração espacial foi possível descobrir a existência dos cinturões de Van Allen ao redor do planeta Terra. Esses cinturões são formados por nuvens de partículas carregadas e estão localizados, de maneira não uniforme, na faixa de 1 000 km a 60 000 km da Terra. Os satélites artificiais que foram lançados mostraram ainda que a magnetosfera terrestre **(figura 7.25)**, região do campo magnético que envolve a Terra, cria um escudo protetor (em azul) para o planeta, pois afasta a radiação da região equatorial concentrando uma maior intensidade de partículas carregadas nos polos. A magnetosfera ainda sofre influência do movimento da própria Terra e do fluxo de partículas carregadas que emanam do Sol, conhecido como "vento" solar. Com isso, a compressão da magnetosfera pode afetar o funcionamento de satélites e sistemas GPS, além de ser responsável por blecautes de rádio, falhas em circuitos elétricos, comportamento errático de bússolas e auroras boreais e austrais.

Steele Hill/NASA/SPL/Latinstock

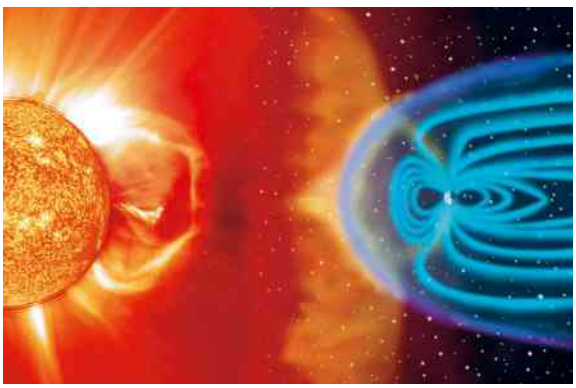


Figura 7.25. Efeito do vento solar sobre a magnetosfera da Terra. Concepção artística.

Aurora boreal e aurora austral

A aurora boreal e a austral são belos espetáculos de luz e cores, que podem ser observados na atmosfera, nas proximidades dos polos norte e sul da Terra **(figura 7.26)**.

Os termos "aurora boreal" e "aurora austral" significam, respectivamente, "luzes do norte" e "luzes do sul". Esses fenômenos são conhecidos desde a Antiguidade, sendo mencionados na mitologia dos esquimós e de outros povos, que lhes atribuíam origem sobrenatural. Podem apresentar-se com variadas formas (cortinas, arcos, raios, etc.) e cores.

Design Pics Inc/Alamy/Latinstock



Figura 7.26. A aurora boreal e a aurora austral são fenômenos atmosféricos que constituem um belo espetáculo de luz e de cores. Fotografia de aurora boreal no Alasca (Estados Unidos), 2015.

A causa das auroras está relacionada com o campo magnético da Terra e uma explicação bem elaborada desse fenômeno só foi possível após o lançamento dos primeiros satélites artificiais. Instrumentos de observação, colocados nesses satélites, permitiram concluir que feixes de partículas eletrizadas (elétrons e prótons), emitidos pelo Sol, são "capturados" pelo campo magnético terrestre ao passarem nas proximidades da Terra e descrevem trajetórias espiraladas nesse campo, como mostra a **figura 7.27**.

Grande número dessas partículas são defletidas em direção aos polos magnéticos da Terra (onde o campo magnético é mais intenso).

Ao atingirem a atmosfera, as partículas colidem principalmente com os átomos e as moléculas de oxigênio e nitrogênio, fazendo com que eles emitam a luz que constitui a aurora.

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

Paulo César Pereira/Arquivo da editora

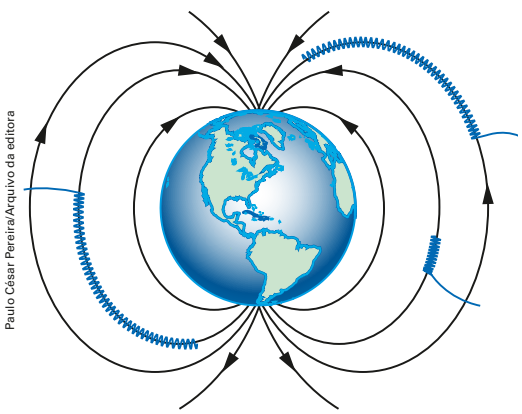


Figura 7.27. Partículas eletrizadas, provenientes do Sol, são "capturadas" pelo campo magnético da Terra.

Veja comentários sobre esta seção no Manual do Professor.

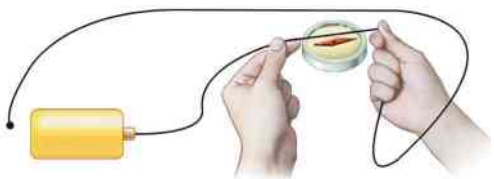
PRATIQUE FÍSICA

EM EQUIPE

Não escreva no livro!

1. Nesta experiência você repetirá as observações feitas por Oersted sobre o desvio de uma agulha magnética quando colocada nas proximidades de uma corrente elétrica. Para fazer previsões sobre o sentido do desvio da agulha, será usada a regra de Ampère, que foi apresentada neste capítulo.

1º) Disponha um fio sobre uma bússola, paralelamente à agulha magnética, e ligue uma de suas extremidades a um dos polos de uma pilha (veja a figura).



Ilustrações: Paulo César Pereira/Arquivo da editora

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

2º) Suponha que a extremidade livre do fio seja encostada no outro polo da pilha (não faça isso por enquanto). Nessas condições, responda:

a) Qual será o sentido do campo magnético, criado pela corrente no fio, no local onde se encontra a bússola? (Use a regra de Ampère.)

b) Então, para qual lado desviará o polo norte da agulha se você fechar o circuito? Feche o circuito e verifique se a previsão estava correta.

c) Inverta o sentido da corrente e repita os procedimentos indicados anteriormente. O desvio da agulha está de acordo com a previsão?

d) Faça o mesmo colocando a bússola, agora, sobre o fio. A agulha desviou no sentido que você havia previsto?

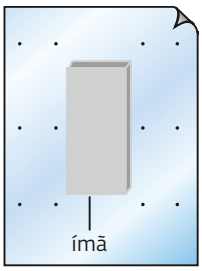
2. Para comparar o campo magnético de um ímã em forma de barra com o criado por uma bobina (solenoide), você poderá proceder da seguinte maneira:

1º) Coloque o ímã sobre uma folha de papel e marque, nessa folha, alguns pontos situados aproximadamente nas posições indicadas na figura **a** desta experiência. Ponha uma pequena bússola sucessivamente em cada um desses pontos. Observando a orientação da agulha magnética, desenhe o vetor $\vec{B}$ criado pelo ímã nos pontos indicados.

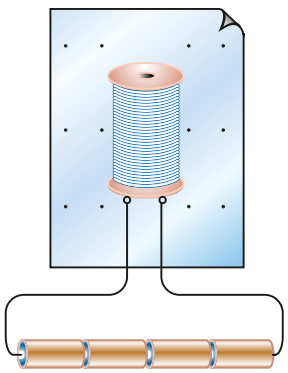
2º) Tome uma bobina com cerca de cem (ou mais) espiras, ligada a uma bateria de pilhas secas (três ou quatro pilhas). Disponha essa bobina sobre uma folha de papel e marque, nessa folha, alguns pontos, de maneira semelhante ao que foi feito para o ímã (veja a figura **b** desta experiência). Com o auxílio da pequena bússola, desenhe o vetor $\vec{B}$ criado pelo solenoide em cada um desses pontos.

Compare as direções e os sentidos dos vetores $\vec{B}$ obtidos nas duas partes desta experiência. Os campos magnéticos criados por um solenoide e por um ímã em forma de barra são realmente semelhantes, como foi afirmado na seção 7.3?

a



b



3. Podemos verificar se uma substância é ferromagnética aproximando dela o polo de um ímã. Como vimos neste capítulo, se a substância for ferromagnética, ela se magnetizará fortemente e será atraída pelo ímã.

Por outro lado, se a substância for paramagnética, ou diamagnética, sua magnetização será tão fraca que a força de atração ou repulsão que o ímã exerce sobre ela não será percebida.

Aproxime um ímã de várias coisas existentes à sua volta: um pedaço de papel, um objeto de plástico, um pedaço de madeira, uma colher, um recipiente de alumínio, a maçaneta de uma porta, um fio de cobre, objetos metálicos de decoração, etc. Baseando-se em suas observações:

a) Indique, entre os objetos observados, aqueles que são ferromagnéticos.

b) Cite quais os metais (ou ligas) testados que não são ferromagnéticos.

Enrole um fio fino (capeado ou esmaltado) em torno de um prego grande, de ferro, de modo a formar uma bobina com cerca de cinquenta espiras. Ligue as extremidades do fio aos polos de uma ou duas pilhas.

INTEGRANDO A FÍSICA E A FORMA COMO OS SERES VIVOS SE ORIENTAM NO ESPAÇO



AfriPics.com/Alamy/Other Images

Figura 7.28. A formiga do deserto em busca de alimento.

Para a maioria dos animais, a locomoção é imprescindível para a sobrevivência. Dependem dela para buscar alimento, fugir de predadores e encontrar melhores condições para se reproduzir **(figura 7.28)**. Surpreendentemente, alguns animais se orientam de uma forma que, para nós, seres humanos, seria possível apenas com o uso de aparatos tecnológicos, como a bússola ou o GPS.

As formigas do deserto...

Dizemos que a luz emitida pelo Sol é não polarizada, pois seus campos elétrico e magnético podem oscilar em qualquer direção perpendicular ao raio de luz. Entretanto, ao passar pela atmosfera e refletir em suas moléculas, os raios de luz que chegam do Sol sofrem polarização, ou seja, seus campos passam a oscilar em poucas ou em uma única direção **(figura 7.29)**.

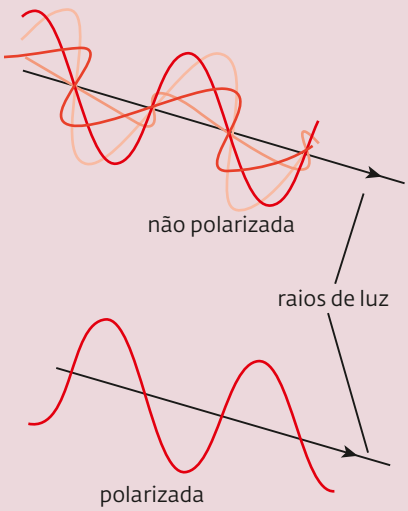


Figura 7.29. Diferença entre luz não polarizada e polarizada.

Nós, seres humanos, não enxergamos a diferença entre luz polarizada e não polarizada, mas as formigas do deserto, por exemplo, percebem. Assim, mesmo em dias nublados, elas sabem qual é a posição do Sol no céu. Combinando essa informação com outras informações sobre o percurso, elas conseguem se orientar com precisão até seu formigueiro, mesmo depois de horas caminhando em direções aleatórias em busca de alimento.

Os morcegos e os pássaros...

Apesar de os morcegos não serem cegos como algumas pessoas acreditam, sua visão tem pouca utilidade nas cavernas escuras onde vivem. Para voar sem colisões, um morcego emite um ultrassom e ouve seu eco: a partir da informação do tempo de ida e volta, é capaz de localizar os obstáculos em que o som foi refletido **(figura 7.30)**. Esse mecanismo de localização ficou conhecido como **ecolocalização**, e também é utilizado por outros seres vivos, como a baleia e o golfinho.

Mas a ecolocalização não explica de que forma os morcegos são capazes de voltar ao ponto de partida após se locomover por grandes distâncias em uma noite. Para tentar entender isso, pesquisadores elaboraram um experimento simples, após conhecerem a rota de um grupo de morcegos. Parte dos morcegos foi colocada em um campo magnético orientado a 90° em relação ao campo magnético terrestre. Esses morcegos, quando liberados, dirigiram-se 90° em relação à rota de costume, "errando" o caminho. Já os morcegos que não foram submetidos ao campo magnético alterado, quando soltos, rumaram diretamente para o local de costume.

Esse resultado sugere que os morcegos são capazes de captar o campo magnético terrestre e utilizar essa informação para decidir em que direção voar, como se tivessem uma bússola interna à sua disposição. Um mecanismo semelhante foi observado em aves. Algumas aves migratórias, por exemplo, voltam ao lugar de origem depois de passar meses em outro continente **(figura 7.31)**. Parece que elas combinam imagens memorizadas com informações da "bússola interna".

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

Ilustrações: Formato/Arquivo da editora

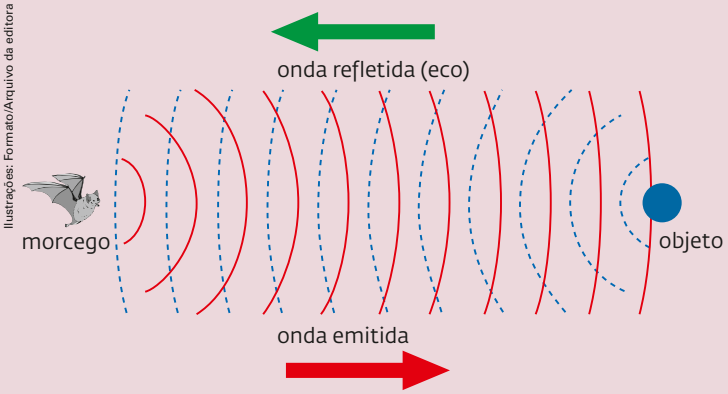


Figura 7.30. Esquema que ilustra o mecanismo da ecolocalização.



Delmas Lehman/View Portfolio/Shutterstock/Glow Images

Figura 7.31. Aves migratórias se orientam pelas linhas de indução do campo magnético terrestre.

O funcionamento desse sensor magnético ainda não é bem compreendido, mas existem alguns indícios. Cristais de ferro foram encontrados no bico de algumas dessas aves. Pesquisadores observaram que esses cristais magnetizados mudam de orientação, dependendo da posição do animal em relação às linhas de indução do campo magnético terrestre, ou seja, esses cristais parecem funcionar como bússolas. Entretanto, não se sabe ao certo como essa informação é percebida e interpretada pelo sistema sensorial da ave.

As bactérias magnetotácticas...

Essas bactérias, assim como ocorre com outros seres vivos, são capazes de precipitar bioquimicamente diferentes minerais. Um deles, a magnetita, é um ferromagnético e, portanto, tende a se alinhar ao campo magnético local. Uma cadeia linear de cristais ferromagnéticos está acondicionada ao longo do comprimento do corpo da bactéria **(figura 7.32)**.

Quando submetidas ao campo magnético terrestre, as forças magnéticas que atuam nessa cadeia provocam um torque que gira o corpo da bactéria, de modo a alinhá-la às linhas de indução deste campo **(figura 7.33)**.

Diferentemente das aves migratórias, diz-se que a resposta da bactéria ao campo magnético é passiva, pois, como a agulha de uma bússola, elas não resistem ao torque provocado por esse campo, girando até que se alinhem as suas linhas de indução. Em virtude da pouca massa que têm, as forças magnéticas da Terra são suficientemente intensas para orientar o corpo da bactéria ponto a ponto de sua trajetória dentro do lago ou pântano em que vive.

Dennis Kunkel Microscopy, Inc./Visuals Unlimited/Corbis/Latinstock

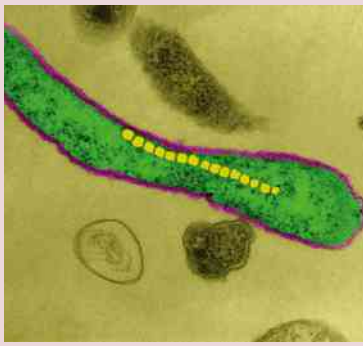


Figura 7.32. Fotomicrografia colorida artificialmente de bactéria magnetotáctica, em que é possível visualizar a cadeia de cristais de magnetita.

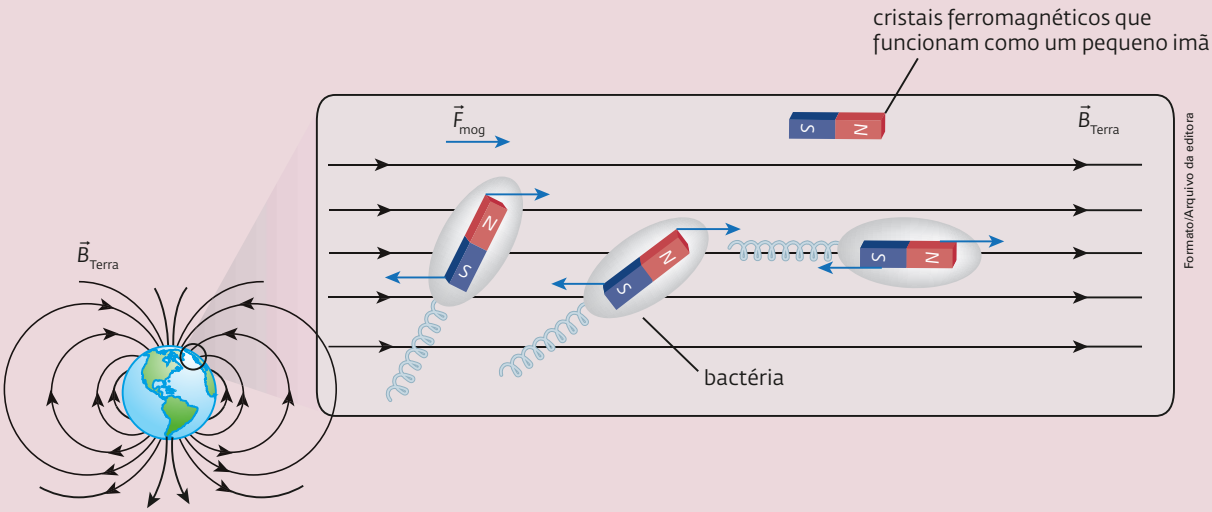


Figura 7.33. A bactéria magnetotáctica se orienta segundo as linhas de indução do campo magnético. Representação sem escala e em cores fantasia.

Pesquise e responda

1. Com base na inclinação do campo magnético terrestre que aprendemos nesta unidade, compare a direção do movimento de bactérias magnetotácticas que vivem em rios e lagos próximo dos polos, com a direção do movimento daquelas que vivem próximo ao equador.

2. O campo magnético terrestre, apesar de interpenetrar e envolver todo o planeta, tem baixa intensidade. Com base nessa informação e recordando seu aprendizado sobre forças e as leis de Newton, discuta com seus colegas se a orientação passiva, como aquela que direciona as bactérias magnetotácticas, seria viável para animais de maior massa, como aves ou morcegos.

1. Em virtude da inclinação da Terra as bactérias nadam na vertical quando estão próximas dos polos do planeta, e praticamente na horizontal quando estão em rios e lagos próximo ao equador terrestre.

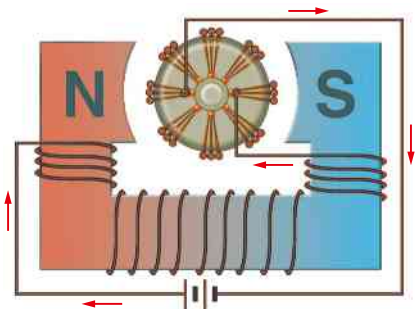
2. As forças magnéticas impostas pelo campo magnético terrestre são de baixa intensidade. Mas, para que morcegos e aves façam manobras em trajetórias curvas, eles precisam estar sujeitos a forças de maior intensidade devido a sua maior massa, comparados às bactérias.

Veja no próximo *Integrando...*

O papel da Física e dos físicos no mundo contemporâneo.

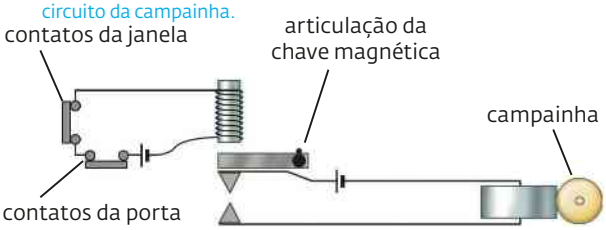
Não escreva no livro!

1. Nos motores elétricos, em geral, o campo magnético é produzido por eletroímãs. A figura abaixo mostra um motor em série, isto é, um motor no qual o circuito das espiras que entram em rotação está em série com a bobina do eletroímã. Invertendo-se a polaridade da bateria que alimenta o motor, o que acontecerá com seu sentido de rotação? Não modificará.



Antonio Robson/Arquivo da editora

2. O diagrama do circuito de um alarme contra roubo, próprio para residências, é apresentado na figura deste problema. Examine os circuitos mostrados no diagrama e explique como funciona esse tipo de alarme.
Ao se abrir a porta ou a janela, o relé é desarmado, fechando-se o circuito da campainha.



Antonio Robson/Arquivo da editora

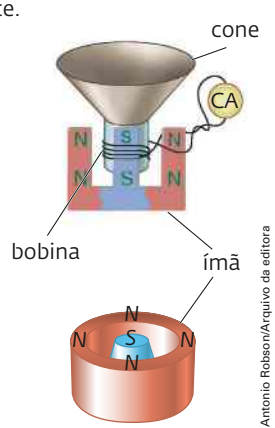
3. A figura deste problema apresenta o esquema de um alto-falante que é utilizado em rádios, TVs e aparelhos de som, em geral, para produzir uma onda sonora a partir de oscilações elétricas. Em síntese, ele é constituído de um ímã permanente fixo e de um cone de papelão que pode oscilar ao longo de seu próprio eixo. Em torno da base do cone, e presa a ela, há uma bobina alimentada por uma corrente elétrica variável (de acordo com o som que se deseja reproduzir).

a) Descreva o que acontece com o cone de papelão quando uma corrente alternada é estabelecida na bobina. Explique por que isso acontece.
3. a) Como a corrente é alternada a extremidade da bobina oscila, para a frente e para trás, ao longo do seu eixo.

b) A onda gerada pelo cone é transversal ou longitudinal? Longitudinal.

c) A frequência do som produzido é maior, menor ou igual à frequência da corrente da bobina? Igual.

d) Ao se variar a intensidade média da corrente na bobina, qual a característica da onda sonora emitida que é alterada? Amplitude.



Antonio Robson/Arquivo da editora

4. Uma pessoa, tentando construir um eletroímã, enrolou um fio em torno de um núcleo de ferro em forma de U, de modo a obter várias espiras em cada ramo desse U, da maneira mostrada na figura deste problema. Ao ligar as extremidades do fio a uma bateria (em bom estado), observou que o campo magnético obtido era praticamente nulo. Observando com atenção a figura, procure explicar por que a pessoa não obteve êxito em sua experiência.

O sentido da corrente nas espiras mostra que, em cada ramo do U, os campos magnéticos têm sentidos contrários.

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


João X. Campos/Arquivo da editora

5. (**UFF-RJ**) A figura 1 representa a vista de cima de uma agulha de bússola colocada sobre uma mesa horizontal e situada na região central de um eletroímã com polos N e S. A orientação da agulha representada nessa figura corresponde ao eletroímã desligado. Ao se ligar o eletroímã, a corrente elétrica que o atravessa gera, na posição onde se encontra a agulha, um campo magnético com intensidade igual à do campo magnético terrestre. d

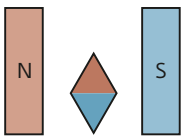
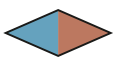
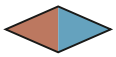


figura 1

Indique, nesse caso, a opção que melhor representa a nova orientação da agulha.

a) 

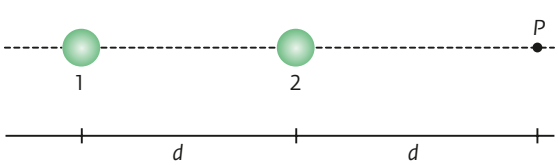
b) 

c) 

d) 

e) 

6. (**Uece**) A figura representa dois fios bastante longos (1 e 2) perpendiculares ao plano do papel, percorridos por correntes de sentido contrário, i_1 e i_2, respectivamente. b



A condição para que o campo magnético resultante, no ponto *P*, seja zero é:

a) $i_1 = i_2$ b) $i_1 = 2i_2$ c) $i_1 = 3i_2$ d) $i_1 = 4i_2$



Stefan Kolumban/Pulsar Imagens

Antenas de transmissão utilizadas em telecomunicações, na cidade de Guaratiba (RJ).

P Resposta pessoal.

P No vácuo, elas se propagam com a mesma velocidade: a da luz.

P Porque as ondas de rádio têm comprimento maior do que a luz visível.

CAPÍTULO 8

Indução eletromagnética – Ondas eletromagnéticas

Em 1938, o cineasta americano George Orson Welles (1915-1985), inspirado pelo romance *A Guerra dos Mundos* (1898), de Herbert G. Wells (1866-1946), anunciou, durante a transmissão de uma novela radiofônica, que discos voadores haviam invadido a Terra. No anúncio, Welles afirmou que se tratava de naves marcianas e que se dirigiam para a região de Nova Jersey, nos Estados Unidos. A população americana que acompanhava a novela ficou em pânico. Esse fato marcou a grande importância do rádio como meio de comunicação na sociedade daquele tempo.

As ondas de rádio são ondas eletromagnéticas que se propagam no ar com velocidades próximas à da luz (300 000 km/s). Seus comprimentos variam de poucos milímetros a alguns quilômetros. Dessa forma, a transmissão do acontecimento fictício citado acima aconteceu praticamente em tempo real. A TV, a telefonia celular e a internet são exemplos de meios de comunicação que se valem da transmissão das ondas eletromagnéticas para propagar suas informações.

PARA INICIAR A CONVERSA

Você acredita que algum outro cineasta conseguiria produzir o mesmo impacto que Welles conseguiu nos dias de hoje?

As ondas eletromagnéticas de TV, celular e rádio possuem comprimentos diferentes. O que elas têm em comum?

Podemos enxergar a luz, mas não conseguimos ver as ondas de rádio. Por quê?

As imagens desta página estão representadas fora de proporção.

8.1 Força eletromotriz induzida

A produção de corrente elétrica requer o consumo de uma forma qualquer de energia. Até a época de Michael Faraday, porém, somente a energia química era transformada em energia elétrica, de maneira aproveitável, por meio de pilhas ou baterias. Mas esse processo não é adequado para produzir grandes quantidades de energia elétrica, como as necessárias para iluminar nossas cidades **(figura 8.1)** ou alimentar as indústrias.

Rubens Chaves/Pulsar Imagens



Figura 8.1. A enorme quantidade de energia elétrica usada para iluminar as cidades é gerada graças ao fenômeno da indução eletromagnética. Belo Horizonte (MG), 2014.

Em 1831, Faraday descobriu o fenômeno da indução eletromagnética, que provocou uma verdadeira revolução no estudo do Eletromagnetismo. Graças a essa descoberta, foi possível construir os **dínamos**, que são aparelhos cujo funcionamento se baseia no fenômeno da indução eletromagnética e que transformam energia mecânica de uma queda-d'água, por exemplo, em energia elétrica. A fotografia da **figura 8.2.a** mostra um grande dínamo, de uma moderna usina hidrelétrica, capaz de gerar enormes quantidades de energia elétrica.

Na **figura 8.2.b** um ciclista, ao pedalar, produz eletricidade para acender uma lanterna com um dínamo. O dínamo, que está acoplado à roda da bicicleta, faz um eixo girar produzindo a oscilação dos polos norte e sul. Por meio de indução eletromagnética, ocorre a geração de energia elétrica que possibilita acender a lanterna.

a

Ismar Ingber/Pulsar Imagens



b



Antonio Robson/Arquivo da editora

Figura 8.2. Em **a** temos parte da Usina Hidrelétrica de Itaipu. Eletroímãs potentes giram gerando corrente de acordo com o fenômeno de indução eletromagnética. Em **b**, utilizando um dínamo acoplado à roda de uma bicicleta, é possível acender uma lanterna (energia elétrica) enquanto o ciclista estiver pedalando (energia mecânica). Representação sem escala e em cores fantasia.

Condutor em movimento dentro de um campo magnético

Consideremos um condutor metálico, movimentando-se com uma velocidade $\vec{v}$, perpendicularmente às linhas de indução de um campo magnético $\vec{B}$. A **figura 8.3.a** ilustra essa situação: a barra metálica *CD* está sendo deslocada dentro do campo magnético criado pelo ímã mostrado na figura. Na **figura 8.3.b**, essa mesma situação é apresentada em corte: o vetor $\vec{B}$ penetrando no papel e a barra *CD* deslocando-se para a direita.

A barra metálica possui elétrons livres. Como esses elétrons estão em movimento, em razão do movimento da barra, eles ficarão sujeitos à ação de uma força magnética exercida pelo campo $\vec{B}$. Podemos verificar, usando a regra da mão direita na **figura 8.3.b**, que essa força tende a deslocar os elétrons para a extremidade *C* da barra. Como estão livres, eles se deslocam, acumulando-se em *C*. Consequentemente, teremos uma separação de cargas na barra *CD*, isto é, a extremidade *D* ficará eletrizada positivamente e a extremidade *C*, negativamente. Essa diferença de potencial será mantida entre as extremidades *C* e *D* enquanto a barra estiver se movimentando dentro do campo, pois essa separação de cargas permanecerá.

Podemos, então, concluir que essa barra se comporta como um gerador de f.e.m, que é equivalente a uma pilha ou a uma bateria. Essa f.e.m. que aparece na barra, em razão de seu movimento em um campo magnético, é denominada **força eletromotriz induzida**.

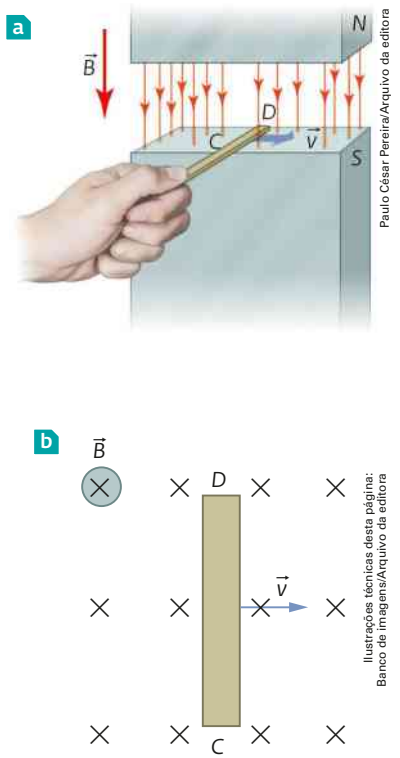


Figura 8.3. Barra metálica sendo deslocada dentro de um campo magnético.

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

Corrente induzida em um circuito

Suponha que a barra *CD* da **figura 8.3.b**, ao se deslocar, esteja apoiada sobre o trilho metálico *GEFH*, como mostra a **figura 8.4**. Dessa maneira, teremos um circuito elétrico fechado, constituído pela barra e pelo trilho. Em virtude da diferença de potencial existente entre os extremos da barra, uma corrente passará nesse circuito no sentido *CEFD* **(figura 8.4)**. Como essa corrente foi estabelecida pela f.e.m. induzida na barra, ela é denominada **corrente induzida**.

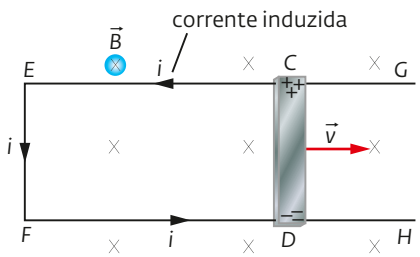


Figura 8.4. Uma corrente induzida, no sentido indicado, é estabelecida no trilho *GEFH* quando a barra *CD* se desloca sobre ele para a direita.

Se a barra *CD* for deslocada para a esquerda, como mostra a **figura 8.5**, haverá uma inversão na separação de cargas, isto é, a extremidade *D* se comportará como o polo positivo de uma pilha e a extremidade *C*, como o polo negativo. A corrente induzida, então, passará a circular no sentido *DFEC*, contrário ao sentido da **figura 8.4**. Assim, se movimentarmos a barra sucessivamente para a direita e para a esquerda, teremos, no circuito, uma corrente ora em um sentido, ora em sentido contrário.

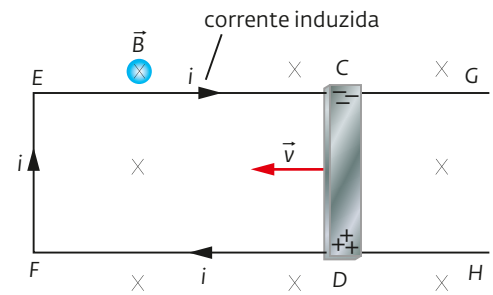


Figura 8.5. Se a barra *CD* se deslocar para a esquerda, a corrente induzida no trilho *GEFH* terá o sentido indicado.



Figura 8.6. Lanterna recarregável à manivela com dínamo.

Essa corrente que muda periodicamente de sentido é uma **corrente alternada**. Portanto, movimentando-se a barra para um lado e para o outro, dentro do campo magnético, teremos um **gerador de corrente alternada**. A abreviação de corrente alternada é CA (AC em inglês). No Brasil a rede elétrica está configurada para operar com corrente alternada na frequência de 60 Hz, ou seja, a corrente elétrica muda o sentido 60 vezes por segundo. Em alguns países, essa frequência é de 50 Hz, como no Paraguai e em alguns países da comunidade europeia. Os geradores de corrente alternada usados na prática, embora se baseiem no mesmo princípio, funcionam de maneira diferente, como veremos na seção seguinte. Existem alguns tipos de lanternas recarregáveis **(figura 8.6)** à manivela com lâmpadas de LED (diodo emissor de luz, do inglês *Light-Emitting Diode*) que usam dínamos para carregar a bateria. O mesmo tipo de dínamo pode ser utilizado para carregar celulares em casos de emergência, onde não haja energia elétrica.

Outros exemplos de f.e.m. induzida

O cientista inglês M. Faraday, realizando um número muito grande de experiências no século XIX, verificou que existem várias outras situações nas quais se observa o aparecimento de uma f.e.m. induzida em um circuito.

Na **figura 8.7**, mostramos uma situação em que isso ocorre. Ao aproximarmos o polo de um ímã de uma espira que se encontra em repouso, observamos o aparecimento de uma corrente nessa espira, que é detectada pelo amperímetro A. Se interrompermos o movimento do ímã, a corrente desaparecerá imediatamente; ao afastarmos o ímã, a corrente tornará a aparecer na espira, porém em sentido contrário ao anterior.

Se uma corrente aparece na espira, é porque existe uma f.e.m. responsável por ela. Assim, o fato de o ímã ser aproximado ou afastado da espira fez com que uma f.e.m. aparecesse nessa espira.

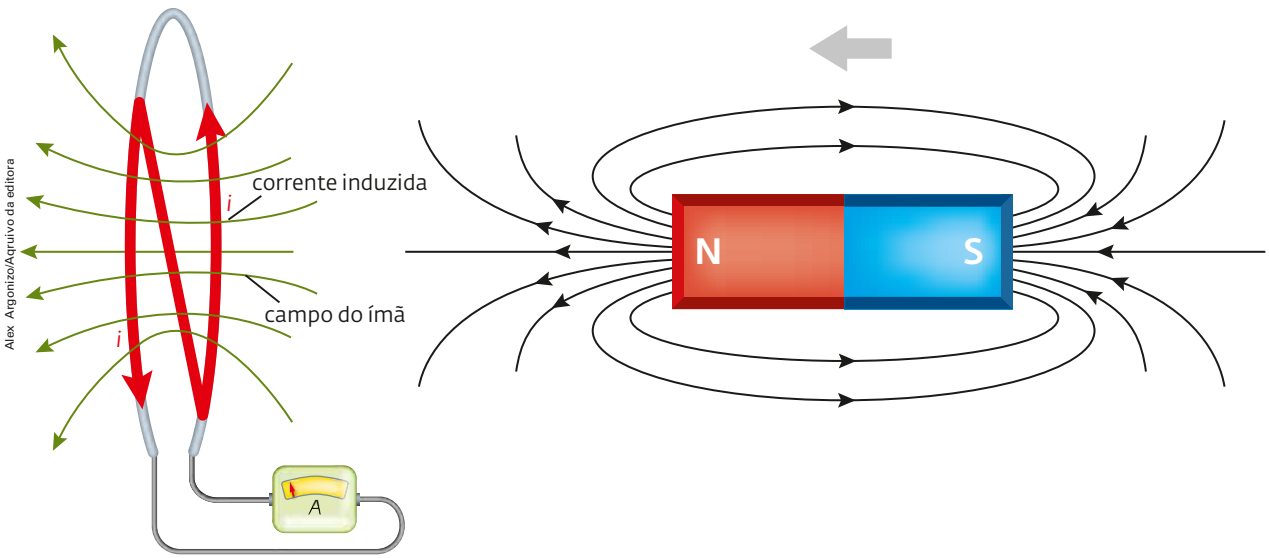
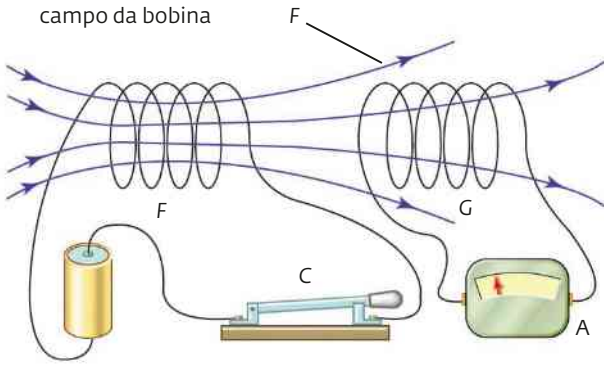


Figura 8.7. Corrente induzida em uma espira, causada pela aproximação do polo norte de um ímã. Representação sem escala e em cores fantasia.

Por analogia com o que ocorre no exemplo da **figura 8.4**, Faraday chamou essa f.e.m. na espira de **f.e.m. induzida**.

A **figura 8.8** também ilustra um caso em que Faraday observou o aparecimento de uma f.e.m. induzida. No instante em que a chave *C* é fechada, estabelecendo uma corrente na bobina *F*, o amperímetro *A* acusa o aparecimento de uma corrente induzida na bobina *G*. Enquanto *C* permanece fechada, isto é, enquanto existe uma corrente estável em *F*, não se observa corrente induzida em *G*. Entretanto, no instante em que se desliga a chave *C*, a corrente induzida reaparece na bobina *G*, em sentido contrário ao anterior.



Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura 8.8. No instante em que a chave *C* é aberta ou fechada, aparece, na bobina *G*, uma corrente induzida.

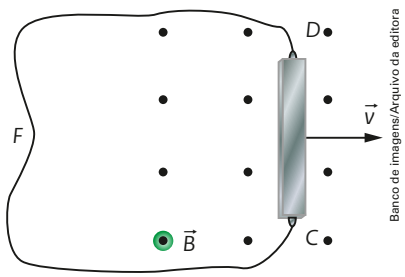
Analisando inúmeras outras experiências semelhantes a essas que descrevemos, Faraday conseguiu descobrir que havia um fato comum em todos os casos em que aparece uma f.e.m. induzida. O resultado de suas observações foi expresso em uma lei básica do Eletromagnetismo, que estudaremos na seção seguinte.

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

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

Não escreva no livro!

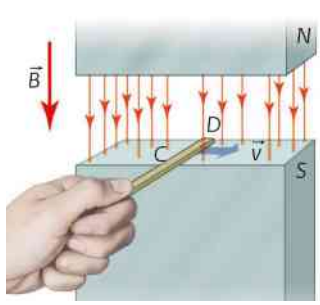
1. Considere uma barra metálica *CD* deslocando-se com velocidade $\vec{v}$, dentro de um campo magnético $\vec{B}$ saindo do papel (veja a figura).



Banco de imagens/Arquivo da editora

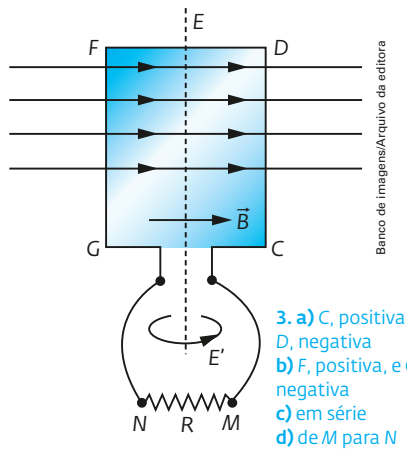
a) Qual é o sentido da força magnética que atua nos elétrons livres dessa barra?
b) Qual das extremidades da barra ficará eletrizada positivamente e qual ficará eletrizada negativamente?
c) Ligando-se *C* e *D* por um fio condutor, como mostra a figura, qual será o sentido da corrente induzida nesse fio?

2. Se a barra *CD*, na figura abaixo, fosse deslocada verticalmente para cima, haveria nela uma separação de cargas? Por quê?



Paulo César Pereira/Arquivo da editora

3. A figura abaixo representa uma espira retangular *CDFG* que gira em torno do eixo *EE'*, no sentido indicado pela seta curva (no instante mostrado, *CD* está entrando no plano da folha e *FG* está saindo dela). A espira gira dentro de um campo magnético $\vec{B}$, orientado da esquerda para a direita. Considerando o instante mostrado na figura, faça o que se pede a seguir.



Banco de imagens/Arquivo da editora

a) Indique qual das extremidades do lado *CD* fica positiva e qual fica negativa.
b) Faça o mesmo para o lado *FG*.
c) Nessas condições, os lados *CD* e *FG* são equivalentes a duas baterias. Essas baterias estão ligadas em série ou em paralelo?
d) Então, qual é o sentido da corrente induzida que passa na resistência *R* ligada às extremidades da espira?

1. a) de *C* para *D*
b) *C*, positivamente, e *D*, negativamente
c) sentido *CFD*
2. Não, porque a força magnética sobre os elétrons seria nula.

3. a) *C*, positiva, e *D*, negativa
b) *F*, positiva, e *G*, negativa
c) em série
d) de *M* para *N*

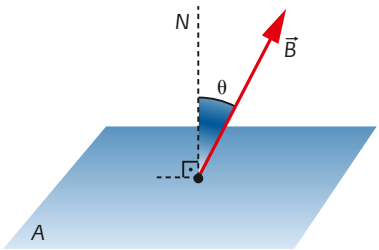


Figura 8.9. O fluxo magnético, φ, através da superfície *A*, é dado pela expressão $\varphi = BA \cos \theta$.

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

8.2 A lei de Faraday

O que é fluxo magnético

Consideremos uma superfície plana, de área *A*, colocada dentro de um campo magnético uniforme $\vec{B}$. Traçando uma perpendicular à superfície, designemos por θ o ângulo formado por essa normal *N* com o vetor $\vec{B}$ (veja a **figura 8.9**). O fluxo magnético através dessa superfície é representado pela letra grega φ (fi) e definido pela seguinte expressão:

$$\varphi = BA \cos \theta$$

No SI, a unidade de fluxo magnético é denominada 1 weber = 1 Wb, em homenagem ao físico alemão do século XIX W. Weber (1804-1891). Então, medindo-se *B* em tesla (T) e *A* em metro quadrado (m^2), teremos:

$$1\ \text{Wb} = 1\ \text{T} \cdot \text{m}^2$$

O conceito de fluxo magnético através de uma superfície pode ser interpretado em termos do número de linhas de indução que atravessam essa superfície: quanto maior for esse número, maior será o valor de φ. Por exemplo, na **figura 8.10** temos duas superfícies de áreas iguais, colocadas em campos magnéticos diferentes. Em **a** temos um campo magnético mais intenso do que em **b**, porque as linhas de indução do campo $\vec{B}_1$ estão mais próximas umas das outras do que as do campo $\vec{B}_2$.

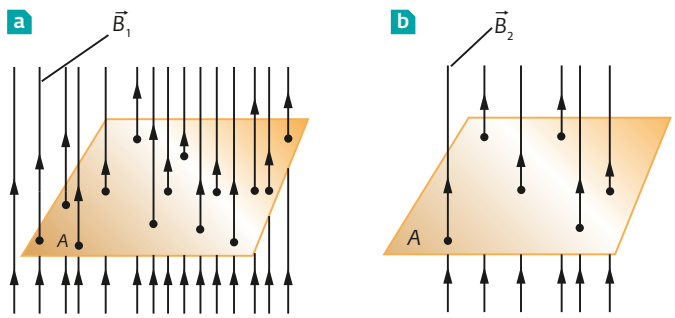
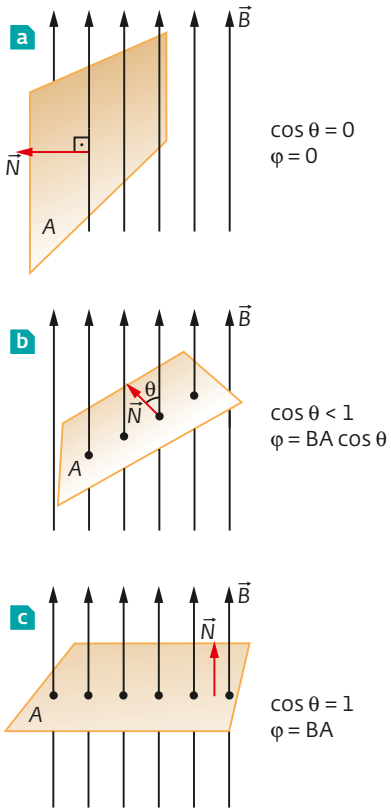


Figura 8.10. O fluxo magnético φ_1 em **a** é maior do que o fluxo φ_2 em **b**.



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

Figura 8.11. O fluxo magnético através de uma superfície depende da inclinação desta em relação ao vetor $\vec{B}$.

O número de linhas que furam a superfície, na **figura 8.10.a**, é maior do que na **figura 8.10.b**, isto é, o valor do fluxo φ_1 é maior do que φ_2. Observe que esse resultado está de acordo com a expressão $\varphi = BA \cos \theta$, a qual nos mostra que quanto maior for o valor de *B*, maior será o valor do fluxo φ.

Quanto maior for a área da superfície colocada em um dado campo $\vec{B}$, maior será o número de linhas de indução que furam a superfície, isto é, maior será o valor do fluxo. Esse resultado também está de acordo com a relação $\varphi = BA \cos \theta$, ou seja, quanto maior for *A*, maior será φ.

Finalmente, devemos observar que o valor de φ depende do ângulo θ, isto é, o fluxo magnético através de uma superfície depende da inclinação desta em relação ao vetor $\vec{B}$. A **figura 8.11** ilustra esse fato em termos das linhas de indução que passam através de uma determinada superfície *A*: na **figura 8.11.a**, nenhuma linha de indução está atravessando a superfície e, portanto, temos $\varphi = 0$; na **figura 8.11.b**, a inclinação da superfície foi modificada e já temos um certo fluxo φ através dela; já na **figura 8.11.c**, estando a superfície perpendicular a $\vec{B}$, temos um valor máximo para o fluxo φ.

A lei de Faraday

Faraday percebeu que havia um fato comum em todas as situações nas quais aparecia uma f.e.m. induzida. Analisando o grande número de experimentos que ele mesmo realizou, Faraday verificou que **sempre que uma f.e.m. induzida aparecia em um circuito, estava ocorrendo uma variação do fluxo magnético através desse circuito**.

De fato, na experiência mostrada na **figura 8.4**, em virtude do movimento da barra para a direita, a área do circuito dentro do campo magnético está aumentando. Assim, o fluxo φ através do circuito está aumentando e há uma f.e.m. induzida nesse circuito. Quando o movimento da barra é interrompido, embora exista um fluxo magnético através do circuito, esse fluxo não está variando; nessas condições, não há f.e.m. induzida. Na **figura 8.5**, observamos uma diminuição do fluxo através do circuito (área diminuindo) e, novamente, observamos o aparecimento de uma f.e.m. induzida.

Da mesma forma, quando o ímã é aproximado ou afastado da espira mostrada na **figura 8.7**, o fluxo magnético através dessa espira está variando e, mais uma vez, uma f.e.m. é induzida no circuito.

No caso mostrado na **figura 8.8**, quando a chave *C* é fechada, a corrente estabelecida na bobina *F* cria um campo magnético que causa um fluxo através da bobina *G*. Portanto, o fluxo φ através de *G* aumenta de zero até um certo valor e uma f.e.m. induzida aparece nessa bobina. Enquanto a chave *C* permanece fechada, a corrente em *F* mantém-se constante e, portanto, é também constante o fluxo através da bobina *G*. Nessas condições, não há f.e.m. induzida em *G*. No instante em que a chave *C* é aberta, o fluxo que existia em *F* desaparece (o fluxo em *G* diminui) e verifica-se, novamente, o aparecimento de uma f.e.m. induzida.

Portanto, a f.e.m. induzida apareceu em todos os casos nos quais estava havendo uma variação do fluxo magnético. Além disso, Faraday observou que o valor da f.e.m. induzida era tanto maior quanto mais rapidamente se processasse a variação do fluxo através do circuito. Mais precisamente, ele verificou que, se durante um intervalo de tempo Δt o fluxo magnético através de um circuito variar de $\Delta\varphi$, haverá, nesse circuito, uma f.e.m. induzida dada por:

$$\varepsilon = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$$

O fenômeno do aparecimento de uma f.e.m. induzida foi denominado **indução eletromagnética** e o resultado que acabamos de estudar tornou-se conhecido como **lei de Faraday da indução eletromagnética**. Essa lei, fundamental para o estudo dos fenômenos eletromagnéticos, pode ser assim resumida:

Lei de Faraday (da indução eletromagnética)

Sempre que ocorrer uma variação do fluxo magnético através de um circuito, aparecerá, nesse circuito, uma f.e.m. induzida. O valor dessa f.e.m., ε, é dado por:

$$\varepsilon = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$$

em que $\Delta\varphi$ é a variação do fluxo observada no intervalo de tempo Δt.



Reprodução/Arquivo da editora

WILHELM EDUARD WEBER (1804-1891)

Físico alemão que, junto com o físico Gauss, estudou o magnetismo terrestre. Em 1833 desenvolveu o telégrafo eletromagnético. A unidade de fluxo magnético recebeu o seu nome em virtude dos inúmeros trabalhos que desenvolveu no campo da ciência do magnetismo.

Exemplo 1

Suponha que na figura 8.7, o ímã, a uma certa distância da espira, esteja estabelecendo através dela um fluxo $\varphi_1 = 1{,}2 \cdot 10^{-2}$ Wb. Aproximando rapidamente o ímã da espira, o fluxo passa a valer $\varphi_2 = 4{,}6 \cdot 10^{-2}$ Wb.

Se essa variação ocorrer em um intervalo de tempo $\Delta t = 0{,}10$ s:

a) Determine o valor da f.e.m. induzida na espira.

O valor dessa f.e.m. será dado pela lei de Faraday. Então, teremos:

$$\varepsilon = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{\Delta t} = \frac{4{,}6 \cdot 10^{-2} - 1{,}2 \cdot 10^{-2}}{0{,}10} = 0{,}34 \text{ V}$$

b) Sabendo-se que a resistência da espira vale 2,0 Ω, calcule a intensidade da corrente induzida indicada pelo amperímetro.

A intensidade dessa corrente será dada pela equação do circuito, isto é:

$$i = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{0{,}34}{2{,}0} \quad \therefore \quad i = 0{,}17 \text{ A}$$

Exemplo 2

Considere uma barra metálica *CD* deslocando-se com velocidade $\vec{v}$ dentro de um campo magnético uniforme $\vec{B}$. A barra desloca-se apoiando-se em dois trilhos, também metálicos, separados de uma distância *L*, como mostra a figura 8.12. Usando a lei de Faraday, determine, em função de *B*, *L* e *v*, a f.e.m. induzida na barra.

De acordo com a lei de Faraday, a f.e.m. induzida é dada por $\varepsilon = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$. Suponhamos que, durante o intervalo de tempo Δt, a barra se desloque de uma distância Δx, passando para a posição $C'D'$ (veja a figura).

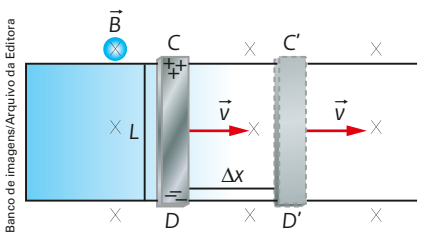
As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

Então, nesse intervalo de tempo, como o campo magnético é perpendicular à área do circuito ($\theta = 0°$), a variação do fluxo através desse circuito será dada por:

$$\Delta\varphi = B \cdot (\text{variação na área do circuito})$$

ou

$$\Delta\varphi = B \cdot (\text{área } CDD'C') = B \cdot (L\Delta x)$$



Banco de imagens/Arquivo da Editora

Figura 8.12. Para o exemplo 2 da seção 8.2.

Logo, teremos:

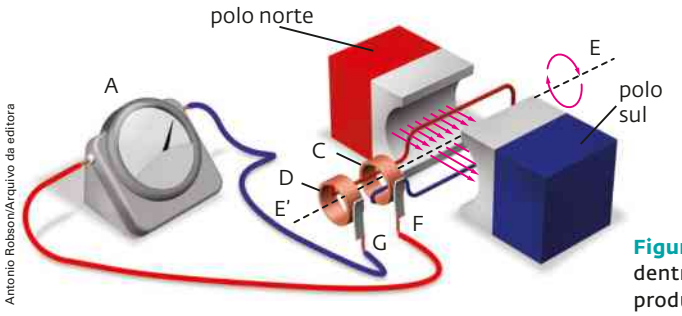
$$\varepsilon = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \frac{BL\Delta x}{\Delta t}$$

Como $\frac{\Delta x}{\Delta t} = v$, virá:

$$\varepsilon = BLv$$

O gerador de corrente alternada

Um dínamo é constituído, basicamente, por uma espira que gira dentro de um campo magnético. A figura 8.13 representa uma espira metálica nessa situação, girando em torno do eixo *EE'* entre os polos de um ímã. Nas extremidades da espira existem dois anéis, *C* e *D*, que deslizam sobre os contatos *F* e *G*, os quais ligam a espira a um circuito externo qualquer. Na figura, esse circuito externo é um amperímetro, usado para indicar a presença de corrente induzida.

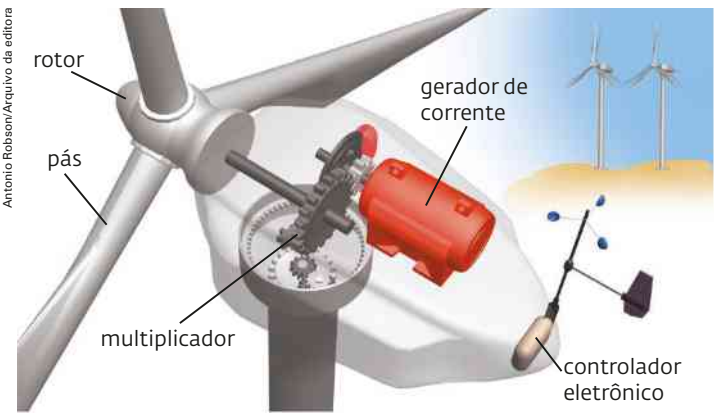


Antonio Robson/Arquivo da editora

Figura 8.13. Uma espira girando dentro de um campo magnético produz uma corrente alternada.

Enquanto a espira gira, há uma variação do fluxo magnético através dela. Isso ocorre porque a inclinação da espira, em relação ao vetor $\vec{B}$, está variando continuamente, conforme vimos ao analisar a **figura 8.11**. Então, uma f.e.m. é induzida na espira, gerando uma corrente indicada pelo amperímetro. Durante uma meia-volta da espira, o fluxo magnético através dela aumenta e, na meia-volta seguinte, ele diminui. Por esse motivo, a corrente induzida aparecerá no circuito ora em um sentido, ora em sentido contrário. Em outras palavras, a espira girando dentro de um campo magnético gera uma **corrente alternada**, como se pode perceber pela indicação do amperímetro.

Os grandes geradores de corrente alternada **(figura 8.14)** encontrados nas turbinas eólicas funcionam de maneira semelhante à que acabamos de descrever. A energia do vento é aproveitada para colocar em rotação as pás da hélice que, por meio de um eixo, aciona o gerador. Este, por indução eletromagnética, transforma grandes quantidades de energia mecânica em energia elétrica.



Antonio Robson/Arquivo da editora

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

Figura 8.14. Esquema do funcionamento de um gerador eólico. Atualmente, 3% da matriz energética brasileira deve-se à energia eólica.

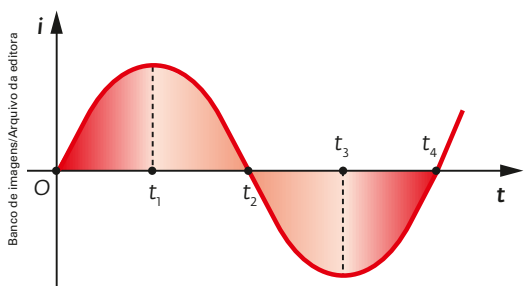
Comentário

O gráfico da **figura 8.15** mostra como a corrente alternada, gerada na espira, varia com o tempo, à medida que ela gira dentro do campo magnético.

Vamos analisar essa variação, supondo uma lâmpada ligada à espira de um gerador de corrente alternada, como mostra a **figura 8.16**. No instante $t = 0$, no qual a espira se encontra na posição mostrada na **figura 8.16.a**, a lâmpada está apagada, mostrando que, nesse instante, não há corrente no circuito. Observe que o gráfico da **figura 8.15** está de acordo com essa observação, pois, para $t = 0$, temos $i = 0$. Enquanto a espira gira, até alcançar a posição mostrada na **figura 8.16.b**, a corrente cresce, atingindo seu valor máximo (instante t_1 no gráfico da **figura 8.15**).

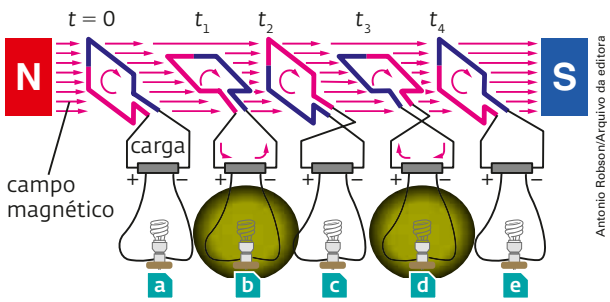
Consequentemente, a lâmpada adquire seu maior brilho nesse momento. Continuando a girar, a espira alcança a posição mostrada na **figura 8.16.c**, onde, novamente, a corrente é nula e, portanto, a lâmpada se apaga (instante t_2 no gráfico da **figura 8.15**). A partir de t_2, a corrente induzida muda de sentido, como está indicado no gráfico (por convenção, a intensidade i passa a ser considerada negativa).

No instante t_3 **(figura 8.16.d)**, o módulo da corrente alcança novamente seu valor máximo e a lâmpada brilha com a mesma intensidade mostrada na **figura 8.16.b**. Finalmente, no instante t_4 **(figura 8.16.e)** a espira retorna à sua posição inicial, completando uma volta (1 ciclo). A corrente é novamente nula (a lâmpada está apagada) e, daí em diante, o processo se repete.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 8.15. O gráfico mostra como a intensidade da corrente alternada gerada na espira varia com o tempo.



Antonio Robson/Arquivo da editora

Figura 8.16. O brilho da lâmpada indica a intensidade da corrente alternada gerada na espira, à medida que ela gira.

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

Não escreva no livro!

5. a) $\theta = 90°; \varphi = 0$
6. a) $\Delta\varphi = 2{,}1 \cdot 10^{-4}$ Wb

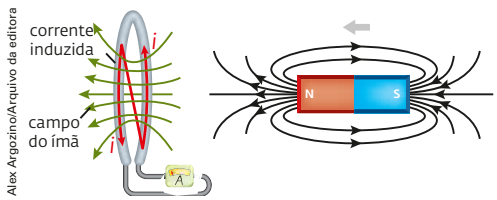
As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.

4. Na **figura 8.11.c** considere que o campo magnético tenha o valor $B = 3{,}5 \cdot 10^{-2}$ T e que a superfície mostrada tenha uma área $A = 60$ cm^2.
a) Qual é o valor do ângulo θ formado pelo vetor $\vec{B}$ com a normal à superfície? (Considere a normal orientada para cima.) $\theta = 0°$
b) Calcule o valor do fluxo magnético φ através da superfície mostrada. $\varphi = 2{,}1 \cdot 10^{-4}$ Wb

5. a) Responda às questões **a** e **b** do exercício anterior para o caso da **figura 8.11.a**.
b) A resposta à questão **b** concorda com o que foi afirmado no texto em relação a essa figura? sim

6. Suponha que a superfície mostrada na **figura 8.11** fosse contornada por um fio metálico formando uma espira retangular de área *A*. Suponha, ainda, que a espira passasse da posição (a) para a posição (c) em um intervalo de tempo $\Delta t = 0{,}03$ s.
Considerando as respostas dos exercícios 4 e 5, determine:
a) a variação do fluxo magnético, através da espira, nesse intervalo de tempo;
b) o valor da f.e.m. induzida na espira. $\varepsilon = 7 \cdot 10^{-3}$ V

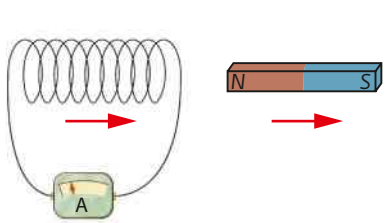
7. Observe a figura a seguir e suponha que tanto o ímã quanto a espira estejam em repouso.



Alex Argozino/Arquivo da editora

Nessas condições:
a) Há um fluxo magnético através da espira? sim
b) Há variação de fluxo magnético através da espira? não
c) Então, há f.e.m. induzida na espira? não

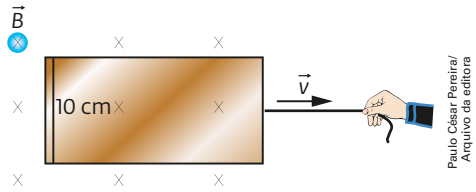
8. O ímã e a bobina mostrados na figura abaixo estão ambos se deslocando com a mesma velocidade $\vec{v}$.



Paulo César Pereira/Arquivo da editora

a) Há um fluxo magnético através da bobina? sim
b) Há variação de fluxo magnético através da bobina? não
c) Então, qual será a indicação do amperímetro? zero

9. A espira retangular, mostrada na figura, está sendo puxada com uma velocidade v = 6,0 m/s, emergindo de um campo magnético B = 0,50 T.

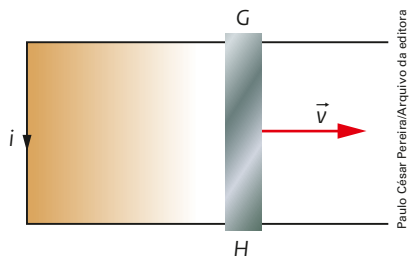


Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Lembrando-se da resposta encontrada no exemplo 2 desta seção, determine:
a) a f.e.m. induzida na espira; 0,30 V
b) a intensidade da corrente induzida que circula na espira, sabendo-se que sua resistência é de 0,40 Ω. 0,75 A

10. Na **figura 8.16** suponha que esteja sendo gerada uma corrente alternada de frequência $f = 60$ hertz.
a) Quanto tempo a espira gasta para efetuar uma volta completa? 0,017 s
b) Qual é o intervalo de tempo decorrido entre os instantes nos quais a lâmpada apresenta dois brilhos máximos consecutivos (posições da espira mostradas nas figuras (b) e (d))? 0,008 s
c) Considerando a resposta da questão anterior, você acha que seus olhos perceberiam flutuações no brilho dessa lâmpada? não

11. O conjunto mostrado na figura abaixo está colocado dentro de um campo magnético externo $\vec{B}$, perpendicular à folha de papel, cujo sentido não é conhecido. Deslocando-se a barra *GH* para a direita, observa-se que uma corrente induzida *i* percorre o circuito no sentido indicado na figura.



Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Indique, entre as afirmativas seguintes, aquelas que estão corretas: Todas estão corretas.
a) O fluxo magnético através do circuito está aumentando.
b) O campo que a corrente induzida cria no interior do circuito está saindo do papel.
c) O campo criado pela corrente induzida tende a diminuir o fluxo magnético através do circuito.
d) O campo magnético externo $\vec{B}$ está entrando na folha de papel.

FÍSICA NO CONTEXTO

USINAS GERADORAS DE ENERGIA ELÉTRICA

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

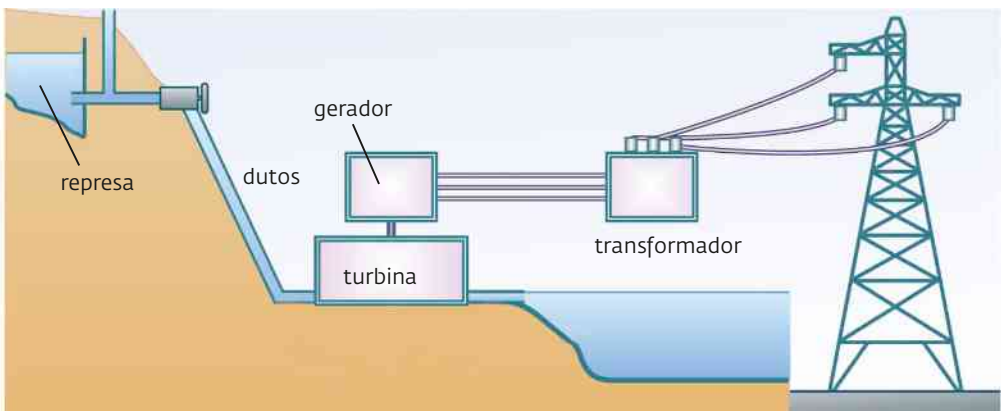
No Brasil, as fontes de energia não renováveis (petróleo e seus derivados, gás natural, carvão mineral e minérios radioativos) totalizam cerca de 54% da matriz energética nacional. Por outro lado, as energias renováveis (hidrelétricas, produtos da cana-de-açúcar, lenha e carvão vegetal) correspondem a cerca de 43% e apenas 3% destas correspondem a outras fontes de energia renovável como energia eólica e energia solar.

As centrais que fornecem energia para os centros consumidores são geralmente de grande porte, gerando potências elevadíssimas (milhares de kW).

Seus geradores funcionam, em princípio, de maneira idêntica ao alternador que acabamos de analisar.

Conforme o tipo de energia usada para fazer girar a espira (ou ímã) do gerador, podemos ter, entre outras, as usinas **hidrelétrica**, **termelétrica** e **nuclear**.

- **Usina hidrelétrica (figura 8.17)** – nessas usinas, a energia potencial gravitacional da água armazenada em uma represa se transforma em energia cinética durante sua queda pela tubulação. Essa energia é usada para fazer girar uma turbina, e seu movimento de rotação é transmitido ao gerador, produzindo corrente elétrica.



Ilustrações: Antonio Robson/Arquivo da editora

Figura 8.17. Na usina hidrelétrica, a energia mecânica da queda-d'água se transforma em energia elétrica.

- **Usina termelétrica (figura 8.18)** – a energia utilizada nessas usinas é a térmica, obtida pela combustão de madeira, carvão ou petróleo (ou gás natural, no caso do nosso país). A energia térmica desprendida na combustão provoca a vaporização da água contida em uma caldeira. Esse vapor, a alta pressão, faz girar uma turbina e essa rotação é transmitida ao gerador.

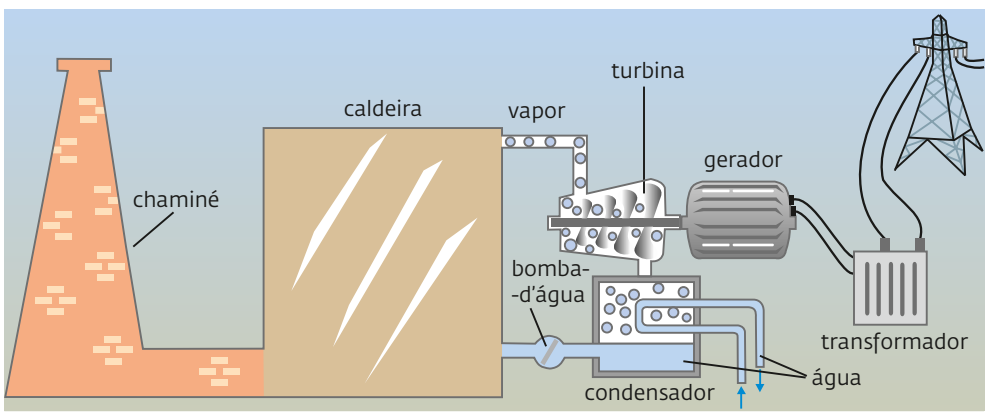
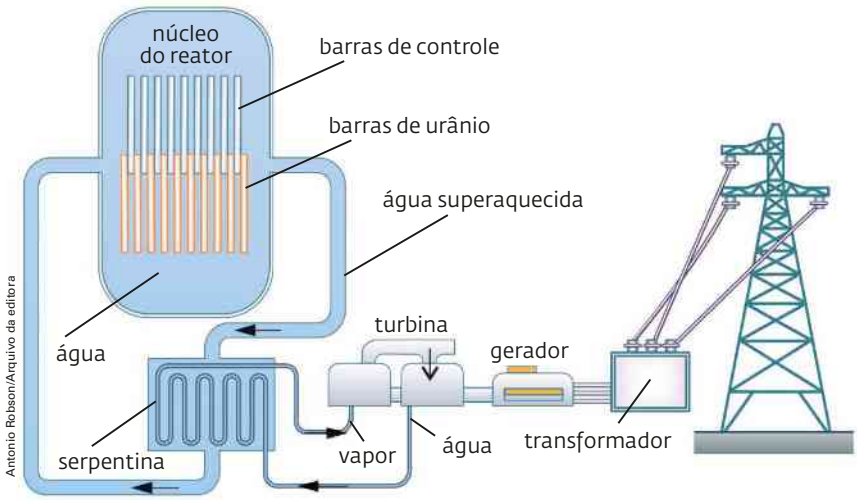


Figura 8.18. Na usina termelétrica, a energia liberada pelo combustível se transforma em energia elétrica.

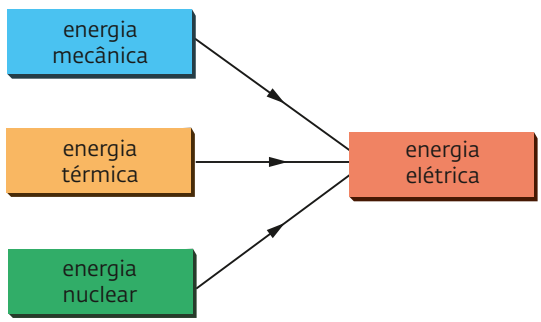
- **Usina nuclear (figura 8.19)** – as usinas nucleares funcionam de maneira semelhante a uma usina termelétrica, mas o calor utilizado para produzir o vapor a alta pressão é proveniente de reações nucleares que ocorrem em um reator atômico (fissões dos núcleos de alguns elementos, como o urânio).



Antonio Robson/Arquivo da editora

Figura 8.19. Esquema do funcionamento de uma usina nuclear. A grande quantidade de calor liberada pelas reações nucleares que ocorrem no reator provoca o superaquecimento da água que nele circula. Essa água entra em contato com uma serpentina, fazendo evaporar a água nela contida. O vapor formado é usado para acionar a turbina que coloca o gerador em rotação. Observe que a água superaquecida (que passa pelo reator) circula isoladamente, sem contato direto com qualquer outra parte do conjunto, para evitar contaminação radioativa. Representação sem escala e em cores fantasia.

Deve-se observar que todas essas centrais funcionam de maneira semelhante, diferindo apenas no tipo de energia que usam para acionar o gerador a fim de obter energia elétrica. Nos casos examinados, tivemos as seguintes transformações:



Em razão do aumento do consumo de energia elétrica em vários países, o uso de outras formas, como energia eólica (dos ventos **(figura 8.20)**), energia das marés, energia solar, energia geotérmica, etc., tem sido incentivado.

Na seção 8.7, no final desse capítulo, são analisadas várias outras informações relacionadas a esse assunto.


Geraldo Bubniak/Fotoarena

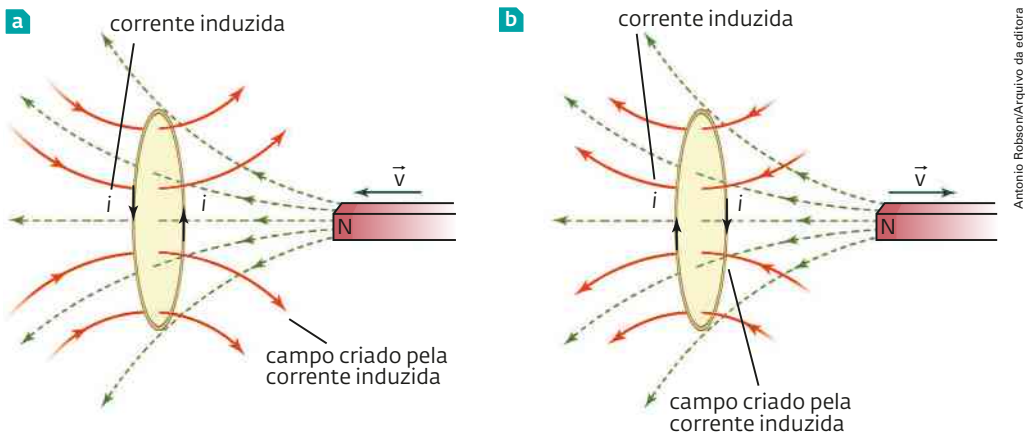
Figura 8.20. Esse dispositivo, que costuma ser denominado turbina de vento, aciona um gerador de energia elétrica de 3 000 kWh. Portanto, ele transforma energia mecânica do vento (energia eólica) em energia elétrica (cada lâmina do cata-vento chega a ter 30 m de comprimento). Na foto, cata-ventos instalados na orla marítima de Fortaleza (CE).

8.3 A lei de Lenz

O sentido da corrente induzida

Já analisamos diversas situações nas quais a corrente induzida aparece no circuito, ora em um sentido, ora em sentido contrário. Por exemplo, para condições como a mostrada na **figura 8.21** dissemos que, quando o ímã se aproxima da espira, a corrente aparece em um determinado sentido **(figura 8.21.a)** e, quando o ímã se afasta, a corrente aparece na espira em sentido contrário ao anterior **(figura 8.21.b)**.

Embora Faraday tivesse percebido esse fenômeno, ele não conseguiu chegar a uma lei que indicasse como determinar o sentido da corrente induzida. Entretanto, em 1834, alguns anos após a divulgação dos trabalhos de Faraday, o cientista H. Lenz apresentou uma "regra", hoje conhecida como **lei de Lenz**, que permite resolver esse problema.



Antonio Robson/Arquivo da editora

Figura 8.21. A corrente induzida na espira aparece com sentido tal que o campo magnético que ela cria tende a contrariar a variação de fluxo através dessa espira. Representação sem escala e em cores fantasia.

A lei de Lenz

Consideremos novamente a **figura 8.21**. Quando o ímã é aproximado da espira, verifica-se que a corrente nela induzida aparece com o sentido indicado na figura. Essa corrente cria um campo magnético cujo sentido pode ser determinado pela regra de Ampère. Aplicando essa regra, verificamos que o campo magnético criado pela corrente induzida tem, no interior da espira, o sentido mostrado na **figura 8.21.a**. Observe que o sentido desse campo é contrário ao do campo magnético do ímã.

Considerando, agora, a **figura 8.21.b**, vemos que, quando o ímã é afastado da espira, a corrente induzida aparece em sentido contrário ao anterior. Usando novamente a regra de Ampère, verificamos que o campo magnético criado pela corrente induzida tem, nesse caso, o mesmo sentido do campo magnético do ímã (veja a figura).

Podemos resumir essas observações da seguinte maneira:

1º) Quando o fluxo magnético através da espira está **aumentando** **(figura 8.21.a)**, a corrente induzida tem um sentido tal que o campo magnético por ela criado tende a **diminuir** o fluxo através da espira (o campo da corrente induzida, **dentro da espira**, tem sentido contrário ao campo magnético do ímã).

2º) Quando o fluxo magnético através da espira está **diminuindo** **(figura 8.21.b)**, a corrente induzida tem um sentido tal que o campo magnético por ela criado tende a **aumentar** o fluxo através da espira (o campo da corrente induzida, **dentro da espira**, tem o mesmo sentido do campo magnético do ímã).



Reprodução/Arquivo da editora

HEINRICH F. E. LENZ (1804-1865)
Físico báltico-alemão nascido no império russo que enunciou a lei que permite estabelecer o sentido das correntes induzidas. Lenz estudou também a dependência da resistência elétrica em relação à temperatura.

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

Após realizar uma série de experiências semelhantes a essa, Lenz chegou à conclusão de que esse comportamento da corrente induzida era observado em todos os casos analisados. Ele sintetizou, então, suas observações da seguinte maneira:

Lei de Lenz

A corrente induzida em um circuito aparece sempre com um sentido tal que o campo magnético que ela cria tende a contrariar a variação do fluxo magnético que a originou.

Em outras palavras, a lei de Lenz nos diz que[1]:

1º) Quando a corrente induzida é estabelecida em virtude de um aumento do fluxo magnético, o seu sentido é tal que o campo por ela criado tem sentido contrário ao campo magnético existente no interior do circuito.

2º) Quando a corrente induzida é estabelecida em virtude de uma diminuição do fluxo magnético, o seu sentido é tal que o campo por ela criado tem o mesmo sentido do campo magnético existente no interior do circuito.

[1] Estamos supondo a normal à superfície orientada de tal modo que o fluxo magnético seja sempre positivo.

Os exemplos seguintes ilustrarão como podemos empregar a lei de Lenz para determinar o sentido da corrente induzida em um circuito.

Exemplo 1

Usando a lei de Lenz, determine o sentido da corrente induzida para a situação mostrada na figura 8.22.

Estando a barra em movimento para a direita, há um aumento de fluxo magnético através do circuito *CEFD*, pois a área do circuito situada dentro do campo magnético está aumentando. Então, o campo criado pela corrente induzida (no interior do circuito) deve ter sentido contrário ao do campo magnético mostrado na figura 8.22, pois, assim, ele tende a diminuir o fluxo magnético através do circuito. Portanto, o campo magnético criado pela corrente induzida está saindo da folha de papel (no interior do circuito). Usando a regra de Ampère, verificamos que, para criar um campo magnético nesse sentido, a corrente induzida deve estar circulando no sentido *CEFD*.

Observe que esse resultado está de acordo com o sentido da corrente mostrado na figura 8.22 e que foi obtido por outro processo (sem o uso da lei de Lenz).

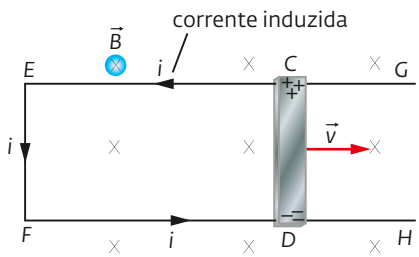
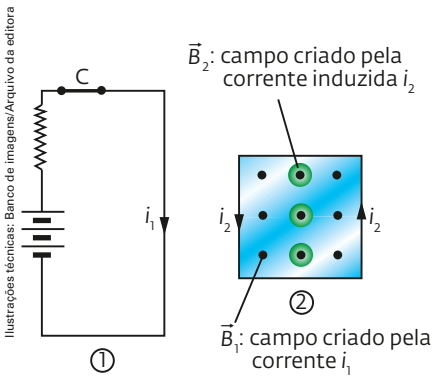


Figura 8.22. Para o exemplo 1 da seção 8.3.

Exemplo 2

A figura 8.23 mostra um circuito elétrico 1, no qual circula a corrente i_1 fornecida por uma bateria. Ao lado desse circuito existe uma espira metálica retangular. No momento em que a chave C do circuito 1 é aberta, uma corrente induzida i_2, de duração muito curta, aparece na espira. Determine o sentido da corrente i_2.

A corrente i_1 cria, no espaço em torno dela, um campo magnético $\vec{B}_1$. A regra de Ampère nos mostra que, no interior da espira, esse campo $\vec{B}_1$ está saindo da folha de papel, como está indicado na figura. Logo, existe um fluxo magnético através da espira. Quando a chave C é aberta, a corrente i_1 é interrompida e esse fluxo diminui (tende a zero). Então, na espira aparece uma corrente induzida i_2 e o campo magnético $\vec{B}_2$ por ela criado, no interior da espira, deve ter o mesmo sentido do campo $\vec{B}_1$ (tendendo a aumentar o fluxo através do circuito). Usando a regra de Ampère, vemos que, para criar no interior da espira um campo $\vec{B}_2$, saindo da folha de papel, o sentido da corrente induzida i_2 deve ser o mostrado na figura.



Ilustrações técnicas: Banco de imagens/Arquivo da editora

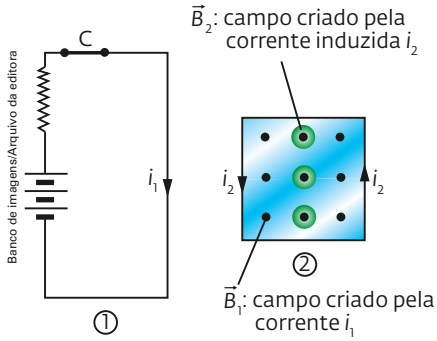
Figura 8.23. Para o exemplo 2 da seção 8.3.

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

Não escreva no livro!

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

12. Suponha que a chave C, na figura abaixo, esteja inicialmente aberta. Se, em certo instante, essa chave for fechada, uma corrente i_1 será estabelecida pela bateria no circuito (1).



a) O campo magnético $\vec{B}_1$ que essa corrente cria no interior da espira (2) está entrando na folha de papel ou saindo dela? Saindo.

b) O fluxo magnético através da espira (2) aumentou ou diminuiu? Aumentou.

c) Então, o campo magnético $\vec{B}_2$, que a corrente induzida na espira (2) cria no seu interior, deve estar entrando na folha de papel ou saindo dela? Entrando.

13. a) Considere sua resposta à questão **c** do exercício anterior e use a regra de Ampère para determinar o sentido da corrente induzida i_2.

b) Decorrido um certo tempo após o fechamento da chave C, haverá corrente induzida na espira (2)? Explique.

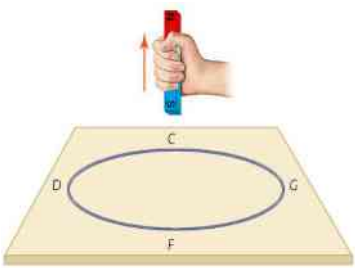
14. A figura abaixo mostra uma espira condutora *CDFG*, colocada sobre uma mesa horizontal. Um ímã é afastado verticalmente da espira da maneira indicada na figura.

a) O campo magnético estabelecido pelo ímã em pontos do interior da espira está dirigido para baixo ou para cima? para cima

b) O fluxo magnético através da espira está aumentando ou diminuindo? Diminuindo.

c) Então, o campo magnético que a corrente induzida cria no interior da espira deve estar dirigido para baixo ou para cima? para cima

d) Usando a regra de Ampère, determine o sentido da corrente induzida na espira. sentido *CDFG*



13. a) Contrário ao mostrado na figura 8.23. **b)** Não, pois o fluxo através da espira permanece constante.

8.4 O transformador

O que é um transformador

Em diversas instalações elétricas e até mesmo em nossas residências tem-se, muitas vezes, necessidade de aumentar ou diminuir a tensão fornecida pelas companhias de eletricidade. O dispositivo que nos permite resolver esse problema é denominado **transformador**.

O transformador é um aparelho bastante simples e está representado esquematicamente na **figura 8.24.a**. É constituído de uma peça de ferro, denominada **núcleo**, em torno do qual são enroladas duas bobinas. Em uma dessas bobinas é aplicada a tensão V_1 que desejamos transformar, isto é, que desejamos aumentar ou diminuir. Essa bobina é denominada **enrolamento primário** (ou simplesmente primário).

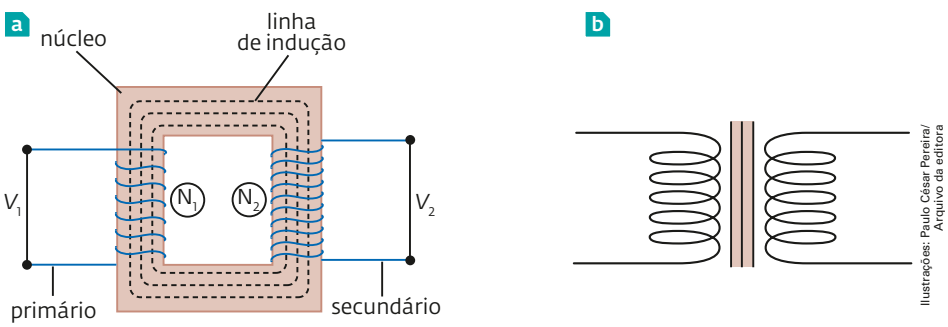


Figura 8.24. Esquema de um transformador simples (**a**) e maneira de representá-lo em um diagrama de circuito elétrico (**b**).



Sérgio/Quim/SQI Studios

Figura 8.25. Foto de um transformador simples usado em laboratórios de ensino.

Após a transformação, a tensão, apresentando um valor V_2, será estabelecida nas extremidades da outra bobina, denominada **enrolamento secundário** (ou simplesmente secundário). Nos diagramas de circuitos elétricos, um transformador é representado da maneira mostrada na **figura 8.24.b**. Na **figura 8.25** mostramos um transformador desse tipo, usado para experiências em laboratórios de ensino.

Como funciona um transformador

Suponhamos que uma tensão constante V_1 seja aplicada ao primário do transformador, por exemplo, ligando-se os extremos da bobina do primário aos polos de uma bateria. Essa tensão fará com que uma corrente contínua (constante) circule pelas espiras do primário. Então, um campo magnético será estabelecido no interior dessa bobina, fazendo com que o núcleo de ferro seja magnetizado. As linhas de indução do campo magnético criado por essa magnetização, no interior da peça de ferro, têm o aspecto mostrado na **figura 8.24**.

Como essas linhas estão passando através da bobina do secundário, teremos um fluxo magnético através das espiras dessa bobina. Entretanto, como a corrente que está passando no primário, provocando a magnetização do núcleo, é constante, o fluxo magnético através do secundário não sofrerá variações. Nessas condições, não haverá f.e.m. induzida nas espiras do secundário e a tensão nos extremos dessa bobina será nula, isto é, $V_2 = 0$.

Por outro lado, se a tensão V_1 aplicada no primário for **alternada**, a corrente que percorrerá as espiras do primário será, também, alternada. Então, o campo magnético estabelecido no núcleo de ferro estará sofrendo flutuações sucessivas e, consequentemente, o fluxo magnético através do secundário estará aumentando e diminuindo periodicamente no decorrer do tempo. Por esse motivo, uma f.e.m. será induzida nas espiras do secundário, fazendo aparecer uma tensão V_2 nos extremos dessa bobina. Em resumo:

Quando uma tensão constante V_1 é aplicada ao primário de um transformador, o fluxo magnético através do secundário é também constante, não havendo, portanto, uma tensão induzida nessa bobina. Quando a tensão aplicada ao primário é alternada, um fluxo magnético variável atravessa as espiras do secundário e uma tensão induzida V_2 aparece nos extremos dessa bobina.

Relação entre as voltagens no primário e no secundário

Vamos estudar como um transformador pode ser usado para aumentar ou diminuir uma tensão de corrente alternada. Para isso, designemos por N_1 o número de espiras no primário e por N_2 o número de espiras no secundário. A partir da lei de Faraday é possível demonstrar que a seguinte relação é válida:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

Com essa expressão podemos concluir que, se o número de espiras no secundário for maior do que no primário, isto é, se $N_2 > N_1$, teremos $V_2 > V_1$. Então, o transformador estará sendo usado para elevar a tensão. Por outro lado, se tivermos $N_2 < N_1$, teremos $V_2 < V_1$, ou seja, o transformador estará sendo usado para diminuir a tensão.

É importante observar que o transformador **(figuras 8.26 e 8.27)** não pode criar energia. Portanto, quando um aparelho é ligado ao secundário durante certo tempo, a energia fornecida a ele não pode ser maior do que a fornecida ao primário. Em outras palavras, a potência obtida no secundário **não** pode ser superior à fornecida ao primário do transformador.



Gabor Nemes/<www.kino.com.br>. Acesso em: 26 maio 2013.

Figura 8.26. Foto de transformador usado nos postes de rua.



SPL/Latinstock

Figura 8.27. Na foto, vemos um conjunto moderno de transformadores, montados sobre base de concreto, para evitar "fugas" de corrente elétrica para a Terra.

As imagens desta página estão representadas fora de proporção.

Exemplo

Um transformador foi construído com um primário constituído por uma bobina de 400 espiras e um secundário com 2 000 espiras. Aplica-se ao primário uma tensão alternada de 120 V.

a) Qual a tensão que será obtida no secundário?

A tensão, V_2, no secundário poderá ser obtida através da relação $\frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1}$. Como temos: $V_1 = 120\,V$; $N_1 = 400$; $N_2 = 2\,000$, vem:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1} \quad \text{ou} \quad \frac{V_2}{120} = \frac{2000}{400} \quad \therefore \quad V_2 = 600\,V$$

b) Suponha que esse transformador esteja sendo usado para alimentar uma lâmpada fluorescente ligada ao seu secundário. Sabendo-se que a corrente no primário vale $i_1 = 1{,}5$ A, qual é o valor da corrente i_2 que passa pela lâmpada? (Suponha que não haja dissipação de energia no transformador.)

A potência desenvolvida em um aparelho elétrico, que é percorrido por uma corrente i ao ser submetido a uma tensão V, é dada por $P = Vi$. Então, a potência P_1 fornecida ao primário é $P_1 = V_1 i_1$ e a potência P_2 obtida no secundário (na lâmpada) é $P_2 = V_2 i_2$. Como não há dissipação de energia no transformador (transformador ideal), devemos ter $P_2 = P_1$. Logo:

$$V_2 i_2 = V_1 i_1 \quad \text{ou} \quad 600\, i_2 = 120 \cdot 1{,}5 \quad \therefore \quad i_2 = 0{,}30\,A$$

Observe que, se o transformador está sendo usado para aumentar a tensão, a corrente no secundário será forçosamente menor do que a corrente no primário. O contrário ocorre com um transformador que abaixa a tensão.

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

Não escreva no livro!

15. Suponha que uma bateria de automóvel esteja ligada ao primário de um transformador.

a) Haverá fluxo magnético através das espiras do secundário? sim

b) Esse fluxo será constante ou variável? Por quê? Constante, pois a corrente no primário é constante.

c) Então, existirá uma tensão nas extremidades da bobina do secundário? não

16. Considerando a situação do exemplo resolvido acima, suponha que a tensão de 120 V tenha sido aplicada à bobina de 2 000 espiras, e uma corrente $i_2 = 3{,}5$ A esteja passando em uma lâmpada ligada à bobina de 400 espiras. Orientando-se pela solução do exemplo resolvido nesta seção, determine a intensidade da corrente que está passando no primário do transformador. 0,70 A



Hulton Archive/Getty Images

JAMES CLERK MAXWELL (1831-1879)
Físico escocês, cuja importância no estudo da Eletricidade e do Magnetismo é comparada àquela que Newton teve na Mecânica, em virtude do caráter fundamental das leis que ele estabeleceu. Maxwell deu também contribuições importantes a outros campos da Física, entre elas um estudo da percepção das cores pela nossa visão (produziu uma das primeiras fotografias coloridas) e uma teoria sobre os anéis de Saturno. Entretanto, foi no campo do Eletromagnetismo que seus trabalhos tiveram maior realce, devendo-se destacar a previsão da existência das ondas eletromagnéticas e um dos triunfos dessa teoria: o estabelecimento da natureza eletromagnética da luz.

8.5 Ondas eletromagnéticas

Um trabalho notável desenvolvido no campo do Eletromagnetismo foi realizado na segunda metade do século XIX pelo físico escocês James C. Maxwell. Apoiando-se nas leis experimentais descobertas por Coulomb, Ampère e Faraday, e acrescentando a elas uma nova concepção criada por ele próprio, Maxwell estruturou um conjunto de equações, atualmente denominadas **equações de Maxwell**, que sintetizam todos os conhecimentos sobre Eletromagnetismo adquiridos até aquela época. Podemos dizer que as equações de Maxwell, no estudo da Eletricidade e do Eletromagnetismo, desempenham o mesmo papel que as leis de Newton na Mecânica.

A consequência mais importante obtida através dessas equações foi a previsão da existência das **ondas eletromagnéticas**, amplamente empregadas no cotidiano, na ciência e na tecnologia. Mostraremos a seguir, de maneira bastante simplificada, como Maxwell chegou a essa conclusão e como, mais tarde, suas ideias foram confirmadas experimentalmente.

Campo elétrico induzido

Na figura 8.28 mostramos uma espira metálica circular colocada em um campo magnético $\vec{B}$ entrando na folha de papel. Provocando-se uma variação nesse campo, o fluxo magnético através da espira variará e, uma corrente induzida será estabelecida na espira, isto é, os elétrons livres existentes nela, que estavam inicialmente em repouso, entrarão em movimento. Somos, portanto, levados a concluir que um **campo elétrico** atuou nesses elétrons, colocando-os em movimento, o qual só pode ter surgido graças à variação do campo magnético. Na figura estão mostradas algumas linhas de força desse campo elétrico, denominado **campo elétrico induzido**, criado pela variação do campo magnético.

Destacando a nossa conclusão, podemos dizer que:

Se um campo magnético, existente em uma certa região do espaço, sofrer variação no decorrer do tempo, essa variação faz aparecer, nessa região, um campo elétrico induzido.

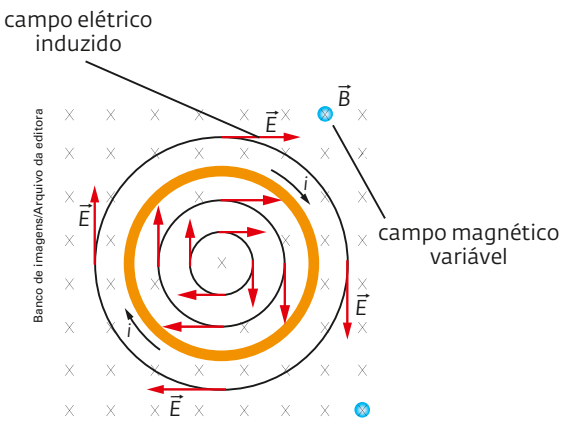


Figura 8.28. Variação de campo magnético gerando campo elétrico induzido. Representação sem escala e em cores fantasia.

Esse fato constitui um dos princípios básicos do Eletromagnetismo, em que um campo elétrico pode ser produzido não só por cargas elétricas em repouso, mas também por um campo magnético variável.

Observe que não é necessária a existência de uma espira metálica, como na **figura 8.28**, para que o campo elétrico apareça. A espira nos mostra que esse campo está presente, pois, se ele não existisse, não haveria corrente induzida na espira.

Campo magnético induzido

Maxwell teve a ideia de que, talvez, o fenômeno inverso fosse verdadeiro. Em outras palavras, lançou a hipótese de que **um campo elétrico variável pudesse dar origem a um campo magnético**.

Para esclarecer o significado dessa ideia, consideremos duas placas metálicas, separadas por certa distância, no ar, ligadas a uma bateria, como mostra a **figura 8.29**. Quando essa ligação é feita, a placa ligada ao polo positivo da bateria vai adquirindo uma carga positiva, enquanto a outra placa vai se carregando negativamente. As cargas nas placas criam um campo elétrico no espaço entre elas. À medida que o valor das cargas nas placas vai aumentando, a intensidade desse campo elétrico também cresce, isto é, temos entre as placas um campo elétrico variável no tempo.

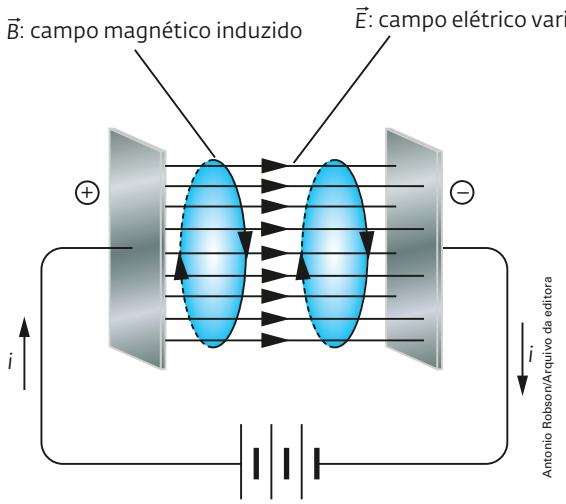


Figura 8.29. Variação de campo elétrico gerando campo magnético induzido. Representação sem escala e em cores fantasia.

Nessas condições, segundo Maxwell, deverá aparecer na região entre as placas um campo magnético, denominado **campo magnético induzido**. Na **figura 8.29** estão representadas algumas linhas do campo elétrico variável e do campo magnético induzido em virtude dessa variação do campo elétrico.

Portanto, a hipótese de Maxwell nos diz que:

> **Se um campo elétrico, existente em uma certa região do espaço, sofrer uma variação no decorrer do tempo, essa variação fará aparecer, nessa região, um campo magnético induzido.**

Portanto, de acordo com as ideias lançadas por Maxwell, um campo magnético poderia ser produzido não só por uma corrente elétrica (cargas elétricas em movimento), como também por um campo elétrico variável.

O que é uma onda eletromagnética

Suponha que em uma certa região do espaço exista um campo magnético $\vec{B}$ variável no tempo. Considere, por exemplo, o campo entre os polos de um eletroímã, cujas espiras são alimentadas por um gerador de corrente alternada (de alta frequência), como mostra a **figura 8.30**. Esse campo $\vec{B}$, sendo gerado por uma corrente alternada, será oscilante, isto é, seu módulo e seu sentido variarão periodicamente no decorrer do tempo. Em razão dessa variação, aparecerá nas vizinhanças do eletroímã um campo elétrico induzido $\vec{E}$.

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

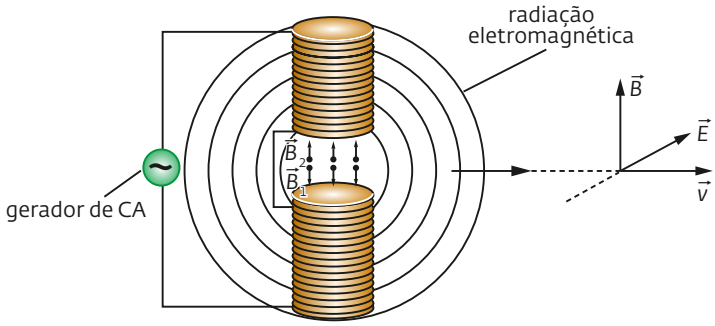


Figura 8.30. Representação do campo magnético no interior do eletroímã. Como a corrente é alternada, o campo magnético apresenta variação ora na configuração do vetor $\vec{B}_1$, ora na configuração do vetor $\vec{B}_2$.

Esse campo, por sua vez, estará variando no tempo e, de acordo com a hipótese de Maxwell, dará origem a um campo magnético induzido. Este, também variável, fará aparecer outro campo elétrico induzido, e assim sucessivamente. Dessa maneira, devemos ter a propagação, através do espaço, de um distúrbio constituído pelos campos variáveis $\vec{E}$ e $\vec{B}$ que se irradia em todas as direções a partir do eletroímã. Na **figura 8.31** procuramos dar a ideia da irradiação desses campos, mostrando, também, os vetores $\vec{E}$ e $\vec{B}$ em certo ponto e a velocidade $\vec{v}$ com que eles se propagam através do espaço.

Maxwell mostrou, por meio de suas equações, que esse distúrbio eletromagnético, ao se propagar, deveria apresentar todas as características de um movimento ondulatório. Portanto, de acordo com Maxwell, essa radiação eletromagnética deveria sofrer reflexão, refração, difração e interferência, exatamente como acontece com uma onda. Por esse motivo, o distúrbio constituído pela propagação de campos elétricos e magnéticos foi denominado **onda eletromagnética**.

Na **figura 8.31** procuramos representar uma onda eletromagnética se propagando para a direita. Observe que ela é constituída pelos campos $\vec{E}$ e $\vec{B}$ que oscilam periodicamente, de maneira semelhante aos pontos de uma corda na qual se propaga uma onda mecânica. Note que os vetores $\vec{E}$ e $\vec{B}$ são perpendiculares entre si e ambos são perpendiculares à direção de propagação da onda.

Ilustrações: Antonio Robson/Arquivo da editora

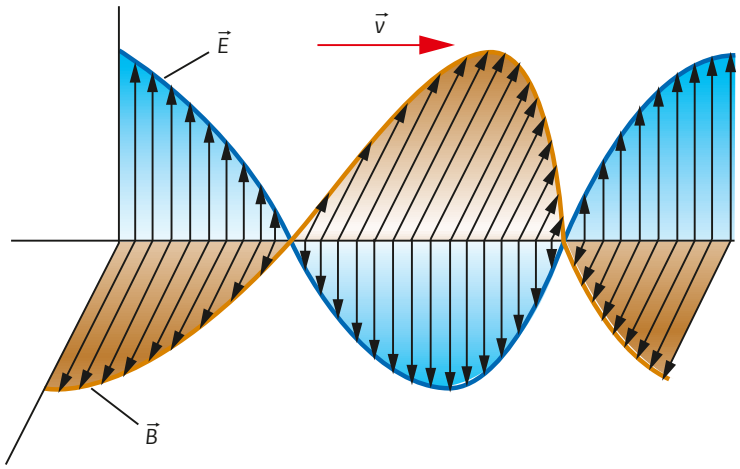


Figura 8.31. Onda eletromagnética propagando-se para a direita. ($\vec{E}$ no plano da folha e $\vec{B}$ em plano perpendicular à folha.)

Velocidade de propagação de uma onda eletromagnética

É importante salientar que, ao contrário das ondas mecânicas, como o som, por exemplo, uma onda eletromagnética **não** necessita de um meio material para se propagar. Como um campo elétrico e um campo magnético podem ser estabelecidos mesmo em um espaço vazio, uma onda eletromagnética pode se propagar no vácuo.

Um dos resultados de maior repercussão obtidos por Maxwell, usando suas equações, foi a determinação do valor da velocidade de propagação de uma onda eletromagnética. Seus cálculos mostraram que, no vácuo ou no ar, essas ondas deveriam se propagar com uma velocidade v cujo valor é:

$$v = 3{,}0 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

A importância desse resultado se deve ao fato de que esse valor coincide com a velocidade de propagação da luz no vácuo. Essa concordância levou Maxwell a suspeitar de que a luz fosse uma onda eletromagnética.

Os cientistas do século XIX já haviam estabelecido que a luz é um fenômeno ondulatório. Entretanto, eles não sabiam responder de que tipo de onda se tratava, isto é, qual era a natureza da onda luminosa.

Atualmente, sabemos que a suspeita de Maxwell era plausível: **a luz se comporta como uma onda eletromagnética**.

O estabelecimento da natureza eletromagnética da luz é considerado um dos grandes triunfos da teoria de Maxwell, pois esse fato veio unificar a Óptica e o Eletromagnetismo.

Então, já que os fenômenos luminosos têm sua origem em fenômenos eletromagnéticos, a Óptica pode ser considerada um ramo do Eletromagnetismo e suas leis (como as leis da reflexão, refração, difração, etc.) podem ser deduzidas das equações de Maxwell.

Em virtude de sua morte prematura, em 1879, aos 48 anos de idade, Maxwell não chegou a ver suas previsões confirmadas.

A existência das ondas eletromagnéticas só foi verificada experimentalmente no fim do século XIX, por Hertz. Ele conseguiu obter, em seu laboratório, ondas eletromagnéticas (ondas hertzianas) com todas as propriedades previstas por Maxwell. Suas experiências, além de confirmarem as hipóteses de Maxwell, contribuíram para estabelecer que a luz se comporta como uma onda eletromagnética.

É, então, importante destacar que:

Ao calcular a velocidade de propagação de uma onda eletromagnética, no vácuo, Maxwell encontrou um resultado igual à velocidade da luz. Esse fato levou-o a suspeitar de que a luz fosse uma onda eletromagnética.
As experiências de Hertz, e outras posteriores, mostraram que as ideias de Maxwell condiziam com os dados experimentais.

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

Não escreva no livro!

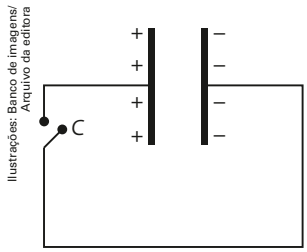
17. Suponha que, na **figura 8.28**, o módulo do campo magnético $\vec{B}$ esteja aumentando no tempo. Nessas condições, responda:

a) Haverá um campo elétrico induzido naquela região? sim

b) Usando a lei de Lenz, determine o sentido da corrente induzida na espira.

c) Então, qual é o sentido das linhas de força do campo elétrico induzido?

18. A figura a seguir mostra duas placas metálicas carregadas com cargas de mesmo módulo, mas de sinais contrários.



Ilustrações: Banco de imagens/ Arquivo da editora

Considerando que a chave C permaneça aberta:

a) Existe um campo elétrico no espaço entre as placas? sim

b) Esse campo elétrico fará aparecer entre as placas um campo magnético induzido? Por quê?

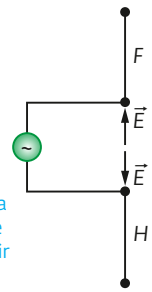
19. Considere o circuito do exercício anterior logo após a chave C ter sido fechada.

a) O valor da carga em cada placa está aumentando, diminuindo ou não está se alterando? Diminuindo.

b) O módulo do campo elétrico entre as placas está aumentando, diminuindo ou não está se alterando? Diminuindo.

c) Então, haverá um campo magnético induzido na região entre as placas? sim

20. Um gerador de voltagem alternada é ligado às extremidades F e H de uma antena metálica, como mostra a figura a seguir. Em virtude disso, estabelece-se entre F e H um campo elétrico $\vec{E}$ que oscila periodicamente no tempo.



a) Haverá um campo magnético induzido nas proximidades da antena? sim

b) Por analogia com a figura 8.30, diga o que ocorre no espaço em torno dessa antena.

17. b) Contrário ao sentido indicado na figura 8.28.
c) Contrário ao sentido indicado na figura 8.28.
18. b) Não, pois o campo elétrico não está variando no tempo.
20. b) Há uma onda eletromagnética se propagando a partir da antena.

FÍSICA NO CONTEXTO

AS UNIFICAÇÕES DAS TEORIAS FÍSICAS

Dois importantes ramos dessa ciência, a Óptica e a Eletricidade, que eram estudados com base em princípios independentes, passaram a ser descritos com base em uma única teoria, sintetizada pelas equações de Maxwell. Ocorreu, então, a **unificação** (ou a síntese) desses dois grandes campos da Física.

Em outros momentos da história da Física foram, também, observadas unificações tão importantes quanto essa e, ainda na atualidade, novas sínteses continuam a ser propostas e pesquisadas, buscando-se descrever o maior número possível de fenômenos naturais com um número cada vez menor de princípios fundamentais. Analisaremos, a seguir, de maneira sucinta, as grandes unificações que os físicos estabeleceram até hoje ao longo da evolução dessa área de conhecimento.

A primeira grande unificação que citaremos, denominada **síntese newtoniana**, estabeleceu a universalidade das leis da Mecânica. A Física aristotélica afirmava que as leis referentes aos movimentos dos corpos celestes eram diferentes daquelas que eram obedecidas pelos corpos na superfície da Terra. Ao publicar os *Principia*, Newton mostrou que as leis básicas por ele estabelecidas poderiam ser usadas para descrever os movimentos de quaisquer corpos (celestes ou terrestres).

As experiências de Oersted, e estudos posteriores desenvolvidos por Ampère e Faraday, mostraram que os fenômenos elétricos e magnéticos tinham a mesma origem. A Eletricidade e o Magnetismo foram unificados, originando um novo campo de estudos mais abran-

gente, denominado Eletromagnetismo. Cerca de cinquenta anos depois os trabalhos de Maxwell tornariam o campo do Eletromagnetismo muito mais amplo, incorporando também a Óptica a essa área.

No início do século XX, após terem ocorrido as sínteses mencionadas, tudo parecia indicar que apenas dois tipos de força estavam presentes em qualquer fenômeno natural: a força de origem gravitacional e a força de origem eletromagnética. Durante grande parte de sua vida, Albert Einstein tentou estabelecer a unificação dessas forças, procurando uma teoria que pudesse descrevê-las com base em um mesmo princípio fundamental. A busca da teoria do campo unificado, como ela foi denominada, até hoje não teve êxito, apesar de muitos cientistas da atualidade continuarem a realizar pesquisas nesse sentido.

Com o desenvolvimento da Física Nuclear, os cientistas constataram a existência de dois outros tipos de força, que se manifestam somente entre partículas que constituem o núcleo atômico. Essas forças foram denominadas **força nuclear fraca** e **força nuclear forte**. A força nuclear fraca entre duas partículas é cerca de 100 mil vezes menor que a força eletromagnética que também se manifesta entre elas, e seu alcance é muito pequeno, pois ela não atua quando as partículas se encontram separadas por distâncias superiores a 10^{-16} cm. Essa força se manifesta praticamente entre todos os tipos de partículas. Por outro lado, a força nuclear forte se manifesta apenas entre partículas nucleares, mas seu alcance é consideravelmente maior, manifestando-se para distâncias de até 10^{-13} cm.

Modernamente, graças aos trabalhos liderados pelo físico paquistanês, radicado na Inglaterra, Abdus Salam, foi obtida uma grande vitória relacionada com a unificação das forças da natureza. Apesar de as tentativas de unificação das forças eletromagnéticas e gravitacionais terem fracassado, esse cientista conseguiu estabelecer uma teoria na qual se chega à síntese entre a força eletromagnética e a força nuclear fraca. Essas ideias puderam ser comprovadas experimentalmente nos aceleradores de partículas do Cern, do francês *Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire*. A importância do trabalho de Abdus Salam fez com que ele recebesse o Prêmio Nobel de Física em 1979.

Outras tentativas para unificar as forças da natureza continuam sendo desenvolvidas e há indícios, segundo alguns pesquisadores, de que a unificação total possa ser alcançada dentro de algum tempo. A teoria responsável por essa unificação é conhecida pela sigla TOE, do inglês *theory of everything*, isto é, "teoria de todas as coisas".

No quadro da **figura 8.32**, você poderá ter uma visão global das principais unificações ocorridas no campo da Física que acabamos de abordar.

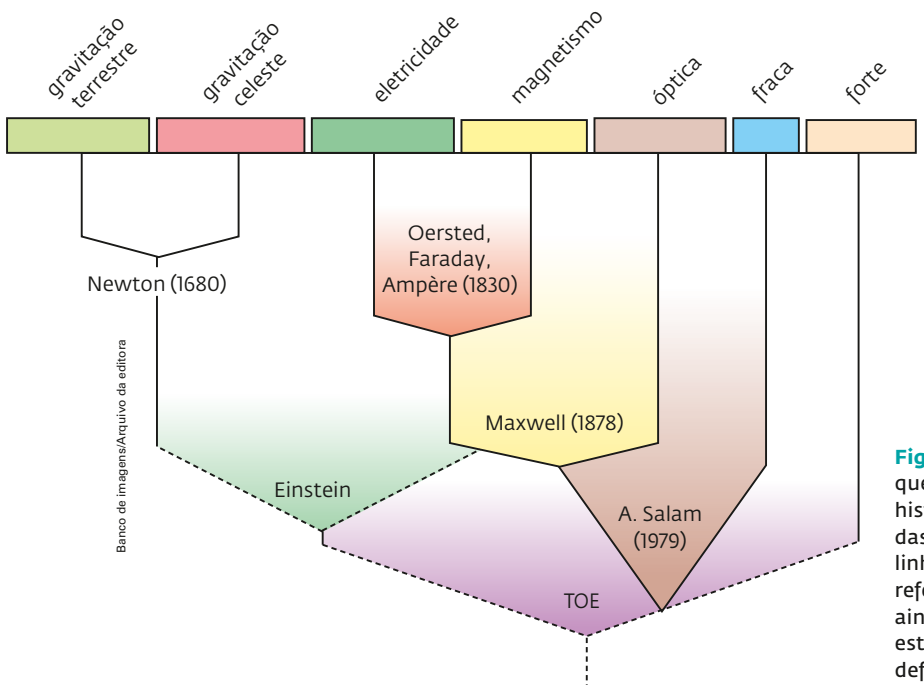


Figura 8.32. Diagrama que mostra a história da unificação das teorias físicas. As linhas pontilhadas se referem a teorias ainda não estabelecidas definitivamente.

8.6 O espectro eletromagnético

O que é espectro eletromagnético

Desde a época de Maxwell até nossos dias, houve um grande progresso nos conhecimentos relacionados com as ondas eletromagnéticas. Assim, sabemos atualmente que existem vários tipos dessas ondas, as quais, apesar de serem todas constituídas pelos campos $\vec{E}$ e $\vec{B}$, que oscilam no tempo e se propagam no espaço, apresentam características bastante diferentes.

Os diversos tipos de ondas eletromagnéticas diferem pelo valor de sua frequência e, também, pela maneira como elas são produzidas, como descreveremos mais adiante.

Na **figura 8.33** estão apresentados os diversos tipos de ondas eletromagnéticas conhecidos. Observe que, conforme o valor da frequência, elas recebem denominações especiais: ondas de rádio, infravermelho, TV, micro-ondas, luz visível, ultravioleta, raios X e raios gama.

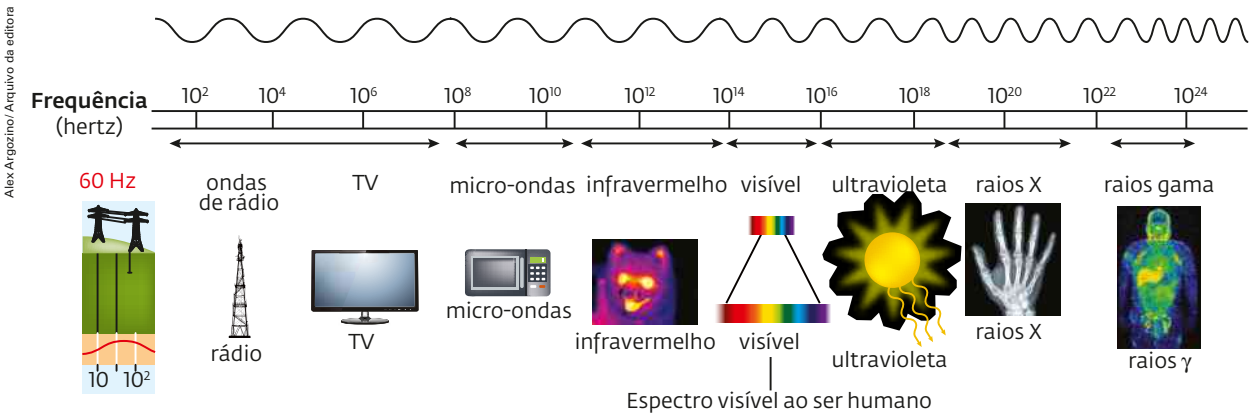


Figura 8.33. Os diversos tipos de ondas eletromagnéticas conhecidas constituem o espectro eletromagnético (os limites dos intervalos mostrados não devem ser considerados com rigidez). Representações sem escala e em cores fantasia.

O conjunto de todos esses tipos de ondas é denominado **espectro eletromagnético**, e está representado na **figura 8.33**. Todas as ondas que constituem esse espectro propagam-se, no vácuo, com a velocidade da luz, $v = 3{,}0 \cdot 10^8$ m/s. Então, sempre que uma carga elétrica é acelerada, ela irradia certo tipo de onda eletromagnética, o que vai depender do valor da aceleração da carga.

Examinaremos, a seguir, algumas características de cada tipo de onda que constitui o espectro eletromagnético.

Ondas de rádio e TV

Vimos, na **figura 8.33**, que as ondas eletromagnéticas que apresentam frequências mais baixas e até cerca de 10^8 hertz, ou seja, 100 milhões de vibrações por segundo, são as **ondas de rádio**. Apesar de as ondas de rádio receberem essa denominação porque são usadas pelas estações de rádio AM e FM para realizar suas transmissões, essa faixa do espectro eletromagnético também engloba as ondas de TV, celular, ondas curtas e ondas longas. Nas estações existem circuitos elétricos especiais que provocam a oscilação de elétrons na antena emissora.

Esses elétrons estão sendo continuamente acelerados e, por isso, emitem as ondas de rádio que transportam as mensagens da estação **(figura 8.34)**.

As ondas de rádio são divididas em três bandas de frequência:

- HF – *High Frequency* (3 MHz a 30 MHz), ondas que são utilizadas para comunicações de longo alcance em transportes marítimos, aéreos e por rádios amadores. Estas ondas são transmitidas através da reflexão da onda na ionosfera, o que possibilita que sejam captadas em pontos distantes da estação emissora.
- VHF – *Very High Frequency* (30 MHz a 300 MHz), ondas que são utilizadas para comunicações de médio alcance, como na navegação costeira, por exemplo.
- UHF – *Ultrahigh Frequency* (300 MHz a 3000 MHz), ondas que são utilizadas para comunicações de curto alcance, como nos carros de polícia, rádios portáteis, telefones celulares, TV e nave espacial para comunicações terrestres.


Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Syda Productions/Shutterstock

Figura 8.34. Com a antena do celular é possível sintonizar a frequência de uma rádio AM ou FM que é emitida por elétrons acelerados na antena da emissora.

As ondas eletromagnéticas usadas pelas emissoras de TV têm as mesmas características das ondas de rádio. Entretanto, como vemos na **figura 8.33**, elas apresentam frequências mais elevadas do que aquelas normalmente usadas pelas estações de rádio.

Os canais de 2 a 13 estão na faixa de frequência VHF e os canais de 14 a 83 estão na faixa da UHF, por exemplo. Nessas faixas de frequência as ondas de TV não são refletidas pela ionosfera, necessitando de estações repetidoras para a transmissão do sinal de um local para outro **(figura 8.35)**. Em alguns casos, utilizam-se satélites estacionários para a transmissão do sinal.

As imagens desta página estão representadas fora de proporção.

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

Antonio Robson/Arquivo da editora

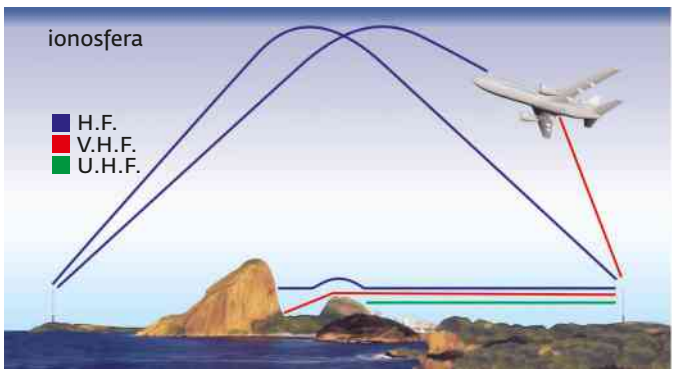


Figura 8.35. As ondas emitidas na banda de frequência HF são refletidas pela ionosfera, que é a camada ionizada da atmosfera situada entre 90 km e 140 km da superfície terrestre. As ondas VHF e UHF necessitam de estações repetidoras para serem transmitidas.

Os aparelhos celulares surgiram no Brasil na década de 1980. Nesta época, os aparelhos eram enormes e ficaram conhecidos como "tijolões", conforme podemos observar na **figura 8.36**. Nesta época a transmissão do sinal era feita de forma analógica (1G), uma tecnologia que permitia apenas a comunicação entre duas pessoas, da mesma forma que utilizamos o telefone fixo presente nas residências.

Shutterstock/Montagem Cesar Wolf



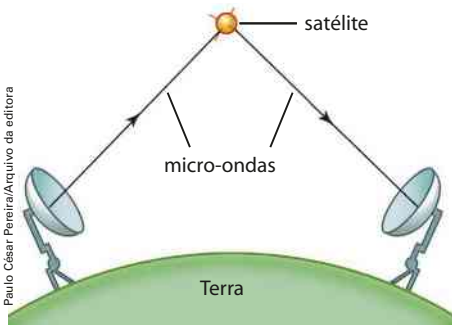
Figura 8.36. Evolução tecnológica dos aparelhos de telefonia móvel.

As imagens desta página estão representadas fora de proporção.

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

Por volta da década de 1990, as operadoras de telefonia móvel começaram a operar com sinal digital (2G), o que possibilitou incorporar novas tecnologias ao aparelho celular, como o acesso à internet, por exemplo. A faixa de frequências de cada aparelho celular depende de cada uma das operadoras de telefonia móvel que existe no país onde operam. Algumas operadoras utilizam as frequências de 850 MHz e 1900 MHz, que é o padrão americano, enquanto outras operadoras utilizam frequências de 900 MHz e 1800 MHz, que é o padrão europeu e é a frequência mais utilizada no mundo.

Atualmente são empregadas novas faixas de frequências, como 3G, que corresponde às frequências de 850 MHz e de 2 100 MHz, e 4G, com frequência de 2 500 MHz. Entretanto, estes valores não são padronizados mundialmente, o que significa dizer que devemos tomar cuidado ao comprar um aparelho celular em outro país. Nos Estados Unidos, por exemplo, o 4G opera na faixa de 700 MHz e 2 100 MHz, logo, este aparelho pode não se conectar adequadamente na faixa do 4G no Brasil.



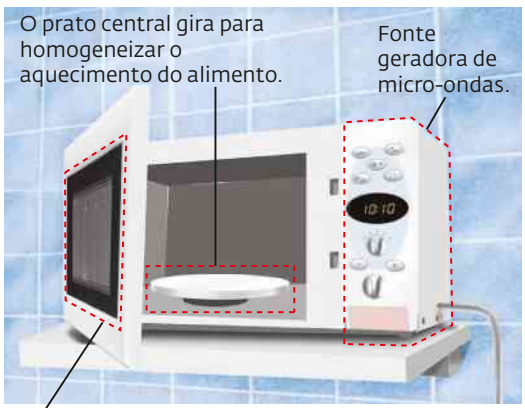
Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura 8.37. As micro-ondas são utilizadas para transmissões de TV ou telefonia através de satélites estacionários.

Micro-ondas

Considerando frequências mais elevadas do que as ondas de rádio, encontramos ondas eletromagnéticas denominadas **micro-ondas**. Elas têm frequências compreendidas, aproximadamente, entre 10^8 hertz e 10^{11} hertz, como indica a **figura 8.33**.

Hoje em dia as micro-ondas são usadas amplamente, em quase todo o mundo, nas telecomunicações, seja transportando sinais de TV via satélite ou transmissões telefônicas, seja ligando cidades e países **(figuras 8.37** e **8.38)** e em alguns eletrodomésticos **(figura 8.39)**.



Antonio Robson/Arquivo da editora

A porta do forno possui uma tela metálica que funciona como uma gaiola de Faraday impedindo que as micro-ondas saiam para o exterior. Além disso, um dispositivo de segurança desliga o forno quando a porta é aberta.

Figura 8.39. O forno de micro-ondas é muito usado para cozinhar e aquecer alimentos. As micro-ondas emitidas têm frequência de 2450 MHz, que corresponde à frequência de ressonância da molécula da água. As micro-ondas são absorvidas pelas moléculas de água existentes nos alimentos, o que provoca aumento da agitação molecular, causando, então, elevação da temperatura do alimento. Recipientes de vidro, cerâmica e outros materiais nos quais os alimentos estão contidos possuem frequência de ressonância diferente da água e por isso não são aquecidos pelas micro-ondas.

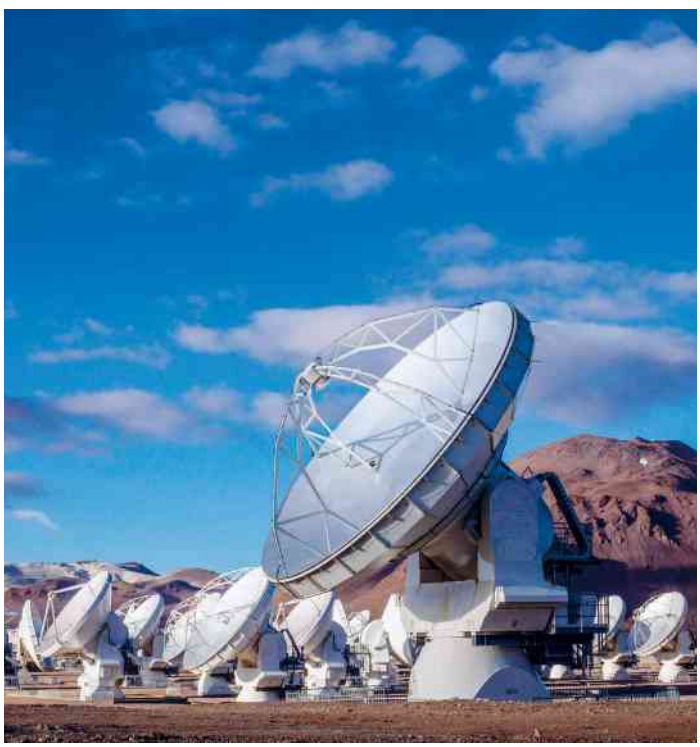

National Geographic/Alamy/Latinstock

Figura 8.38. Telescópio de micro-ondas ALMA (*Atacama Large Millimeter Array*), na planície Chajnantor, no deserto do Atacama, Chile, 2013.

Radiação visível

As ondas eletromagnéticas cujas frequências estão compreendidas entre $4{,}0 \cdot 10^{14}$ hertz e $7{,}5 \cdot 10^{14}$ hertz constituem uma região do espectro eletromagnético importante para nós. Essas radiações são capazes de estimular a visão humana; são as **radiações luminosas** (luz visível).

Observe, na **figura 8.33**, que as radiações luminosas constituem uma faixa muito pequena do espectro eletromagnético. Portanto, nossos olhos não são capazes de perceber a grande maioria das radiações integrantes desse espectro. As menores frequências das radiações visíveis nos dão a sensação de vermelho. Aumentando a frequência das radiações, teremos, sucessivamente, as radiações correspondentes às cores laranja, amarelo, verde, azul, anil e, no final da região visível, a radiação violeta **(figura 8.40)**. Pode-se perceber, agora, que a denominação **infravermelho** foi usada porque as frequências dessa radiação estão situadas em uma faixa logo abaixo da frequência correspondente à cor vermelha.

Luz	Comprimento de onda (10^{-7} m)	Frequência (10^{4} Hz)
Violeta	4,0 – 4,5	6,7 – 7,5
Anil	4,5 – 5,0	6,0 – 6,7
Azul	5,0 – 5,3	5,7 – 6,0
Verde	5,3 – 5,7	5,3 – 5,7
Amarelo	5,7 – 5,9	5,0 – 5,3
Alaranjado	5,9 – 6,2	4,8 – 5,0
Vermelho	6,2 – 7,5	4,0 – 4,8

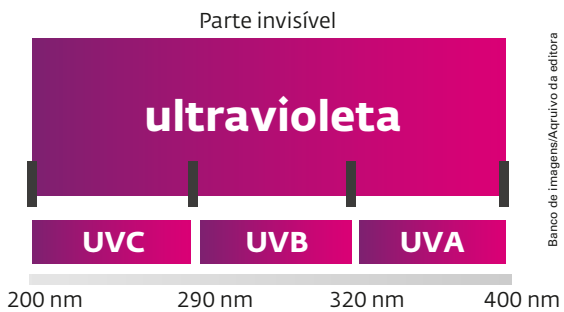
Figura 8.40. Espectro da luz visível com radiações luminosas identificadas por suas cores.

Radiação ultravioleta

As radiações eletromagnéticas com frequências imediatamente superiores às da região visível são denominadas **radiações ultravioleta**. Essa denominação indica que as frequências dessas ondas são superiores à frequência da luz violeta. Observe, na **figura 8.33**, que a região ultravioleta alcança frequências desde o visível até 10^{18} hertz, com comprimento de onda entre 200 mm e 400 mm **(figura 8.41)**.

Os raios ultravioleta são emitidos por átomos excitados, como em lâmpadas de vapor de Hg acompanhando a emissão de luz. Essas radiações não são visíveis e até podem danificar os tecidos do olho humano. A radiação ultravioleta está dividida em três faixas **(figura 8.41)**: as radiações UVA, UVB e UVC.

A luz solar contém uma quantidade apreciável dessas radiações, que são, em grande parte, absorvidas pela camada de ozônio (O_3) da atmosfera terrestre. A destruição dessa camada (que origina os "buracos da camada de ozônio") pode fazer com que o câncer de pele se torne um sério problema. Em contrapartida, o fato de a radiação ultravioleta ser capaz de matar células vivas torna essa radiação útil no combate às bactérias. As lâmpadas de ultravioleta são, então, largamente empregadas para esterilizar dependências hospitalares, cozinhas de hotéis, restaurantes e até mesmo sistemas de ar condicionado.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 8.41. Espectro eletromagnético correspondente à radiação ultravioleta.

Na **figura 8.42**, podemos observar como as radiações UVA e UVB penetram na pele em comparação com a radiação IV. Em excesso, a radiação UVA é responsável por provocar o fotoenvelhecimento, enquanto a radiação UVB pode provocar queimaduras solares e até o desenvolvimento de câncer. O câncer de pele é o tipo de câncer mais frequente no Brasil, correspondendo a 25% dos tumores malignos registrados no país. A radiação UVC é bloqueada pela camada de ozônio. Para alertar a população dos riscos da radiação UV, foi criado um índice UV que tem o papel de informar o nível de radiação solar na superfície da Terra **(figura 8.43)**. Observe que a intensidade de radiação UV varia de acordo com o horário do dia em que as pessoas estão expostas à radiação solar. Ao meio-dia, por exemplo, o risco de danos à pele causados pela exposição à radiação UV é maior.

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

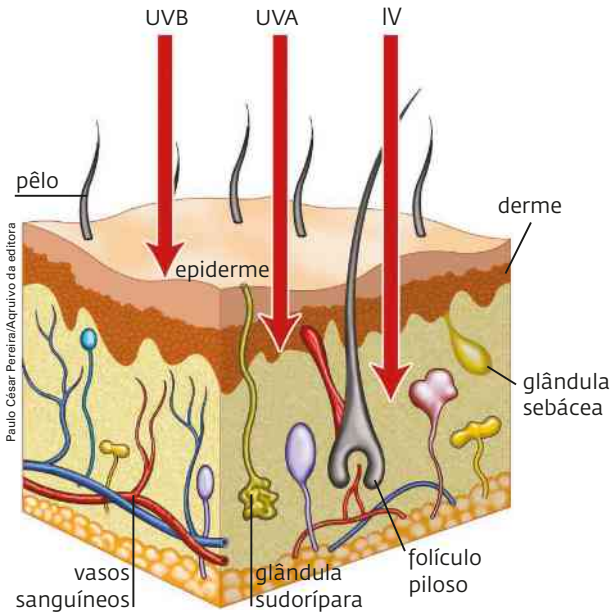


Figura 8.42. Penetração da radiação UV e IV na pele. Representação sem escala e em cores fantasia.

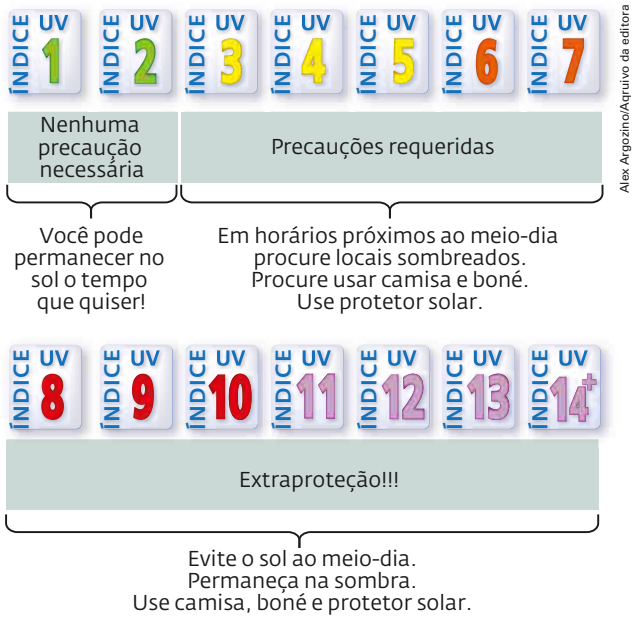


Figura 8.43. Índice UV.

Raios X

Esse tipo de radiação é constituído pelas ondas eletromagnéticas de frequências superiores às radiações ultravioleta (veja a **figura 8.33**). Os raios X foram descobertos em 1895 pelo físico alemão W. Röntgen, e por isso no início eram chamados de raios Röntgen.

Esses raios podem ser produzidos em tubos apropriados (ampolas de raios X), como o mostrado na fotografia da **figura 8.44.a**. Nesses tubos, um feixe de elétrons é emitido pela placa marrom indicada na **figura 8.44.b**. Esses elétrons são acelerados por meio de uma diferença de potencial elevada, existente entre o filamento e um alvo de tungstênio. Ao atingirem esse alvo, os elétrons são bruscamente retardados, isto é, sofrem uma desaceleração muito intensa. Em virtude disso, eles emitem ondas eletromagnéticas de alta frequência, situadas na faixa correspondente aos raios X (veja a **figura 8.44.b**).

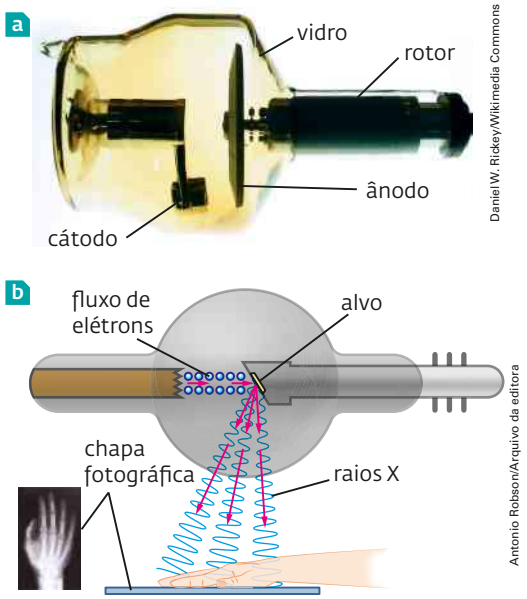


Figura 8.44. Ampola de raios X (**a**) e representação, sem escala e em cores fantasia, do mecanismo que permite a produção desse tipo de raio (**b**).

Röntgen verificou que os raios X têm a propriedade de atravessar, com certa facilidade, os materiais de baixa densidade, como os músculos de uma pessoa, e de ser mais bem absorvidos por materiais de densidade mais elevada, como os ossos do corpo humano. Em virtude dessa propriedade, logo após a sua descoberta, os raios X passaram a ser amplamente usados para se obter radiografias **(figura 8.45)**. O próprio Röntgen foi o primeiro a fazer uso dessas radiações com essa finalidade, conseguindo obter a radiografia dos ossos da mão de uma pessoa.

Modernamente, os raios X encontram um campo muito vasto de aplicações além do seu emprego em diagnóstico por radiografias **(figura 8.45)** e tomografias em seres humanos e de uso veterinário. Eles também são utilizados no tratamento de câncer (radioterapia), na odontologia, na inspeção de bagagens e cargas nas fronteiras **(figura 8.46)**, na inspeção de fraturas em materiais (fuselagem de aeronaves, por exemplo), na pesquisa científica, na inspeção alimentar e na indústria.



Montgomery Martin/Alamy/Latinstock

Figura 8.45. Paciente sendo preparado para exame de raios X.



imageBROKER/Alamy/Latinstock

Figura 8.46. Equipamento de raios X utilizado em processos de fiscalização nos aeroportos.

Todos os ambientes que utilizam radiação devem estar devidamente sinalizados **(figuras 8.47.a** e **b)** indicando a presença de radiação ionizante.



SPL/Latinstock

WILHELM CONRAD RÖNTGEN (1845-1923)

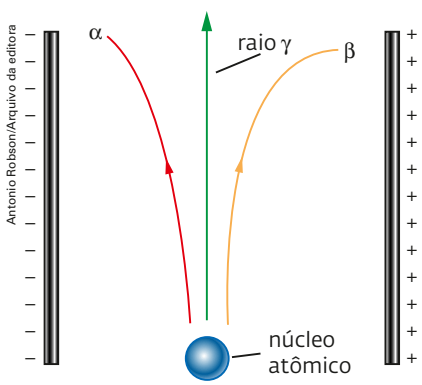
Físico alemão, descobriu os raios X, que também costumam ser chamados de raios Röntgen. Em 1895, lecionando na Universidade de Wurzburg, na Alemanha, ao realizar experiências com tubos de raios catódicos, percebeu a existência das radiações de natureza desconhecida que denominou raios X. Essa descoberta lhe valeu o Prêmio Nobel de Física em 1901.

As imagens desta página estão representadas fora de proporção.

Raios gama (raios γ)

Na **figura 8.33** vimos que as ondas eletromagnéticas que apresentam as frequências mais altas conhecidas são os **raios gama**. Essa radiação é emitida pelos núcleos atômicos dos elementos quando eles se desintegram. Esses elementos são denominados **elementos radioativos**.

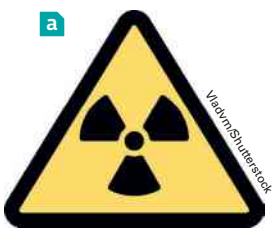
Um núcleo atômico, ao se desintegrar, pode emitir até três tipos de radiações: α, β e γ. Fazendo essas radiações passarem dentro de um campo elétrico, como mostra a **figura 8.48**, verifica-se que elas se separam. Os raios α desviam-se para um lado (são partículas positivas), os raios β desviam-se para o outro (são partículas negativas) e os raios γ não sofrem desvio, pois não possuem carga elétrica e, assim, não interagem com o campo elétrico.



Antonio Robson/Arquivo da editora

Figura 8.48. Radiações α, β e γ separadas pela ação de um campo elétrico.

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



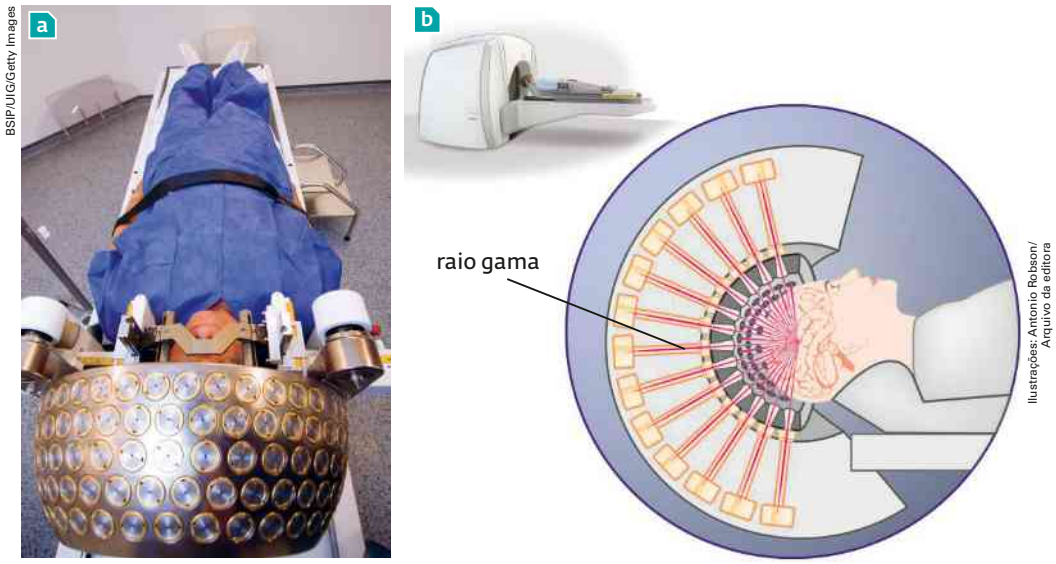
VladvmShutterstock



Ecelop/Shutterstock

Figura 8.47. Em **a**, Trifólio – símbolo usado internacionalmente para alertar as pessoas sobre radiações ionizantes nas proximidades que podem constituir risco para os seres vivos. Em **b** símbolo que alerta contra radiação ionizante, mas que não substitui o trifólio. Ambos são utilizados em hospitais e clínicas de radiologia, por exemplo.

Do mesmo modo que os raios X, os raios γ podem causar danos irreparáveis às células animais. Apesar de ser conhecida por causa da explosão de bombas atômicas que foram jogadas em Hiroshima e Nagasaki, no Japão, durante a 2ª Guerra Mundial, atualmente a radiação γ é largamente empregada em Medicina Nuclear tanto para diagnóstico quanto para terapia **(figura 8.49)**. Outras aplicações dos raios γ envolvem a esterilização de materiais (fraldas, injeções, etc.), na irradiação de alimentos **(figura 8.50)**, em telescópios astronômicos e na inspeção de peças e tubulações na indústria.



BSIP/UIG/Getty Images

Ilustrações: Antonio Robson/ Arquivo da editora

Figura 8.49. Fotografia (**a**) e representação, sem escala e em cores fantasia (**b**), de um paciente sendo submetido a uma neurocirurgia com Gamma Knife para remoção de um tumor localizado no cérebro. O equipamento utiliza 192 fontes do elemento radioativo cobalto-60. A radiação gama produzirá danos nas células tumorais.

As imagens desta página estão representadas fora de proporção.



Fotos: Voyagerix/Shutterstock

Figura 8.50. A irradiação é uma técnica utilizada para conservar os alimentos. O processo de irradiação evita o brotamento nas leguminosas, retardando o envelhecimento dos alimentos. Ela não torna o alimento radioativo, apenas atua sobre bactérias, fungos e leveduras que estão presentes nos alimentos.

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

Não escreva no livro!

21. Considere um feixe de micro-ondas e um feixe de luz verde, ambos propagando-se no vácuo.
a) A velocidade de propagação das micro-ondas é maior, menor ou igual à da luz verde? igual
b) O comprimento de onda das micro-ondas é maior, menor ou igual ao da luz verde? maior

22. Medindo-se o comprimento de onda de uma radiação eletromagnética, propagando-se no vácuo, encontrou-se o valor $\lambda = 7{,}5 \cdot 10^{-9}$ m. Determine que tipo de onda eletromagnética constitui essa radiação. Radiação ultravioleta.

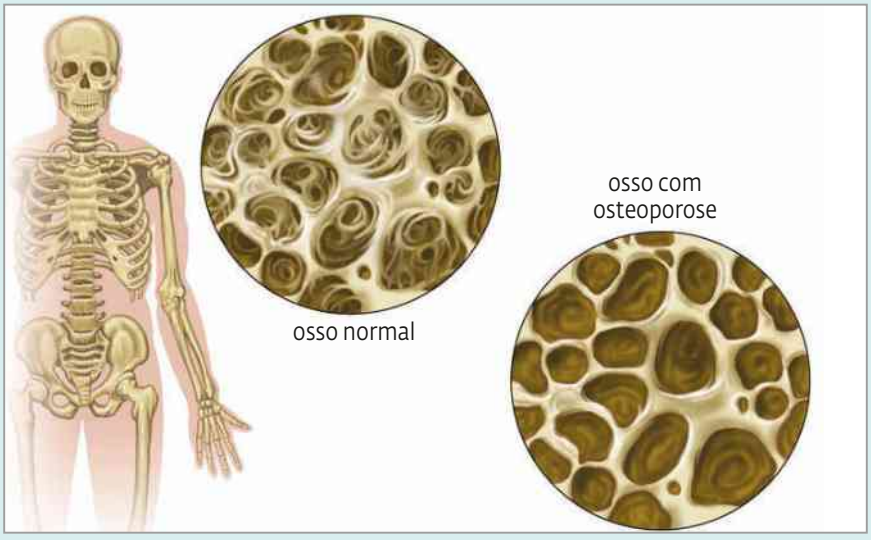
23. Em uma radiografia, os ossos aparecem claros sobre um fundo escuro. Então, lembrando-se do que foi dito no texto sobre os raios X, responda: em uma chapa de radiografia, a quantidade de raios X que incide nas regiões claras é maior ou menor do que a quantidade que incide sobre as regiões escuras? menor

APLICAÇÕES DA FÍSICA

DENSITOMETRIA ÓSSEA

A osteoporose **(figura 8.51.a)** é uma doença caracterizada pela redução de massa óssea, o que aumenta o risco de fraturas que podem ocorrer tipicamente em pessoas idosas. Entre os principais fatores de risco que podem levar à osteoporose estão a predisposição genética para a doença, o uso de medicamentos à base de cortisona, alimentação deficiente em cálcio e vitamina D, sedentarismo, tabagismo, consumo de álcool, entre outros. O diagnóstico pode ser obtido através de um exame denominado densitometria óssea que emprega raios X de baixa intensidade. Esta técnica mede a atenuação do feixe de raios X quando este atravessa o osso, ou seja, uma fonte emite raios X **(figura 8.51.b)**, que são colimados em um feixe estreito que atravessa o paciente até alcançar o detector, onde é registrada a intensidade do feixe transmitido. O equipamento se movimenta de um lado para o outro ao longo de toda a mesa. Um computador calcula a Densidade Mineral Óssea (BMD, do inglês *bone mineral density*), em g/cm^2, que é comparada com valores de referência.

a



Paulo Cesar/Arquivo da editora

b



Dwight Arthur/<http://www.camisrd.com/>

Figura 8.51. Representação, sem escala e em cores fantasia, do osso normal e do osso com osteoporose (**a**). Equipamento de diagnóstico para o exame de densitometria óssea (**b**).

1. É um método diagnóstico não invasivo.
2. Porque os raios X interagem com os tecidos do nosso corpo, tanto com o tecido mole quanto com o osso.

QUESTÕES

1. Cite uma vantagem da densitometria óssea.

2. Explique por que é possível identificar osteoporose no osso utilizando os raios X.

8.7 Transmissão e distribuição de energia elétrica

Por que a transmissão da energia elétrica é feita com alta tensão

Ilustrações: Antonio Robson/Arquivo da editora

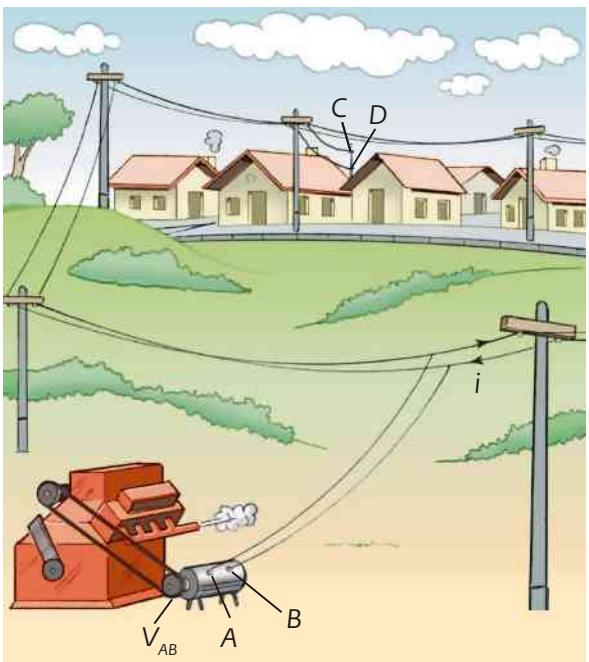


Figura 8.52. A potência fornecida pelo gerador é em parte dissipada nos fios que conduzem a corrente até o local onde ela será utilizada. Representação sem escala e em cores fantasia.

Qualquer que seja o tipo de usina escolhido para a produção de energia elétrica, em qualquer parte do mundo, ela será sempre construída para gerar corrente alternada.

Um dos principais motivos dessa escolha está relacionado com as perdas de energia, por efeito Joule, que ocorrem nos fios que transportam a corrente elétrica a longas distâncias. Para analisar esse fato, consideremos a **figura 8.52**, na qual temos um gerador produzindo corrente elétrica, que é transportada pelos fios *AC* e *BD*, para ser utilizada na rede elétrica de uma residência.

Sendo V_{AB} a tensão entre os polos do gerador e i a corrente nos fios, a potência fornecida pelo gerador é $P_1 = iV_{AB}$. Mas, sendo r a resistência total dos fios transportadores, a potência desenvolvida nesses fios sob a forma de calor (efeito Joule) será $P_2 = ri^2$. Assim, a potência P, que é recebida na residência, será:

$$P = P_1 - P_2 \quad \text{ou} \quad P = iV_{AB} - ri^2$$

A perda por efeito Joule nos fios ($P_2 = ri^2$) deve ser a menor possível. Para isso, devemos procurar diminuir os valores de r e de i. O valor de r só pode ser diminuído se for aumentada a área da seção reta dos fios, isto é, usando-se fios mais grossos. Entretanto, existe um limite para esse procedimento, pois cabos muito grossos, além de terem custo elevado, tornam a rede de transmissão extremamente pesada.

Assim, a solução mais adequada é procurar reduzir o valor da corrente i a ser transmitida. A potência $P_1 = iV_{AB}$, fornecida pelo gerador, não pode sofrer alteração; se o valor de i for reduzido, teremos de aumentar o valor de V_{AB} para manter inalterado o valor dessa potência. Concluímos assim que, para reduzir as perdas por aquecimento nos fios transportadores, a energia elétrica deve ser transmitida com baixa corrente e alta tensão.

Essa é exatamente a solução adotada pelos engenheiros eletricistas ao projetarem as linhas de transmissão. O valor da alta tensão em cada caso depende da potência a ser transmitida e da distância entre a usina e o local de consumo. Assim, são usadas tensões de 100 000 V, 250 000 V, 480 000 V, etc. e, atualmente, já são projetadas transmissões com até 1 000 000 V. Não é possível, entretanto, elevar indefinidamente o valor dessas altas tensões, porque acima de certos valores o ar em volta do fio torna-se condutor, permitindo o escoamento de eletricidade, o que constitui outra forma de perda de potência.

A tensão alternada pode ser facilmente elevada ou reduzida



Steve Allen/SPL/Latinstock

Figura 8.53. Turbinas que são acionadas por vapor a alta pressão para usinas termelétricas ou nucleares.

As altas tensões necessárias para a transmissão de energia elétrica não podem ser fornecidas diretamente por um gerador, seja ele de corrente alternada, seja de corrente contínua. De fato, os maiores geradores **(figura 8.53)** das grandes usinas fornecem tensões em torno de 10 000 V. Então, torna-se necessário, para a transmissão, elevar consideravelmente os valores das tensões fornecidas pelos geradores.

Se o gerador fosse de corrente contínua, não haveria condições de resolver esse problema, pois, conforme estudamos na seção 8.4, um **elevador de tensão**, isto é, um transformador, **não funciona** com corrente contínua. Por outro lado, se o gerador for de corrente alternada, será relativamente fácil elevar a tensão produzida usando-se aquele aparelho.

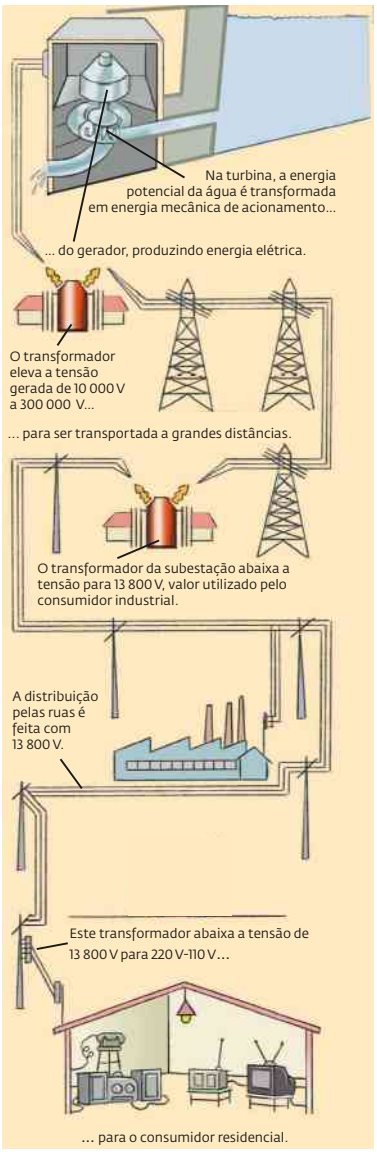
Além disso, devemos nos lembrar de que, ao chegar aos centros de consumo, a alta tensão deverá ser reduzida antes de ser distribuída, pois seria fora de propósito um consumidor receber em sua casa tensões de valores tão elevados como aqueles da transmissão. Com a escolha da corrente alternada, esse problema também é resolvido com um transformador, que reduz os valores da alta tensão.

Essa facilidade de elevar ou reduzir uma tensão alternada é o fator preponderante que levou os engenheiros a darem preferência aos sistemas de produção, transmissão e distribuição de energia elétrica por meio de corrente alternada.

A utilidade do transformador na transmissão de energia elétrica

Na **figura 8.54** apresentamos um esquema da distribuição de energia elétrica, mostrando as sucessivas transformações de tensão que ocorrem desde a geração na usina até sua utilização pelo consumidor.

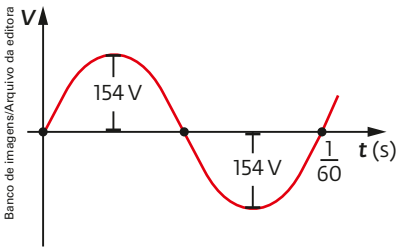
Observe que logo após a tensão alternada ser produzida em um gerador (com cerca de 10 000 V), o seu valor é elevado (para 300 000 V, por exemplo) por meio de transformadores existentes na subestação próxima à usina. Com essa alta-tensão, a energia elétrica é transportada a longas distâncias até chegar ao centro consumidor (uma cidade, por exemplo), nas proximidades do qual se localiza uma outra subestação. Neste local, os transformadores reduzem a tensão para valores (cerca de 13 000 V) com os quais ela é distribuída aos consumidores industriais e pelas ruas da cidade. Finalmente, nas proximidades das residências existem transformadores (nos postes das ruas) que reduzem ainda mais a tensão (para 110 V ou 220 V), de modo que a energia elétrica possa ser utilizada, sem riscos, pelo consumidor residencial.



Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura 8.54. Enquanto a energia elétrica é transportada desde a usina até as residências, ela sofre várias alterações em sua tensão. Representações sem escala e em cores fantasia.

Tensão de pico e tensão eficaz



Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 8.55. Diagrama mostrando a variação da tensão da corrente alternada com o tempo.

A tensão que recebemos em nossas residências, proveniente do transformador de rua, é uma tensão alternada, isto é, o seu sentido é invertido periodicamente, como mostra o gráfico da **figura 8.55**. Essas inversões de sentido são muito rápidas, pois a sua frequência é de 60 hertz, isto é, a tensão muda de sentido 120 vezes por segundo.

Vemos, pelo gráfico, que a tensão não é constante, como acontece com uma corrente contínua. O seu valor varia rapidamente: passa por um valor máximo, decresce, chega a zero, inverte de polaridade, atinge um valor igual ao máximo, porém com polaridade contrária, torna a se anular, e assim sucessivamente.

O valor máximo atingido pela tensão alternada é denominado valor de pico (para o caso mostrado na **figura 8.55**, esse valor é de 154 V). Entretanto, quando fornecemos o valor de uma voltagem alternada, estamos normalmente nos referindo não à **tensão de pico**, mas a uma quantidade denominada **valor eficaz da tensão**.

Esse valor eficaz seria o valor de uma tensão constante (contínua) que dissipasse, durante o tempo de um período, em uma resistência R, a mesma energia térmica que é dissipada em R pela tensão alternada, durante o mesmo intervalo de tempo. Pode-se mostrar que entre a tensão eficaz e a tensão de pico existe a seguinte relação:

$$V\,(\text{eficaz}) = \frac{V\,(\text{de pico})}{\sqrt{2}}$$

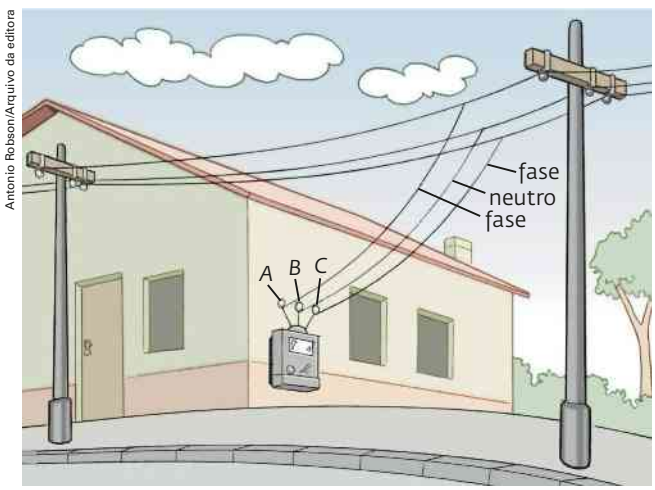
Então, para o caso da **figura 8.55**, o valor da tensão eficaz é:

$$V\,(\text{eficaz}) = \frac{154}{\sqrt{2}} = \frac{154}{1{,}4} \quad \text{ou} \quad V\,(\text{eficaz}) = 110\ \text{V}$$

Portanto, o gráfico da **figura 8.55** representa exatamente a tensão nas tomadas elétricas das residências em um grande número de cidades, nas quais o valor eficaz é 110 V e o valor de pico é 154 V.

O fio neutro e os fios de fase

Na **figura 8.56** mostramos como usualmente a tensão obtida no transformador de rua é transferida para uma residência. Essa transferência é realizada por meio de três fios: um deles, denominado **fio neutro**, sai do ponto central do secundário do transformador que está ligado à Terra; os outros dois são denominados **fios de fase** e saem dos pontos extremos desse secundário.



Antonio Robson/Arquivo da editora

Figura 8.56. Passagem da corrente elétrica dos fios de rua para uma residência, vendo-se o fio neutro e os fios de fase. Representação sem escala e em cores fantasia.

Entre cada fase e o neutro existe uma tensão eficaz de 110 V. Assim, na **figura 8.56** temos $V_{AB} = 110$ V e $V_{BC} = 110$ V. Entre as duas fases há uma tensão eficaz de 220 V; portanto, temos $V_{AC} = 220$ V. Então, na residência mostrada nessa figura, é possível instalar tomadas de 110 V (usando-se uma fase e um neutro) e tomadas de 220 V (usando-se as duas fases).

Em algumas instalações elétricas, entretanto, a residência é ligada ao transformador de rua apenas por uma das fases e pelo neutro. Nessas residências só poderão ser instaladas tomadas de 110 V.

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

Não escreva no livro!

24. Na **figura 8.52**, suponha que a pequena usina elétrica esteja gerando uma potência $P_1 = 2\,400$ W, com uma tensão $V_{AB} = 120$ V, sendo $r = 3{,}0\ \Omega$ a resistência total dos cabos *AC* e *BD* usados para transportar a energia até a residência.

a) Qual a corrente que está sendo conduzida pelos cabos de transmissão? 20 A

b) Qual a potência que está sendo dissipada, por efeito Joule, nesses cabos? 1 200 W

c) Qual a porcentagem da energia gerada que é dissipada na transmissão? 50%

d) Qual é a potência elétrica que está sendo entregue à residência? 1 200 W

25. Percebendo que a dissipação de energia na transmissão, analisada no exercício anterior, era muito elevada, o proprietário da residência tomou a seguinte medida: como o gerador era de CA (corrente alternada), instalou um transformador na saída desse gerador, elevando a tensão de 120 V para 600 V, e outro transformador na entrada da residência, reduzindo a tensão novamente para 120 V.

Supondo que a usina estivesse gerando a mesma potência $P_1 = 2\,400$ W, responda às questões do exercício anterior nessa nova situação.

26. a) No exercício anterior, se o gerador da usina fosse de corrente contínua, seria possível reduzir as perdas usando a mesma solução ali apresentada? Por quê?

b) Faça uma pesquisa em lojas especializadas para obter o custo aproximado da solução do problema dada pelo proprietário. Procure saber o preço de 1 kWh de energia elétrica na região onde você mora e calcule quanto tempo, aproximadamente, seria necessário para que a economia de energia fosse equivalente ao gasto naquelas instalações.

27. a) Explique o porquê de as transmissões de energia elétrica serem feitas sob alta-tensão.

b) Então, qual é o fator preponderante que leva a corrente alternada a ser adotada nessas transmissões?

28. Observe a **figura 8.54**, que mostra as diversas fases de produção, transmissão e distribuição da energia elétrica, e faça o que se pede.

a) Quantas vezes o valor da tensão foi alterado por meio de transformadores? 3 vezes

b) Diga onde estão localizados esses transformadores e se cada um é usado para elevar ou reduzir a tensão.

c) Em cada caso mencionado em **b**, diga se o valor da corrente na transmissão aumenta, diminui ou não se altera.

Não escreva no livro!

25. a) 4,0 A
b) 48 W
c) 2%
d) 2352 W
26. a) Não, pois o transformador não funciona com corrente contínua.
27. a) Significa "voltagem elevada", que tem como consequência a redução da corrente, diminuindo as perdas por efeito Joule na transmissão.
b) A facilidade com que sua voltagem pode ser aumentada ou diminuída, por meio de transformadores.
28. b) Subestação da usina – elevação;
subestação da cidade – redução;
transformador do poste – redução.
c) diminui; aumenta; aumenta.

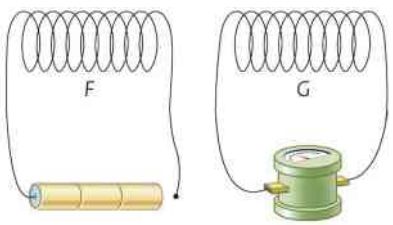
PRATIQUE FÍSICA

EM EQUIPE

Não escreva no livro!

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

1. As duas bobinas mostradas na figura abaixo devem possuir cerca de 300 espiras cada uma. Ligue uma das extremidades da bobina *F* a um dos polos de uma bateria constituída de três ou quatro pilhas secas. A bobina *G* deve ser ligada a um microamperímetro sensível. Coloque as duas bobinas próximas uma da outra, da maneira mostrada na figura.



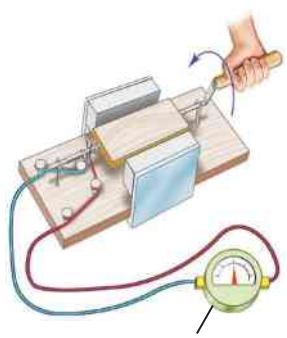
1º) Faça o contato da extremidade livre de *F* com a bateria, fechando o circuito dessa bobina. Observe que, nesse instante, o microamperímetro acusa a passagem de uma corrente na bobina *G*. Explique por que isso acontece (veja a seção 8.2).

2º) Mantenha fechado o circuito da bobina *F*. Nessas condições, há fluxo magnético através da bobina *G*? Esse fluxo varia? Observe, então, se o microamperímetro indica a passagem de corrente induzida em *G*.

3º) Desligue o circuito da bobina *F* e verifique, no microamperímetro, que aparece novamente uma corrente induzida em *G*. Essa corrente possui o mesmo sentido ou sentido contrário ao da corrente observada na 1ª parte?

2. Um motor elétrico pode ser usado como um dínamo, isto é, como um gerador de corrente. Para isso, desligue as pilhas do motor e ligue-o a um microamperímetro sensível, como mostra a figura abaixo. Gire as espiras, em um determinado sentido, com suas próprias mãos. Enquanto as espiras estão girando, o fluxo magnético através delas varia continuamente e, portanto, uma corrente induzida é estabelecida no circuito. Observe que o microamperímetro indica a passagem dessa corrente.

Gire as espiras, agora, em sentido contrário ao anterior. Observe o que ocorre com o sentido da corrente indicada no microamperímetro.



Ilustrações: Paulo César Pereira/Arquivo da editora

8. Com o circuito fechado, aparece uma força magnética que se opõe à rotação do gerador.
9. **a)** Nas três situações, porque todas estão com a carga acelerada.

PROBLEMAS E TESTES

Não escreva no livro!

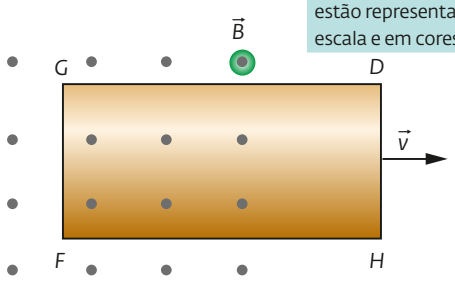
1. A distância entre as extremidades das asas metálicas de um avião é 20 m. Esse avião está voando horizontalmente, com uma velocidade de 300 m/s, em uma região onde o campo magnético da Terra tem uma componente vertical, dirigida para cima, cujo valor é $6{,}0 \cdot 10^{-5}$ T.

a) Em virtude da separação de cargas, de que lado do avião o potencial é mais elevado? lado direito

b) Qual o valor da f.e.m. induzida entre as extremidades das asas do avião? 0,36 V

2. A figura abaixo mostra uma espira retangular abandonando, com uma velocidade $\vec{v}$, uma região onde existe um campo magnético $\vec{B}$.

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



a) O fluxo magnético através da espira está aumentando ou diminuindo? Diminuindo.

b) Usando a lei de Lenz, determine o sentido da corrente induzida na espira. sentido *GFHD*

3. Um transformador está sendo usado para abaixar a tensão de 120 V para 12 V. Esse transformador tem 200 espiras no primário e verifica-se que uma potência de 60 W está sendo dissipada em uma lâmpada ligada ao seu secundário. Supondo que não haja perda de energia no transformador (transformador ideal), determine:

a) o número de espiras no secundário; 20 espiras

b) a corrente no secundário; 5,0 A

c) a corrente no primário. 0,50 A

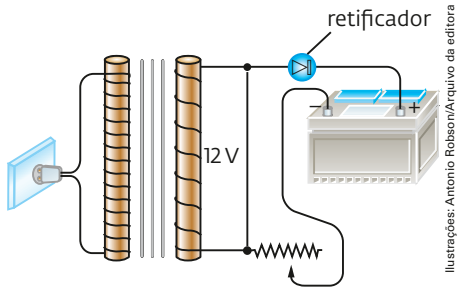
4. Um aparelho de radar é usado para localizar um objeto distante (um avião, por exemplo) por meio de ondas eletromagnéticas que são emitidas pelo aparelho, refletidas pelo objeto e captadas, na volta, pelo aparelho. As radiações eletromagnéticas usadas nesse dispositivo têm, no ar, um comprimento de onda de, aproximadamente, 1 cm. Qual é, então, o tipo de onda eletromagnética utilizado nos aparelhos de radar? micro-ondas

5. Comumente ouvimos dizer que uma estação de rádio está transmitindo em ondas longas, em ondas médias ou em ondas curtas.

a) Procure explicar a origem das denominações dadas a essas ondas de rádio.

b) Qual dessas ondas possui maior frequência? onda curta

6. A figura a seguir representa o circuito de um carregador de bateria, alimentado por uma voltagem de 120 V. Analise o circuito e explique como funciona o aparelho.



Ilustrações: Antonio Robson/Arquivo da editora

7. Uma espira circular de prata é colocada em um campo magnético uniforme, com seu plano perpendicular ao vetor $\vec{B}$. A área da seção reta do fio de prata é $A = 2{,}0\ \text{mm}^2$ e o raio da espira é $a = 30$ cm. Supondo que o campo magnético esteja variando com uma taxa de 0,050 T/s, determine a intensidade da corrente na espira. 1,0 A

8. Um pequeno gerador de corrente contínua é acionado manualmente por meio de uma manivela. Um estudante, que está girando a manivela, percebe que, estando o gerador em circuito aberto (sem nenhum aparelho ligado a ele), é fácil provocar essa rotação (o gerador parece leve). Entretanto, quando um aparelho é ligado ao gerador, o estudante percebe que há uma resistência muito maior para mantê-lo em rotação (o gerador parece pesado). Explique por que isso ocorre.

9. Considere as seguintes situações:

I. Elétrons livres em um fio condutor, no qual foi estabelecida uma corrente alternada de alta frequência.

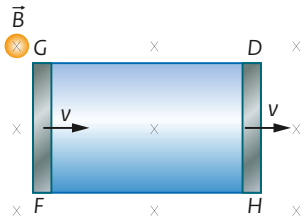
II. Elétrons em movimento circular uniforme, no interior de um acelerador de partículas.

III. Elétrons em movimento, a partir do repouso, em um campo elétrico uniforme de grande intensidade.

a) Em quais dessas situações os elétrons estarão emitindo radiações eletromagnéticas? Explique.

b) Na situação III, a energia cinética adquirida pelo elétron, menor após percorrer uma certa distância, é maior, menor ou igual ao trabalho que o campo realiza sobre ele? Por quê?

10. Duas barras metálicas, *GF* e *DH*, estão se deslocando com a mesma velocidade em um campo magnético uniforme, como mostra a figura abaixo. As barras estão ligadas pelos fios condutores *GD* e *FH*.



Analise as afirmativas seguintes e indique aquelas que estão corretas: Todas estão corretas

a) Em ambas as barras há uma separação de cargas.
b) A extremidade *G* fica positiva e a *F* fica negativa.
c) A extremidade *D* fica positiva e a *H* fica negativa.
d) A f.e.m. induzida em *GF* é igual à induzida em *DH*.
e) Não há corrente induzida nos fios condutores porque as f.e.m. nas duas barras são opostas.

5. **a)** Essas denominações se referem aos valores dos comprimentos de onda: λ (onda longa) > λ (onda média) > λ (onda curta)
6. O transformador reduz a voltagem alternada para 12 V e o retificador faz com que a bateria receba corrente contínua (o reostato serve apenas para controlar o valor da corrente).

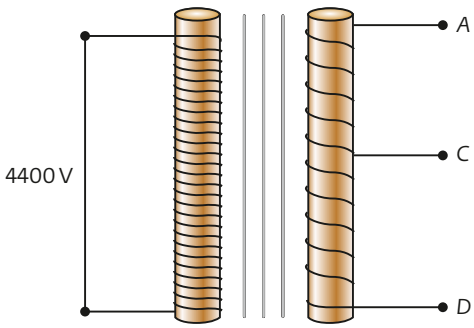
11. Uma espira circular, de raio $R = 10$ cm, está colocada perpendicularmente a um campo magnético uniforme de módulo $B = 0{,}10$ T. Reduzindo-se uniformemente o valor de $\vec{B}$ para zero, observa-se que uma f.e.m. induzida $\varepsilon = 0{,}02$ V aparece na espira. Quanto tempo decorreu até que o valor de $\vec{B}$ se reduzisse a zero? 0,157 s

12. O transformador representado na figura abaixo possui 2 000 espiras no primário e 100 espiras no secundário. Aplicando-se uma voltagem alternada de 4 400 V no primário, determine a leitura de um voltímetro supondo que ele seja ligado:

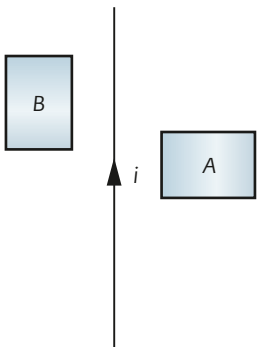
a) entre *A* e *C*; 110 V

b) entre *C* e *D*; 110 V

c) entre *A* e *D*. 220 V



13. Próximo a um fio, percorrido por uma corrente *i*, são colocadas duas espiras, *A* e *B*, da maneira mostrada na figura deste problema.



Supondo que a corrente no fio esteja aumentando com o tempo, diga se a corrente induzida tem o sentido horário ou anti-horário:

a) na espira *A*; nas três situações

b) na espira *B*. menor

14. A figura deste problema mostra um fio reto e comprido, percorrido por uma corrente *i*, tendo ao seu lado uma espira circular de cobre, que pode se movimentar de cinco maneiras diferentes: Em II e em IV

I. A espira se movimenta com velocidade $\vec{v}$, paralela ao fio.

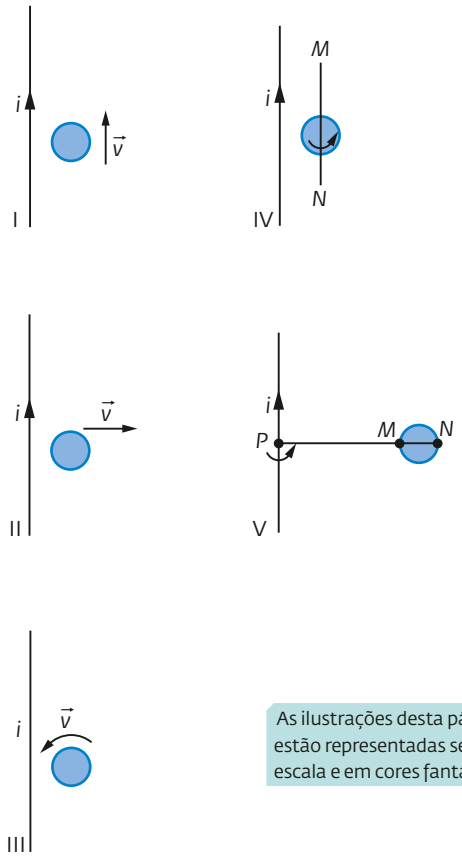
II. A espira se movimenta com velocidade $\vec{v}$, perpendicular ao fio, afastando-se dele.

III. A espira gira em torno de um eixo, perpendicular ao seu plano, passando pelo seu centro com velocidade angular ω.

IV. A espira gira em torno de um eixo *MN*, paralelo ao fio, situado no plano da espira e passando por seu centro.

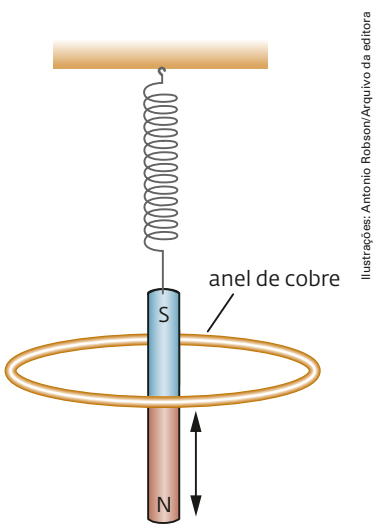
V. Uma haste rígida, isolante, está fixada nos pontos *M* e *N* da espira e o conjunto gira em torno de um ponto *P* do fio.

Diga em quais dessas situações haverá uma corrente induzida na espira.



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

15. Um ímã está oscilando verticalmente, preso a uma mola, passando pelo centro de um anel de cobre, como mostra a figura deste problema. Tendo em vista o princípio de conservação da energia, diga se a amplitude de oscilação do ímã aumenta, diminui ou não se modifica, enquanto ele oscila. Explique sua resposta supondo que as forças de atrito sejam desprezíveis. Diminui



Ilustrações: Antonio Robson/Arquivo da editora

Apêndice F

F.1 Capacitores

O que é um capacitor

As imagens desta página estão representadas fora de proporção.

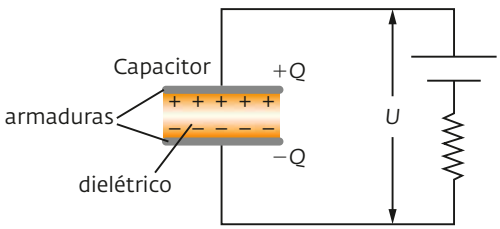
O **capacitor** é um dispositivo capaz de armazenar cargas elétricas e descarregá-las em um momento oportuno, quando solicitado. Essa propriedade faz com que ele possa ser empregado em circuitos de rádio, TV, máquinas de calcular, desfibriladores cardíacos e uma variedade enorme de aparelhos elétricos e eletrônicos do nosso cotidiano **(figura f.1)**.


Bondarchuk/Shutterstock/Glow Images


ChaosMaker/Shutterstock/Glow Images


AISPIX/Image Source/Shutterstock/Glow Images

Figura f.1. Alguns dos aparelhos que usam capacitores durante seu funcionamento.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura f.2. Um capacitor é constituído por duas superfícies condutoras separadas por um dielétrico. Representação sem escala e em cores fantasia.

Eles são constituídos por dois condutores separados por um isolante: os condutores são chamados **armaduras** (ou placas) e o isolante é o **dielétrico**. Costuma-se dar nome a esses aparelhos de acordo com a forma de suas armaduras. Assim temos **capacitor plano (figura f.2)**, **capacitor cilíndrico (figura f.3)**, **capacitor esférico**, etc.



Gavran333/Shutterstock

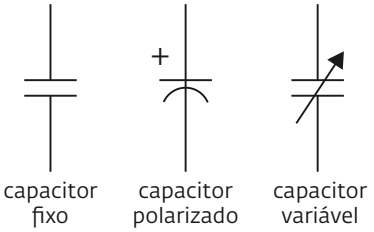


Mikekh/Dreamstime.com/Isuzu Images

Figura f.3. Em **a**, capacitores cilíndricos. Em **b**, capacitores de diferentes formatos.

O dielétrico pode ser um isolante qualquer, como o vidro, a parafina, o papel; muitas vezes, é o próprio ar. Nos diagramas de circuitos elétricos, o capacitor é representado da maneira mostrada na **figura f.4**.

Um dos primeiros capacitores cilíndricos, construído na cidade holandesa de Leyden, recebeu o nome de **garrafa de Leyden**. Suas armaduras são folhas metálicas que envolvem o recipiente interna e externamente e o dielétrico é o próprio vidro da garrafa. Esses aparelhos antigos ocupavam um volume muito grande em comparação com os modernos capacitores atuais.

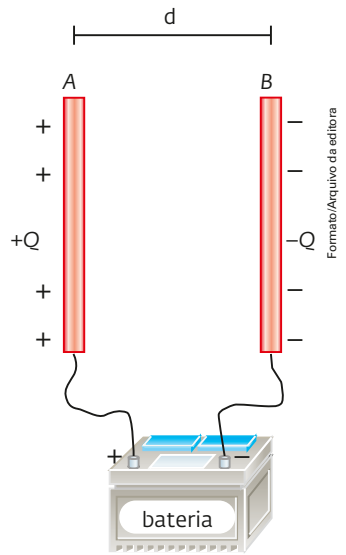


Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura f.4. Em um diagrama de um circuito elétrico, os diferentes tipos de capacitores são representados conforme a figura acima.

Capacitância de um capacitor

Consideremos um capacitor qualquer, com as armaduras planas, por exemplo, e liguemos essas armaduras aos polos de uma bateria, como mostra a **figura f.5**. Em virtude dessa ligação, as armaduras receberão cargas: a armadura *A*, ligada ao polo positivo, recebe uma carga $+Q$ e a armadura *B*, ligada ao polo negativo, recebe uma carga $-Q$. Dizemos, então, que o capacitor ficou carregado com carga *Q*. Nessas condições, há entre as armaduras do capacitor uma diferença de potencial V_{AB}, igual àquela entre os polos da bateria.



Formato/Arquivo da editora

Figura f.5. As armaduras de um capacitor recebem cargas elétricas ao serem ligadas aos polos de uma bateria. Representação sem escala e em cores fantasia.

Pode-se perceber também que, se o capacitor for ligado a outra bateria de maior diferença de potencial, a carga que as placas vão adquirir será maior. Entretanto, verifica-se que, para um dado capacitor, a relação entre a carga *Q* adquirida e a diferença de potencial V_{AB} aplicado é constante. Essa constante, denominada **capacitância**, é característica do capacitor e é representada pelo símbolo *C*. Assim, temos:

$$C = \frac{Q}{V_{AB}}$$

No SI, medindo-se a carga em coulombs e a diferença de potencial em volts, a capacitância é medida em farads, que se representa por F. Então, temos:

$$1\ \text{F} = \frac{1\ \text{coulomb}}{1\ \text{volt}} \quad \text{ou} \quad 1\ \text{F} = 1\ \frac{\text{C}}{\text{V}}$$

Em resumo, podemos escrever:

A capacitância *C* de um capacitor é obtida dividindo-se a carga *Q*, distribuída em suas armaduras, pela diferença de potencial aplicada a elas. A expressão matemática desta grandeza é:

$$C = \frac{Q}{V_{AB}}$$

A unidade de medida de *C* no SI é o farad (1 F = 1 C/V).

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

Comentários

1) Quando dizemos que um capacitor possui uma carga Q, estamos nos referindo à carga em uma das armaduras apenas. A carga total é nula, pois temos uma carga $+Q$ em uma armadura e uma carga $-Q$ na outra.
2) A unidade 1 farad (1 F = 1 C/V) é muito grande, pois dificilmente poderíamos obter um capacitor que, recebendo a carga de 1 coulomb em suas armaduras, adquirisse o potencial de 1 volt apenas. A unidade mais usada na prática, isto é, na medida de capacitâncias mais comuns nos laboratórios e oficinas, é o microfarad, que é representado por 1 μF. O microfarad é um submúltiplo do farad, tal que $1\ \mu F = 10^{-6}$ F.
3) Devemos observar pela expressão que define a capacitância, $\frac{Q}{V_{AB}}$, que, para uma dada diferença de potencial aplicada nas armaduras, quanto maior for a capacitância, maior será a carga acumulada nestas armaduras. Por esse motivo dizemos que o capacitor é um "armazenador" de cargas elétricas e quanto maior for sua capacitância, maior será a carga que ele é capaz de armazenar.

Fatores que influenciam na capacitância



Ilustrações: Antonio Robson/Arquivo da editora

Figura f.6. Os capacitores cilíndricos apresentam capacitâncias relativamente grandes, ocupando pequenos volumes.

A capacitância de um capacitor é uma constante característica do aparelho. Assim, ela vai depender de certos fatores próprios do capacitor, que examinaremos a seguir.

A área das armaduras, por exemplo, influi na capacitância, que é tanto maior quanto maior for o valor dessa área. Em outras palavras, a capacitância C é proporcional à área A de cada armadura, ou seja:

$$C \propto A$$

Então, para aumentarmos a capacitância de um capacitor, devemos aumentar a área de suas armaduras. Nos capacitores antigos, como a garrafa de Leyden, para se obter esse efeito, tinha-se que aumentar muito o volume ocupado por eles, o que tornava seu uso incômodo. Capacitores mais modernos, como o mostrado na **figura f.6**, apresentam grande capacitância e ocupam volume relativamente pequeno. Usando-se folhas de alumínio compridas como armaduras, separadas por papel parafinado e enroladas da maneira mostrada na figura, o volume ocupado é pequeno, embora a área das placas seja grande.



Figura f.7. Esquema de capacitores variáveis.

O fato de a capacitância depender da área das armaduras é aproveitado na construção de certos tipos de aparelhos, denominados **capacitores variáveis**. Na **figura f.7** mostramos um esquema desse capacitor. O conjunto das armaduras do aparelho é móvel, podendo girar em torno de um eixo. À medida que giramos esse conjunto, há uma variação na área das armaduras que se defrontam e, assim, a capacitância do aparelho também varia. Capacitores como esses são encontrados nos sintonizadores dos rádios.

Outro fator que influencia na capacitância é a distância d entre as armaduras, assim, quanto maior for a capacitância C do aparelho, menor deverá ser a distância d, isto é:

$$C \propto \frac{1}{d}$$

Nos capacitores modernos, são utilizados dielétricos de grande poder de isolamento, com espessura bastante reduzida, com o fim de obter grandes capacitâncias.

Influência do dielétrico na capacitância

Consideremos um capacitor plano tal que o dielétrico entre as armaduras seja o ar. Carregando-se o capacitor com uma carga Q, uma diferença de potencial V_{AB} será estabelecida nessas armaduras.

Sabe-se que se houvesse vácuo entre elas, teríamos condições praticamente iguais àquelas observadas quando existe ar.

Então, com vácuo ou ar entre as armaduras, a carga Q estabelece entre elas uma diferença de potencial V_{AB} e a capacitância C_0 desse capacitor é, como sabemos, $C_0 = \frac{Q}{V_{AB}}$ **(figura f.8.a)**.

Nessas condições, temos no espaço entre as armaduras um campo elétrico uniforme $\vec{E}_0$, criado pelas cargas $+Q$ e $-Q$ existentes nas placas.

Entretanto, ao introduzirmos entre as armaduras um dielétrico qualquer (mica, parafina, papel, etc.), mantendo nelas a mesma carga, o campo elétrico no interior desse dielétrico será inferior a $\vec{E}_0$ **(figura f.8.b)**.

Sendo K a constante dielétrica do isolante em questão, o campo passará a valer $E = \frac{E_0}{K}$, como vimos no capítulo 1.

Consequentemente, a diferença de potencial entre as armaduras também ficará dividida por K (pois $V_{AB} = E \cdot d$), isto é, passará a valer $\frac{V_{AB}}{K}$. Se Q não varia e a diferença de potencial é reduzida, então a capacitância aumenta, isto é, se torna K vezes maior.

Portanto, se um capacitor sem dielétrico entre as armaduras (vácuo ou ar) tem capacitância C_0, ao introduzirmos entre elas um dielétrico de constante K, sua capacitância passará a ser:

$$C = KC_0$$

Em outras palavras, um capacitor com dielétrico entre as armaduras é melhor armazenador de carga do que sem ele, pois a introdução do dielétrico faz crescer a capacitância (uma vez que $K > 1$ para qualquer isolante).

Podemos, então, destacar, em relação aos fatores que influem na capacitância:

A capacitância C é uma constante que caracteriza a capacidade de um capacitor de armazenar carga. O valor de C é diretamente proporcional à área *A* das armaduras, isto é:

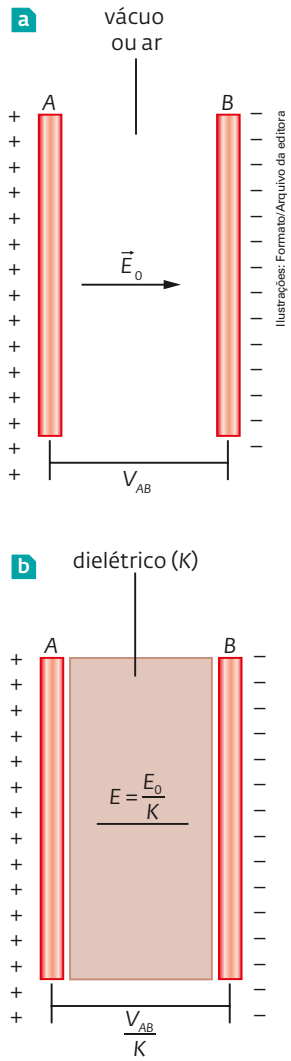
$$C \propto A$$

e é inversamente proporcional à distância *d* entre placas (espessura do dielétrico), ou seja:

$$C \propto \frac{1}{d}$$

Além disso, o valor de C depende da natureza do dielétrico: C_0 corresponde à capacitância de um capacitor sem dielétrico; quando introduzimos entre as armaduras um isolante de constante dielétrica *K*, sua capacitância passa a ser:

$$C = KC_0$$



Ilustrações: Formato/Arquivo da editora

Figura f.8. Quando um isolante, de constante dielétrica *K*, é introduzido entre as armaduras de um capacitor, sua capacitância torna-se *K* vezes maior.

Exemplo

Na figura f.5 mostramos um capacitor ligado aos polos de uma bateria. Suponha que a diferença de potencial entre os polos dessa bateria seja 300 V e que a carga transferida às placas do capacitor seja $Q = 1{,}2 \cdot 10^{-3}$ C.

a) Determine a capacitância C desse capacitor.

Sabemos que $C = \frac{Q}{V_{AB}}$ e temos $Q = 1{,}2 \cdot 10^{-3}$ C e $V_{AB} = 300$ V, pois a voltagem entre os polos da bateria é a mesma estabelecida nas placas do capacitor. Então:

$$C = \frac{Q}{V_{AB}} = \frac{1{,}2 \cdot 10^{-3}\,\text{C}}{300\,\text{V}}$$

$$C = 4{,}0 \cdot 10^{-6}\,\text{F} = 4{,}0\,\mu\text{F}$$

b) Mantendo-se o capacitor ligado à bateria e afastando-se as placas de modo que a distância entre elas se torne duas vezes maior, qual será o valor da diferença de potencial V_{AB} entre as placas?

Como as placas continuam ligadas à bateria, o valor de V_{AB} não será alterado, isto é, $V_{AB} = 300$ V.

c) Nas condições mencionadas em b, qual é a capacitância do capacitor?

Já sabemos que $C \propto \frac{1}{d}$. Como a variação de d foi a única alteração sofrida pelo capacitor, sua nova capacitância deverá ser duas vezes menor (pois o valor de d foi duplicado), isto é, o novo valor de C será:

$$C = \frac{4{,}0\,\mu\text{F}}{2} \quad \text{ou} \quad C = 2{,}0\,\mu\text{F}$$

d) Ainda nas condições consideradas em b, qual será a carga Q nas armaduras?

Sendo $C = \frac{Q}{V_{AB}}$, teremos $Q = CV_{AB}$.

Sabendo que $V_{AB} = 300$ V e que $C = 2{,}0\,\mu\text{F} = 2{,}0 \cdot 10^{-6}$ F, teremos:

$$Q = CV_{AB} = 300 \cdot 2{,}0 \cdot 10^{-6}$$

$$Q = 6{,}0 \cdot 10^{-4}\,\text{C}$$

Devemos observar, então, que, embora a diferença de potencial permaneça a mesma, a carga nas armaduras diminui quando elas são afastadas.

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

Não escreva no livro!

1. As armaduras de um capacitor possuem uma carga $Q = 1{,}5 \cdot 10^{-4}$ C. Nessas condições, a diferença de potencial entre elas é de 50 V. Determine a capacitância deste capacitor em farad e em μF. $C = 3{,}0 \cdot 10^{-6}$ F = 3,0 μF

2. Ligando-se o capacitor do exercício anterior a uma bateria cuja diferença de potencial entre os polos é $V_{AB} = 250$ V, responda:

a) Qual é, então, a capacitância do aparelho?

b) Qual o valor da carga elétrica que agora existe nas armaduras? $7{,}5 \cdot 10^{-4}$ C

3. Um capacitor plano é carregado ligando-se suas armaduras aos polos de uma bateria. Mantendo-se a ligação com essa bateria e reduzindo-se a distância entre as placas, a diferença de potencial entre as armaduras aumenta, diminui ou não se altera? Não se altera.

4. Um capacitor plano, com ar entre as placas, possui uma capacitância $C = 2{,}5\,\mu\text{F}$. Quando a carga nas placas é $Q = 4{,}0 \cdot 10^{-4}$ C, existe entre elas uma diferença de potencial $V_{AB} = 160$ V e um campo elétrico $E = 40\,000$ N/C. Supondo que o capacitor não esteja ligado a nenhuma bateria e introduzindo-se entre as armaduras um dielétrico de constante $K = 5{,}0$, determine quais serão os novos valores:

a) da capacitância do capacitor; 12,5 μF

b) da carga em suas armaduras; $4{,}0 \cdot 10^{-4}$ C

c) da diferença de potencial entre as armaduras; 32 V

d) do campo elétrico entre as armaduras. 8 000 N/C

2. a) $C = 3{,}0 \cdot 10^{-6}$ F

F.2 Energia em um capacitor

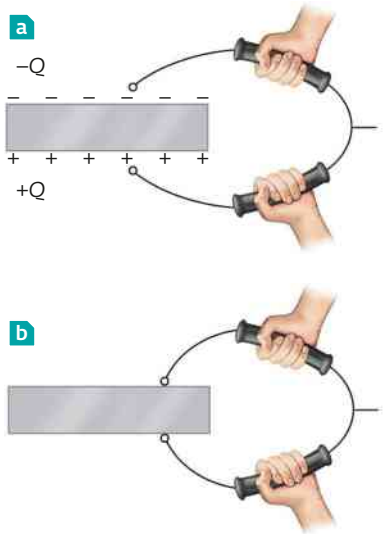
Um capacitor armazena energia

Consideremos um capacitor carregado com uma carga Q, apresentando uma voltagem V_{AB} entre suas armaduras **(figura f.9.a)**. Se ligarmos essas armaduras por um condutor **(figura f.9.b)**, o capacitor se descarregará. Essa descarga provoca um aquecimento no condutor e, muitas vezes, quando a voltagem V_{AB} é muito alta, a descarga vem acompanhada de uma faísca que salta entre os extremos do condutor e a armadura.

Haverá, pois, manifestação de energia sob a forma de calor, luz ou som (estalido que costuma acompanhar a faísca).

Portanto, quando o capacitor se descarrega, há liberação de certa quantidade de energia, o que pode ser esperado, pois nesse processo há transporte de carga elétrica entre dois pontos (as placas do capacitor) que apresentam uma diferença de potencial. Essa energia encontra-se armazenada no capacitor e é fornecida pela bateria enquanto o aparelho está sendo carregado por ela.

De fato, quando o capacitor é ligado à bateria (para ser carregado), esta retira cargas negativas de uma placa (que fica carregada positivamente) e fornece quantidade igual de cargas negativas à outra placa (que se carrega negativamente). Nesse processo, a bateria tem de realizar um trabalho que é responsável pelo armazenamento de energia no capacitor.



Ilustrações: Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura f.9. Um capacitor carregado se descarrega quando suas armaduras são ligadas por um condutor. Representação sem escala e em cores fantasia.

Como calcular a energia no capacitor

Quando uma carga elétrica Q é transportada entre dois pontos cuja diferença de potencial V_{AB} é mantida constante, o trabalho realizado no transporte é dado por $\mathcal{C} = QV_{AB}$. Na descarga do capacitor, porém, a diferença de potencial entre as armaduras não se mantém constante. À medida que a carga é transportada de uma placa para outra, a diferença de potencial vai diminuindo, passando do valor inicial *VAB* para um valor final nulo.

Nesse caso, não podemos usar a expressão citada para calcular o trabalho no processo da descarga. Esse trabalho é dado pela expressão:

$$\mathcal{C} = \frac{1}{2} Q V_{AB}$$

O trabalho realizado pela bateria ao carregar o capacitor será dado pela mesma expressão e a energia potencial armazenada no capacitor terá também o mesmo valor. Isto é:

$$E = \frac{1}{2} Q V_{AB}$$

Como $C = \frac{Q}{V_{AB}}$, podemos expressar essa energia em função de C e V_{AB} (substituindo Q por CV_{AB}): $E = \frac{1}{2} C V_{AB}^2$, ou, em função de C e Q (substituindo V_{AB} por $\frac{Q}{C}$): $E = \frac{1}{2} \cdot \frac{Q^2}{C}$. Podemos, então, destacar:

Um capacitor carregado com carga Q, apresentando entre as armaduras uma diferença de potencial V_{AB}, armazena energia que é liberada na sua descarga. Essa energia é igual ao trabalho realizado pela bateria no processo de carga do capacitor e é fornecida pela relação:

$$E = \frac{1}{2} QV_{AB}$$

Exemplo

Um capacitor plano, carregado, mas desligado da bateria, tem uma capacitância $C = 9{,}0\ \mu F$, havendo entre suas armaduras uma diferença de potencial $V_{AB} = 200\ V$.

a) Qual a energia que será liberada na descarga desse capacitor?

Sabemos que a energia liberada por um capacitor ao ser descarregado (igual à energia que ele armazena) é dada pela relação: $E = \frac{1}{2} QV_{AB}$. Temos $V_{AB} = 200\ V$ e o valor de Q pode ser calculado, pois $Q = CV_{AB}$. Como $C = 9{,}0\ \mu F = 9{,}0 \cdot 10^{-6}\ F$, virá:

$$Q = 9{,}0 \cdot 10^{-6} \cdot 200 \quad \text{ou} \quad Q = 1{,}8 \cdot 10^{-3}\ C$$

Então, a energia procurada é:

$$E = \frac{1}{2} QV_{AB} = \frac{1}{2} \cdot 1{,}8 \cdot 10^{-3} \cdot 200 \quad \text{ou} \quad E = 0{,}18\ J$$

b) Afastando-se uma armadura da outra, para triplicar a distância entre elas, qual será a nova energia que o capacitor armazenará?

Devemos usar a mesma expressão $E = \left(\frac{1}{2}\right) QV_{AB}$ para calcular essa energia. A carga Q não sofreu alteração; portanto: $Q = 1{,}8 \cdot 10^{-3}\ C$.

Entretanto, sendo $C \propto \frac{1}{d}$, quando a distância entre as armaduras for triplicada, a capacitância ficará dividida por 3. Logo, a nova capacitância será:

$$C' = \frac{C}{3} = \frac{9{,}0 \cdot 10^{-6}}{3} \quad \text{ou} \quad C' = 3{,}0 \cdot 10^{-6}\ F$$

Consequentemente, teremos nova voltagem nas placas, pois $V_{AB} = \frac{Q}{C}$. Como Q não variou e C tornou-se 3 vezes menor, teremos, para a voltagem, um valor 3 vezes maior. A nova voltagem V'_{AB} será, portanto:

$$V'_{AB} = 200 \cdot 3 \quad \text{ou} \quad V'_{AB} = 600\ V$$

Então, a nova energia E' armazenada no capacitor será:

$$E' = \frac{1}{2} QV'_{AB} = \frac{1}{2} \cdot 1{,}8 \cdot 10^{-3} \cdot 600 \quad \text{ou} \quad E' = 0{,}54\ J$$

c) Qual o trabalho que foi realizado no afastamento das armaduras do capacitor?

O trabalho realizado no afastamento das armaduras foi transferido para o capacitor, que, por isso, teve sua energia aumentada. Então, tendo em vista o princípio de conservação da energia, esse trabalho é igual ao aumento de energia no capacitor, isto é:

$$\mathcal{C} = E' - E = 0{,}54 - 0{,}18 \quad \text{ou} \quad \mathcal{C} = 0{,}36\ J$$

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

Não escreva no livro!

5. Um capacitor, carregado com uma carga de $2{,}8 \cdot 10^{-3}\ C$, apresenta entre suas armaduras uma diferença de potencial $V_{AB} = 500\ V$.

a) Qual a energia armazenada nesse capacitor? 0,70 J

b) Qual foi o trabalho realizado para carregar esse capacitor? 0,70 J

6. Mantendo o capacitor mencionado no exercício 5 desligado da bateria, afastamos suas armaduras, de modo que a distância entre elas se torne 2 vezes maior.

a) Haverá realização de trabalho nesse afastamento? Sim.

b) Então, a energia do capacitor aumentará, diminuirá ou não se alterará? Aumentará.

PROBLEMAS E TESTES

Não escreva no livro!

1. Em um capacitor plano, de capacitância $C = 4{,}0\ \mu F$, a distância entre as armaduras é $d = 1{,}5$ mm e o campo elétrico entre elas vale $E = 2{,}0 \cdot 10^5$ N/C. Calcule:

a) a diferença de potencial entre as armaduras; $3{,}0 \cdot 10^2$ V

b) a carga armazenada no capacitor. $1{,}2 \cdot 10^{-3}$ C

2. Dois capacitores, de capacitâncias C_1 e C_2, estão ligados a uma bateria da maneira mostrada na figura abaixo. Sejam V_1 e V_2 as tensões entre as placas desses capacitores e Q_1 e Q_2 as cargas adquiridas por eles. Sabendo-se que $C_1 > C_2$, indique, entre as alternativas seguintes, aquela que está correta. c

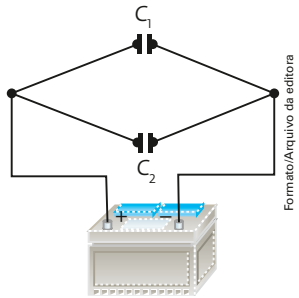
a) $V_1 > V_2$ e $Q_1 = Q_2$

b) $V_1 < V_2$ e $Q_1 = Q_2$

c) $V_1 = V_2$ e $Q_1 > Q_2$

d) $V_1 < V_2$ e $Q_1 < Q_2$

e) $V_1 > V_2$ e $Q_1 < Q_2$



Formato/Arquivo da editora

Representação sem escala e em cores fantasia.

3. Um capacitor plano está carregado e suas armaduras estão desligadas da bateria. Suponha que a distância entre as armaduras seja reduzida. Nessas condições indique, entre as afirmativas seguintes, aquela que está **errada**:

a) A diferença de potencial entre as armaduras diminui.

b) A capacitância do capacitor aumenta.

c) A carga nas armaduras não varia.

d) A energia armazenada no capacitor aumenta. d

4. Um capacitor plano, com ar entre as armaduras, está desligado da bateria. Supondo que esse capacitor seja totalmente mergulhado na água, indique, entre as afirmativas seguintes, aquelas que estão corretas: Todas estão corretas.

a) A carga nas armaduras não se altera.

b) O campo elétrico entre as armaduras diminui.

c) A diferença de potencial entre as armaduras diminui.

d) A capacitância do capacitor aumenta.

e) A energia armazenada no capacitor diminui.

5. No problema anterior, suponha que as armaduras do capacitor tenham permanecido ligadas à bateria quando ele foi introduzido na água. Nessas condições, quais são as afirmativas apresentadas naquele problema que estão corretas? d

6. Uma nuvem eletrizada está situada a 200 m de altura, paralelamente à superfície da Terra, formando com essa superfície um capacitor plano de 0,50 μF. Quando o campo elétrico no ar (entre a nuvem e a Terra) atinge o valor de $3{,}0 \cdot 10^6$ N/C, observa-se a ocorrência de um relâmpago.

Calcule a quantidade de carga elétrica que se encontrava acumulada na nuvem naquele instante. 300 C

7. No problema anterior, determine a quantidade de energia que é liberada na descarga elétrica, isto é, no raio que salta da nuvem para a Terra. $9{,}0 \cdot 10^{10}$ J

8. A tensão entre as placas de um capacitor de 6,0 μF é 200 V. Liga-se cada uma de suas armaduras às de um outro capacitor de 3,0 μF, inicialmente descarregado. Calcule:

a) a energia inicialmente armazenada no primeiro capacitor; 0,12 J

b) a energia armazenada na associação dos dois capacitores; 0,08 J

c) a energia 2 dissipada em virtude da ligação. 0,04 J

9. (**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.

c) apresenta uma magnetização desprezível sob a ação do ímã permanente.

d) induz correntes elétricas na bobina mais intensas que a capacidade do captador.

e) oscila com uma frequência menor do que a que pode ser percebida pelo captador. c

10. (**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. b

11. (**UFC-CE**) O fluxo magnético que atravessa cada espira de uma bobina cilíndrica com 50 espiras, em função do tempo, é dado pela expressão $\Phi = 2t$, entre os tempos $t = 1$ e $t = 10$ s, em que o fluxo é dado em Wb. Para esse intervalo de tempo, determine:

a) o módulo da força eletromotriz média induzida; 100 V

b) o sentido da corrente induzida, considerando que o campo magnético está "entrando" no plano do papel, e o plano transversal da bobina é o próprio plano do papel. A corrente induzida deve ter um sentido anti-horário na bobina.

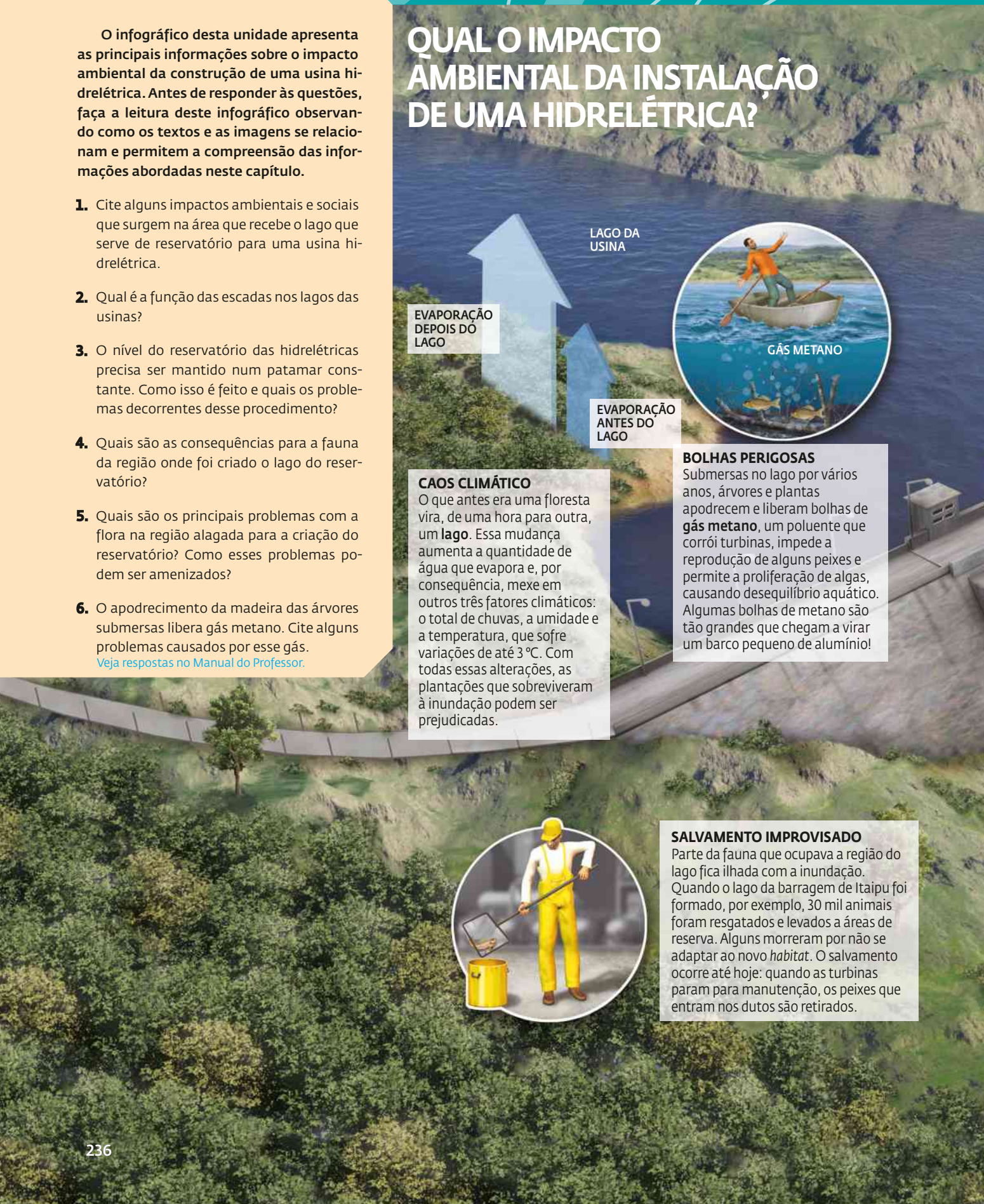
INFOGRÁFICO

O infográfico desta unidade apresenta as principais informações sobre o impacto ambiental da construção de uma usina hidrelétrica. Antes de responder às questões, faça a leitura deste infográfico observando como os textos e as imagens se relacionam e permitem a compreensão das informações abordadas neste capítulo.

1. Cite alguns impactos ambientais e sociais que surgem na área que recebe o lago que serve de reservatório para uma usina hidrelétrica.
2. Qual é a função das escadas nos lagos das usinas?
3. O nível do reservatório das hidrelétricas precisa ser mantido num patamar constante. Como isso é feito e quais os problemas decorrentes desse procedimento?
4. Quais são as consequências para a fauna da região onde foi criado o lago do reservatório?
5. Quais são os principais problemas com a flora na região alagada para a criação do reservatório? Como esses problemas podem ser amenizados?
6. O apodrecimento da madeira das árvores submersas libera gás metano. Cite alguns problemas causados por esse gás.

Veja respostas no Manual do Professor.

QUAL O IMPACTO AMBIENTAL DA INSTALAÇÃO DE UMA HIDRELÉTRICA?



CAOS CLIMÁTICO
O que antes era uma floresta vira, de uma hora para outra, um **lago**. Essa mudança aumenta a quantidade de água que evapora e, por consequência, mexe em outros três fatores climáticos: o total de chuvas, a umidade e a temperatura, que sofre variações de até 3 °C. Com todas essas alterações, as plantações que sobreviveram à inundação podem ser prejudicadas.

BOLHAS PERIGOSAS
Submersas no lago por vários anos, árvores e plantas apodrecem e liberam bolhas de **gás metano**, um poluente que corrói turbinas, impede a reprodução de alguns peixes e permite a proliferação de algas, causando desequilíbrio aquático. Algumas bolhas de metano são tão grandes que chegam a virar um barco pequeno de alumínio!

SALVAMENTO IMPROVISADO
Parte da fauna que ocupava a região do lago fica ilhada com a inundação. Quando o lago da barragem de Itaipu foi formado, por exemplo, 30 mil animais foram resgatados e levados a áreas de reserva. Alguns morreram por não se adaptar ao novo *habitat*. O salvamento ocorre até hoje: quando as turbinas param para manutenção, os peixes que entram nos dutos são retirados.



Paulo Manzi/Arquivo da editora

COMEÇAR DE NOVO
No alagamento para a formação da barragem, muitas espécies vegetais ficam submersas, reduzindo a biodiversidade. Para diminuir o problema, as construtoras de hidrelétricas têm programas de **reflorestamento** em suas margens. A usina de Itaipu, por exemplo, recebeu 20 milhões de mudas no entorno de seu reservatório.

PESCARIA ALTERADA
A formação de um **lago** muda os hábitos da vida aquática. Algumas espécies de peixe somem e outras se multiplicam. No rio Paraná, as espécies mais numerosas mudaram com a instalação de Itaipu:

ANTES DE ITAIPU		DEPOIS DE ITAIPU	
Cascudo-preto	**22%**	Armado	**38%**
Dourado	**17%**	Corvina	**15%**
Pacu	**13%**	Mapará	**13%**

SUBIDA ÍNGREME
Para garantir que peixes migradores consigam subir o rio para acasalar, são construídas **"escadas" aquáticas**. Cada grupo de degraus tem uma área de descanso para que o peixe não tenha câimbras por esforço muscular na hora da subida.

RIO SOFREDOR
O nível do reservatório das hidrelétricas precisa ser mantido em um patamar constante. Para isso, os técnicos abrem e fecham as **comportas**, dependendo do regime de chuvas. Quem perde com isso é o rio, que recebe a água do lago. A alteração do volume de água desordena toda a vida aquática – sobretudo nas margens –, que enfrenta períodos de seca e inundação.

Fonte de dados: Suzana Paquete. *MUNDO ESTRANHO. Qual o impacto ambiental da instalação de uma hidrelétrica?* Disponível em: <http://mundoestranho.abril.com.br/materia/qual-o-impacto-ambiental-da-instalacao-de-uma-hidreletrica>. Acesso em: 21 mar. 2016.

UNIDADE

4 Física contemporânea

De acordo com a lei da gravitação de Newton, o campo gravitacional de um corpo pode atrair outros corpos materiais. Segundo a teoria da relatividade geral, proposta por Einstein, o campo gravitacional modifica a geometria do espaço-tempo localmente, de forma que, uma vez que o espaço se curva, a luz também se curvará no espaço ao redor de um objeto massivo.

Os estudos sobre os modelos atômicos no final do século XIX e início do século XX formam a base de pesquisa que possibilitou a elaboração da teoria da relatividade, que contribuiu para o desenvolvimento de novas interpretações da natureza, como a determinação da massa e da natureza da matéria escura e a descoberta de novos planetas.

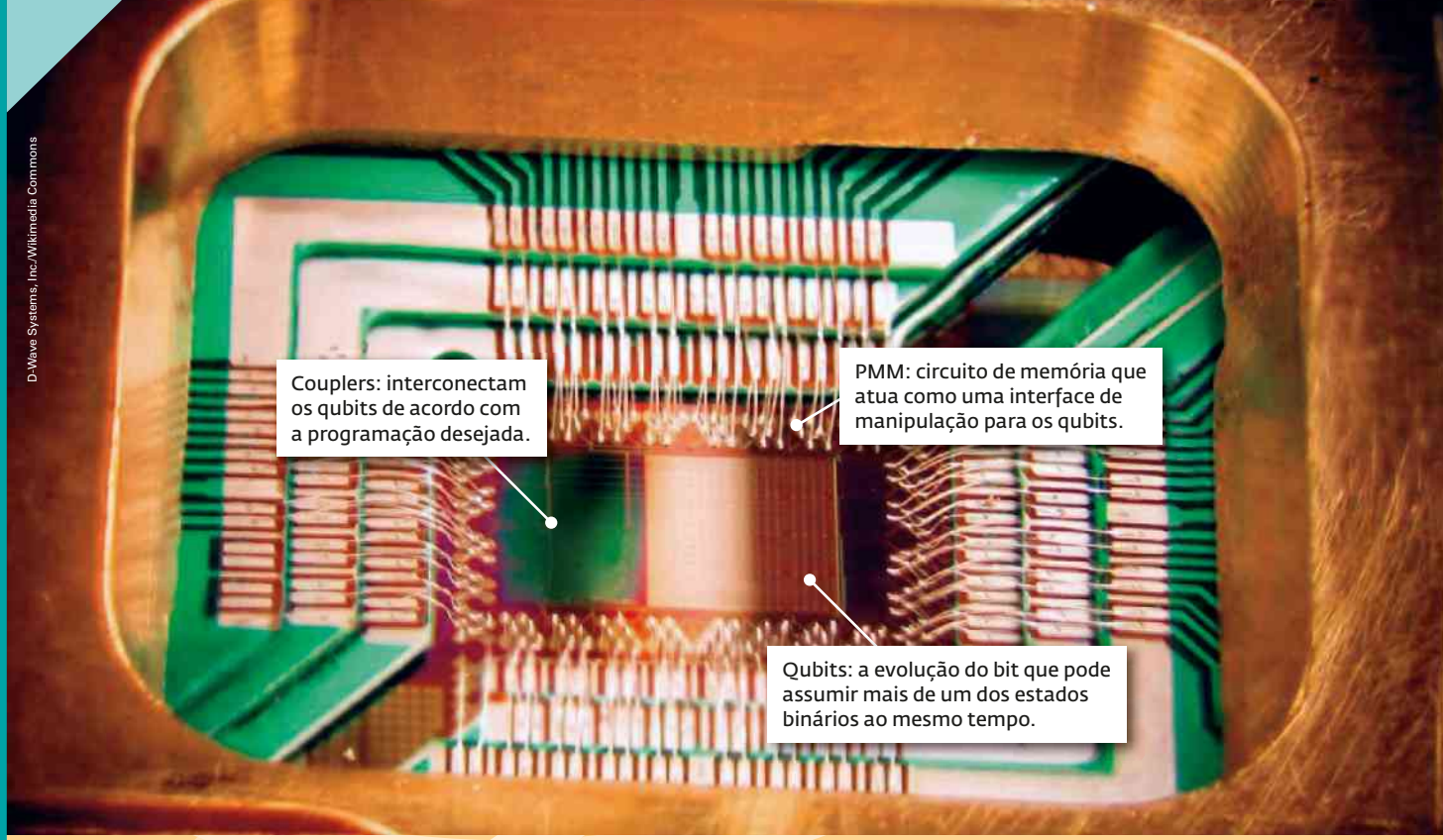
CAPÍTULO 9
Teoria da relatividade e Física quântica



Sistema de galáxias "Gato de Cheshire", denominação dada pelo fato de a imagem lembrar o Gato Que Ri, personagem do livro *Alice no País das Maravilhas*, de Lewis Carrol. Na imagem temos o fenômeno das lentes gravitacionais previsto pela teoria da relatividade geral, de Einstein.



SPL DC/Latinstock



D-Wave Systems, Inc./Wikimedia Commons

Versão 2.0 de um processador quântico que possui 512 qubits.

CAPÍTULO 9

Teoria da relatividade e Física quântica

O bit pode estar em apenas um de dois valores possíveis: 0 ou 1. O bit quântico, ou qubit, pode ser simultaneamente os valores equivalentes a 0 e 1.

Controlar a interação dos qubits com sua vizinhança.

Resolver cálculos complexos de forma mais rápida do que com os computadores tradicionais.

O computador quântico é um recurso tecnológico moderno que está cada vez mais próximo da realidade, devido à redução do tamanho dos componentes eletrônicos até alcançar dimensões atômicas. O computador tradicional é uma aplicação da teoria de Alan Turing, que foi desenvolvida na década de 1930, segundo a qual um computador pode operar com sequências lógicas de bits e só pode adquirir um entre dois valores: 0 e 1. Isso significa que toda informação em um computador é armazenada, processada e transmitida sob a forma de sequências de bits. A leitura numérica dos bits é feita pelos transistores, que compõem os chips do processador e das memórias. Mas, como um transistor interpreta um bit por vez, isso limita muito a capacidade de processamento. Para ser veloz, um processador tem que ter 40 milhões de transistores. Na computação quântica, o bit deixa de ser descrito pelas leis da Física clássica, pois pode ser representado por um único átomo. Os bits quânticos (qubits) podem simultaneamente adquirir os valores 0 e 1, devido à propriedade da superposição da mecânica quântica. Essa propriedade permite realizar milhões de cálculos ao mesmo tempo.

PARA INICIAR A CONVERSA

Cite uma das principais diferenças entre bit e qubit.

Pesquise: qual é a principal dificuldade para que um computador quântico se torne realidade?

Qual será a vantagem de utilizar um computador quântico?

9.1 Relatividade: antecedentes históricos

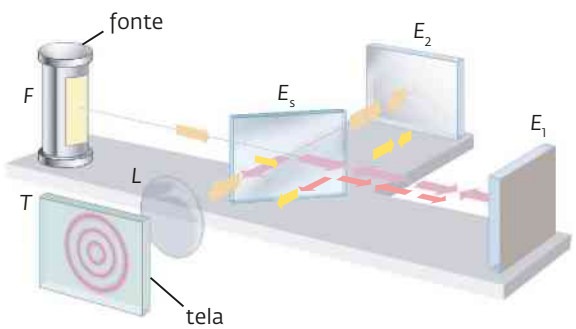
A ideia de o espaço ser preenchido por um fluido puro e transparente é antiga e vem da época dos gregos. Aristóteles, por exemplo, acreditava que tudo o que existia na Terra era constituído por quatro elementos (terra, fogo, ar e água) e que o **éter** era a substância pura, imutável e transparente que preenchia o espaço celeste. Essa ideia sobre o éter só viria a sofrer modificações no século XVII, com os trabalhos de Descartes, Huygens e Newton.

Em 1678, Huygens, ao ampliar a teoria da ondulatória da luz com base nas ideias de Robert Hooke, usou como referência no comportamento das ondas sonoras para dar sua definição de éter. Huygens, por exemplo, sabia que as ondas sonoras se propagam em meios materiais líquidos, sólidos e gasosos. Entretanto, ele também sabia que o som não se propaga no vácuo, mas as ondas luminosas sim. Dessa forma, era natural para ele que a luz só conseguia se propagar no vácuo se este fosse preenchido por um fluido, que foi batizado de éter luminífero. Essa ideia de o vácuo ser preenchido por um fluido chamado de éter vai perdurar até 1817, quando Young e Fresnel, ao explicarem a luz como sendo uma onda transversal, esbarraram no problema de o éter ser um fluido. Para eles, o éter seria um sólido elástico, pois ondas transversais não se propagam em fluidos, entretanto o éter também seria tênue para não oferecer resistência aos objetos nele imersos, como os planetas, por exemplo. Apesar de ter propriedades contraditórias, a ideia do éter manteve sua existência por longos anos, chegando a ganhar notória credibilidade após Maxwell, em 1860, demonstrar que a luz era uma onda eletromagnética. Na teoria eletromagnética da luz, o éter de Maxwell era um meio mais tênue que os gases mais leves, inerte e perfeitamente elástico e que possibilitava a propagação de ondas elétricas e magnéticas.

No final do século XIX, a hipótese do éter foi questionada quando apareceram indícios perturbadores de que a velocidade de propagação da luz no vácuo era a mesma qualquer que fosse o referencial utilizado para medi-la. E isso era um problema, pois as velocidades até aquele momento eram dependentes dos referenciais adotados em suas medidas.

As equações do Eletromagnetismo de Maxwell apresentam uma solução ondulatória em que as ondas eletromagnéticas viajam numa velocidade constante no vácuo, igual a $c = 3{,}0 \cdot 10^8$ m/s. Uma análise mais cuidadosa das equações mostra que essa velocidade é independente do movimento da fonte ou do observador, entrando em desacordo com a Mecânica newtoniana, na qual as velocidades das ondas são relativas, dependendo do referencial. Curiosamente, Maxwell acreditava na existência do "éter", apesar de suas equações serem capazes de descrever a propagação das ondas eletromagnéticas sem depender desse hipotético meio elástico tênue.

O interferômetro de Michelson **(figura 9.1)** é um instrumento baseado na interferência da luz. Ele divide uma onda luminosa monocromática proveniente da fonte *F* em duas direções que seguem caminhos por bra-



Antonio Robson/Arquivo da editora

Figura 9.1. No interferômetro de Michelson um raio de luz é dividido pelo espelho semirreflexivo E_s, seguindo dois caminhos pelos braços perpendiculares entre si. Esses dois raios refletem nos espelhos E_1 e E_2 e voltam a E_s, onde se superpõem, atravessam a lente *L* e são detectados sobre a tela *T*. Ao se superporem, os dois raios podem apresentar interferência construtiva ou destrutiva no detector. O interferômetro permite comparar as velocidades dos raios de luz nas direções dos dois braços perpendiculares. Representação sem escala e em cores fantasia.

ços perpendiculares, dirigindo-se para os espelhos E_1 e E_2, onde se refletem, voltam ao espelho E_S e se superpõem. Após atravessarem a lente L, projetam-se sobre a tela T, dando origem a franjas de interferência construtiva ou destrutiva. É um instrumento extremamente preciso, que permite comparar a velocidade da luz em duas direções perpendiculares entre si.

A ideia do físico polonês Albert Abraham Michelson (1853-1931) era verificar a existência de um vento de "éter" passando pela Terra durante seu movimento orbital a 30 km/s em torno do Sol. Se um dos braços do instrumento estivesse alinhado com a direção do vento de "éter" e um tipo de franja sendo observada, após girar o interferômetro 90º haveria um deslocamento dessa franja. As primeiras tentativas não obtiveram sucesso, mas com a ajuda do químico estadunidense Edward Williams Morley (1838-1923) foi possível melhorar a sensibilidade do instrumento.

As experiências se repetiram durante o decorrer do ano, na esperança de o movimento orbital da Terra se alinhar de maneira favorável com a direção do vento de "éter". Várias medições foram realizadas entre 1881 e 1887, sem sucesso em detectar uma variação da velocidade da luz com a direção de propagação. No entanto, os cálculos baseados na velocidade orbital da Terra e os cuidados experimentais de Michelson e Morley indicavam que o instrumento tinha sensibilidade suficiente para detectar o vento de "éter", caso existisse.

Sendo assim, apesar do questionamento da existência do éter ter partido dos resultados experimentais de Michelson-Morley quando verificaram que não havia alteração no efeito da velocidade do referencial do observador (Terra) na medida da velocidade da luz viajando no éter, o conceito de éter se manteve estável, principalmente quando H. A. Lorentz, em 1892, apresentou sua teoria eletromagnética da qual o éter fazia parte e ainda justificou os resultados negativos dos experimentos de Michelson-Morley, acrescentando à sua teoria a chamada hipótese da contração. Apenas em 1905 a polêmica do éter seria reaberta, quando Albert Einstein apresentou sua teoria da relatividade desconsiderando a hipótese da existência do éter na sua formulação.

Relatividade: uma teoria feita em duas etapas

Apesar de a teoria do eletromagnestimo de Maxwell ser bastante recente se comparada com a Mecânica newtoniana, Einstein teve a intuição de que ela era correta, mas seria preciso corrigir o fato de que suas leis seriam alteradas por uma mudança de referencial. Para isso, seria necessário modificar a Mecânica newtoniana.

A teoria da relatividade foi elaborada por Einstein em duas etapas. Inicialmente, em 1905, ele publicou a teoria da relatividade especial, ou teoria da relatividade restrita. Essa teoria sofria da restrição de só valer para referenciais inerciais, isto é, aqueles que, como o das estrelas fixas, não estão sujeitos a acelerações.

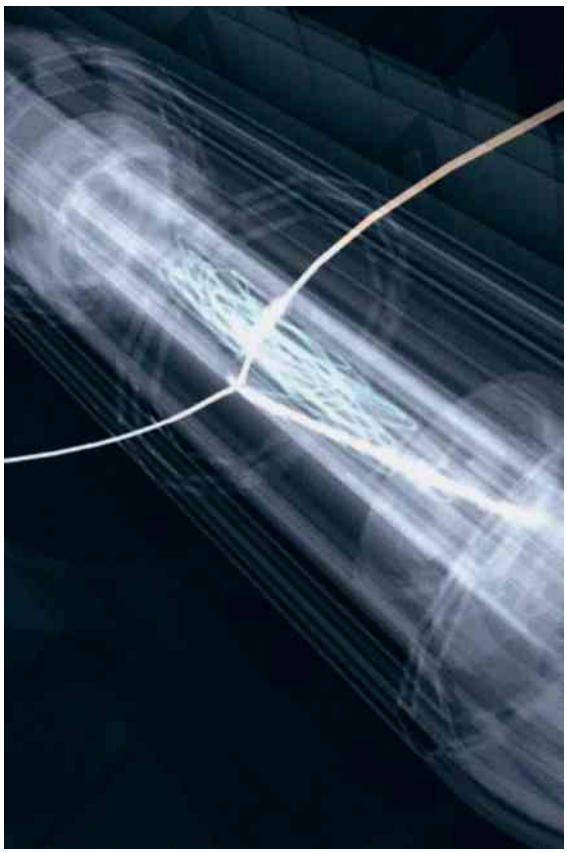
Posteriormente, Einstein procurou estender sua teoria aos referenciais acelerados. Essa tarefa foi árdua, e ele só conseguiu concluí-la em 1915. Para tanto, foi importante perceber, por volta de 1908, que as forças inerciais sentidas por um observador num referencial acelerado são da mesma natureza que as forças causadas por um campo gravitacional. Com essa equivalência entre os efeitos de um referencial acelerado e os efeitos gravitacionais, sua nova teoria, denominada teoria da relatividade geral, permitiu um melhor entendimento da gravidade, englobando a teoria da gravitação de Newton.

FÍSICA NO CONTEXTO

MATÉRIA E ANTIMATÉRIA

De tempos em tempos vemos renascer nos cientistas o sonho de encontrar os elementos fundamentais que expliquem como tudo se originou. Atualmente, uma das mais aceitas teorias que descrevem o Universo prevê que cerca de 71,4% dele é feito de energia escura, 24% de matéria escura, sendo que apenas 4,6% é o que conhecemos. Mas afinal o que é que conhecemos?

Demócrito, no século V a.C., já buscava maneiras de explicar que as coisas eram feitas de matéria, e esta era uma combinação de poucos tipos de átomos. Galileu apontou seu telescópio para o céu e descobriu não só que o Universo tinha mais do que cinco planetas, conforme lhe ensinaram, mas havia matéria fora da Terra. Newton criou a lei da gravitação, com base nos trabalhos de Kepler e Galileu, e explicou o funcionamento do Universo. Sua teoria foi testada imediatamente por Halley, que previu a aparição do cometa que receberia o seu nome e demonstrou experimentalmente que o Universo era dinâmico e estava em expansão. Daí surgiu a teoria do *big-bang* para explicar o início do Universo. Paralelamente, Einstein também iria contrariar Newton, ao afirmar que os raios de luz, mesmo não tendo massa, sofreriam a influência da gravidade e se curvariam ao atravessar o espaço próximo a grandes massas, como são os corpos celestes. O efeito da distorção no espaço-tempo provocada pela presença de uma grande massa ficou conhecido como lente gravitacional de Einstein e teve sua comprovação experimental em 1919. Os cientistas não tinham dúvidas de que a matéria existia e de que o Universo é composto dela – afinal era possível medir ondas eletromagnéticas como luz, ondas de rádio, raios X e raios gama emitidos por ela. A antimatéria foi prevista em 1928, quando Dirac juntou a teoria quântica e a relatividade de Einstein e concluiu que a resposta do problema em que trabalhava apresentava duas soluções – uma em que a energia do elétron era positiva, o que era um resultado esperado, e outra em que a energia era negativa, que a princípio não fazia o menor sentido físico. Assim, Dirac sugeriu existir um estado complementar à matéria que denominou antimatéria. Sua hipótese seria confirmada experimentalmente em 1932 por Carl Anderson, que descobriria o pósitron, partícula com massa igual à do elétron, porém com carga positiva, que corresponde à antimatéria do elétron. Atualmente consegue-se produzir em aceleradores diversas partículas que correspondem à antimatéria de partículas que conhecemos, como o antipróton. Os cientistas acreditam que no princípio do Universo matéria e antimatéria foram criadas em igual quantidade, entretanto não se sabe o que aconteceu com a antimatéria que desapareceu do Universo.



Chukman So/Berkeley Lab/University of California

Figura 9.2. Cientistas conseguiram capturar e produzir átomos inteiros feitos de antimatéria no Cern (Centro Europeu de Pesquisa Nuclear). Concepção artística da captura de átomos anti-hidrogênio.

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

Não escreva no livro!

Não; pois o que se sente é um movimento retilíneo uniforme.

1. Considere-se em um veículo, numa estrada reta, com a pavimentação lisa e em bom estado. Se a velocidade do veículo for constante, o motor silencioso e as janelas estiverem fechadas para não sentir o vento, você é capaz de estimar a velocidade se estiver de olhos fechados?

2. Critique a seguinte afirmação: "A teoria da relatividade especial só se aplica a objetos com velocidades comparáveis à da luz, não valendo no nosso cotidiano, porque este obedece às leis de Newton". Para as velocidades do nosso dia a dia não é necessária a utilização da relatividade, a menos que se queira uma grande precisão.

9.2 A teoria da relatividade especial

A relatividade especial ou restrita, publicada em 1905, é uma teoria válida apenas para os referenciais inerciais, ou seja, para aqueles que não sofrem aceleração **(figura 9.3)**. Isso não significa que não se possa estudar o movimento de um objeto acelerado. Apenas o observador (referencial) é que não pode estar sujeito a acelerações. Para se compatibilizar com a teoria eletromagnética desenvolvida no século XIX, de modo que ambas fossem válidas em todos os referenciais inerciais, essa teoria modificou a Mecânica newtoniana.



Chris Pearsall/Alamy/Latinstock

Jim Sugar/Corbis/Latinstock

Figura 9.3. Não se distingue um referencial inercial de outro: o avião supersônico *Concorde* (Reino Unido, 2003) voava regularmente a duas vezes a velocidade do som, numa altitude de cerca de 17 km, na estratosfera, onde praticamente não existe turbulência (**a**). Nessas condições, para um voo em linha reta, o referencial do avião pode ser considerado inercial. A comissária de bordo serve, naturalmente, uma refeição como se o avião estivesse parado em terra, mostrando que não se distingue um referencial inercial de outro (**b**). O mesmo não acontece para um referencial acelerado. Caso o avião enfrentasse turbulência, a situação seria diferente, e os passageiros deveriam se prender com cintos de segurança.

Einstein conseguiu basear a teoria em dois postulados. O primeiro traduz o fato de não sentirmos, em termos de forças, um movimento retilíneo uniforme, apesar de sentirmos quando estamos sofrendo acelerações. Esse resultado já era conhecido por Galileu. Além disso, esse primeiro postulado está em conformidade com o fato de Michelson e Morley não conseguirem determinar um referencial para o hipotético "éter". O segundo postulado decorre da constância da velocidade da luz, que aparece na teoria eletromagnética de Maxwell e no fato de a experiência de Michelson e Morley não indicar variações na velocidade da luz à medida que o interferômetro era girado.

Postulados da teoria da relatividade especial

1º) As leis físicas são as mesmas para quaisquer observadores em movimento uniforme.

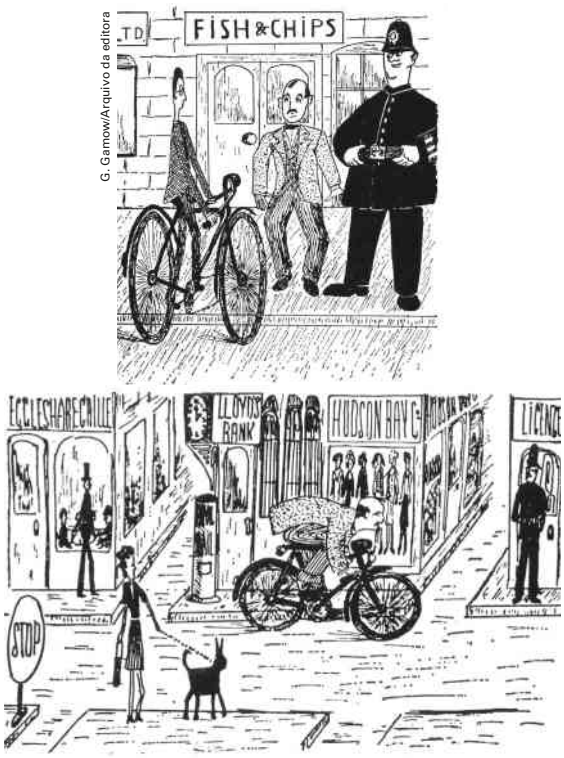
Assim, não há na natureza um referencial inercial privilegiado, como seria o "éter", caso essa substância existisse, e não faz sentido o conceito de repouso absoluto. É impossível detectar, por meio das leis físicas da Dinâmica, o estado de movimento de um referencial inercial. O mesmo não acontece para um observador num referencial acelerado (não inercial), onde as forças inerciais se fazem sentir. O objetivo desse postulado é garantir que as leis do Eletromagnetismo não se alterem por uma mudança de referencial, como acontecia com as leis da Mecânica.

2º) A velocidade da luz no vácuo possui sempre o mesmo valor para qualquer observador.

Tal valor, $c = 3{,}00 \cdot 10^8$ m/s, independe do movimento da fonte emissora de luz ou da direção de propagação. A teoria da relatividade especial mostra que a velocidade da luz no vácuo é também uma velocidade-limite, que não pode ser atingida e muito menos ultrapassada por qualquer partícula material.

Cinemática relativística

Einstein percebeu que a única maneira de dois observadores, com um movimento relativo entre si, conseguirem medir o mesmo valor para a velocidade de um raio de luz seria se um deles achasse que a régua ou o relógio do outro não estava coincidindo com o seu. Apenas dessa maneira o segundo observador, ao dividir a distância percorrida pelo raio de luz pelo tempo de percurso, poderia obter o mesmo valor que o primeiro para a velocidade da luz **(figura 9.4)**.



G. Gamow/Arquivo da editora

Figura 9.4. Se a velocidade da luz fosse de algumas dezenas de quilômetros por hora, vivenciaríamos efeitos relativísticos no nosso cotidiano. Na ilustração do astrofísico George Gamow, o personagem Mr. Tompkins vê um ciclista a cerca de 90% da velocidade da luz, sofrendo contração na direção de seu movimento. O personagem se pergunta como veria a cidade se estivesse no lugar do ciclista. Em razão do primeiro postulado da teoria da relatividade especial, se existe uma lei dizendo que objetos em movimento contraem na direção do movimento, essa contração também deve se aplicar ao referencial do ciclista.

Einstein, usando os postulados por ele propostos, demonstrou que um observador, ao perceber um relógio em movimento, notará também que, para ele, o ritmo desse relógio será mais lento. De maneira semelhante, se um observador perceber uma régua em movimento, notará que a dimensão dela será reduzida na direção do movimento **(figura 9.4)**. Esse efeito é chamado de contração de Lorentz em homenagem ao físico holandês Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928). O fator numérico que nos fornece a contração da régua e quanto o relógio atrasa é o mesmo, sendo dado pelo fator γ de Lorentz.

Na verdade, esses efeitos não ocorrem apenas com os relógios e as réguas em movimento. Qualquer objeto observado em movimento apresentará essa contração, além de ter o ritmo de todos os seus processos físicos e químicos acontecendo com maior lentidão. Podemos considerar que são o tempo e o espaço que sofrem esses efeitos, quando observados de outro referencial em movimento. A teoria da relatividade é em essência uma teoria do espaço-tempo.

Sugestão de leitura

GAMOW, G. *O incrível mundo da Física moderna*. 3. ed. São Paulo: Ibrasa, 1980.

Uma experiência foi realizada em 1964 no acelerador de partículas do Cern (**figuras 9.5.a** e **b**), em Genebra, Suíça, utilizando uma partícula chamada píon. O píon é instável e, em repouso, decai depois de um tempo de vida da ordem de $8{,}7 \cdot 10^{-17}$ s, emitindo dois fótons que viajam na velocidade da luz. No experimento realizado no acelerador, píons viajando com velocidade de $0{,}9975c$, ao decairem, emitiram os fótons que tiveram suas velocidades determinadas experimentalmente, e os resultados mostraram que a velocidade dos fótons foi igual à velocidade da luz, concordando perfeitamente com a teoria da relatividade.

A partir das deformações do espaço e do tempo, pode-se deduzir a equação relativística da composição de velocidades:

$$v = \frac{v_B + v_C}{1 + \frac{v_B v_C}{c^2}}$$

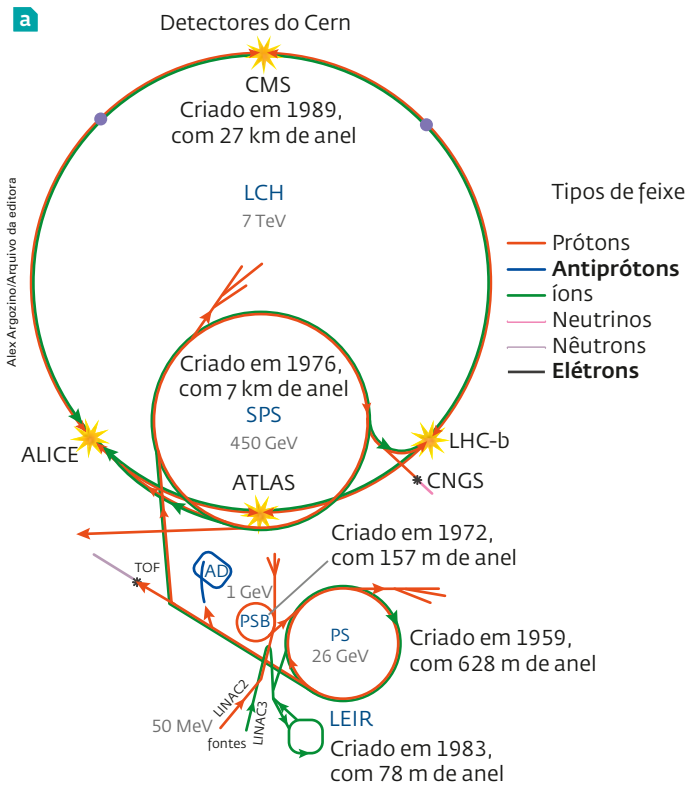
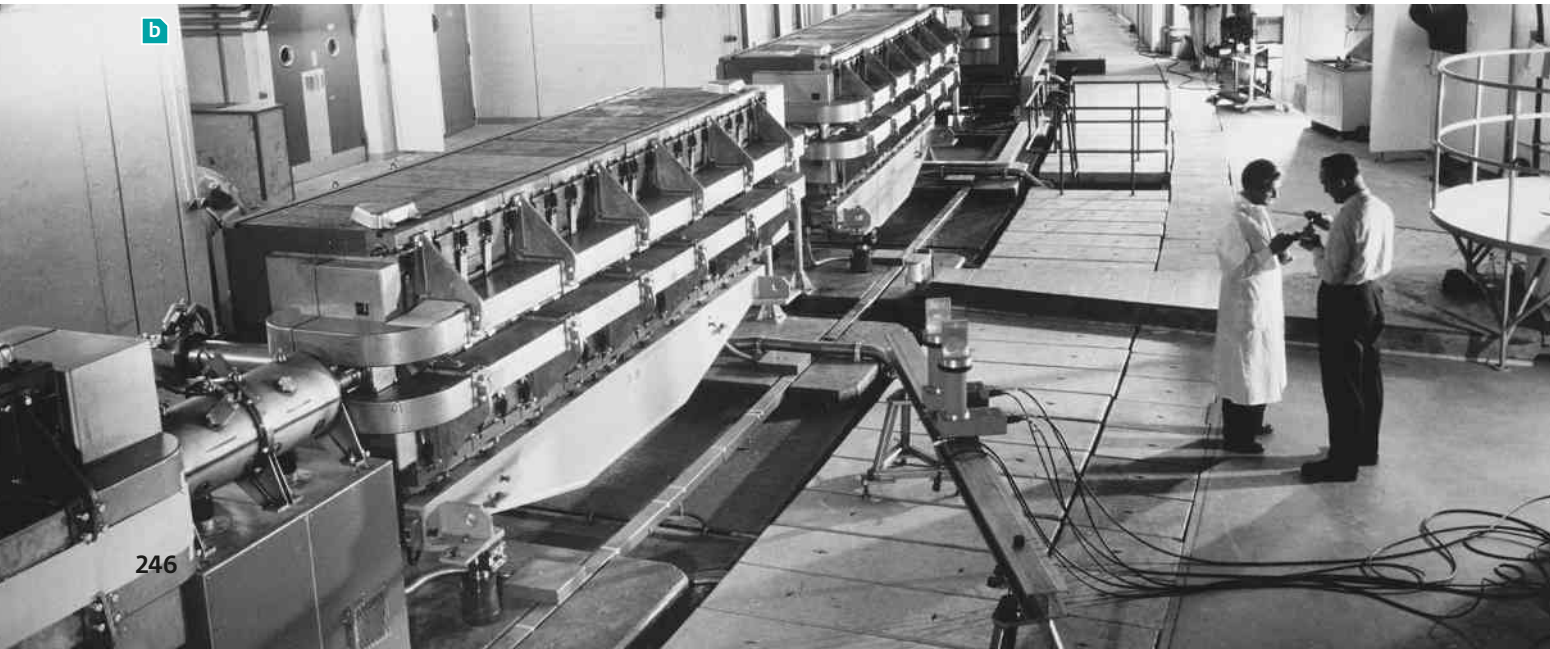


Figura 9.5. Em **a** desenho esquemático sem escala e em cores fantasia do complexo de aceleradores de partículas do Cern. O acelerador Proton Synchrotron (PS), de 1959, foi utilizado para estudar o píon. Os prótons e íons usados nas colisões dos aceleradores são inicialmente acelerados nos aceleradores lineares. Em **b** acelerador de partículas Proton Synchrotron (PS), do Cern (Genébra, 1959). Na época, ele acelerou prótons a uma energia recorde de 24 GeV. Nos dias de hoje ele pode atingir energias de 26 GeV.

Cern/SPL/Latinstock



Assim, a teoria da relatividade é uma teoria que deve ser entendida em quatro dimensões: as três dimensões do espaço e uma quarta dimensão, que é o tempo. Esse tipo de "geometria" quadridimensional é chamada de espaço-tempo.

Um professor de Einstein, o matemático Hermann Minkowski (1864-1909), foi quem teve a ideia de formular a relatividade em termos geométricos. Por esse motivo, essa formulação da teoria da relatividade especial é denominada **espaço-tempo de Minkowski**. No espaço-tempo, a grandeza análoga ao ponto da geometria do espaço é o **evento**, um acontecimento ocorrido num dado instante, em determinado ponto do espaço.

Na geometria do espaço-tempo um conceito comumente usado é o **cone de luz**. Para entendê-lo, imagine uma superfície como a da água, sobre a qual é gerado um pulso ondulatório.

Esse pulso se expandirá na forma de um círculo. Acrescentando o tempo como uma dimensão extra, os círculos concêntricos formarão a superfície de um cone. No caso de um pulso de luz, tal superfície cônica representada no espaço-tempo é denominada cone de luz (**figuras 9.6** e **9.7**).

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

Antonio Robson/ Arquivo da editora

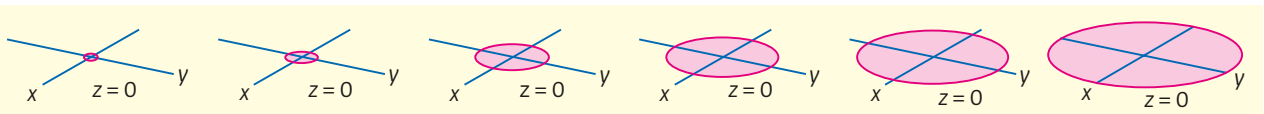


Figura 9.6. Ilustração da expansão de um pulso circular numa superfície plana representada por uma sucessão de instantes.

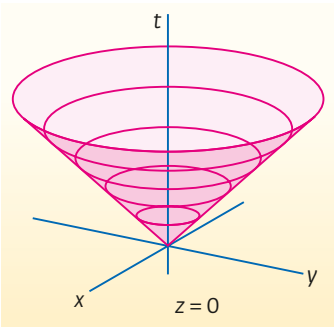
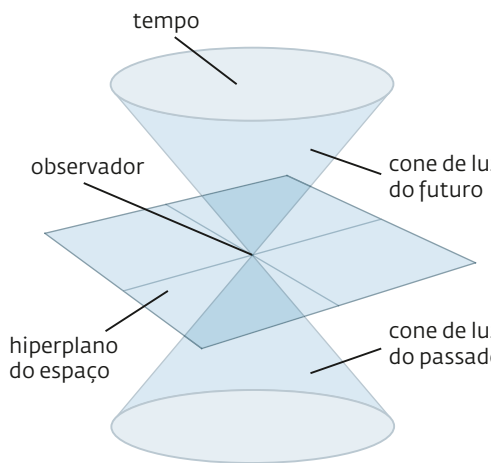


Figura 9.7. Ao acrescentar o eixo do tempo, o pulso em expansão descreve um cone no espaço-tempo. O caso de um pulso esférico expandindo-se no espaço tridimensional é análogo, mas, para desenhá-lo no espaço-tempo, somos obrigados a omitir uma coordenada, fixando seu valor em $z = 0$. Ao passarmos dos três eixos (x, y e t) para os quatro eixos do espaço-tempo (x, y, z e t), o cone de luz, que foi desenhado como uma superfície bidimensional, passa a ser uma hipersuperfície de três dimensões, um conceito abstrato, pois não conseguimos visualizar quatro eixos perpendiculares entre si no espaço tridimensional em que vivemos.

Todos os raios de luz emitidos a partir do evento presente se propagam ao longo da superfície do cone de luz do futuro. Todos os raios de luz que nos atingem no presente propagam-se ao longo do cone de luz do passado. Assim, não devemos estranhar o fato de que, ao olharmos o Sol, a 8 minutos-luz de distância, estamos vendo uma imagem ocorrida há 8 minutos, pois o cone de luz mistura espaço com tempo. No caso de Sírio, a estrela mais brilhante e distante 8 anos-luz da Terra, estamos tendo uma imagem de 8 anos atrás. Assim, uma imagem instantânea não é uma projeção na retina do espaço tridimensional à nossa volta e sim uma projeção do cone de luz do passado, que nas quatro dimensões do espaço-tempo é denominada **hipersuperfície** de três dimensões **(figura 9.8)**.



Antonio Robson/Arquivo da editora

Figura 9.8. Espaço-tempo de Minkowski. Presente no hiperplano do espaço, passado e futuro nos cones de luz. Sugere-se representar a escala do eixo temporal dessa forma. Nesse caso, um raio de luz se propaga no espaço-tempo, formando um ângulo de 45° com os eixos.

O "paradoxo" dos gêmeos

A teoria da relatividade restrita só vale para referenciais inerciais, e a tentativa de aplicá-la a um referencial acelerado pode levar a situações paradoxais, como é o caso do chamado "paradoxo" dos gêmeos.

Consideremos a situação de dois gêmeos, João e José, em que José embarca numa nave capaz de atingir em pouco tempo uma altíssima velocidade, viajando em direção à Próxima de Centauro, que é uma estrela distante 4,3 anos-luz da Terra. Lá chegando, a nave retorna à Terra trazendo José. Podemos concluir, usando a teoria da relatividade especial, que, devido ao rápido movimento da nave, do ponto de vista de João, José envelhece mais lentamente, mas para José é João que envelhece menos. O "paradoxo" surge se aplicarmos esse raciocínio à viagem completa, pois ao mesmo tempo teríamos José mais novo que João e João mais novo que José.

A falha nesse raciocínio provém do fato de o referencial da nave não ser inercial todo o tempo, pois ela precisa acelerar na partida da Terra, frear em Próxima do Centauro, dar novamente a partida nos motores para a viagem de volta e frear na chegada à Terra. Já o referencial da Terra é inercial. Assim, podemos usar a teoria da relatividade especial apenas no referencial inercial da Terra e concluir que José envelhece mais devagar. Para entender o problema no referencial acelerado da nave precisamos usar a teoria da relatividade geral.

Exemplo

Suponhamos que os gêmeos João e José tenham 3 anos de idade e que José embarque numa nave em direção à Próxima de Centauro, numa jornada de 4,3 anos-luz. Lá chegando, depois de uma breve estadia, José retorna à Terra. A nave mantém, em praticamente todo o tempo da viagem de ida e de volta, uma velocidade de 0,995c. Quais as idades dos gêmeos quando se encontrarem depois da viagem?

O fator de Lorentz é:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - 0{,}995^2}}$$

$$\gamma = 10$$

Como apenas o referencial da Terra é inercial, só podemos aplicar a teoria da relatividade especial nesse referencial.

Como a luz demora 4,3 anos para fazer o trajeto da viagem, o tempo que João deve esperar para a nave de José fazer a travessia é 4,3 anos/0,995 ($\approx$ 4,3 anos). Na viagem de ida e volta João terá envelhecido $2 \cdot 4{,}3$ anos $= 8{,}6$ anos.

Usando a teoria da relatividade especial no referencial inercial da Terra, para João, o tempo de José caminha 10 vezes mais devagar. Assim, durante a viagem de ida e volta, José só terá envelhecido $2 \cdot 4{,}3$ anos/10 ($\approx$ 0,9 anos).

Quando se encontrarem, João terá 11,6 anos e José, apenas 3,9 anos. Esse efeito realmente acontece e foi observado utilizando-se dois relógios atômicos. Um deles ficou em terra enquanto o outro deu uma volta de avião em torno do globo. No retorno, o relógio que viajou estava um pouco atrasado.

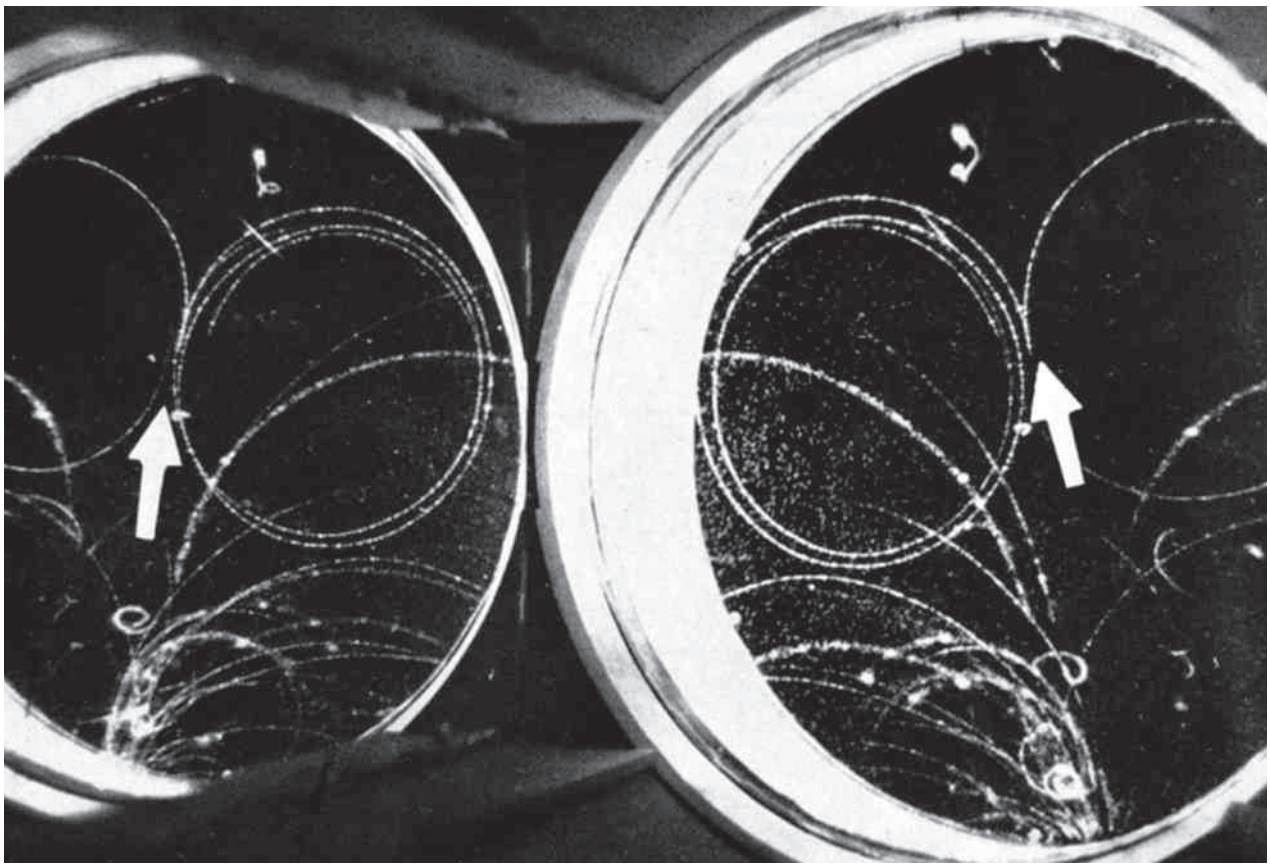
Dinâmica relativística

Todas as consequências dos dois postulados da teoria da relatividade especial, que citamos, são vistas na Cinemática, eles envolvem os conceitos de espaço e tempo que estão na base de toda a Física. Com essas revisões de conceitos básicos, a Dinâmica também sofreu mudanças, e as equações para a quantidade de movimento e energia de uma partícula tiveram que ser reescritas. Assim, a quantidade de movimento e a energia de uma partícula passaram a ser dadas pelas equações $\vec{q} = \gamma m \vec{v}$ e $E = \gamma mc^2$.

Essas expressões mostram por que é impossível colocar uma partícula material na velocidade da luz; o fator de Lorentz nessas condições tenderia ao infinito e necessitaríamos de uma energia infinita para que tal acontecesse.

Einstein chegou à equação $E_0 = mc^2$ relacionando a massa de um objeto com uma nova forma de energia, a energia de repouso, que engloba todas as formas de energia contidas no objeto, e descobriu serem equivalentes os conceitos de energia e massa. Assim, $1\ \text{kg} = (3{,}0 \cdot 10^8)^2\ \text{J} = 0{,}9 \cdot 10^{17}\ \text{J}$. Existem reações em que uma quantidade de matéria pode desaparecer, surgindo energia em seu lugar. Existem também reações que criam matéria, caso tenhamos um suprimento adequado de energia **(figura 9.9)**. A energia continua se conservando, e o desaparecimento de uma pequena massa acarreta enorme liberação de energia.

A expressão relativística da energia cinética passa a ser dada, então, subtraindo-se da energia relativística a energia do repouso, ou seja: $E_C = (\gamma - 1)mc^2$.



Reprodução/<http://www.cloudylabs.fr/>

Figura 9.9. Fotografia de uma câmara de bolhas demonstrando a formação do par elétron-pósitron quando um fóton (energia mínima de 1,022 MeV) interage com um núcleo, cedendo toda a sua energia para ele. O campo magnético que é aplicado à câmara de bolhas, nesse caso perpendicular ao plano da fotografia, faz com que as trajetórias das partículas espiralem em direções opostas.

APLICAÇÕES DA FÍSICA

GPS – SISTEMA DE POSICIONAMENTO GLOBAL

A teoria da relatividade é aplicada nos aparelhos GPS (*Global Position System*) que estão presentes nos *smartphones*, automóveis, aviões, navios, entre outros. O GPS permite localizar sua posição na Terra com alta precisão **(figura 9.10)**. Cada satélite emite um sinal de onda de rádio e seu tempo de propagação é medido por relógios atômicos através das informações enviadas por diversos satélites estacionários que orbitam o planeta. Pelo fato de os satélites terem altas velocidades (10.000 km/h), seus relógios internos são atrasados diariamente quando comparados com os relógios que estão na Terra. Além disso, como os satélites estão posicionados a 20.000 km acima da superfície da Terra, eles sofrem menos influência da força da gravidade, e por isso são necessários cálculos relativísticos para corrigir a diferença do tempo entre um relógio situado na Terra e outro no espaço. O erro de localização seria maior do que 11 quilômetros por dia caso não fossem aplicadas as correções relativísticas.



Antonio Robson/Arquivo da editora

Figura 9.10. Os aparelhos GPS definem com precisão sua localização a partir de correções de tempo introduzidas pela teoria da relatividade. Representação sem escala e em cores fantasia.

QUESTÕES

1. O GPS é uma tecnologia relativamente recente quando comparada historicamente ao surgimento dos meios de transporte, tais como o carro, o avião e o navio. Ainda assim, mesmo quando não havia GPS, os usuários desses meios de transporte conseguiam (e conseguem mesmo hoje em dia) traçar rotas e chegar ao seu destino utilizando distintas formas de orientação. Faça uma pesquisa sobre essas formas de orientação para viagens de longa distância e as compare com o GPS.

2. Cada vez mais é comum ver receptores de GPS integrados a dispositivos de uso pessoal, tais como celulares e *notebooks*, e a tendência é de que essa integração continue aumentando. Contudo, isso traz uma questão polêmica: a preocupação de perda da privacidade das pessoas. Pensando nisso, discuta os pontos positivos e negativos do uso dessa tecnologia, imaginando como seria possível manter a privacidade dos usuários.

1. De modo geral, todos os mecanismos utilizavam informações encontradas em bússolas e mapas, combinadas com identificação pelas estrelas e geografia da região. Já o GPS identifica, com precisão, a posição e a direção de um veículo.
2. Entre os pontos negativos, podemos citar que o uso do GPS facilita controlar os locais por onde as pessoas passam. Espera-se que os estudantes discutam os usos do GPS e as medidas que podem ser tomadas para não permitir a invasão de privacidade por eles.

Nota sobre o conceito de massa

Uma tendência atual é chamar a massa de repouso, $m \approx m_0$, ou seja, aquela medida com o objeto em repouso, que traduz a quantidade de matéria desse objeto. Cada tipo de partícula elementar, como um elétron ou um nêutron, é caracterizado pela sua massa de repouso e outras propriedades, como carga elétrica, por exemplo. Essas propriedades não devem mudar se a partícula é observada num referencial em movimento. Quando uma grandeza não varia quando se muda de referencial, se diz que ela é **invariante**.

Para entendermos melhor a utilização atual de conceitos equivalentes, como de energia e massa, faremos o seguinte cálculo:

$$E^2 - c^2q^2 = (\gamma mc^2)^2 - c^2(\gamma mv^2)^2 = \gamma^2 m^2 c^4 (1 - v^2/c^2) = m^2c^4$$

Se repetíssemos esse cálculo em outro referencial em que a partícula de massa m tivesse outra energia E' e outra quantidade de movimento q', o resultado seria:

$$E'^2 - c^2q'^2 = E^2 - c^2q^2 = m^2c^4$$

Nos dois primeiros membros dessa expressão temos duas grandezas, energia e quantidade de movimento, que variam quando se muda de referencial. No entanto, o último membro é invariante, não depende do referencial. De início, a teoria da relatividade mostra uma equivalência entre massa e energia (de repouso). Então estaríamos tentados a eliminar um desses conceitos, por serem redundantes. Mas na teoria da relatividade, em que várias grandezas dependem dos referenciais, quando encontramos uma grandeza invariante ela é preciosa. Assim, optou-se por designar a grandeza invariante associada a determinada partícula como **massa**. Energia passa a ser a grandeza equivalente à massa para uma partícula em repouso, mas dependente do referencial no caso geral.

Massa de um feixe de luz

Pode parecer estranho que o fator de Lorentz, γ, que aparece nessas equações, tenda ao infinito para $v = c$. Analisemos, por exemplo, o caso da energia de uma partícula de massa m e velocidade v. A energia é dada por:

$$E = \gamma mc^2 = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

No caso de um feixe de luz, no entanto, E é finito, mas γ é infinito. A única possibilidade é a massa de repouso m ser nula. Nesse caso, temos zero dividido por zero, que é indeterminado; pode ser qualquer valor. Assim, a teoria impõe a condição de que a massa de repouso de um feixe de luz, ou de um fóton, seja identicamente nula. Deve-se frisar que essa massa de repouso não pode ser apenas muito pequena: ela deve ser exatamente zero.

O termo "massa de repouso nula" pode causar um certo mal-estar, mas lembre-se de que a mesma teoria impede que o raio de luz fique em repouso para que essa medida de massa seja realizada. Finalizando nossa análise da equação da energia de uma partícula, $E = \gamma\, m\, c^2$, vemos que ela depende de duas grandezas, m e v. Para as partículas materiais, os valores de m e v determinam a sua energia. Para a luz, $v \equiv c$ e $m \equiv 0$, mas a equação fica indeterminada, permitindo ao feixe de luz possuir qualquer energia.

Apesar de a energia ou a quantidade de movimento da luz serem indeterminadas, existe uma relação entre elas. No tópico "Nota sobre o conceito de massa", vimos uma relação que podemos aplicar ao caso da luz: $E^2 - c^2q^2 = m^2c^4 = 0$, logo $E = cq$.

Resumindo, para um feixe de luz, temos:

$$v \equiv c \Leftrightarrow m \equiv 0 \text{ e } |\vec{q}| = \frac{E}{c} \text{ (para a luz)}$$

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

3. Se astronautas numa estação espacial observarem uma nave passar em alta velocidade, acharão que o comprimento, na direção do movimento da nave, ficou encurtado. Consequentemente, podemos dizer que os tripulantes da nave observarão o comprimento da estação espacial, na direção do seu movimento, parecer dilatado? Justifique sua resposta em termos dos postulados da teoria da relatividade especial. Veja resposta no Manual do Professor.

4. Se um observador *A* nota que o relógio de outro observador *B*, em movimento retilíneo uniforme em relação a ele, movimenta-se em ritmo mais lento, podemos concluir que, para o observador *B*, o relógio de *A* caminha num ritmo mais rápido? Que argumento da teoria da relatividade especial você pode usar para resolver essa questão? Veja resposta no Manual do Professor.

5. Um astronauta numa futura estação espacial nota uma nave aproximando-se a 60% da velocidade da luz. Em sentido oposto e numa trajetória paralela, ele observa um meteoroide indo de encontro à nave a 80% da velocidade da luz. Com que velocidade os tripulantes da nave observariam o meteoroide segundo a Mecânica newtoniana? E de acordo com a teoria da relatividade?

6. Um elétron está a 99,5% da velocidade da luz. A massa do elétron vale $9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg. Calcule:

a) a energia de repouso do elétron; $8{,}2 \cdot 10^{-14}$ J

b) sua energia relativística; $8{,}2 \cdot 10^{-13}$ J

c) a energia cinética do elétron de acordo com a Mecânica newtoniana e de acordo com a teoria da relatividade; $7{,}4 \cdot 10^{-13}$ J

d) a quantidade de movimento do elétron de acordo com a Mecânica newtoniana e de acordo com a teoria da relatividade. $2{,}7 \cdot 10^{-22}$ kg · m/s e $2{,}7 \cdot 10^{-21}$ kg · m/s

Não escreva no livro!

5. De acordo com a Mecânica newtoniana: $v = 1{,}40$ c. De acordo com a teoria da relatividade: $v = 0{,}95$ c.

6. c) $4{,}1 \cdot 10^{-14}$ J e $7{,}4 \cdot 10^{-14}$ J

9.3 A teoria da relatividade geral

A teoria da relatividade especial formulada em 1905 não podia ser aplicada a referenciais acelerados (não inerciais); assim, nos anos seguintes, Einstein procurou estendê-la a esse tipo de referencial. Uma ideia importante para essa nova teoria é o chamado **princípio de equivalência**, formulado por Einstein em 1908. Quando um elevador começa a subir rapidamente, somos empurrados contra o piso e sentimos como se sofrêssemos um pequeno aumento de peso. O oposto acontece quando o elevador desacelera bruscamente. O que Einstein percebeu foi que a sensação de aumento de peso, sentida pelos passageiros no referencial acelerado do elevador, é realmente **equivalente** ao efeito de um campo gravitacional **(figura 9.11)**.

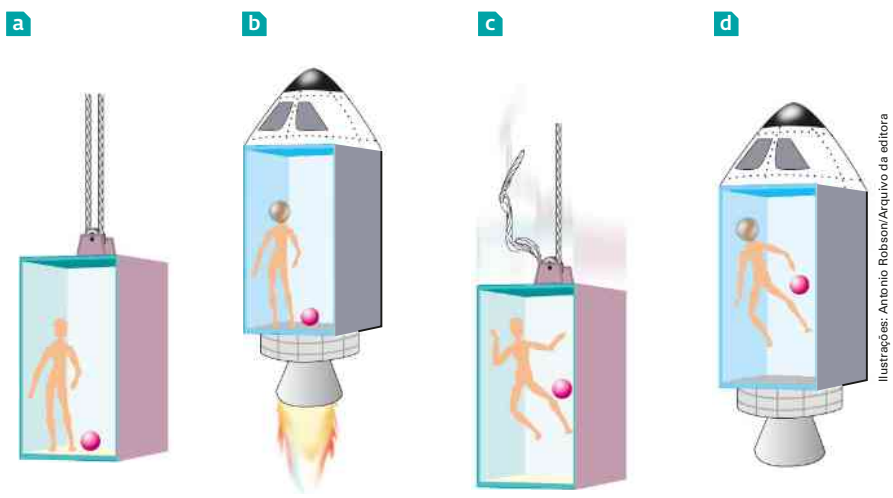


Figura 9.11. De acordo com o princípio de equivalência, não se podem distinguir os efeitos sentidos em um referencial acelerado, numa pequena região do espaço, dos efeitos produzidos por um campo gravitacional. As leis físicas dentro de um elevador parado, num campo gravitacional (**a**), são equivalentes às leis em uma nave acelerada com aceleração *g*, no espaço vazio, livre de campo gravitacional (**b**). Da mesma forma, um elevador em queda livre acelerado para baixo (**c**) é equivalente a uma nave livre de campo gravitacional (**d**). Representação sem escala e em cores fantasia.

Em decorrência da equivalência, esse efeito em um referencial acelerado pode ser utilizado para cancelar a sensação de peso causada pela gravidade. Assim, se o elevador estiver em queda livre, os passageiros flutuarão em seu interior como se estivessem na ausência da gravidade.

Depois de descobrir o princípio de equivalência, Einstein constatou que poderia formular matematicamente sua nova teoria em termos de espaços curvos e geometrias não euclidianas. Essas formas de geometrias haviam sido desenvolvidas por alguns matemáticos do século XIX, entre eles Georg Friedrich Bernhard Riemann.

A grande novidade introduzida por Einstein, em relação ao trabalho dos matemáticos, foi utilizar-se de uma geometria de quatro dimensões, na qual, como vimos, o tempo era a quarta dimensão. A ideia, a ser desenvolvida matematicamente, era a de que uma grande massa criaria uma curvatura no espaço-tempo **(figuras 9.12** e **9.13)**.

A nova lei da gravitação decorreria do comportamento das partículas ao descreverem trajetórias nesse espaço-tempo, curvado por uma grande massa **(figura 9.14)**.

Depois de aprender toda a matemática necessária e enfrentar grandes dificuldades na elaboração da teoria, Einstein a concluiu em 1915. A expressão matemática sintetizando todas as ideias a respeito da relatividade e substituindo o conceito newtoniano de gravitação passou a ser conhecida como equação de campo de Einstein.

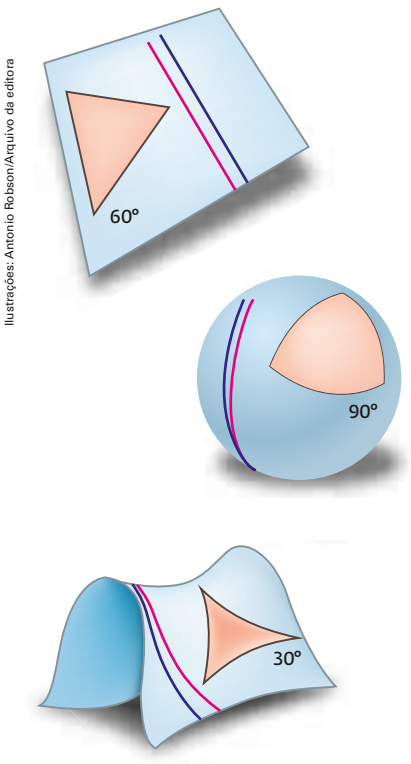
As ilustrações desta página estão representadas sem escala e em cores fantasia.



SPL/Latinstock

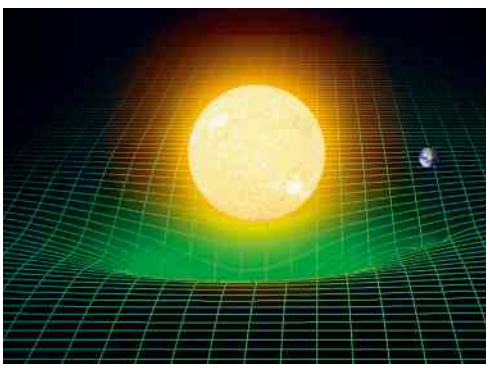
GEORG FRIEDRICH BERNHARD RIEMANN (1826-1866)

É considerado o matemático que verdadeiramente deu início à Topologia (do grego *topos* = lugar + *logos* = estudo), ramo da Matemática que estuda objetos sujeitos a mudanças contínuas e suaves em suas formas. Criou a Geometria riemanniana, com as ferramentas matemáticas necessárias ao tratamento dos espaços curvos, a qual foi essencial na elaboração da teoria geral da relatividade. Ambicionava, com suas ideias de espaço curvo, dar um tratamento geométrico ao eletromagnetismo e à gravitação, incorporando noções como as de linhas de força. O que ele não sabia na época é que tal tratamento, para obter êxito, necessitava da inclusão do tempo como uma quarta dimensão.



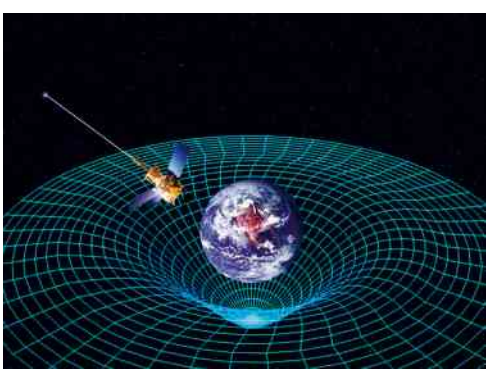
Ilustrações: Antonio Robson/Arquivo da editora

Figura 9.12. Devido ao fato de vivermos nas três dimensões do espaço, não conseguimos conceber um espaço tridimensional curvo. O artifício, então, é trabalhar com um espaço bidimensional curvo, descobrir suas propriedades e estendê-las ao caso das três dimensões. As figuras ilustram duas dessas propriedades: o paralelismo de retas e a soma dos ângulos internos de um triângulo. A primeira das figuras ilustra um espaço, chamado de euclidiano porque duas paralelas nunca se encontram. No espaço euclidiano, a soma dos ângulos internos de um triângulo é igual a 180°. Nas outras figuras são exemplificados dois tipos de espaços curvos em que essas propriedades têm um comportamento diferente. No caso dos raios de luz inicialmente paralelos, ou eles se aproximam ou se distanciam cada vez mais.



Ligo/T. Pyle/SPL/Latinstock

Figura 9.13. Nesta figura está representada uma superfície bidimensional, e a curvatura do espaço é causada por uma grande massa, como o Sol ou a Terra. Para nós, que observamos de fora, a trajetória de uma partícula se curva nas vizinhanças da grande massa ao procurar seguir o caminho mais curto. Uma hipotética criatura bidimensional vivendo nessa superfície, sem poder olhar para fora, não perceberá a curvatura de seu espaço. No entanto, notará que a trajetória da partícula se aproximou da grande massa, ao passar em sua vizinhança. Como Newton, a criatura concluirá que existe uma força atraindo a partícula a distância.

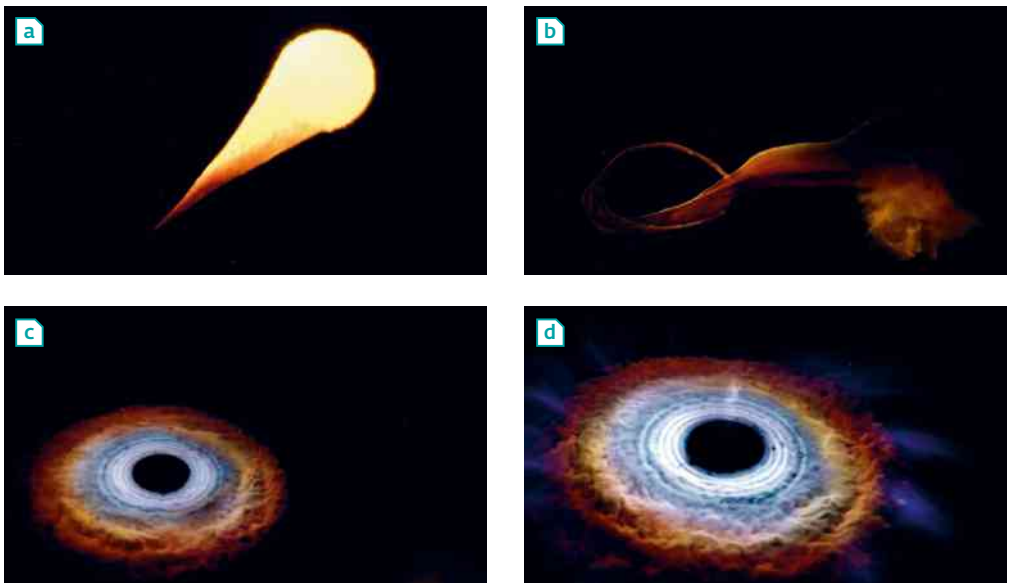


Reprodução/NASA

Figura 9.14. A Nasa, em 2004, lançou a sonda Gravity Probe B, que possuía quatro giroscópios capazes de detectar a movimentação de uma determinada estrela. Com essa sonda foi possível confirmar a curvatura do espaço-tempo prevista por Einstein.

O astrofísico alemão Karl Schwarzschild (1873-1916) aplicou as equações de campo de Einstein, recém-descobertas, aos dados de uma estrela. Sua solução mostrava a existência de um raio-limite, conhecido como raio de Schwarzschild. Se a estrela fosse comprimida até esse raio, não existiria força na natureza capaz de sustentá-la contra a atração gravitacional a que estaria sujeita e ela sofreria um colapso, transformando-se num buraco negro **(figura 9.15)**.

As imagens desta página estão representadas fora de proporção.



Imagens: Reprodução/NASA

Figura 9.15. Esta sequência de imagens, feitas por estudos em raios x, ilustra uma estrela sendo engolida por um buraco negro na galáxia PGC043234, a 290 milhões de anos-luz da Terra.

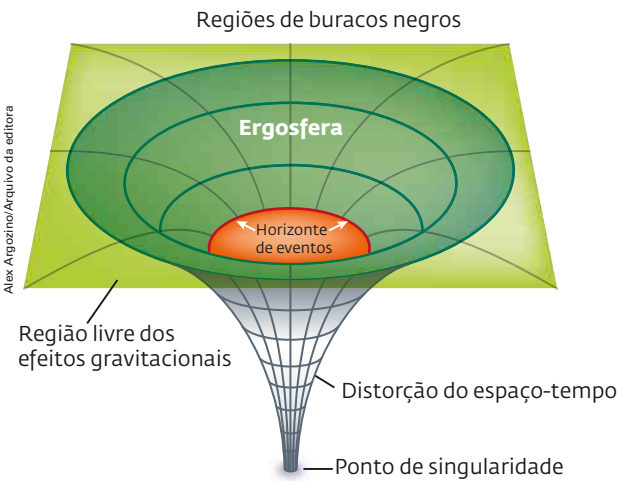
Einstein nunca acreditou que as suposições decorrentes da aplicação de suas equações pudessem de fato acontecer.

Hoje, no entanto, temos diversas evidências da existência dos buracos negros, provenientes das observações astronômicas. A teoria mostra que na proximidade de um buraco negro a deformação do espaço-tempo gerado faz com que o **cone de luz do futuro** de uma partícula aponte para dentro do próprio buraco negro. Assim, é tão impossível deter a queda dessa partícula em direção ao buraco negro quanto é impossível deter a marcha do tempo em direção ao futuro.

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

O raio a partir do qual o cone de luz se volta para dentro do buraco negro e não permite que nem a luz escape é o chamado raio de Schwarzschild. Em analogia ao horizonte terrestre, que nos impede de ver além, a superfície esférica com o raio de Schwarzschild é denominada **horizonte de eventos** **(figura 9.16)**.

As equações de campo de Einstein também foram aplicadas ao Universo como um todo. A solução mostrava que o Universo não poderia ser estacionário, ou seja, aparentar ser sempre o mesmo. Ele deveria ser dinâmico, sujeito à gravidade, e se encontrar expandindo ou contraindo. Novamente Einstein não acreditou nesse resultado e acrescentou um termo extra à sua equação, chamado de **constante cosmológica**, cuja função era a de se contrapor à gravidade.



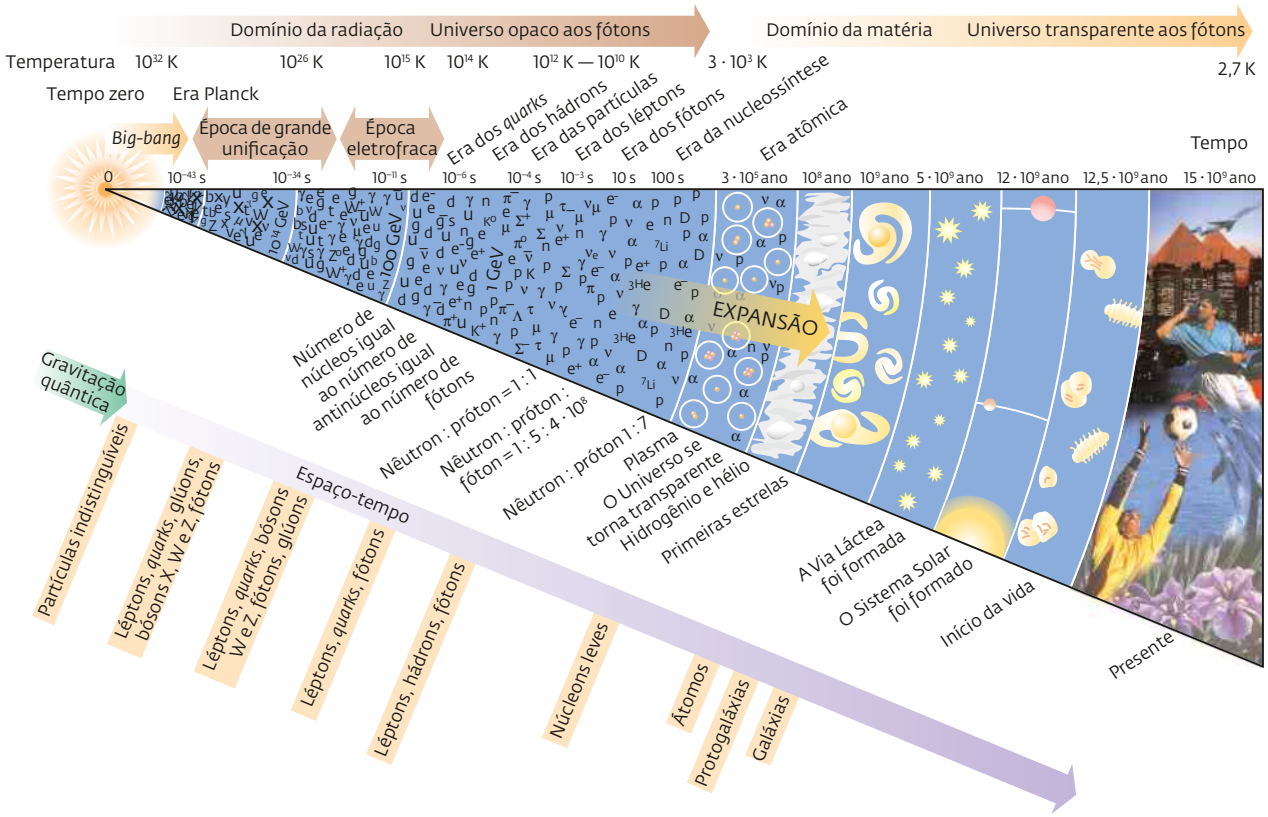
Alex Argozino/Arquivo da editora

Figura 9.16. A curvatura do espaço-tempo na vizinhança de um buraco negro faz com que o cone de luz do futuro de uma partícula aponte totalmente para o seu interior, depois que a partícula cruza o horizonte de eventos. Assim, nem a partícula nem um sinal luminoso que ela venha a emitir conseguem sair.

Posteriormente, em 1929, o astrônomo Edwin Hubble (1889-1953) descobriu, ao analisar a luz de galáxias distantes, que o Universo está em expansão. Einstein lamentou ter acrescentado o termo extra a sua equação, dizendo ter sido esse o maior erro de sua vida. Perdeu, com isso, a chance de ter previsto a expansão do Universo a partir do *big-bang* **(figura 9.17)**.

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

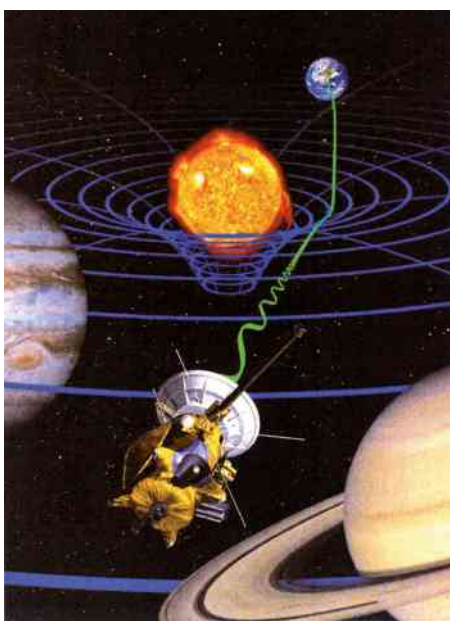
Representação da expansão do Universo a partir do *big-bang*



Paulo César Pereira/Arquivo da editora

Figura 9.17. A teoria da relatividade geral é essencial na teoria do *big-bang*. Outras áreas, como a Física de partículas, fornecem detalhes sobre o comportamento da matéria em condições extremas. A descrição do Universo nas frações de segundo iniciais ainda depende de um tratamento quântico da gravidade, uma união entre Física quântica e teoria da relatividade geral que se espera que aconteça neste século.

Da mesma forma que a teoria da relatividade especial, a teoria geral da relatividade tem passado por vários testes. Em 2002, ela foi submetida a um teste em que foi utilizada a sonda espacial Cassini, durante sua jornada a caminho de Saturno, depois de passar por Júpiter. Naquela época a Terra e a sonda estavam em lados opostos do Sol. Um sinal de micro-onda tangenciando a superfície solar foi enviado da Terra para a sonda e da sonda novamente para a Terra e foi observado o desvio da frequência nas ondas de rádio para a nave. O experimento permitiu uma precisão de vinte partes por milhão, e o resultado teórico baseado na teoria da relatividade geral confirmou a medida **(figura 9.18)**.



Reprodução/Nasa

Figura 9.18. Teste da teoria da relatividade geral: um experimento utilizando a nave Cassini na sua rota em direção a Saturno confirmou as previsões da teoria geral da relatividade com uma precisão de vinte partes por milhão. Ele foi realizado em 2002, quando um sinal de rádio retornou à Terra proveniente da nave, que estava do lado oposto do Sol, a mais de um bilhão de quilômetros de distância. Concepção artística.

VERIFIQUE O QUE APRENDEU

Não escreva no livro!

7. Uma das diferenças entre a teoria da relatividade geral e a especial diz respeito às suas condições de validade.

a) A que tipo de restrição estava sujeita a teoria da relatividade especial de 1905 e que desapareceu na teoria da relatividade geral de 1915?

b) Qual foi o princípio usado por Einstein na relatividade geral que permitiu a inclusão de referenciais acelerados?

c) O que diferencia as duas teorias na maneira de conceber o espaço-tempo?

8. Critique a seguinte afirmação: "A teoria geral da relatividade só se aplica a objetos extremamente densos, como estrelas de nêutrons ou buracos negros, não valendo para massas como a da Terra, que obedece à lei da gravitação de Newton".

A teoria geral da relatividade, por englobar a Física newtoniana, também vale para a gravidade de massas como a da Terra.

9. Quando fazem manobras muito bruscas, os pilotos de caça usam uma vestimenta especial que comprime suas pernas, impedindo que o sangue flua para elas e provoque desmaios. Com essas vestimentas eles conseguem suportar acelerações da ordem de 9 "*g*"s. Comente o significado da última frase, sob o ponto de vista do princípio da equivalência.

10. Na teoria da relatividade especial vimos que uma pessoa que observa um relógio em movimento percebe um atraso quando compara com a marcação de seu próprio relógio. Na teoria da relatividade geral, além desse feito, o ritmo de avanço do tempo é influenciado pela gravidade. Como se comparam os ritmos de avanço do tempo de dois relógios em repouso, um no nível do mar e outro numa altitude elevada? (Lembre-se de que a aceleração da gravidade varia com a altitude.)

Quanto mais forte é o campo gravitacional, mais devagar um relógio anda. Assim, o menor ritmo de avanço de tempo acontece para um relógio que se encontra a uma altitude mais elevada.

7. a) A teoria de 1905 só vale para referenciais inerciais. Já a teoria de 1915 é geral, valendo também para referenciais acelerados.
b) O princípio da equivalência.
c) A relatividade geral trabalha com o espaço-tempo curvo.

9. Os efeitos da aceleração são equivalentes aos efeitos gravitacionais. Essa frase já contém a ideia do princípio de equivalência.

9.4 Problemas que levaram ao surgimento da Física quântica

No final do século XIX, surgiram vários resultados de experiências que os físicos da época, usando as teorias existentes, não conseguiam explicar, como a radiação emitida por um objeto negro, o efeito fotoelétrico e o espectro de linhas emitidas pelos gases incandescentes. Hoje sabemos que seria impossível solucionar esses problemas na época, pois somente a **Física quântica** pode resolvê-los. E essa teoria surgiu somente no início do século XX com o físico alemão Max Planck.

A Física quântica foi tomando forma aos poucos, sendo construída por vários cientistas. Seu surgimento foi diferente do surgimento da teoria da relatividade, que nasceu da tentativa de corrigir a Mecânica de Newton e torná-la compatível com o Eletromagnetismo de Maxwell, duas teorias que já eram descritas por formalismos matemáticos bem estabelecidos.

A Física quântica foi sendo revelada aos poucos. O primeiro fato com o qual os cientistas depararam foi o de algumas grandezas físicas, que até então só apresentavam valores contínuos, como a energia, passarem a apresentar valores discretos[1]. Isso motivou o nome Física quântica, pois a palavra *quantum*, que em latim significa "quantidade" e cujo plural é *quanta*, foi usada para designar as unidades discretas das grandezas que deixavam de se comportar como contínuas.

A carga elétrica também é uma grandeza quantizada, seu *quantum* de carga vale $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C. Outro exemplo de quantização é o da própria matéria, que já se sabia ser constituída de átomos. Se você partisse uma barra de alumínio ao meio, depois outra vez, ficando com a metade da metade e assim sucessivamente, não poderia continuar, em princípio, indefinidamente, pois depararia com um átomo de alumínio, que, se fosse partido, deixaria de ser a mesma substância.

A concepção teórica da Física quântica foi elaborada durante as primeiras décadas do século XX. Apresentaremos numa sequência histórica os problemas que marcaram o surgimento dessa nova teoria.

[1] No contexto da Física quântica, ou da Matemática, a palavra "discreto" é usada em oposição a "contínuo". Por exemplo, os números naturais constituem um conjunto discreto, enquanto os números reais formam um conjunto contínuo. Entre dois números naturais consecutivos não existe um terceiro número, mas entre dois números reais quaisquer existe uma infinidade de outros números reais.

Teoria do corpo negro

Desde a época medieval os ferreiros já sabiam que objetos quentes incandescem **(figura 9.19)**. Em 1792, Thomas Wedgwood observou que existia relação entre a temperatura e a cor da luz irradiada por objetos aquecidos, como um pedaço de ferro "em brasa". Para ele, a cor da luz emitida era dependente apenas da temperatura e não de outros parâmetros, como material, formato ou tamanho.

No século XIX, alguns cientistas, como os austríacos Josef Stefan (1835-1893), Ludwig Boltzmann (1844-1906) e o alemão Wilhelm Wien (1864-1928), haviam estudado experimentalmente o espectro eletromagnético emitido por um radiador térmico ideal, chamado de **corpo negro**. Do ponto de vista teórico, a explicação da emissão de radiação por um objeto numa dada temperatura deveria seguir, pela Termodinâmica, um esquema simples: quanto mais quente, maior seria a vibração de seus átomos.

Por outro lado, o Eletromagnetismo mostrava que cargas aceleradas irradiavam ondas eletromagnéticas. Um átomo sujeito a agitação térmica estaria sofrendo continuamente acelerações e, como os átomos possuem cargas elétricas, deveria irradiar. No entanto, os cálculos teóricos feitos por vários físicos da época utilizando essas ideias falhavam, e as curvas teóricas não reproduziam a curva experimental.

Planck foi um dos cientistas que tentaram solucionar o problema. Para simplificar, ele considerou que os átomos constituintes do objeto aquecido eram osciladores harmônicos, vibrando em torno de um ponto de equilíbrio estável. Os vários osciladores do objeto teriam suas energias distribuídas estatisticamente, de acordo com a temperatura. Mas Planck não conseguiu sucesso inicialmente, pois o espectro calculado divergia do experimental. Ele percebeu que, se a energia de cada oscilador só pudesse adquirir valores discretos, a curva teórica se comportaria conforme indicava o resultado experimental. Então ele ajustou o valor de uma constante h, que constava de sua expressão, para que a curva teórica coincidisse com o espectro experimental. Essa constante, chamada de **constante de Planck**, vale $h = 6{,}63 \cdot 10^{-34}\ \text{J} \cdot \text{s}$.

Sua solução do problema da radiação térmica mostrou que a energia dos osciladores era quantizada. O oscilador só poderia ser encontrado em determinados **níveis de energia** e, no caso específico de osciladores harmônicos, os níveis de energia são igualmente espaçados, separados de uma energia igual a hf, em que f é a frequência do oscilador.

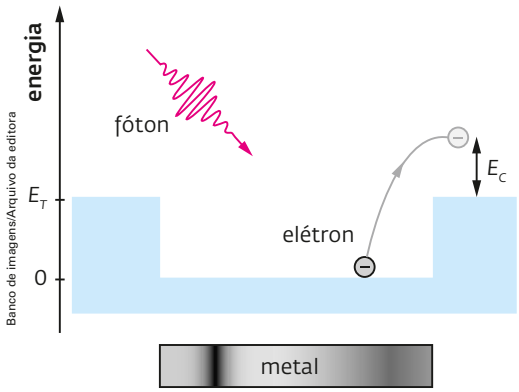
Planck, apesar de ter encontrado a solução do problema, relutou em publicá-la, temendo ser criticado por chegar a um resultado que divergia dos seus princípios fundamentados na Mecânica clássica. Contudo, seu resultado foi publicado em 1900 e marcou o nascimento da Física quântica. A ideia da quantização da energia viria a ser utilizada para resolver outros problemas da época, e a constante de Planck passaria a ser a marca da nova Física que estava surgindo.

Reprodução/http://<vignette2.wikia.nocookie.net/>



Figura 9.19. A figura representa um ferreiro forjando uma espada a cerca de 1100 K. Antes do século XV, quando as armas de fogo foram inventadas, a espada era a principal arma de combate dos samurais, dos cavaleiros medievais e dos beduínos.

Efeito fotoelétrico



Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 9.20. A luz arranca elétrons de um metal quando a energia de seus fótons, ***hf***, é maior que a função trabalho, E_T, que mantém os elétrons presos no metal. A escala vertical do gráfico representa a energia. Representação sem escala e em cores fantasia.

Outro problema experimental sem explicação era o **efeito fotoelétrico**, em que se arrancam elétrons de metais por meio da luz. Apesar de haver elétrons livres num metal, eles não conseguem "escapar" devido à grande atração exercida pelas cargas elétricas positivas dos núcleos atômicos. O resultado combinado de todas as forças envolvidas pode ser obtido supondo cada elétron preso numa barreira de energia potencial, como mostrado na **figura 9.20**.

Para arrancar um elétron de um metal, deve-se realizar um trabalho sobre ele, fornecendo uma quantidade de energia denominada função trabalho do metal, E_T. Se essa energia for de origem térmica, temos a chamada **emissão termiônica**. É por emissão termiônica, por exemplo, que elétrons saem de um filamento de tungstênio aquecido para formar a imagem no tubo de imagens de uma TV.

Aparentemente, não haveria problema na explicação do efeito fotoelétrico, em que os elétrons são arrancados pela luz, pois esta forneceria a energia necessária para arrancá-los. No entanto, observações experimentais mostravam que o ato de arrancar elétrons dependia da cor da luz utilizada e não de sua intensidade. E isso era problemático porque a teoria da onda eletromagnética mostrava que a intensidade dessa onda só dependia do quadrado das amplitudes dos campos elétrico e magnético. Assim, de acordo com o Eletromagnetismo de Maxwell, se jogássemos luz vermelha num metal e notássemos que os elétrons não estavam sendo arrancados, bastaria usar um feixe de luz vermelha mais intenso para arrancá-los. Mas isso não funcionava. Por outro lado, se passássemos a usar luz violeta, os elétrons poderiam ser arrancados, mesmo que a intensidade fosse baixa. Essa dependência da energia de um feixe de luz com sua frequência não aparece na teoria da onda eletromagnética de Maxwell.

Albert Einstein relacionou a necessidade de uma dependência da energia da luz com sua frequência. Somando isso à conclusão de Planck, de que a energia de um oscilador harmônico era quantizada em unidades de hf (ideia de um *quantum* de luz), Einstein lançou a hipótese de que uma luz monocromática de frequência f era constituída de unidades indivisíveis, os *quanta* de luz, posteriormente denominados **fótons**, cujas energias eram dadas pela equação $E = hf$. Assim, num artigo de março de 1905, conseguiu explicar a experiência do efeito fotoelétrico, três meses antes de publicar o artigo sobre a teoria da relatividade restrita.

No efeito fotoelétrico um feixe monocromático de luz de frequência f é direcionado a determinado metal. Se, individualmente, os fótons possuírem energia $E = hf$ maior que a função trabalho do metal E_T, ao colidirem contra os elétrons poderão fornecer a energia necessária para arrancá-los **(figura 9.20)**. Os elétrons arrancados adquirem uma energia cinética E_C. Pela conservação da energia podemos escrever:

$$hf = E_T + E_C$$

Uma hipótese por trás disso é a de que um elétron só consegue absorver um fóton de cada vez, num processo instantâneo.

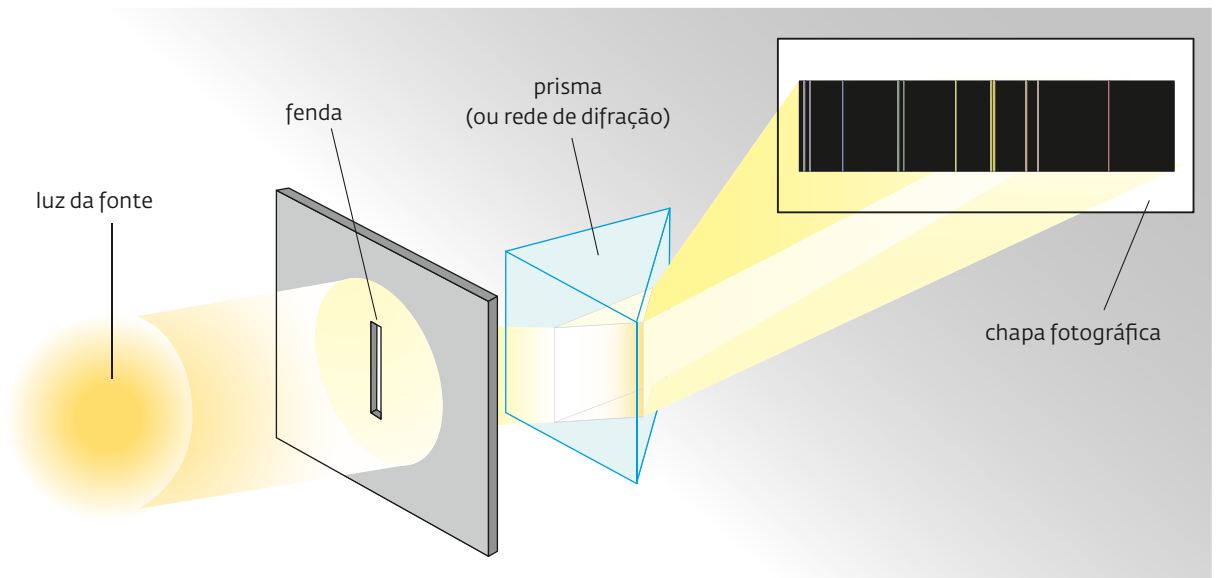
Hoje em dia, o efeito fotoelétrico está presente em nosso cotidiano. Com sensores fotoelétricos é possível acender ou desligar automaticamente a iluminação nas ruas e abrir e fechar portas. Além disso, esses sensores podem controlar o tamanho de peças em uma linha de produção e até auxiliar o diagnóstico de doenças em imagens médicas, pois durante um exame radiográfico os raios X que são emitidos por um aparelho interagem com o corpo humano através do efeito fotoelétrico, permitindo distinguir estruturas e tecidos com diferentes densidades.

Espectro de linhas

No início do século XIX, o cientista alemão Joseph von Fraunhofer (1787-1826) descobriu linhas escuras em posições específicas do espectro solar. Posteriormente, percebeu que um gás incandescente emite o mesmo tipo de linhas no espectro. Se estiver aquecido, ele emite luz e as linhas são brilhantes. Mas, se for atravessado por luz branca em baixa temperatura, ele absorve luz, produzindo linhas escuras de absorção.

Para um mesmo elemento químico, a posição das linhas de emissão ou absorção no espectro é a mesma. O mais importante é que cada elemento químico possui um conjunto de linhas no espectro que o caracterizam. É como se fosse a impressão digital desse elemento químico **(figura 9.21)**. Isso permite analisar a composição química dos gases de uma chama ou da atmosfera de uma estrela a milhões de anos-luz de distância. Esse ramo da ciência, com muita aplicação prática e enorme precisão nas medidas, é denominado Espectroscopia.

No caso dos átomos de hidrogênio, o suíço Johann Jakob Balmer (1825-1899) descobriu empiricamente, em 1885, uma expressão matemática capaz de dar a posição das linhas no espectro visível. Suas previsões coincidiam com os valores medidos para essas linhas, que possuíam na época uma precisão melhor que uma parte em mil. Em seguida, vários cientistas trabalharam buscando expressões empíricas similares, estendendo os resultados de Balmer a outras faixas do espectro e a outros elementos químicos. Johannes Rydberg (1854-1919) conseguiu sintetizar numa equação, dependente de números inteiros, esses resultados empíricos.



Antonio Robson/Arquivo da editora

Figura 9.21. A luz emitida por um gás incandescente é colimada por uma fenda e depois decomposta por um prisma ou rede de difração, mostrando as linhas de emissão do espectro que podem ser vistas na chapa fotográfica. O espectro apresentado na ilustração é do gás mercúrio. Representação sem escala e em cores fantasia.

No início do século XX, a questão era entender por que um átomo de um gás só emite luz em algumas poucas frequências do espectro, formando um conjunto discreto, e não contínuo, de linhas. Quem permitiu entender o espectro discreto da luz emitida pelos átomos foi Niels Bohr. Guiado pela ideia da quantização da energia descoberta por Planck e conhecendo a fórmula empírica de Rydberg, em 1913 Bohr conseguiu mostrar que a energia do elétron orbitando o núcleo do átomo de hidrogênio era quantizada. O elétron só poderia permanecer em níveis de energia dados por um número inteiro maior que zero, chamado número quântico n. Os valores da energia eram dados pela fórmula:

$$E_n = -\frac{1}{n^2} 2{,}18 \cdot 10^{-18}\ \text{J}, \text{ em que } n = 1, 2, 3,\ldots$$ [2]

Bohr lançou a hipótese de que, enquanto o elétron permanecesse nos níveis de energia do átomo, ele não irradiaria. Quando caísse de um nível de energia mais alto para um mais baixo, a energia liberada seria usada para criar um fóton, processo denominado **emissão espontânea**. A partir dos níveis de energia encontrados e usando a expressão para a energia do fóton, foi possível verificar que o espectro do hidrogênio seria constituído de linhas discretas, coincidindo com as medidas experimentais **(figura 9.22)**.

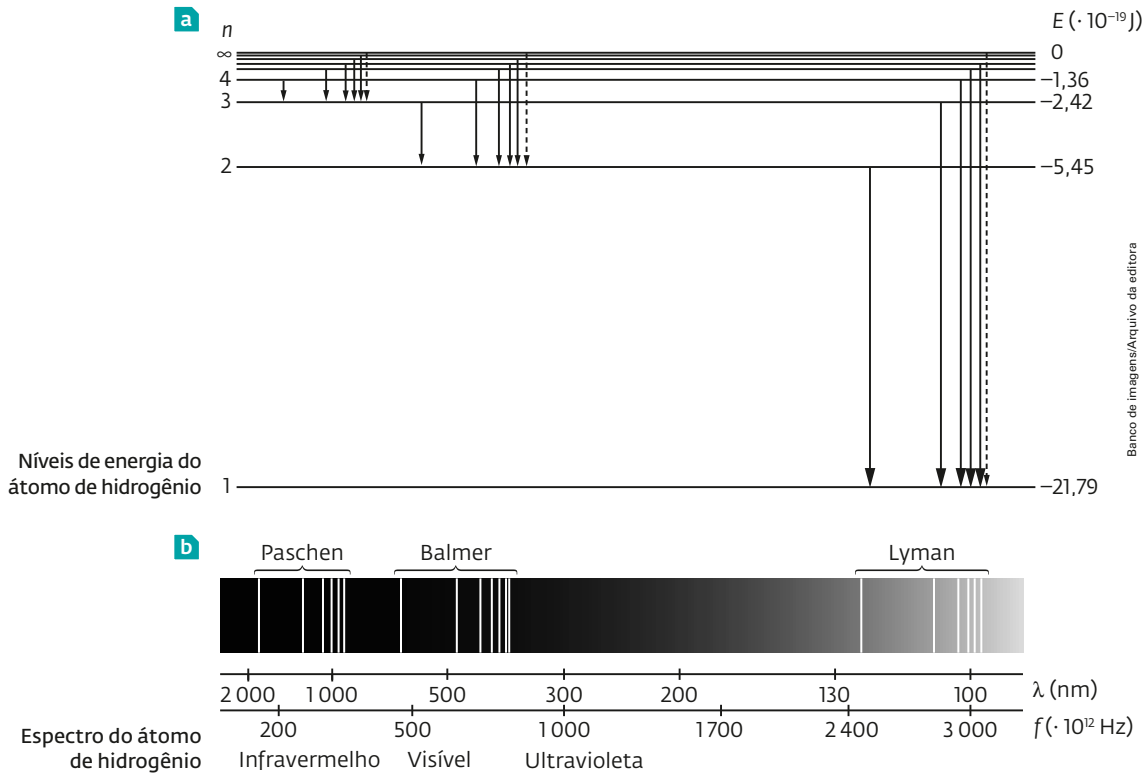


Figura 9.22. A figura **a** mostra os níveis de energia do átomo de hidrogênio. Os níveis estão indicados pelo número quântico ***n*** (variando de 1 a 4). Para os outros valores de ***n***, até ***n* = ∞**, temos uma infinidade de níveis cada vez mais juntos uns dos outros. As setas indicam algumas transições entre níveis mais excitados e níveis de menor energia. Note que foi utilizada uma escala em que as energias são negativas para um elétron ligado ao átomo. A energia é nula para n **= ∞** e uma energia maior que zero significa que o elétron foi arrancado do núcleo de hidrogênio. A figura **b** mostra o espectro do hidrogênio com três séries de linhas espectrais. A série de Balmer, que corresponde às transições para o nível ***n*** = 2, é a única que produz fótons na região do visível. Procure fazer uma correspondência entre determinada linha do espectro na figura **b** e a transição entre dois níveis de energia na figura **a**. As escalas de comprimento de onda ou de frequência não estão representadas de forma linear.

Além da emissão, existe o processo denominado **absorção**, em que um fóton, ao atingir um átomo, poderá ser absorvido, desde que sua energia coincida com a separação de energia entre o nível inicial do elétron e um segundo nível de energia mais alto. Caso o átomo não possua um segundo nível de energia cuja separação coincida com a energia do fóton, este não poderá ser absorvido.

[2] É comum a utilização do elétron-volt na equação para os níveis de energia. Nesse caso, a equação é escrita como: $E_n = -13{,}6\ \text{eV}/n^2$.

PRATIQUE FÍSICA

EM EQUIPE

Não escreva no livro!

ATENÇÃO!
Tome cuidado ao lidar com fogo ou objetos e substâncias quentes.

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

1. Construa um acelerômetro usando uma bolinha de isopor (ou uma rolha), linha de costura e um vidro com tampa cuja boca seja larga o suficiente para colocar a bolinha em seu interior. Prenda a linha na bolinha e faça um pêndulo colando a linha na parte interna da tampa do vidro. O pêndulo deve poder oscilar no interior do vidro tampado. Dessa maneira, carregando o pêndulo, se você acelerar para a frente, notará que ele vai para trás, como esperado. Agora encha o vidro totalmente com água e tampe-o, mantendo o pêndulo em seu interior.

Observação

Se você tiver um líquido transparente viscoso, como óleo mineral ou glicerina, para encher o vidro, o resultado será melhor.


Paulo César Pereira/ Arquivo da editora

Você acabou de construir um acelerômetro. Agora, movimente-se com o vidro de boca para baixo, a fim de manter o pêndulo livre em seu interior (veja a figura deste exercício). Note que nesse caso a bolinha de isopor aponta no sentido da aceleração. Explique o comportamento da bolinha do ponto de vista de um observador parado e do ponto de vista de quem está caminhando com o acelerômetro.

2. Consiga uma bola grande e um transferidor com escala em graus, para medir ângulos. Utilizando um barbante, construa alguns triângulos de diferentes tamanhos sobre a superfície da bola. Utilize fita adesiva para fixar os seus vértices de cada triângulo e para determinar os lados do triângulo. No espaço curvo da superfície da bola, meça os ângulos internos dos vários triângulos, calculando a soma desses ângulos. Verifique os valores dessa soma para triângulos bem pequenos e para triângulos maiores.

3. Corte tiras de papel com cerca de meio centímetro de largura e cole-as sobre a superfície de uma maçã ou outro fruto que possua uma concavidade próxima do talo. É conveniente que a cola usada não amoleça muito a tira de papel, deformando-a. Note o comportamento de tiras inicialmente paralelas, indo em direção à concavidade próxima ao talo. Associe suas observações com a abordagem de Einstein para a gravitação. Nessa abordagem, qual a analogia entre o talo, a concavidade e o traçado seguido pela tira de papel?

PROBLEMAS E TESTES

Não escreva no livro!

1. (**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." a

Física na Escola, v. 8, n. 2. 2007 (adaptado).

A decisão tomada pela companhia é equivocada, pois:

a) o material é incapaz de acumular radiação, não se tornando radioativo por ter sido irradiado.

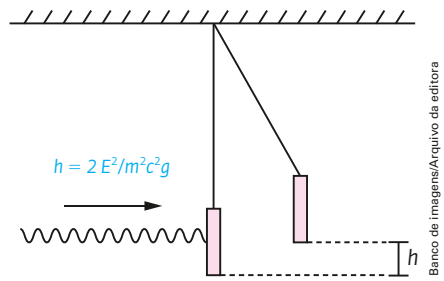
b) a utilização de uma embalagem é suficiente para bloquear a radiação emitida pelo material.

c) a contaminação radioativa do material não se prolifera da mesma forma que as infecções por micro-organismos.

d) o material irradiado emite radiação de intensidade abaixo daquela que ofereceria risco à saúde.

e) o intervalo de tempo após a esterilização é suficiente para que o material não emita mais radiação.

2. (**ITA-SP**) Um feixe de *laser* com energia E incide sobre um espelho de massa m dependurado por um fio. Sabendo que o *momentum* do feixe de luz *laser* é E/c, em que c é a velocidade da luz, calcule a que altura h o espelho subirá.



3. (**UFG-GO**) O efeito fotoelétrico, explorado em sensores, células fotoelétricas e outros detectores eletrônicos de luz, refere-se à capacidade da luz de retirar elétrons da superfície de um metal. Quanto a esse efeito, pode-se afirmar que: d

a) a energia dos elétrons ejetados depende da intensidade da luz incidente.

b) a energia dos elétrons ejetados é discreta, correspondendo aos *quanta* de energia.

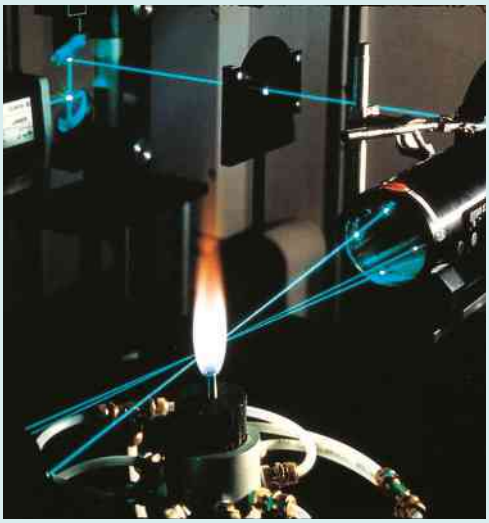
c) a função trabalho depende do número de elétrons ejetados.

d) a velocidade dos elétrons ejetados depende da cor da luz incidente.

e) o número de elétrons ejetados depende da cor da luz incidente.

APLICAÇÕES DA FÍSICA

Amplificação da luz por emissão estimulada de radiação – *Laser*



U.S. Dept. of Energy/SPL/Latinstock

Figura 9.23. Os feixes de raios *laser* mostrados na foto estão sendo usados para analisar a chama proveniente da queima de uma substância combustível. Esse estudo conduzirá à fabricação de motores de combustão mais eficientes e não tão poluentes como os atuais.



David Parker/SPL/Latinstock

Figura 9.24. Os raios *laser* são usados para cortar e soldar metais e, também, para cortar papel e tecidos.

O que é um raio *laser*

O *laser* é um tipo especial de radiação eletromagnética visível, cujas aplicações tecnológicas e científicas vêm crescendo dia a dia.

O termo *laser* é constituído pelas iniciais das seguintes palavras inglesas: *light amplification by stimulated emission of radiation*, que significam "amplificação da luz por emissão estimulada de radiação". Um feixe de raios *laser* distingue-se da luz comum por apresentar algumas características próprias, que analisaremos a seguir.

Um feixe de *laser* apresenta-se sempre com intensidade muito elevada, isto é, há grande concentração de energia em áreas muito pequenas (feixes muito finos). Por exemplo, um *laser* de potência baixa, em torno de alguns miliwatts, apresenta brilho considerável, muito superior ao da luz emitida por uma lâmpada de 60 watts. Além disso, esse intenso feixe é constituído de raios praticamente paralelos, que podem se propagar por distâncias muito grandes sem se dispersar (os raios se mantêm quase paralelos, com divergência muito baixa).

A luz do *laser* é monocromática, isto é, ela é constituída de radiações que apresentam uma única frequência, de valor bem determinado. Com a luz comum seria muito difícil obter esse grau de monocromaticidade, pois ela se apresenta como uma mistura de radiações de várias frequências **(figura 9.25)**.

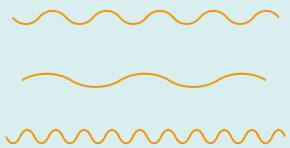


Figura 9.25. A luz comum é constituída por uma mistura de radiações de diversas frequências.

A luz de um feixe de *laser* é coerente, enquanto um feixe de luz comum é incoerente. Essa denominação indica que, na luz comum, as cristas e os vales das ondas luminosas se distribuem aleatoriamente uns em relação aos outros, isto é, estão defasadas entre si, como mostra a **figura 9.26**, e essa defasagem não permanece constante no decorrer do tempo.

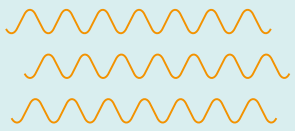


Figura 9.26. A luz comum, mesmo quando é monocromática, apresenta-se incoerente.

Por outro lado, as diversas radiações que constituem um feixe de *laser* estão rigorosamente em fase, havendo coincidência entre as cristas e, em consequência, entre os vales, como mostra a **figura 9.27**. Dizemos, então, que a luz do *laser* é coerente.

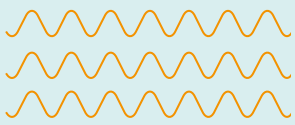
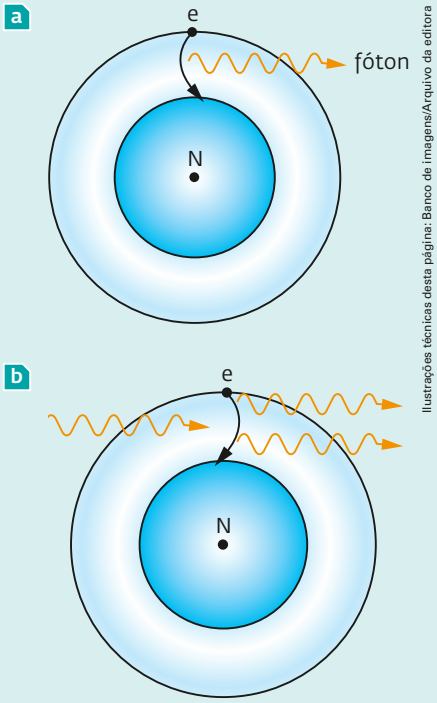


Figura 9.27. A luz do *laser* é coerente.

A expressão "emissão estimulada", que aparece no termo *laser*, indica uma maneira incomum pela qual um átomo emite radiação. Geralmente, essa emissão é feita por um processo denominado **emissão espontânea**, representada na **figura 9.28.a**: um elétron, que foi transferido para um nível de energia mais elevado em um átomo, tende naturalmente a voltar para um nível de energia mais baixo (mais estável). A energia perdida pelo elétron, nessa transição, é irradiada sob a forma de um pulso de luz, denominado **fóton**. Na **figura 9.28.b**, o elétron é **induzido** a sofrer a transição pela passagem de um fóton no interior do átomo. Como consequência dessa transição, há a emissão de um fóton exatamente em fase com o fóton incidente. Dizemos que essa é uma emissão estimulada de radiação na qual dois fótons em fase abandonam o átomo. Em uma substância que está emitindo um *laser*, esse processo ocorre com um número enorme de átomos, que foram previamente excitados. Por exemplo, mesmo em um *laser* de baixa potência temos a emissão de, no mínimo, 10^{15} fótons por segundo.



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

Figura 9.28. Em **a** o átomo emite espontaneamente um fóton. Em **b** temos a emissão estimulada de radiação (dois fótons em fase deixam o átomo). Representação sem escala e em cores fantasia.

Aplicações do *laser*

São inúmeras as aplicações dos raios *laser* em diversos setores da ciência, da tecnologia e de nosso cotidiano. Entre elas podemos citar:

- leitura do código universal de produtos, para conferir preços de mercadorias em supermercados **(figura 9.29)**;
- em telecomunicações, utilizando cabo de fibra óptica, para transportar sinais de TV e telefone;
- para soldar e cortar metais;
- para medir, com precisão, distâncias muito grandes, como a distância da Terra à Lua;
- para furar orifícios muito pequenos e bem definidos, em substâncias duras;
- em CDs, DVDs e nos *Blu-rays*, para o armazenamento digital de alta densidade de informações, músicas e vídeos, sem perdas ou ruídos;
- na holografia, para obtenção de fotografias tridimensionais de um objeto (hologramas);
- na Medicina, em cirurgias substituindo os bisturis, na endoscopia e para colar retinas descoladas.

As aplicações do *laser* vêm se tornando tão amplas e diversificadas que é praticamente impossível relacionar todas elas.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Figura 9.29. Este diagrama representa, por meio de um código de barras, o preço de uma mercadoria. Sua leitura é feita com um aparelho que emite raios *laser*.

Questões

1. Em todos os dispositivos que utilizam a luz *laser* de alguma forma, existe um aviso indicando que se deve tomar cuidado com os olhos ao manuseá-los.
a) Qual o motivo de existir tal aviso?
b) Atualmente, já é possível produzir *lasers* nas cores verde e azul. Por que esses *lasers* são mais perigosos para a visão que os vermelhos?

2. Existem três principais tecnologias de armazenamento de dados que utilizam raios *laser* para a leitura e gravação: CD-ROM, DVD-ROM e *Blu-ray*. Pesquise qual a diferença entre essas três tecnologias, explicando por que um DVD consegue armazenar sete vezes mais dados que um CD e um *Blu-ray* consegue armazenar cerca de cinco vezes mais dados que um DVD.

1. a) Um feixe de raio *laser* possui muito mais energia concentrada que um feixe de luz comum e, como a retina humana não é preparada para receber tamanha energia, pode sofrer algum dano.
b) A quantidade de energia que um feixe de *laser* carrega depende de sua frequência. ($E = hf$). Assim, os *lasers* nas cores verde e azul, por possuírem uma frequência maior, vão carregar mais energia também.
2. A diferença entre as tecnologias está no comprimento de onda do *laser* que cada uma utiliza.

O trabalho em equipe e o progresso da ciência

Ainda há quem enxergue a ciência como um conjunto de conhecimentos que decorre de ideias brilhantes e da genialidade de alguns. A história da ciência, entretanto, vem mostrando justamente o contrário: com frequência, avanços importantes acontecem a partir da integração de habilidades e conhecimentos de muitos **(figura 9.30)**.

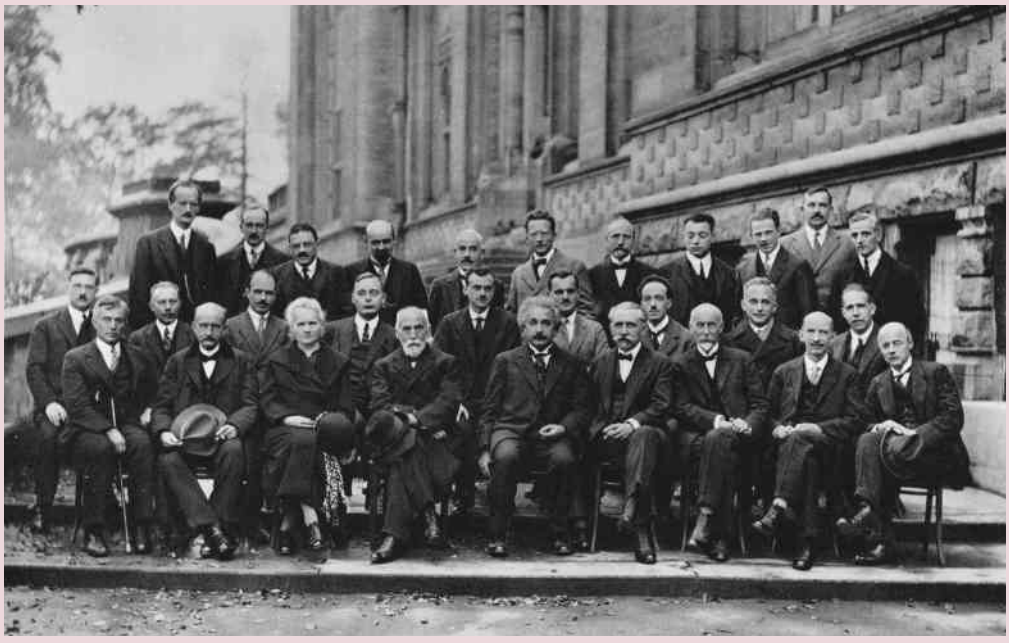
Procure saber como se deu o surgimento da lâmpada, por exemplo. Provavelmente você ficará convencido de que Edison, diferentemente do que diz a crença popular, não foi o inventor isolado da lâmpada. Ele contava com a ajuda de técnicos e especialistas e, antes dele, outras equipes de pesquisadores já haviam elaborado versões menos eficientes da lâmpada elétrica. O que ele e sua equipe fizeram foi aperfeiçoá-la, viabilizando seu uso e produção em larga escala.

O mesmo é verdade para a relatividade de Einstein. Ele não chegou às teorias que lhe deram fama de forma totalmente isolada. Ele estava ciente dos problemas que a Física enfrentava em sua época, bem como das opiniões de outros cientistas. A teoria da relatividade é fruto não apenas de sua capacidade lógica, mas também da capacidade de reunir, de uma maneira sintética e organizada, o que outros cientistas já afirmavam. Aliás, a ideia central do primeiro postulado da teoria da relatividade especial, que estudamos neste capítulo, já havia sido proposta séculos antes, de uma maneira um pouco menos abrangente, por Galileu. A contração do espaço, que neste capítulo chamamos de *contração de Lorentz*, recebeu esse nome porque já havia sido concebida pelo físico Hendrik Lorentz e também pelo físico George Fitzgerald, apesar de eles terem dado interpretações bem diferentes das de Einstein. As transformações de coordenadas entre referenciais, uma das ferramentas mais importantes dessa teoria, são feitas com o auxílio de equações que já haviam sido deduzidas por Lorentz. Além desses, Poincaré, Minkowski, Besso e muitos outros cientistas tiveram participação direta ou indireta no desenvolvimento da teoria da relatividade, tanto da especial como da geral.

No livro *Algumas razões para ser um cientista*, o físico inglês Michael Berry, ao fazer referência à comunidade de pesquisadores, comenta:

"Nós cooperamos simplesmente porque os modos de funcionamento da natureza ficam tão sutilmente ocultados que nenhum pesquisador ou pesquisadora individual pode descobri-los sozinho. Somos muito mais espertos em conjunto do que separadamente, portanto faz sentido cooperar [...]".

Atualmente, o trabalho em equipe vem sendo valorizado e integrado no dia a dia de indústrias e corporações. Grandes inovações comerciais, assim como descobertas científicas, raramente são obtidas por criações isoladas. A criatividade vem sendo encarada, na visão atual da psicologia e da educação, como um fenômeno social.



SSPL/Getty Images

Figura 9.30. Participantes da 5ª Conferência de 1927, no Instituto Internacional de Física Solvay, Bélgica.

A comunicação multidisciplinar

Além do trabalho em equipe, a comunicação entre disciplinas vem se destacando como habilidade importante para a pesquisa em Ciências, principalmente quando o trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de tecnologias ou a solução de problemas complexos. A relação entre a Física, a Química, a Biologia e outras ciências afins proporciona uma visão mais ampla do assunto, ajudando cada membro da equipe a expor sua opinião com mais clareza. É bem provável que a solução para problemas contemporâneos, como a fome, a poluição ou a pobreza, surja da cooperação de pesquisadores que saibam transmitir sua opinião técnica para profissionais de outras áreas. Essa comunicação interdisciplinar facilita a cooperação e ajuda a equipe a chegar a soluções às quais, isoladamente, nenhum de seus membros chegaria **(figura 9.31)**.

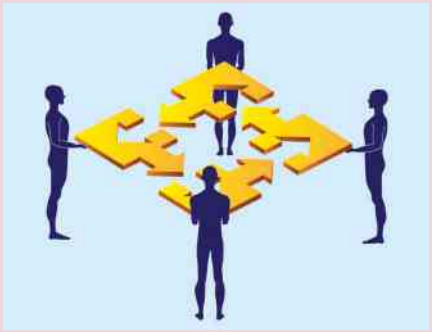


Figura 9.31. A multidisciplinaridade contribui para o entendimento e a solução de problemas complexos.

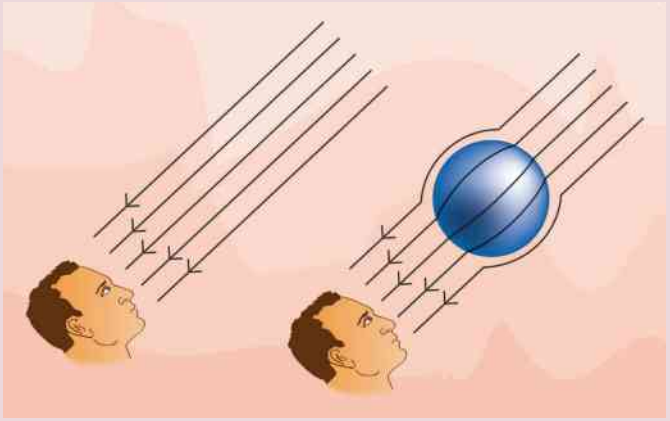
O futuro da ciência

É verdade que a ciência já conseguiu muito e que, às vezes, seus produtos e processos parecem ter saído de um filme de ficção. Contudo, exatamente por já ter alcançado tanto, o próximo passo se torna cada vez mais difícil. Assim, a dependência do trabalho em equipe e da comunicação multidisciplinar será cada vez maior. Se é notável o que já se conseguiu, é ainda mais surpreendente o que está por vir. As pesquisas modernas não pararam nos tópicos apresentados neste capítulo.

Existe uma equipe de cientistas na Universidade de Harvard, nos Estados Unidos, por exemplo, que estuda o quão pequena uma gota de água pode chegar a ser e qual a relação de seu formato com as características da superfície na qual ela se apoia. Outra equipe da Universidade de Chicago, usando sensores e supercâmeras, mediu o tempo e a velocidade de deformação de uma folha de papel por um bloco pesado colocado sobre ela. Por mais espantoso que possa parecer, o papel pode ser comprimido por semanas antes de atingir uma espessura final.

Outras tecnologias modernas já em uso, como a levitação magnética, continuam a ser desenvolvidas e aprimoradas por equipes de pesquisadores em todo o mundo. A levitação magnética, no ambiente de laboratório, já é feita inclusive com seres vivos. Sapos e rãs flutuaram no ar pela força magnética invisível que contrabalanceava o peso desses anfíbios. O último feito da levitação magnética foi o de suspender no ar um lutador de sumô de mais de cem quilos. Mas, para quem acha a levitação surpreendente, é igualmente espantoso que a invisibilidade, graças ao desenvolvimento dos *metamateriais*, se torne viável em um futuro não muito distante. Esse tipo de material, por possuir índice de refração negativo, direciona a trajetória da luz de tal modo que ela seria capaz de contornar o objeto e sair do outro lado, na mesma direção para a qual ela teria se dirigido caso o objeto não estivesse lá **(figura 9.32)**. Assim, um observador na frente de um objeto poderia ver tudo o que estivesse atrás dele, fazendo com que o objeto em si desaparecesse.

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



Ilustrações: Tânia Ricci/Arquivo da editora

Figura 9.32. O metamaterial faz com que a luz contorne o objeto (direita) e chegue aos olhos do observador como se o objeto não estivesse presente (esquerda).

1. Veja resposta no Manual do Professor.
2. Os cientistas não concebem explicações científicas para fenômenos naturais a partir do "zero" e individualmente. Suas ideias surgem do estudo de teorias e pesquisas anteriores.

Pesquise e responda

1. A afirmação "A pilha foi inventada por Alessandro Volta" pode passar a ideia de que ela foi concebida única e exclusivamente por esse pesquisador, sem cooperação com outros pesquisadores e sem que ele tivesse utilizado resultados de pesquisas anteriores. Com base no texto e em uma pesquisa na internet, redija um parágrafo que expresse a participação de Volta na concepção da pilha elétrica.
2. Relacione a frase de Newton "Se pude enxergar mais longe do que outros, foi porque me apoiei nos ombros de gigantes" com as ideias apresentadas no texto.

INFOGRÁFICO

Veja as respostas no Manual do Professor.

O infográfico desta unidade apresenta as principais informações sobre o destino do rejeito radioativo das usinas nucleares brasileiras. Antes de responder às questões, faça a leitura deste infográfico observando como os textos e as imagens se relacionam e permitem a compreensão das informações referentes à reciclagem e ao armazenamento do rejeito radioativo.

1. De que maneira os rejeitos radioativos são classificados?
2. Quais tipos de rejeito nuclear podem ser reciclados e quais não podem?
3. Qual é a função da piscina em uma usina nuclear?
4. Qual é o destino dos rejeitos de média atividade (RMA)?
5. Qual é a técnica mais utilizada para a reciclagem do urânio e quais são os subprodutos desse processo?
6. O que é MOX e qual é sua utilidade?
7. Como o combustível atômico reciclado é transportado?

DESTINO DO REJEITO RADIOATIVO DAS USINAS BRASILEIRAS

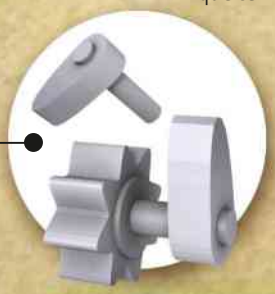
A disposição dos rejeitos varia de acordo com a atividade e com o tempo de meia-vida.



CILINDROS COM URÂNIO
No reator das usinas nucleares existem pastilhas de urânio enriquecido. A cada ano, um terço desse combustível precisa ser trocado. Esse material é o rejeito de alta atividade (RAA), que tem alto risco de contaminação.



Equipamentos da usina que têm contato direto com o RAA são contaminados e se tornam rejeitos de média atividade (RMA). Esse rejeito é concretado dentro de barris metálicos.





O que tem contato indireto com o RAA, como as roupas de proteção, pode ter um nível de contaminação baixo. Esse resíduo de baixa atividade (RBA) pode ser lavado para reúso, mas depois de algumas lavagens também vai para os barris.

Paulo Manzi/Arquivo da editora

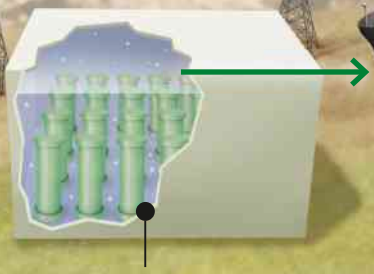
RECICLAGEM RADIOATIVA

Veja como o combustível nuclear pode ser reprocessado para reaproveitar o rejeito inicial dos reatores.



DE VOLTA PARA CASA

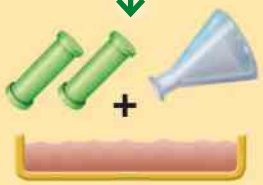
Só há três unidades capazes de reciclar combustível radioativo no mundo. Após a reciclagem, o material reciclado e o material radioativo são devolvidos ao país de origem. Por motivo de segurança, o transporte é feito em navios parecidos com petroleiros, com forte esquema de segurança.

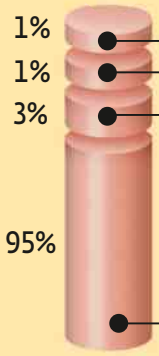


O RAA não serve de combustível, mas será fonte de radiação e calor por séculos. Por isso, é guardado dentro da própria usina, em uma piscina especial, feita para resfriá-lo e conter a radiação. Quando as usinas de Angra forem desativadas, esse material irá para um depósito geológico.

TUDO SE APROVEITA

O urânio usado no reator pode ser reciclado com algumas tecnologias. A mais usada é a que o mistura com ácido nítrico, numa reação que fornece três produtos: urânio, plutônio e rejeitos radioativos.





PLUTÔNIO

O plutônio obtido na reciclagem na forma de óxido pode ser misturado com urânio para formar o MOX, um tipo de combustível nuclear que pode ser usado nas usinas movidas a urânio.

SEGUNDA MÃO

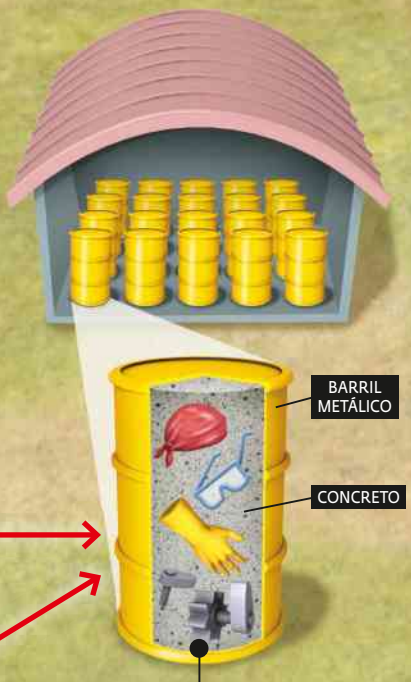
Apenas 1% do produto da reação é o isótopo de urânio pronto para ser reaproveitado.

LIXO SEM REMÉDIO

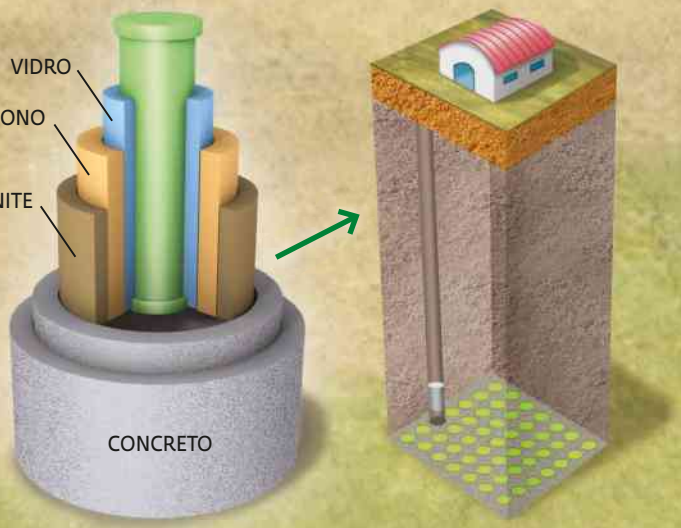
Cerca de 3% do produto da reciclagem é o rejeito inútil e altamente radioativo. Esse é solidificado em uma mistura com vidro especial e colocado em cilindros de aço para armazenagem em depósitos geológicos especiais.

URÂNIO NÃO ENRIQUECIDO

O principal produto da reciclagem é o urânio, que precisa ser enriquecido para ser reutilizado.



Selados, os barris são guardados na usina e depois levados para um dos quatro depósitos intermediários de Itaorna, a 2 km da usina. Eles são vedados com concreto e resinas isolantes para garantir nível zero de radiação mesmo no pátio externo do depósito.



Por fim, os rejeitos radioativos seguem para depósitos geológicos de longa duração, que podem armazenar também o lixo vitrificado produzido no reprocessamento de combustível (ver quadro Reciclagem radioativa).

Fonte de dados: Tarso Araújo. MUNDO ESTRANHO. *Onde é guardado o lixo nuclear das usinas brasileiras*. Disponível em: <http://mundoestranho.abril.com.br/materia/onde-e-guardado-o-lixo-nuclear-das-usinas-brasileiras>. Acesso em: 23 mar. 2016.

Respostas

Capítulo 1
Carga elétrica

Verifique o que aprendeu

1. Quando dois corpos, feitos de uma mesma substância, são atritados, não há transferência de elétrons de um para o outro; logo, eles não se eletrizam.

2. **a)** sim
b) positiva
c) a borracha
d) a lã

3. igual

4. **a)** O algodão ficará eletrizado positivamente e o papel ficará eletrizado negativamente.
b) o algodão

5. **a)** Repelir.
b) Atrair.

6. A barra perde sua carga para a terra através do corpo da pessoa.

7. **a)** Sim; os pneus (isolantes) impedem que o ônibus perca sua carga para a terra.
b) Porque o ônibus perde sua carga para a terra através do corpo da pessoa e isso provoca o "choque elétrico".
c) Porque nosso clima é geralmente úmido e o ônibus não chega a adquirir carga elétrica apreciável.

9. **a)** não
b) Há alinhamento das moléculas de maneira semelhante à figura 1.18.b, porém com as cargas orientadas de maneira inversa.
c) positiva em *A* e negativa em *B*
d) polarização do dielétrico

10. **a)** Os elétrons do corpo metálico se deslocarão para a terra, através do fio condutor.
b) Sim; positiva.

11. **a)** carga positiva na extremidade mais próxima de *B* e carga negativa na extremidade mais afastada
b) A extremidade mais próxima de *B* seria atraída e a mais afastada, repelida.
c) Sim, porque a força de atração é maior do que a de repulsão.
d) A carga positiva de *C* seria neutralizada por parte da carga de *B*; então *C* seria repelido por *B*, pois ambos estariam, agora, com carga negativa.

12. **a)** Não, porque ela também seria atraída se estivesse neutra.
b) sim

13. **a)** positiva na esfera e negativa nas folhas
b) sim
c) Os elétrons do indutor seriam transferidos para a esfera, neutralizando sua carga positiva.
d) negativa

14. **a)** Negativa, porque o indutor repele elétrons para as folhas.
b) Diminuiria, porque o indutor atrairia elétrons livres para a esfera e a carga nas folhas reduziria.

15. **a)** para a direita e igual a 0,86 N
b) para a esquerda e igual a 0,86 N

16. **a)** multiplicado por 5
b) 4,3 N

17. **a)** Ficará 25 vezes menor.
b) Ficará 4 vezes maior.

18. **a)** Ficará 43 vezes menor.
b) $2 \cdot 10^{-2}$ N

Problemas e testes

1. e

2. negativo

3. **a)** Elétrons livres se deslocam para as extremidades dos blocos *A* e *C*, próximo dos bastões.
b) *A* negativo, *B* positivo e *C* negativo.

4. Em virtude do atrito com o ar e da gasolina com as paredes do tanque, o caminhão pode adquirir uma carga elétrica durante o percurso até o posto. Essa carga, atingindo certo valor, poderia dar origem a uma centelha elétrica, o que teria consequências desastrosas.

5. c

6. **a)** 3 vezes maior
b) Diminuiu 9 vezes.
c) $3{,}0 \cdot 10^{-4}$ N

7. d

8. 02 + 04 + 08 = 14

9. e

10. a

11. b

12. d

Capítulo 2
Campo elétrico

Verifique o que aprendeu

1. a) Porque atuará uma força elétrica em q.
b) Q
c) carga de prova
d) sim

2. a) $4{,}0 \cdot 10^5$ N/C
b) vertical para baixo

3. a) negativo
b) 4,0 μC

4. a) $4{,}5 \cdot 10^5$ N/C
b) 2 vezes maior
c) $9{,}0 \cdot 10^5$ N/C

5. a) 3 vezes maior
b) 9 vezes menor
c) $1{,}0 \cdot 10^5$ N/C

6. a) 80 vezes menor
b) $1{,}1 \cdot 10^4$ N/C

7. a) para a direita
b) $7{,}2 \cdot 10^5$ N/C

8. a) para a direita
b) $7{,}2 \cdot 10^5$ N/C
c) $1{,}44 \cdot 10^6$ N/C

9. a) negativo
b) 2 vezes menor
c) 4 vezes maior
d) $6{,}0 \cdot 10^4$ N/C

10. $8{,}0 \cdot 10^3$ N/C

11. $E = E_0/8$

12. $Q_2 = 4Q_1$

14. a) Não, pois essa expressão só é válida para calcular o campo criado por uma carga puntual.
b) Sim, essa relação é válida em qualquer situação.

15. a) da placa positiva para a negativa
b) Igual, porque o módulo da carga do próton é igual ao do elétron.
c) Permaneceria constante.
d) retilíneo uniformemente acelerado

16. a) O feixe A é constituído de elétrons; o feixe B, de nêutrons; e o feixe C, de prótons.
b) Porque o elétron, tendo menor massa, adquire maior aceleração ao penetrar no campo.

17. a) Eletriza-se positivamente.
b) Não, porque não há carga elétrica na superfície interna do recipiente.

18. a) Porque A se eletriza em contato com a superfície externa da gaiola.
b) Por causa da blindagem eletrostática produzida pela gaiola, no seu interior.

19. Deveria ter envolvido P com a cúpula metálica.

20. Não, porque a borracha é isolante.

21. a) A mica possui rigidez dielétrica elevada.
b) Não, pois ao ser submetido ao campo elétrico citado, o pirex se torna condutor e não poderia ser usado como isolante.

22. a) A rigidez dielétrica do ar diminui quando aumenta a umidade do ar.
b) É maior do que a do ar.

23. a) Pela ponta A, porque o campo elétrico é mais intenso próximo à ponta mais aguda.
b) Maior, porque a esfera não possui pontas, e para que a rigidez dielétrica do ar em torno dela seja atingida, será necessário fornecer à esfera uma carga maior.

24. Apenas a pessoa a 80 m da torre, porque a ação protetora de um para-raios se estende a uma distância aproximadamente igual ao dobro de sua altura.

25. a) Quando é aplicado a ele um campo elétrico suficiente para tornar livres alguns elétrons dos átomos de sua estrutura.
b) É o maior valor do campo elétrico que pode ser aplicado ao isolante sem que ele se torne um condutor.

26. a) Escoa para o ar.
b) É superior à rigidez dielétrica do ar.

Problemas e testes

1. ponto D

2. c

3. a) zero
b) zero
c) $4{,}5 \cdot 10^5$ N/C
d) $2{,}0 \cdot 10^5$ N/C

4. **a)** negativo
b) $4 \cdot 10^5$ C

5. 3,3 μC

6. **a)** em *A*, carga negativa e, em *B*, carga positiva
b) maior
c) $\vec{F}_A$ para a esquerda e $\vec{F}_B$ para a direita
d) Tenderá a se deslocar para a esquerda.

7. **a)** $E = 9{,}0 \cdot 10^5$ N/C, horizontal para a esquerda.
b) O vetor campo elétrico resultante no seu interior é nulo.

8. c

9. **a)** $t' = \sqrt{\frac{8H}{g}}$
b) $t_T = \sqrt{\frac{18H}{g}}$
c) igual a *t'*
d) $D = 8\,\frac{qEH}{mg}$

Capítulo 3
Potencial elétrico

Verifique o que aprendeu

1. **a)** 220 volts
b) 5,0 C

2. **a)** igual
b) $-1{,}5 \cdot 10^{-3}$ J
c) zero

3. **a)** para *A*
b) Menor, porque uma carga positiva tende sempre a se deslocar para regiões onde o potencial é menor.

4. **a)** perpendicular às placas e dirigido de *M* para *N*
b) $6{,}0 \cdot 10^3$ N/C

5. **a)** 750 V
b) zero
c) 750 V

6. **a)** sim
b) a intensidade do campo

7. **a)** 50 V/mm
b) $5{,}0 \cdot 10^4$ V/m $= 5{,}0 \cdot 10^4$ N/C

8. **a)** 2 vezes menor
b) 3 vezes menor

9. **a)** $V_A = -18 \cdot 10^4$ V
b) $V_B = -6{,}0 \cdot 10^4$ V
c) $V_{BA} = 12 \cdot 10^4$ V

10. **a)** $V_1 = 9{,}0 \cdot 10^5$ V
b) $V_2 = -3{,}0 \cdot 10^5$ V
c) $V = 6{,}0 \cdot 10^5$ V

11. **a)** zero
b) diferente de zero
c) nula

12. **a)** $V_C = 4{,}5 \cdot 10^4$ V
b) $V_P = V_{P'} = 4{,}5 \cdot 10^4$ V

13. **a)** de S_1 para S_2
b) linhas perpendiculares a S_1 e S_2 e dirigidas de S_1 para S_2
c) $V_{AB} = 0$ e $V_{AC} = 200$ V

14. **a)** $V_B = 800$ V
b) $V_C = 800$ V
c) $\mathcal{T}_{AB} = 0$

15. $V_{AB} = 5 \cdot 10^7$ V (50 milhões de volts)

16. **a)** igual
b) menor

17. **a)** $2 \cdot 10^{-3}$ C
b) não

18. 40 s

19. 500 W

Problemas e testes

1. **a)** 01; 04; 08 e 16

2. $Q_1 = 1$ μC e $Q_2 = 2$ μC

3. e

4. Todas estão corretas.

5. a; e.

6. $E = 0$ nessa região

7. **a)** $V_A = 5{,}4 \cdot 10^5$ V
b) $V_B = 3{,}6 \cdot 10^5$ V
c) $V_{AB} = 1{,}8 \cdot 10^5$ V

8. **a)** Aumentará.
b) 1,2 mm

9. b

10. a

11. As cargas positivas em vértices opostos e as cargas negativas também (por exemplo, cargas positivas em *A* e *C* e negativas em *B* e *D*).

12. a) $2{,}4 \cdot 10^6$ J

b) 12 km

13. e

Capítulo 4
Corrente elétrica

Verifique o que aprendeu

1. a) para a direita

b) para a esquerda

2. a) $\Delta Q = 32$ C

b) $i = 3{,}2$ A

3. a) 240 C

b) $1{,}5 \cdot 10^{21}$ elétrons

4. a) 4 pilhas

b) de maneira semelhante à da figura **4.11.a**

5. a) não

b) $V_{AB} = 3{,}0$ V

6. a) $V_{BC} = 0$; $V_{DE} = 0$ e $V_{FG} = 0$

b) Aumenta 6 V.

c) Diminui 6 V.

7. a) $V_{AE} = 12$ V

b) $V_{AH} = 12$ V

8. a) $V_{BA} = -12$ V

b) $V_A = 22$ V

c) $V_A = 12$ V

9. a) de *A* para *B*

b) de *C* para *D*

c) do polo negativo para o positivo

10. a) 1,2 A

b) 1,2 A

c) 1,2 A

11. a) 3,0 Ω

b) 0,50 A

c) 4,5 V

12. a) *AB*, *CD* e *EF*.

b) *BC* e *DE*

c) $V_{AB} = V_{CD} = V_{EF} = 0$

13. a) 0,30 A em ambas

b) $V_{BC} = 4{,}5$ V; $V_{DE} = 7{,}5$ V

c) $V_{AD} = 4{,}5$ V; $V_{AF} = 12$ V

14. a) 4 vezes menor

b) 8,0 A

15. a) o cobre

b) a prata

16. a) sim

b) 40 Ω

17. a) Também duplica.

b) Não se altera.

c) 80 V

18. a) não

b) 100 Ω

c) 75 Ω

19. Com a pele seca: 1,2 mA; com a pele molhada: 120 mA; ou seja, há risco de morte se uma pessoa tocar uma rede elétrica com a pele molhada.

20. a) igual

b) maior

c) 12 V

21. a) 6 V em ambas

b) menor

22. a) As três lâmpadas se apagam.

b) As três lâmpadas se apagam.

c) As três lâmpadas se apagam.

23. a) Apenas L_1 se apaga.

b) Apenas L_2 se apaga.

c) As três lâmpadas se apagam.

24. a) 6,0 Ω

b) 2,0 A em cada uma

c) 4,0 A

25. a) 0,50 A

b) Diminuirá.

c) 1,0 A

d) 60 lâmpadas

26. a) 2,0 Ω

b) 5,0 Ω

c) 0,30 A

27. a) Perdem.

b) para o motor da bomba

c) 300 W

d) $1{,}8 \cdot 10^5$ J

28. a) Diminui.
b) Aumenta.
c) não
d) sim

29. 4,0 Ω

30. a) Aumentada.
b) Diminuir.
c) Aumentando.

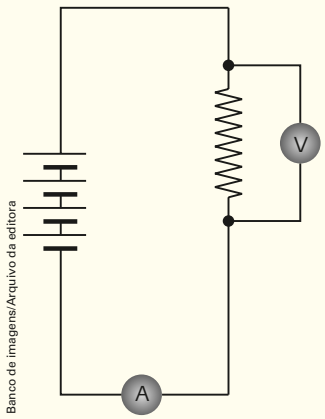
31. a) $R = 11\ \Omega$
b) $\Delta E = 44$ kWh

32. a) igual
b) Em R_1

33. a) Em paralelo com a pilha, entre *A* e *B*.
b) Em paralelo com a associação, entre *A* e *D*.
c) O amperímetro colocado em *G* medirá tanto a corrente que passa em R_1 quanto em R_2.
d) em *E* ou em *F*
e) Em *A*, *M* ou *N*.

34. b) $R = 15\ \Omega$

35. a) Amperímetro.
b) Voltímetro.
c) Veja a figura.



Banco de imagens/Arquivo da editora

36. 5,0 Ω

37. a) zero
b) material supercondutor

38. a) Há perdas, por efeito Joule, na rede de transmissão.
b) praticamente 700 000 kW
c) Manter os cabos abaixo de sua temperatura de transição (temperaturas muito baixas).

39. Será praticamente zero, porque a resistência do voltímetro é muito grande.

40. a) igual
b) menor
c) Em R_2.

PROBLEMAS E TESTES

1. a) 0,60 A
b) 0,40 A
c) 0,30 A

2. de cobre

3. c

4. a) 1,5 A
b) Aproximadamente 147 Ω

5. b

6. a) 0,90 V em R_1; 0,60 V em R_2 e R_3.
b) 0,30 A em R_1; 0,20 A em R_2; 0,10 A em R_3.

7. a) 4,0 Ω
b) 6,0 A
c) $i_1 = 4{,}0$ A; $i_2 = i_3 = i_4 = i_5 = 2{,}0$ A

8. b, d

9. Posição (1). Pois a resistência inferior fica ligada em paralelo com a superior. Assim, temos uma diminuição na resistência total do chuveiro e isto acarreta um aumento de sua potência.

10. c

11. a) 60 W
b) 5 W
c) 55 W

12. a) $V_1 = 110$ V; $V_2 = 0$
b) na de 100 W
c) Diminui; aumenta.

13. d

14. e

15. a

16. c

Capítulo 5
Força eletromotriz – Equação do circuito

Verifique o que aprendeu

1. a) no sentido *ABCD*
b) Ganham.
c) Perdem.

2. **a)** energia mecânica

b) Energia elétrica se transforma em energia química.

3. **a)** 15 J

b) 12 J

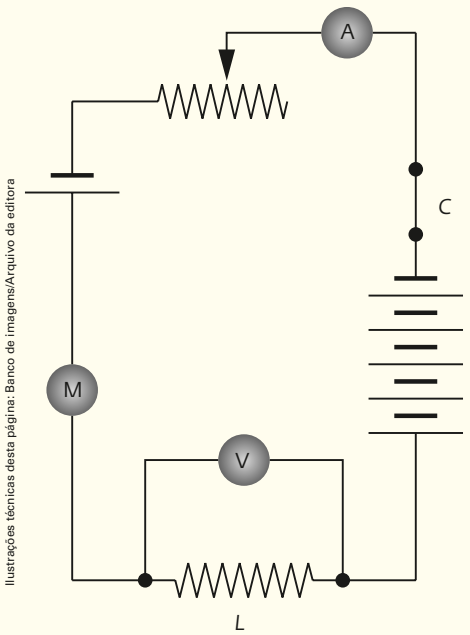
c) 3 J

4. **a)** 75 W

b) 60 W

c) 15 W

5. Veja a figura.



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

6. Geradores: pilha e bateria; resistências: chuveiro e ferro de passar; receptores: liquidificador e ventilador.

7. **a)** Os portadores de carga elétrica da corrente do circuito.

b) O gerador de eletricidade.

8. **a)** 30 W

b) 5,0 W

c) 25 W

9. **a)** 4,0 Ω

b) 2,4 A

c) 9,6 V

d) $i_1 = 1{,}2\ A$; $i_2 = 0{,}80\ A$; $i_3 = 0{,}40\ A$

10. **a)** 0,5 A

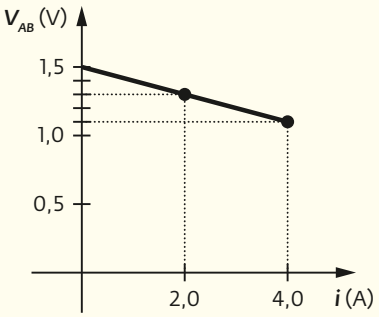
b) $V_1 = 3{,}5\ V$; $V_2 = 4{,}5\ V$

11. **a)** 1,5 V

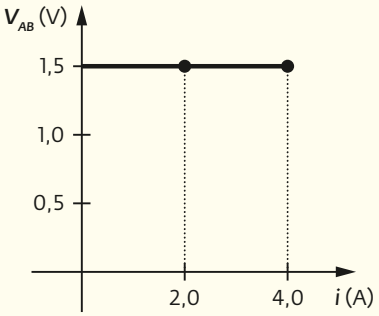
b) 1,3 V

c) 1,1 V

12. **a)** Veja a figura.



b) Veja a figura.



13. **a)** Não se alterou.

b) Aumentou.

c) Diminuiu.

d) Diminuiu.

14. **a)** $\varepsilon = 4{,}5\ V$

b) $r = 0{,}2\ \Omega$

PROBLEMAS E TESTES

1. **a)** $P = 0{,}30\ W$

b) $T = 5{,}4 \cdot 10^3\ J$

2. **a)** igual

b) igual

c) a pilha grande

3. Amperímetro: 0,60 A; voltímetro: 5,7 V.

4. Todas estão corretas.

5. b

6. **a)** Não se altera.

b) Não se altera.

c) Aumenta.

7. e

8. 50 A

Capítulo 6
O campo magnético

Verifique o que aprendeu

1. **a)** *M*
b) *A* é o polo norte e *B* é o sul.

2. polo sul

3. *A*: norte; *C*: sul; *D*: norte; *E*: sul; *F*: norte; *B*: sul.

4. **a)** Atraído
b) polo sul magnético

5. Aproximadamente 90°

6. A agulha deveria estar orientada perpendicularmente ao fio e não paralelamente a ele, como mostra a figura.

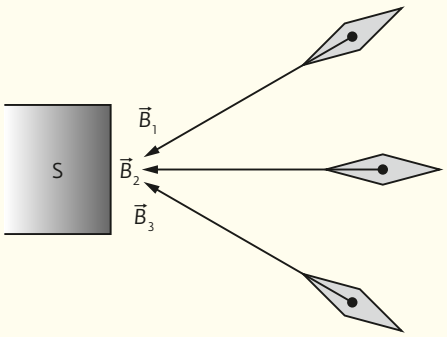
7. Não, pois a corrente no fio fará a agulha se desviar da direção norte-sul.

8. Verificando se a agulha se desvia ao ser aproximada da região da parede onde está o fio.

9. **a)** Existirá apenas a força eletrostática.
b) Existirá apenas a força eletrostática.
c) Existirá uma força eletrostática e uma força magnética.

10. Entrando, porque o norte geográfico é um polo sul magnético.

11. Veja a figura.



12. vetor orientado de *P* para *D*

13. **a)** $\theta = 0°$ ou $\theta = 180°$
b) $\theta = 90°$

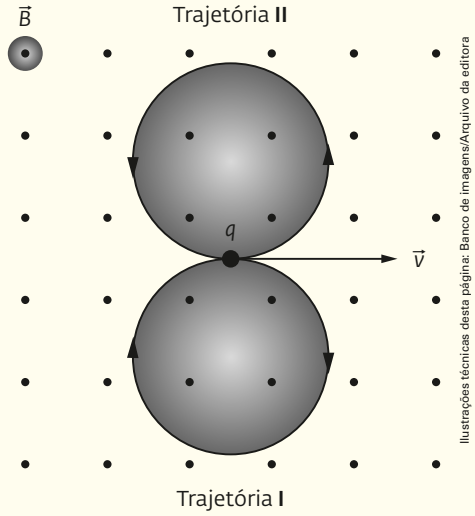
14. **a)** $F = 0$
b) $F = 1{,}5 \cdot 10^{-3}$ N
c) $F = 3{,}0 \cdot 10^{-3}$ N
d) $F = 0$

15. **a)** O primeiro é gerado por cargas elétricas, enquanto o segundo é gerado por cargas elétricas em movimento.
b) As primeiras podem ser abertas; as segundas são sempre fechadas.

16. **a)** perpendicular a $\vec{v}$, para a esquerda
b) perpendicular a $\vec{B}$, para baixo
c) perpendicular a $\vec{v}$, para a esquerda

17. Veja a trajetória **I** na figura abaixo.

18. Veja a trajetória **II** na figura abaixo.



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

19. **a)** $R' = 2R$; $T' = T$
b) $R' = \frac{R}{2}$; $T' = \frac{T}{2}$

20. **a)** $F = 0$
b) $F = 0{,}15$ N, dirigida para o lado de cima da folha de papel.

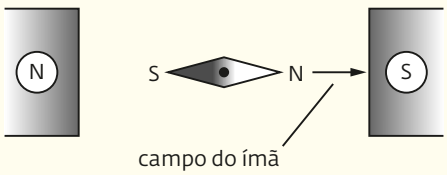
21. **a)** O sentido de rotação será invertido.
b) O sentido de rotação será invertido.
c) O sentido de rotação não se modificará.

22. **a)** Em *GE* a força está saindo da folha; em *ED* a força é nula; em *DC* a força está penetrando na folha.
b) Tende a girar em torno do eixo.

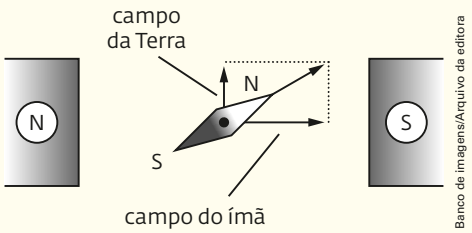
23. **a)** 0,10 N
b) comprimida
c) 5,0 mm do eixo *OP*.

Problemas e testes

1. **a)** Veja a figura.



b) Veja a figura.



2. **a)** Perpendicular à folha de papel, penetrando nela.
b) $B = 2{,}0\ T$

3. Porque elas não são tangentes às forças magnéticas que atuam nas cargas elétricas em movimento.

4. **a)** movimento retilíneo uniformemente acelerado
b) movimento retilíneo uniforme
c) Inicialmente o movimento será retilíneo uniformemente retardado e, depois, retilíneo uniformemente acelerado.

5. **a)** de *P* para *Q*
b) de *N* para *M*
c) menor

6. a

Capítulo 7
Alterações do campo magnético

Verifique o que aprendeu

1. Em *P* e *Q*: entrando na folha de papel; em *M* e *R*: saindo da folha de papel.

2. **a)** $1{,}2 \cdot 10^{-3}\ T$
b) $4{,}0 \cdot 10^{-4}\ T$

3. **a)** Ambos são verticais, dirigidos para cima.
b) $B_2 = 1{,}5 \cdot 10^{-4}\ T$
c) $B = 4{,}5 \cdot 10^{-4}\ T$, vertical, para cima.

4. **a)** Vertical, para cima.
b) $8{,}0 \cdot 10^{-4}\ T$

5. **a)** polo norte
b) de *G* para *F*

6. **a)** igual
b) maior
c) $B_2 = 3{,}0 \cdot 10^{-3}\ T$

7. *D*

8. Um ímã, bobina ou solenoide.

9. **a)** Semelhante à figura **7.22**, mas as linhas entram no polo sul do ímã.
b) Orientados de *F* para *G*.
c) polo norte
d) Atraído.

10. **b)** Orientado de *G* para *F*.
c) polo sul
d) Repelida.

11. polo norte em *G* e polo sul em *F*

Problemas e testes

1. Não modificará.

2. Ao se abrir a porta ou a janela, o relé é desarmado, fechando-se o circuito da campainha.

3. **a)** Como a corrente é alternada, a extremidade da bobina oscila, para a frente e para trás, ao longo do seu eixo.
b) longitudinal
c) igual
d) amplitude

4. O sentido da corrente nas espiras mostra que, em cada ramo do U, os campos magnéticos têm sentidos contrários.

5. d

6. b

Capítulo 8
Indução eletromagnética – Ondas eletromagnéticas

Verifique o que aprendeu

1. **a)** de *C* para *D*
b) *C*, positivamente, e *D*, negativamente
c) sentido *CFD*

2. Não, porque a força magnética sobre os elétrons seria nula.

3. **a)** *C*, positiva, e *D*, negativa
b) *F*, positiva, e *G*, negativa
c) em série
d) de *M* para *N*

4. **a)** $\theta = 0°$
b) $\varphi = 2{,}1 \cdot 10^{-4}\ Wb$

5. **a)** $\theta = 90°$; $\varphi = 0$
b) sim

6. **a)** $\Delta\varphi = 2{,}1 \cdot 10^{-4}\,Wb$
b) $\varepsilon = 7 \cdot 10^{-3}\,V$

7. **a)** sim
b) não
c) não

8. **a)** sim
b) não
c) zero

9. **a)** 0,30 V
b) 0,75 A

10. **a)** 0,017 s
b) 0,008 s
c) não

11. Todas estão corretas.

12. **a)** Saindo.
b) Aumentou.
c) Entrando.

13. **a)** Contrário ao mostrado na figura **8.23**.
b) Não, pois o fluxo através da espira permanece constante.

14. **a)** para cima
b) Diminuindo.
c) para cima
d) sentido *CDFG*

15. **a)** sim
b) Constante, pois a corrente no primário é constante.
c) não

16. 0,70 A

17. **a)** sim
b) Contrário ao sentido indicado na figura **8.28**.
c) Contrário ao sentido indicado na figura **8.28**.

18. **a)** sim
b) Não, pois o campo elétrico não está variando no tempo.

19. **a)** Diminuindo.
b) Diminuindo.
c) sim

20. **a)** sim
b) Há uma onda eletromagnética se propagando a partir da antena.

21. **a)** igual
b) maior

22. radiação ultravioleta

23. menor

24. **a)** 2,0 A
b) 1 200 W
c) 50%
d) 1 200 W

25. **a)** 4,0 A
b) 48 W
c) 2%
d) 2 352 W

26. Não, pois o transformador não funciona com corrente contínua.

27. **a)** Significa "voltagem elevada", que tem como consequência a redução da corrente, diminuindo as perdas por efeito Joule na transmissão.
b) A facilidade com que sua voltagem pode ser aumentada ou diminuída, por meio de transformadores.

28. **a)** 3 vezes
b) Subestação da usina – elevação; subestação da cidade – redução; transformador do poste – redução.
c) Diminui; aumenta; aumenta.

PROBLEMAS E TESTES

1. **a)** lado direito
b) 0,36 V

2. **a)** Diminuindo.
b) sentido *GFHD*

3. **a)** 20 espiras
b) 5,0 A
c) 0,50 A

4. micro-ondas

5. **a)** Essas denominações se referem aos valores dos comprimentos de onda: λ (onda longa) $>$ λ (onda média) $>\lambda$ (onda curta).
b) onda curta

6. O transformador reduz a voltagem alternada para 12 V e o retificador faz com que a bateria receba corrente contínua (o reostato serve apenas para controlar o valor da corrente).

7. 1,0 A

8. Com o circuito fechado, aparece uma força magnética que se opõe à rotação do gerador.

9. **a)** Nas três situações, porque todas estão com a carga acelerada.
b) menor

10. Todas estão corretas.

11. 0,157 s

12. **a)** 110 V
b) 110 V
c) 220 V

13. **a)** anti-horário
b) horário

14. Em **II** e em **IV**

15. diminui

Apêndice F

Verifique o que aprendeu

1. $C = 3{,}0 \cdot 10^{-6}\ F = 3{,}0\ \mu F$

2. **a)** $C = 3{,}0 \cdot 10^{-6}\ F$
b) $7{,}5 \cdot 10^{-4}\ C$

3. Não se altera.

4. **a)** 12,5 μF
b) $4{,}0 \cdot 10^{-4}\ C$
c) 32 V
d) 8 000 N/C

5. **a)** 0,70 J
b) 0,70 J

6. **a)** sim
b) Aumentará.

Problemas e testes

1. **a)** $3{,}0 \cdot 10^{2}\ V$
b) $1{,}2 \cdot 10^{-3}\ C$

2. c

3. d

4. Todas estão corretas.

5. d

6. 300 C

7. $9{,}0 \cdot 10^{10}\ J$

8. **a)** 0,12 J
b) 0,08 J
c) 0,04 J

9. c

10. b

11. **a)** 100 V
b) A corrente induzida deve ter um sentido anti-horário na bobina.

Capítulo 9

Teoria da relatividade e Física quântica

Verifique o que aprendeu

1. Não, pois o que se sente é um movimento retilíneo uniforme.

2. Para as velocidades do nosso dia a dia não é necessária a utilização da relatividade, a menos que se queira uma grande precisão.

3. De acordo com o primeiro postulado, as leis físicas são as mesmas para quaisquer referenciais inerciais. Assim, se existe uma lei que faz com que se observe o encurtamento do comprimento na direção do movimento, ela também se aplicará à estação espacial.

4. De acordo com o primeiro postulado, as leis físicas são as mesmas para quaisquer referenciais inerciais. Assim, se existe uma lei que faz com que se observe um relógio em movimento caminhar num ritmo mais lento, a mesma será aplicada para os dois observadores.

5. De acordo com a mecânica newtoniana: $v = 1{,}40\ c$. De acordo com a teoria da relatividade: $v = 0{,}95\ c$.

6. **a)** $8{,}2 \cdot 10^{-14}\ J$
b) $8{,}2 \cdot 10^{-13}\ J$
c) $4{,}1 \cdot 10^{-14}\ J$ e $74 \cdot 10^{-14}\ J$
d) $2{,}7 \cdot 10^{-22}\ kg \cdot m/s$ e $2{,}7 \cdot 10^{-21}\ kg \cdot m/s$

7. **a)** A teoria de 1905 só vale para referenciais inerciais. Já a teoria de 1915 é geral, valendo também para referenciais acelerados.
b) o princípio da equivalência
c) A relatividade geral trabalha com o espaço-tempo curvo.

8. A teoria geral da relatividade, por englobar a Física newtoniana, também vale para a gravidade de massas como a da Terra.

9. Os efeitos da aceleração são equivalentes aos efeitos gravitacionais. Essa frase já contém a ideia do princípio de equivalência.

10. Quanto mais forte é o campo gravitacional, mais devagar um relógio anda. Assim, o menor ritmo de avanço de tempo acontece para um relógio que se encontra a uma altitude mais elevada.

Problemas e testes

1. a

2. $h = \dfrac{2E^2}{m^2c^2g}$

3. d

Sugestões de leitura

A lista apresentada a seguir é sugerida para tentar ampliar seus conhecimentos e incentivá-lo a fazer outras leituras além do livro didático. Seu professor poderá orientá-lo por onde começar, como ir adquirindo cada obra, como incorporá-las à biblioteca de sua escola e como desenvolver o hábito de ler.
Boa leitura!

ARRIBAS, S. D. *Experiências de Física ao alcance da escola*. Passo Fundo: UPF, 1987.

BERNAL, J. D. *Ciência na História*. Lisboa: Livros Horizonte, 1969. v. 1 a 7.

CAMPOS, C. A. S. *Brasil 3D:* estereogramas tupiniquins. São Paulo: Imagica, 1995.

CARVALHO, R. P. *Física do dia a dia.* Belo Horizonte: Autêntica, 2011.

DAOU, L.; CARUSO, F. *Tirinhas de Física*. Rio de Janeiro: Centro Brasileiro de Ensino de Física, 2001. v. 1 a 4.

FEYNMAN, R. P. *Está a brincar, Sr. Feynman?.* Rio de Janeiro: Campus, 2006.

FIOLHAIS, C. *Física divertida*. Lisboa: Gradiva, 2007.

GILMORE, R. *Alice no país do* quantum. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1998.

_____. *O mágico dos* quarks. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 2002.

GONICK, L.; HUFFMAN, A. *Introdução ilustrada à Física*. São Paulo: Harbra, 1994.

HEWITT, P. G. *Física conceitual*. Porto Alegre: Artmed, 2002.

PANZERA, Á. C. *Estrelas e planetas*. Belo Horizonte: Ed. da UFMG, 2008.

PAULINO, J. O. S. *Raios e trovões*. Belo Horizonte: Ed. da UFMG, 1997.

PERELMAN, I. *Física recreativa*. Moscou: Mir, 1980.

PRICE, D. S. *O homem e a ciência*: a ciência desde a Babilônia. Belo Horizonte: Itatiaia, 1976.

QUINN, S. *Marie Curie:* uma vida. São Paulo: Scipione, 1997.

SAGAN, C. *O mundo assombrado pelos demônios*. São Paulo: Companhia das Letras, 1997.

STRATHERN, P. *Aristóteles em 90 minutos*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1997.

_____. *Arquimedes e a alavanca em 90 minutos*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1998.

_____. *Böhr e a teoria quântica em 90 minutos*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1999.

_____. *Galileu e o Sistema Solar em 90 minutos*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1999.

_____. *Hawking e os buracos negros em 90 minutos*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1998.

VALADARES, E. C. *Física mais que divertida*. Belo Horizonte: Ed. da UFMG, 2012.

WALKER, J. *O grande circo da Física*. Lisboa: Gradiva, 1990.

ZIMAN, J. *A força do conhecimento*. São Paulo: Edusp, 1981.

Bibliografia

BARTHEM, R. *Temas atuais de Física:* a luz. São Paulo: Livraria da Física, 2005.

BENSON, H. *University Physics.* New York: Wiley, 1991.

BOLTON, L. *Hidden Pictures.* New York: Penguin, 1993.

CARVALHO, R. P. *Física do dia a dia.* Belo Horizonte: Autêntica, 2011.

_____. *Temas atuais de Física:* micro-ondas. São Paulo: Livraria da Física, 2005.

CHALMERS, A. F. *O que é Ciência afinal?.* São Paulo: Brasiliense, 2011.

CHILDRESS, D. H. *As fantásticas invenções de Nikola Tesla*. São Paulo: Madras, 2004.

DAWKINS, R. *Desvendando o arco-íris.* São Paulo: Companhia das Letras, 2000.

DURAN, J. E. R. *Biofísica:* conceitos e aplicações. São Paulo: Pearson, 2011.

EISBERG, R.; RESNICK, R. *Física quântica:* átomos, moléculas, sólidos, núcleos e partículas. Rio de Janeiro: Elsevier, 1979.

ERNST, B. *Adventure with Impossible Figures.* Norfolk: Taschen, 2000.

FEYNMAN, R. P.; LEIGHTON, R. B.; SANDS, M. *Lectures on Physics:* the New Millennium Edition. London: Addison Wesley, 2011. 3 v.

GENNES, P. G. *Os objetos frágeis*. Campinas: Ed. da Unicamp, 1997.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. *Energy, Environment and Development*. London: Earthscan, 2010.

GRIBBIN, J. *História da Ciência*. Porto: Europa América, 2005.

HALLIDAY, D.; RESNIC, R.; WALKER, J. *Fundamentals of Physics.* New York: Wiley, 2010.

HAWKING, S. *Os gênios da Ciência:* sobre os ombros de gigantes. Rio de Janeiro: Campus, 2005.

HEWITT, P. G. *Fundamentos de Física conceitual.* Porto Alegre: Bookman, 2009.

HOUAISS, A.; VILLAR, M. S. *Dicionário Houaiss da Língua Portuguesa.* Rio de Janeiro: Objetiva, 2011.

INGRAM, J. *As ilusões da vida:* a estranha ciência do extremamente comum. Rio de Janeiro: Ediouro, 2005.

KAKU, M. *Física do impossível.* Rio de Janeiro: Rocco, 2010.

LIVINGSTON, J. D. *Rising Force:* the Magic of Magnet. Cambridge: Harvard, 2011.

MARINHO, F. C.; DORIA, M. M. *Temas atuais de Física:* ondas e *bits*. São Paulo: Livraria da Física, 2005.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA. *Algumas razões para ser um cientista.* Rio de Janeiro: CBPF, 2005.

MOSCOVICH, I. *Magic Cylinder Book.* Stradbroke: Tarquin, 1991.

NASSAU, K. *The Physics and Chemistry of Color:* the Fifteen Causes of Color. Hoboken: Wiley Inter-Science, 2001.

NUSSENZVEIG, H. M. *Curso de Física básica.* São Paulo: Edgar Blücher, 1983. 3 v.

OKUNO, E.; CALDAS, I. L.; CHOW, C. *Física para Ciências Biológicas e Biomédicas*. São Paulo: Harbra, 1982.

OSTERMANN, F.; PUREUR, P. *Temas atuais de Física:* supercondutividade. São Paulo: Livraria da Física, 2005.

PAULA, H. F.; MATEUS, A. L.; ALVES, E. G. *Quântica para iniciantes*. Belo Horizonte: Ed. da UFMG, 2011.

PIRES, A. S. T. *Evolução das ideias da Física*. São Paulo: Livraria da Física, 2011.

RETONDO, C. G.; Faria, P. *Química das sensações*. Campinas: Átomo, 2009.

SMITH, A. *The Usborne Big Book of Experiments.* London: Usborne, 1996.

TIPPLER, P. A.; LLEWELLYN, R. A. *Física moderna*. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

VALADARES, E. C. *Física mais que divertida*. Belo Horizonte: Ed. da UFMG, 2012.

_____; CHAVES, A.; ALVES, E. G. *Temas atuais de Física:* aplicações da Física quântica – do transistor à nanotecnologia. São Paulo: Livraria da Física, 2005.

Índice remissivo

Absorção, **259, 260**
agulha magnética, **150, 151, 153, 160, 173, 177**
amperímetro, **94, 117, 138, 194, 195, 199**

Balança, **25, 26, 29**
bobina, **120, 156, 178, 181, 197, 205, 206**
Bohr, Niels, **13, 260**
bússola, **150, 151, 161**

Campo,
- elétrico, **35-50, 59-63, 66-70, 83-86, 88-90, 155-159, 208-210, 219**
- gravitacional, **29, 36, 68, 192, 204, 242, 252**

carga elétrica, **12-16, 21, 24, 30, 36, 49, 50, 54, 70, 72, 143, 214, 219, 233, 251, 256**
cientistas, **13, 29, 84, 120, 153, 211, 213, 259, 264**
comprimento de onda, **51, 217**
constante,
- de Planck, **247**
- de proporcionalidade, **26, 96**

contração de Lorentz, **245, 264**

Diferença de potencial, **59-65, 68, 70, 73, 74, 88-94, 98, 99, 103-107, 111-114, 134-137, 142, 143, 193, 218, 229-234**
difração, **210, 211**

Efeito Joule, **87, 95, 113, 129, 131, 136, 222**
Einstein, Albert, **213, 242-245, 247, 249, 252-254, 258, 264**
eletroímã, **120, 178, 210**
eletroscópio, **21-23, 50**
energia,
- cinética, **68, 111, 201, 249, 258**
- elétrica, **50, 53, 82, 86, 89, 110-113, 120, 124, 125, 127, 131, 192, 194, 201, 202, 222, 223**
- mecânica, **110, 111, 126, 127, 129, 131, 192, 199**
- potencial, **68, 125, 126, 201, 233, 258**
- térmica, **95, 113, 126, 127, 143, 201, 224**

espaço, **36, 38, 45-47, 208-211, 243, 247, 249**
espectro eletromagnético, **214, 217, 257**
espectroscopia, **259**

Faraday, Michael, **44, 45, 50, 51, 192-198, 203, 206, 208, 212**
fator de Lorentz, **248, 249, 251**
feixe de luz, **251, 258**
fibra óptica, **263**
fluxo magnético, **196, 197, 199, 203, 204, 206, 208**
força,
- centrípeta, **163**
- de atração, **21, 28-30, 150**
- elétrica, **24, 26, 27, 29, 30, 36-38, 40, 42, 46, 52, 59, 60-64, 83**
- gravitacional, **36, 68**
- magnética, **150, 154, 156, 158, 162-167, 193, 265**

frequência, **86, 95, 113, 194, 210, 214-219, 224, 250, 255, 258, 262**

Gerador, **71-73, 86, 125-128, 131-136, 142, 193, 194, 198, 199, 201, 210, 222, 223**
gravitação, **242, 243, 253**

Ímã, **12, 120, 149-155, 160, 161, 178, 180, 193, 194, 197, 198, 203**
impulso, **168**
índice de refração, **265**
irradiação, **210, 220**

***L**aser*, **262, 263**
lei,
- de Coulomb, **24-28, 40, 154**
- de Faraday, **66, 180, 196-198, 206**
- de Lenz, **203, 204**
- de Ohm, **98-101**

leis de Newton, **208**
linhas de indução, **159-161, 173-175, 178, 193, 196, 206**
linhas de transmissão, **222**

Massa, **47, 163, 167, 243, 249, 251, 253**
Mileto, Tales de, **149**
mola, **167**
motor elétrico, **72, 110, 125, 127, 128**
movimento,
- circular, **162, 163**
- de rotação, **168, 201**
- ondulatório, **210**
- retilíneo uniforme, **244**

Ondas,
- de rádio, **214-216, 243, 255**
- sonoras, **241**

órbita, **13**

Partícula, **15, 30, 46, 71, 73, 156, 158, 162, 163, 169, 213, 219, 243, 249, 251**
pêndulo elétrico, **21**
Planck, Max, **256-258, 260**
potencial elétrico, **65, 66, 68, 70, 73, 74, 101**

Quantidade de movimento, **249, 251**
queda livre, **252**

Resistividade, **96**
ressonância, **216**
Röntgen, Wilhem, **218, 219**
Rydberg, Johannes, **259, 260**

Satélite, **215, 216, 250**
solenoide, **178-180**

Telefone, **215**
telégrafo, **197**
teoria,
- da gravitação, **242**
- da relatividade, **242, 244-252, 255, 256, 264**
- do *Big Bang*, **243**
- quântica, **243**

Tesla, Nikola, **156**
trabalho, **59-64, 66-68, 111, 125-129, 132, 233, 234, 258**
trajetória circular, **163**
transformador, **87, 205-207, 223, 224**

Velocidade,
- constante, **241**
- da luz, **211, 214, 242, 244-246, 249**

Volta, Alessandro, **59, 69, 89**
voltímetro, **63, 117, 118, 136, 137**

Física 3

MANUAL DO PROFESSOR

SUMÁRIO

1. **Apresentação** 282
2. **O Ensino Médio e esta Coleção** 283
   - Ensino Médio: breve histórico e cenário atual 283
   - O Novo Enem 284
   - Concepção da obra 286
3. **A Física no Ensino Médio** 288
   - Por que ensinar/aprender Física 288
   - A história sobre o ensino da Física 288
   - O ensino de Física, os desafios atuais e os PCNEM 289
4. **O papel da experimentação** 292
5. **O ensino com OED** 293
6. **Como a obra está organizada** 294
   - Aspectos gerais da obra 294
7. **Painel da Coleção** 297
8. **Referências de apoio e aprofundamento** 300
9. **Projeto integrador** 308
   - O que são projetos 308
   - Etapas de um projeto 308
   - Princípios norteadores de um projeto 308
   - Proposta de projeto 308
10. **Orientações específicas de cada capítulo e resoluções das atividades** 309

1. Apresentação

O livro didático é um importante auxiliar do trabalho do professor. Por essa razão, há muitos anos nos dedicamos a fornecer ao professor de Física um material acessível e rico em atividades e exemplos diferenciados. Ao mesmo tempo, procuramos acompanhar as mudanças educacionais que se processam no país, atualizando e reformulando nossas obras para atender às novas demandas e realidades.

O objetivo deste Manual é auxiliá-lo no uso desta Coleção, no planejamento e no desenvolvimento de sua prática educacional, nas escolhas e nos caminhos a seguir durante o curso, bem como nas reflexões acerca de sua atividade docente.

Em nossa atividade cotidiana, imersos no trabalho de educar e ensinar, muitas vezes somos questionados tanto pelos estudantes quanto pela sociedade. Um desses questionamentos é: por que ensinar/aprender Física? Certamente as respostas a essa e a outras inquietações da sociedade não são óbvias nem únicas, mas poderão ser mais bem compreendidas se tivermos acesso a referências e documentos diversos que vêm tratando dessa problemática há décadas.

Nessa perspectiva, na primeira parte deste Manual procuramos tratar de algumas questões mais abrangentes sobre o Ensino Médio atual e, em particular, sobre aspectos que consideramos relevantes ao ensino de Física. Principalmente em um momento de grandes e rápidas transformações, precisamos estar atentos e acompanhar novas propostas e reflexões sobre questões que são relevantes em nosso trabalho.

Ainda nesta primeira parte, descrevemos aspectos gerais da obra, como estrutura, linguagem, desenvolvimento conceitual e proposta pedagógica, destacando suas características que contemplam orientações dos PCN e dos PCN+. No final desta primeira parte, trazemos um conjunto de referências que poderão auxiliá-lo em seu trabalho.

Na segunda parte do Manual, apresentamos orientações específicas para cada volume da Coleção. Sugerimos propostas e complementações que são fruto de reflexões da prática docente e procuram um diálogo constante com a sala de aula e com os problemas que dela provêm, como administração do tempo e desafios trazidos pelos alunos. Fazemos também sugestões de debates e práticas que contribuem para dar sentido ao aprendizado da Física. Apresentamos orientações de conteúdos e abordagens para cada capítulo dos três volumes e sugerimos atividades para a sala de aula, explorando recursos textuais e práticos presentes na Coleção. Tais indicações podem ser utilizadas com finalidades diversas, a exemplo de avaliações, atividades em grupo, atividades de encerramento de conteúdo e de reforço entre conteúdos de diferentes unidades e capítulos do livro.

Esperamos que essas orientações subsidiem o seu trabalho, no preparo e na realização das práticas em sala de aula, e incentivamos todos os colegas a nos enviar suas colaborações com comentários, críticas e sugestões, com o objetivo de aperfeiçoar o ensino de Física e fazer com que ele seja instigante e significativo para os alunos.

2. O Ensino Médio e esta Coleção

Ensino Médio: breve histórico e cenário atual

Os objetivos da educação no Ensino Médio vêm sofrendo mudanças que decorrem não apenas da ineficácia do ensino tradicionalmente praticado nas escolas, mas também das profundas transformações sociais, econômicas e ambientais que vivenciamos no século XXI.

Nas décadas de 1980 e 1990 o sistema escolar sofreu críticas de diferentes setores da sociedade, assim como de pesquisadores, educadores, professores e estudantes. Essas críticas se referiam ao fato de o Ensino Básico não estar cumprindo objetivos formativos amplos necessários ao ingresso no Ensino Superior e no mercado de trabalho. Fato que, é importante destacar, não se limita ao ensino das ciências, mas a áreas de conhecimento distintas, como indicam avaliações institucionais, a exemplo das levadas a efeito pelo Saeb[1].

No fim dos anos 1990, diversas medidas buscaram alterar esse quadro. Entre elas ganhou especial destaque a Lei de Diretrizes e Bases (LDB), promulgada em 20 de dezembro de 1996, que mudou o caráter formativo do Ensino Médio após um longo período em que o objetivo desse nível de ensino era tão somente preparar o estudante para o ingresso no Ensino Superior ou para funções técnicas do mercado de trabalho. Com a nova LDB, essa etapa da Educação Básica passou a ser concebida de modo mais amplo, visando à formação cidadã do educando.

Nos termos da LDB:

> *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;*
>
> *IV. a compreensão dos fundamentos científico-tecnológicos dos processos produtivos, relacionando a teoria com a prática, no ensino de cada disciplina.*

Nessa concepção, o Ensino Médio passa a ser etapa final da formação básica, visando capacitar o estudante a ser um cidadão inserido no mundo, preparado para lidar com desafios pessoais e sociais, e possibilitando sua atuação na prática social e no mundo do trabalho.

Pouco tempo depois da promulgação da LDB, novos documentos foram publicados pelo Ministério da Educação (MEC), com o objetivo de adequar a organização pedagógica e curricular do sistema escolar à legislação e fornecer orientações, propostas e material de apoio à implementação das reformas educacionais. Destacam-se, entre esses documentos, as Diretrizes Curriculares Nacionais para o Ensino Médio (DCNEM/1998), os Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN/1998) e as Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN+/2002).

As DCNEM sistematizam os princípios gerais da LDB, explicitam desdobramentos desses princípios e dispõem sobre a organização curricular da formação básica nacional e suas relações com a formação para o mercado de trabalho.

Os PCNEM e os PCN+ tiveram como objetivo esclarecer e orientar educadores na implementação da LDB e das DCNEM, dada a dificuldade de realizar, na prática, o que a legislação preconizava, como, por exemplo, "desbastar o currículo enciclopédico", "(res)significar os conteúdos disciplinares como meio para a constituição de competências e valores, e não como objetivos do ensino em si mesmos" (Parecer CEB/CNA nº 15, de 1º de junho de 1998).

Esse conjunto de documentos, bem como os sistemas avaliativos então implantados no país (Saeb e Enem), trouxe uma concepção de educação muito diversa da até então vigente, que enxergava o Ensino Médio apenas como fase de preparação para o Ensino Superior. O Enem ganhou especial destaque como avaliação que viria a sinalizar mais concretamente essas novas orientações educacionais.

[1] O Sistema Nacional de Avaliação da Educação Básica (Saeb) é atualmente composto de duas avaliações diagnósticas, com o objetivo de aferir a qualidade do ensino oferecido pelo sistema educacional brasileiro. A primeira, denominada Avaliação Nacional da Educação Básica (Aneb), abrange de maneira amostral os estudantes das redes públicas e privadas do país, matriculados no 5º e no 9º ano do Ensino Fundamental e no 3º ano do Ensino Médio. A segunda, denominada Avaliação Nacional do Rendimento Escolar (Anresc), também conhecida como Prova Brasil, é aplicada censitariamente a alunos do 5º e do 9º ano do Ensino Fundamental público, nas redes estaduais, municipais e federal. Ambas são realizadas a cada dois anos, com aplicação de provas de Língua Portuguesa e de Matemática, além de questionários socioeconômicos.

O Novo Enem

O Exame Nacional do Ensino Médio (Enem), criado pelo Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais (Inep/MEC) em 1998, é parte do conjunto de reformas e propostas educacionais do final da década de 1990. Fundamentado na LDB/1996, nas DCNEM, nos PCN, bem como nas Matrizes Curriculares de Referência para o Saeb, o Enem foi criado originariamente com o objetivo de "avaliar o desempenho do aluno ao término da escolaridade básica, para aferir o desenvolvimento de competências fundamentais ao exercício pleno da cidadania" (Enem, Documento Básico, 1998).

No entanto, diferentemente do Saeb, que pretende avaliar o sistema de ensino em diferentes níveis e estágios, o Enem foi criado para avaliar o aluno na saída do Ensino Médio, individualmente e em caráter voluntário.

Com isso, o Enem visava alcançar os seguintes objetivos específicos:

a) oferecer uma referência para que cada cidadão possa proceder a sua autoavaliação com vistas às suas escolhas futuras, tanto em relação ao mercado de trabalho quanto em relação à continuidade de estudos;

b) estruturar uma avaliação da Educação Básica que sirva como modalidade alternativa ou complementar aos processos de seleção nos diferentes setores do mundo do trabalho;

c) estruturar uma avaliação da Educação Básica que sirva como modalidade alternativa ou complementar aos exames de acesso aos cursos profissionalizantes pós-médios e ao Ensino Superior.

Exame Nacional do Ensino Médio, Documento Básico, Inep, 2001.

Nessa concepção original, o exame era constituído por uma prova única contendo 63 questões objetivas de múltipla escolha e uma proposta para redação. A Matriz de Referência tinha por base cinco competências e 26 habilidades, sem uma divisão formal em áreas de conhecimento.

Ao longo de suas edições, o Enem ganhou reconhecimento e passou a ser cada vez mais uma forma de sinalização de metas para a escola básica e para os concursos vestibulares. Também se tornou referência para professores e estudantes, que começaram a se empenhar em compreender e utilizar novas abordagens de ensino, como a problematização, a interdisciplinaridade e a contextualização, pouco compreendidas e pouco praticadas até então.

Esse modelo do Enem perdurou durante quase uma década, quando algumas mudanças importantes foram introduzidas. Na fase de transição da concepção original para o Novo Enem, destaca-se sua crescente utilização como instrumento de seleção para ingresso no Ensino Superior. Muitas instituições públicas, principalmente as universidades federais, aderiram amplamente ao exame após a implantação do Sisu[2]. Mais tarde, com o Prouni[3], o Novo Enem também passa a constituir meio de acesso ao Ensino Superior privado.

A proposta de reformulação que introduz o Novo Enem, a partir de 2009, traz alterações não somente em sua utilização como processo seletivo para ingresso no Ensino Superior, mas também no próprio conteúdo do exame. A matriz de habilidades que embasa o exame é reelaborada, e o conteúdo da prova passa a contemplar mais diretamente o currículo do Ensino Médio praticado nas redes escolares do país.

Segundo o MEC:

Com o Novo Enem, o MEC busca reformular o currículo do Ensino Médio e mudar o acúmulo excessivo de conteúdo hoje cobrado nos vestibulares. A proposta é oferecer outro tipo de formação, voltada para a solução de problemas. Além disso, um exame unificado pode promover a mobilidade dos alunos pelo país. Centralizar os exames seletivos é mais uma forma de democratizar o acesso a todas as universidades.

Disponível em: <www.brasil.gov.br/educacao/2009/10/bom-desempenho-do-enem-pode-garantir-vaga-na-faculdade>. Acesso em: 12 abr. 2016.

Utilização do Novo Enem no processo seletivo

As universidades possuem autonomia e poderão optar entre quatro possibilidades de utilização do novo exame como processo seletivo:

- como fase única, com o sistema de seleção unificada, informatizado e *on-line*;
- como primeira fase;
- combinado com o vestibular da instituição;
- como fase única para as vagas remanescentes do vestibular.

De acordo com o MEC:

A alternativa à descentralização dos processos seria, então, a unificação da seleção às vagas das Ifes por meio de uma única prova. A racionalização da disputa por essas vagas, de forma a democratizar a participação nos processos de seleção para vagas em diferentes regiões do país, é uma responsabilidade social tanto do Ministério da Educação quanto das instituições de Ensino Superior, em especial as Ifes.

Proposta à Associação Nacional dos Dirigentes das Instituições Federais de Ensino Superior.

---

[2] O Sistema de Seleção Unificada (Sisu) foi desenvolvido pelo Ministério da Educação para selecionar os candidatos às vagas das instituições públicas de Ensino Superior que utilizarão a nota do Exame Nacional do Ensino Médio (Enem) como única fase de seu processo seletivo. (Disponível em: <http://portal.mec.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=16185&Itemid=1101>. Acesso em: 12 abr. 2016.)

[3] O Programa Universidade para Todos (Prouni) foi criado em 2004 e tem como finalidade a concessão de bolsas de estudos integrais e parciais a estudantes de cursos de graduação e de cursos sequenciais de formação específica em instituições privadas de Educação Superior. As instituições que aderem ao programa recebem isenção de tributos. (Disponível em: <http://portal.mec.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=205&Itemid=298>. Acesso em: 12 abr. 2016.)

Estrutura da prova

O novo exame foi dividido nas quatro áreas do conhecimento que estruturam o novo Ensino Médio: Linguagens, Códigos e suas Tecnologias (incluindo redação); Ciências Humanas e suas Tecnologias; Ciências da Natureza e suas Tecnologias; Matemática e suas Tecnologias.

Cada área é contemplada com 45 itens de múltipla escolha, totalizando 180 itens aplicados em dois dias de prova.

A Matriz de Referência

Na nova matriz, as cinco competências de caráter geral do antigo Enem passam a ser denominadas "eixos cognitivos", as competências e habilidades são redefinidas por área de conhecimento, e a cada uma delas é associado um conjunto de ementas de conteúdos disciplinares específicos.

Seguem abaixo tanto os eixos cognitivos, comuns a todas as áreas do conhecimento, como as competências e habilidades que compõem a Matriz de Referência das Ciências da Natureza.

Eixos cognitivos (comuns a todas as áreas de conhecimento)

I. **Dominar linguagens (DL)**: dominar as normas urbanas de prestígio da Língua Portuguesa e fazer uso das linguagens matemática, artística e científica e das línguas espanhola e inglesa.

II. **Compreender fenômenos (CF)**: construir e aplicar conceitos das várias áreas do conhecimento para a compreensão de fenômenos naturais, de processos histórico-geográficos, da produção tecnológica e das manifestações artísticas.

III. **Enfrentar situações-problema (SP)**: selecionar, organizar, relacionar e interpretar dados e informações representados de diferentes formas, para tomar decisões e enfrentar situações-problema.

IV. **Construir argumentação (CA)**: relacionar informações, representadas em diferentes formas, e conhecimentos disponíveis em situações concretas para construir argumentação consistente.

V. **Elaborar propostas (EP)**: recorrer aos conhecimentos desenvolvidos na escola para elaboração de propostas de intervenção solidária na realidade, respeitando os valores humanos e considerando a diversidade sociocultural.

Habilidades — Área de Ciências da Natureza e suas Tecnologias

Competência de área 1 — Compreender as ciências naturais e as tecnologias a elas associadas como construções humanas, percebendo seus papéis nos processos de produção e no desenvolvimento econômico e social da humanidade.

H1 — Reconhecer características ou propriedades de fenômenos ondulatórios ou oscilatórios, relacionando-os a seus usos em diferentes contextos.

H2 — Associar a solução de problemas de comunicação, transporte, saúde ou outro com o correspondente desenvolvimento científico e tecnológico.

H3 — Confrontar interpretações científicas com interpretações baseadas no senso comum ao longo do tempo ou em diferentes culturas.

H4 — Avaliar propostas de intervenção no ambiente, considerando a qualidade da vida humana ou medidas de conservação, recuperação ou utilização sustentável da biodiversidade.

Competência de área 2 — Identificar a presença e aplicar as tecnologias associadas às ciências naturais em diferentes contextos.

H5 — Dimensionar circuitos ou dispositivos elétricos de uso cotidiano.

H6 — Relacionar informações para compreender manuais de instalação ou utilização de aparelhos ou sistemas tecnológicos de uso comum.

H7 — Selecionar testes de controle, parâmetros ou critérios para a comparação de materiais e produtos tendo em vista a defesa do consumidor, a saúde do trabalhador ou a qualidade de vida.

Competência de área 3 — Associar intervenções que resultam em degradação ou conservação ambiental a processos produtivos e sociais e a instrumentos ou ações científico-tecnológicos.

H8 — Identificar etapas em processos de obtenção, transformação, utilização ou reciclagem de recursos naturais, energéticos ou matérias-primas, considerando processos biológicos, químicos ou físicos neles envolvidos.

H9 — Compreender a importância dos ciclos biogeoquímicos ou do fluxo de energia para a vida, ou da ação de agentes ou fenômenos que podem causar alterações nesses processos.

H10 — Analisar perturbações ambientais, identificando fontes, transporte e/ou destino dos poluentes ou prevendo efeitos em sistemas naturais, produtivos ou sociais.

H11 — Reconhecer benefícios, limitações e aspectos éticos da biotecnologia, considerando estruturas e processos biológicos envolvidos em produtos biotecnológicos.

H12 — Avaliar impactos em ambientes naturais decorrentes de atividades sociais ou econômicas, considerando interesses contraditórios.

Competência de área 4 — Compreender interações entre organismos e ambiente, em particular aquelas relacionadas à saúde humana, relacionando conhecimentos científicos, aspectos culturais e características individuais.

H13 — Reconhecer mecanismos de transmissão da vida, prevendo ou explicando a manifestação de características dos seres vivos.

H14 — Identificar padrões em fenômenos e processos vitais dos organismos, como manutenção do equilíbrio interno, defesa, relações com o ambiente, sexualidade, entre outros.

H15 — Interpretar modelos e experimentos para explicar fenômenos ou processos biológicos em qualquer nível de organização dos sistemas biológicos.

H16 — Compreender o papel da evolução na produção de padrões, processos biológicos ou na organização taxonômica dos seres vivos.

Competência de área 5 — Entender métodos e procedimentos próprios das ciências naturais e aplicá-los em diferentes contextos.

H17 — Relacionar informações apresentadas em diferentes formas de linguagem e representação usadas nas ciências físicas, químicas ou biológicas, como texto discursivo, gráficos, tabelas, relações matemáticas ou linguagem simbólica.

H18 — Relacionar propriedades físicas, químicas ou biológicas de produtos, sistemas ou procedimentos tecnológicos às finalidades a que se destinam.

H19 — Avaliar métodos, processos ou procedimentos das ciências naturais que contribuam para diagnosticar ou solucionar problemas de ordem social, econômica ou ambiental.

Competência de área 6 — Apropriar-se de conhecimentos da Física para, em situações-problema, interpretar, avaliar ou planejar intervenções científico-tecnológicas.

H20 — Caracterizar causas ou efeitos dos movimentos de partículas, substâncias, objetos ou corpos celestes.

H21 — Utilizar leis físicas e/ou químicas para interpretar processos naturais ou tecnológicos inseridos no contexto da Termodinâmica e/ou do Eletromagnetismo.

H22 — Compreender fenômenos decorrentes da interação entre a radiação e a matéria em suas manifestações em processos naturais ou tecnológicos, ou em suas implicações biológicas, sociais, econômicas ou ambientais.

H23 — Avaliar possibilidades de geração, uso ou transformação de energia em ambientes específicos, considerando implicações éticas, ambientais, sociais e/ou econômicas.

Competência de área 7 — Apropriar-se de conhecimentos da Química para, em situações-problema, interpretar, avaliar ou planejar intervenções científico-tecnológicas.

H24 — Utilizar códigos e nomenclatura da Química para caracterizar materiais, substâncias ou transformações químicas.

H25 — Caracterizar materiais ou substâncias, identificando etapas, rendimentos ou implicações biológicas, sociais, econômicas ou ambientais de sua obtenção ou produção.

H26 — Avaliar implicações sociais, ambientais e/ou econômicas na produção ou no consumo de recursos energéticos ou minerais, identificando transformações químicas ou de energia envolvidas nesses processos.

H27 — Avaliar propostas de intervenção no meio ambiente aplicando conhecimentos químicos, observando riscos ou benefícios.

Competência de área 8 — Apropriar-se de conhecimentos da Biologia para, em situações-problema, interpretar, avaliar ou planejar intervenções científico-tecnológicas.

H28 — Associar características adaptativas dos organismos com seu modo de vida ou com seus limites de distribuição em diferentes ambientes, principalmente em ambientes brasileiros.

H29 — Interpretar experimentos ou técnicas que utilizam seres vivos, analisando implicações para o ambiente, a saúde, a produção de alimentos, matérias-primas ou produtos industriais.

H30 — Avaliar propostas de alcance individual ou coletivo, identificando aquelas que visam à preservação e à implementação da saúde individual, coletiva ou do ambiente.

Concepção da obra

> *O problema de "ensinar Física na América Latina" é apenas parte de um problema maior, que é o de "ensinar Física em qualquer lugar", que, aliás, está incluído num problema mais amplo, que é o de "ensinar qualquer coisa em qualquer lugar" e para o qual não é conhecida uma solução satisfatória.*
>
> Richard Feynman[4].

[4] Durante a 1ª Conferência Interamericana de Ensino de Física, na década de 1950, em sua estada no Brasil.

Todos nós que estamos envolvidos de diferentes maneiras com o trabalho educacional sabemos da enorme quantidade de problemas presentes na educação dos jovens de nosso país. Sabemos que as questões relacionadas a esse cenário são muitas, complexas e de naturezas distintas, tais como estrutura escolar precária, falta de incentivo familiar, formação inicial insuficiente, entre tantos outros problemas. A bibliografia referente a esses temas é razoavelmente extensa e abrange diversos aspectos de estudos já desenvolvidos sobre educação, ensino e aprendizagem. Entretanto, nem todos os professores conhecem e/ou têm acesso a essas publicações. Cabe ressaltar, ainda, que sua leitura e compreensão exigem conhecimentos e competências que nem sempre os professores adquirem em sua formação inicial e que, para muitos deles, são raras as oportunidades de fazer cursos de aperfeiçoamento em formação continuada.

Como professores e autores de livros didáticos de Física há muitos anos, esses fatos nos preocupam, pois eles atingem de maneira particular o ensino dessa área do conhecimento. As palavras do físico e professor Richard Feynman que encabeçam essas considerações não constituem propriamente um consolo, mas talvez uma explicação, dada a complexidade e a abrangência dos problemas envolvidos na arte de educar.

Ainda que ancorada na legislação e com uma grande diversidade de propostas e orientações, a atividade docente não deixou de prescindir do livro didático como um instrumento de grande ajuda para o professor. Por isso, o livro ganhou uma responsabilidade ainda maior diante desse panorama educacional: além de fortalecer os conhecimentos fundamentais das diferentes disciplinas, cabe ao livro didático subsidiar uma formação mais abrangente dos jovens, voltada à cidadania e ao mundo atual.

Embora nossos textos tenham sido publicados, em suas edições mais antigas, apoiados quase totalmente nas ideias que adquirimos em nossa prática docente, nas edições mais recentes, e nesta Coleção, nos inspiramos também em trabalhos de pesquisadores na área de ensino de Física, procurando incorporá-los para realinhar e atualizar as atividades docentes às questões e aos resultados de estudos que vêm sendo acumulados ao longo dos últimos anos.

Dentre os temas relacionados à educação que consideramos importante inserir no desenvolvimento de nossa obra, destaca-se a interdisciplinaridade, cuja relevância vem se tornando cada vez mais evidente nas pesquisas em ensino. Além de maior atenção a essa característica durante a apresentação dos conceitos e dos exemplos, criamos uma seção dedicada exclusivamente para esse fim, seção que será descrita mais adiante neste Manual.

Não temos a pretensão de que nossa proposta seja válida em qualquer situação. "Panaceias" e receitas não são possíveis nem desejáveis. Acreditamos, porém, que você, professor, poderá utilizar esta Coleção fazendo suas escolhas na seleção de conteúdos e acrescentando leituras e outras atividades quando julgar necessário.

A participação do professor na seleção dos conteúdos e na escolha das atividades que serão realizadas é essencial para o bom andamento do curso, não apenas porque o professor é aquele que melhor conhece a necessidade de aprendizado de seu aluno, mas também porque o envolvimento do professor com seu projeto de ensino favorece um envolvimento maior do aluno com seu projeto de aprendizagem.

Pretendemos que esta obra ofereça aos estudantes uma compreensão mais abrangente dos conhecimentos físicos, despertando-os para saberes relevantes à educação do cidadão de nossos dias, atenuando dificuldades e resistências que frequentemente demonstram. Com o olhar atento a esses problemas, esta obra procura enfatizar abordagens conceituais da Física, contextualizando os significados de teorias, leis e modelos, sem abandonar a linguagem e o formalismo sempre que necessário. Não se trata, portanto, de privilegiar nomenclaturas, a memorização ou a mera aplicação de fórmulas destituídas de significados. Definições, fórmulas, equações e exercícios são necessários e fazem parte da aprendizagem de Física, mas devem sempre ser tratados de modo que os alunos tenham compreensão de seus sentidos, tanto na Física como em sua relação com outros saberes.

Finalmente, procuramos empregar uma linguagem clara, ter cuidado especial com a sequência e a relação de conteúdos e tornar acessíveis atividades e textos, sem, contudo, abrir mão do rigor conceitual e de um princípio de honestidade científica condizente com uma formação básica adequada a diferentes perfis de estudantes.

Os aspectos destacados a seguir poderão ajudá-lo a construir situações de ensino que incorporam algumas das características apontadas por professores e por especialistas em educação como fundamentais para um ensino de qualidade. Esperamos que o caminho proposto auxilie o estudante a enriquecer e aprimorar suas formas espontâneas de interpretar a natureza e a vencer os obstáculos que surgem na jornada de estudar e aprender.

3. A Física no Ensino Médio

Por que ensinar/aprender Física

Retomemos as palavras de Feynman. Certamente "ensinar qualquer coisa em qualquer lugar" é um problema para o qual não se conhece uma solução satisfatória. No nosso caso, a tarefa de ensinar Física frequentemente é tida como um problema ainda maior, diante de algumas restrições pelas quais o professor passa. Faz parte do senso comum a ideia de que é uma disciplina difícil, abstrata, e que se faz muito uso da Matemática. Quase todo professor de Física já deve ter ouvido, ao menos uma vez, algum aluno questionar: "Por que tenho que estudar Física se no futuro não farei nenhum uso desse aprendizado?". Ou, ainda, depoimentos de que, para aprender Física ou para ser um "físico", é preciso estudar muito.

Isso nos faz refletir sobre a origem dessas ideias. É certo que estudar e aprender requer dedicação. Mas por que a Geografia, a Língua Portuguesa ou a Arte, por exemplo, seriam diferentes das Ciências? Por que exigiriam menos dedicação ou seriam mais fáceis? Por que seriam mais palatáveis ou mais necessárias à formação de todos? Por que demandariam menos inteligência? Seriam as dificuldades de aprendizagem um "privilégio" das Ciências?

Durante muito tempo, a Física ensinada era, de fato, "formulística" e distante do dia a dia dos alunos. Ainda que haja, em alguns casos, um maior aprofundamento e extensão de tópicos, ou uma dedicação ao desenvolvimento de raciocínios lógicos, em geral o único sentido do aprendizado dessa ciência era aplicá-la em provas e exames. De fato, nessa concepção essa "disciplina" não motivava, não era interessante nem havia utilidade teórica ou prática, a não ser ingressar no nível superior. Nesses moldes, o ensino de Física não formava nem educava, no sentido mais abrangente do que seja educar e do que a LDB prescreve: formar para a vida, para o mundo do trabalho, aprimorar o educando como pessoa.

Nem todo jovem vai precisar usar conhecimentos físicos em sua futura profissão, mas sua formação, como cidadão do mundo, não pode prescindir de conhecimentos científicos e tecnológicos, ou mesmo de uma visão da Ciência, de sua linguagem, suas metodologias e sua construção histórica. Assim como ocorre com as outras disciplinas, ensinamos/aprendemos Física para melhor nos colocarmos e atuarmos no mundo. Precisamos entender o conhecimento físico como cultura para uma formação geral. A inclusão da Física na escola básica não tem mais a função que um dia teve; como estava, a função era limitar-se à preparação para o Ensino Superior nas "carreiras científicas". Vivemos uma nova configuração do mundo social, do mundo do trabalho, com uma grande sofisticação e demandas nas comunicações, nos transportes, no suprimento de alimentos e de energia, no lazer e na vida pessoal. Estamos rodeados de aparelhos e equipamentos "impregnados" de conhecimentos científicos e tecnológicos. Observamos um mundo com mudanças climáticas, novas doenças e novas formas de controlar a saúde e obter curas. Em todos esses âmbitos, o conhecimento físico está presente. Dessa forma, acreditamos que o ensino de Física deve estar atrelado à conscientização de que nossa compreensão e atuação no mundo ficariam limitadas sem conhecimentos científicos e tecnológicos, da mesma forma que ficaria limitada caso não conhecêssemos nossa língua, nossa história ou a geografia de nosso país e do mundo.

A história sobre o ensino da Física

Uma crença generalizada e aceita durante muito tempo era a de que bons professores não precisavam ser formados: qualquer pessoa com certo conhecimento, ou que dispusesse de um bom livro sobre um dado assunto, poderia ensinar. Pouco era conhecido ou pesquisado sobre o ato de aprender, de ensinar, de compreender, de memorizar, de generalizar, de aplicar e de contextualizar conhecimentos que eram ensinados nas diversas etapas da educação escolar. Ainda nos dias de hoje perdura em alguns setores a ideia de que ter bom domínio sobre um assunto é necessário e suficiente para ensiná-lo.

Tais concepções começaram a mudar no início da segunda década do século passado, quando o psicólogo suíço Jean Piaget, que também se interessava por estudos de Biologia e Epistemologia, lançou as primeiras ideias sobre o que viria a ser sua teoria do conhecimento, principalmente sobre o desenvolvimento cognitivo das crianças, sugerindo que o ato de pensar e aprender não poderiam ser entendidos como um simples processo, ainda que refinado, de "tentativas e erros". Com a sua colaboração e a de outros pesquisadores, novas concepções envolvendo o pensamento e a linguagem foram sendo elaboradas, e hoje contamos com inúmeras pesquisas sobre o assunto.

Além de pesquisas e teorias modernas sobre cognição e aprendizagem, alguns acontecimentos do século XX contribuíram para a modificação da ideia que se tinha sobre ensinar e aprender as disciplinas das Ciências Naturais. Após a Guerra Fria, por exemplo, o conhecimento científico passou a ser elemento estratégico para a superação do subdesenvolvimento e para

a formação de pessoas que dessem suporte ao desenvolvimento tecnológico e industrial. Nesse cenário, a formação de cientistas passou a ser meta mundial, e o conhecimento científico foi considerado fundamental para os planos de desenvolvimento.

Nas décadas de 1980 e 1990, entram em cena novas concepções e orientações educacionais, segundo as quais a educação científica deveria ser direcionada a todos os estudantes, e não apenas a futuros cientistas. Essas ideias impulsionaram pesquisas e mudanças curriculares que convergiram, ainda na década de 1990, às legislações e orientações curriculares mencionadas. Trouxeram também questões mais complexas, como "Para que ensinar Ciências?" e, em nosso caso, "Para que ensinar Física?" ou, ainda, "O que ensinar?". É nesse quadro que os PCNEM e outras propostas curriculares estaduais e/ou municipais vêm sendo apresentados.

Acreditamos que é nessa linha e nesse contexto que estamos nos orientando e produzindo subsídios para os professores. Não se trata mais de conceber a educação como se fosse possível desenvolvê-la baseada no senso comum. Também foi abandonada a ideia de ensinar Física apenas para futuros físicos. Com esses novos pressupostos, não é fácil apontar, com segurança e objetividade, os processos, os contextos, os conteúdos e as competências que precisam ser observadas no desenvolvimento dos princípios que embasam o ensino de Física hoje. Assim como nas Ciências, qualquer teoria ou concepção educacional que surja deverá sempre ser admitida em caráter provisório e dinâmico. Pensamos que nós, autores, ao escrever nosso livro, procuramos cumprir a tarefa a nosso modo. Acreditamos ter construído caminhos que auxiliem professores e estudantes a encontrar respostas diversas, tendo em vista objetivos e realidades também diversos.

O ensino de Física, os desafios atuais e os PCNEM

Diante do quadro até aqui apresentado, entendemos os PCNEM como uma orientação que pode nos auxiliar na reflexão e na busca de caminhos diante dos tantos desafios que se colocam hoje para nós. Também entendemos esses parâmetros como uma sinalização para guiar nossas práticas, quer como educadores, quer como professores, pesquisadores e autores de materiais didáticos. Sem dúvida, temos de considerar que se trata de um enorme desafio dar conta de tantas inquietações, de tantos objetivos, competências e habilidades a serem desenvolvidos no ensino de Física. Para exemplificar algumas articulações desta Coleção com as orientações desses documentos oficiais, retomamos os três grandes campos de competências dos PCN+ com os quais nos preocupamos.

Representar e comunicar

As Ciências em geral, e a Física em particular, têm uma linguagem própria para representar e comunicar seus conhecimentos, composta de nomenclatura, símbolos, equações, representações de grandezas e unidades e representações gráficas.

Faz parte do aprender Física dominar essa linguagem, utilizar essa nomenclatura; representar e relacionar grandezas de diferentes formas, em textos, diagramas, tabelas, gráficos e equações; ler e interpretar textos diversos, como problemas e exercícios, o próprio texto didático, notícias científicas, informações e manuais técnicos, entre outros. Mais do que isso, dominar essa linguagem faz parte da formação cultural ampla, para o mundo social e do trabalho.

Nesse campo de competências, são habilidades propostas nos PCN+:

- reconhecer e utilizar adequadamente na forma oral e escrita símbolos, códigos e nomenclatura da linguagem científica;
- ler, articular e interpretar símbolos e códigos em diferentes linguagens e representações: sentenças, equações, esquemas, diagramas, tabelas, gráficos e representações geométricas;
- consultar, analisar e interpretar textos e comunicações de ciência e tecnologia veiculados por diferentes meios;
- elaborar comunicações orais ou escritas para relatar, analisar e sistematizar eventos, fenômenos, experimentos, questões, entrevistas, visitas, correspondências;
- analisar, argumentar e posicionar-se criticamente em relação a temas de ciência e tecnologia.

Nesta obra a representação e o uso de símbolos e nomenclaturas científicas são trabalhados ao longo de todos os capítulos, seja no texto, seja nas verificações de aprendizagem. Procuramos, sempre que necessário, aproximar e articular a linguagem da Física à do mundo cotidiano. Desse modo, acreditamos que a Coleção fornece elementos para que o aluno consiga se expressar utilizando o vocabulário, as nomenclaturas, os códigos e os símbolos da Física, para que possa compreender informações científicas que surgem em sua vivência diária, como em contas de energia elétrica, manuais e instruções de dispositivos tecnológicos, notícias, reportagens, etc.

Com as atividades investigativas e as questões conceituais dissertativas, o estudante desenvolve e exercita a habilidade de expressar esses conceitos de forma escrita, preparando-se para usar a linguagem científica e suas notações formais nas mais diversas formas e expressões.

Ao mesmo tempo, a leitura e a interpretação de textos, em diferentes formas e linguagens, é uma constante nesta Coleção, particularmente nas seções *Aplicações da Física*, *Física no contexto* e *Integrando...* . Em algumas dessas leituras, o aluno é chamado a responder a questões ou elaborar novos textos com base na compreensão dos textos apresentados. Destacam-se, ainda, os *Infográficos*, que promovem a leitura, a interpretação e a articulação de diferentes linguagens — esquemas, tabelas, gráficos, ilustrações e textos.

A elaboração de textos, a análise crítica e o posicionamento diante de questões científicas também são contemplados nessas seções e nas atividades de verificação de aprendizagem.

Investigar e compreender

A compreensão de fenômenos, conceitos e teorias físicas constituem um campo abrangente de habilidades e saberes, possivelmente o mais explorado no ensino da Física. No entanto, muito frequentemente limitam-se à memorização e à aplicação de fórmulas em exercícios repetitivos que não exigem do estudante a compreensão conceitual ou a solução de problemas reais.

A compreensão, na Física, envolve o reconhecimento de fenômenos e a sua interpretação científica, o entendimento de conceitos e modelos, a identificação de dados e informações relevantes em um problema, além de estratégias para solucioná-lo.

A investigação, por sua vez, é caminho para a compreensão e dela necessita; é parte do aprendizado, assim como do próprio fazer científico.

Observar, elaborar hipóteses, fazer estimativas, medir, dimensionar, comparar e avaliar resultados de medidas e observações, tudo isso é essencial na aprendizagem das Ciências e envolve habilidades que não se limitam à experimentação, no sentido estrito do termo. Antes, elaboram estratégias para responder a questões, resolver problemas e realizar pesquisas para buscar informações e aprofundamento de temas.

Nesse campo de competências, são habilidades propostas nos PCN+:

- identificar, em dada situação-problema, as informações ou variáveis relevantes e possíveis estratégias para resolvê-la;
- identificar fenômenos naturais ou grandezas em dado domínio do conhecimento científico, estabelecer relações e identificar regularidades, invariantes e transformações;
- selecionar e utilizar instrumentos de medição e de cálculo, representar dados e utilizar escalas, fazer estimativas, elaborar hipóteses e interpretar resultados;
- reconhecer, utilizar, interpretar e propor modelos explicativos para fenômenos ou sistemas naturais ou tecnológicos;
- articular, integrar e sistematizar fenômenos e teorias dentro de uma ciência e entre as várias ciências e áreas de conhecimento.

Nesta obra buscamos contemplar atividades investigativas de diferentes formas e em diferentes momentos, ao longo de todos os capítulos, seja no desenvolvimento e na apresentação conceituais, seja nas atividades práticas ou em avaliações propostas.

No campo conceitual, a Coleção enfatiza a apresentação de leis gerais em detrimento de casos particulares, o que possibilita ao aluno, em situações diversas, identificar variáveis a considerar para explicar um fenômeno ou resolver um problema, mesmo que não tenha tido contato com aquela situação específica.

No campo da investigação prática, uma seção específica, *Pratique Física*, procura dar conta dos aspectos com vocação propriamente experimentais, no sentido mais tradicional do termo, mas tratando de diversificar a natureza do experimento, desde as demonstrações qualitativas para ilustrar fenômenos até a realização de medidas, passando por habilidades como fazer previsões e estimativas, usar e associar escalas, construir e interpretar gráficos e propor soluções a desafios práticos. Ainda nesse campo de competências, a busca de informações e a realização de pesquisas sobre assuntos diversos são incentivadas nessa e em outras seções, a exemplo de *Aplicações da Física e Infográficos*.

Contextualizar

Para além do domínio da linguagem científica, da compreensão e da investigação, a construção do conhecimento científico pelo aluno envolve a contextualização da Ciência, de seus problemas, de seus desdobramentos tecnológicos e sociais e de sua construção histórica.

Não faz sentido, hoje, ensinar/aprender Física sem que se lide com situações reais. Estamos imersos em um mundo de equipamentos e aparatos tecnológicos, desde os mais simples aos mais sofisticados, cujo uso prático, criativo ou crítico requer um mínimo de compreensão de seu funcionamento, de suas funções e de seus impactos.

Também vivemos problemas de ordem social e ambiental e, para que possamos compreendê-los e nos posicionar diante dos debates que os cercam, precisamos fazer uso do conhecimento físico.

Os exemplos são muitos e vão desde situações do dia a dia, ligadas aos transportes, à localização de endereços e regiões de uma cidade, a medidas associadas a condições meteorológicas, a instalações elétricas residenciais e ao uso de dispositivos em diagnósticos e tratamentos de saúde, ou ainda a problemas de maior alcance, como a geração de energia elétrica em uma região ou país, os benefícios, riscos e impactos envolvidos no uso de fontes de energia, ou questões de natu-

reza cosmológica, como evolução e vida no Universo e, finalmente, temas com impactos científicos e tecnológicos, como, por exemplo, o funcionamento de aceleradores de partículas.

Ao lado disso, a ciência como atividade humana e influenciada por interesses sociais e econômicos, cuja construção tem uma história que é parte da história do ser humano, é essencial para desmistificar a ideia de uma ciência neutra ou de um cientista que vive às margens da sociedade.

Nesse campo de competências, são habilidades propostas nos PCN+:

- compreender o conhecimento científico e o tecnológico como resultados de uma construção humana, inseridos em um processo histórico e social;
- entender a ciência e a tecnologia como partes integrantes da cultura humana contemporânea;
- reconhecer e avaliar o desenvolvimento tecnológico contemporâneo, suas relações com as ciências, seu papel na vida humana, sua presença no mundo cotidiano e seus impactos na vida social;
- reconhecer e avaliar o caráter ético do conhecimento científico e do conhecimento tecnológico e utilizar esses conhecimentos no exercício da cidadania.

Nesta obra demos especial atenção à contextualização da Física em situações ou fenômenos cotidianos e a aplicações sociais e tecnológicas nas seções *Aplicação da Física* e *Física no contexto*. Assim, procuramos dar um caráter ao conhecimento físico não justificado por si só, mas vinculado a temáticas e problemas sociais e tecnológicos. Ao apresentar tópicos de Física e tecnologias da atualidade, como nanociência e cosmologia, diagnósticos por imagem e impactos de usinas geradoras de eletricidade, a Coleção visa contribuir para a formação mais ampla do aluno, de modo que ele possa se posicionar com mais responsabilidade em relação às pesquisas científicas modernas e seus desdobramentos sociais e econômicos.

Também apresentamos elementos de caráter histórico relativos a diferentes campos da Física e à construção dessa ciência, com destaque para questões polêmicas e controversas ou mudanças de paradigmas, como ocorreu com as ideias sobre gravitação e cosmologia, com o conceito de calor, com o desenvolvimento do Eletromagnetismo, assim como com os estudos que levaram aos modelos atuais da Física moderna e contemporânea.

Interdisciplinaridade

A necessidade de articular conhecimentos disciplinares surge do fato de que os processos naturais extrapolam os saberes de uma única disciplina escolar. Além disso, algumas situações profissionais do mundo do trabalho exigem do especialista competências e conhecimentos próprios de mais de uma disciplina. Um ensino atualizado, portanto, deve ser aquele que propicia conexões entre as diferentes áreas do saber durante a busca por explicações sobre o mundo, destacando e significando conceitos e problemas comuns a todas elas.

A interdisciplinaridade nos PCN+:

> *A despeito de todas estas convergências, para se compor um programa de trabalho articulado em uma área, há difíceis obstáculos que precisam ser transpostos. Primeiro, é preciso encontrar os pontos de contato reais entre as disciplinas da área, a exemplo dos acima enumerados. Em seguida, a partir desses pontos, é preciso estabelecer as pontes e o trânsito entre as disciplinas, que nem sempre interligarão todas elas da mesma forma. Finalmente, é preciso identificar, analisar e desfazer falsas semelhanças, traduzir linguagens diferentes usadas para o mesmo objeto ou distinguir linguagens iguais usadas para identificar conceitos diferentes. Em suma, há que se compreender e trabalhar convergências e divergências, reais ou aparentes, determinar e desenvolver temáticas e métodos comuns e, com esse conhecimento, preparar o trabalho de cada disciplina e de seu conjunto.*

Nesta obra, o modo como a Coleção apresenta o conteúdo da disciplina — contextualizado, relacionado ao cotidiano, voltado à formação do cidadão, com contribuições da História e da Filosofia da Ciência — torna a relação da Física com as outras áreas do conhecimento algo natural e desejável. A proposta geral da Coleção se torna mais completa quando desenvolvida no diálogo com outras disciplinas, reforçando a sintonia com a concepção geral de ensino indicada pelos documentos oficiais.

Além da articulação com outras disciplinas da área de Ciências Naturais, Matemática e suas Tecnologias, o uso intenso da linguagem escrita nos textos e nas atividades propostas permite uma forte relação com a área de Linguagem, Códigos e suas Tecnologias.

Ao longo do desenvolvimento dos tópicos, tomamos o cuidado de apresentar aos alunos o processo humano e histórico do desenvolvimento da Física como ciência, o que permite uma interação com as Ciências Humanas e suas Tecnologias. Além da articulação implícita com outras disciplinas, a seção *Integrando...* evidencia, por meio da relação entre leis e conceitos, a conexão existente entre campos diferentes do conhecimento. Os textos dessa seção, ao mostrar pontos comuns entre as disciplinas e ao utilizar conceitos e métodos de uma delas para explicar fenômenos de outra, serve de ponto de partida para que o aluno desenvolva uma visão abrangente da natureza.

4. O papel da experimentação

As atividades experimentais, quando usadas para o ensino de Física, podem apresentar funções essenciais na construção do conhecimento, não apenas como meio de promover a compreensão de fenômenos ou "demonstrar" teorias, mas também para desenvolver competências e habilidades de investigação. Observar, elaborar hipóteses, estimar, medir, avaliar, comparar e interpretar dados e resultados são ações fundamentais para a apropriação de conhecimentos e procedimentos científicos. Essa necessidade também está claramente expressa nos PCN+:

> *É indispensável que a experimentação esteja sempre presente ao longo de todo o processo de desenvolvimento das competências em Física, privilegiando-se o fazer, manusear, operar, agir, em diferentes formas e níveis. É dessa forma que se pode garantir a construção do conhecimento pelo próprio aluno, desenvolvendo sua curiosidade e o hábito de sempre indagar, evitando a aquisição do conhecimento científico como uma verdade estabelecida e inquestionável.*
>
> PCN+ — Ensino Médio.

Sabemos da dificuldade que muitas escolas têm para realizar experimentos em sala de aula e, sobretudo, em laboratório. Grande parte de nossa rede escolar não dispõe de materiais e espaços físicos adequados. Mesmo as escolas que possuem laboratórios e equipamentos muitas vezes não os utilizam por razões diversas, tais como a falta de tempo do professor para o planejamento e a execução das atividades, a ausência de manutenção do espaço e dos equipamentos e a falta de recursos para manter e repor materiais. Entendemos, porém, que uma das maiores dificuldades esteja no preparo pedagógico do professor para que essas práticas sejam realizadas. A falta de preparo acaba por desmotivar o uso de um recurso que entendemos como fundamental para que o ensino de Física seja de qualidade. Assim, este manual, tanto na primeira quanto na segunda parte, poderá suprir um pouco dessa necessidade de formação, trazendo algumas orientações gerais e específicas sobre o uso de atividades experimentais.

É bastante comum que a "experimentação" nos processos de ensino e aprendizagem das Ciências seja entendida e praticada apenas como execução de manuais e receitas visando à "comprovação" de leis e teorias. Ou, ainda, como forma de ilustrar o chamado "método científico". No entanto, entendemos que o papel da experimentação é *mais* e *menos* do que isso. *Mais* porque essa prática didática não se limita à reprodução de experimentos com a finalidade única de comprovação de leis. *Menos* porque nem sempre essas atividades requerem espaço físico e equipamentos sofisticados.

Os meios e os tipos de experimentação podem ser diversos, desde a mera observação de fenômenos em situações do cotidiano até experimentos mais requintados. Além disso, as atividades experimentais para o ensino passam por muitas modalidades, a exemplo de experimentos com materiais de baixo custo, demonstrações, execução de medidas simples, leitura e compreensão de experimentos científicos históricos, interpretação de dados, entre outras possibilidades.

As atividades experimentais podem ser realizadas em sala de aula ou fora dela, em casa, no trajeto de casa para a escola, em um espaço ao redor da escola, em suas quadras, pátios e outros espaços. O mundo em que vivemos é, em si, um grande laboratório, pleno de possibilidades e desafios. Obviamente esse potencial todo deve ser explicado e planejado com o aluno para que seja explorado de forma que atenda às expectativas de aprendizagem, sempre com o monitoramento do docente alertando para os perigos de algum experimento.

Finalmente, outra característica importante da experimentação em ensino é sua abertura natural para o trabalho em equipe, com divisão de tarefas e troca de ideias e discussões, o que possibilita uma oportunidade de maior engajamento e protagonismo dos alunos no processo de ensino e aprendizagem.

Acreditamos e temos vivências positivas de que, mesmo diante de dificuldades relacionadas a tempo, infraestrutura e outras condições materiais e/ou humanas, é possível, em dados momentos do curso, "experimentar" experimentações. Se bem planejadas, é provável que o professor perceba a parceria dos alunos, que costumam encarar essas atividades como algo que entretém e intriga. Convidamos vocês a experimentar! Na segunda parte deste manual, apresentamos propostas nesse sentido.

Nesta obra há diferentes momentos e tópicos em que atividades investigativas podem ser praticadas. Além da própria seção *Pratique a Física*, em que sugerimos diferentes tipos de prática experimental — algumas demonstrativas, outras de verificação de conceitos, outras ainda em que habilidades de observação, medidas, organização de dados e interpretação de resultados são o foco —, há outras seções em que as atividades experimentais podem ser exploradas. Esse é o caso dos textos encontrados nas seções *Aplicações da Física*, *Integrando...*, *Infográficos*, além de alguns problemas e questões em *Verifique o que aprendeu*. Em algumas dessas passagens, há questões e sugestões de observação e de pesquisa para as quais os alunos necessitam desenvolver habilidades investigativas diversas, complementando as atividades do tipo experimental apresentadas em *Pratique a Física*.

5. O ensino com OED

O uso do computador na educação é defendido por muitos pesquisadores em todo o mundo desde a década de 1950. Pesquisadores brasileiros e documentos oficiais do MEC corroboram essa opinião enfatizando que essa prática pode contribuir positivamente com o processo de ensino e aprendizagem e que ela deve estar atrelada a uma ação conjunta entre a escola e o professor.

O uso do computador na educação está, geralmente, relacionado a situações complementares às atividades tradicionais de ensino e aprendizagem.

Um dos termos mais abrangentes para se referir ao uso de computadores e suas tecnologias na educação escolar é *Tecnologia Educativa*. Esse termo não se limita aos recursos técnicos usados no ensino; antes, considera todos os processos de concepção, desenvolvimento e avaliação da aprendizagem. Também admite o uso de computadores conectados à internet, mais particularmente à World Wide Web, sua mais forte expressão.

A aplicação da Tecnologia Educativa por meio de conteúdos digitais pode ampliar a visão do aluno para diferentes campos do saber, facilitando a execução de atividades experimentais antes consideradas de risco ou de custo elevado, mas que agora podem ser realizadas com o auxílio de aplicativos que fornecem som, imagens e interatividade com o usuário, o que torna a aula mais prazerosa e dinâmica.

As Tecnologias da Informação e Comunicação (TIC) constituem hoje uma área de pesquisa na educação. Esse campo de estudos ocupa grande parte dos trabalhos de pesquisa, das publicações, das comunicações em eventos e dos cursos de formação de professores e de pós-graduação em ensino de Ciências e Física. As TIC envolvem o uso da internet e de *softwares* educacionais de vários tipos, com numerosas aplicações, para diferentes segmentos do ensino, e vêm sendo usadas em nosso sistema educacional há anos, cada vez em maior escala, com múltiplas aplicações e concepções.

Entre as motivações e justificativas para o uso das TIC destacam-se sua contribuição para a modernização do ensino e o auxílio no desenvolvimento de habilidades essenciais para a formação do cidadão.

Entre os recursos das TIC utilizados para o ensino, os Objetos Educacionais Digitais (OEDs) vêm ganhando reconhecimento por sua simplicidade e sua adaptabilidade a diferentes meios e processos de ensino. Em termos gerais, o OED é um recurso digital a ser utilizado como auxiliar nos processos de ensino e aprendizagem, complementando atividades didático-pedagógicas.

Os OEDs podem ser apresentados e veiculados em diferentes formatos (simulações, animações, audiovisuais, áudios, hipertextos, hipermídia, infográficos, textos e jogos digitais) e aplicados em diferentes níveis e segmentos do ensino. Os OEDs podem ser inseridos e realocados em momentos distintos de um curso, são facilmente atualizados e podem ser usados em diferentes plataformas.

Além disso, trata-se de um recurso aplicável tanto na modalidade de ensino a distância como na presencial. Seu uso didático é justificado por requisitar do aluno a utilização de linguagens e formas distintas de representação, tais como textos discursivos, tabelas, gráficos e ilustrações.

Um dos tipos de OED em particular, a simulação, desempenha um papel que vem sendo reconhecido como de alto valor didático para o caso do ensino de Física, pois possibilita a visualização e a interação com determinados fenômenos e modelos abstratos a que, geralmente, o aluno tem acesso apenas pela representação estática dos livros impressos.

Além disso, diferentemente de vídeos e animações, as simulações permitem que o aluno, ao mudar parâmetros e variáveis pelo teclado, verifique as respectivas alterações ocorridas no fenômeno visualizado, o que auxilia na compreensão do significado das grandezas que descrevem tal fenômeno.

Por fim, a aprendizagem por meio de recursos digitais ainda traz uma vantagem pedagógica importante: a consulta a diversas fontes de leitura sobre um mesmo tema. Quando o estudante utiliza o OED de forma *on-line*, ele tem a sua disposição toda a informação que a internet pode oferecer. Obviamente, a orientação do professor nesse ponto é de fundamental importância para que o aluno não navegue por *sites* de pouca credibilidade autoral. No entanto, se bem orientado, o aluno pode acessar inúmeras fontes de pesquisa que tratam dos conceitos relacionados ao assunto do OED que ele está utilizando. Ele tem a possibilidade de parar para procurar outros exemplos daquilo que está estudando, ou ainda descobrir outras formas de explicar aquele mesmo conceito ou fenômeno abordado no OED, o que poderá contribuir sobremaneira para um aprendizado mais abrangente e aprofundado do conteúdo.

Em nossas sugestões de aprofundamento no final desta primeira parte do manual, o professor encontrará alguns *sites* que disponibilizam, gratuitamente, simulações e outros OEDs destinados ao ensino de Física.

6. Como a obra está organizada

Aspectos gerais da obra

Linguagem

No desenvolvimento de toda a nossa obra tivemos especial cuidado com a linguagem utilizada, procurando desenvolver os textos com correção gramatical, sintática e linguística, atentando também para um aspecto que julgamos imprescindível em livros didáticos: uma redação prática para professores e também que seja uma linguagem adequada aos alunos desta faixa etária.

Ainda quanto à leitura e compreensão dos textos, sugerimos ao professor que:

- peça aos alunos que façam leituras sistemáticas dos textos do livro em casa ou na sala de aula, principalmente das seções em que a habilidade de leitura é relevante, como é o caso de *Aplicações da Física*, *Física no contexto*, *Integrando...* e *Infográficos*;
- peça aos alunos que anotem termos que desconheçam ou sobre os quais tenham dúvidas quanto ao significado, sejam elas de natureza científico-conceitual ou não, para serem discutidos na sala de aula;
- ao iniciar um assunto ou um tópico de Física, faça levantamentos em sala de aula a respeito do que os alunos sabem e compreendem sobre o tema ou o conceito introduzido. Muitos termos usados nas Ciências e na Física têm outros usos na linguagem coloquial, e é importante estabelecer relações entre os diversos significados, aproximando o conhecimento científico daquele do senso comum ou do sentido que certas palavras têm em outros contextos. O levantamento pode ser feito também com o auxílio das três questões que abrem cada capítulo, na seção *Para iniciar a conversa*. Feitos esses levantamentos, procure debater os diferentes entendimentos e concepções dos alunos;
- peça aos alunos que respondam às questões propostas no livro e elaborem as próprias questões para posterior debate em sala de aula.

Desenvolvimento conceitual

De maneira geral, procuramos salientar a natureza física dos princípios e dos fenômenos em estudo, enfatizando a origem e a evolução dos conceitos, dos modelos e das teorias, ressaltando, em particular, seus aspectos históricos. Seguindo essa linha, temos observado que não só tornamos a compreensão da Física menos árida, levando os alunos a se entusiasmar pelos estudos dela, como a aprendizagem torna-se mais eficaz e significativa. Os alunos, muitas vezes, ao tomarem contato com concepções históricas de conceitos ou modelos físicos, os identificam com as próprias concepções, o que pode auxiliar na compreensão dos modelos atuais. Além disso, esse processo de identificação com a forma de pensamento de outras épocas contribui para que o aluno desenvolva uma visão dinâmica e social da construção da ciência, superando a concepção comum de uma ciência neutra e desvinculada de interesses sociais e econômicos.

Recomendamos ao professor fugir de abordagens com excesso de formalismo. Por esse motivo, sugerimos que ele evite enunciar os princípios como se fossem "postulados", enunciar suas consequências como "teoremas" e restringir suas explicações à solução de problemas numéricos.

Também evitamos a apresentação extremamente sucinta dos conhecimentos, pois isso impede que os estudantes alcancem uma compreensão satisfatória deles, confundindo a aprendizagem com a simples memorização. Nesse sentido, cabe a cada professor avaliar a extensão e a profundidade com que pode trabalhar o livro, fazendo escolhas adequadas ao tempo de que dispõe, aos conhecimentos prévios dos estudantes e aos objetivos a serem alcançados.

Estrutura

Como discutimos no início dessas orientações, tanto o Ensino Fundamental como o Ensino Médio em nosso país têm passado por várias mudanças nos últimos anos. E, como não poderia deixar de ser, o ensino da Física é parte dessas mudanças. Por meio de contato direto com um grande número de professores e escolas e de um grande número de pesquisas na área, detectamos alguns aspectos dessas mudanças que dificultam a tarefa dos professores e o aprendizado dos estudantes e procuramos atenuá-los. A diversidade de carga horária destinada ao ensino de Física em cada escola leva os professores a enfrentar conteúdos programáticos muito distintos. Nessas circunstâncias, a escolha de um livro-texto que se adapte a essa diversidade torna-se necessária.

Os volumes desta Coleção foram desenvolvidos com o propósito de levar os conceitos fundamentais dessa ciência a todos os estudantes — nosso sonho de uma "Física para todos". Estamos convencidos de que mesmo aqueles que não necessitam diretamente de conhecimentos físicos em suas profissões ou em outras atividades devem ter acesso a eles e deles se apropriar. Em razão desse encaminhamento, os textos foram elaborados seguindo alguns critérios:

- no início de todos os capítulos, apresentamos o boxe *Para iniciar a conversa* com o objetivo de problematizar o assunto a ser tratado no capítulo e promover uma aproximação desse assunto com os conhecimentos prévios dos alunos. Recomendamos ao professor que trabalhe as ideias apresentadas nessa seção e acrescente exemplos e questões que considerar relevantes;

- em cada seção, procuramos ressaltar a Física presente no cotidiano dos estudantes, focalizando fenômenos e processos interessantes e úteis. Essa preocupação tem especial destaque nas seções *Física no contexto*, *Aplicações da Física*, *Integrando* e *Infográficos*. Em todas elas são apresentados aspectos diversos de aplicações ou contextualizações dos conhecimentos trabalhados no capítulo, com questões ou sugestões de pesquisas a serem desenvolvidas tanto em casa como em sala de aula. É importante destacar que tais seções são muito importantes na condução do aprendizado, não devendo, portanto, ser entendidas como suplementos extras ou dispensáveis;
- preocupamo-nos em dar ênfase às leis gerais, reduzindo substancialmente as informações de caráter específico, evitando ao máximo a pura memorização dessas leis e ressaltando seu poder explicativo dos fenômenos em estudo. Para isso, recorremos ao uso de linguagem usual e redação concisa, de maneira a torná-la acessível e a não enfadar os estudantes;
- todos os conceitos, resultados ou conclusões considerados relevantes estão apresentados em destaque para que os estudantes possam perceber os aspectos fundamentais de cada assunto tratado. Muitas vezes, constituem uma síntese da seção, auxiliando em sua compreensão. Memorizar o que está sendo estudado, em algumas situações, pode ser importante, desde que não seja a única habilidade desenvolvida na aprendizagem;
- praticamente em todas as seções estão incluídos exemplos, com questões ou problemas resolvidos detalhadamente. O objetivo aqui é consolidar o entendimento das ideias apresentadas e o processo sequencial que foi seguido;
- as atividades de avaliação (exercícios, testes, questões e problemas) estão presentes em diversos níveis e em duas seções: *Verifique o que aprendeu* e *Problemas e testes*. Essa variedade de atividades dá condições ao professor de planejar a análise e a discussão dos exercícios de acordo com a realidade da escola e dos alunos. Além disso, os diferentes níveis de dificuldade lhe permitem trabalhar com a diversidade de cognição dos estudantes, fato comum em classes com elevado número de alunos.

A seguir apresentamos comentários específicos de algumas seções da obra.

Verifique o que aprendeu

Esta série de exercícios está presente no final de cada seção e é indispensável para a aprendizagem do conteúdo estudado. Nesta seção, os alunos poderão dominar as ideias apresentadas antes de serem introduzidos a novos conceitos ou informações.

Os exercícios desta seção contribuem significativamente para desmistificar a dificuldade que alguns estudantes costumam associar ao estudo da Física.

Além disso, esses exercícios criam uma passagem para a resolução de problemas mais elaborados, propostos posteriormente, estabelecendo transições suaves entre os níveis de dificuldade. É recomendável resolver os exercícios relativos a uma dada seção antes de iniciar o estudo da seção seguinte.

Problemas e testes

Os problemas e testes propostos estão apresentados em número suficiente para que o professor possa selecionar aqueles que julgar mais significativos para o curso e mais adequados ao desenvolvimento da classe.

Em todas as atividades avaliativas, mas principalmente na resolução de problemas, é importante incentivar os alunos a ler cuidadosamente o enunciado para identificar as informações e os dados relevantes da situação proposta (o problema propriamente dito), para que estabeleçam estratégias de solução. Também é essencial que, ao chegarem a um resultado, os alunos avaliem sua pertinência, comparem seu resultado com os resultados de colegas e discutam as suas respostas. Nem sempre essa prática é frequente nas aulas de Física, e muitas vezes os alunos chegam a resultados descabidos (como valores e dimensões fora da realidade) e não se preocupam em rever suas soluções.

Pratique Física

Como já destacamos, um dos pontos de preocupação dos educadores que se dedicam ao ensino de Ciências é a ausência quase total de atividades experimentais oferecidas ao longo dos cursos. Também já observamos que em muitas de nossas escolas a falta de laboratórios, materiais, tempo e estímulo aos professores para o preparo das aulas práticas é um fato.

Considerando esse quadro, na seção *Pratique Física* propomos algumas experiências simples que possibilitam aos professores dar caráter experimental ao curso sem necessidade de salas especiais. Reforçamos que as atividades experimentais são indispensáveis a qualquer curso de Física, mesmo que a escola não disponha de laboratórios apropriados. Muitos dos experimentos propostos na obra requerem material simples e podem, eventualmente, ser propostos como tarefas a serem feitas em casa.

Relembramos que o trabalho experimental pode ser usado sempre como um recurso poderoso para auxiliar na compreensão e na aprendizagem significativa dos assuntos em estudo, lembrando-se sempre dos cuidados a serem tomados e também de que esses experimentos devem ser realizados sob a orientação do professor. Por isso, as experiências devem ser consideradas atividades obrigatórias, devidamente valorizadas e incluídas nas avaliações.

Em situações em que os alunos possam fazer as atividades em casa, sempre sob a orientação do responsável, sugerimos que o professor peça a eles que elaborem breves relatórios da prática realizada e troquem seus resultados ou dúvidas. No entanto, sempre que possível, recomendamos que os experimentos sejam desenvolvidos na sala de aula, em equipe, ou, quando for mais adequado, sob a forma de demonstrações pelo professor.

Nessas atividades é desejável incentivar os alunos a elaborar hipóteses e previsões acerca do fenômeno ou da situação proposta, a estimar ordens de grandeza e dimensões, a escolher instrumentos de medida apropriados, a usar escalas e unidades de medidas adequadas para apresentar dados e a construir tabelas, gráficos ou outras formas de organização de dados e resultados. Conforme a natureza da atividade, desde as mais simples até as mais complexas, uma ou mais dessas habilidades são essenciais para que a prática não seja apenas uma tarefa "burocrática", mas sim que desperte a vontade de aprender e de investigar e faça sentido no contexto do conhecimento que está sendo tratado.

As demonstrações geralmente são recebidas com entusiasmo pelos estudantes e podem ser realizadas utilizando-se diversos tipos de material encontrado na própria escola ou em casa, em lojas de brinquedos, em armarinhos, em oficinas e outros estabelecimentos. Também nesse caso sugerimos que sejam propostas questões e desafios para os alunos, incentivando-os a fazer previsões e apresentar suas próprias explicações sobre o que observaram.

Ainda como parte do "praticar", as visitas a museus e centros de ciências ou outros espaços similares são importantes e motivam os jovens a conhecer e aprender. Sempre que possível, esse tipo de atividade é recomendável. Se na cidade onde a escola se localiza não houver espaços como esses, outras visitas que complementam e enriquecem o aprendizado, ampliando o sentido do ensino, podem ser feitas. É o caso, por exemplo, de uma usina geradora de eletricidade (hidrelétrica, termelétrica ou outra), de uma oficina mecânica, de uma assistência técnica de eletrodomésticos, de indústrias diversas, de uma estação de tratamento de água, etc. Na bibliografia recomendada aos alunos e nas referências apresentadas neste manual são citados livros com sugestões referentes a atividades experimentais, assim como sugestões de *sites* na internet, de museus e centros de ciências, parques e visitas diversas.

Como a carga horária dos cursos de Física varia muito de uma escola para outra, sugerimos ao professor que selecione e planeje previamente todas as atividades propostas na seção *Pratique Física*, para que possa avaliar se são compatíveis com a duração e o perfil de seu curso.

Aplicações da Física

A seção *Aplicações da Física* apresenta textos que permitem ao aluno relacionar o que está estudando com o que vê em casa, na rua, no céu, na TV, ou seja, em sua vida. Podem tratar de aspectos práticos, como situações de risco e de controle de velocidade, do funcionamento de aparatos tecnológicos, como uma câmera fotográfica, um medidor de energia elétrica residencial, a formação da imagem em um aparelho de TV ou o funcionamento de um GPS, da radiação *laser* ou de um coletor solar ou, ainda, de aspectos socioambientais, como o destino do lixo nuclear no Brasil.

Tão importantes quanto a leitura são as discussões das questões propostas, que problematizam os temas em questão. Sugerimos que sejam feitas de preferência na sala de aula, individualmente ou em grupos. No caso de não dispor de tempo para isso, sugerimos ao professor que, em seu planejamento, escolha pelo menos alguns dos textos que considera interessantes para serem trabalhados em sala de aula no semestre ou no ano letivo, indicando a leitura de outros como atividade para casa, se for o caso.

Física no contexto

Esta seção apresenta textos complementares aos assuntos tratados no capítulo que contextualizam o assunto em estudo, desenvolvem aspectos históricos ou apresentam exemplos do cotidiano, tecnologias atuais ou curiosidades da Física.

Sugerimos que a leitura desta seção seja feita em conjunto, na sala de aula. Os assuntos abordados nela devem ser considerados como parte integrante do capítulo, e acreditamos que sua omissão reduz consideravelmente o conhecimento de que o aluno pode se apropriar. Assim, recomendamos que esta seção seja valorizada pelo professor, trabalhada pelos alunos e incluída nas avaliações.

Integrando

Esta seção tem como objetivo fornecer subsídios para que o aluno perceba a relação entre os assuntos estudados nas diferentes disciplinas escolares e, a partir da integração desses assuntos, desenvolva uma visão abrangente e unificada da natureza e de seus fenômenos. Para tanto, ela traz textos que evidenciam as conexões entre conceitos e temas de diferentes áreas do conhecimento, chamando atenção para convergências e divergências entre eles. Os textos são sempre acompanhados de sugestões de pesquisas e orientações gerais relacionadas ao assunto.

A despeito de todo problema que a fragmentação da ciência em disciplinas escolares possa acarretar, sua unificação não é de forma alguma uma tarefa simples. Assim, tendo em vista um uso mais proveitoso da seção, recomendamos a participação conjunta de professores das diferentes disciplinas em foco no texto. Caso essa articulação não seja possível, ainda assim acreditamos que os textos, quando lidos e debatidos em sala de aula sob a orientação do professor de Física, constituem um recurso favorável à ampliação do entendimento de conceitos e fenômenos.

Infográficos

Esta seção, apresentada no final de cada unidade, em páginas duplas, promove o exercício da leitura e interpretação de diferentes formas de linguagem. Utiliza a contextualização e a aplicação do conhecimento físico em sistemas, processos e aparatos tecnológicos atuais, tais como plantas de geração de energia, funcionamento de um submarino nuclear e do metrô, etc.

7. Painel da Coleção

No quadro a seguir apresentamos a sequência dos tópicos abordados em cada volume, bem como as respectivas seções de leitura de cada capítulo.

Volume	Unidade	Capítulos
1	**1 — A abrangência da Física**	**1.** MEDIDAS *Aplicações da Física*: A nanorrevolução. *Integrando*: Ciências Naturais. *Infográfico*: Ultraman Triatlo.
	2 — Cinemática	**2.** MOVIMENTO RETILÍNEO *Física no contexto*: Galileu Galilei. *Aplicações da Física*: Medindo a velocidade no trânsito. *Integrando*: Ciências Naturais. **3.** VETORES — MOVIMENTO CURVILÍNEO *Aplicações da Física*: Mapas de ruas e a tecnologia GPS. *Infográfico*: Como funciona a energia eólica?
	3 — Leis de Newton	**4.** PRIMEIRA E TERCEIRA LEIS DE NEWTON *Física no contexto*: Isaac Newton. *Aplicações da Física*: O atrito pode ser útil. **5.** SEGUNDA LEI DE NEWTON *Física no contexto*: Queda dos objetos com resistência do ar. *Integrando*: Força e contração muscular. **6.** GRAVITAÇÃO UNIVERSAL *Aplicações da Física*: A atração da Terra está dirigida para seu centro. *Infográfico*: Como funciona o metrô?
	4 — Leis da Conservação	**7.** CONSERVAÇÃO DE ENERGIA *Física no contexto*: Economizando energia elétrica; A casa sustentável: o futuro que já chegou. *Aplicações da Física*: Ao dirigir, mantenha distância, pois E_c é proporcional a V^2. *Integrando*: Força muscular e energia. **8.** CONSERVAÇÃO DE QUANTIDADE DE MOVIMENTO *Física no contexto*: Estabelecimento do conceito de quantidade de movimento. *Aplicações da Física*: O impulso e a quantidade de movimento no nosso dia a dia. **9.** HIDROSTÁTICA E HIDRODINÂMICA *Física no contexto*: O problema de Arquimedes; A sustentação das aeronaves; O gol olímpico. *Aplicações da Física*: Dispositivos para observar o fundo dos oceanos; Densímetros. *Infográfico*: Submarino nuclear.

Volume	Unidade	Capítulos
2	**1 — Temperatura — Dilatação**	**1.** TEMPERATURA E DILATAÇÃO *Física no contexto*: Fenômeno de dilatação; Congelamento da água. *Aplicações da Física*: A lâmina bimetálica; Avanços na tecnologia da medida e do controle da temperatura. **2.** COMPORTAMENTO DOS GASES *Física no contexto*: Por que o balão sobe na atmosfera? *Aplicações da Física*: O planeta como uma grande estufa. *Integrando:* Conceitos para entender o congelamento da água. *Infográfico*: Como funciona um dirigível?
	2 — Calor	**3.** TERMODINÂMICA *Física no contexto:* Condução de calor; Correntes de convecção; Absorção e reflexão da radiação térmica; Calor específico e temperatura ambiente; Entropia – Indisponibilidade da energia. *Aplicações da Física*: Câmaras termográficas. *Integrando:* Termodinâmica e o corpo humano. **4.** MUDANÇAS DE FASE *Física no contexto*: Materiais de estrutura pouco comum. *Aplicações da Física*: Aquecimento global do planeta. *Infográfico*: Como funciona uma refinaria de petróleo?
	3 — Óptica e ondas	**5.** REFLEXÃO DA LUZ *Física no contexto*: Eclipse do Sol e da luz; Câmara escura de orifício; O forno solar; O espelho de Arquimedes. *Aplicações da Física*: Reflexão em câmeras fotográficas. **6.** REFRAÇÃO DA LUZ *Física no contexto*: Aplicações da refração; O arco-íris. *Aplicações da Física*: Microscopia moderna. *Integrando:* Imagem e o sentido da visão. **7.** MOVIMENTO ONDULATÓRIO *Física no contexto*: O pêndulo de Foucault; As ondas do mar ao longo da costa; Polarização da luz; A fala humana; A expansão do Universo; Medidas de velocidade por efeito Doppler. *Infográfico*: Como é feita a gravação de uma música?

Volume	Unidade	Capítulos
3	**1 — Campo e potencial elétrico**	**1.** CARGA ELÉTRICA *Física no contexto*: As experiências de Coulomb com a balança de torção. *Aplicações da Física*: Pintura eletrostática a pó. *Integrando:* A força elétrica e a matéria. **2.** CAMPO ELÉTRICO *Aplicações da Física*: Como funcionam os para-raios. **3.** POTENCIAL ELÉTRICO *Física no contexto*: Napoleão Bonaparte e o conde Alessandro Volta; Por que os pássaros não tomam choque ao pousar nos fios? *Aplicações da Física*: Diferença de potencial na Medicina. *Infográfico*: Como funciona o carro elétrico?
	2 — Circuitos elétricos de corrente contínua	**4.** CORRENTE ELÉTRICA *Física no contexto*: Efeitos da corrente elétrica; O efeito joule no cotidiano do ser humano; Analogia mecânica para a primeira lei de Ohm; Curto-circuito; Riscos e cuidados nas instalações elétricas; Supercondutividade a altas temperaturas. *Aplicações da Física*: Medida da energia elétrica usada em uma residência. **5.** FORÇA ELETROMOTRIZ — EQUAÇÃO DO CIRCUITO *Integrando:* A pilha de Daniell e o gerador. *Infográfico*: Como funciona o computador?
	3 — Eletromagnetismo	**6.** O CAMPO MAGNÉTICO *Física no contexto*: Recursos de inclusão social para deficientes auditivos; Os cíclotrons. *Aplicações da Física*: O motor de corrente contínua. **7.** ALTERAÇÕES DO CAMPO MAGNÉTICO *Física no contexto*: A magnetosfera. *Aplicações da Física*: Como se forma a imagem em um tubo de TV. *Integrando:* A Física e a forma como os seres vivos se orientam no espaço. **8.** INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA — ONDAS ELETROMAGNÉTICAS *Física no contexto*: Usinas geradoras de energia elétrica; As unificações das teorias físicas. *Aplicações da Física*: Densitometria óssea. *Infográfico*: Qual o impacto ambiental da instalação de uma hidrelétrica?
	4 — Física contemporânea	**9.** TEORIA DA RELATIVIDADE E FÍSICA QUÂNTICA *Física no contexto*: Matéria e antimatéria. *Aplicações da Física*: GPS — Sistema de Posicionamento Global; Amplificação da luz por emissão estimulada de radiação — *Laser.* *Integrando:* O fazer ciência ao mundo moderno. *Infográfico*: Destino do rejeito radioativo das usinas brasileiras.

8. Referências de apoio e aprofundamento

Documentos oficiais

BRASIL. Ministério da Educação. Secretaria de Educação Média e Tecnológica. *Parâmetros Curriculares Nacionais:* Ensino Médio. Área de Ciências Naturais, Matemática e suas Tecnologias. Brasília, 1999.

BRASIL. Ministério da Educação. Secretaria de Educação Média e Tecnológica. *PCN+ Ensino Médio:* Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais. Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias. Brasília, 2002.

_____. Ministério da Educação. Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais (Inep). *Exame Nacional do Ensino Médio (Enem):* documento básico, 2002. Brasília, 2001.

_____. Ministério da Educação. Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais (Inep). *Exame Nacional para Certificação de Competências de Jovens e Adultos (Encceja)*. Brasília, 2002.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Estado da Educação. *Caderno do professor, Física, Ensino Médio*. São Paulo, 2008.

Educação e currículo

AQUINO, Júlio Groppa (Org.). *Erro e fracasso na escola.* Alternativas teóricas e práticas. 2. ed. São Paulo: Summus, 1997.

BAGNO, Marcos. *A pesquisa na escola:* o que é e como se faz. 5. ed. São Paulo: Loyola, 2000.

BOGDAN, R.; BIKLEN, S. *Investigação qualitativa em Educação:* uma introdução à teoria e aos métodos. Porto: Porto Editora, 1994. (Colecção Ciências da Educação, v. 12).

BRANSFORD, J. D.; BROWN, A. L.; COCKING, R. R. *Como as pessoas aprendem:* cérebro, mente, experiência e escola. Tradução de Carlos David Szlac. São Paulo: Senac, 2007.

BUSQUETS, Maria Dolores et al. *Temas transversais em educação:* bases para uma formação integral. Tradução de Cláudia Schilling. 5. ed. São Paulo: Ática, 1999.

CONTENTE, M. *A leitura e a escrita:* estratégia de ensino para todas as disciplinas. Lisboa: Editorial Presença, 2000.

DEFFUNE, Deisi; DEPRESBITTERIS, Léa. *Competências, habilidades e currículos da educação profissinal:* crônicas e reflexões. São Paulo: Senac São Paulo, 2000.

DELORS, Jacques. *Educação:* um tesouro a descobrir. Brasília: Unesco; São Paulo: Cortez, 1998.

DEMO, Pedro. *A nova LDB:* ranços e avanços. 6. ed. Campinas: Papirus, 1997. (Coleção Magistério: formação e trabalho pedagógico).

FAZENDA, I. C. A. *Interdisciplinaridade:* história, teoria e pesquisa. 10. ed. Campinas: Papirus, 2002.

FORQUIN, J.-C. *Escola e cultura:* as bases epistemológicas do conhecimento escolar. Porto Alegre: Artes Médicas, 1993.

FREIRE, Paulo. *Educação como prática da liberdade*. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 1971.

_____. *Pedagogia da autonomia*. São Paulo: Paz e Terra, 1996.

GADOTTI, Moacir. *Escola cidadã*. 4. ed. São Paulo: Cortez, 1997. (Questões da nossa época).

GOODSON, I. F. *As políticas de currículo e de escolarização*. Petrópolis: Vozes, 2008.

JAPIASSU, H. *Interdisciplinaridade e patologia do saber*. Rio de Janeiro: Imago, 1976. (Logoteca).

LEWIS, John L. *O ensino da Física escolar*. São Paulo: Martins Fontes, 1972. 3 v.

LOPES, A. C. *Políticas de integração curricular*. Rio de Janeiro: Editora da Uerj, 2008.

MACEDO, L. de. Situação-problema: forma e recurso de avaliação, desenvolvimento de competências e aprendizagem escolar. In: PERRENOUD, P. et al. *As competências para ensinar no século XXI*. Porto Alegre: Artmed, 2002.

MORIN, Edgar. *A religação dos saberes.* O desafio do século XXI. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2002.

_____. *Os sete saberes necessários à educação do futuro*. São Paulo: Cortez, 2000.

NEVES, I. C. B. et al. *Ler e escrever:* compromisso de todas as áreas. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS, 2001.

PERRENOUD, Philippe. *Construir as competências desde a escola*. Porto Alegre: Artmed, 1999.

_____. *Ensinar:* agir na urgência, decidir na incerteza. Porto Alegre: Artmed, 2001.

_____. et al. *As competências para ensinar no século XXI*. Porto Alegre: Artmed, 1999.

PINSKY, Jaime. *Cidadania e educação*. 4. ed. São Paulo: Contexto, 2000.

SAVIANI, Dermeval. *Educação:* do senso comum à consciência filosófica. São Paulo: Cortez, 1980.

VENTURA, Fernando H. Monserrat. *A organização do currículo por projetos de trabalho.* O conhecimento é um caleidoscópio. 5. ed. Porto Alegre: Artmed, 1998.

Formação de professores

ABIB, M. L. V. S. *Construção de conhecimentos sobre ensino na formação inicial do professor de Física*. Tese (Doutorado em Educação) — Faculdade de Educação da USP, São Paulo, 1997.

BARBE, J. et al. Didactic restrictions on the teacher's practice: the case of limits of functions in spanish high schools. *Educational Studies in Mathematics*, v. 59, n. 1-3, p. 235-268, 2005.

BROUSSEAU, G. Fondements et méthodes de la didactique des mathématiques. *Reserches en Didactique des mathématiques*, Grenoble, v. 7, n. 2, p. 33-115, 1986.

CARVALHO, Anna Maria P. de. Reformas nas licenciaturas: a necessidade de uma mudança de paradigma mais do que de mudança curricular. *Em Aberto*, Brasília, ano 12, n. 54, abr./jun. 1992.

_____; GIL-PEREZ, D. *Formação de professores de Ciências*. São Paulo: Cortez, 1995.

CHEVALLARD, Y. El análisis de las prácticas docentes en la teoría antropológica de lo didáctico. *Reserches en Didactique des mathématiques*, Grenoble, v. 19, n. 2, p. 221-266, 1999.

_____. *La Transposición Didáctica:* Del saber sabio al saber enseñado. Buenos Aires: Aique Grupo Editor, 1991.

_____. Readjusting Didactics to a Changing Epistemology. *European Educational Research Journal*. Marseilles, v. 6, n. 2, p. 131-134, 2007.

_____; BOSCH, M.; GASCON, J. *Estudar matemáticas:* o elo perdido entre o ensino e a aprendizagem. Tradução de Dayse Vaz de Moraes. Porto Alegre: Artmed Editora, 2001.

CONTRERAS, J. *Autonomia de professores*. São Paulo: Cortez, 2002.

DIOGO, R. C.; OSÓRIO, A. S.; SILVA, D. R. R. *A teoria antropológica do didático*: possibilidades de contribuição ao ensino de Física. In: VI ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS, 2007, Florianópolis — SC. Anais do VI Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências. Belo Horizonte: Abrapec, 2007.

LABURÚ, C. E.; ARRUDA, S. M.; NARDI, R. Pluralismo metodológico no ensino de ciências. *Ciência & Educação*. Bauru, v. 9, n. 2, p. 247-260, 2003.

MACHADO, S. D. A. Contrato didático. In: MACHADO, S. D. A. *Educação matemática:* uma introdução. São Paulo: Educ, 1999. p. 43-64.

MACHADO, V. M. *Prática de estudo de ciências:* formação inicial docente na unidade pedagógica sobre a digestão humana. 2011. 268 f. Tese (Programa de pós-graduação em educação) — Centro de Ciências Humanas e Sociais, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2011.

MENEZES, L. C. (Org.). *Formação continuada de professores de Ciências:* no âmbito ibero-americano. São Paulo: Autores Associados/Nupes, 1996. (Coleção Formação de professores).

MOREIRA, M. A. A teoria dos campos conceituais de Vergnaud, o ensino de Ciências e a pesquisa nesta área. *Investigações em ensino de Ciências*, Porto Alegre, v. 7, n. 1, p. 7-29, 2002.

RICARDO, E. C. *As Relações com os saberes nas situações didáticas e os obstáculos à aprendizagem*. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ENSINO DE FÍSICA, 15, 2003, Curitiba. Atas do XV SNEF, 2003, p. 586-592.

_____. *Competências, interdisciplinaridade e contextualização:* dos Parâmetros Curriculares Nacionais a uma compreensão para o ensino das ciências. 2005. 257 f. Tese (Programa de Pós-Graduação em Educação Científica e Tecnológica) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

SAVIANI, D. Formação de professores: aspectos históricos e teóricos do problema no contexto brasileiro. *Revista Brasileira de Educação*, v. 14, n. 40, p. 143-155, jan./abr. 2009.

SCHIVANI, M.; PIETROCOLA, M. *Robótica educacional no ensino de Física*: estudo preliminar sob uma perspectiva praxeológica. In: XIV ENCONTRO DE PESQUISA EM ENSINO DE FÍSICA, 2012, Maresias, SP. Anais do XIV Encontro de Pesquisa em Ensino de Física. Maresias, 2012.

TARDIF, M. *Saberes docentes e atuação profissional*. São Paulo: Vozes, 2010.

ZIMMERMANN, E.; BERTANI, J. A. Um novo olhar sobre os cursos de formação de professores. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 20, n. 1, p. 43-62, abr. 2003.

O livro didático

CRUZ, E.S. *A noção de variável em livros didáticos de ensino fundamental:* um estudo sob a ótica da organização praxeológica. 2005. 105 F. Dissertação (Mestrado em Educação Matemática) — Pontifícia Universidade Católica, São Paulo, 2005.

FREITAG, Bárbara et al. *O livro didático em questão*. São Paulo: Cortez, 1989.

KURNAZ, M. A.; ARSLAN, A. S. Praxeological Analysis of the Teaching Conditions of the Energy Concept. *Cypriot Journal of Education Sciences*, Kyrenia, v. 5, n. 4, p. 233-242, 2010.

OLGA, Molina. *Quem engana quem? Professor × livro didático*. Campinas: Papirus, 1987.

POISSON, C. *Mathematical and Didactic Organization of Calculus Textbooks:* an extended project in the department of mathematics and statistics. 2011. 83 f. Dissertação de Mestrado em ensino de matemática. Universidade de Concordia, Montreal, Canadá, 2011.

VALENZUELA, S. T. F. *O uso de dispositivos didáticos para o estudo de técnicas relativas a sistema de equações lineares no Ensino Fundamental*. 2007. 152 f. Dissertação (Programa de Pós-graduação — Mestrado em Educação) — Centro de Ciências Humanas e Sociais, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2007.

WUO, Wagner. *A Física e os livros:* uma análise do saber físico nos livros didáticos adotados para o Ensino Médio. São Paulo: Educ/Fapesp, 2000.

Informática de informação e comunicação no ensino e OED

ALMEIDA, Fernando José de. *Educação e informática:* os computadores na escola. São Paulo: Cortez/Autores Associados, 1998. (Coleção Polêmicas do nosso tempo).

BULEGON, Ana Marli. *Contribuições dos objetos de aprendizagem, no ensino de Física, como recursos didáticos para a construção e/ou desenvolvimento do pensamento crítico e da aprendizagem significativa*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

CARVALHO NETO, C. Z. *Educação digital*: paradigmas, tecnologias e complexmedia dedicada à gestão do conhecimento. Tese (Doutorado) — defendida no Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Gestão do Conhecimento da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, 2011.

FERRÉS, Joan. *Vídeo e educação*. Tradução de Juan Acuña Liorens. Porto Alegre: Artes Médicas, 1996.

LOLLINI, Paolo. *Didática & computador:* quando e como a informática na escola. Tradução de Antonio Vietti e Marcos J. Marcionilo. São Paulo: Loyola, 1991.

PAPERT, Seymor. *A máquina das crianças:* repensando a escola na era da informática. Tradução de Sandra Costa. Porto Alegre: Artes Médicas, 1994.

Ensino e aprendizagem de Ciências/Física

ASTOLFI, P.; DEVELAY, M. *A didática das ciências*. São Paulo: Papirus, 1995.

CARVALHO JÚNIOR, G. D. *Aula de Física:* do planejamento à avaliação. São Paulo: Livraria da Física, 2011.

CASTRO, Amélia Domingues de; CARVALHO, Anna Maria Pessoa de (Org.). *Ensinar a ensinar:* didática para a escola fundamental e média. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2001.

DELIZOICOV, Demétrio; ANGOTTI, J. A.; PERNANBUCO, M. M. *Ensino de Ciências:* fundamentos e métodos. São Paulo: Cortez, 2002.

_____; ANGOTTI, José André. *Física*. São Paulo: Cortez, 1991. (Coleção Magistério 2º grau. Série Formação Geral).

_____. et al. *Pesquisa em ensino de Ciências:* abordagem social. São Paulo: Cortez, 2002.

GARCIA, Nilson Marcos Dias et al. (Org.). *A pesquisa em ensino de Física e a sala de aula:* articulações necessárias. São Paulo: Livraria da Física, 2012.

HAMBURGER, Ernst W.; MATOS, Cauê (Org.). *O desafio de ensinar Ciências no século XXI*. São Paulo: Imprensa Oficial/ Estação Ciência, 2000.

_____; SMOLKA, A. L. B. (Org.). *Linguagem, cultura e cognição*. Belo Horizonte: Autêntica, 2001.

NARDI, Roberto. *Pesquisas em ensino de Física*. São Paulo: Escrituras, 2001.

_____. (Org.). *Pesquisa em ensino de Ciências e Matemática*. Bauru: Unesp, 1996. (Ciências e Educação).

_____. (Org.). *Questões atuais no ensino de Ciências*. São Paulo: Escrituras, 1998. (Educação para a Ciência). v. 2.

PIAGET, Jean. *Seis estudos de Psicologia*. Tradução de Maria Alice Magalhães D'Amorim e Paulo Sérgio Lima Silva. Rio de Janeiro: Forense Universitária, 1997.

PIETROCOLLA, Maurício (Org.). *Ensino de Física:* conteúdo, metodologia e epistemologia numa concepção integrada. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2001.

VIGOTSKI, L. S. et al. *Linguagem, desenvolvimento e aprendizagem*. São Paulo: Ícone, 2001.

Experimentação

ALVES FILHO, J. P. *Atividades experimentais:* do método à prática construtivista. 2000. 302 f. Tese (Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Educação) — Centro de Ciências da Educação, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2000.

ARAÚJO, M. S. T. D.; ABIB, M. L. V. D. S. Atividades experimentais no ensino de Física: diferentes enfoques, diferentes finalidades. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 25, n. 2, p. 176-194, jun. 2003.

ARRIBAS, Santos Diez. *Experiências de Física ao alcance da escola*. Passo Fundo: UFP, 1987.

BORGES, A. T. Novos rumos para o laboratório escolar de Ciências. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*. Florianópolis, v. 19, n. 3, p. 291-313, dez. 2002.

BROSS, Ana Maria Marques. *Recuperação da memória do ensino experimental de Física na escola secundária brasileira:* produção, utilização, evolução e preservação dos equipamentos. Dissertação (Mestrado) — Instituto de Física e Faculdade de Educação da USP, São Paulo, 1990.

CADERNO BRASILEIRO DE ENSINO DE FÍSICA. v. 21. Edição Especial. Nov. 2004.

CASH, Terry et al. *175 More Science Experiments*. New York: Random House, 1999.

CERBARO, B. Q.; ROCHA FILHO, J. B. *Experimentos para Ensino Médio de Física:* compilando e testando experimentos didáticos no contexto curricular. In: SALÃO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 10, 2009, Porto Alegre. Anais do X Salão de Iniciação Científica. Porto Alegre, 2009, p. 1118-1120.

CRESTANA, Silverio; CASTRO, Miriam Goldman de; PEREIRA, Gilson R. de M. (Org.). *Centros e museus de Ciência*: visões e experiências; subsídios para um programa nacional de popularização da Ciência. São Paulo: Saraiva/Estação Ciência, 1998.

GASPAR, A.; MONTEIRO, I. C. C. Atividades experimentais de demonstração em sala de aula: uma análise segundo o referencial da teoria de Vygotsky. *Investigação em Ensino de Ciências*, Porto Alegre, v. 10, n. 2, p. 227-254, 2005.

LABURÚ, C. E.; BARROS, M. A.; KANBACH, B. G. A relação com o saber profissional do professor de Física e o fracasso da implementação de atividades experimentais no ensino médio. *Investigação em Ensino de Ciências*, Porto Alegre, v. 12, n. 3, p. 305-320, 2007.

MORTENSEN, M. F. Analysis of the Educational Potential of a Science Museum Learning Environment: Visitors' experience with and understanding of an immersion exhibit. *International Journal of Science Education*, v. 33, n. 4, p. 517-545, 2011.

PSSC (Physical Science Study Committee). *Física*. Brasília: Universidade de Brasília, 1966.

SMITH, A. *The Usborne Big Book of Experiments*. London: Usborne, 1996.

VALADARES, Eduardo Campos de. *Física mais que divertida:* inventos eletrizantes baseados em materiais reciclados e de baixo custo. Belo Horizonte: Ed. da UFMG/Inep, 2000.

História e Filosofia da Ciência

ALVES, Rubem. *Filosofia da Ciência:* introdução ao jogo e suas regras. São Paulo: Brasiliense, 1982.

BACHELARD, Gaston. *O novo espírito científico*. Rio de Janeiro: Tempo Brasileiro, 1968.

_____. *Epistemologia*. Trechos escolhidos por D. Lecourt. Rio de Janeiro: Zahar, 1977.

BAKHTIN, Mikhail (V. N. Volochinov). *Marxismo e filosofia da linguagem*. São Paulo: Hucitec/Anna Blume, 2002.

BERNAL, J. D. *Ciência na História*. Lisboa: Livros Horizonte, 1969. 7 v.

BUNGE, Mário. *Filosofia da Física*. São Paulo: Martins Fontes, 1973.

CHALMERS, A. F. *O que é Ciência, afinal?* Tradução de Raul Fiker. São Paulo: Brasiliense, 1993.

CHASSOT, Attico Inácio. *A Ciência através dos tempos*. São Paulo: Moderna, 1995.

DEUS, J. D. (Org.). *A crítica da ciência*. Rio de Janeiro: Zahar, 1974.

EINSTEIN, Albert. *Como vejo o mundo*. Tradução de H. P. de Andrade. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1983.

GRIBBIN, J. *História da ciência*. Porto: Europa América, 2005.

HAWKING, S. *Os gênios da ciência*: sobre os ombros de gigantes. Rio de Janeiro: Campus, 2005.

KUHN, Thomas S. *A estrutura das revoluções científicas*. São Paulo: Perspectiva, 1975.

MARTINS, Roberto de Andrade. Que tipo de história da ciência esperamos ter nas próximas décadas? *Episteme*, Porto Alegre, v. 10, n. 10, p. 39-56, 2000.

NEVES, M. C. D. O uso da história da ciência no ensino de Física. *Ciência e Educação*, Bauru, 1998, v. 5, n. 1, p. 73-82.

NEWTON, Isaac. *Principia:* princípios matemáticos de filosofia natural. São Paulo: Nova Stella/Edusp, 1990.

PAIS, A. *"Sutil é o senhor..."* A ciência e a vida de Albert Einstein. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1995.

_____. *Einstein viveu aqui*. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1997.

PEDUZZI, Luiz; MARTINS, André Ferrer; FERREIRA, Juliana (Org.). *Temas de história e filosofia da ciência no ensino*. Natal: Ed. da UFRN, 2012.

PIETROCOLA, Maurício; MARTINS, Roberto de Andrade. Historiografia e natureza da ciência na sala de aula. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 28, p. 27-59, 2011.

PIRES, A. S. T. *Evolução das ideias da Física*. São Paulo: Livraria da Física, 2011.

POPPER, Karl. *A lógica da pesquisa científica*. São Paulo: Edusp, 1974.

_____. *Conjecturas e refutações*. 2. ed. Brasília: Ed. da UnB, 1982.

PRIGOGYNE, Ilya. *O fim das certezas*. Lisboa: Gradiva, 1996.

ROCHA, José Fernando (Org.). *Origens e evolução das ideias da Física*. Salvador: Edufba, 2002.

ROSMORDUC, Jean. *Uma história da Física e da Química:* de Tales a Einstein. Tradução de Leila Velho C. Faria. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1988.

SEGRE, Emilio. *Dos raios X aos* quarks. Brasília: Ed. da UnB, 1987.

THUILLIER, Pierre. *De Arquimedes a Einstein:* a face oculta da invenção científica. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1994. (Coleção Ciência e Cultura).

Ciência, tecnologia e sociedade

AIKENHEAD, G. What is STS Science Teaching? In: SOLOMON, J.; AIKENHEAD, G. *STS Education:* International Perspectives on Reform. New York: Teacher College Press, 1994.

ANGOTTI, J. A.; AUTH, M. Ciência e tecnologia: implicações sociais e o papel da educação. *Ciência & Educação*, v. 7, n. 1, 2001.

AULER, D.; BAZZO, W. A. Reflexões para a implementação do movimento CTS no contexto educacional brasileiro. *Ciência & Educação*, v. 7, n. 1, 2001.

HAZEN & TREFIL. *Saber Ciência*. São Paulo: Cultura Editores Associados, 1995.

KUPSTAS, Marcia (Org.). *Ciência e tecnologia em debate*. São Paulo: Moderna, 1998. (Debate na escola).

MION, R.; BASTOS, F.; ANGOTTI, J. A. Educação em Física: discutindo Ciência-Tecnologia e Sociedade. *Ciência & Educação*, v. 7, n. 2, 2001.

MORAES, José Uibson Pereira; ARAÚJO, Mauro Sérgio Teixeira de. *O ensino de Física e o enfoque CTSA:* caminhos para uma educação cidadã. São Paulo: Livraria da Física, 2012.

PINHEIRO, N. A. M.; SILVEIRA, R. M.; BAZZO, W. A. Ciência, tecnologia e sociedade: a relevância do enfoque CTS para o contexto do Ensino Médio. *Ciência & Educação*, v. 13, n. 1, 2001.

SANTOS, M. E. V. M. dos. *A cidadania na voz dos manuais escolares*. Lisboa: Livros Horizonte, 2001.

SANTOS, W.; AULER, D. (Org.). *CTS e educação científica:* desafios, tendências e resultados de pesquisas. Brasília: Ed. da UnB, 2011.

Energia, meio ambiente e sociedade

BERMANN, Célio. *Energia no Brasil:* para quê? para quem? Crise e alternativas para um país sustentável. São Paulo: Livraria da Física/Fase, 2001.

BRANCO, Samuel M. *Energia e meio ambiente.* 5. ed. São Paulo: Moderna, 1990. (Polêmica).

GOLDENBERG, José. *Energia, meio ambiente & desenvolvimento*. São Paulo: Edusp, 1998.

HEMERY, Daniel; DEBIER, Jean-Claude; MOURÃO, Ronaldo Rogério de Freitas. *Sol e energia no terceiro milênio*. São Paulo: Scipione, 2000. (Ponto de Apoio).

KURAMOTO, R. Y. R.; APPOLONI, C. R. Uma breve história da política nuclear brasileira. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, v. 19, n. 3, p. 379-392, Florianópolis, dez. 2002.

SCARLATO, Francisco C.; PONTIN, Joel. *Energia para o século XXI*. São Paulo: Ática, 2001.

Física moderna e contemporânea

BASSALO, J. M. et al. *Aspectos contemporâneos da Física*. Belém: UFPA, 2000.

BOHR, Niels. *Física atômica e conhecimento humano:* ensaios 1932-1957. Tradução de Vera Ribeiro. Rio de Janeiro: Contraponto, 1995.

CAVALCANTE, M. A.; TAVOLARO, C. R. C. Inserção de Física moderna e contemporânea no Ensino Médio: uma proposta experimental. In: SBPC Jovem, 5, 1997, Belo Horizonte. *Anais da SBPC Jovem*.

CHAVES, Alaor et al. *Aplicações da Física quântica:* do transistor à nanotecnologia. São Paulo: Livraria da Física, 2005.

COUDERC, P. et al. *A relatividade*. São Paulo: Martins Fontes, 1981.

DIAMOND, Sheldon R. *Fundamental Concepts of Modern Physics*. New York: Amsco School, 1970.

EINSTEIN, A. *A teoria da relatividade especial e geral*. São Paulo: Contraponto, 1999.

EISBERG, R.; RESNICK, R. *Física quântica*. Rio de Janeiro: Campus, 1983.

GAZZINELLI, Ramayana. *Teoria da relatividade especial*. São Paulo: Edgard Blücher, 2005.

GILBERT, A. *Origens históricas da Física moderna*. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1982.

HOLTON, G. et al. *Fundamentos de la física moderna*. Barcelona: Reverie, 1948.

MENEZES, Luis Carlos de. *A matéria:* uma aventura do espírito. São Paulo: Livraria da Física, 2005.

NUSSENZVEIG, H. Moysés. *Complexidade & caos*. Rio de Janeiro: UFRJ/Copea, 1999.

PATY, Michel. *A matéria roubada*. São Paulo: Edusp, 1995.

PESSOA JÚNIOR, Osvaldo. *Conceitos de Física quântica*. São Paulo: Livraria da Física, 2007.

SALAM, Abdus et al. *A unificação das forças fundamentais:* o grande desafio da Física contemporânea. Rio de Janeiro: Zahar, 1994. (Ciência e Cultura).

STACHEL, J. (Org.). Einstein e a teoria da relatividade. In: *O ano miraculoso de Einstein:* cinco artigos que mudaram a face da Física. Parte 3. Rio de Janeiro: Ed. da UFRJ, 2001.

TIPLER, Paul A. *Física moderna*. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981.

VALADARES, Eduardo de Campos; MOREIRA, Alisson Magalhães. Ensinando Física moderna no Ensino Médio: efeito fotoelétrico, *laser* e emissão de corpo negro. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 15, n. 2, ago. 1998.

YOUNG, Matt. *Óptica e* lasers. São Paulo: Edusp, 1998.

Astronomia, Astrofísica e Cosmologia

ASIMOV, Isaac. *111 questões sobre a Terra e o Espaço*. São Paulo: Best Seller, 1992.

BAROLLI, Elizabeth; GONÇALVES FILHO, Aurélio. *Nós e o Universo*. 4. ed. São Paulo: Scipione, 1991.

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

BOOTH, Nicholas. *Exploring the Solar System*. New York: Press Syndicate of the University of Cambridge, 1995.

BRETONES, Paulo Sérgio. *Os segredos do Sistema Solar.* 3. ed. São Paulo: Atual, 1993. (Projeto Ciência).

CANIATO, Rodolpho. *O que é Astronomia*. São Paulo: Brasiliense, 1984.

FARIA, Romildo Povoa. *Visão para o Universo*. São Paulo: Ática, 1996.

FRIAÇA, Amâncio et al. *Astronomia:* uma visão geral do Universo. São Paulo: Edusp, 2001. (Coleção Acadêmica).

KOESTLER, Arthur. *O homem e o Universo*. São Paulo: Ibrasa, 1989.

MARTINS, Roberto de Andrade. *O Universo:* teorias sobre sua origem e evolução. São Paulo: Moderna, 1994.

MATSUURA, Oscar T. *Atlas do Universo*. São Paulo: Scipione, 1996.

MOURÃO, Ronaldo Rogerio de Freitas. *Manual do astrônomo*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1994.

REEVES, Hubert. *A hora do deslumbramento:* o Universo tem um sentido? São Paulo: Martins Fontes, 1988.

ZEILIK, M. et al. *Introductory Astronomy and Astrophysics*. Nova York: Saunders College, 1992.

Livros de divulgação científica e paradidáticos

ALVES, G.; CARUSO, F.; MOTTA, H.; SANTORO, A. *O mundo das partículas de hoje e de ontem.* Rio de Janeiro: Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), 2000.

BARTHEM, Ricardo. *A luz*. São Paulo: Livraria da Física, 2005

BEN-DOV, Yoav. *Convite à Física*. Tradução de Maria Luiza X. de A. Borges; revisão técnica de Henrique Lins de Barros. Rio de Janeiro: Zahar, 1996. (Ciência e Cultura).

BLOOMFIELD, L. A. *How Things Work:* the Physics of Everyday Life. New York: John Wiley & Sons, 1997.

BOLTON, L. *Hidden Pictures*. New York: Penguin, 1993.

BRENNAN, Richard. *Gigantes da Física:* uma história da Física moderna através de oito biografias. Rio de Janeiro: Zahar, 2000.

BRODY, David E. et al. *As sete maiores descobertas científicas da História*. São Paulo: Companhia das Letras, 2002.

CALDER, Nigel. *O Universo de Einstein*. Brasília: Ed. da UnB, 1994.

CARVALHO, Regina P. *Micro-ondas*. São Paulo: Livraria da Física, 2005.

CHILDRESS, D. H. *As fantásticas invenções de Nikola Tesla*. São Paulo: Madras, 2004.

CRATO, Nuno. *Passeio aleatório pela ciência do dia a dia*. São Paulo: Livraria da Física, 2009.

DAWKINS, R. *Desvendando o arco-íris*. São Paulo: Companhia das Letras, 2000.

DUARTE, Marcos; OKUNO, Emico. *Física do futebol*. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

EINSTEIN, Albert; INFELD, Leopold. *A evolução da Física*. Tradução de Giasone Rebuá. 4. ed. Rio de Janeiro: Guanabara-Koogan, 1988.

ERNST, B. *Adventure with Impossible Figures*. Norfolk: Taschen, 2000.

FERRARO, Nicolau Gilberto. *Eletricidade:* história e aplicações. 7. ed. São Paulo: Moderna, 1991. (Desafios).

FEYNMAN, Richard P. *Está a brincar, Sr. Feynman!* Lisboa: Gradiva, 1988.

_____. *Física em seis lições*. Rio de Janeiro: Ediouro, 1995.

FIGUEIREDO, A. et al. *Calor e temperatura*. São Paulo: FTD, 2000.

_____; PIETROCOLLA, M. *Física, um outro lado:* faces da energia. São Paulo: FTD, 1999.

FIOLHAIS, Carlos. *Física divertida*. 4. ed. Lisboa: Gradiva, 1994. (Aprender Fazer Ciência).

GAMOW, George. *As aventuras do Sr. Tompkins*. Tradução de A. M. Nunes Santos e Christopher Auretta. Lisboa: Gradiva, 1990. (Aprender Fazer Ciência).

_____. *Biografia da Física*. Rio de Janeiro: Zahar, 1952.

_____. *O incrível mundo da Física moderna*. Tradução de E. Jacy Monteiro. São Paulo: Ibrasa, 1980.

GASPAR, Alberto. *Eletricidade e suas aplicações*. São Paulo: Ática, 1999.

_____. *História da eletricidade*. São Paulo: Ática, 2000.

GENNES, P. G. *Os objetos frágeis*. Campinas: Ed. da Unicamp, 1997.

GILMORE, Robert. *Alice no país do* quantum. Rio de Janeiro: Zahar, 1998.

_____. *O mágico dos* quarks. Rio de Janeiro: Zahar, 2001.

GLEISER, Marcelo. *A dança do Universo*. São Paulo: Companhia das Letras, 1997.

_____. *Macro micro*. São Paulo: Publifolha, 2005.

GONÇALVES FILHO, Aurélio; BAROLLI, Elizabeth. *Instalação elétrica:* investigando e aprendendo. São Paulo: Scipione, 2005.

GONICK et al. *Introdução ilustrada à Física*. São Paulo: Harbra, 1994.

HAWKING, Stephen. *O Universo numa casca de noz*. São Paulo: Mandarim, 2001.

_____; PENROSE, Roger. *A natureza do espaço e do tempo*. Tradução de Alberto Luiz da Rocha Barros. Campinas: Papirus, 1997. (Papirus Ciência).

INGRAM, J. *As ilusões da vida*: a estranha ciência do extremamente comum. Rio de Janeiro: Ediouro, 2005.

KAKU, M. *Física do impossível*. Rio de Janeiro: Rocco, 2010.

KRAUSS, Lawrence M. *Sem medo da Física:* um guia para você não ficar perdido no espaço. Rio de Janeiro: Campus, 1995.

LINDLEY, David. *The End of Physics*. New York: Basic Books, 1993.

LIVINGSTON, J. D. *Rising Force*: the Magic of Magnet. Cambridge: Harvard, 2011.

LOPES, José Leite. *Uma história da Física no Brasil*. São Paulo: Livraria da Física, 2004.

MARINHO, F. C.; DORIA, M. M. *Temas atuais de Física*: ondas e *bits*. São Paulo: Livraria da Física, 2005.

MENEZES, Luis Carlos. *A matéria:* uma aventura do espírito. São Paulo: Livraria da Física, 2005.

_____. *Vale a pena ser físico*? São Paulo: Moderna, 1988.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA. *Algumas razões para ser um cientista*. Rio de Janeiro: CBPF, 2005.

MONTANARI, Valdir. *Energia nossa de cada dia*. São Paulo: Moderna, 2000. (Desafios).

MORRISON, Philip et al. *Powers of Ten*. New York: Scientific American Library, 1982.

MOSCOVICH, I. *Magic Cylinder Book*. Stradbroke: Tarquin, 1991.

NORRETRANDERS, Tor. *The User Illusion*. Londres: Penguin, 1999.

OKUNO, E. *Desvendando a física do corpo humano:* biomecânica. São Paulo: Manole, 2003.

_____. *Radiação:* efeitos, riscos e benefícios. São Paulo: Harbra, 1988.

_____. *Radiação ultravioleta:* características e efeitos. São Paulo: Livraria da Física, 2005.

OSTERMANN, F.; PUREUR, P. *Temas atuais de Física*: supercondutividade. São Paulo: Livraria da Física, 2005.

PATERNITI, Michael. *Ao volante com Mr. Albert*. Lisboa: Teorema, 2004.

PERELMAN, I. *Física recreativa*. Moscou: Mir, 1980.

REEVES, Hubert. *Nomes de deuses*. São Paulo: Unesp, 2000.

_____. *Um pouco mais de azul*. São Paulo: Martins Fontes, 1998.

RETONDO, F. *Química das sensações*. Campinas: Átomo, 2009.

SAGAN, Carl. *Bilhões e bilhões:* reflexões sobre vida e morte na virada do milênio. Tradução de Rosaura Eichemberg. São Paulo: Companhia das Letras, 1998.

_____. *O mundo mal assombrado pelos demônios*. São Paulo: Companhia das Letras, 1997.

SCHENBERG, Mário. *Pensando a Física*. São Paulo: Brasiliense, 1984.

SCHWARTZ, Joseph; MCGUINESS, Michael. *Einstein e a relatividade em quadrinhos*. Tradução de Mário Bendetson. Rio de Janeiro: Xenon, 1994.

SPEYER, Edward. *Seis caminhos a partir de Newton*. Rio de Janeiro: Campus, 1995.

STRATHERN, Paul. *Aristóteles em 90 minutos*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1997.

_____. *Arquimedes e a alavanca*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1997.

_____. *Bohr e a teoria quântica*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1997.

_____. *Galileu e o Sistema Solar*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1997.

_____. *Hawking e os buracos negros*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1997.

_____. *Platão em 90 minutos*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1997.

_____. *Sócrates em 90 minutos*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1997.

VON BAEYER, Hans Christian. *Arco-íris, flocos de neve,* quarks*:* a Física e o mundo que nos rodeia. Tradução de Luiz Euclydes Trindade Frazão Filho. Rio de Janeiro: Campus, 1994.

WALKER, Jearl. *O grande circo da Física*. Lisboa: Gradiva, 1990.

WEINBERG, Steven. *Sonhos de uma teoria final:* a busca das leis fundamentais da natureza. Tradução de Carlos Irineu da Costa. Rio de Janeiro: Rocco, 1996. (Ciência Atual).

WYNN, Charles M. et al. *The Five Biggest Ideas in Science*. New York: John Wiley & Sons, 1997.

Física para os Ensinos Fundamental e Médio

CANIATO, Rodolpho. *As linguagens da Física mecânica*. São Paulo: Ática, 1990.

FERMI, Enrico. *Física*. Bologna: Nicola Zanichelli, 1948.

GRUPO DE REELABORAÇÃO DO ENSINO DE FÍSICA (GREF). *Física 1*: Mecânica. São Paulo: Edusp, 1991. *Física 2:* Física térmica e Óptica. São Paulo: Edusp, 1991. *Física 3:* Eletromagnetismo. São Paulo: Edusp, 1993. 3 v.

MAIZTEGUI, A. P. et al. *Física elemental*. Buenos Aires: Kapellusz, 1981.

MCDERMOTT, L. C. *Physics by Inquiry*. New York: John Wiley & Sons, 1996. v. I e II.

NUFFIELD Foundation Collection. *Physics*. London: Penguin, 1966. v. I-V.

PIÓRICHKINE, A. V. *Física*. Moscou: Mir, 1982. v. 1-4.

PSSC (Physical Science Study Committee). *Física*. Brasília: Ed. da UnB, 1966.

Física para graduação

AMALDI, Ugo. *Imagens da Física:* as ideias e as experiências do pêndulo aos *quarks*. São Paulo: Scipione, 1995.

CHAVES, Alaor. *Física*. Rio de Janeiro: Reichmann & Affonso, 2000. v. 1-4.

CUTNELL, J.; JOHNSON, K. *Physics*. New York: John Wiley & Sons, 1995.

DURAN, J. E. R. *Biofísica*: conceitos e aplicações. São Paulo: Pearson, 2011.

EISBERG, R. M. et al. *Física:* fundamentos e aplicações. São Paulo: McGraw-Hill, 1981. v. 1-4.

HEWITT, P. G. *Fundamentos de Física Conceitual*. Porto Alegre: Bookman, 2009.

NASSAU, K. *The Physics and Chemistry of Color*: the Fifteen Causes of Color. Hoboken: Wiley inter-science, 2001.

NUSSENZVEIG, Moysés H. *Curso de Física básica*. São Paulo: Edgard Blücher, 1988. v. 1 e 2.

OKUNO, Emico; CALDAS, Iberê L.; CHOW, Cecil. *Física para Ciências Biológicas e Biomédicas*. São Paulo: Harper & Row do Brasil, 1982.

PAULA, H. F.; MATEUS, A. L.; ALVES, E.G. *Quântica para iniciantes*. Belo Horizonte: Ed. da UFMG, 2011.

RESNICK, Robert; HALLIDAY, David; WALKER, Jearl. *Fundamentos de Física*. 6. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2002. 4 v.

TIPLER, Paul. *Física.* Rio de Janeiro: LTC, 1997. 3 v.

_____; LLEWELLYN, R. A. *Física moderna*. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

Sites

Instituições de referência e fontes de pesquisa (Acessos em: 13 maio 2016)

CENPEC. Centro de Pesquisas para Educação e Cultura. Apresenta notícias, projetos e assessoria a políticas educacionais. Disponível em: <www.cenpec.org.br>.

ESCOLA DO FUTURO. Disponibiliza estudos e pesquisas sobre a sociedade do conhecimento e seus impactos nas áreas da Comunicação, Educação e Informação para iluminar os novos contornos da "sociedade em rede". Contém uma Biblioteca Virtual do Estudante Brasileiro. Disponível em: <www.bibvirt.futuro.usp.br>.

MEC — Ministério da Educação. Nele, o professor pode encontrar algumas informações úteis, como LDB, DCN e PCN e outras informações sobre o ensino em nosso país. Disponível em: <www.mec.gov.br>.

PROFIS — Espaço de Apoio, Pesquisa e Cooperação de Professores de Física. Disponibiliza diversos *links* e propostas de interesse a professores e estudantes de Física. Disponível em: <www.if.usp.br/profis>.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE FÍSICA — Fornece informações sobre publicações da Sociedade e atas dos Encontros na área de ensino de Física: Simpósio Nacional de Ensino de Física (Snef) e Encontro Nacional de Pesquisa em Ensino de Física (Epef). Disponível em: <www.sbfisica.org.br>.

Referências para atividades, experimentos, leituras (Acessos em: 13 maio 2016)

Energia nuclear (apostila educativa). Disponível em: <www.cnen.gov.br>.

Experimentos virtuais — Mecânica (Ifusp). Disponível em: <www.fisfoto.if.usp.br/index.html>.

Física e Cultura — CBPF. Disponível em: <www.cbpf.br/FISCUL>.

Grupo de Reelaboração do Ensino de Física (GREF) — Leituras de Física. Disponível em: <www.if.usp.br/gref/>.

PET. Vídeos e experimentos de Física — Universidade Estadual de Maringá. Disponível em: <www.pet.dfi.uem.br/>.

Sistema Internacional de Unidades: SI. — Duque de Caxias, RJ : Inmetro/Cicma/Sepin, 2012. 94 p. Inclui índice. Traduzido de: Le Système international d'unités – The International System of Units. 8. ed. 2006. ISBN: 978-85-86920-11-0 1. Sistema SI. 2. Unidade de Medida. 3. Metrologia. I. Inmetro II. Disponível em: <www.inmetro.gov.br/inovacao/publicacoes/si_versao_final.pdf>.

Objetos Educacionais Digitais (OED) (Acessos em: 13 maio 2016)

Centro Interdisciplinar de Novas Tecnologias na Educação (Cinted). Disponível em: <www.cinted.ufrgs.br/CESTA>.

Conexão Escola. Disponível em: <http://www.conexaoprofessor.rj.gov.br/sala_de_aula_objaprendizagem.sp>.

Digital Education. Disponível em: <http://sitede.neweducation.com.br/sistema-ensino/objetos-aprendizagem/>.

Federação de Repositórios Educa Brasil (FEB). Disponível em: <www.feb.ufrgs.br/>.

Labvirt Física. Disponível em: <www.labvirt.fe.usp.br>.

MEC. Disponível em: <http://objetoseducacionais2.mec.gov.br/handle/mec/115>.

Portal do Professor. Disponível em: <http://portaldoprofessor.mec.gov.br/index.html>.

Rede Interativa Virtual de Educação (Rived). Disponível em: <http://rived.mec.gov.br>.

Periódicos nacionais de ensino de Ciências e ensino de Física (Acessos em: 13 maio 2016)

ALEXANDRIA — Revista de Educação em Ciência e Tecnologia (UFSC). Publicação do Programa de Pós-Graduação em Educação Científica e Tecnológica da UFSC. Disponível em: <www.ppgect.ufsc.br/alexandriarevista>.

CADERNO BRASILEIRO DE ENSINO DE FÍSICA. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina. Disponível em: <www.periodicos.ufsc.br/index.php/fisica>.

CIÊNCIA E EDUCAÇÃO. Publicação do Programa de Pós-Graduação em Educação para Ciência da Faculdade de Ciência da Unesp, *campus* de Bauru. Órgão de divulgação dos trabalhos produzidos pelo Curso de Especialização em Ensino de Ciências e Matemática e pelo Curso de Mestrado em Educação para a Ciência. Disponível em: <www2.fc.unesp.br/cienciaeeducacao/>.

CIÊNCIA HOJE DAS CRIANÇAS. Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência (SBPC). Disponível em: <www.ciencia.org.br>.

FÍSICA NA ESCOLA. Suplemento da Revista Brasileira de Ensino de Física. Publicação trimestral da Sociedade Brasileira de Física (SBF). É destinada a apoiar as atividades de Física do Ensino Fundamental e Médio. Disponível em: <www.sbfisica.org.br>.

INVESTIGAÇÕES EM ENSINO DE CIÊNCIAS (UFRGS). Periódico voltado para a pesquisa em ensino de Ciências, com apoio do Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Publica artigos relacionados à investigação em ensino e aprendizagem de Ciências; revisão da literatura nessa área de pesquisa; fundamentação teórica com implicações para a pesquisa; metodologia de pesquisa; crítica e comentários sobre artigos publicados na própria revista. Disponível em: <www.if.ufrgs.br/ienci/>.

REVISTA BRASILEIRA DE ENSINO DE FÍSICA. São Paulo: Sociedade Brasileira de Física. Disponível em: <www.sbfisica.org.br/rbef>.

REVISTA EXPERIÊNCIAS EM ENSINO DE CIÊNCIAS (UFRGS). Revista dedicada ao ensino de Ciências e publicada pelo Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e pelo Programa Internacional de Doutorado em Ensino de Ciências (Pidec) oferecido pela Universidade de Burgos (UBU), Espanha, em convênio com a UFRGS. Disponível em: <www.if.ufrgs.br/eenci>.

Eventos de ensino de Ciências/Física (Acessos em: 13 maio 2016)

ENPEC — Encontro de Pesquisa em Ensino de Ciências. Disponível em: <http://fep.if.usp.br/~profis/enpec.html>.

EPEF — Encontro de Pesquisa em Ensino de Física. Disponível em: <http://fep.if.usp.br/~profis/epef.html>.

SNEF — Simpósio Nacional de Ensino de Física. Disponível em: <http://fep.if.usp.br/~profis/snef.html>.

Cursos de extensão

Instituto de Física da UFRGS (IF-UFRGS). Disponível em: <www.if.ufrgs.br>.

Instituto de Física da UFRJ. Disponível em: <www.if.ufrj.br/>.

Instituto de Física da Universidade de Brasília. Disponível em: <www.fis.unb.br>.

Instituto de Física de São Carlos (USP) — IFSC. Disponível em: <www.ifsc.usp.br>.

Instituto de Física Gleb Watagin (Unicamp). Disponível em: <www.portal.ifi.unicamp.br/extensao/>.

Instituto de Física Teórica da Unesp (IFT/Unesp). Disponível em: <www.ift.unesp.br/Extensao/extensao.php>.

Espaços informais e de divulgação — Museus e Centros de Ciência

Casa da Ciência. Disponível em: <www.cciencia.ufrj.br>.

Centro de Divulgação Científica e Cultural. Disponível em: <www.cdcc.sc.usp.br>.

Espaço Museu do Universo. Disponível em: <www.rio.rj.gov.br/planetario/universo/>.

Estação Ciência. Disponível em: <www.eciencia.usp.br>.

Fundação Planetário da Cidade do Rio de Janeiro. Disponível em: <www.rio.rj.gov.br/planetario>.

Museu da Vida. Disponível em: <www.fiocruz.br/emvida/>.

Museu de Astronomia e Ciências Afins (MAST). Disponível em: <www.mast.br>.

Museu de Ciências e Tecnologia. Disponível em: <www.mct.pucrs.br/>.

Observatório do Valongo. Disponível em: <www.valongo.ufrj.br>.

Observatório Nacional. Disponível em: <www.o.n.br>.

Parque da Ciência e Tecnologia (Cientec). Disponível em: <www.parquecientec.usp.br>.

Planetário da Gávea. Disponível em: <www.rio.rj.gov.br/planetario>.

Planetário do Ibirapuera (Planetário e Escola Municipal de Astrofísica "Prof. Aristóteles Orsini"). Disponível em: <www.planetario>.

O *Show* da Física/USP. Disponível em: <www.cepa.if.usp.br/showdefisica>.

Usina Ciência. Disponível em: <www.ufal.br/usciencia/>.

9. Projeto integrador

O que são projetos

A palavra projeto é rotineiramente utilizada em diversos âmbitos da atuação humana. A ela estão associadas as mais diversas definições, tais como intenção, sonho, proposta para resolução de problemas, atividade organizada, entre outras.

A ideia de projeto voltado ao ensino tem sido muito difundida entre professores e educadores de nosso país. No entanto, erros de interpretação de seus fundamentos têm levado à banalização do termo e, algumas vezes, a equívocos sobre sua concepção e execução. Contudo, um trabalho bem organizado por meio de projetos aparece como uma importante alternativa ao contexto, geralmente pouco dinâmico, da sala de aula.

Etapas de um projeto

Seguem abaixo as etapas que devem estar presentes durante a execução de um projeto centrado em uma situação-problema e destinado ao Ensino Médio:

1) Levantamento do repertório dos estudantes e de possíveis propostas para a situação-problema.
2) Definição de uma situação-problema relacionada à realidade dos alunos.
3) Definição das etapas do projeto.
4) Formação das equipes de trabalho e definição do cronograma.
5) Investigação dos saberes que deverão ser apropriados para que se chegue à solução do problema proposto.
6) Execução das atividades e resolução do problema.
7) Apresentação do trabalho final do projeto.

Princípios norteadores de um projeto

Além dos momentos listados acima, o trabalho por projeto deve ser guiado por princípios que garantam o cumprimento das expectativas de aprendizagem estabelecidas. A seguir destacamos esses princípios e suas respectivas justificativas didáticas.

- A situação-problema deve pertencer à *realidade do aluno*, tem que lhe ser familiar, para que ele perceba mais facilmente as relações lógicas que serão estabelecidas e encontre sentido naquilo que terá que estudar.
- Para que uma proposta de trabalho se constitua de fato em um projeto, o desenvolvimento das atividades em sala de aula deve permitir a participação da turma durante a tomada de decisões. Compartilhar escolhas e decidir em conjunto são atitudes que favorecem o surgimento de uma atmosfera propícia à *cumplicidade* e à *cooperação*, características essenciais para um bom trabalho em equipe.
- A finalidade do projeto é a *aprendizagem significativa* de conteúdos relacionados ao problema e, portanto, a passagem para a próxima etapa deve ser feita apenas quando a equipe, como um todo, já atingiu a compreensão real dos conceitos abordados na etapa atual.
- O *sequenciamento* da pesquisa por informações e do estudo dos conteúdos deve facilitar a *memorização compreensiva* dos conceitos.
- Deve haver um *monitoramento* constante do andamento do projeto, não apenas do cumprimento do cronograma, mas também da aprendizagem significativa dos conceitos envolvidos em cada etapa.

Proposta de projeto

PROJETO: A FÍSICA DA MÚSICA

Propondo o projeto

Situação-problema: O que é preciso saber para construir um instrumento musical?

Planejamento

Para a execução do projeto será necessário:

- elaborar uma lista de referências para o estudo e o planejamento do trabalho.
- dividir a turma em equipes de pesquisa. Cada equipe será responsável por pesquisar o funcionamento e o desenvolvimento histórico de um instrumento musical. Além disso, cada equipe deverá construir o seu próprio instrumento. A ideia é que os alunos, com base no conhecimento que assimilaram por meio da pesquisa feita, idealizem uma versão simplificada de um instrumento real, que possa ser confeccionada com materiais de baixo custo.

O professor deve informar aos alunos que eles serão avaliados nos aspectos atitudinais e conceituais. A avaliação atitudinal irá considerar sua colaboração com o desenvolvimento do trabalho em equipe e com o cumprimento dos prazos. Como aspectos conceituais, será considerada sua participação nas atividades de pesquisa, na apresentação final do projeto e no domínio dos conceitos físicos e matemáticos associados ao instrumento musical construído.

Execução

O professor deverá avaliar o material pesquisado por todos os grupos, além de repassar com os alunos os conceitos físicos associados às ondas sonoras e à audição, tais como amplitude, intensidade, frequência, altura e timbre. Ele deverá também avaliar o grau de envolvimento de cada aluno na realização desta etapa do projeto.

Fechamento

Cada equipe apresentará a pesquisa realizada e depois exibirá sua construção, indicando o material utilizado e explicando como se dá a geração de som pelo instrumento escolhido.

A qualidade sonora dos instrumentos não será alvo de avaliação do projeto. Contudo, o professor poderá pedir aos alunos, como forma de motivá-los, que componham e ensaiem uma música simples e executem-na utilizando os instrumentos construídos. No entanto, o professor deve deixar claro para os alunos que o objetivo didático do projeto é o aprendizado que tiveram sobre a física do som, tanto em seus aspectos gerais quanto na relação entre a geometria do instrumento e a faixa de frequências e intensidades do som que ele pode produzir.

Finalmente, é importante que o professor estabeleça um momento para que as equipes discutam as diferenças e semelhanças dos instrumentos construídos. Esse tipo de debate ajuda o professor a detectar o que de fato foi aprendido e quais as dúvidas comuns entre as equipes.

10. Orientações específicas de cada capítulo e resoluções das atividades

Unidade 1 — Campo e potencial elétrico

Capítulo 1: Carga elétrica

Orientações específicas

Nesta unidade, iniciamos o ensino da parte da Física que investiga os fenômenos elétricos. Nosso ponto de partida é o estudo de conceitos básicos da eletricidade, tais como: carga, condutor, isolante, campo elétrico e potencial elétrico. No nosso entender, introduzir o estudo da Eletricidade com esses conceitos é a ordem natural de apresentar o assunto, uma vez que iniciamos o curso com os fenômenos que ocorrem com a carga elétrica em repouso para depois migrar para aqueles que decorrem de seu movimento.

Recomendamos ao professor que não prolongue o estudo da Eletrostática além do desenvolvimento apresentado em nosso texto. Um tratamento mais extenso e profundo do que aquele feito, além de se tornar árido para o estudante, pode acarretar em falta de tempo para uma abordagem mais ampla — e mais interessante na visão do aluno — dos fenômenos relacionados à corrente elétrica e ao Eletromagnetismo. Esses outros assuntos apresentam um grande número de aplicações ligadas à vida diária do estudante e estão estreitamente relacionados com a tecnologia e a ciência moderna. Por este motivo, achamos preferível reduzir a profundidade do estudo da Eletrostática e dedicar um pouco mais de tempo ao ensino dos assuntos que serão tratados nas próximas unidades. A fim de facilitar a redução do ensino da Eletrostática, deixamos a apresentação dos capacitores para o capítulo 8. É bem verdade que esses são dispositivos largamente utilizados nos aparelhos elétricos e eletrônicos do mundo atual; no entanto, a compreensão dos conceitos físicos relacionados ao seu funcionamento exigiria um estudo avançado demais para um curso de Física destinado ao Ensino Médio. Ficará, portanto, a critério do professor incluir ou não este apêndice em sua programação.

Julgamos que os seguintes pontos devem ser observados durante o trabalho do professor com este primeiro capítulo:

- O fato de os objetos que nos rodeiam não se apresentarem de forma eletrizada no dia a dia pode levar o aluno a pensar que eles não possuem carga elétrica em seu interior. Esse é um ponto que precisa ser esclarecido para o aluno. Ele precisa entender que os prótons e os elétrons dos átomos de todos os objetos possuem carga elétrica e é justamente a desigualdade entre a quantidade dessas partículas elementares que faz com que um objeto adquira carga elétrica líquida diferente de zero.
- O professor deve deixar claro que a lei de Coulomb, apesar de ser uma das leis fundamentais da Eletricidade, tem sua aplicação restrita apenas para o caso da interação entre cargas puntiformes. Cálculos da força elétrica para distribuições não puntiformes de carga são muito mais complexos e, portanto, fogem do objetivo do capítulo, que tem caráter apenas introdutório.
- Aconselhamos que o professor trabalhe apenas com o sistema internacional de unidades (S.I.), como fizemos em nosso texto. A abordagem de outras unidades de medida para as grandezas, apresentadas neste primeiro contato com a Eletricidade, poderia trazer uma dificuldade adicional que não se justifica em termos didáticos.
- O professor deve explicar para os alunos que não é necessário inserir os sinais das cargas elétricas Q_1 e Q_2 na expressão da lei de Coulomb, sendo suficiente a substituição de seus valores absolutos. Assim, a relação $F = k_0 Q_1 Q_2 / r^2$ deverá ser empregada somente para a obtenção do módulo de $\vec{F}$. O sentido de $\vec{F}$, quando necessário, pode ser facilmente obtido pelo conhecimento dos sinais dessas cargas: sentido oposto de repulsão quando as cargas apresentam sinais iguais e sentido oposto de atração quando elas apresentam sinais contrários.
- A conceituação da unidade de carga no S.I. — o Coulomb — foi feita de uma maneira mais intuitiva, partindo de sua relação com a carga elementar,

isto é, com a carga do elétron. Evidentemente, não será necessário que o estudante memorize essa relação; basta que ele entenda que existe uma carga elementar e que 1 Coulomb já representa uma enorme quantidade de carga elétrica, pois está associado a um número gigantesco de cargas elementares.

- Um possível desfecho para o capítulo é a leitura e a discussão do texto da seção *Integrando...* "A força elétrica e a matéria", pois este texto revela a abrangência da força elétrica na natureza. A partir dele o aluno terá a oportunidade de perceber que a força elétrica é a força responsável por manter unidas as partículas dos objetos que nos rodeiam, conferindo a eles seu formato, sua consistência e suas propriedades físico-químicas.

Resoluções das atividades

Para iniciar a conversa

Os objetos de cargas opostas se aproximam devido à força de atração eletrostática, e de cargas semelhantes se afastam.

Este processo é chamado de indução e, ao contrário do que acontece no atrito e no contato, neste os objetos não se tocam. Outra diferença é que, para realizar o processo de indução, é necessário utilizar um fio terra.

Ficariam opostas também: o documento ficaria escuro com o conteúdo reproduzido na parte clara.

Verifique o que aprendeu

1. Não; em ambos os casos os corpos não ficarão eletrizados. Isto porque, sendo os corpos atritados entre si de mesma natureza (papel com papel e plástico com plástico), não haverá transferência de elétrons de um para o outro.

2. a) Sim, pois a lã perdeu elétrons para a barra de borracha.
b) Como a lã perdeu elétrons, ela ficará eletrizada positivamente.
c) Como a borracha ficou eletrizada negativamente, foi ela que recebeu elétrons.
d) Como a lã perdeu elétrons, ela ficou com excesso de prótons.

3. Estando a barra de vidro e a seda inicialmente neutras, o número de elétrons em cada uma era igual ao número de prótons. Como os elétrons em excesso adquiridos pela seda foram cedidos pelo vidro, o número destes elétrons é **igual** ao número de prótons em excesso no vidro.

4. a) Na tabela 1.1 o papel está situado após o algodão. Tendo em vista a informação fornecida no texto (que o estudante não deve memorizar), concluímos que o algodão ficará eletrizado **positivamente** e, portanto, o papel ficará eletrizado **negativamente**.
b) O algodão ficou eletrizado positivamente.

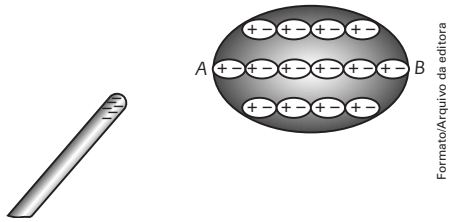
5. Pela tabela 1.1 concluímos que a poliamida sintética e o papel-alumínio ficarão positivos, enquanto o PVC ficará negativo. Então:
a) A folha de papel-alumínio será **repelida** pela poliamida sintética.
b) O tubo de PVC será **atraído** pela poliamida sintética.

6. À medida que a barra metálica adquire carga por atrito, como a barra e o corpo humano são condutores, esta carga escoa-se para a terra através da pessoa. Por este motivo, a barra não ficará eletrizada.

7. a) Como o ar seco e os pneus são isolantes, a carga do ônibus não pode escoar para a terra. Assim, o ônibus permanece eletrizado.
b) O corpo humano é condutor e, então, a carga elétrica do ônibus passa para a terra por meio da pessoa. Esta descarga provoca choque.
c) O nosso clima é úmido, o que faz com que o ar se torne ligeiramente condutor. Por este motivo, à medida que o ônibus adquire carga elétrica, ela vai se escoando para a terra através do ar e, assim, o ônibus não chega a armazenar uma carga apreciável.

8. Em virtude do atrito com o ar e da gasolina com as paredes do tanque, o caminhão pode adquirir uma carga elétrica. Esta carga, atingindo um determinado valor, poderia dar origem a uma centelha elétrica, que teria, evidentemente, consequências desastrosas. Para evitar que a carga elétrica acumule-se no caminhão, usa-se a corrente metálica, que provoca o escoamento da carga para a terra à medida que ela se forma.

9. a) Não, pois um isolante praticamente não possui elétrons livres.
b) As moléculas orientam-se, alinhando-se da maneira mostrada na figura abaixo.



Formato/Arquivo da editora

c) Vemos claramente, na figura, que a extremidade *A* fica positiva e *B* fica negativa.
d) Como vimos, este alinhamento das moléculas no dielétrico denomina-se **polarização**.

10. a) Os elétrons em excesso na extremidade *B* passam para a terra pelo fio condutor.
b) Como o corpo metálico perdeu elétrons para a terra, ele ficará com excesso de prótons, isto é, ficará eletrizado positivamente.

Aplicações da Física: Pintura eletrostática a pó

1. As máquinas fotocopiadoras utilizam um sistema parecido com o da pintura eletrostática. Inicialmente, o tambor está carregado eletricamente e, ao entrar em contato com o feixe de luz a *laser*, esses pontos perdem sua carga, porém o seu entorno continua carregado. A seguir, o tambor entra em contato com partículas de

toner carregadas eletricamente que são atraídas pelo tambor, porém somente nos pontos atingidos pelo *laser*, visto que os outros pontos possuem a mesma carga elétrica das partículas e, portanto, elas são repelidas. Por fim, o tambor entra em contato com o papel carregado com a carga oposta, atraindo as partículas de *toner*, e o conjunto é aquecido de modo a fixar permanentemente essas partículas.

2. O objetivo desta atividade é desenvolver a capacidade dos estudantes de correlacionarem desenvolvimentos tecnológicos com base em princípios científicos e diversificar o domínio de aplicação da eletricidade. Caso não seja possível realizar as visitas, essa atividade pode ser substituída por uma pesquisa na internet. Como as fontes são distintas, as vantagens explicitadas dessa técnica podem variar bastante, mas alguns pontos importantes são: baixa toxicidade, melhor aproveitamento da tinta (menor desperdício e quase completa reutilização de material), melhor cobertura do material a ser pintado, possibilita alcançar pontos difíceis, permite uma cobertura mais homogênea e possui um custo de aplicação mais baixo em alguns casos. Todavia, essa lista não é exaustiva e novos pontos podem ser apresentados pelos aplicadores e fabricantes.

11. a) Teremos uma separação de cargas, ficando positiva a extremidade de *C* mais próxima de *B* e negativa a extremidade mais afastada (o estudante deverá fazer um desenho mostrando este fato).

b) A extremidade mais próxima de *B* será atraída por ele e a extremidade mais afastada será repelida.

c) Sim; porque a atração exercida por *B* (sobre a extremidade mais próxima) é maior do que a repulsão (sobre a extremidade mais afastada). Portanto, o corpo *C* é atraído por *B*, quer este corpo *B* esteja positivo, quer esteja negativo.

d) A carga positiva de *C* é neutralizada por parte da carga negativa de *B*. Então, *B* e *C* ficam ambos negativos e, assim, *C* é repelido após tocar o bastão *B*.

12. a) Não, pois, mesmo que a bolinha estivesse neutra, ela seria atraída pelo corpo eletrizado.

b) Sim, pois a bolinha só será repelida se possuir uma carga de mesmo sinal que a do corpo.

13. a) Elétrons livres serão repelidos para as folhas e, assim, a esfera ficará positiva, enquanto as folhas ficarão negativas.

b) Sim, pois estão ambas eletrizadas negativamente.

c) Haverá passagem de elétrons de *C* para a esfera, neutralizando (ou diminuindo) sua carga positiva.

d) Os elétrons livres em excesso nas folhas se distribuirão pelo eletroscópio, que ficará, então, eletrizado negativamente.

14. a) Se as folhas, que estavam negativas, se separam mais, é porque houve um aumento em sua carga negativa. Isto ocorre porque o indutor repeliu elétrons da esfera para estas folhas. Então, se o indutor repeliu elétrons, ele estava eletrizado negativamente.

b) Neste caso, o indutor atrairia elétrons das folhas para a esfera, isto é, a carga negativa das folhas diminuiria. Então, haveria uma redução na separação entre elas.

15. a) Q_1 repele Q_2. Logo, a força $\vec{F}_2$ sobre Q_2 aponta para a direita. Como:

$$Q_1 = 4{,}3\ \mu C = 4{,}3 \cdot 10^{-6}\ C$$

$$Q_2 = 2{,}0\ \mu C = 2{,}0 \cdot 10^{-6}\ C$$

$$r = 30\ cm = 0{,}30\ m$$

Temos, pela lei de Coulomb:

$$F_2 = k_0 \frac{Q_1 Q_2}{r^2} = 9{,}0 \cdot 10^9 \cdot \frac{(4{,}3 \cdot 10^{-6}) \cdot (2{,}0 \cdot 10^{-6})}{(0{,}30)^2}$$

$$\Rightarrow F_2 = 0{,}86\ N$$

b) Q_2 também repele Q_1. Logo, a força $\vec{F}_1$ sobre Q_1 está dirigida para a esquerda. Como vimos no exemplo resolvido da seção 1.5, $\vec{F}_1$ e $\vec{F}_2$ constituem um par de ação e reação. Portanto, devemos ter:

$$F_1 = F_2 \Rightarrow F_1 = 0{,}86\ N$$

16. a) Como $F \propto Q_1 Q_2$, sendo Q_1 multiplicado por 10 e Q_2 dividido por 2, concluímos que *F* ficará multiplicado por 5 (pois $10 : 2 = 5$).

b) Seria:

$$F = 5 \cdot 0{,}86\ N \text{ ou } F = 4{,}3\ N$$

17. a) Como $F \propto 1/r^2$, se *r* for multiplicado por 5, concluímos que *F* será **dividido** por 25.

b) Como, agora, o valor de *r* foi dividido por 2, concluímos que *F* **aumentará**, tornando-se 4 vezes maior.

18. Quando duas cargas elétricas, inicialmente no vácuo, são mergulhadas em um meio material, a força elétrica entre elas **diminui**. Pela tabela 1.2 vemos que a constante dielétrica da glicerina é $K = 43$. Isto significa que a força entre as cargas torna-se 43 vezes menor. Portanto, a força entre Q_1 e Q_2 na glicerina será:

$$F = \frac{0{,}86}{43} \Rightarrow F = 2{,}0 \cdot 10^{-2}\ N$$

INTEGRANDO... A FORÇA ELÉTRICA E A MATÉRIA

1. • Massa aproximada do elétron: $9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg
• Massa aproximada do próton: $1{,}7 \cdot 10^{-27}$ kg
• Raio do átomo de hidrogênio: $5{,}3 \cdot 10^{-11}$ m

2. $F = \dfrac{9 \cdot 10^9 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}}{(5{,}3 \cdot 10^{-11})^2} \simeq 8{,}2 \cdot 10^{-8}\ N$

3. $F = \dfrac{6.7 \cdot 10^{-11} \cdot 1{,}7 \cdot 10^{-27} \cdot 9{,}1 \cdot 10^{-31}}{(5{,}3 \cdot 10^{-11})^2} \simeq 3{,}7 \cdot 10^{-47}\ N$

4. • Ordem de grandeza da força elétrica $= 10^{-7}$
• Ordem de grandeza da força gravitacional $= 10^{-46}$
Portanto, a força elétrica é aproximadamente 10^{40} vezes maior do que a força gravitacional. Note que esse é um fator muito alto, o que nos permite desprezar a atração gravitacional nessa situação.

5. $F = \dfrac{9 \cdot 10^9 \cdot 2{,}5 \cdot 10^{-12} \cdot 2{,}5 \cdot 10^{-12}}{(20 \cdot 10^{-6})^2} = 1{,}4 \cdot 10^{-4}\ N$

Pratique Física em equipe

As observações feitas no texto antes da apresentação das experiências deste capítulo são extremamente importantes. De fato, se a umidade do ar estiver elevada e aqueles cuidados não forem observados, as experiências não apresentarão resultados satisfatórios.

1. Os estudantes devem perceber que os pedaços leves de papel e um fino filete de água são atraídos em direção ao pente eletrizado em função da carga induzida. Caso os pedaços de papel fossem maiores, a força elétrica seria menor que o peso do papel e este não seria atraído de modo significativo.

2. Após realizar a experiência, o estudante poderá responder às questões formuladas da seguinte maneira:

a) A bolinha **não** estava inicialmente eletrizada, mas é atraída pelos motivos analisados no início da seção 1.1.

b) Após encostar no pente, a bolinha adquire uma carga de mesmo sinal que ele e, por isso, é repelida (veja detalhes do processo na seção 1.1).

3. 1º) As tiras repelem-se porque estão eletrizadas com cargas de mesmo sinal (ambas foram atritadas com mesmo material).

2º) Ao introduzir o pente entre as tiras, verificamos que a separação entre elas aumenta. Isto ocorre porque o pente possui carga de mesmo sinal que as tiras (elas são repelidas pelo pente).

3º) Introduzindo-se entre as tiras um objeto qualquer (folha de papel, pedaço de pano ou a própria mão da pessoa), observa-se que as folhas se fecham. Para entender por que isto ocorre, consideremos a figura anterior, na qual *CD* e *CF* representam as tiras supostas com carga negativa. Ao introduzir o objeto *AB* entre elas, aparecem nas duas faces do objeto voltadas para as folhas cargas positivas (por indução ou por polarização). Estas cargas positivas atraem as folhas e, por isso, elas se fecham. Retirando o objeto *AB*, as tiras voltam a se separar, pois, como o plástico é isolante, elas perdem pouca carga ao encostarem no objeto *AB*.

4. As observações descritas nesta experiência exigirão uma condição especial: tempo bastante seco. Entretanto, satisfeitas estas condições, os estudantes poderão observar os efeitos descritos, os quais são bastante interessantes.

5. O professor deverá estimular o estudante a construir o eletroscópio, orientando-se pela figura desta experiência. Com este aparelho ele poderá realizar, perante a classe, as experiências descritas na seção 1.4.

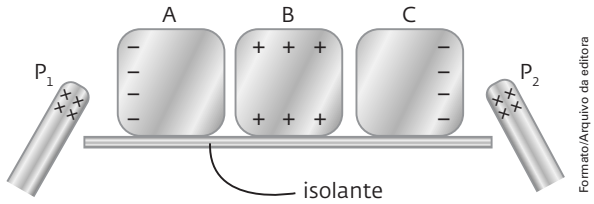
Problemas e testes

1. e

Quando as cargas têm o mesmo sinal, elas se repelem, isto é, $\vec{F}_1$ e $\vec{F}_2$ têm sentidos opostos. Quando elas têm sinais contrários, elas se atraem, isto é, $\vec{F}_1$ e $\vec{F}_2$ continuam a ter sentidos opostos. Portanto, os sentidos de $\vec{F}_1$ e $\vec{F}_2$ são opostos em qualquer situação.

2. Como *C* repele *D* e este é positivo, concluímos que *C* também é positivo. Se *A* atrai *C*, concluímos que *A* é negativo e, como *A* repele *B*, o corpo *B* também será negativo.

3. a) Os elétrons livres dos blocos metálicos serão atraídos pelos bastões P_1 e P_2, acumulando-se nas extremidades de *A* e *C* próximas de P_1 e P_2 (veja a figura abaixo).



b) Como vemos na figura, o bloco *B* ficará positivo porque vários elétrons livres deste bloco passaram para *A* e para *C*. Então, ao serem separados, os blocos terão as seguintes cargas: *A* – negativa, *B* – positiva, *C* – negativa.

4. Em virtude do atrito com o ar e do atrito da gasolina com as paredes do tanque, o caminhão pode adquirir uma carga elétrica durante o percurso até o posto. Essa carga, atingindo certo valor, poderia dar origem a uma centelha elétrica, que teria consequências desastrosas. Para evitar que a carga elétrica acumulada no caminhão provoque incêndio ou explosão no posto de abastecimento, um cabo terra deve ser conectado entre o posto e o caminhão, provocando o escoamento da carga elétrica para a terra.

5. Sabemos que $F \propto 1/r^2$. Observando os gráficos apresentados nas alternativas deste problema, vemos que o gráfico **c** é o único que corresponde à função mencionada (*F* diminui de maneira não linear à medida que *r* aumenta).

6. a) Como a distância *r* passou de $4{,}0 \cdot 10^{-2}$ m para $12 \cdot 10^{-2}$ m, o valor de *r* tornou-se **3 vezes maior**.

b) Como $F \propto 1/r^2$ e *r* tornou-se 3 vezes maior, concluímos que *F* tornou-se **9 vezes menor**.

c) O novo valor de *F* será:

$$F = \frac{27 \cdot 10^{-4}}{9} \text{ ou } F = 3{,}0 \cdot 10^{-4} \text{ N}$$

7. d

Para a carga *q* ficar em equilíbrio, as forças elétricas $\vec{F}_1$ e $\vec{F}_2$ de Q_1 e Q_2 sobre ela devem ter sentidos contrários. Isto só pode ocorrer se *q* estiver entre Q_1 e Q_2 (à direita de Q_2 e à esquerda de Q_1 as forças $\vec{F}_1$ e $\vec{F}_2$ terão o mesmo sentido). Além disso, devemos ter $F_1 = F_2$. Para que isto ocorra, como $Q_1 > Q_2$, concluímos que a carga *q* deve estar mais próxima de Q_2.

8. 02 + 04 + 08 = 14

01) Está incorreta, pois só é possível a troca de elétrons entre materiais.

02) Está correta, pois quando atritamos dois materiais inicialmente neutros, um adquire carga negativa e outro, positiva. Logo, após a eletrização ambos irão se atrair.

04) Está correta, pois no processo de eletrização o número total de prótons e elétrons não se altera, havendo apenas separação das cargas elétricas. Não há, portanto,

criação nem destruição de carga elétrica, isto é, a carga total é conservada.

08) Está correta, pois quanto mais afastados estiverem na lista, maior será a eficiência na eletrização.

16) Está incorreta, pois, após o atrito, os bastões irão se repelir.

32) Está incorreta, pois materiais idênticos não se eletrizam por atrito.

9. e

Após o contato entre A e B temos: $Q_A = Q_B = \frac{Q}{2}$

Após o contato entre A e C temos: $Q_A = Q_C = \frac{Q}{4}$

Após o contato entre B e C temos: $Q_B = Q_C = \frac{\frac{Q}{2} + \frac{Q}{4}}{2} = \frac{3Q}{8}$

10. a

As partículas de fumaça, ao atravessar a grade metálica que está carregada negativamente, ficam carregadas negativamente. Ao se aproximar das placas coletoras que estão carregadas positivamente, as partículas são atraídas e se depositam neste local.

11. b

Na eletrização por atrito, há passagem de cargas negativas (elétrons) de um corpo para outro. Se o bastão ficou carregado positivamente, ele perdeu elétrons para a seda, ou seja, cargas negativas foram transferidas do bastão para a seda.

12. d

Ao conectar o condutor às esferas, haverá a distribuição de cargas entre elas. Podemos considerar que o conjunto corresponde a um grande condutor. Como não há campo elétrico em seu interior, não haverá diferença de potencial.

Capítulo 2: Campo elétrico

Orientações específicas

O campo elétrico é um dos conceitos mais fundamentais da Física e, portanto, procuramos utilizar uma abordagem simples para apresentá-lo em nosso livro, lançando mão de imagens que ajudassem sua visualização e exemplos que clareassem seu significado. Ainda assim, é fundamental que o professor se esforce para que as ideias apresentadas neste capítulo sejam assimiladas pelos estudantes de uma maneira segura, uma vez que o conceito de campo elétrico será utilizado repetidas vezes durante o desenvolvimento da Eletricidade e também do Eletromagnetismo.

A definição geral de campo poderia ter sido dada no estudo da Gravitação Universal, como costuma ocorrer com livros didáticos de Física destinados ao Ensino Médio. Entretanto, por se tratar de um conceito um tanto abstrato, julgamos mais adequado introduzi-lo neste capítulo, quando o aluno já se encontra mais amadurecido e, desta forma, mais apto à compreensão desse conceito.

Chamamos a atenção para alguns cuidados gerais relacionados ao desenvolvimento deste capítulo:

- Um erro frequente é o entendimento de campo elétrico como sendo "o espaço em torno da carga". Sabemos que o campo elétrico não é o próprio espaço ao redor da carga, e sim "algo" que está situado nesse espaço. Em outras palavras, quando nos referimos ao campo elétrico de uma carga, estamos falando sobre as modificações introduzidas no espaço devido à presença da carga.
- O cálculo matemático do módulo de $\vec{E}$ foi feito somente para o caso do campo de uma carga puntual ou de uma distribuição discreta de cargas puntuais. O campo resultante de uma distribuição contínua de cargas foi analisado apenas de modo qualitativo, com o objetivo único de fazer o aluno perceber que existem campos mais complexos do que aquele que se origina de uma simples carga puntual.
- De modo semelhante, consideramos inapropriado o estudo matemático da lei de Gauss em um curso introdutório de Eletricidade. Nossa experiência nos informa que os alunos, de maneira geral, não conseguem dominar a aplicação dessa lei e não veem sentido em estudar o campo elétrico produzido por distribuições de cargas em placas infinitas, em fios longos e retos, no interior de esferas dielétricas eletrizadas, etc.
- Por se tratar de um caso simples, analisamos também o campo elétrico estabelecido por uma esfera metálica eletrizada. Julgamos que tal análise representa uma oportunidade de apresentar ao estudante uma técnica, ainda que de uma forma bastante simplificada, para se calcular campos resultantes de cargas não puntuais. A análise que fizemos no tópico *Campo de uma esfera* usa ideias simples, mas que retratam os fundamentos conceituais do Cálculo Integral, assunto que alguns alunos terão oportunidade de estudar em cursos mais avançados.
- Outra configuração de campo elétrico que apresentamos neste capítulo foi aquela produzida por duas placas paralelas e carregadas com cargas de mesmo módulo, porém de sinais contrários. O campo elétrico uniforme, situado na região entre as placas, é bastante explorado ao longo dos capítulos de nosso livro, pois permite a formulação de um grande número de problemas compatíveis com o nível de um curso de Eletricidade para o Ensino Médio.

Resoluções das atividades

Para iniciar a conversa

Os tubarões utilizam sua capacidade de detecção de campos elétricos através da ampola de Lorenzini localizada em sua cabeça.

A carga elétrica.

Entre os vários fatores que explicam os ataques de tubarões em Pernambuco, alguns especialistas consideram que o principal deles foi a construção do porto de Suape, ao sul do Recife. Essa afirmação se baseia no fato de que, a partir da década de 1990, quando passou a funcionar regularmente, aumentou o número de ataques. O porto causou impactos ambientais, desde a mudança da salinidade da água até a destruição de ecossistemas costeiros e marinhos, onde tubarões recém-nascidos se alimentavam. Essa mudança forçou os tubarões a se deslocar para o norte, região da maior parte dos ataques nas praias metropolitanas do Recife. Há diversos outros fatores que o professor pode discutir com os estudantes, inclusive a recente descoberta do despejo irregular de lixo e de restos animais de um matadouro clandestino na região. Além disso, é importante enfatizar que o ser humano precisa conviver em harmonia com os demais habitantes do planeta para evitar desequilíbrios deste tipo.

Verifique o que aprendeu

1. a) Haverá um campo elétrico em P_1 se uma força elétrica atuar sobre a carga colocada naquele ponto. Como, ao ser colocada em P_1, a carga Q é repelida por Q, a pessoa concluirá que existe um campo elétrico em P_1.

b) O campo em P_1 é criado por Q.

c) A carga q, usada para verificar se existe o campo, denomina-se **carga de prova** (ou carga de teste).

d) O campo em P_1 existe independentemente de q, pois ele é criado por Q.

2. a) Temos:

$$E = \frac{F}{q} = \frac{0{,}60}{1{,}5 \cdot 10^{-6}} \Rightarrow E = 4{,}0 \cdot 10^5 \text{ N/C}$$

b) Como a carga Q colocada em P é positiva, concluímos que o vetor $\vec{E}$ terá a mesma direção e o mesmo sentido da força elétrica $\vec{F}$ (o estudante deverá, então, traçar o vetor $\vec{E}$ vertical, para baixo).

3. a) Como Q tende a se deslocar em sentido contrário ao campo elétrico $\vec{E}$, concluímos que ela é uma carga **negativa**.

b) De $E = F/q$, vem:

$$q = \frac{F}{E} = \frac{0{,}20}{5{,}0 \cdot 10^4} \Rightarrow Q = 4{,}0 \cdot 10^{-6} \text{ C}$$

Como 10^{-6} C = 1 μC, temos $Q = 4{,}0$ μC.

4. a) Temos $Q = 4{,}5$ μC $= 4{,}5 \cdot 10^{-6}$ C e $r = 30$ cm $= 0{,}30$ m. Então, como Q é uma carga puntual, vem:

$$E = k_0 \frac{Q}{r^2} = 9{,}0 \cdot 10^9 \cdot \frac{(4{,}5 \cdot 10^{-6})}{(0{,}30)^2}$$

$$\Rightarrow E = 4{,}5 \cdot 10^5 \text{ N/C}$$

b) Como $E \propto Q$, duplicando Q o valor de E torna-se duas vezes maior.

c) O novo valor do campo seria:

$$E = 2 \cdot (4{,}5 \cdot 10^5 \text{ N/C}) = 9{,}0 \cdot 10^5 \text{ N/C}$$

5. a) A distância r' (de P' a Q) é **3 vezes maior** do que a distância r (de P a Q).

b) Como $E \propto 1/r^2$ e $r' = 3r$, concluímos que o campo E' em P' é **9 vezes menor** do que o campo em P.

c) Então, como o campo em P vale $9{,}0 \cdot 10^5$ N/C, teremos:

$$E' = \frac{9{,}0 \cdot 10^5}{9} \therefore E' = 1{,}0 \cdot 10^5 \text{ N/C}$$

6. a) Sabemos que a força entre cargas elétricas no ar se torna 80 vezes menor quando elas são mergulhadas na água. Como $E = F/q$, é evidente que a intensidade do campo também se reduz na mesma proporção, isto é, torna-se 80 vezes menor.

b) Seria, evidentemente:

$$E'' = \frac{9{,}0 \cdot 10^5}{80} \therefore E'' = 1{,}1 \cdot 10^4 \text{ N/C}$$

7. a) Examinando a figura 2.3, vemos que o campo criado por uma carga positiva aponta no sentido em que se afasta da carga. Assim, como Q_1 é uma carga positiva, concluímos que o campo $\vec{E}_1$ que esta carga cria em P está apontando para a direita (o estudante deverá desenhar este vetor $\vec{E}_1$ em P).

b) Como Q_1 é uma carga puntual e observando que a distância de P a Q_1 é $r_1 = 10$ cm $= 0{,}10$ m vem:

$$E_1 = k_0 \frac{Q_1}{r_1^2} = 9{,}0 \cdot 10^9 \cdot \frac{(8{,}0 \cdot 10^{-7})}{(0{,}10)^2}$$

$$\therefore E_1 = 7{,}2 \cdot 10^5 \text{ N/C}$$

8. a) O campo $\vec{E}_2$ é criado por uma carga negativa (carga Q_2) e, portanto, como vemos na figura 2.4, deve apontar para esta carga. Logo, o estudante deverá traçar o vetor $\vec{E}_2$ em P apontando para a direita (no mesmo sentido de $\vec{E}_1$).

b) Como Q_2 também é uma carga puntual e sua distância a P é $r_2 = 10$ cm $= 0{,}10$ m vem:

$$E_2 = k_0 \frac{Q_2}{r_2^2} = 9{,}0 \cdot 10^9 \cdot \frac{(8{,}0 \cdot 10^{-7})}{(0{,}10)^2}$$

$$\therefore E_2 = 7{,}2 \cdot 10^5 \text{ N/C}$$

Observação: O sinal da carga não deve ser levado em consideração no cálculo da intensidade do campo, pois estamos calculando simplesmente o **módulo** do vetor campo elétrico. O sentido do campo já foi determinado e indicado na figura (levando em consideração o sinal da carga).

c) Como $\vec{E}_1$ e $\vec{E}_2$ têm a mesma direção e o mesmo sentido, o valor do campo elétrico resultante, $\vec{E}$, em P será:

$$E = E_1 + E_2 = 7{,}2 \cdot 10^5 + 7{,}2 \cdot 10^5$$

$$\therefore E = 1{,}44 \cdot 10^6 \text{ N/C}$$

Então, o vetor $\vec{E}$ aponta para a direita.

9. a) Como o vetor $\vec{E}$ aponta para a esfera, concluímos que a carga desta esfera é **negativa**.

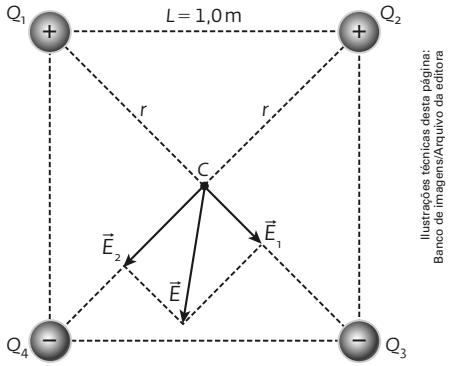
b) A distância r' de P' ao centro da esfera é R e a distância r de P ao centro é $2R$. Então, $r' = r/2$.

c) Sabemos que o campo da esfera em um ponto é inver-

samente proporcional ao quadrado da distância deste ponto ao centro da esfera. Assim, como $r' = r/2$, concluímos que $E' = 4E$.

d) $E' = 4E = 4 \cdot 1{,}5 \cdot 10^4 \therefore E' = 6{,}0 \cdot 10^4$ N/C

10. A distância r de cada carga ao centro do quadrado pode ser obtida considerando o triângulo retângulo $Q_1 Q_2 C$.



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

Temos:

$$r^2 + r^2 = 1{,}0^2 \therefore r^2 = 0{,}50$$

Como $Q_1 = -Q_3$, essas cargas estabelecem em C campos de mesmo módulo e mesmo sentido, cuja resultante $\vec{E}_1$ vale:

$$E_1 = 2 \cdot 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{1{,}0 \cdot 10^{-7}}{0{,}50} \text{ ou } E_1 = 3{,}6 \cdot 10^3 \text{ N/C}$$

De modo semelhante, como $Q_2 = -Q_4$, elas estabelecem em C o campo $\vec{E}_2$ dado por:

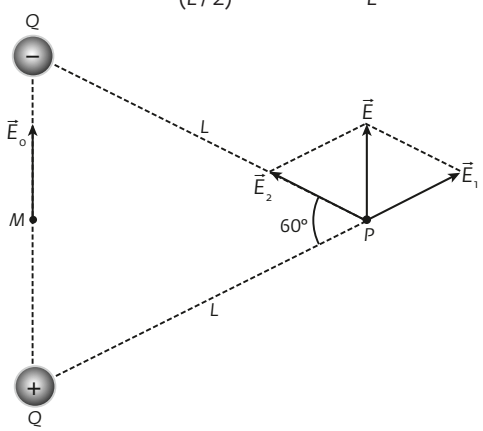
$$E_2 = \frac{2 \cdot 9 \cdot 10^9 \cdot 2{,}0 \cdot 10^{-7}}{0{,}50} \text{ ou } E_2 = 7{,}2 \cdot 10^3 \text{ N/C}$$

Na figura anterior, vemos que $\vec{E}_1$ e $\vec{E}_2$ são perpendiculares entre si. Então, o módulo do campo resultante $\vec{E}$, em C, é dado por:

$$E^2 = E_2^2 + E_1^2 \ \therefore \ E = 8{,}0 \cdot 10^3 \text{ N/C}$$

11. O campo $\vec{E}_0$, no ponto médio M mostrado na figura, é dado por:

$$E_0 = 2k_0 \frac{Q}{(L/2)^2} \text{ ou } E_0 = 8k_0 \frac{Q}{L^2}$$



No ponto P (terceiro vértice do triângulo), as cargas criam os campos $\vec{E}_1$ e $\vec{E}_2$ de mesmo módulo, que têm como resultante o vetor $\vec{E}$ mostrado na figura. Portanto:

$$E = 2E_1 \text{ sen } 30° \therefore E = E_1$$

Como $E_1 = \frac{K_0 Q}{L^2}$, obtemos $E = \frac{E_0}{8}$.

12. Como o campo resultante em O é nulo, temos $E_1 = E_2$, isto é:

$$k_0 \frac{Q^1}{d^2} = k_0 \frac{Q_2}{(2d)^2} \therefore Q_2 = 4Q_1$$

13. O aluno deverá traçar uma figura semelhante àquela mostrada na resposta do problema, observando dois aspectos importantes desse diagrama:

1º) O número de linhas de força que partem da carga $+2Q$ é maior do que o número das que partem da carga $+Q$.

2º) A região do campo de pequena intensidade (praticamente nulo), entre as cargas, está mais próxima da carga $+Q$ (observe a região onde não aparecem linhas de força e compare com a figura 2.13.b).

14. a) A expressão $E = \frac{K_0 Q}{r^2}$ só se aplica ao caso do campo criado por uma carga puntual. O campo em P_2, na figura 2.14, é criado por duas placas extensas eletrizadas, isto é, cargas **não puntuais**. Então, aquela expressão matemática **não poderá ser usada** para este caso.

b) Sim, pois a expressão $E = F/q$ é a **definição** da intensidade do campo elétrico e, portanto, pode ser usada em qualquer situação.

15. a) O próton possui carga positiva e, assim, a força sobre ele teria o mesmo sentido do campo $\vec{E}$, isto é, estaria apontando da placa positiva para a negativa.

b) De $F = qE$, como o módulo da carga Q do próton é igual à do elétron, concluímos que a força no próton terá módulo igual ao da força que atuou no elétron.

c) Como o campo é uniforme, sabemos que o valor da força no próton **permaneceria constante** enquanto ele se deslocasse.

d) Sob a ação de uma força constante, o próton adquiriria uma **aceleração constante**, isto é, um movimento retilíneo uniformemente acelerado.

16. a) O feixe A deslocou-se para a placa positiva. Logo, as partículas deste feixe são negativas, isto é, o feixe A é constituído de elétrons. Como o feixe B não se desviou, suas partículas não devem possuir carga, isto é, o feixe B é constituído de nêutrons. O feixe C desviou-se para a placa negativa. Logo, suas partículas são positivas, isto é, este feixe é constituído de prótons.

b) Como vimos no exercício anterior, as forças que atuam nos prótons e nos elétrons são iguais. Como o elétron possui uma massa menor, ele adquire, ao penetrar no campo, maior aceleração do que o próton. Por isso, o feixe A é mais desviado do que o feixe C.

17. a) Sabemos que a carga positiva do cilindro metálico está distribuída em sua superfície externa. Assim, é evidente que a pequena esfera adquirirá uma carga positiva ao tocar esta superfície.

b) Não há carga elétrica na superfície interna do cilindro. Então, a esfera em B não ficará eletrizada.

18. a) Porque a pessoa *A* está em contato com a superfície externa da gaiola, onde sabemos existir carga elétrica. Assim, esta pessoa eletriza-se e seus cabelos repelem-se uns aos outros.

b) Porque no interior da gaiola não há campo nem carga elétrica (blindagem eletrostática).

19. Aprendemos nesta seção que, para blindar eletrostaticamente um aparelho, devemos envolvê-lo com uma superfície metálica. Da maneira como o estudante procedeu, ele blindou a carga *Q* (não haveria efeitos de cargas externas sobre *Q*). Então, para blindar *P*, o estudante deveria envolver este aparelho com a cúpula metálica.

20. Não; a carga negativa permanecerá fixa na região onde apareceu (região atritada), porque a borracha é isolante e, assim, as cargas elétricas não se deslocam ao longo dela.

Aplicações da Física: Como funcionam os para-raios?

1. Não existe nenhum indício de que espelhos atraiam raios. Mesmo tendo uma fina cobertura refletora de metal atrás do vidro, não existe razão alguma para acreditar que eles atraiam raios, em especial porque eles não se configuram como uma ponta e não acumulam cargas suficientes para atrair o raio. Por fim, se fosse verdade que eles atraem raios, fechar a cortina não faria diferença, o que mostra o quanto de ficção há nessa lenda.

2. Se houver uma ponta em um local elevado, haverá probabilidade de que ela seja atingida por raios sempre que ocorrer uma tempestade (veja a resposta deste exercício no Livro do Aluno).

21. a) O valor da rigidez dielétrica da mica (cerca de $100 \cdot 10^6$ N/C) é muito elevado, em comparação com o de outros materiais. Assim, ela poderá suportar campos elétricos mais intensos sem se tornar condutora (entre as placas de um capacitor, por exemplo).

b) A rigidez dielétrica do vidro pirex é:

$$14 \cdot 10^6 \text{ N/C} = 1{,}4 \cdot 10^7 \text{ N/C}.$$

Assim, quando submetido a um campo elétrico de $2{,}0 \cdot 10^7$ N/C, o pirex se torna condutor e não poderia ser usado como isolante.

22. a) Pelas informações fornecidas, o ar úmido se torna condutor sob a ação de um campo elétrico menor; isto é, a rigidez dielétrica do ar torna-se menor quando ele está úmido.

b) Isto significa que o óleo pode suportar a ação de campos elétricos mais intensos do que o ar, sem tornar-se condutor, ou seja, sua rigidez dielétrica é maior que a do ar.

23. a) Como sabemos, o campo elétrico é mais intenso próximo à ponta *A* (mais aguda). Portanto, nas proximidades de *A*, o ar se torna condutor, enquanto ainda permanece isolante nas demais regiões. Logo, o escoamento da carga se fará pela ponta *A*.

b) Como a esfera não possui pontas e sua área é igual à do corpo da figura, para que a rigidez dielétrica do ar em torno dela seja atingida, será necessário fornecer à esfera uma carga maior do que aquela que foi fornecida ao corpo (com cargas iguais, o campo elétrico criado nas proximidades da esfera seria inferior àquele próximo à ponta *A*).

24. Como dissemos, a ação protetora de um para-raios se estende a uma distância aproximadamente igual ao dobro de sua altura. Portanto, apenas a pessoa situada a 80 m da base da torre mencionada não estaria protegida.

25. a) Aplicando-se ao isolante um campo elétrico $\vec{E}$ e uma força elétrica $F = qE$ irá atuar sobre cada um de seus elétrons. Portanto, quanto maior *E*, maior será *F* e, se o valor de *E* for suficiente para liberar os elétrons de seus átomos, eles se tornam elétrons livres e o material torna-se condutor.

b) Por definição, a rigidez dielétrica de um isolante é o valor máximo de $\vec{E}$ que pode ser aplicado ao material sem que ele se torne um condutor.

26. À medida que aumentamos a carga na esfera, o campo elétrico que ela cria em suas proximidades também aumenta e, para um determinado valor da carga, este campo torna-se superior à rigidez dielétrica do ar. Nessas condições, o ar em volta da esfera se torna condutor e qualquer carga adicional transferida a ela se escoa para o ar. Com essa análise ficam respondidos os itens **a** e **b**.

Pratique Física em equipe

Evitar o uso de peneiras (coadores) muito altas que não permitiriam uma aproximação suficiente do pente para atrair os pedaços de papel. Informe aos alunos que em lugares muito úmidos a eletrização do pente pode ser reduzida, prejudicando o resultado. Com estes cuidados, verifica-se que o isolante não exerce blindagem sobre estes pedaços. Em contrapartida, quando usamos a peneira metálica, não haverá ação do pente eletrizado sobre o papel, em virtude da blindagem exercida pelo metal. Retirando-se a peneira metálica, desaparece o efeito de blindagem e os pedaços de papel são novamente atraídos pelo pente.

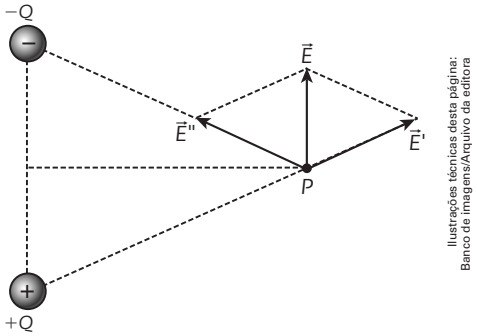
Problemas e testes

1. O campo elétrico (resultante) será nulo em um ponto onde os campos $\vec{E}_1$ e $\vec{E}_2$, criados por Q_1 e Q_2, tiverem o mesmo módulo e sentidos contrários. Apenas nos pontos situados entre Q_1 e Q_2 estes campos têm sentidos contrários. Temos $Q_1 > Q_2$ e sabemos que o campo criado por uma carga puntual é tanto menor quanto maior for a distância à carga. Concluímos, então, que, para termos $E_1 = E_2$, o ponto procurado deve estar mais próximo de Q_2. Logo, este ponto só pode ser *D*.

2. c

O campo criado em *P* pela carga $+Q$ está representado pelo vetor $\vec{E}'$ na figura a seguir e o campo criado pela carga $-Q$, pelo vetor $\vec{E}''$ (observe que os módulos destes dois vetores

são iguais). Usando a regra do paralelogramo, determinamos a resultante de $\vec{E}'$ e $\vec{E}''$, obtendo o vetor $\vec{E}$ da figura a seguir. Concluímos, então, que o campo elétrico em *P* é mais bem representado pelo vetor $\vec{E}_3$ da figura deste problema.



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

3. a) e b) Como estes dois pontos estão situados no interior da esfera metálica, o campo elétrico é **nulo** nestes pontos.

c) O campo criado por uma esfera em pontos exteriores a ela é dado por $E = k_0 Q/r^2$ (supondo a esfera no ar). Para um ponto muito próximo de sua superfície, temos $r = R$ (raio da esfera). Logo:

$$E = k_0 \frac{Q}{R^2} = 9{,}0 \cdot 10^9 \cdot \frac{(2{,}0 \cdot 10^{-6})}{(0{,}20)^2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow E = 4{,}5 \cdot 10^5 \text{ N/C}$$

d) Neste caso, $r = R + 10 \text{ cm} = 30 \text{ cm}$. Então:

$$E = k_0 \frac{Q}{R^2} = 9{,}0 \cdot 10^9 \cdot \frac{(2{,}0 \cdot 10^{-6})}{(0{,}30)^2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow E = 2{,}0 \cdot 10^5 \text{ N/C}$$

4. a) Como o campo está apontando para a Terra, concluímos que a carga nela existente é **negativa**.

b) Considerando a Terra esférica, o campo que ela cria em pontos próximos de sua superfície é dado por $E = k_0 Q/R^2$ (em que $R = 6\,000 \text{ km} = 6{,}00 \cdot 10^6 \text{ m}$). Então, o módulo da carga na Terra será:

$$Q = \frac{E \cdot R^2}{k_0} = \frac{100 \cdot (6{,}00 \cdot 10^6)^2}{9{,}0 \cdot 10^9} \Rightarrow Q = 4{,}0 \cdot 10^5 \text{ C}$$

5. O campo elétrico, no ar, próximo à superfície da esfera, é dado por $E = \frac{K_0 Q}{R^2}$. Se substituirmos nesta expressão o maior valor que *E* pode ter no ar ($E = 3 \cdot 10^6$ N/C), determinaremos a carga máxima que pode ser dada à esfera sem que ela se descarregue. Então:

$$3 \cdot 10^6 = 9{,}0 \cdot 10^9 \frac{Q}{(0{,}10)^2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow Q = 3{,}3 \cdot 10^{-6} \text{ C ou } Q = 3{,}3 \text{ μC}$$

6. a) Vários elétrons livres do metal deslocam-se em sentido contrário ao campo aplicado ao corpo, isto é, deslocam-se para *A*. Portanto, a extremidade *A* ficará negativa e *B* ficará positiva.

b) Observando as linhas de força do campo indutor, vemos que estão mais próximas umas das outras nas vizinhanças de *A*. Então, a intensidade deste campo elétrico é maior nas proximidades de *A* do que nas de *B*.

c) Como a carga em *A* é negativa, a força $\vec{F}_A$ terá sentido contrário ao campo ($\vec{F}_A$ aponta para a esquerda). Em *B*, a carga é positiva e, então, $\vec{F}_B$ tem o mesmo sentido do campo ($\vec{F}_B$ aponta para a direita).

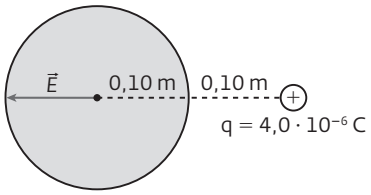
d) Como o campo é mais intenso em *A* do que em *B*, temos $F_A > F_B$. Assim, o corpo metálico tenderá a se deslocar **para a esquerda**.

7. Dados: $q = 4 \cdot 10^{-6}$ C; $d = 0{,}2 \text{ m} = 2 \cdot 10^{-1}$ m; $k = 9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$.

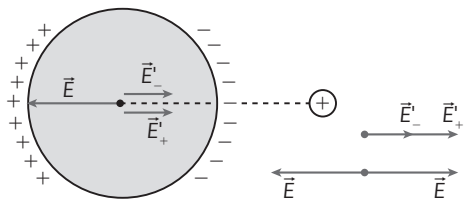
a) O campo eletrostático gerado pela partícula no centro da esfera maciça é dado pela lei de Coulomb:

$$E = k \frac{q}{r^2} \Rightarrow E = 9 \cdot 10^9 \frac{4 \cdot 10^{-6}}{(2 \cdot 10^{-1})^2}$$

$\Rightarrow E = 9{,}0 \cdot 10^5$ N/C, no sentido indicado na figura abaixo.



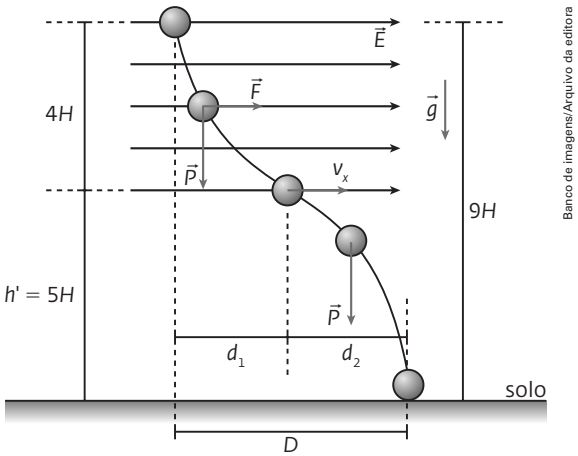
b) Analisando a figura abaixo, como a esfera condutora está em equilíbrio eletrostático, o vetor campo elétrico resultante no seu interior é nulo. A partícula eletrizada induz cargas elétricas negativas (–) e positivas (+) na superfície da esfera, gerando um outro campo elétrico no seu interior ($\vec{E}' = \vec{E}_- + \vec{E}_+$), em sentido oposto ao campo da partícula, de modo a anular o campo elétrico resultante.



8. c

Como a gota possui velocidade constante, sabemos que a resultante das forças sobre a gota é nula, de acordo com as leis de Newton. Neste caso, existe alguma força que equilibra a força que atua sobre a gota. Essa força é ocasionada pelo campo elétrico existente entre as placas. Para equilibrar a força peso, a força exercida pelo campo deve ser vertical para cima. Como a placa que possui carga negativa é a placa superior, concluímos que a gota possui carga negativa e sofrerá, então uma força no sentido contrário ao sentido do vetor $\vec{E}$.

9. Como o campo elétrico ($\vec{E}$) é horizontal e a força elétrica ($\vec{F}$) só age na direção do campo, ela não influi no tempo de queda. Como o enunciado não informou o sinal da carga, supomos que seja positiva. Por isso, a força elétrica está no mesmo sentido do campo elétrico.



Banco de imagens/Arquivo da editora

a) Como indicado na figura acima, quando a partícula atingir a altura $h' = 5H$, ela terá caído $4H$. Como na vertical o movimento é uniformemente variado, vem:

$$4H = \frac{1}{2} \cdot g \cdot t'^2 \Rightarrow 8H\, g \cdot t'^2 \Rightarrow t' = \sqrt{\frac{8H}{g}}$$

b) Analogamente ao item anterior, para o tempo total, temos:

$$9H = \frac{1}{2} \cdot g \cdot t_T^2 \Rightarrow 18H = g \cdot t_T^2 \Rightarrow t_T = \sqrt{\frac{18H}{g}}$$

c) O tempo que a partícula permanece sob ação do campo elétrico é $t' = \sqrt{\frac{8H}{g}}$.

d) A distância horizontal percorrida pela partícula, como mostrado na figura, é:

$$D = d_1 + d_2 \text{ (I)}$$

Capítulo 3: Potencial elétrico

Orientações específicas

Ao iniciar este capítulo, o professor deverá ressaltar para os estudantes que a diferença de potencial, junto com o conceito de campo elétrico visto no capítulo anterior, é uma grandeza que será utilizada em todo o curso de Eletricidade. No estudo de corrente elétrica e dos circuitos elétricos, por exemplo, essa grandeza desempenha um papel fundamental. Com isso quer-se dizer que o entendimento deste capítulo irá facilitar sobremaneira o estudo dos próximos capítulos. Além disso, os termos *voltagem*, *volt*, etc. costumam fazer parte do vocabulário cotidiano dos estudantes, mesmo antes de seu contato com a Física; por esse motivo, temos observado um interesse natural do aluno em querer estudar esses tópicos, talvez na tentativa de entender melhor o significado de termos que lhe são familiares.

Recomendamos que o professor fique atento aos seguintes pontos durante o ensino deste capítulo:

- Nada melhor do que a tensão de uma pilha, de uma tomada ou de uma bateria para exemplificar, de maneira concreta, o conceito de diferença de potencial. Quando estes exemplos são omitidos, muitos estudantes acabam não percebendo que a tensão em circuitos elétricos é a mesma tensão que eles já haviam estudado neste terceiro capítulo.
- Temos observado que muitos alunos entendem, equivocadamente, que um valor elevado de potencial elétrico em um ponto corresponderia a um valor também elevado de campo elétrico naquele ponto. Se o professor detectar este engano entre seus estudantes, ele deverá explicar, com o auxílio da relação $E = V_{AB}/d$, que a intensidade do campo elétrico na região entre dois pontos separados por uma pequena distância d é diretamente proporcional à variação do potencial elétrico entre esses dois pontos, e não ao valor do potencial em si. Em outras palavras, ainda que o potencial seja elevado, se ele variar pouco, o campo elétrico terá baixa intensidade.
- Uma ação que facilita a assimilação dos conceitos de campo e potencial elétrico é a elaboração, em conjunto com os alunos, de um quadro comparativo desses dois conceitos. Neste quadro, é importante que conste, além dos nomes *campo elétrico* e *potencial elétrico* encabeçando cada coluna, os seguintes campos: unidade de medida, tipo de grandeza: escalar ou vetorial, expressão para o cálculo no caso de carga puntual, expressão para o cálculo no caso de esfera condutora e relação entre as duas grandezas. O esboço de um quadro como esse é apresentado a seguir:

	CAMPO ELÉTRICO ($\vec{E}$)	POTENCIAL ELÉTRICO (V)
UNIDADE DE MEDIDA		
TIPO DE GRANDEZA		
CÁLCULO PARA CARGA PUNTUAL		
CÁLCULO PARA ESFERA METÁLICA		
RELAÇÃO ENTRE $\vec{E}$ e V		

- O conceito de potencial elétrico, assim como ocorre com o conceito de campo elétrico, pode parecer bastante abstrato na visão do aluno. Para que ele perceba mais sentido e significado nesse conceito, tomamos o cuidado de relacioná-lo, ao longo do desenvolvimento do capítulo, com as grandezas trabalho e energia. Essas duas grandezas já foram estudadas no primeiro volume da coleção e, deste modo, são conhecidas do estudante. Além disso, essa relação vai ajudar o aluno a entender a origem da energia elétrica dissipada por efeito joule durante a passagem da corrente elétrica, fenômeno que será tratado na próxima unidade.
- Os tópicos 3.3 e 3.5, embora apresentem algumas ideias e informações novas, não introduzem conceitos fundamentais ou conhecimentos que sejam necessários para o desenvolvimento do restante de nosso curso. O objetivo destas seções é apenas o de ilustrar a aplicação do conceito de potencial. Por esse motivo, elas devem ser tratadas mais rapidamente e, em caso de um curso com carga horária reduzida, poderão ser suprimidas da programação, sem que haja prejuízos didáticos consideráveis.

Resoluções das atividades

Para iniciar a conversa

Na fabricação de fios e cabos é utilizado o cobre, por ser um bom condutor de eletricidade.

Pelo fato desses materiais serem isolantes elétricos, diminuindo assim os riscos de um possível acidente mais grave.

Em baterias, pilhas, geradores e demais produtores de diferença de potencial.

Verifique o que aprendeu

1. a) Designando por A e B os terminais da tomada:

$$V_{AB} = \frac{\mathcal{C}_{AB}}{q} = \frac{44\ \text{J}}{0{,}20\ \text{C}} \Rightarrow V_{AB} = 220\ \frac{\text{J}}{\text{C}} = 220\ \text{V}$$

b) Se as cargas cederam 1 100 J de energia ao aparelho, concluímos, conforme foi dito no texto, que elas receberam esta quantidade de energia do campo elétrico, ou seja, um trabalho $\mathcal{C}_{AB} = 1\ 100$ J foi realizado sobre elas. Então, de $V_{AB} = \mathcal{C}_{AB}/q$ vem (sabendo-se que V_{AB} é mantido constante):

$$q = \frac{\mathcal{C}_{AB}}{V_{AB}} = \frac{1\,100}{220} \Rightarrow Q = 5{,}0\ \text{C}$$

2. a) A força elétrica é conservativa, isto é, o trabalho que ela realiza não depende da trajetória. Então, ao longo da trajetória II o trabalho realizado pelo campo elétrico será ainda **igual** a $1{,}5 \cdot 10^{-3}$ J.

b) Ao longo da trajetória III:

$$\mathcal{C}_{AB} = 1{,}5 \cdot 10^{-3}\ \text{J}$$

Então, se a carga Q for deslocada no sentido inverso, isto é, de B para A, o trabalho realizado pelo mesmo campo elétrico será $\mathcal{C}_{BA} = -1{,}5 \cdot 10^{-3}$ J.

c) Consideremos, por exemplo, que a carga Q saia de A e se desloque até B pela trajetória II e volte de B para A ao longo da trajetória III. Tendo em vista as respostas das questões **a** e **b**, concluímos que o trabalho total realizado sobre Q pelo campo elétrico, nesta trajetória fechada, é nulo ($\mathcal{C}_{AB} + \mathcal{C}_{BA} = 0$). Este resultado é geral, sendo válido em qualquer trajetória **fechada**.

Observação: O professor poderá informar a seus alunos que este resultado é válido para todas as forças **conservativas**, isto é, o trabalho que elas realizam em uma trajetória fechada é sempre **nulo**.

3. a) A carga positiva q será atraída pelo corpo negativo e, então, tenderá a se deslocar para A.

b) Uma carga positiva tende a se deslocar de onde o potencial é maior para onde ele é menor. Portanto, o potencial de A é **menor** do que o de B.

Observação: Este exercício ilustra uma maneira prática de determinar as regiões de um campo elétrico onde o potencial é menor (ou maior): abandona-se uma carga positiva neste campo e observa-se para onde ela tende a se deslocar.

4. a) Entre as placas teremos um campo elétrico uniforme, perpendicular a elas e dirigido da placa positiva para a negativa (os estudantes deverão desenhar o vetor $\vec{E}$ em uma cópia da figura do exercício).

b) Como o campo é uniforme, temos $V_{MN} = Ed$. Então:

$$E = \frac{V_{MN}}{d} = \frac{12}{2{,}0 \cdot 10^{-3}} \Rightarrow E = 6{,}0 \cdot 10^{3}\ \text{V/m}$$

$$\text{ou } E = 6{,}0 \cdot 10^{3}\ \text{N/C}$$

5. a) Temos:

$$V_{AB} = Ed = (1{,}5 \cdot 10^{4}) \cdot (5{,}0 \cdot 10^{-2}) \Rightarrow V_{AB} = 750\ \text{V}$$

b) Como BC é perpendicular a $\vec{E}$, concluímos que $V_{BC} = 0$. Poderíamos também chegar a esta conclusão usando a relação $V_{BC} = Ed$ e observando que a distância d entre B e C, ao longo do campo, é nula ($d = 0$). Então, $V_{BC} = 0$.

c) Temos $V_{CA} = Ed$, em que d é a distância de A até C ao **longo do campo**, isto é, $d = 5{,}0\ \text{cm} = 5{,}0 \cdot 10^{-2}\ \text{m}$. Então:

$$V_{AC} = Ed = (1{,}5 \cdot 10^{4}) \cdot (5{,}0 \cdot 10^{-2}) \Rightarrow V_{AC} = 750\ \text{V}$$

De outra maneira, poderíamos ter escrito:

$$V_{AC} = V_{AB} + V_{BC} = V_{AB} + 0 \Rightarrow V_{AC} = V_{AB} \text{ ou } V_{AC} = 750\ \text{V}$$

6. a) Com os dados da tabela, os alunos construirão o gráfico $V_{AB} \times d$ e obterão uma reta passando pela origem. Como E = constante, temos $V_{AB} \propto d$ e, então, o aspecto do gráfico obtido já devia ser esperado.

b) De $V_{AB} = Ed$, vemos que a inclinação do gráfico $V_{AB} \times d$ fornece o valor de E.

7. a) Considerando em seus gráficos, por exemplo, o primeiro e o terceiro pontos marcados, os estudantes obterão a inclinação a $\Delta V_{AB}/\Delta d$ do gráfico. Temos:

$$\Delta V_{AB} = 300 - 100 \text{ ou } \Delta V_{AB} = 200\,V$$

$$\Delta d = 6{,}0 - 2{,}0 \text{ ou } \Delta d = 4{,}0\,mm$$

Logo:

$$\text{inclinação} = \frac{\Delta V_{AB}}{\Delta d} = \frac{200\,V}{4{,}0\,mm} = 50\,V/mm$$

b) Como inclinação $= E$, temos $E = 50$ V/mm. Lembrando que 1 mm $= 10^{-3}$ m, vem:

$$E = 50\,\frac{V}{10^{-3}\,m} = 50 \cdot 10^3\,\frac{V}{m} = 5{,}0 \cdot 10^4\,\frac{V}{m}$$

Como 1 V/m = 1 N/C, temos $E = 5{,}0 \cdot 10^4$ N/C

8. a) A expressão $V = k_0 Q/r$ mostra-nos que $V \propto 1/r$. Então, duplicando r, o valor de V torna-se 2 vezes menor.

b) Pelo mesmo motivo ($V \propto 1/r$), ao triplicar r, o valor de V fica dividido por 3.

c) Como $V \propto 1/r$, o estudante deverá traçar um gráfico que corresponde à proporção inversa. Esta curva é uma **hipérbole**.

9. a) Lembrando que o sinal de Q deve ser levado em consideração para o cálculo do potencial, teremos:

$$V_A = k_0\,\frac{Q}{r_A} = 9{,}0 \cdot 10^9 \cdot \frac{(-3{,}0 \cdot 10^{-6})}{0{,}15} \therefore V_A = -18 \cdot 10^4\,V$$

b) $V_B = k_0\,\frac{Q}{r_B} = 9{,}0 \cdot 10^9 \cdot \frac{(-3{,}0 \cdot 10^{-6})}{0{,}45} \therefore V_B = -6 \cdot 10^4\,V$

c) $V_{BA} = V_B - V_A = -6{,}0 \cdot 10^4 - (-18 \cdot 10^4) \therefore V_{BA} = 12 \cdot 10^4\,V$

10. a) Temos:

$$V_1 = k_0\,\frac{Q_1}{r_1} = 9{,}0 \cdot 10^9 \cdot \frac{5{,}0 \cdot 10^{-6}}{5 \cdot 10^{-2}} \therefore V_1 = 9{,}0 \cdot 10^5\,V$$

b) $V_2 = k_0\,\frac{Q_2}{r_2} = 9{,}0 \cdot 10^9 \cdot \frac{(-5{,}0 \cdot 10^{-6})}{15 \cdot 10^{-2}} \therefore V_2 = -3{,}0 \cdot 10^5\,V$

c) O potencial em P será a **soma algébrica** de V_1 e V_2, isto é:

$V = V_1 + V_2 = 9{,}0 \cdot 10^5 - 3{,}0 \cdot 10^5 \;\therefore\; V = 6{,}0 \cdot 10^5\,V$

11. a) Como P está situado no interior da esfera, neste ponto, temos $E = 0$.

b) Vimos que o potencial de qualquer ponto do interior da esfera é igual ao de um ponto da superfície e dado por $V = k_0 Q/R$

Logo, $V_P \neq 0$.

c) Como P e P' estão no mesmo potencial, $V_P - V_{P'} = 0$.

12. a) O potencial de um ponto da superfície da esfera é dado por:

$$V_C = k_0\,\frac{Q}{R} = 9{,}0 \cdot 10^9 \cdot \frac{(1{,}5 \cdot 10^{-6})}{0{,}30} \therefore V_C = 4{,}5 \cdot 10^4\,V$$

b) Sabemos que $V_P = V_C$ e $V_{P'} = V_C$.

Logo, $V_P = V_{P'} = 4{,}5 \cdot 10^4$ V.

13. a) Uma carga positiva tende a se mover para pontos onde o potencial é menor. Então, a carga de prova tenderá a se mover para S_2.

b) Como a carga positiva deslocou-se para S_2, concluímos que o campo elétrico terá este mesmo sentido (aponta de S_1 para S_2). Lembrando que as linhas de força são perpendiculares às superfícies equipotenciais, o estudante deverá traçar linhas perpendiculares a S_1 e a S_2, apontando de S_1 para S_2 e igualmente espaçadas (pois o campo é uniforme).

c) Como A e B pertencem a uma mesma superfície equipotencial, $V_A = V_B$, isto é, $V_{AB} = 0$. Por outro lado, temos $V_A = 500$ V e $V_C = 300$ V; então:

$$V_{AC} = V_A - V_C = 500 - 300 \text{ ou } V_{AC} = 200\,V$$

14. a) A superfície do condutor é equipotencial. Então $V_B = V_A$, isto é, $V_B = 800$ V.

b) **Todos** os pontos do condutor estão no mesmo potencial. Portanto, temos também $V_C = 800$ V.

c) De $V_{AB} = \tau_{AB}/q$, temos $\tau_{AB} = qV_{AB}$. Como $V_{AB} = 0$, obtemos $\tau_{AB} = 0$ (como vimos, isto ocorre porque o vetor $\vec{E}$ é perpendicular à superfície do condutor).

Aplicações da Física: Diferença de potencial na medicina

1. Este procedimento melhora a fixação dos eletrodos na pele e consequentemente melhora a condução dos impulsos elétricos no eletrocardiógrafo.

2. Um batimento (intervalo RR) gasta aproximadamente 0,9s, logo, por regra de três, em um minuto (60s), temos $\frac{60}{0{,}9} = 67$ batimentos. Assim, podemos dizer que a frequência cardíaca desse paciente é de 67 batimentos por minuto.

15. A energia cinética adquirida pelo próton é igual ao trabalho realizado sobre ele no acelerador de partículas, isto é, $T = E_c$. Da definição de diferença de potencial, temos $T = qV_{AB}$, em que q, neste caso, é a carga do próton. Então:

$$qV_{AB} = E_c \therefore V_{AB} = \frac{E_C}{q}$$

Substituindo os valores de E_c e Q obtemos:

$$V_{AB} = 5 \cdot 10^7\,V \text{ (cinquenta milhões de volts)}$$

16. a) Como vimos nesta seção, quando o contato é feito internamente, a carga da pequena esfera se transfere integralmente para a esfera oca (princípio de funcionamento do gerador de Van de Graaff). Então, neste caso, a carga final na esfera oca (grande) será de:

$$10 \cdot 0{,}1\,\mu C = 1\,\mu C.$$

b) No contato externo da pequena esfera, sua carga **não** é totalmente transferida para a esfera grande. Então, a carga final na esfera oca será **menor** do que 1 μC.

17. a) O potencial de uma esfera eletrizada é dado por:

$$V = k_0\frac{Q}{R} \Rightarrow Q = \frac{VR}{k_0}$$

Substituindo-se os valores $V = 10 \cdot 10^6$ volts, $R = 1{,}8$ m e $k_0 = 9 \cdot 10^9$ unidades SI, obtemos $Q = 2 \cdot 10^{-3}$ C.

b) Para que isso fosse possível, o campo elétrico na superfície da esfera teria de ser **menor** do que a rigidez dielétrica do ar ($3 \cdot 10^6$ N/C). Com a carga Q encontrada em **a**, o campo na superfície da esfera será:

$$E = k_0\,\frac{Q}{R^2} = 9{,}0 \cdot 10^9 \cdot \frac{2 \cdot 10^{-3}}{(1{,}8)^2} \Rightarrow E = 5{,}5 \cdot 10^6\,N/C$$

Então, sendo este campo maior do que $3 \cdot 10^6$ N/C, o ar em torno da esfera se tornará condutor antes que aquela carga se acumule na esfera, isto é, a esfera mencionada não poderá atingir o potencial de $10 \cdot 10^6$ V.

18. No exercício 17, para a esfera atingir o potencial de $10 \cdot 10^6$ V, ela deverá adquirir uma carga $Q = 2 \cdot 10^{-3}$ C. Podemos estabelecer a seguinte proporção:

$$50 \cdot 10^{-6} \text{ C são transportados em 1 s}$$
$$2 \cdot 10^{-3} \text{ C em } t$$

Portanto, obtemos $t = 40$ s.

19. Em cada 1 s, uma carga $Q = 50 \cdot 10^{-6}$ C deve ser transportada de maneira a sofrer uma elevação de potencial $V_{AB} = 10 \cdot 10^6$ V. O trabalho realizado nesta operação é dado por:

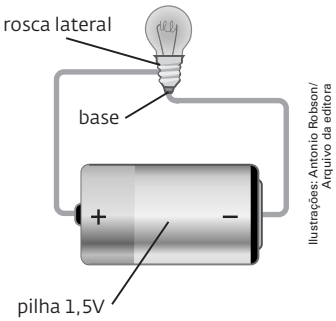
$$\mathcal{C} = qV_{AB} = 50 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 10^6 \text{ ou } \mathcal{C} = 500 \text{ J}$$

Como esse trabalho é realizado em 1 s, a potência do motor deve ser $P = 500$ J/s $= 500$ W.

Pratique Física

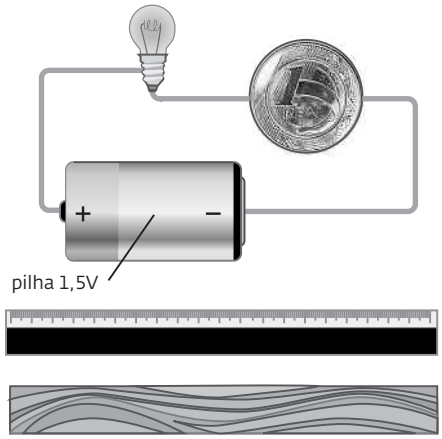
em equipe

1. Espera-se que o aluno monte um arranjo experimental semelhante ao da figura abaixo:



Ilustrações: Antonio Robson/ Arquivo da editora

2. A lâmpada só vai acender quando os fios forem conectados a partes diferentes da lâmpada e não ambos na base ou no vidro da lâmpada, como alguns alunos tentarão fazer. Evite a utilização de fios desfiados que possam comprometer o experimento. Após conseguir acender a lâmpada, o aluno deve desenhar o arranjo experimental. Ainda não é necessário utilizar símbolos elétricos para identificar as conexões. Com a certeza de que o arranjo está funcionando, o aluno deve conectar a régua, a madeira e o metal ao circuito, conforme a figura:



Espera-se que o aluno perceba que a lâmpada acenderá apenas quando os condutores (moedas, metais, etc.) estiverem presentes no arranjo experimental.

Problemas e testes

1. (01), (04), (08) e (16)

(08) e (16): O campo elétrico é um exemplo de campo do tipo conservativo. Por ser conservativo, existe um potencial associado a ele. Além disso, em um campo assim, o trabalho realizado para deslocar uma partícula depende somente dos pontos inicial e final.

2. Ao ligar uma esfera à outra através do fio, se estabelece o equilíbrio eletrostático entre elas, logo:

$$V_1 = \frac{kQ_1}{R_1} = V_2 = \frac{kQ_2}{R_2} \Rightarrow R_1Q_2 = R_2Q_1 \text{ (1)}$$

Nesse processo, há, por hipótese, a conservação de cargas, ou seja, a carga inicial Q é mantida na configuração final de cargas:

$$Q = Q_1 + Q_2 \text{ (2)}$$

Substituindo-se a equação (2) na (1), temos:

$$R_1(Q - Q_1) = R_2Q_1$$

Usando os valores numéricos fornecidos pela questão:

$$5 \cdot 10^{-2}(3 \cdot 10^{-6} - Q_1) = 10^{-1} \cdot Q_1$$
$$Q_1 = \frac{15 \cdot 10^{-8}}{15 \cdot 10^{-2}} = 1\mu C$$

Da equação (2), temos que $Q_2 = Q - Q_1 = 2\mu C$

3. e

A diferença de potencial a que se refere o texto sobre o transistor MOSFET é a provocada pelo campo elétrico.

4. a) Correta; pois a placa *A* é negativa e *B* é positiva (observe os polos da bateria). Então, o vetor $\vec{E}$ está dirigido de *B* para *A*. Seu valor será:

$$E = \frac{V_A - V_B}{d} = \frac{300}{2{,}0 \cdot 10^{-2}} \Rightarrow E = 1{,}5 \cdot 10^4 \text{ V/m}$$

b) Correta; pois o campo elétrico no interior de um condutor, em equilíbrio eletrostático, é **nulo**.

c) Correta; pois o vetor $\vec{E}$ está dirigido da placa positiva para a negativa. Seu valor será igual àquele calculado em **a**.

d) Correta; pois o potencial de *B* em relação a *A* é $V_B = 300$ V, uma vez que $V_A = 0$ (nível). Como todos os pontos de um condutor em equilíbrio eletrostático estão no mesmo potencial, temos $V_C = V_B$, ou seja, $V_C = 300$ V.

e) Correta; pois como $V_C - V_D = 300$ V (veja a voltagem da bateria) e $V_C = 300$ V, vemos que $V_D = 0$ (isto significa que *D* está no mesmo potencial de *A*).

5. a) Errada; pois entre *A* e *B* temos um campo elétrico uniforme dirigido de *B* para *A*. Então, sobre o elétron atuará uma força elétrica constante, dirigida de *A* para *B* e, assim, o seu movimento será **uniformemente acelerado**.

b) Correta; pois entre *B* e *C* o campo elétrico é nulo e, portanto, não haverá força atuando sobre o elétron. Logo, sua E_c permanece constante (movimento retilíneo uniforme).

c) Correta; pois entre *C* e *D* temos um campo elétrico uniforme dirigido de *C* para *D*. Então, sobre o elétron atuará uma força constante, dirigida de *D* para *C* (contrária ao seu movimento) e, assim, o movimento do elétron será **uniformemente retardado.**

d) Correta; pois as forças que atuam no elétron entre *A* e *B* e entre *C* e *D* têm módulos iguais e sentidos contrários. Além disso, como $d_{AB} = d_{CD}$, concluímos que entre *A* e *B* é realizado um trabalho positivo sobre o elétron e entre *C* e *D* é realizado um trabalho de mesmo módulo, porém negativo. Portanto, a energia que o elétron recebe entre *A* e *B* é **retirada** entre *C* e *D* e, assim, sua velocidade ao chegar em *D* é nula.

e) Errada; pois vimos que a velocidade do elétron aumenta de *A* até *B*, permanece constante entre *B* e *C* e diminui entre *C* e *D*.

6. Se o potencial tem o mesmo valor em todos os pontos da região, a diferença de potencial V_{AB} entre dois pontos **quaisquer** será nula. Então, se uma carga se deslocar entre estes dois pontos, temos $\tau_{AB} = 0$. Não havendo trabalho realizado sobre a carga, **quaisquer que sejam os pontos considerados**, somos levados a concluir que não há força elétrica atuando sobre ela. Consequentemente, devemos ter $E = 0$ nesta região.

Temos um exemplo concreto desta situação no interior de uma esfera metálica em que V = constante e $E = 0$.

7. a) O potencial que Q_1 estabelece em *A* é:

$$V_{1A} = k_0 \frac{Q_1}{r_{1A}} = 9{,}0 \cdot 10^9 \cdot \frac{(5{,}0 \cdot 10^{-6})}{5{,}0 \cdot 10^{-2}} \Rightarrow V_{1A} = 9{,}0 \cdot 10^5\ \text{V}$$

A carga Q_2 estabelece em *A* um potencial:

$$V_{2A} = k_0 \frac{Q_2}{r_{2A}} = 9{,}0 \cdot 10^9 \cdot \frac{(-2{,}0 \cdot 10^{-6})}{5{,}0 \cdot 10^{-2}} \Rightarrow$$
$$\Rightarrow V_{2A} = -3{,}6 \cdot 10^5\ \text{V}$$

Logo, o potencial em *A* será:

$$V_A = V_{1A} + V_{2A} \Rightarrow V_A = 5{,}4 \cdot 10^5\ \text{V}$$

b) De modo análogo ao que foi feito para o ponto *A*, teremos para *B*:

$$V_{1B} = k_0 \frac{Q_1}{r_{1B}} = 9{,}0 \cdot 10^9 \cdot \frac{(5{,}0 \cdot 10^{-6})}{0{,}10} \Rightarrow V_{1B} = 4{,}5 \cdot 10^5\ \text{V}$$

$$V_{2B} = k_0 \frac{Q_2}{r_{2B}} = 9{,}0 \cdot 10^9 \cdot \frac{(-2{,}0 \cdot 10^{-6})}{0{,}20}$$
$$\Rightarrow V_{2B} = -0{,}90 \cdot 10^5\ \text{V}$$

Logo:

$$V_B = V_{1B} + V_{2B} \Rightarrow V_B = 3{,}6 \cdot 10^5\ \text{V}$$

c) Teremos:

$$V_{AB} = V_A - V_B = 5{,}4 \cdot 10^5 - 3{,}6 \cdot 10^5 \Rightarrow V_{AB} = 1{,}8 \cdot 10^5\ \text{V}$$

8. a) De $V_{AB} = Ed$, obtemos $E = V_{AB}/d$. Como V_{AB} permanece constante (mantida pela bateria), diminuindo *d* *E* aumentará.

b) De $V_{AB} = Ed$, vem:

$$d = \frac{V_{AB}}{E} = \frac{3\,600}{3 \cdot 10^6} \Rightarrow d = 1{,}2 \cdot 10^{-3}\ \text{m ou } d = 1{,}2\ \text{mm}$$

Logo, quando a distância entre as placas atingir 1,2 mm o campo elétrico entre elas tornar-se-á igual a $3 \cdot 10^6$ N/C e uma faísca saltará de uma placa para a outra.

9. b

Desenhando os campos $\vec{E}_1$ e $\vec{E}_2$ criados por $+Q$ e $-Q$ em *P*, vemos que estes vetores têm direções diferentes. Então, a resultante deles não pode ser nula, isto é, em *P* temos $E \neq 0$.

Por outro lado, o potencial em *P* é dado pela soma **algébrica** dos potenciais V_1 e V_2 estabelecidos por $+Q$ e $-Q$. Observando que estas cargas estão à mesma distância *r* de *P*, temos:

$$V = V_1 + V_2 = k_0 \frac{Q}{r} - k_0 \frac{Q}{r} \Rightarrow V = 0$$

10. a

Como a esfera é metálica, em equilíbrio eletrostático, em seu centro temos $E = 0$. Por outro lado, o potencial *V* no centro da esfera é igual ao de sua superfície, isto é, $V = 800$ V.

11. Devemos observar inicialmente que, sendo o centro do quadrado equidistante de seus vértices, qualquer que seja a distribuição das cargas (duas positivas e duas negativas), teremos sempre $V = 0$ naquele centro. De fato, sendo *r* a distância de um vértice ao centro, temos, para qualquer distribuição das cargas nos vértices:

$$V = k_0 \frac{Q}{r} + k_0 \frac{Q}{r} - k_0 \frac{Q}{r} - k_0 \frac{Q}{r} \Rightarrow V = 0$$

Para que também tenhamos $E = 0$ no centro, os campos devidos às cargas situadas em vértices opostos devem se anular mutuamente. Para que isto ocorra, as cargas de mesmo sinal devem ser colocadas em vértices opostos. Por exemplo: colocando-se as cargas positivas em *A* e *C*, os campos que elas estabelecem no centro têm mesmo módulo e sentidos contrários e, portanto, se anularão. O mesmo ocorre com os campos das cargas negativas colocadas em *B* e *D*. Assim, o campo (total) no centro será nulo.

12. a) A energia *E* armazenada na bateria é dada pelo trabalho τ realizado para transportar a carga $q = 2 \cdot 10^5$ C sob uma diferença de potencial (entre os polos da bateria) cujo valor é $V_{AB} = 12$ V.

Temos:

$$E = \tau = qV_{AB} = 2 \cdot 10^5 \cdot 12 \Rightarrow E = 2{,}4 \cdot 10^6\ \text{J}$$

b) Nessa tarefa, a energia *E* seria transformada em energia potencial gravitacional da bateria, isto é, $mgh = E$. Logo:

$$h = \frac{E}{mg} = \frac{2{,}4 \cdot 10^6}{20 \cdot 10} \Rightarrow h = 1{,}2 \cdot 10^4\ \text{m} = 12\ \text{km}$$

13. e

$V = Ed$

$E = \frac{V}{d}$

$F = qE$

$F = e \cdot \frac{V}{d}$

Infográfico

1. O tanque de um carro elétrico é feito de fibra de carbono, que é mais leve e suporta aproximadamente cem vezes mais pressão que um tanque normal. Como o hidrogênio é pouco denso, é necessário colocar muita pressão para fazer caber muito gás em pouco espaço.
2. É o dispositivo que transforma o hidrogênio em energia, utilizando um princípio descoberto há quase 200 anos a partir da reação química do gás hidrogênio com o oxigênio do ar.
3. Por meio do sistema eletrônico. Ele decide, em cada momento, se a eletricidade do motor deve vir das baterias, dos capacitores ou da célula de combustível, de acordo com a aceleração e o tipo de movimento.
4. A energia produzida na célula pode ir direto para o motor ou recarregar duas reservas de energia do carro: baterias e ultracapacitores.
5. Alguns carros elétricos podem recarregar as baterias na tomada em até seis horas. Com as baterias 100%, a autonomia chega a 100 km. Um tanque de hidrogênio é suficiente para 350 km.
6. É um tipo de freio que transforma a energia mecânica do movimento das rodas em eletricidade para recarregar as baterias.

Unidade 2 — Circuitos elétricos de corrente contínua

Capítulo 4: Corrente elétrica

Orientações específicas

Este é o capítulo em que introduzimos o estudo da corrente elétrica, conceito fundamental para o desenvolvimento dos demais capítulos do livro. Nossa experiência tem mostrado que os estudantes são motivados por esse assunto, provavelmente em virtude da relação que fazem entre corrente elétrica e o funcionamento de dispositivos elétricos e eletrônicos de nosso dia a dia. Devemos, porém, selecionar os tópicos e procurar uma maneira adequada de apresentá-los, a fim de fazer bom uso desta motivação. Para isso, recomendamos que o professor considere os seguintes pontos durante o desenvolvimento deste capítulo:

- No tópico 4.2 apresentamos a estrutura interna de uma pilha seca, um dos tipos de pilha mais utilizados no dia a dia. Não aconselhamos uma descrição detalhada dos vários tipos de pilha tampouco das reações de oxidação e de redução que se processam em seu interior, uma vez que faz mais sentido tratar desse assunto pela abordagem da Química. No entanto, algumas relações entre os enfoques físicos e químicos dados ao estudo da pilha estão feitas na seção *Integrando...* do próximo capítulo, quando o aluno terá melhor condições de compreender a razão pela qual esse tema aparece nessas duas disciplinas.
- O professor deverá analisar com cuidado o fato de a corrente elétrica apresentar o mesmo valor em todos os pontos de um circuito de malha única, como aquele mostrado na figura 4.11. Os alunos, frequentemente, se surpreendem com essa informação, pois costumam pensar que a corrente elétrica no ponto *B* do circuito daquela figura deveria ser menor do que a do ponto *A*, pois eles supõem que ela se desgasta ao percorrer a extensão do fio. Neste momento, a analogia hidráulica ilustrada na figura 4.12 deverá ser explorada, pois ela ajuda o aluno a perceber o próprio erro e entender o que de fato ocorre durante a passagem da corrente elétrica por esse tipo de circuito.
- Outro equívoco frequente neste capítulo ocorre quando o estudante acredita que a relação $V_{AB} = Ri$ deve ser utilizada somente para materiais ôhmicos, isto é, materiais que apresentam resistência elétrica constante. Assim que o professor detectar este tipo de engano, ele deverá esclarecer ao estudante que esta expressão, quando colocada na forma $R = \frac{V_{AB}}{i}$, pode ser entendida como a própria definição matemática da resistência eletrica, servindo para o cálculo de seu valor em qualquer situação, o que inclui o caso em que a razão $\frac{V_{AB}}{i}$ não permanece constante.
- Julgamos inapropriado propor ao estudante exercícios que envolvem associações complicadas de resistências. Precisamos nos conscientizar de que é mais importante que o aluno aprenda a analisar um esquema simples de ligação elétrica, como de uma residência, por exemplo, do que ser capaz de resolver problemas formais e complexos, totalmente desvinculados de sua realidade e interesse imediato.
- Durante o estudo da medição da resistência elétrica, julgamos conveniente limitar-nos à apresentação do ohmímetro, do voltímetro e do amperímetro. Métodos mais sofisticados, como o da ponte de Wheatstone, não foram descritos em nosso curso, pois julgamos incompatíveis com o nível de um estudante do Ensino Médio.
- O tópico 4.7 trata da transformação da energia elétrica em outras formas de energia, principalmente a transformação de energia elétrica em energia térmica por efeito Joule. A própria natureza do assunto faz com que este tópico tenha um caráter fundamental. Além disso, trata-se de um tópico relacionado a um

grande número de aplicações tecnológicas e situações ligadas à vida do aluno. Por esses motivos, recomendamos que o professor dedique uma atenção especial ao desenvolvimento desta seção, trabalhando com cuidado seus exemplos e comentários.

Resoluções das atividades

Para iniciar a conversa

Porque ligar o ar-condicionado significava, para a tripulação, usar uma quantidade de ampères que poderia fazer falta para terminar o resgate em segurança.

Ela é formada com elétrons livres presentes no metal que formam os fios.

Ambos irão abrir o circuito elétrico, interrompendo a passagem da corrente elétrica. Caso contrário, o risco de incêndio por efeito joule e queima dos aparelhos por sobrecarga é muito grande.

Verifique o que aprendeu

1. a) Os elétrons (carga negativa) deslocam-se em sentido contrário ao campo $\vec{E}$. Logo, a corrente de elétrons terá o sentido da esquerda para a direita.

b) A corrente convencional (cargas positivas) tem o mesmo sentido do campo $\vec{E}$. Logo, o seu sentido é da direita para a esquerda.

2. a) Temos:

$$\Delta Q = (2{,}0 \cdot 10^{20}) \cdot (1{,}6 \cdot 10^{-19}) \Rightarrow \Delta Q = 32\ \text{C}$$

b) A intensidade da corrente será:

$$i = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{32}{10} \Rightarrow i = 3{,}2\ \text{A}$$

3. a) De $i = \Delta Q/\Delta t$, vem $\Delta Q = i \cdot \Delta t$.

Observando que $i = 400\ \text{mA} = 0{,}400\ \text{A}$ e

$\Delta t = 10\ \text{min} = 600\ \text{s}$, temos:

$$\Delta Q = i \cdot \Delta t = 0{,}400 \cdot 600 \Rightarrow \Delta Q = 240\ \text{C}$$

b) Podemos estabelecer a seguinte proporção, sabendo que a carga do elétron é $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C (veja o exercício anterior ou a tabela no final do volume):

$$1{,}6 \cdot 10^{-19}\ \text{C} - 1\ \text{elétron}$$
$$240\ \text{C} - x \Rightarrow x = \frac{240}{1{,}6 \cdot 10^{-19}}$$

$$\text{ou } x = 1{,}5 \cdot 10^{21}\ \text{elétrons}$$

4. a) Como cada pilha seca fornece uma voltagem de 1,5 V, para obter 6 V deverão ser associadas, adequadamente, 4 pilhas.

b) O estudante deverá associar as pilhas em série (o professor deverá solicitar ao estudante que faça um desenho, observando que o polo positivo de uma pilha deve estar em contato com o polo negativo da pilha seguinte).

5. a) Não; pois a pilha superior da associação está invertida (o seu polo positivo está em contato com o polo positivo da anterior).

b) O potencial sobe 1,5 V quando passamos de *B* para o polo positivo da primeira pilha; sobe mais 1,5 V quando nos deslocamos pela segunda pilha e sobe 1,5 V na terceira pilha. Entretanto, na quarta pilha, estaremos passando do potencial mais alto (polo positivo) para o mais baixo (polo negativo em *A*). Então, nesta pilha, haverá uma queda de 1,5 V no potencial. Assim:

$$V_{AB} = 1{,}5\ \text{V} + 1{,}5\ \text{V} + 1{,}5\ \text{V} - 1{,}5\ \text{V} \Rightarrow V_{AB} = 3{,}0\ \text{V}$$

6. a) Como *B* e *C* estão em contato, então estão no mesmo potencial, isto é, $V_B = V_C$ ou $V_{BC} = 0$. De modo semelhante concluímos que $V_{DE} = 0$ e $V_{FG} = 0$.

b) Ao passarmos de *C* para *D*, estamos passando do potencial menor (polo negativo) para um potencial maior (polo positivo). Então, o potencial **aumenta** 6 V.

c) De *E* para *F* estamos passando de um potencial mais alto para um mais baixo. Portanto, o potencial **diminui** 6 V.

7. a) De A para *B* o potencial aumenta 6 V; de *B* para *C* não varia; de *C* para *D* aumenta 6 V e de *D* para *E* não varia. Logo:

$$V_{AE} = 6\ \text{V} + 6\ \text{V} \Rightarrow V_{AE} = 12\ \text{V}$$

b) Já sabemos que $V_{AE} = 12$ V. Observando, agora, que de *E* para *F* o potencial **diminui** 6 V, de *F* para *G* não varia e de *G* para *H* **aumenta** 6 V, teremos:

$$V_{AH} = 12\ \text{V} - 6\ \text{V} + 6\ \text{V} \Rightarrow V_{AH} = 12\ \text{V}$$

8. a) $V_{AB} = V_A - V_B = 12 \Rightarrow -12 = V_B - V_A$

Mas: $V_{BA} = V_B - V_A \Rightarrow V_{BA} = -12\ \text{V}$

b) Uma vez que $V_{AB} = V_A - V_B$, $V_B = 10\ \text{V}$ e $V_{AB} = 12\ \text{V}$, temos que: $12 = V_A - 10 \Rightarrow V_A = 22\ \text{V}$

c) Neste caso, temos: $12 = V_A - 0 \Rightarrow V_A = 12\ \text{V}$

9. Os estudantes deverão indicar na figura que o sentido convencional da corrente, no exterior da bateria, é dirigido do polo positivo para o negativo (a corrente convencional sai do polo positivo e entra no polo negativo). Então, é fácil concluir que:

a) O sentido da corrente na lâmpada é de *A* para *B*.

b) O sentido da corrente no motor é de *C* para *D*.

c) Vimos que a corrente no interior da bateria, **completando o circuito**, desloca-se do polo negativo para o positivo.

10. Destacamos, nesta seção, que em um circuito como este do exercício (circuito em série) a intensidade da corrente tem o **mesmo valor** em qualquer seção do circuito. Logo:

a) A corrente em *B* é de 1,2 A.

b) A corrente que passa através do motor também vale 1,2 A.

c) No interior da bateria, a corrente ainda é igual a 1,2 A.

11. a) Temos:

$$R = \frac{V_{AB}}{i} = \frac{6{,}0}{2{,}0} \therefore R = 3{,}0\ \Omega$$

b) De $R = V_{AB}/i$, obtemos:

$$i = \frac{V_{AB}}{R} = \frac{1{,}5}{3{,}0} \therefore i = 0{,}50\ \text{A}$$

c) De $R = V_{AB}/i$, vem:

$$V_{AB} = Ri = 3{,}0 \cdot 1{,}5 \therefore V_{AB} = 4{,}5\ \text{V}$$

12. a) Os trechos de resistência desprezível são aqueles representados por linhas não quebradas (trechos "lisos"), ou seja: *AB*, *CD* e *EF*.

b) Os trechos que possuem resistência (não desprezível) são representados por linhas quebradas: *BC* e *DE*.

c) Não há variação de potencial em um trecho de resistência desprezível.

Logo, $V_A = V_B$, isto é, $V_{AB} = 0$.

Do mesmo modo, temos $V_{CD} = 0$ e $V_{EF} = 0$.

13. a) A intensidade da corrente é a mesma em qualquer seção do circuito. Logo, a corrente tanto em *BC* quanto em *DE* vale $i = 0{,}30$ A.

b) Temos: $V_{BC} = R_{BC}i = 15 \cdot 0{,}30 \therefore V_{BC} = 4{,}5$ V

$$V_{DE} = R_{DE}i = 25 \cdot 0{,}30 \therefore V_{DE} = 7{,}5 \text{ V}$$

c) Temos: $V_{AD} = V_{AB} + V_{BC} + V_{CD}$

Lembrando que $V_{AB} = 0$ e $V_{CD} = 0$, vem:

$$V_{AD} = V_{BC} \therefore V_{AD} = 4{,}5 \text{ V}$$

De modo análogo, temos:

$$V_{AF} = V_{AD} + V_{DE} + V_{EF} = 4{,}5 + 7{,}5 + 0 \therefore V_{AF} = 12 \text{ V}$$

14. a) Como o segundo fio tem um diâmetro duas vezes maior do que o do primeiro, concluímos que sua seção reta terá uma área **4 vezes maior** (lembre-se de que a área varia com o quadrado das dimensões lineares). Então, como $R \propto 1/A$, vemos que a resistência *R* do segundo fio é 4 vezes menor do que a do primeiro.

b) De $i = V_{AB}/R$, como V_{AB} é constante e *R* tornou-se 4 vezes menor, concluímos que *i* será **4 vezes maior**, isto é:

$$i = 4 \cdot 2{,}0 \therefore i = 8{,}0 \text{ A}$$

15. a) O melhor condutor será aquele que possuir **menor** resistividade. Pela tabela 4.2 vemos, então, que o cobre é **melhor** condutor do que o tungstênio.

b) O material dos fios elétricos deveria ser aquele que apresentasse o **menor** valor da resistividade, isto é, o melhor condutor de todos. Pela tabela 4.2 concluímos que este material deveria ser a **prata.**

Observação: Em virtude do elevado preço da prata, usa-se o material de ρ imediatamente superior. Pela tabela 4.2 vemos que este material é exatamente o cobre que, como sabemos, é largamente empregado na construção de fios condutores em geral.

16. a) Sim; pois como o gráfico $V_{AB} \times i$ é uma reta passando pela origem, concluímos que $V_{AB} \propto i$ (R = constante).

b) Pelo gráfico vemos que para $V_{AB} = 20$ V, temos $i = 0{,}50$ A. Então:

$$R = \frac{V_{AB}}{i} = \frac{20}{0{,}50} \therefore R = 40\ \Omega$$

17. a) Como $V_{AB} \propto i$, duplicando V_{AB} o valor de *i* também duplica.

b) Como o material é ôhmico, o valor de sua resistência **não se altera** quando modificamos a voltagem aplicada.

c) Como *R* não se modifica, temos $R = 40\ \Omega$. Logo:

$$V_{AB} = Ri = 40 \cdot 2{,}0 \therefore V_{AB} = 80 \text{ V}$$

18. a) Não; pois o gráfico $V_{AB} \times i$ não é retilíneo (V_{AB} não é proporcional a *i*).

b) Pelo gráfico vemos que, para $V_{AB} = 10$ V, temos $i = 0{,}10$ A. Então:

$$R = \frac{V_{AB}}{i} = \frac{10}{0{,}10} \Rightarrow R = 100\ \Omega$$

c) O gráfico mostra-nos que, para $V_{AB} = 15$ V, temos $i = 0{,}20$ A. Logo:

$$R = \frac{V_{AB}}{i} = \frac{15}{0{,}20} \Rightarrow R = 75\ \Omega$$

Deve-se observar que o valor de *R* modificou-se quando alteramos a voltagem aplicada ao resistor. Este resultado já era esperado, pois o condutor **não** é ôhmico.

19. Se uma pessoa com a pele seca tocar os dois polos de uma tomada de 120 V, seu corpo será atravessado por uma corrente:

$$i = \frac{V}{R} = \frac{120}{100\,000} = 1{,}2 \text{ mA}$$

Essa pessoa, como vimos, sentirá apenas um ligeiro formigamento.

Se a pessoa estivesse, porém, com a pele molhada, a corrente em seu corpo seria:

$$i = \frac{V}{R} = \frac{120}{1\,000} = 120 \text{ mA}$$

Portanto, essa pessoa poderia até falecer em virtude de fibrilação cardíaca. Por esse motivo, não devemos tocar em instalações elétricas se estivermos com a pele molhada.

20. a) Como as lâmpadas estão ligadas em série, a corrente que passa em R_1 é igual à corrente que passa em R_2.

b) Temos $R_1 = V_{AB}/i$ e $R_2 = V_{CD}/i$ e como $V_{AB} > V_{CD}$ (veja a figura do exercício), concluímos que $R_1 > R_2$ (a maior voltagem está aplicada na maior resistência).

c) A voltagem entre os polos da bateria é a voltagem V_{AD} aplicada na associação. Então:

$$V_{AD} = V_{AB} + V_{CD} = 8 + 4 \text{ ou } V_{AD} = 12 \text{ V}$$

21. a) A voltagem entre os polos da bateria é aquela que ela mantém entre os pontos *A* e *B*, isto é, $V_{AB} = 6$ V. Como R_1 está ligada entre *A* e *B*, teremos uma voltagem de 6 V aplicada em R_1. Da mesma forma, como R_2 está ligada também entre *A* e *B*, ela estará submetida à mesma voltagem de 6 V.

b) Temos $i_1 = V_{AB}/R_1$ e $i_2 = V_{AB}/R_2$ e como $R_1 > R_2$ concluímos que $i_1 < i_2$ (como dissemos, a menor resistência é percorrida pela maior corrente).

22. A interrupção da corrente em qualquer ponto de um circuito em série provoca a sua interrupção em todos os pontos do circuito (como ocorre geralmente com as lâmpadas de uma árvore de Natal). Então, neste exercício, qualquer uma das chaves ao ser desligada fará com que todas as lâmpadas se apaguem.

23. Como as lâmpadas estão ligadas em paralelo, é possível desligar uma delas sem que as demais se apaguem (como ocorre em nossas residências). Assim, é fácil perceber que:

a) Desligando a chave *A*, interrompemos a corrente apenas em L_1.

b) Desligando a chave *B*, interrompemos a corrente apenas em L_2.

c) Podemos observar que através da chave C passa a corrente total do circuito (as correntes das três lâmpadas). Assim, desligando C, interrompemos a corrente nas três lâmpadas (a chave C funciona como uma chave geral).

24. a) Temos, para a ligação em paralelo:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{2}{R_2} = \frac{1}{12} + \frac{1}{12} \text{ ou } \frac{1}{R} = \frac{2}{12}$$

$$\therefore R = 6{,}0\ \Omega$$

b) Tanto R_1 quanto R_2 estão submetidas à mesma voltagem $V_{AB} = 24$ V. Assim:

$$i_1 = \frac{V_{AB}}{R_1} = \frac{24}{12} \text{ ou } i_1 = 2{,}0\ \text{A}$$

$$i_2 = \frac{V_{AB}}{R_2} = \frac{24}{12} \text{ ou } i_2 = 2{,}0\ \text{A}$$

d) A corrente total (fornecida pela bateria) será:

$$i = i_1 + i_2 = 2{,}0 + 2{,}0 \text{ ou } i = 4{,}0\ \text{A}$$

25. a) Temos $V_{AB} = 120$ V e $R = 240\ \Omega$. Então:

$$i = \frac{V_{AB}}{R} = \frac{120}{240} \text{ ou } i = 0{,}50\ \text{A}$$

b) Os aparelhos elétricos em uma residência estão ligados em paralelo. Portanto, ao acendermos a segunda lâmpada, a resistência elétrica da instalação **diminuirá.**

c) A segunda lâmpada está ligada em paralelo com a primeira e é idêntica a ela. Logo, também será percorrida por uma corrente de 0,50 A. Então, a corrente que passa pelo medidor (corrente total) será 0,50 A + 0,50 A = 1,0 A.

d) Como cada lâmpada é percorrida por uma corrente de 0,50 A, é claro que a corrente total de 30 A será alcançada quando forem ligadas 60 lâmpadas.

26. a) Como R_2 e R_3 estão em paralelo:

$$\frac{1}{R_{23}} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{3{,}0} + \frac{1}{6{,}0} \Rightarrow \frac{1}{R_{23}} = \frac{2{,}0 + 1{,}0}{6{,}0}$$

$$\therefore \frac{1}{R_{23}} = \frac{3{,}0}{6{,}0} \text{ ou } R_{23} = 2{,}0\ \Omega$$

b) A resistência R_1 está em série com a associação de R_2 e R_3, ou seja, está em série com a resistência equivalente R_{23}.

Logo, a resistência total da associação será:

$$R = R_1 + R_{23} = 3{,}0 + 2{,}0 \text{ ou } R = 5{,}0\ \Omega$$

c) Sendo $V_{AD} = 1{,}5$ V a voltagem entre os polos da pilha, isto é, a voltagem que ela aplica na associação, será:

$$i = \frac{V_{AB}}{R} = \frac{1{,}5}{5{,}0} \therefore i = 0{,}30\ \text{A}$$

Aplicações da Física: Medida da energia elétrica usada em uma residência

1. a) Para obter a resposta em kWh, devemos expressar P em kW e t em horas. Como 1 kW é 1 000 W, então P é 0,5 kW. Sendo $E = P \cdot t$, temos:

$E = 0{,}5\text{kW} \cdot 4\text{h} \Rightarrow \text{E} = 2\ \text{kWh}$ (dia)

b) A energia total utilizada pelo aquecedor seria

$E_T = 30 \cdot 2\text{kWh} \Rightarrow E_T = 60\text{kWh}$

O preço solicitado seria, então: 60 · R$ 0,50 = R$ 30,00

2. a) 1h por dia em 30 dias são 30h e

$E = P \cdot t = 5\,000 \cdot 30 = 150\,000\ \text{Wh} = 150\ \text{kWh}$

Supondo R$ 0,50 o valor do kWh, temos: R$ 75,00

b) Banhos com menor duração e não ligar o chuveiro na potência máxima.

27. a) As cargas da corrente **perdem** energia ao atravessarem um motor elétrico.

b) A energia perdida pelas cargas é transferida para o motor da bomba (aparece sob a forma de energia mecânica de rotação do motor).

c) Temos: $P = iV_{AB} = 2{,}5 \cdot 120 \therefore P = 300\ \text{W}$

d) O motor funcionou durante um tempo

$\Delta t = 10\ \text{min} = 600\ \text{s}$. Então, de $P = \Delta E/\Delta t$, vem:

$$\Delta E = P \cdot \Delta t = 300 \cdot 600 \therefore \Delta E = 1{,}8 \cdot 10^5\ \text{J}$$

28. a) Como os aparelhos são ligados em paralelo, sabemos que quanto maior for o número deles ligados na instalação, **menor** será a resistência do circuito.

b) Como a resistência do circuito diminui, a corrente total, isto é, aquela que passa no fusível, **aumenta.**

c) Não; pois neste caso a corrente total será de

25 A + 2 A = 27 A e o fusível queima-se apenas quando a corrente através dele ultrapassa 30 A.

d) Sim; pois neste caso a corrente local que passa no fusível (até que ele se queime) é de:

$2 \cdot 2{,}0\ \text{A} + 25\ \text{A} + 2{,}5\ \text{A} = 31{,}5\ \text{A}$

29. À medida que vamos aumentando o número de aparelhos ligados, a resistência total, R, do circuito diminui e, consequentemente, a corrente total i (no fusível) aumenta. O mínimo valor que R pode adquirir será aquele para o qual se tenha $i = 30$ A. Então:

$$R(\text{mínimo}) = \frac{V_{AB}}{i} = \frac{120}{30\ \text{A}} = 4{,}0\ \Omega$$

Assim, se R se tornar inferior a 4,0 Ω, i se tornará maior do que 30 A e o fusível se queimará.

30. a) De $P = iV_{AB}$, como V_{AB} é constante, vemos que para aumentar P devemos **aumentar** i.

b) De $i = V_{AB}/R$, como V_{AB} = constante, vemos que para aumentar i devemos **diminuir** R.

c) Ao trocarmos a chave de inverno para verão, a água passará a sair com uma temperatura menor, isto é, estamos **diminuindo** a potência do chuveiro. Tendo em vista as soluções das questões **a** e **b**, concluímos que a resistência do chuveiro foi **aumentada.**

31. a) Como $\text{P} = \frac{V^2}{R}$, então:

$$4\,400 = \frac{220^2}{R} \Rightarrow \text{R} = 11\ \Omega$$

b) Lembre que a energia se relaciona com a potência pela equação $\Delta\text{E} = \text{P} \cdot \Delta\text{t}$. No nosso caso:

$\text{P} = 4\,400\ \text{W} = 4{,}4\ \text{kW}$

$\Delta\text{t} = 30 \cdot 20\ \text{min} = 600\ \text{min} = 10\ \text{h}$

Logo: $\Delta\text{E} = \text{P} \cdot \Delta\text{t} = 4{,}4\ \text{kW} \cdot 10\ \text{h} \Rightarrow \Delta\text{E} = 44\ \text{kWh}$

32. a) Como R_1 e R_2 estão em série, sabemos que a corrente em R_1 é **igual** à corrente em R_2.

b) De $P = Ri^2$, como i tem o mesmo valor para ambas, concluímos que será dissipada maior potência na resistência de maior valor, isto é, em R_1.

33. a) Devemos ligar o voltímetro entre os pontos A e B, em paralelo com a pilha (1). (O estudante deverá fazer um desenho na figura, mostrando esta ligação do voltímetro.)

b) A voltagem que a associação de pilhas está aplicando no circuito é V_{AD}. Então, o voltímetro deve ser colocado entre os pontos *A* e *D*, em paralelo com a associação de pilhas (isto deve ser indicado com um desenho).

c) Um amperímetro deve ser colocado em série com a resistência pela qual passa a corrente que ele deve medir. Então, colocando-se o amperímetro no ponto *G*, ele medirá tanto a corrente em R_1 quanto em R_2.

d) Pelos motivos analisados na questão anterior concluímos que o amperímetro poderá ser colocado em *E* ou em *F*.

e) Dos pontos citados (*A*, *E*, *F*, *G*, *M* e *N*), a corrente total passa por *A*, *M* e *N*. Então, podemos colocar o amperímetro em qualquer um destes pontos.

34. a) O estudante poderá fazer um desenho como aquele da figura 4.56.

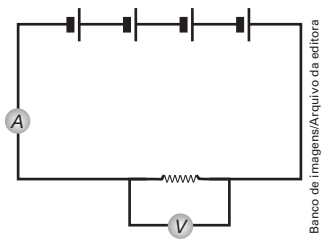
b) Evidentemente, como a voltagem aplicada à resistência é $V_{AB} = 1{,}5$ V e a corrente que passa através dela é $i = 0{,}10$ A, teremos:

$$R = \frac{V_{AB}}{R} = \frac{1{,}5}{0{,}10} \therefore R = 15\ \Omega$$

35. a) Funciona como um amperímetro em série 1.

b) Funciona como um voltímetro (em paralelo).

c)



Banco de imagens/Arquivo da editora

36. Temos: $R = \frac{V_{AB}}{i} = \frac{1{,}5}{0{,}30} \therefore R = 5{,}0\ \Omega$

37. a) A temperatura de transição de uma substância mencionada no texto desta seção representa aquele valor abaixo do qual sua resistência elétrica se anula. Então, a resistência do fio de chumbo abaixo de 7,2 K é igual a zero.

b) Qualquer material, nestas condições, é denominado um supercondutor.

38. a) As linhas de transmissão, em virtude de apresentarem resistência elétrica, se aquecem ao serem percorridas por uma corrente elétrica (efeito Joule). Portanto, há uma perda de potência nas linhas e, assim, a potência que chega à cidade é inferior à potência gerada na usina.

b) Neste caso, como a resistência da linha de transmissão é nula, não haveria perda do efeito Joule e, evidentemente, a potência que chegaria à cidade seria de 700 000 kW (igual à potencial gerada na usina).

c) Como vimos, os materiais só se tornam supercondutores a temperaturas muito baixas. Então, na atualidade, é praticamente impossível a construção de uma linha de transmissão supercondutora em virtude das enormes dificuldades encontradas para manter os cabos em temperaturas tão baixas.

39. Deve-se observar que o voltímetro foi ligado em série no circuito. Então, como a resistência interna do voltímetro é muito grande, teremos um circuito com resistência total extremamente elevada. Assim, a corrente neste circuito (dada por $i = V_{AB}/R$), isto é, a leitura do amperímetro, será praticamente nula.

40. a) Como R_1 e R_2 estão em paralelo, sabemos que a voltagem aplicada em R_1 é igual à voltagem aplicada em R_2.

b) De $i = V_{AB}/R$, como V_{AB} tem o mesmo valor para R_1 e R_2 e sendo $R_1 > R_2$, vemos que $i_1 < i_2$.

c) De $P = iV_{AB}$, como V_{AB} é igual para ambas as resistências, vemos que haverá maior dissipação de potência na resistência percorrida pela maior corrente, isto é, em R_2.

Pratique Física

em equipe

1. Os estudantes devem observar que a água com sal é capaz de conduzir corrente elétrica, mas a água com açúcar, não. Isso se deve à composição dessas substâncias, pois o sal em solução produz íons, enquanto o açúcar, não. Os estudantes devem ainda perceber que a quantidade de sal pode alterar os resultados. Se for colocado pouco sal, o líquido não irá conduzir eletricidade e, à medida que se acrescenta mais sal, a condutividade vai aumentando até um valor máximo. Porém, no caso do açúcar, não há variação.

2. Esta experiência tem como objetivo principal fazer o aluno observar os dois fatos seguintes:

a) Ligando-se a lâmpada L_2 (e em seguida L_3) em série com L_1, o brilho desta lâmpada diminui, mostrando que houve uma diminuição na intensidade da corrente, do que se conclui que houve um aumento na resistência total do circuito.

b) Desligando-se qualquer uma das lâmpadas, as demais se apagam, mostrando que, quando vários aparelhos estão ligados em série, interrompendo-se a corrente em um deles, ela será interrompida em todos os pontos do circuito.

Problemas e testes

1. a) Quando o cursor está em *C*, temos entre *A* e *B* apenas a resistência da lâmpada ($R = 200\ \Omega$). Então, a corrente na lâmpada será:

$$i = \frac{V_{AB}}{R} = \frac{120}{200} \Rightarrow i = 0{,}60\ \text{A}$$

b) Neste caso, a resistência entre *A* e *B* vale:

$$R = 200\ \Omega + 100\ \Omega = 300\ \Omega.$$

Então: $i = \frac{V_{AB}}{R} = \frac{120}{300} \Rightarrow i = 0{,}40$ A

c) Como agora temos $R = 200\ \Omega + 200\ \Omega = 400\ \Omega$, então:

$$i = \frac{V_{AB}}{R} = \frac{120}{400} \Rightarrow i = 0{,}30\ \text{A}$$

2. Para identificar o material que constitui uma resistência, podemos determinar o valor de sua **resistividade.**

De $R = \rho\ \frac{L}{A}$, vem $\rho = \frac{R \cdot A}{L}$

Como $A = 3{,}0\ \text{mm}^2 = 3{,}0 \cdot 10^{-6}\ \text{m}^2$, temos:

$$\rho = \frac{(5{,}7 \cdot 10^{-2}) \cdot (3{,}0 \cdot 10^{-6})}{10{,}0} \Rightarrow \rho = 1{,}71 \cdot 10^{-8}\ \Omega \cdot \text{m}$$

Consultando a tabela 4.2 vemos que este valor de ρ corresponde ao **cobre.**

3. c

a) Errada; pois como *AB* e *BC* são feitos do mesmo material, têm a mesma resistividade.

b) Errada; pois *AB* e *BC* têm o mesmo comprimento, mas *AB* é mais fino do que *BC*.

c) Correta; pois como *AB* e *BC* estão em série, sabemos que eles são percorridos pela mesma corrente.

d) Errada; pois $V_{AB} = R_{AB}i$ e $V_{BC} = R_{BC}i$. Como $R_{AB} > R_{BC}$, temos $V_{AB} > V_{BC}$.

e) Errada; pois como existe uma corrente elétrica passando por estes condutores, deve haver um campo elétrico no interior deles que provoca esta corrente.

4. a) De $P = iV_{AB}$, obtemos:

$$i = \frac{P}{V_{AB}} = \frac{330}{220} \Rightarrow i = 1{,}5\ \text{A}$$

b) $R = \frac{V_{AB}}{i} = \frac{220}{1{,}5} \Rightarrow R \cong 147\ \Omega$

5. b

Quando várias resistências são associadas em paralelo, a resistência equivalente é **menor** do que qualquer uma delas. Então, como em nosso caso temos uma resistência de $4\,\Omega + 3\,\Omega = 7\,\Omega$ associada em paralelo com uma de $2\,\Omega$, podemos concluir, sem fazer o cálculo, que a resistência equivalente será **inferior** a $2\,\Omega$.

6. a) A corrente i_1 que passa em R_1 é aquela fornecida pela pilha, cujo valor é $i_1 = 0{,}30$ A. Logo, a voltagem V_1 em R_1 é:

$$V_1 = R_1 i_1 = 3{,}0 \cdot 0{,}30 \Rightarrow V_1 = 0{,}90\ \text{V}$$

A resistência equivalente à ligação de R_2 e R_3 é $R_{23} = 2{,}0\ \Omega$. Podemos supor esta resistência substituindo R_2 e R_3 e sendo, então, percorrida pela corrente $i_1 = 0{,}30$ A (que passa em R_1).

Logo, a voltagem aplicada a R_{23} será:

$$V_{23} = R_{23} i_1 = 2{,}0 \cdot 0{,}30 \Rightarrow V_{23} = 0{,}60\ \text{V}$$

Esta voltagem é aquela que está aplicada tanto em R_2 quanto em R_3.

Observação: O valor de V_{23} poderia ter sido obtido de outra maneira, lembrando que a voltagem da pilha é 1,5 V. Então, podemos escrever:

$$1{,}5 = V_1 + V_{23} \text{ ou } 1{,}5 = 0{,}90 + V_{23} \Rightarrow$$
$$\Rightarrow V_{23} = 0{,}60\ \text{V}$$

b) Em R_1, como vimos, passa uma corrente $i_1 = 0{,}30$ A. Em R_2 e em R_3, teremos:

$$i_2 = \frac{V_{23}}{R^2} = \frac{0{,}60}{3{,}0} \Rightarrow i_2 = 0{,}20\ \text{A}$$

$$i_3 = \frac{V_{23}}{R^3} = \frac{0{,}60}{6{,}0} \Rightarrow i_3 = 0{,}10\ \text{A}$$

Observe que $i_2 + i_3 = i_1$, como não podia deixar de ser.

7. a) Observemos inicialmente que R_4 e R_5 estão em paralelo. A resistência R_{45} equivalente a elas será dada por:

$$\frac{1}{R_{45}} = \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} = \frac{1}{6{,}0} + \frac{1}{6{,}0} \Rightarrow R_{45} = 3{,}0\ \Omega$$

R_1 está em série com R_{45}. Logo, a resistência equivalente a elas é:

$$R' = R_1 + R_{45} = 3{,}0 + 3{,}0 \Rightarrow R' = 6{,}0\ \Omega$$

R_2 está em série com R_3. Logo, a resistência equivalente a elas é:

$$R'' = R_2 + R_3 = 6{,}0 + 6{,}0 \Rightarrow R'' = 12{,}0\ \Omega$$

R' e R'' estão em paralelo. Portanto, a resistência equivalente final R será dada por:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R'} + \frac{1}{R''} \Rightarrow \frac{1}{R} = \frac{1}{6{,}0} + \frac{1}{12{,}0} \Rightarrow \frac{1}{R} = \frac{2{,}0 + 1{,}0}{12{,}0}$$

$$R = 4{,}0\ \Omega$$

b) A corrente total será obtida dividindo-se V_{AB} pela resistência equivalente R, isto é:

$$i = \frac{V_{AB}}{R} = \frac{24}{4{,}0} \Rightarrow i = 6{,}0\ \text{A}$$

c) Lembrando-se das resistências R' e R'' em paralelo, vemos que ambas estão submetidas à voltagem $V_{AB} = 24$ V. Então, a corrente em cada uma será:

$$i' = \frac{V_{AB}}{R'} = \frac{24}{6{,}0} \Rightarrow i' = 4{,}0\ \text{A}$$

$$i'' = \frac{V_{AB}}{R''} = \frac{24}{12{,}0} \Rightarrow i'' = 2{,}0\ \text{A}$$

Podemos concluir que:

– em R_1 passa uma corrente de 4,0 A.

– em R_2 passa uma corrente de 2,0 A.

– em R_3 passa uma corrente de 2,0 A.

Observemos, agora, que a corrente que chega à associação de R_4 e R_5 é de 4,0 A. Como $R_4 = R_5$, concluímos que:

– em R_4 passa uma corrente de 2,0 A.

– em R_5 passa uma corrente de 2,0 A.

8. Como a maior corrente que pode passar no fusível é de 25 A, concluímos que a potência máxima *PM* que pode ser usada nos aparelhos elétricos desta residência é:

$$P_M = iV_{AB} = 25 \cdot 120 \text{ ou } P_M = 3\,000\ \text{W}$$

Então, para verificar se o fusível se queimará, basta somar as potências dos aparelhos especificados em cada opção e verificar se esta soma é superior a 3 000 W. Temos:

a) Não, pois $(2\,400\ \text{W} + 120\ \text{W} + 240\ \text{W}) < 3\,000\ \text{W}$.

b) Sim, pois $(2\,400\ \text{W} + 840\ \text{W}) > 3\,000\ \text{W}$.

c) Não, pois $(840\ \text{W} + 240\ \text{W} + 120\ \text{W}) < 3\,000\ \text{W}$.

d) Sim, pois $(10 \cdot 60\ \text{W} + 120\ \text{W} + 2\,400\ \text{W}) > 3\,000\ \text{W}$.

e) Não, pois

$(840\ \text{W} + 120\ \text{W} + 240\ \text{W} + 5\ \text{W} \cdot 60\ \text{W}) < 3\,000\ \text{W}$.

Observação: Este problema poderia ser resolvido também, embora de maneira mais trabalhosa, calculando-se a corrente que passa em cada um dos aparelhos e verificando, para cada opção, se a soma das correntes é maior ou menor do que 25 A.

9. Quando a chave está na posição (2), vemos que a corrente percorre apenas a resistência superior. Passando a chave para a posição (1), a resistência inferior fica ligada em pa-

ralelo com a superior. Assim, temos uma **diminuição** na resistência total do chuveiro e isto acarreta um **aumento** de sua potência. Portanto, em (1) o chuveiro está no inverno (potência maior) e na posição (2) está no verão (potência menor).

Observação: A situação poderia também ser analisada da seguinte maneira: com a chave em (2) temos potência dissipada apenas na resistência superior e, na posição (1), além da mesma potência continuar a ser dissipada nesta resistência, teremos dissipação de potência na resistência inferior. Assim, é claro que a posição (1) corresponde a inverno.

10. Para aumentar a potência desenvolvida no interior da estufa devemos diminuir a resistência que a aquece. Então, temos:

a) Procedimento correto; pois como $R \propto L$, cortando um pedaço da resistência, diminuímos R.

b) Procedimento correto; pois a resistência final será menor do que a inicial (a ligação em paralelo faz diminuir o valor de R).

c) Procedimento errado; pois neste caso a resistência final será **maior** do que a inicial.

d) Procedimento correto; pois de $R = \rho L/A$ vemos que, quanto menor for ρ, menor será R.

e) Procedimento correto; pois como $R \propto (1/A)$ vemos que, quanto maior for A, menor será R.

11. a) A potência total desenvolvida entre A e B, isto é, no motor, é dada pela expressão geral:

$$P = iV_{AB} = 5{,}0 \cdot 12 \Rightarrow P = 60\,W$$

b) A potência dissipada por efeito Joule será:

$$P' = Ri^2 = 0{,}20 \cdot 5{,}0^2 \Rightarrow P' = 5{,}0\,W$$

c) A potência mecânica de rotação do motor, P' será dada pela diferença entre P e P'':

$$P'' = P - P' = 60 - 5{,}0 \text{ ou } P'' = 55\,W$$

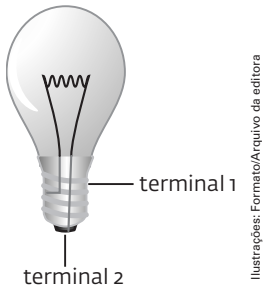
12. a) O voltímetro V_1 está ligado a dois fios entre os quais existe uma voltagem de 110 V. Então, $V_1 = 110$ V. O voltímetro V_2 está ligado a dois pontos entre os quais não existe resistência. Então, $V_2 = 0$.

b) Como as lâmpadas estão em paralelo, elas estarão submetidas à mesma voltagem $V_{AB} = 110$ V. De $P = iV_{AB}$, vemos que passa a maior corrente na lâmpada de maior potência, isto é, na lâmpada de 100 W.

c) O amperímetro está indicando a corrente total no circuito, isto é, a soma das correntes que passam nas lâmpadas. Retirando-se uma das lâmpadas a intensidade da corrente total diminui e o amperímetro indicará este fato. A resistência total do circuito **aumenta**, pois, na ligação em paralelo, quanto menor for o número de resistências associadas, **maior** será a resistência equivalente.

13. d

Para que a lâmpada acenda, é necessário que se estabeleça um circuito fechado, ou seja, cada polo da pilha deve ser ligado a um dos terminais elétricos da lâmpada que se localizam na sua lateral (terminal 1) e na sua extremidade inferior (terminal 2), conforme indica a figura:



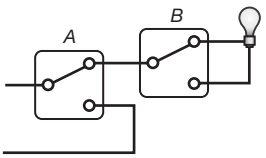
Ilustrações: Formato/Arquivo da editora

Nas ligações 2, 4 e 6, o circuito não está fechado, pois em 2 o fio que ligaria o terminal 1 da lâmpada ao polo positivo da pilha não está encostado no polo da pilha corretamente, em 4 o terminal 2 da lâmpada não está ligado a nenhum polo da pilha, mas na sua lateral que é isolante e em 6 o terminal 2 da lâmpada também não está ligado a nenhum polo da pilha. Assim, a lâmpada só acenderá nas ligações: 1, 3 e 7.

14. e

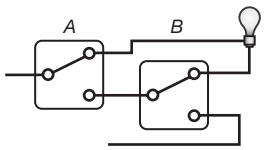
Para resolver este problema, devemos testar os circuitos, verificando se a lâmpada é acesa ou apagada por qualquer mudança em uma das chaves independente da outra. Para que a lâmpada acenda é necessário que se estabeleça um circuito fechado entre seus dois polos e os dois terminais elétricos que serão submetidos à tensão para ligá-la.

a)



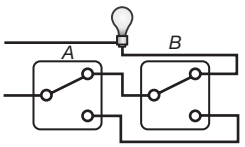
Na alternativa **a** a lâmpada não acende, pois a chave B ora liga um de seus polos no circuito e desliga o outro, ou vice-versa, impedindo sempre que a lâmpada acenda, portanto essa ligação está incorreta.

b)



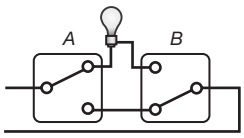
Na alternativa **b** quando as chaves A e B se encontram na posição I conforme a figura, a lâmpada está desligada, movendo a chave A para a posição II, a lâmpada continua desligada, pois o polo de sua lateral não estará ligado ao circuito, logo esta ligação está incorreta.

c)



Na alternativa **c** quando as duas chaves estão na posição I, conforme a figura, a lâmpada está acesa. Se a chave A mudar para a posição II ela apaga. Se com A na posição II, B for movido para a posição II a lâmpada continua apagada e, portanto essa ligação está incorreta.

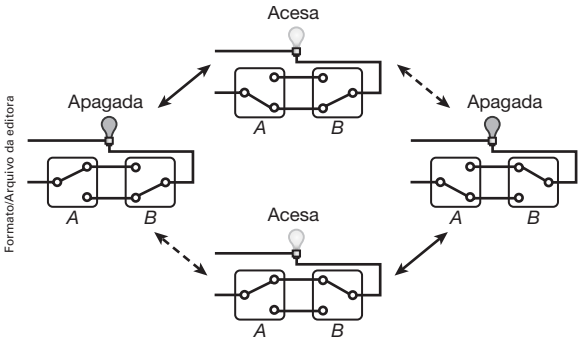
d)



Formato/Arquivo da editora

Na alternativa **d** verifica-se que com a chave *A* na posição I e *B* na posição II, conforme ilustra a figura, o circuito está aberto e, portanto, a lâmpada apagada. Ao mudar o interruptor *A* para a posição II, a lâmpada continua apagada, portanto a ligação está incorreta.

A figura a seguir mostra o circuito da alternativa **e** cuja lâmpada inicialmente está apagada (circuito à direita) e as possíveis transformações no circuito quando a chave *A* é mudada (indicado pelas setas de linha cheia) e quando a chave *B* é mudada (indicada pelas setas de linha tracejada). Note que, conforme desejamos, para todas as possibilidades o circuito sempre muda de uma situação em que a lâmpada está acesa (circuito fechado) para uma situação que ela está apagada (circuito aberto).



Formato/Arquivo da editora

15. a

$i = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \Rightarrow \Delta Q = i \cdot \Delta t = 3{,}0 \cdot 60 \Rightarrow \Delta Q = 180\ \text{C}$

Mas:

$\Delta Q = ne \Rightarrow n = \frac{\Delta Q}{e} = \frac{180}{1{,}6 \cdot 10^{-19}} \Rightarrow n = 1{,}1 \cdot 10^{21}$

16. Transformar mais energia por unidade de tempo, ou seja, transformar energia rapidamente significa ter mais potência.

Para uma tensão *U* a potência *P* de um resistor *R* é dada por $P = U^2/R$. Isto significa que na mesma tensão *U* quanto menor a resistência *R* maior a potência *P*.

Como desejamos a maior potência *P* é necessário encontrar o resistor que ofereça a menor resistência.

Será necessário analisar cada um dos fios por meio da 2ª lei de Ohm, $R = \rho L/A$

Material *A*: $R = \rho L/(3A) = 0{,}33\rho L/A$

Material *B*: $R = 2\rho 3L/A = 6\rho L/A$

Material *C*: $R = 3\rho 2L/(2A) = 3\rho L/A$

Material *D*: $R = 3\rho L/(3A) = \rho L/A$

Material *E*: $R = 2\rho L/(4A) = 0{,}5\rho L/A$

Pelo exposto o material *A* é o que apresenta a menor resistência.

Capítulo 5: Força eletromotriz — equação do circuito

Orientações específicas

Neste capítulo, abordamos os conceitos de força eletromotriz (f.e.m.) e força contraeletromotriz (f.c.e.m.), além das técnicas usadas para o cálculo das grandezas características de um circuito elétrico. Procuramos dar ao capítulo um desenvolvimento simples, tratando apenas das ideias fundamentais, como julgamos que deve ser feito em um curso inicial de Eletricidade. Assim, não aconselhamos que o professor ensine qualquer tópico que possa desmotivar o estudante em razão de sua complexidade, como é o caso dos geradores em paralelo ou outras associações mais complicadas. Tratamos, em nosso livro, apenas das associações de geradores em série, pois, além de simples, são aquelas que o estudante tem a oportunidade de encontrar em aparelhos elétricos do seu cotidiano, como lanternas, rádios, alarmes, calculadoras, etc.

Também consideramos inapropriada a análise de circuitos de várias malhas em um curso de Eletricidade para o Ensino Médio. Preferimos nos restringir aos circuitos redutíveis a uma única malha, uma vez que os princípios físicos envolvidos neste estudo são basicamente os mesmos daqueles utilizados na análise de circuitos mais complexos. Ao lidar com circuitos de várias malhas, o aluno acaba se envolvendo de tal maneira com cálculos matemáticos que a interpretação física poderá ficar relegada a um plano secundário, o que não gostaríamos que acontecesse no nosso curso.

Acreditamos que o professor deva observar os seguintes pontos durante o desenvolvimento deste capítulo:

- O processo de carga de uma bateria, ilustrado na figura 5.5, deve ser examinado com atenção especial, pois, de forma geral, os alunos têm sua atenção despertada para esta operação, uma vez que vários deles já tiveram a oportunidade de presenciar situações similares, como, por exemplo, a recarga da bateria de um automóvel ou da bateria de telefones móveis.
- Deve-se observar que a equação do circuito ($i = \Sigma\varepsilon/\Sigma R$), apresentada no tópico 5.2, foi obtida com relativa facilidade. Julgamos importante que o professor faça o aluno acompanhar a dedução desta equação, procurando deixar clara cada etapa do processo, pois ela ilustra muito bem uma das aplicações do princípio de conservação da energia, princípio esse que foi estabelecido no primeiro volume da coleção, e que desempenha um papel de destaque na fundamentação conceitual da Física.
- É um equívoco pensar que a f.e.m. de um gerador tem o mesmo valor da diferença de potencial esta-

belecida entre seus polos. O principal objetivo do tópico 5.3 é justamente o de esclarecer que tais conceitos são diferentes e que somente em situações muito particulares esses valores numéricos serão iguais. Essa discussão é complementada e aprofundada pelo texto da seção *Integrando* — "A pilha de Daniell e o gerador", em que o estudante terá a chance de comparar as abordagens dadas pela Física e pela Química para o assunto *pilha elétrica*, o que deverá ampliar o seu entendimento sobre esse assunto.

Resoluções das atividades

Para iniciar a conversa

Resposta pessoal. Seria interessante o professor ouvir de seus alunos outras sugestões de economia de energia.

As baterias de celulares possuem componentes que resistem à passagem de corrente elétrica, estabelecendo o que chamamos de resistência interna. Devido ao efeito joule, a energia elétrica se transforma em energia térmica, esquentando as baterias de celulares.

Espera-se que o aluno avalie que os metais que formam a bateria de celular, depositados em lugares inapropriados como lixões públicos, podem contaminar o solo e a água.

Verifique o que aprendeu

1. a) A corrente sai do polo positivo do gerador de f.e.m. e penetra em seu polo negativo. Então, o sentido da corrente na figura é *ABCD*.

b) As cargas recebem energia quando passam no interior do gerador de f.e.m.

c) A bateria está sendo carregada (a corrente está passando nela do polo positivo para o negativo). Então, esta bateria é um gerador de f.c.e.m. e, portanto, as cargas perdem energia ao passarem em seu interior.

2. a) O gerador *G* estabelece uma corrente graças ao seu movimento de rotação. Em outras palavras, temos **energia mecânica** (da rotação) transformando-se em energia elétrica (das cargas).

b) Na bateria, a energia elétrica que as cargas perdem transforma-se em energia química (que se armazena no interior da bateria).

3. a) Como $\varepsilon = 15\,V = 15\,J/C$, concluímos que cada 1 C recebe 15 J de energia ao passar no gerador *G*.

b) Como $\varepsilon' = 12\,V = 12\,J/C$, vemos que cada 1 C perde 12 J de energia ao passar pela bateria.

c) Se a carga de 1 C recebeu 15 J de energia com *G* e perdeu 12 J na bateria, os 3 J restantes devem ter sido perdidos em *R* (sob a forma de calor).

4. a) Temos: $P = \varepsilon i = 15 \cdot 5{,}0 \Rightarrow P = 75\,W$

b) $P' = \varepsilon' i = 12 \cdot 5{,}0 \Rightarrow P' = 60\,W$

c) Pela Conservação da Energia, a potência dissipada em *R* deve ser:

$$P_R = P - P' = 75 - 60 \text{ ou } P_R = 15\,W$$

5. Em geral, os estudantes habituam-se a trabalhar em circuitos elétricos representados por seus diagramas convencionais e são incapazes de visualizar a disposição real dos elementos do circuito representados no diagrama. Este exercício procura dar ao aluno a oportunidade de comparar um circuito real com sua representação convencional. Ele não deverá ter dificuldades para traçar o esquema mostrado na resposta do exercício, devendo-se apenas observar que a lâmpada L está representada pelo símbolo de uma resistência (filamento) e também salientar que a polaridade da bateria situada entre o motor e o reostato tem sentido contrário ao das outras (supondo que o conjunto de baterias esteja gerando a corrente, a bateria isolada estará sendo carregada).

6. Geradores elétricos: pilha alcalina, bateria de celular: resistências elétricas: chuveiro elétrico, ferro elétrico de passar roupa; receptores elétricos: liquidificador, ventilador.

7. a) Os portadores de carga elétrica da corrente do circuito.

b) O gerador de eletricidade do circuito.

Observação: Espera-se que a analogia seja compreendida da seguinte maneira: do mesmo jeito que o gerador força os portadores de carga a sair do menor potencial elétrico e chegar ao maior potencial elétrico, adquirindo energia potencial elétrica, na montanha-russa, a esteira eleva, também de maneira forçada, o potencial gravitacional do carrinho o qual, por sua vez, ganha energia mecânica.

8. a) Temos: $P = \varepsilon i = 6{,}0 \cdot 5{,}0 \therefore P = 30\,W$

b) $P' = ri^2 = 0{,}20 \cdot 5{,}0^2 \therefore P' = 5{,}0\,W$

c) Se as cargas recebem uma potência $P = 30\,W$ da bateria e perdem nesta própria bateria uma potência $P' = 5{,}0\,W$, a potência que as cargas perdem na lâmpada será:

$$P_L = P - P' = 30 - 5{,}0 \text{ ou } P_L = 25\,W$$

9. a) Como R_1, R_2 e R_3 estão associadas em paralelo, virá:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \text{ ou } \frac{1}{R} = \frac{1}{8} + \frac{1}{12} + \frac{1}{24}$$

$$\frac{1}{R} = \frac{3+2+1}{24} \therefore R = 4{,}0\,\Omega$$

Portanto, os estudantes deverão fazer um desenho do circuito mostrando as resistências R_1, R_2 e R_3 substituídas pela resistência $R = 4{,}0\,\Omega$.

b) Raciocinando com a resistência equivalente $R = 4{,}0\,\Omega$, temos, pela equação do circuito série:

$$i = \frac{\Sigma\varepsilon}{\Sigma R} = \frac{\varepsilon}{R+r} = \frac{12}{4{,}0+1} \therefore i = 2{,}4\,A$$

c) Considerando ainda a resistência $R = 4{,}0\,\Omega$ ligada entre *A* e *B*, temos:

$$V_{AB} = Ri = 4{,}0 \cdot 2{,}4 \therefore V_{AB} = 9{,}6\,V$$

d) Como R_1, R_2 e R_3 estão todas submetidas à mesma voltagem V_{AB} vem:

$$i_1 = \frac{V_{AB}}{R_1} = \frac{9{,}6}{8} \therefore i_1 = 1{,}2\,A$$

$$i_2 = \frac{V_{AB}}{R_2} = \frac{9{,}6}{12} \therefore i_2 = 0{,}80\,A$$

$$i_3 = \frac{V_{AB}}{R_3} = \frac{9{,}6}{24} \therefore i_3 = 0{,}40\,A$$

10. a) O amperímetro indicará o valor da corrente i no circuito. Como ε é uma f.e.m. e ε' é uma f.c.e.m. vem:

$$i = \frac{\Sigma\varepsilon}{\Sigma R} = \frac{\varepsilon - \varepsilon'}{R_1 + R_2 + r'} = \frac{12 - 3}{7 + 9 + 2} \therefore i = 0{,}5\ \text{A}$$

b) V_1 está lendo a tensão nos extremos de R_1. Logo:

$$V_1 = R_1 i = 7 \cdot 0{,}5 \therefore V_1 = 3{,}5\ \text{V}$$

V_2 está indicando a tensão em R_2, que é percorrida pela mesma corrente $i = 0{,}5$ A. Assim:

$$V_2 = R_2 i = 9 \cdot 0{,}5 \therefore V_2 = 4{,}5\ \text{V}$$

11. a) Em circuito aberto, isto é, com $i = 0$, a expressão $V_{AB} = \varepsilon - ri$ nos fornece:

$$V_{AB} = \varepsilon \text{ ou } V_{AB} = 1{,}5\ \text{V}$$

b) $V_{AB} = \varepsilon - ri = 1{,}5 - 0{,}1 \cdot 2{,}0 \therefore V_{AB} = 1{,}3\ \text{V}$

c) $V_{AB} = \varepsilon - ri = 1{,}5 - 0{,}1 \cdot 4{,}0 \therefore V_{AB} = 1{,}1\ \text{V}$

Deve-se fazer o aluno observar a queda em V_{AB} à medida que aumenta a corrente fornecida pela pilha.

12. a) Os alunos construirão o gráfico $V_{AB} \times i$, obtendo o resultado mostrado na figura da resposta do exercício (observe que o seu aspecto é análogo ao da figura 5.13).

b) Se r = 0, teríamos $V_{AB} = \varepsilon$, ou seja, V_{AB} seria constante e igual a 1,5 V, por maior que fosse i. Então, o gráfico $V_{AB} \times i$ seria como aquele da resposta deste exercício.

13. a) A f.e.m. de uma pilha **não se altera** com o seu tempo de uso.

b) Com o uso prolongado, o valor da resistência interna da pilha **aumenta**.

c) Em virtude do aumento em r, a tensão V_{AB} da pilha **diminui**.

d) A queda em V_{AB} acarreta uma diminuição na corrente i através da lâmpada (por isso há uma **diminuição** no brilho da lâmpada).

14. a) O voltímetro está indicando a voltagem V_{AB} entre os polos da bateria. Quando C está aberta, temos $i = 0$ e então $V_{AB} = \varepsilon$. Logo, $\varepsilon = 4{,}5$ V.

b) De $V_{AB} = \varepsilon - ri$ vem:

$$4{,}2 = 4{,}5 - \text{r} \cdot 1{,}5 \therefore \text{r} = 0{,}2\ \Omega$$

Pratique física em equipe

O material a ser utilizado nesta experiência é muito fácil de ser obtido (placas de cobre, zinco, aço, solução de NaCl, etc.), com exceção do voltímetro, que o professor deverá se empenhar em conseguir, se o laboratório do colégio não o possuir.

O objetivo principal da atividade é que o aluno conheça a pilha de Volta e construa, ele próprio, alguns dispositivos semelhantes a essa pilha. Seguindo o roteiro, o estudante poderá realizar facilmente a experiência, devendo observar, entretanto, que os contatos elétricos entre os fios de ligação, as placas, etc. sejam benfeitos (para evitar oxidação, por exemplo).

Problemas e testes

1. a) Como $i = 200$ mA $= 0{,}200$ A, vem:

$$P = \varepsilon i = 1{,}5 \cdot 0{,}200 \Rightarrow P = 0{,}30\ \text{W}$$

b) Esta transferência de energia é medida pelo trabalho $\mathcal{C}$ realizado sobre as cargas. De $P = \mathcal{C}/\Delta t$, vem $\Delta t = P \cdot \mathcal{C}$ e como $\Delta t = 5{,}0$ h $= 1{,}8 \cdot 10^4$ s temos:

$$\mathcal{C} = P \cdot \Delta t = 0{,}30 \cdot 1{,}8 \cdot 10^4 \Rightarrow \mathcal{C} = 5{,}4 \cdot 10^3\ \text{J}$$

2. a) Já que as duas pilhas são constituídas pelos mesmos elementos, elas possuem a mesma f.e.m.

b) Como as pilhas possuem a mesma f.e.m. e $r = 0$ para ambas, concluímos que a voltagem aplicada à lâmpada será a mesma nos dois casos. Então, o brilho da lâmpada é o **mesmo**, quer ela esteja ligada à pilha maior, quer esteja ligada à pilha menor.

c) A quantidade de reagentes químicos é maior na pilha grande e, assim, ela é capaz de manter uma dada corrente durante um tempo mais longo (esta é a vantagem da pilha grande sobre a pequena).

3. Devemos, inicialmente, reduzir o circuito a um circuito em série, substituindo as duas resistências em paralelo por sua resistência equivalente R. Temos:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{10} + \frac{1}{30} \text{ ou } \frac{1}{R} = \frac{3+1}{30} \Rightarrow R = 7{,}5\ \Omega$$

Assim, a leitura do amperímetro será:

$$i = \frac{\Sigma\varepsilon}{\Sigma R} = \frac{6{,}0}{0{,}5 + 2{,}0 + 7{,}5} \Rightarrow i = 0{,}60\ \text{A}$$

O voltímetro está medindo a tensão nos terminais da bateria. Então, sua leitura será:

$$V = \varepsilon - ri = 6{,}0 - 0{,}5 \cdot 0{,}60 \Rightarrow V = 5{,}7\ \text{V}$$

Poderíamos também calcular V observando que o voltímetro está indicando a tensão nos extremos de uma associação de duas resistências em série (2,0 Ω em série com 7,5 Ω). Então, de $V = Ri$, vem:

$$V = (2{,}0 + 7{,}5) \cdot 0{,}60 \Rightarrow V = 5{,}7\ \text{V}$$

Observe que utilizando dois pontos de vista diferentes obtivemos o mesmo valor para V (como não podia deixar de ser).

4. a) Correta; pois R_1 e R_2 estão em paralelo. Logo:

$$\frac{1}{R_{12}} = \frac{1}{2{,}5} + \frac{1}{10} \Rightarrow \frac{1}{R_{12}} = \frac{4+1}{10} \Rightarrow R_{12} = 2{,}0\ \Omega$$

$R_{34} = 2{,}0\ \Omega$. Como R_{12} e R_{34} estão em série, a resistência equivalente do circuito externo será:

$$R = R_{12} + R_{34} = 2{,}0 + 2{,}0 \text{ ou } R = 4{,}0\ \Omega$$

b) Correta; pois a corrente na bateria é dada por:

$$i = \frac{\Sigma\varepsilon}{\Sigma R} = \frac{45}{1{,}0 + 4{,}0} \Rightarrow i = 9{,}0\ \text{A}$$

c) Correta; pois $R_{12} = R_{34} = 2{,}0\ \Omega$ e ambas são percorridas pela mesma corrente $i = 9{,}0$ A. Então:

$$V_{BA} = R_{12} i = 2{,}0 \cdot 9{,}0 \Rightarrow V_{BA} = 18\ \text{V}$$

$$V_{CB} = R_{34} i = 2{,}0 \cdot 9{,}0 \Rightarrow V_{CB} = 18\ \text{V}$$

d) Correta; pois $i_1 = V_{BA}/R_1$ e $i_4 = V_{CB}/R_4$. Como $V_{BA} = V_{CB}$ e $R_1 = R_4$, temos $i_1 = i_4$.

e) Correta; pois $i_1 = V_{BA}/R_1$ e $i_3 = V_{CB}/R_3$. Como $V_{BA} = V_{CB}$ e $R_1 = R_3/4$, temos $i_1 = 4i_3$.

5. b

$$\Delta Q = 600\ mAh = 600 \cdot 10^{-3}\text{A} \cdot 3{,}6 \cdot 10^{3}\text{s} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \Delta Q = 2{,}16 \cdot 10^{3}\text{C}$$

$$P = \varepsilon \cdot i = \varepsilon \cdot \frac{\Delta Q}{\Delta t} \Rightarrow \Delta t = \frac{\varepsilon \cdot \Delta Q}{P}$$

Substituindo os valores conhecidos, em unidades do SI, vem:

$$\Delta t = \frac{3{,}6 \cdot 2{,}16 \cdot 10^{3}}{1{,}8} = 4{,}32 \cdot 10^{3}\text{s} \Rightarrow \Delta t = 1{,}2\ \text{h}$$

6. a) Como a bateria não possui resistência interna, concluímos que ela **mantém** constante a tensão aplicada à associação de lâmpadas, por maior que seja a corrente fornecida. Assim, quando acendemos a segunda lâmpada, a leitura de V não se modifica.

b) Já que a tensão aplicada à primeira lâmpada não se modificou, a corrente através dela também não se modifica (a indicação de A_2 permanece invariável).

c) A_1 estará indicando, agora, a soma das correntes que passam pelas duas lâmpadas. Como antes ele indicava apenas a corrente na primeira lâmpada, a leitura de A_1 aumenta quando fechamos a chave.

7. e

a) Errada, será $12R + r$.

b) Errada, $\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{12R} + \frac{1}{6R} \Rightarrow R_{eq} = 4R + r$.

c) Errada, será $i = \frac{\varepsilon}{12R + r}$.

d) Errada, quando k está fechada, temos: R' da associação é $4R$, portanto $i = \frac{\varepsilon}{4R + r}$ no circuito todo. Em k temos: $i' = \frac{i}{2}$.

e) Correta, pois, para que a potência seja máxima, a resistência resultante da associação de $12R$ e $6R$ deve ser r. Assim $4R = r$.

8. O voltímetro indica a tensão no gerador e no farol. Dado que as leituras para o farol são 12 V e 10 A, conclui-se pela 1ª lei de Ohm que a resistência do farol é:

$$R = \frac{U}{i} = \frac{12}{10} = 1{,}2\ \Omega$$

Com estes dados na bateria:

$U = \varepsilon - ri \Rightarrow 12 = \varepsilon - 0{,}05 \cdot 10 \Rightarrow \varepsilon = 12{,}5\text{ V}$ é a f.e.m da bateria.

Com o motor de arranque em funcionamento, a corrente que atravessa o farol é de 8,0 A, o que faz com que a tensão nos terminais do farol seja de $U = Ri \Rightarrow U = 1{,}2 \cdot 8 = 9{,}6\text{ V}$.

Aplicando esta tensão na bateria:

$$U = \varepsilon - ri \Rightarrow 9{,}6 = 12{,}5 - 0{,}05i$$

De onde vem a corrente fornecida pela bateria, $i = 58$ A. O farol fica com 8 A, o motor ficará com 50 A.

INTEGRANDO... A PILHA DE DANIELL E O GERADOR

Os valores encontrados na internet para resistência interna de pilhas comuns comerciais variam de 0,1 a 0,5 Ω. Assumindo $r = 0{,}5\ \Omega$, o termo $r \cdot i$ teria valor de $0{,}5 \cdot 10^{-2} = 0{,}005\ \Omega$. Esse é um valor que, de fato, tanto para fins práticos como didáticos, é muito inferior à indicação de 1,5 V dessa pilha e, portanto, pode ser desprezado.

INFOGRÁFICO

1. Bateria de bios, memória RAM, entradas USB, etc.

2. O disco rígido (também conhecido pelo nome inglês de *hard disk* (HD)) é a unidade responsável pelo armazenamento de dados e informações no computador.

3. O processador, também conhecido pela sigla CPU (Central Processing Unit) – Unidade Central de Processamento, é o cérebro do computador: faz cálculos, determina a capacidade de processamento e os programas que a máquina é capaz de executar. É feito de silício.

4. A memória RAM (Read-only Access Memory) é o lugar em que são mantidos todos os dados usados pelos aplicativos e pelo sistema operacional enquanto o PC está ligado. Quando um programa é carregado, todos os dados referentes ao programa são carregados à memória principal ou apenas os dados que forem necessários no momento. Todas as informações são guardadas em meios de armazenamento como discos rígidos, memórias *flash*, CD-ROM, etc. Assim que o PC é desligado, todo o conteúdo que estava em uso na memória deixa de existir.

5. Os dispositivos que possibilitam a entrada de dados para o computador são: disquete, CD-ROM, DVD, memória USB (*flash drive*), teclado.

6. Através de conectores específicos (ex.: vídeo) e das portas USB.

7. Retirar o ar quente do interior do gabinete proveniente do funcionamento dos dispositivos eletroeletrônicos por meio da ventilação.

Unidade 3 — Eletromagnetismo

Capítulo 6: O campo magnético – 1ª parte

Orientações específicas

Nesta terceira unidade estudaremos o Eletromagnetismo, a parte da Física que investiga os fenômenos magnéticos decorrentes do movimento das cargas elétricas. Os conceitos que serão vistos fundamentam boa parte das aplicações tecnológicas do mundo contemporâneo e, por isso, trata-se de um assunto que não deve ser suprimido da programação do professor. Temos observado que alguns professores preferem investir o tempo de sua programação no ensino da Eletrostática e da Eletrodinâmica em detrimento do Eletromagnetismo. Este não é um procedimento com o qual concordamos, pois omitir princípios físicos e resultados experimentais tão importantes como os que são tratados nesta unidade poderá conduzir a um desfalque didático, uma vez que o tema apresenta um grande potencial para o desenvolvimento de habilidades inerentes à ciência, além de contemplar importantes pilares conceituais da Física moderna.

Recomendamos ao professor que observe os seguintes pontos durante o ensino deste assunto:

- Apesar de iniciarmos o capítulo, no tópico 6.1, descrevendo propriedades dos materiais imantados, sem relacioná-las ao movimento de cargas elétricas, recomendamos que isso seja feito somente no momento do estudo deste tópico, uma vez que tal procedimento poderia passar a ideia, conceitualmente inadmissível, de que os fenômenos magnéticos não guardam relação com os fenômenos eletrodinâmicos.
- Ao tópico 6.2 deve ser dada ênfase especial, pois nele está apresentado o princípio básico do Eletromagnetismo, o qual explica que os fenômenos magnéticos têm origem no movimento das cargas elétricas.
- Ao iniciar o estudo do campo magnético, os alunos podem sentir dificuldades em entender e trabalhar com as situações em que uma partícula eletrizada se movimenta com velocidade $\vec{v}$ em uma região onde existe um campo magnético $\vec{B}$. O professor deverá, portanto, fazer com que os alunos usem efetivamente aquela regra prática (regra da mão direita) e não permaneçam como meros espectadores. Caso seja viável, o professor poderá ainda caminhar pela sala e observar de perto se os alunos estão posicionando a mão corretamente e, em caso negativo, deve apontar o erro para que o aluno possa corrigi-lo. Procedendo dessa maneira, as dificuldades e aversões iniciais costumam desaparecer naturalmente, e os estudantes passam a se sentir mais capazes de dar continuidade ao estudo do capítulo.
- Escolhemos a "regra da mão direita" para trabalhar com os vetores $\vec{v}$, $\vec{B}$ e $\vec{F}$, por que nossa experiência tem mostrado que os alunos a consideram mais simples do que outras regras que têm a mesma finalidade.
- No tópico 6.6 não recomendamos que seja desenvolvido o estudo do momento (ou torque) que atua na espira dentro do campo magnético. Como pode ser observado no texto desse tópico, o funcionamento do motor de corrente contínua foi analisado satisfatoriamente, e de maneira qualitativa, sem que fosse necessário lançar mão de tal recurso conceitual.

Resoluções das atividades

Para iniciar a conversa

As vantagens estão relacionadas principalmente aos aspectos tecnológicos e ambientais se considerarmos o baixo consumo de energia e a ausência de emissão de gases poluentes. É possível considerar também o ponto de vista econômico, com a geração de emprego com mão de obra especializada, o baixo custo de manutenção, o uso de energia renovável, a exploração do turismo, entre outros.

Além disso, os trens Maglev são mais rápidos que os outros trens-bala convencionais porque não têm contato com o trilho, ou seja, flutuam cerca de dez centímetros acima dos trilhos, eliminando o atrito. A aerodinâmica do trem também colabora para reduzir o atrito com o ar.

A levitação eletromagnética se dá por repulsão de polos magnéticos idênticos ou atração de polos magnéticos opostos.

Essa resposta pode variar, mas espera-se que o aluno faça a relação entre corrente elétrica e campo magnético presente nas bobinas e eletroímãs e responda **não** a essa pergunta.

Verifique o que aprendeu

1. a) Os estudantes aprendem, em seus cursos de Geografia, a se orientar em relação ao Sol da seguinte maneira: com os braços abertos, apontando a mão direita para o nascente (leste) terão o oeste à esquerda, o norte à frente e o sul atrás. Usando este processo, verifica-se que, na figura, o norte geográfico corresponde a *M*.

b) O polo norte da **agulha** é aquele que aponta para o norte geográfico. Logo, o polo norte da agulha é *A*, sendo *B* o seu polo sul.

Observação: Sugere-se que o professor relembre ao aluno que os polos magnéticos e geográficos da Terra não coincidem exatamente. Vale ainda dizer que as linhas de indução magnética apresentam inclinações em relação à superfície terrestre, como será comentado no tópico *Linhas de indução*. Por fim, vale comentar que, além do desalinhamento com a direção norte-sul geográfica, a componente paralela à superfície do campo magnético terrestre apresenta variações locais, e que todas essas variações são registradas em mapas de declinação magnética usadas para navegação aérea e marítima.

2. Como *D* é um polo norte e *C* repele *D*, concluímos que *C* é também um polo norte. Sendo *C* atraído por *A*, concluímos que *A* é um polo sul e, portanto, como *A* repele *B*, o polo *B* é um polo sul.

3. Tendo em vista as informações fornecidas na figura 6.7, os estudantes concluirão que *A* permanece como polo norte, enquanto em *C* aparece um polo sul. Assim, em *D* aparece um polo norte e, em *E*, um polo sul. Em *F* teremos o aparecimento de um polo norte, enquanto *B* continua a ser um polo sul. Portanto, passamos a ter três ímãs, cada um com um par de polos (norte e sul).

4. a) Como o polo norte da agulha fica voltado para o norte geográfico da Terra, concluímos que "o polo magnético norte da agulha é atraído pelo norte geográfico da Terra".

b) Já que o norte geográfico da Terra atrai o norte magnético da agulha, concluímos que ele é um **polo sul magnético.**

5. A bússola se alinha com a direção norte-sul geográfica (aproximadamente), enquanto a linha do equador está na direção leste-oeste. Portanto, o ponteiro da bússola e a linha do equador formam entre si um ângulo aproximado de 90°.

6. Conforme foi observado pela primeira vez por Oersted, uma agulha magnética tende a se orientar perpendicularmente a um fio no qual passa uma corrente elétrica (como mostra a figura 6.8). Então, na figura deste exercício, a agulha deveria estar orientada perpendicularmente ao fio (a corrente no fio é muito intensa).

7. A pessoa poderá se enganar completamente ao tentar se orientar pela bússola magnética. Isto ocorre porque a corrente no fio poderá provocar desvios na agulha magnética, de modo que ela não estará alinhada na direção norte-sul.

8. A pessoa poderá aproximar a agulha magnética da região da parede onde passa o fio. Se a agulha se desviar, a pessoa concluirá que há uma corrente no fio.

9. a) Como as cargas estão em repouso, haverá entre elas apenas uma força eletrostática.

b) Ainda neste caso haverá apenas uma força eletrostática, pois uma das cargas está em repouso.

c) Quando as **duas cargas** estão em movimento aparece entre elas a **força magnética** (além da força eletrostática).

Física no contexto: Recurso de inclusão social para deficientes auditivos

1. Um receptor instalado no ambiente capta as ondas sonoras por um microfone e as transforma em um sinal elétrico. Este sinal irá gerar um campo magnético no anel magnético, resultando na variação do fluxo magnético através da bobina no aparelho auditivo. O aparelho, por sua vez, converte a variação da corrente novamente em som.

2. As interferências e os ruídos do ambiente externo, que muitas vezes prejudicam a compreensão da pessoa com deficiência auditiva.

10. Conforme dissemos, o campo magnético terrestre, em qualquer ponto, está orientado do Sul para o Norte (pois esta é a orientação normal da agulha de uma bússola). Então, o estudante deverá traçar setas na figura deste exercício, indicando que as linhas de indução estão orientadas do sul para o norte. Portanto, vemos que as linhas de indução estão "entrando" no polo norte geográfico e isso concorda com o fato de que o norte geográfico é um sul magnético (as linhas de indução "penetram" no polo sul de um ímã).

11. O vetor $\vec{B}$ tem, em cada ponto, a direção na qual a agulha magnética se orientou e o seu sentido é aquele para onde fica voltado o polo norte da agulha. Com isto em mente, os estudantes traçarão os vetores $\vec{B}_1$, $\vec{B}_2$ e $\vec{B}_3$ (deve-se observar que estes vetores apontam para o polo S do ímã e comparar com a figura 6.11, onde vemos que os vetores $\vec{B}_1$, $\vec{B}_2$ e $\vec{B}_3$ apontam no sentido de afastamento do polo N).

12. Usando o mesmo método do exercício 1, vemos que o ponto *D* está indicando o norte geográfico. Então, o estudante deverá traçar na figura um vetor $\vec{B}$ orientado de *P* para *D* (o campo magnético da Terra aponta do sul para o norte).

13. O valor da força magnética é dado por $F = Bqv \operatorname{sen}\theta$. Então:

a) Para que se tenha $F = 0$, devemos ter $\operatorname{sen}\theta = 0$. Então, concluímos que deve ser $\theta = 0°$ ou $\theta = 180°$.

b) Para que *F* seja máximo, o valor de $\operatorname{sen}\theta$ deve ser máximo. Isso ocorre quando $\theta = 90°$ (a partícula deve ser lançada com $\vec{v}$ perpendicular a $\vec{B}$).

14. Deseja-se que o estudante aplique a equação $F = Bqv \operatorname{sen}\theta$ em cada caso (habituando-se a lidar com esta relação):

a) Como $\theta = 0°$ e $\operatorname{sen} 0° = 0$, sabemos que $F = 0$.

b) $F = Bqv \operatorname{sen}\theta = (0{,}30) \cdot (2{,}0 \cdot 10^{-6}) \cdot (5{,}0 \cdot 10^{3}) \cdot \operatorname{sen} 30°$

Como $\operatorname{sen} 30° = 0{,}50$ obtemos $F = 1{,}5 \cdot 10^{-3}$ N.

c) $F = Bqv \operatorname{sen}\theta = (0{,}30) \cdot (2{,}0 \cdot 10^{-6}) \cdot (5{,}0 \cdot 10^{3}) \cdot \operatorname{sen} 90°$

Como $\operatorname{sen} 90° = 1$ obtemos $F = 3{,}0 \cdot 10^{-3}$ N.

d) Como $\theta = 180°$ e $\operatorname{sen} 180° = 0$, sabemos que $F = 0$.

15. a) Os campos elétricos são gerados por cargas elétricas ou distribuições de cargas elétricas, enquanto os campos magnéticos são gerados por cargas elétricas em movimento.

b) A principal diferença entre as linhas de força do campo elétrico e as linhas de indução do campo magnético é que as primeiras podem ser abertas, enquanto as segundas são sempre fechadas.

16. A finalidade deste exercício é fazer com que o aluno adquira uma maior habilidade no uso da "regra da mão direita" e também se habitue com as convenções para representar um vetor "entrando" ou "saindo" do papel, que foram apresentadas neste tópico.

a) Na figura abaixo: polegar para cima ($\vec{v}$), os demais dedos "entrando" no papel ($\vec{B}$) e a palma da mão mostrando que $\vec{F}$ aponta **para a esquerda.**

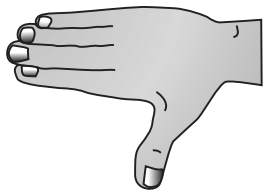


Ilustrações: Formato/ Arquivo da editora

b) Na figura abaixo: polegar "saindo" do papel ($\vec{v}$), os demais dedos para a direita ($\vec{B}$) e a palma da mão voltada para cima. Como a carga é negativa, concluímos que $\vec{F}$ estará dirigida **para baixo.**

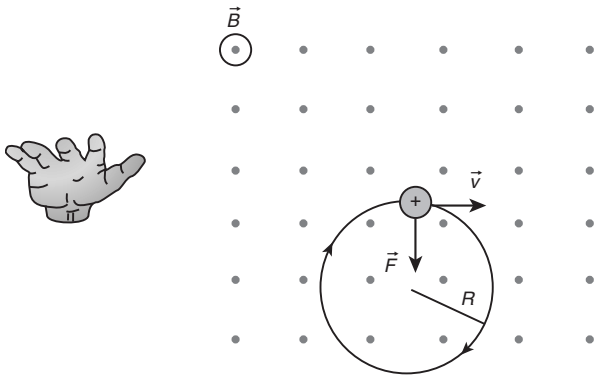


c) Na figura abaixo temos: a palma da mão indicando que $\vec{F}$ está "penetrando" no papel e o polegar voltado para baixo ($\vec{v}$). Os demais dedos indicam que $\vec{B}$ está apontando **para a esquerda** (o enunciado do exercício informa que $\vec{B}$ é perpendicular a $\vec{v}$).

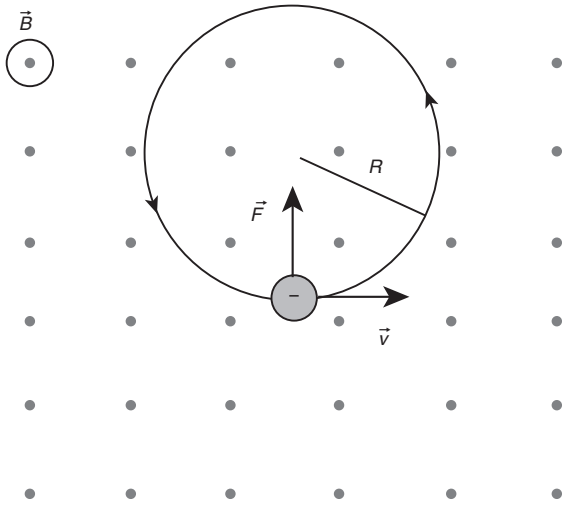


Ilustrações: Formato/ Arquivo da editora

17. Usando a "regra da mão direita" da maneira mostrada na figura abaixo, vemos que a força magnética $\vec{F}$, no instante do lançamento, aparecerá voltada para baixo. Assim, a trajetória da partícula se curvará para baixo e ela descreverá uma circunferência no sentido horário.



18. Se a carga na partícula for negativa, a força magnética no instante do lançamento estará apontando para cima. Então, a partícula descreverá uma trajetória circular no sentido anti-horário, como mostra a figura:



19. a) Quando a velocidade dobra de valor, temos que a nova velocidade pode ser expressa por $v' = 2v$ e os novos valores do raio e do período, que chamaremos de R' e T', podem ser obtidos por:

$$R' = \frac{mv'}{qB} = \frac{2mv}{qB} = 2R$$

$T' = T$, pois o período não depende da velocidade.

b) Quando a intensidade de B dobra, temos que $B' = 2B$ e os novos valores do raio e do período, que chamaremos de R' e T', podem ser obtidos por:

$$R' = \frac{mv}{qB'} = \frac{mv}{2qB} = \frac{R}{2}$$

$$T' = \frac{2\pi m}{qB'} = \frac{2\pi m}{2qB} = \frac{T}{2}$$

20. a) Sabemos que o campo $\vec{B}$ entre os polos é dirigido de N para S. Então, o fio *CD* está orientado na mesma direção de $\vec{B}$, isto é, temos $\theta = 0°$ e, assim, não há força magnética sobre o fio.

b) Usando a "regra da mão direita" da maneira mostrada na figura a seguir temos: polegar "saindo" do papel (sentido de *i*, isto é, de $\vec{v}$) e demais dedos para a direita ($\vec{B}$). Vemos que a palma da mão aponta para cima ($\vec{F}$).



O valor da força magnética no fio será (observe que $\theta = 90°$ e $L = 25\text{ cm} = 0{,}25\text{ m}$):

$$F = BiL = 0{,}20 \cdot 3{,}0 \cdot 0{,}25 \Rightarrow F = 0{,}15\text{ N}$$

21. a) Neste caso, invertemos o sentido do campo $\vec{B}$ aplicado à espira. Consequentemente, invertem-se os sentidos das forças que atuam nos lados desta espira e, assim, ela passará a girar em sentido **contrário** ao anterior.

b) Também neste caso invertem-se os sentidos das forças sobre a espira, ocasionando uma inversão no sentido de rotação.

c) Trocando simultaneamente o sentido de $\vec{B}$ e o sentido da corrente na espira, **não** há inversão no sentido das forças magnéticas. Assim, o sentido de rotação da espira do motor **não** se modifica.

22. a) O vetor $\vec{B}$ é dirigido de N para S. Então, como o lado *ED* é paralelo a $\vec{B}$, não haverá força magnética sobre ele. Usando a "regra da mão direita" verificamos que sobre *GE* há uma força "saindo" do papel e sobre *DC* há uma força "penetrando" no papel.

b) As forças sobre *GE* e *CD* têm a mesma intensidade e são opostas (como ocorre na figura 6.28). Assim, a espira tende a **girar** em torno do eixo *OP*.

23. a) Neste caso, a força magnética $\vec{F}$ estaria voltada para cima e, então, o módulo da força resultante $\vec{R}$ que atuaria sobre a mola seria igual à **diferença** entre *F* e *mg*, isto é, seria:

$$F_R = F - mg = 0{,}30 - 0{,}20 \Rightarrow R = 0{,}10\text{ N}$$

b) Como $F > mg$, concluímos que $\vec{F}_R$ está dirigida para cima e, portanto, a mola seria **comprimida**.

c) Sob a ação de $\vec{F}_R$ a mola iria ser comprimida de *X* tal que $\vec{F}_R = kX$ (lei de Hooke). Então:

$$X = \frac{\vec{F}_R}{k} = \frac{0{,}10}{20} \Rightarrow X = 5{,}0 \cdot 10^{-3}\text{ m} \Rightarrow X = 5{,}0\text{ mm}$$

Pratique Física

Em equipe

1. Após localizar os pontos cardeais pelo processo descrito, supondo que os polos da agulha magnética não estejam identificados, os alunos poderão determinar qual é o polo norte desta agulha (aquele polo que fica voltado para o norte geográfico).

Aproximando o polo norte da agulha dos polos de um ímã e observando se ele é atraído ou repelido, identificam-se também facilmente os polos do ímã.

2. Esta atividade, que pode ser realizada com facilidade, costuma ser bastante atraente para os alunos.

3. Para que a força magnética no fio seja observada com bastante clareza deve-se usar um fio fino (bem leve), não muito esticado (livre de se movimentar) e colocado bem próximo do ímã.

A experiência constituirá uma oportunidade para o estudante se exercitar no uso da "regra da mão direita". Usando esta regra para determinar o sentido da força magnética, o estudante verificará que o fio realmente se desloca no sentido desta força.

Ainda com a "regra da mão direita", o aluno poderá prever que, ao inverter o sentido da corrente no fio, o sentido da força magnética deve se inverter. Realizando a experiência, ele verá sua previsão confirmada. Estes mesmos comentários são válidos para a inversão do sentido do campo magnético.

4. O mesmo efeito da experiência anterior pode ser observado de maneira "espetacular" seguindo a orientação desta experiência. Se for usada uma lâmpada de filamento "reto" (não espiralado), o efeito é notável mesmo com ímãs "fracos".

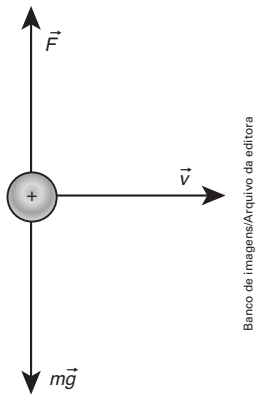
5. Qualquer estudante com um pouco de habilidade poderá construir este pequeno motor de corrente contínua (ou outro modelo simples qualquer). Recomendamos apenas que as "escovas" estejam bem pressionadas sobre o comutador e que os ímãs sejam colocados o mais próximo possível das espiras. É gratificante para o aluno ver funcionar, com sucesso, o motor que ele mesmo construiu.

Problemas e testes

1. a) Neste caso, a agulha se orientará na direção do campo do ímã, ficando o seu polo norte voltado para onde aponta o vetor $\vec{B}$. Como o campo do ímã está orientado de seu polo norte para seu polo sul, a agulha tomará a orientação mostrada na figura da resposta deste problema (podemos também chegar a esta conclusão observando que o polo sul do ímã atraiu o polo norte da agulha e que o polo norte do ímã atraiu o polo sul da agulha).

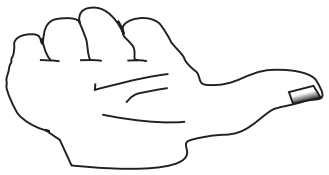
b) Nesse caso, devemos traçar (qualitativamente) os vetores que representam o campo do ímã e o campo terrestre (esse orientado do sul geográfico para o norte geográfico) e, em seguida, determinamos a resultante destes vetores. A agulha se orientará ao longo do campo magnético resultante.

2. a) Para equilibrar $m\vec{g}$, a força magnética $\vec{F}$ deve estar dirigida verticalmente para cima como na figura abaixo:



Banco de imagens/Arquivo da editora

Aplicando a "regra da mão direita" como na figura a seguir, temos: polegar para a direita ($\vec{v}$) e palma da mão para cima ($\vec{F}$), vemos que os demais dedos estão perpendiculares à folha de papel e "penetrando" nela. Portanto, $\vec{B}$ deve ser horizontal e "penetrando" no plano da figura.


Formato/Arquivo da editora

b) Como $\vec{v}$ é perpendicular a $\vec{B}$, temos $F = Bqv$. Então, impondo a condição de equilíbrio, isto é, $F = mg$, vem:

$$Bqv = mg \Rightarrow B = \frac{mg}{qv}$$

Substituindo os valores de m, g, q e v fornecidos (observando que $m = 4{,}0\ \text{mg} = 4{,}0 \cdot 10^{-6}\ \text{kg}$) obtemos $B = 2{,}0$ T (este é um campo magnético de intensidade elevada e, portanto, difícil de ser obtido em um laboratório de ensino "comum").

3. As linhas do **campo elétrico** são tangentes ao vetor $\vec{E}$ e, portanto, indicam a direção e o sentido da força elétrica em cada ponto. Por este motivo, elas são denominadas, adequadamente, linhas de força do campo elétrico.

Entretanto, as linhas de indução indicam em cada ponto a direção e o sentido do vetor $\vec{B}$ e esta direção não é a direção da força magnética (a força magnética não tem uma direção única em cada ponto, pois depende da direção da velocidade da partícula que passa pelo ponto). Dessa maneira, não seria correto dar a denominação de linhas de força do campo magnético às linhas de indução, pois elas não estão relacionadas diretamente com $\vec{F}$ (estão relacionadas com $\vec{B}$).

4. a) A partícula eletrizada ficará sob a ação de uma força elétrica constante (campo uniforme), em sentido contrário ao do campo e, portanto, no mesmo sentido de sua velocidade $\vec{v}$. Logo, seu movimento será retilíneo uniformemente acelerado (aceleração constante).

b) O ângulo entre $\vec{v}$ e $\vec{B}$ será $\theta = 180°$ e, como sen $180° = 0$, concluímos que não haverá força magnética atuando na partícula. Logo, seu movimento será retilíneo uniforme.

c) Neste caso, a força que atua na partícula é o seu peso, que tem sempre o mesmo sentido do campo. Podemos imaginar que se trata de uma partícula lançada verticalmente para cima, próximo à superfície da Terra. Sob a ação da força peso, o movimento será uniformemente retardado até que a velocidade se anule passando, em seguida, a ser uniformemente acelerado em sentido contrário ao inicial (a carga da partícula não terá nenhuma influência no movimento dentro do campo gravitacional).

5. A situação apresentada neste problema é semelhante àquela analisada no final do tópico 6.5, onde mostramos como foi possível, por meio do efeito Hall, concluir que são cargas negativas que se movem em um condutor metálico. É importante que aquela análise tenha sido bem entendida pelos estudantes, antes de procurarem responder às questões deste problema. Temos:

a) Como *Q* está ligado ao polo (+) e *P* ao polo (–), temos uma corrente convencional, na placa, de *Q* para *P*. Logo os elétrons se deslocam de *P* para *Q*.

b) Usando a "regra da mão direita" ($\vec{B}$ "entrando" no papel e $\vec{v}$ dirigida de *P* para *Q*) e lembrando-se de que a carga dos elétrons é negativa, vemos que eles ficam sob a ação de uma força magnética dirigida de *N* para *M*, fazendo com que sofram um deslocamento neste sentido.

c) O deslocamento dos elétrons ocasiona um acúmulo de cargas negativas em *M*, deixando um excesso de cargas positivas em *N*. Assim, temos $V_N > V_M$.

6. a

Pela "regra da mão direita", a corrente tem sentido horário e pelo gráfico se vê que em *I* implica – *x*.

Capítulo 7: Alterações do campo magnético

Orientações específicas

Neste capítulo, veremos como caracterizar o campo magnético em função da corrente elétrica que o estabelece. Procuramos tratar do assunto por uma abordagem mais conceitual do que matemática, sem expor diretamente as expressões numéricas que relacionam essas duas grandezas físicas. Ao tratar do campo magnético gerado por correntes elétricas que atravessam um condutor retilíneo, por exemplo, nos limitamos apenas a apresentar o fato de que *B* é proporcional a *i* e inversamente proporcional a *r*, sem levar em consideração a expressão completa para o seu cálculo: $B = \frac{\mu_0 i}{2\pi r}$. Acreditamos que essa maneira de encaminhar o ensino, enfocando somente as informações relevantes e de fácil assimilação, torna dispensável a memorização de fórmulas.

Julgamos que os seguintes comentários devem ser considerados pelo professor ao desenvolver este capítulo.

- Ao contrário do que é feito em alguns livros didáticos de Física, preferimos não apresentar a lei de Biot-Savart. Acreditamos que, em nosso curso, ela não teria utilidade, uma vez que, para aplicá-la aos casos de interesse, seria necessário o uso de cálculo integral, assunto que não pertence ao escopo do Ensino Médio.
- Deve-se observar que a regra de Ampère, apresentada no tópico 7.1, foi usada no texto para determinação do sentido de $\vec{B}$, e não se aplica somente ao caso de um fio retilíneo, mas a qualquer outra configuração geométrica de fio condutor, como uma espira, um solenoide, etc. Não enxergamos a necessidade de apresentar regras específicas para cada um dos casos, já que a regra de Ampère pode ser aplicada em todas as situações examinadas no capítulo.
- Embora consideremos válido exigir dos estudantes o emprego correto da regra de Ampère, temos observado que alguns deles sentem dificuldade em compreendê-la. Quando o professor perceber um caso assim, não deve insistir em seu entendimento imediato, mas sim destacar outros aspectos tão ou mais importantes do capítulo e deixar a abertura para que o aluno o procure quando se sentir mais confortável e desejoso de compreender melhor a regra.
- Ainda em relação à regra de Ampère, constatamos que muitos estudantes não têm clareza de quando devem utilizar essa regra ou a "regra da mão direita" que havia sido apresentada no capítulo anterior. O professor deverá, então, deixar bem claro que a "regra da mão direita" deve ser utilizada para relacionar os vetores $\vec{F}$, $\vec{v}$ e $\vec{B}$, ao passo que a regra de Ampère relaciona o vetor campo magnético $\vec{B}$ com a corrente *i* que gerou esse campo.

Resoluções das atividades

Para iniciar a conversa

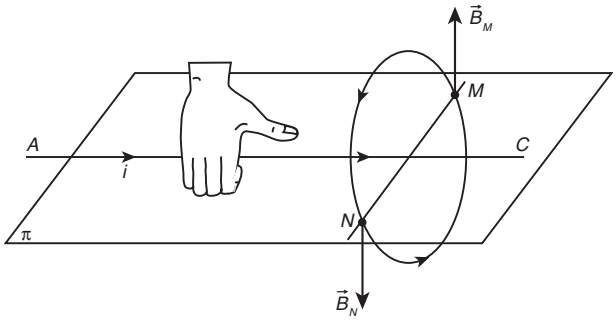
A saúde era estabelecida pelo equilíbrio das funções vitais. Para Mesmer, a cura de doenças como a paralisia e o escoburto era possível por meio de imersões em fluídos magnéticos.

A magnetobiologia estuda os efeitos produzidos por campos magnéticos nos organismos, enquanto o biomagnetismo pretende quantificar, através de medição, os campos gerados por seres vivos.

A corrente elétrica pode ser estabelecida em condutores líquidos. Dessa forma, a corrente elétrica poderia imantar a barra de ferro criando, assim, um ímã artificial que geraria o campo magnético.

Verifique o que aprendeu

1. Na figura a seguir, suponhamos que o plano π mostrado represente o plano da figura do exercício, no qual se localiza o fio *AC*. Usando a regra de Ampère da maneira representada na figura abaixo, vemos que as linhas de indução *AC* circulam no sentido indicado, isto é, o vetor $\vec{B}$ estará "entrando" no papel em todos os pontos situados à direita de *AC* (como no ponto *N*) e estará "saindo" do papel em todos os pontos à esquerda de *AC* (como no ponto *M*).



Ilustrações: Formato/Arquivo da editora

Concluímos, então, que em *P* e *Q* o vetor $\vec{B}$ está "entrando" na folha de papel, enquanto em *M* e *R* o vetor $\vec{B}$ está "saindo" da folha.

2. a) Vimos que $B \propto i$. Como *i* foi duplicada, concluímos que *B* também o será, isto é, o novo valor de *BM* será:

$$B_M = 2 \cdot (6{,}0 \cdot 10^{-4}) \therefore B_M = 12 \cdot 10^{-4}\,\text{T}$$
$$(\text{ou } B_M = 1{,}2 \cdot 10^{-3}\,\text{T})$$

b) Sabemos que $B \propto 1/r$. Ao passarmos de *M* para *R* estamos triplicando o valor de *r* (de $r = 1$ cm para $r = 3$ cm). Então, o valor de *B* ficará dividido por 3, isto é:

$$B_R = \frac{B_M}{3} = \frac{12 \cdot 10^{-4}}{3} \therefore B_R = 4{,}0 \cdot 10^{-4}\,\text{T}$$

3. a) Usando a regra de Ampère, vemos que tanto $\vec{B}_1$ quanto $\vec{B}_2$ em *P* são verticais, para cima.

Observação: Se o professor achar conveniente (em caso de dificuldades dos alunos em usar a regra de Ampère), poderá lançar mão da figura 7.2.b, que mostra o vetor $\vec{B}$ em um ponto à direita de uma corrente que está "saindo" do papel. Como vemos, esse vetor está apontando para cima e, então, esse será o sentido de $\vec{B}_1$ no ponto *P* deste exercício. Observando a figura 7.4 vemos que o vetor $\vec{B}$ à esquerda de uma corrente que "entra" no papel está também apontando para cima. Logo, esse será o sentido de $\vec{B}_2$ no ponto *P* deste exercício.

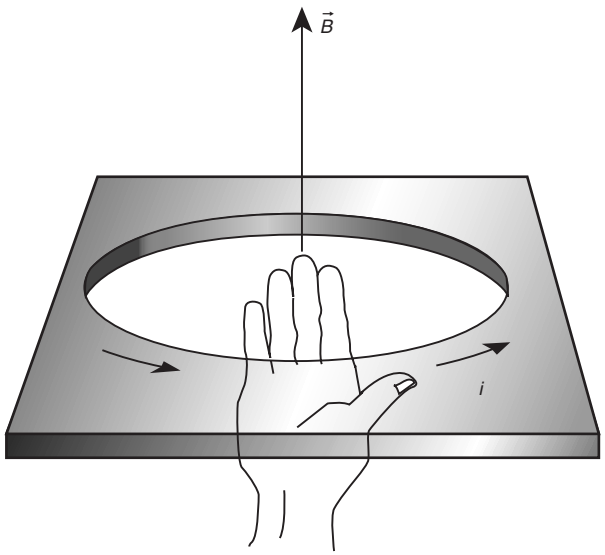
b) Sabemos que $B \propto i$. Então, como $i_2 = i_1/2$, concluímos que:

$$B_2 = \frac{B_1}{2} = \frac{3{,}0 \cdot 10^{-4}}{2} \therefore B_2 = 1{,}5 \cdot 10^{-4}\,\text{T}$$

c) Como $\vec{B}_1$ e $\vec{B}_2$ são ambos verticais, dirigidos para cima, é claro que o campo magnético resultante $\vec{B}$, em *P*, também será vertical, dirigido para cima, e seu módulo vale:

$$B = B_1 + B_2 = 3{,}0 \cdot 10^{-4} + 1{,}5 \cdot 10^{-4}$$
$$\text{ou } B = 4{,}5 \cdot 10^{-4}\,\text{T}$$

4. a) Sabemos que o campo magnético $\vec{B}$ no centro da espira será perpendicular ao plano desta espira. Logo, em nosso caso, $\vec{B}$ será um vetor com a direção vertical (o plano da espira é horizontal). Para determinar o sentido de $\vec{B}$, observemos que a corrente circula na espira com o sentido indicado na figura abaixo. Então, usando a regra de Ampère da maneira mostrada nesta figura, vemos que os dedos da mão direita indicam que o vetor $\vec{B}$, no centro da espira, aponta para cima.



b) Vimos que, no centro da espira, temos $B \propto i/R$. Então:

– duplicando *i*, teremos *B* duplicado;

– reduzindo *R* à metade, teremos *B* duplicado.

Assim, *B* será multiplicado por 4, isto é, o novo valor de *B* será:

$$B = 4 \cdot (2{,}0 \cdot 10^{-4}) \text{ ou } B = 8{,}0 \cdot 10^{-4}\,\text{T}$$

5. a) Como sabemos, a extremidade do ímã (ou do eletroímã que fica voltada para o norte geográfico) é o polo norte do ímã. Então, *F* está se comportando como o polo norte do solenoide.

b) As linhas de indução no interior do ímã (ou de um eletroímã) estão orientadas do polo sul para o polo norte, como vemos na figura 7.11. Então, em nosso caso, o campo no interior do solenoide está orientado de *G* para *F*.

6. a) Como as duas bobinas (solenoides) estão em série, a intensidade da corrente é a mesma para ambas.

b) Temos os seguintes valores do número de espiras por unidade de comprimento:

$$n_1 = \frac{N}{L_1} = \frac{100}{20} \therefore n_1 = 5{,}0 \text{ espiras/cm}$$

$$n_2 = \frac{N}{L_2} = \frac{100}{40} \therefore n_2 = 2{,}5 \text{ espiras/cm}$$

Como $B \propto ni$ e *i* tem o mesmo valor para os dois solenoides, concluímos que teremos o maior *B* na bobina com maior *n*. Como $n_1 > n_2$, temos $B_1 > B_2$.

c) Em nosso caso ($i_1 = i_2$) temos $B \propto n$. Então, como $n_2 = n_1/2$:

$$B_2 = \frac{B_1}{2} = \frac{6{,}0 \cdot 10^{-3}\,\text{T}}{2} \therefore B_2 = 3{,}0 \cdot 10^{-3}\,\text{T}$$

7. Usando a regra de Ampère vemos que a corrente circula nas espiras do solenoide, no sentido de *D* para *C*. Poderemos também chegar a esta conclusão observando que as espiras deste solenoide estão enroladas no mesmo sentido que aquelas da figura 7.13. Como as linhas de indução estão orientadas de **S** para **N** (dentro do solenoide), concluímos que a situação deste exercício é idêntica à da figura 7.13.b. Observando esta figura, vemos que a corrente está se dirigindo de *D* para *C* (este procedimento poderá ser utilizado pelos alunos que estejam em dificuldades para usar a regra de Ampère, sendo permitido a eles consultar as figuras que analisaram ao estudar o texto do capítulo).

Como a corrente elétrica está fluindo de *D* para *C*, concluímos que *D* é o polo positivo da bateria.

8. No interior da caixa pode haver um ímã, uma bobina ou um solenoide percorridos por corrente elétrica.

Aplicações da Física: Como se forma a imagem em um tubo de TV

1. O CRT, do inglês *Cathode Ray Tube*, é o modelo mais conhecido até hoje, pois esteve durante muitos anos no mercado, sem evoluir muito desde a sua invenção. Ele consiste em um tubo do qual são emitidos os raios catódicos. Os raios catódicos são provocados pelos elétrons que se elevam do polo negativo do catodo.

Com este fenômeno químico, partículas negativas são propagadas em forma de feixe de luz. Em uma TV em cores, estes feixes são focados em uma matriz de pontos em cores básicas RGB (azul, verde e vermelho) presente em uma tela fosforescente (de fósforo). Um sinal de crominância é adicionado à superposição de uma onda senoidal ao sinal preto e branco, que, juntos, formam a cor resultante. Na TV em preto e branco, esse sinal era ignorado ou não existia.

As TVs de LCD utilizam uma matriz chamada "matriz passiva". Os pontos de luz existentes nesta matriz recebem uma carga na vertical e são aterrados na horizontal através de circuitos eletrônicos. É uma verdadeira encruzilhada. Quando o ponto recebe esta corrente, as moléculas de cristal líquido existentes ali são "torcidas", o que causa um efeito de "acendimento".

O funcionamento de uma TV de plasma se baseia na ionização de gases nobres existentes em minúsculas cápsulas, também chamadas de células. Estas cápsulas são localizadas entre duas placas de vidro e cada uma é revestida de fósforo nas cores RGB (vermelho, verde e azul). Ao receberem uma carga eletromagnética, são ionizadas, gerando, então, a luz colorida. É o mesmo processo das lâmpadas fluorescentes.

A tecnologia OLED utiliza o mesmo mecanismo das TVs LED, mas, em vez de usar diodos (LED) comuns, utiliza diodos orgânicos, feitos de carbono, que, ao receberem uma carga elétrica, emitem luz.

2. Após a implantação do sistema digital em 2007, esse sistema foi bastante discutido nos noticiários. Essa mudança alterou um padrão de mais de 50 anos de transmissão de televisão e envolveu décadas de pesquisas nos mais diversos países, num processo semelhante ao que foi a introdução da TV colorida. A principal diferença entre as duas formas de transmissão se deve à estrutura de codificação do sinal da televisão. A transmissão tradicional codifica o sinal de modo analógico, tanto a imagem como o som nas ondas eletromagnéticas transmitidas. Em uma frequência separada, o som é enviado na própria forma de onda. Já o sinal da imagem é separado da intensidade luminosa e da intensidade de cada uma das cores. Para identificar a amplitude da luminosidade e das cores, utiliza-se a amplitude da onda eletromagnética. Já na TV digital, toda a informação é transformada em 0 e 1 e depois decodificada pelo aparelho televisor. Com essa mudança, para os aparelhos de televisão que possuem somente um decodificador analógico, é necessário utilizar um decodificador digital que transforma o sinal da televisão digital em um sinal analógico, de modo que o aparelho possa decodificar a informação e reproduzi-la.

9. a) Os estudantes deverão traçar linhas de indução semelhantes àquelas da figura 7.22, porém orientadas em sentido contrário a elas (as linhas "penetram" no polo sul do ímã).

b) Os ímãs elementares do pedaço de ferro se orientarão no sentido do campo aplicado, isto é, no sentido do campo do ímã. Logo, os estudantes deverão fazer um desenho como o da figura 7.22, porém com os ímãs elementares orientados de *F* para *G*.

c) Como o campo no interior de *FG* está orientado de *F* para *G*, concluímos que *G* será um polo norte.

d) A extremidade *G* (polo norte) encontra-se mais próxima do polo S do ímã e, assim, *FG* será atraído pelo ímã (o polo S atrai *G* mais fortemente do que repele *F*).

Observação: Na figura 7.22, analisamos o que se passa quando *FG* é aproximado do polo norte de um ímã. Neste exercício foi analisado o que se passa quando *FG* é aproximado do polo sul do ímã. Vemos então que, em ambos os casos, o pedaço de ferro é atraído pelo ímã (como sabemos de nossa experiência diária).

10. b) Sendo *FG* uma substância diamagnética, os seus ímãs elementares orientam-se em sentido contrário ao campo aplicado. Assim, os estudantes deverão desenhar os pequenos ímãs orientados de *G* para *F* (em sentido contrário ao campo do ímã).

c) Como o campo magnético no interior de *FG* está orientado de *G* para *F*, concluímos que *G* será um polo sul.

d) Como *G* é um polo sul, ele será repelido pelo polo sul do ímã.

Observação: Portanto, uma substância diamagnética é sempre repelida por um ímã, quer seja aproximada de seu polo norte, quer de seu polo sul.

11. Observando que a corrente se dirige do polo positivo para o polo negativo da pilha, podemos usar a regra de Ampère

e, assim, verificamos que as linhas de indução criadas pela bobina estão orientadas, no interior da barra de ferro, de *F* para *G*. Portanto, *G* é o polo norte (as linhas "saem" de *G*) e *F* é o polo sul (as linhas "entram" em *F*).

12. Sabemos que a elevação de temperatura provoca um aumento na agitação dos átomos (ou moléculas) que constituem um corpo. Assim, é de esperar que, ao aquecermos suficientemente um ímã, o aumento na agitação atômica seja tal que desfaça o alinhamento dos ímãs elementares. Dessa maneira, o ímã pode perder totalmente a sua imantação (este fato é observado experimentalmente).

Pratique Física

Em equipe

1. Temos:

a) Lembrando que a corrente circula no fio do polo positivo para o polo negativo da pilha, o aluno não terá dificuldade (usando a regra de Ampère) em determinar o sentido de $\vec{B}$ no ponto onde se encontra a agulha magnética (sob o fio).

b) O polo norte da agulha se desviará no sentido de $\vec{B}$. Fechando o circuito, o estudante verá confirmada sua previsão.

c) Invertendo o sentido da corrente, inverte-se o sentido de $\vec{B}$ e, então, o polo norte se desviará em sentido contrário ao anterior.

d) Sobre o fio, como nos mostra a regra de Ampère, o sentido de $\vec{B}$ é contrário àquele que ele apresenta sob o fio. O desvio da agulha confirmará este fato.

2. 1º) O vetor $\vec{B}$ criado pelo ímã em cada ponto será traçado, como sabemos, no sentido para o qual aponta o polo norte da pequena agulha magnética colocada no ponto.

2º) Com procedimento análogo, o estudante desenhará o vetor $\vec{B}$ criado pelo solenoide em cada um dos pontos marcados na folha de papel.

Comparando as configurações obtidas em cada folha, ele perceberá claramente que o campo magnético criado por um ímã é semelhante àquele criado por um solenoide. Este resultado confirma a hipótese de que estes campos têm a mesma origem (cargas elétricas em movimento).

3. a) Observando os objetos que são atraídos pelo ímã, o estudante identificará aqueles que são **ferromagnéticos**, isto é, que possuem **ferro**, **cobalto** ou **níquel** em sua constituição.

b) Vários **metais** (ou ligas) não são ferromagnéticos: alumínio, cobre, bronze etc. O aluno os identificará porque eles **não** serão atraídos pelo ímã.

INTEGRANDO... A Física e a forma como os seres vivos se orientam no espaço

1. Em virtude da inclinação das linhas de indução do campo magnético terrestre, as bactérias nadam para baixo ou para cima (na vertical) quando estão próximas dos polos do planeta, mas se movimentam praticamente na horizontal quando estão em rios e lagos próximo ao equador terrestre, uma vez que nessas regiões a inclinação do campo magnético é mais próxima de zero.

2. As forças magnéticas impostas pelo campo magnético terrestre são de baixa intensidade. Mas, para que morcegos e aves voem "vencendo" a resistência provocada pelo meio e para que façam manobras em trajetórias curvas, eles precisam estar sujeitos a forças de muito maior intensidade do que aquelas que orientam as bactérias, já que seus corpos apresentam maior massa.

Problemas e testes

1. Invertendo-se a polaridade da bateria, haverá uma inversão no sentido da corrente no eletroímã e também no sentido da corrente nas espiras do motor (estas espiras estão em série com as espiras do eletroímã). Portanto, haverá uma inversão no sentido do campo magnético do motor e, ao mesmo tempo, uma inversão no sentido da corrente nas espiras que entram em rotação. Nessas condições não haverá inversão de sentido na rotação do motor.

2. O dispositivo é constituído de dois circuitos elétricos (cada um "alimentado" por uma bateria própria): o circuito da bobina do relé, ligado às portas e às janelas, e o circuito da campainha. Quando as portas e janelas estão fechadas, há uma corrente na bobina e o eletroímã atrai a chave magnética, mantendo aberto o circuito da campainha. Abrindo-se uma porta ou uma janela, a corrente na bobina é interrompida, libertando a chave magnética que fecha o circuito da campainha, acionando o alarme.

3. a) Como a corrente é alternada, a extremidade esquerda da bobina se comporta ora como polo norte ora como um polo sul magnético. Em virtude disso, a bobina será sucessivamente atraída e repelida pelo ímã fixo, e como ela está presa ao cone, este oscilará, para a frente e para trás, juntamente com essa bobina.

b) O cone provocará compressões e rarefações, que irão se propagar no ar. Sabemos que isto constitui uma onda de pressão longitudinal.

c) O cone oscilará com a mesma frequência de oscilação da corrente alternada na bobina. Como a frequência da onda sonora produzida é igual à frequência da fonte que a gerou (o cone), concluímos que a frequência do som é igual à da corrente na bobina.

d) Fazendo-se variar a amplitude da corrente na bobina, haverá alteração na força que atua no cone e, assim, sua amplitude de oscilação será alterada. Por este motivo, a amplitude da onda sonora gerada se modificará (há uma alteração na intensidade do som emitido).

4. Observando o sentido da corrente nas espiras do ramo do eletroímã mais próximo do polo (+) da bateria, vemos que o campo magnético criado por essa corrente está dirigido para baixo, "penetrando" no núcleo de ferro. Uma análise

semelhante mostra que, no outro ramo do núcleo de ferro, as espiras foram enroladas de tal modo que o campo magnético criado pela corrente nessas espiras também está dirigido para baixo, "penetrando" no núcleo de ferro. Em consequência disto, em qualquer ponto no interior do núcleo de ferro teremos dois campos magnéticos de sentidos opostos e, assim, o campo magnético resultante será praticamente nulo.

5. d

A ponta sul da agulha se orienta como o polo norte do eletroímã. Como as linhas são circulares, a melhor representação é a **d**.

6. b

Como B é proporcional a i, e i_1 está a $2d$ de P e i_2 está a d, é necessário que $i_1 = 2i_2$.

Capítulo 8: Indução eletromagnética — ondas eletromagnéticas

Orientações específicas

A importância deste capítulo, que encerra nosso curso de Eletricidade, pode ser atribuída essencialmente a três aspectos: à apresentação da lei de Faraday da Indução Eletromagnética, à análise do trabalho desenvolvido por Maxwell no século passado e à proximidade do assunto com a realidade do aluno.

A lei de Faraday da Indução Eletromagnética ocupa uma posição de destaque entre as leis fundamentais da Física, estando em pé de igualdade com a lei de Coulomb e com as leis de Newton.

Já o trabalho desenvolvido por Maxwell no século passado se constitui em uma síntese no campo do Eletromagnetismo tão importante quanto aquela realizada por Newton na Mecânica. Procuramos, em nosso texto, chegar a um dos resultados mais conhecidos desse trabalho, que foi a previsão da existência das ondas eletromagnéticas e a conclusão de que a luz é uma onda dessa natureza.

Por fim, a fácil associação dos tópicos do capítulo com o mundo à nossa volta se dá tanto por meio de conceitos e fenômenos físicos, como ocorre com a radiação ultravioleta ou a corrente alternada, como pela apresentação e pela descrição de conquistas tecnológicas deste século, como é o caso do transformador de eletricidade, do forno de micro-ondas, do aparelho *laser*, das linhas de transmissão, das usinas geradoras de energia elétrica, entre outras.

Trata-se, portanto, de um capítulo com enorme potencial didático, pois o professor poderá criar as condições para que o aluno se dê conta do papel da Física na idealização e na implementação da tecnologia moderna, fazendo com que ele constate aquilo que foi comentado na apresentação que introduz a nossa obra, ou seja, que o mundo está repleto de Física.

Consideramos que os seguintes pontos específicos devem ser observados durante o desenvolvimento deste capítulo.

- Não recomendamos que o professor apresente a definição de fluxo magnético por meio de um produto escalar, pois isto implicaria a utilização de grandezas matemáticas abstratas, com as quais o estudante teria dificuldades em trabalhar. Preferimos, para um curso de Ensino Médio, dar ênfase a uma interpretação mais concreta de fluxo, relacionando-o com o número de linhas de indução que "furam" uma superfície.
- O gerador de corrente alternada deve ser analisado apenas de modo qualitativo. Julgamos inapropriado apresentar a expressão matemática da *f.e.m.* para este tipo de gerador ($\varepsilon = \varepsilon_m \operatorname{sen} 2\pi ft$), que nada acrescenta de fundamental ao que foi analisado nessa seção e que poderá transmitir ao aluno uma imagem exagerada de complexidade do assunto.
- Para aplicar corretamente a lei de Lenz, o estudante deverá dominar o uso da regra de Ampère. Se, no capítulo anterior, os alunos encontraram dificuldades em usar esta regra e, seguindo nossa recomendação, o professor a relegou a um segundo plano, também aqui ele não deverá insistir demasiadamente na aplicação da lei de Lenz a problemas específicos.
- Para que o aluno tenha ideia da importância do transformador, sugerimos a leitura e o debate do item "Como funciona um transformador" do tópico 8.4, no qual fica claro que a existência desse dispositivo viabilizou a escolha da corrente alternada em detrimento da corrente contínua, tanto em escala comercial quanto industrial.

Resoluções das atividades

Para iniciar a conversa

Resposta pessoal. Se por um lado há outras formas de se confirmar se uma notícia é verdadeira ou não, há também novos recursos de som e imagem que podem tornar a ficção bem mais próxima da realidade.

No vácuo, elas se propagam com a mesma velocidade: a da luz.

Nosso olho só consegue decodificar as ondas eletromagnéticas que possuem comprimento na faixa da luz visível. Como as ondas de rádio têm comprimento maior do que a luz visível, não as enxergamos.

Verifique o que aprendeu

1. a) Usando a "regra da mão direita" com o polegar para a direita ($\vec{v}$) e os demais dedos saindo do papel ($\vec{B}$), vemos que a palma da mão direita está voltada para *C*. Como os elétrons possuem carga negativa, concluímos que a força magnética sobre eles aponta para *D*.

b) Como os elétrons livres da barra metálica são empurrados para *D*, é claro que esta extremidade ficará negativa e *C* ficará positiva.

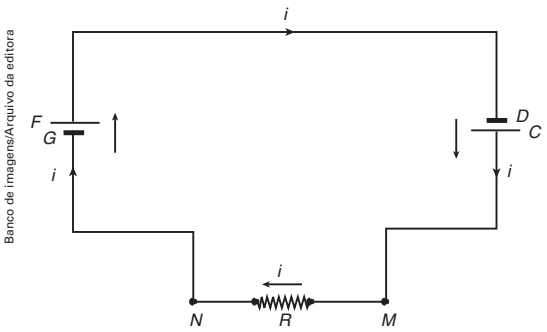
c) A barra comporta-se como uma bateria cujo polo positivo está em *C* e cujo polo negativo está em *D*. Então, a corrente induzida terá, no fio, o sentido de *C* para *D*, isto é, o sentido *CFD*.

2. Deve-se observar que, neste caso, a velocidade $\vec{v}$ dos elétrons da barra seria paralela ao campo magnético $\vec{B}$. Então, não haveria uma força magnética sobre os elétrons para provocar a separação de cargas na barra (para haver esta separação é necessário que a barra corte as linhas de indução).

3. a) Usando a "regra da mão direita" com o polegar entrando no papel ($\vec{v}$) e os demais dedos apontando para a direita ($\vec{B}$), vemos que a força sobre os elétrons em *CD* aponta de *C* para *D*. Logo, *C* fica positivo e *D* fica negativo.

b) Com procedimento semelhante, concluímos que a força sobre os elétrons em *FG* aponta de *F* para *G*. Logo, *F* fica positivo e *G* fica negativo.

c) A situação é equivalente àquela mostrada na figura abaixo.



Banco de imagens/Arquivo da editora

Vemos que as duas baterias *GF* e *CD* estão ligadas em série (o polo positivo F está ligado ao polo negativo *D*).

d) Examinando a figura, concluímos que a corrente induzida, gerada pelas duas baterias em série, circulará no sentido ali indicado. Logo, a corrente passa em *R* de *M* para *N*.

Observação: O professor poderá informar a seus alunos que a situação analisada neste exercício (espira girando dentro de um campo magnético) constitui exatamente a base do funcionamento do gerador de corrente (dínamo), que será apresentado na seção seguinte.

4. a) Como a normal à superfície está orientada para cima, vemos que ela possui a mesma direção e o mesmo sentido de $\vec{B}$, isto é, o ângulo entre $\vec{B}$ e a normal à superfície é $\theta = 0°$.

b) Como $A = 60\ cm^2 = 60 \cdot 10^{-4}\ m^2$, vem:

$$\varphi = BA \cos\theta = (3{,}5 \cdot 10^{-2}) \cdot (60 \cdot 10^{-4}) \cdot \cos 0°$$

$$\therefore \varphi = 2{,}1 \cdot 10^{-4}\ Wb$$

5. a) Neste caso, a normal à superfície é **perpendicular** a $\vec{B}$, isto é, temos $\theta = 90°$. Como $\varphi = BA \cos\theta$ e $\cos 90° = 0$, vem $\varphi = 0$.

b) **Sim**, no texto foi afirmado que $\varphi = 0$ porque nenhuma linha de indução está furando a superfície. Logo, essa afirmação concorda com o resultado que encontramos em **b**.

6. a) Teríamos:

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = 2{,}1 \cdot 10^{-4} - 0 \therefore \Delta\varphi = 2{,}1 \cdot 10^{-4}\ Wb$$

b) Pela lei de Faraday, vem:

$$0\varepsilon = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \frac{2{,}1 \cdot 10^{-4}}{0{,}03} \therefore \varepsilon = 7 \cdot 10^{-3}\ V$$

7. a) Há um fluxo magnético φ através da espira, pois várias linhas de indução do campo criado pelo ímã estão furando o plano da espira.

b) Como a espira e o ímã estão em repouso, o fluxo magnético através da espira **permanece constante** (não há variação do número de linhas de indução que furam o plano da espira).

c) Como $\Delta\varphi = 0$ concluímos, pela lei de Faraday, que $\varepsilon = 0$.

8. a) De maneira análoga à questão **a** do exercício anterior, concluímos que existe um fluxo magnético φ através da bobina (em virtude do campo criado pelo ímã).

b) Como a bobina e o ímã deslocam-se com a mesma velocidade, a distância entre eles permanece constante. Por isso, o número de linhas de indução que atravessam a bobina não variará, isto é, o fluxo φ através da bobina **permanecerá constante**.

c) Pela lei de Faraday, com $\Delta\varphi = 0$, vemos que $\varepsilon = 0$. Como não há f.e.m. induzida na bobina, não haverá corrente induzida ($i = 0$).

9. a) Observemos que a f.e.m. será induzida no lado da espira cujo comprimento é $L = 10\ cm = 0{,}10\ m$. Então,

$$\varepsilon = BLv = 0{,}50 \cdot 0{,}10 \cdot 6{,}0 \therefore \varepsilon = 0{,}30\ V$$

b) Pela equação do circuito, virá:

$$i = \frac{\Sigma\varepsilon}{\Sigma R} = \frac{0{,}30}{0{,}40} \therefore i = 0{,}75\ A$$

10. a) Este tempo é o período *T* do movimento de rotação da espira. Como sabemos,

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{60} \therefore T = 0{,}017\ s$$

b) Vimos, na figura 8.16, que o intervalo de tempo entre as posições **b** e **d** corresponde à meia volta da espira. Logo, o tempo entre dois brilhos máximos da lâmpada é:

$$\Delta t = \frac{T}{2} = \frac{0{,}016}{2} \therefore \Delta t = 0{,}008\ s$$

c) Observe que o tempo encontrado em **b** é de apenas 8 milésimos de segundo. Então, o brilho da lâmpada passa muito rapidamente de um máximo para outro, isto

é, praticamente não haverá flutuações no brilho e não será possível a nossos olhos perceber essas pequenas e rápidas flutuações.

11. a) Correta, pois o movimento de *GH* está provocando um aumento na área do circuito.

b) Correta, como se pode concluir pela regra de Ampère.

c) Correta, pois vimos em **a** que o fluxo magnético através do circuito está aumentando.

d) Correta, pois o campo da corrente está "saindo" do papel e diminuindo o fluxo existente no circuito. Concluímos, então, que o campo $\vec{B}$ externo está "entrando" na folha de papel.

12. a) O campo $\vec{B}_1$ estabelecido por i_1 no interior da espira (2) está saindo do papel.

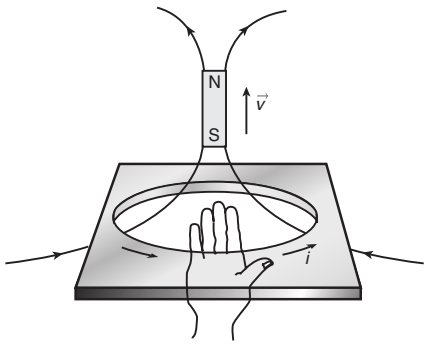
b) Quando fechamos a chave *C*, a corrente i_1 aumenta desde zero até o seu valor final. Então, B_1 também passa de zero para um determinado valor, fazendo com que haja um **aumento** no fluxo magnético φ através de (2).

c) Como φ através de (2) aumentou, a lei de Lenz nos diz que $\vec{B}_2$ deve aparecer procurando diminuir φ. Logo, $\vec{B}_2$ deve estar entrando no papel (em sentido contrário a $\vec{B}_1$).

13. a) Usando a regra de Ampère, vemos que, para criar um campo $\vec{B}_2$ entrando no papel, a corrente induzida i_2 deve aparecer em um sentido contrário àquele da figura 8.23 (a figura 8.23 representa a situação quando **abrimos** *C*).

b) Após a chave *C* já estar fechada, o campo $\vec{B}_1$ permanece constante, isto é, o fluxo φ através de (2) não varia. Assim, não haverá corrente induzida nesta espira (a corrente induzida i_2 aparece apenas durante um curto intervalo de tempo, no instante em que fechamos ou abrimos a chave *C*).

14. a) As linhas de indução penetram no polo sul. Logo, temos no interior da espira um campo magnético dirigido **para cima**, como mostra a figura:



Formato/Arquivo da editora

b) Como o ímã está se afastando da espira, concluímos que o fluxo através dela está **diminuindo**.

c) O campo da corrente induzida deve reforçar o fluxo no interior da espira (lei de Lenz). Então, o campo da corrente deve também estar dirigido para cima.

d) A regra de Ampère nos mostra que, para criar um campo para cima, a corrente induzida deve circular no sentido indicado pelo polegar (sentido *CDFG*).

15. a) Sim, pois a bateria estabelece uma corrente no primário, a qual cria um campo magnético no núcleo de ferro. As linhas de indução deste campo atravessam o secundário estabelecendo aí um fluxo magnético.

b) Como a corrente que a bateria estabelece no primário é contínua (constante), o campo que essa corrente cria também é constante (não varia no tempo). Logo, o fluxo φ através do secundário também será constante.

c) Como o fluxo através do secundário **não** sofre variações, não haverá f.e.m. induzida em suas espiras. Logo, a voltagem V_2 é **nula**.

16. No exemplo resolvido vimos que, em um transformador (ideal), a potência que obtemos no secundário deve ser igual àquela que é entregue ao primário. Então, de $P_2 = P_1$ vem (lembrando que $P = Vi$):

$$V_2 i_2 = V_1 i_1 \text{ ou } 24 \cdot 3{,}5 = 120\, i_1 \therefore i_1 = 0{,}70\ \text{A}$$

(Observe, então, que nesse caso a corrente no secundário é **maior** do que no primário, pois $V_2 < V_1$.)

17. a) **Sim**, pois a variação de $\vec{B}$ no tempo faria aparecer um **campo elétrico induzido**.

b) Como $\vec{B}$ está aumentando, temos um aumento no fluxo φ através da espira. Então, o campo magnético da corrente induzida deve ter sentido contrário ao campo $\vec{B}$ já existente. Para isso, a corrente induzida deve ter sentido contrário àquele mostrado na figura 8.28. (Vemos isso pela regra de Ampère.)

c) A corrente induzida é provocada pelo campo elétrico induzido. Logo, o sentido de $\vec{E}$ será o mesmo da corrente induzida (contrário ao da figura 8.28).

18. a) Como sabemos, há um campo elétrico $\vec{E}$ dirigido da placa positiva para a placa negativa.

b) **Não haverá um campo** $\vec{B}$ induzido porque o campo $\vec{E}$ não está variando no decorrer do tempo (o campo $\vec{B}$ só é induzido quando há variação de $\vec{E}$).

19. a) Quando fechamos *C*, há passagem de carga de uma placa para outra, isto é, a carga de uma das placas vai gradualmente neutralizando a carga de sinal contrário da outra placa. Assim, o valor das cargas em ambas as placas diminui gradualmente com o decorrer do tempo.

b) Em virtude da diminuição das cargas nas placas, temos uma **diminuição** no módulo do campo elétrico entre elas.

c) Sim, haverá um campo $\vec{B}$ induzido porque o campo $\vec{E}$ está variando no tempo (de maneira semelhante ao que ocorre na figura 8.31).

20. a) Sim, como o campo $\vec{E}$ está variando, essa variação dará origem a um campo $\vec{B}$ induzido.

b) Na figura 8.30, vimos que um campo $\vec{B}$ oscilante dá origem à irradiação de uma onda eletromagnética. De maneira análoga, o campo $\vec{E}$ oscilante **originará uma onda eletromagnética** que se irradiará em todas as direções a partir da antena *FH*.

21. a) No vácuo (ou no ar) **todas** as ondas eletromagnéticas propagam-se com a **mesma** velocidade ($v = 3{,}0 \cdot 10^8$ m/s).

b) Temos $\lambda = v/f$. O valor de v é o mesmo para as duas radiações. Então, como f da micro-onda < f da luz verde, concluímos que λ da micro-onda > λ da luz verde.

33. Para isto, devemos calcular a frequência desta radiação e, em seguida, consultar a figura 8.35. Como a radiação propaga-se no vácuo, temos $v = 3{,}0 \cdot 10^8$ m/s. Então, de $\lambda = v/f$, temos:

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{3{,}0 \cdot 10^8}{7{,}5 \cdot 10^{-9}} \therefore f = 4{,}0 \cdot 10^{16} \text{ hertz}$$

Consultando a figura 8.35, vemos que esta frequência corresponde à região ultravioleta do espectro eletromagnético, isto é, trata-se de uma **radiação ultravioleta**.

23. Os ossos absorvem uma maior quantidade de raios X do que os músculos. Então, nas regiões claras das radiografias (ossos) incidiu uma quantidade **menor** de raios X do que nas regiões escuras (músculos).

Observação: Os raios X possuem a propriedade de escurecer as regiões de um filme que são atingidas por eles. Assim, as regiões da chapa menos atingidas por estas radiações são exatamente aquelas correspondentes aos ossos (onde elas são mais absorvidas) que, por esse motivo, apresentam-se mais claras.

Aplicações da Física: Densitometria Óssea

1. A densitometria óssea tem a vantagem de ser um método diagnóstico não invasivo que permite identificar a redução de massa óssea, indicando a presença de osteoporose.

2. Os raios X interagem com os tecidos do nosso corpo, tanto o tecido mole quanto o osso. Quando os raios X atravessam o osso eles são atenuados. Se o resultado da atenuação dos raios X for uniforme ao longo do osso, isso significa que o osso não sofreu modificação em sua estrutura; entretanto, quando uma pessoa tem osteoporose, o tecido ósseo, ao ser atravessado pelos raios X, não terá atenuação uniforme devido à perda óssea.

24. a) De $P_1 = iV_{AB}$, vem:

$$i = \frac{P_1}{V_{AB}} = \frac{2\,400}{120} \therefore i = 20 \text{ A}$$

b) Essa potência é:

$$P_2 = ri^2 = 3{,}0 \cdot 20^2 \text{ ou } P_2 = 1\,200 \text{ W}$$

c) Como $P_2 = P_1/2$, concluímos que 50% da energia gerada é dissipada na transmissão.

d) Essa potência será:

$$P = P_1 - P_2 = 2\,400 - 1\,200 \text{ ou } P = 1\,200 \text{ W}$$

25. a) Temos, agora:

$$i = \frac{P_1}{V_{AB}} = \frac{2\,400}{600} \therefore i = 4{,}0 \text{ A}$$

b) A potência dissipada será:

$$P_2 = ri^2 = 3{,}0 \cdot 4{,}0^2 \text{ ou } P_2 = 48 \text{ W}$$

c) Podemos estabelecer a seguinte proporção:

$$2\,400 \text{ — } 48$$

$$100 \text{ — } x \therefore x = \frac{48 \cdot 100}{2400} \text{ ou } x = 2\%$$

d) A potência entregue na residência, neste caso, será:

$$P = P_1 - P_2 = 2\,400 - 48 \text{ ou } P = 2\,352 \text{ W}$$

O professor deverá destacar, para seus alunos, que o uso de tensão mais alta reduziu consideravelmente a perda por dissipação térmica na linha de transmissão. Daí decorre a vantagem do uso de altas voltagens nos fios de transmissão de energia elétrica.

26. a) Não, pois, como sabemos, os transformadores não poderiam ser usados para elevar e abaixar o valor da tensão contínua (constante).

b) O professor deverá incentivar seus alunos a realizar esta atividade. Observe que a economia de potência foi de:

$$1\,200 \text{ W} - 48 \text{ W} = 1\,152 \text{ W} = 1{,}15 \text{ kW}$$

Supondo que a usina operasse, em média, 10 horas por dia, isso significa uma economia de energia de 11,5 kWh (esse tempo de operação da usina e, portanto, a economia de energia, poderão variar muito de um caso para outro). Procurando saber, em lojas especializadas, o custo de transformadores com as características aproximadas daqueles que foram usados pelo proprietário (e outros gastos necessários, como instalação, transporte etc.), o estudante poderá calcular o tempo solicitado.

27. a) A expressão **alta-tensão** significa tensão elevada. Recorre-se ao procedimento de elevação de tensão, nas transmissões de energia elétrica, para se obter uma redução da intensidade da corrente a ser transmitida. Dessa maneira, consegue-se reduzir a dissipação de energia, por efeito Joule, durante a transmissão. Nos exercícios 24 e 25 foi apresentado um exemplo concreto que demonstra a grande economia alcançada com esse processo.

b) O uso da corrente alternada possibilita a elevação ou redução da tensão por meio dos transformadores, o que não é possível realizar com a corrente contínua. Então, em última análise, o uso da corrente alternada possibilita a transmissão com alta tensão, economizando perdas por dissipação térmica (principalmente quando as distâncias das usinas aos locais em que a energia será usada são grandes).

28. a) Observando a figura 8.55, vemos que o valor da tensão foi alterado três vezes (nas posições em que um transformador foi introduzido).

b) Um primeiro transformador, colocado na subestação da usina, eleva a tensão de 10 000 V para 300 000 V (valor com que a tensão é transmitida). O segundo transformador está colocado na subestação da cidade e abaixa a tensão para 13 800 V; e um terceiro transformador, colocado no poste próximo à residência, torna a abaixar a tensão daquele valor para 220 V ou 110 V (valor da tensão que é usada na residência).

c) No primeiro transformador há elevação de tensão e, consequentemente, redução da intensidade da corrente. No segundo e no terceiro, que são redutores de voltagem, a intensidade da corrente será aumentada.

Pratique Física
Em equipe

1. Temos:

1º) No momento em que fechamos o circuito da bobina *F*, a corrente nessa bobina estabelece um campo magnético que dará origem a um fluxo através de *G*, como mostra a figura 8.8. Então, em *G* ocorreu uma variação do fluxo magnético, pois ele era inicialmente nulo. Por esse motivo, aparecerá uma corrente induzida (de curta duração) em *G*, que será indicada pelo microamperímetro.

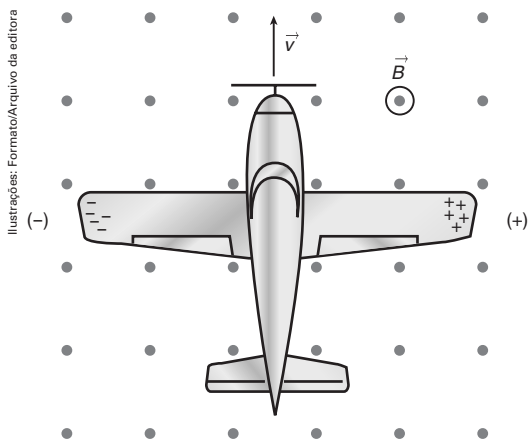
2º) Nestas condições, é evidente que exista um campo magnético criado por *F*, mas o fluxo através de *G* não sofre variação. Assim, a indicação do microamperímetro será nula.

3º) Ao desligarmos o circuito de *F*, o fluxo magnético através de *G* é reduzido bruscamente até zero. Então, essa diminuição de fluxo provoca uma corrente induzida em *G* cujo sentido é contrário àquele da 1ª parte (lei de Lenz).

2. É interessante, nesta experiência, fazer o aluno observar que o motor elétrico pode funcionar como um gerador de corrente. De fato, o motor entra em rotação quando se faz uma corrente elétrica passar através dele (energia elétrica transforma-se em energia mecânica). Por outro lado, fazendo-se a bobina do motor entrar em rotação (como nesta experiência), aparecerá uma corrente em suas espiras (indicada pelo microamperímetro), isto é, o aparelho estará funcionando como um gerador de corrente (energia mecânica transforma-se em energia elétrica).

Problemas e testes

1. a) A situação está ilustrada na figura abaixo, na qual o vetor $\vec{B}$ "saindo" da folha representa a componente **vertical** do campo magnético da Terra. Usando a "regra da mão direita" vemos que os elétrons livres do avião serão deslocados para a extremidade de sua asa esquerda, ocasionando a separação de cargas mostrada na figura a seguir. Então, o potencial mais elevado (polo +) está situado na extremidade da asa direita.

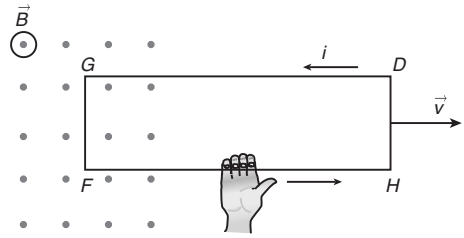


Ilustrações: Formato/Arquivo da editora

b) $\varepsilon = BLv = (6{,}0 \cdot 10^{-5}) \cdot (20) \cdot (300) \therefore \varepsilon = 0{,}36\ \text{V}$

2. a) Como a espira está abandonando o campo, então está diminuindo o número de linhas de indução que passam através dela. Logo, o fluxo magnético através da espira está **diminuindo**.

b) Como φ está diminuindo, a corrente induzida deve aparecer criando, no interior da espira, um campo de mesmo sentido que o campo magnético existente (para reforçar o fluxo). Usando a regra de Ampère, a corrente induzida deve ter o sentido *GFHD* (figura a seguir).



3. a) Temos $V_1 = 120$ V; $V_2 = 12$ V e $N_1 = 200$. Então, de $V_2/V_1 = N_2/N_1$, vem:

$$\frac{12}{120} = \frac{N_2}{200} \Rightarrow N_2 = 20 \text{ espiras}$$

b) Lembrando da relação $P = iVAB$, vemos que a potência P_2 no secundário é $P_2 = i_2V_2$. Então, vem:

$$60 = i_2 \cdot 12 \Rightarrow i_2 = 5{,}0\ \text{A}$$

c) Como estamos supondo desprezíveis as dissipações de energia no transformador, a potência fornecida ao primário é transferida integralmente ao secundário. Então, de $P_2 = P_1$, concluímos que $P_1 = 60$ W. Assim, usando a relação $P_1 = i_1V_1$, vem:

$$60 = i_1 \cdot 120 \Rightarrow i_1 = 0{,}50\ \text{A}$$

(Veja que temos $V_2 < V_1$ e, consequentemente, obtivemos $i_2 > i_1$.)

4. Deve-se observar que o enunciado deste problema procura dar ao aluno uma ideia sobre os fundamentos de um aparelho de radar, isto é, o estudante toma conhecimento de que o radar é um dispositivo que localiza um objeto por meio das **ondas eletromagnéticas** que ele próprio emite e são refletidas pelo objeto.

Para determinar o tipo de onda eletromagnética usada no radar, devemos calcular sua frequência e, em seguida, consultar a figura 8.33. De $\lambda = v/f$, vem (observando que $v = 3{,}0 \cdot 10^8$ m/s e $\lambda = 1$ cm $= 10^{-2}$ m):

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{3{,}0 \cdot 10^8}{10^{-2}} \Rightarrow f = 3 \cdot 10^{10} \text{ hertz}$$

Na figura 8.33 vemos que esta frequência identifica as ondas de radar como sendo **micro-ondas**.

5. a) As denominações mencionadas no enunciado do problema referem-se aos valores relativos do **comprimento de onda** das ondas eletromagnéticas emitidas pelas estações de rádio. Assim, uma estação de ondas longas realiza suas emissões utilizando uma onda eletromagnética de λ **maior** do que uma estação de ondas médias, e esta, por sua vez, emite ondas eletromagnéticas com λ maior do que uma estação de ondas curtas.

b) De $\lambda = v/f$, temos $f = v/\lambda$. Como o valor de v é o mesmo para todas as ondas eletromagnéticas (no ar), vemos que terá **maior** frequência a onda de **menor** λ. Logo, as emissoras de ondas curtas emitem ondas eletromagnéticas de frequências mais elevadas do que as de ondas médias e as de ondas longas.

6. Para carregar uma bateria devemos fazer passar através dela uma corrente contínua dirigida, dentro da bateria, do polo positivo para o polo negativo (sentido contrário àquele observado quando a bateria está se descarregando). Então o carregador mostrado na figura deste problema deve, inicialmente, reduzir a voltagem de 120 V para um valor igual (ou melhor, um pouco superior) à voltagem da bateria. Isso é feito usando-se um transformador, como mostra a figura do problema.

Entretanto, a tensão obtida no secundário do transformador é alternada. Por isso, é necessária a utilização do **retificador** (veja a figura) para que a corrente fornecida à bateria seja contínua. A intensidade desta corrente é ajustada para valores especificados (geralmente pelos fabricantes de baterias) por meio do reostato também mostrado na figura. Finalmente, devemos observar que a bateria está ligada adequadamente ao carregador, isto é, a corrente tem um sentido tal (indicado no retificador) que passa do polo (+) para o polo (–) dentro da bateria.

7. A intensidade da corrente será dada por $i = \varepsilon/R$, em que ε é a f.e.m. estabelecida na espira e R sua resistência. De $\varepsilon = \Delta\varphi/\Delta t$, como o plano da espira é perpendicular a $\vec{B}$, temos $\varepsilon = \pi a^2 \Delta B/\Delta t$. Por sua vez, $R = \rho L/A$, ou seja, $R = \rho 2\pi a/A$. Temos, então, após realizar as simplificações e lembrando que para a prata temos $\rho = 1{,}5 \cdot 10^{-8}\ \Omega \cdot m$:

$$i = \frac{a \cdot A \cdot (\Delta B/\Delta t)}{2\rho} = \frac{0{,}30 \cdot 2{,}0 \cdot 10^{-6} \cdot 5{,}0 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 1{,}5 \cdot 10^{-8}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow i = 1{,}0\ \text{A}$$

8. Quando o gerador é ligado a um aparelho, isto é, quando o circuito do gerador se fecha, em suas espiras é estabelecida uma corrente e, consequentemente, uma força magnética passa a atuar sobre essas espiras. A força magnética que atua na espira em movimento, parcialmente mergulhada no campo magnético, tende a contrariar o deslocamento da espira, havendo necessidade de um trabalho para mantê-la em movimento.

De maneira semelhante, o estudante que aciona a manivela, após o circuito ser fechado, deverá realizar um trabalho extra para vencer as forças mencionadas, já que elas tendem sempre a contrariar o movimento. Essa análise está de acordo com o princípio de conservação de energia: de fato, para fazer a corrente circular no aparelho (no circuito), isto é, para obter energia elétrica no aparelho, é necessário realizar um trabalho correspondente à energia obtida.

9. a) Sempre que uma carga elétrica é **acelerada**, ela emite uma onda (ou radiação) eletromagnética. Logo:

I. Qualquer corpo que executa um movimento oscilatório possui aceleração.

II. Um corpo em movimento circular possui aceleração centrípeta.

III. Um elétron dentro de um campo elétrico fica sob a ação de uma força que lhe imprime uma aceleração.

Logo, nas três situações apresentadas, o elétron possui aceleração e, consequentemente, estará emitindo uma radiação eletromagnética.

b) A energia transferida pelo campo ao elétron é medida pelo trabalho realizado sobre ele. Mas parte dessa energia é irradiada, transportada pela onda eletromagnética gerada pelo elétron. Então, a energia cinética que ele adquire é **menor** do que o trabalho realizado pela força elétrica que nele atua.

10. a) Correta, pois as duas barras estão em movimento "cortando" linhas de indução de um campo magnético.

b) Correta, pois a "regra da mão direita" mostra-nos que os elétrons livres de *GF* são deslocados para *F*.

c) Correta, pois os elétrons livres de *DH* são deslocados para *H* ("regra da mão direita").

d) Correta, pois *GF* e *DH* possuem o mesmo comprimento e se deslocam com a mesma velocidade dentro de um campo uniforme ($\varepsilon = BLv$).

e) Correta, pois a f.e.m. em *GF* tende a produzir uma corrente no sentido *GDHF*, enquanto a f.e.m. em *DH* tende a produzir uma corrente no sentido *DGFH*.

11. O valor de ε é dado pela lei de Faraday: $\varepsilon = \Delta\varphi/\Delta t$. Então, como conhecemos ε, basta calcular $\Delta\varphi$ para termos Δt. Lembrando que a área do círculo é $A = \pi R^2$, temos o seguinte valor do fluxo inicial na espira (devemos observar que a espira é perpendicular a $\vec{B}$):

$$\varphi = B \cdot A = (0{,}10) \cdot \pi \cdot (0{,}10)^2 \text{ ou } \varphi = 3{,}14 \cdot 10^{-3}\ \text{weber}$$

Como o valor final de φ é zero, o módulo da variação $\Delta\varphi$ será o próprio valor inicial de φ, isto é, $\Delta\varphi = 3{,}14 \cdot 10^{-3}$ weber. Então, de $\varepsilon = \Delta\varphi/\Delta t$, vem:

$$\Delta t = \frac{\Delta\varphi}{\varepsilon} = \frac{3{,}14 \cdot 10^{-3}}{0{,}020} \therefore \Delta t = 0{,}157\ \text{s}$$

12. a) Temos $N_1 = 2\,000$; $V_1 = 4\,400$ V e entre *A* e *C* temos $N_2 = 50$ espiras. Logo, a leitura do voltímetro ligado entre *A* e *C* será V_2, cujo valor é dado por:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1} \text{ ou } \frac{V_2}{4\,400} = \frac{50}{2\,000} \therefore V_2 = 110\ \text{V}$$

b) Entre *C* e *D*, temos também um número $N_2 = 50$ espiras. Então, é claro que a indicação do voltímetro será $V_2 = 110$ V.

c) Entre *A* e *D*, temos $N_2 = 100$ espiras. Então, de $V_2/V_1 = N_2/N_1$, vem:

$$\frac{V_2}{4\,400} = \frac{100}{2\,000} \therefore V_2 = 220\ \text{V}$$

13. a) Usando a regra de Ampère, verifica-se que o campo magnético, $\vec{B}$, criado pela corrente *i* na região onde está colocada a espira *A*, está entrando na página. Além disso, como *i* está aumentando, o módulo desse campo estará crescendo e, consequentemente, o fluxo magnético através da espira *A* estará, também, aumentando.

Uma corrente induzida será, pois, estabelecida na espira, cujo sentido deve ser tal que tenda a criar nela um

campo magnético $\vec{B}'$, de sentido contrário a $\vec{B}$ (lei de Lenz). Para que isso ocorra, a corrente em *A* deverá circular no sentido anti-horário.

b) Com raciocínio semelhante, e verificando que o campo magnético $\vec{B}$, criado por *i*, está saindo da página na região da espira *B* (e que o fluxo de $\vec{B}$ está aumentando), concluímos que a corrente induzida nessa espira circulará no sentido horário, pois, assim, criará um campo magnético que tende a se opor ao aumento de $\vec{B}$.

14. Devemos observar que as linhas do campo magnético criado pela corrente *i* são circulares, com centro no fio, penetrando na página na região onde está a espira e saindo da página no outro lado do fio. Sabemos que o fluxo magnético *f* através da espira está relacionado com o número de linhas de indução que atravessam a área limitada pela espira. Dessa maneira:

I. Neste movimento, φ não varia, pois a espira passa por posições em que o campo magnético apresenta a mesma configuração (mesmo número de linhas de indução através da área da espira). Assim, não haverá corrente induzida na espira.

II. Neste caso, a espira está se deslocando para regiões onde o campo tem menor intensidade (pois $B \propto 1/r$). Logo, φ estará variando e teremos corrente induzida.

III. Não se modifica o número de linhas que furam a área da espira. Logo, não há corrente induzida porque φ = = constante.

IV. Na posição mostrada na figura, temos um fluxo máximo através da espira e, à medida que ela gira em torno de *MN*, várias linhas de indução não mais passarão no interior da espira, isto é, o fluxo φ estará variando. Portanto, **há corrente induzida** na espira.

V. Neste movimento, a espira estará passando por posições sucessivas nas quais a configuração das linhas do campo é a mesma. Logo, φ **não varia** e não há corrente na espira.

15. À medida que o ímã oscila, estará havendo variação do fluxo magnético através do anel de cobre. Consequentemente, haverá nele uma corrente induzida, que provocará um certo aquecimento no anel, isto é, uma certa quantidade de energia térmica estará sendo gerada nesse processo. Então, a energia mecânica de oscilação do ímã deverá sofrer uma redução equivalente à energia térmica gerada no anel. Assim, apesar de as forças de atrito serem desprezíveis, a amplitude de oscilação do ímã se tornará gradualmente menor (as oscilações são amortecidas).

Observação: O amortecimento das oscilações do ímã pode ser entendido em termos da lei de Lenz: a corrente induzida no anel dá origem a um campo magnético que tende a contrariar a variação do fluxo, dando origem a forças magnéticas sobre o ímã que são sempre contrárias ao seu movimento.

APÊNDICE F

Verifique o que aprendeu

1. Temos:

$$C = \frac{Q}{V_{AB}} = \frac{1{,}5 \cdot 10^{-4}}{50} \Rightarrow C = 3{,}0 \cdot 10^{-6}\ \text{F}$$

Como 10^{-6} F = 1 μF, temos: $C = 3{,}0$ μF.

2. a) A capacitância é uma característica do capacitor. Como não houve nenhuma alteração na estrutura do aparelho, sua capacitância **não** se modificou, continuando a valer $C = 3{,}0\ \mu F = 3{,}0 \cdot 10^{-6}$ F.

b) De $C = Q/V_{AB}$ vem:

$$Q = CV_{AB} = 3{,}0 \cdot 10^{-6} \cdot 250 \Rightarrow Q = 7{,}5 \cdot 10^{-4}\ \text{C}$$

3. Como as armaduras permaneceram ligadas à bateria, a tensão entre elas **não se altera.**

4. a) Conforme vimos, a capacitância torna-se *K* vezes maior, isto é:

$$C' = KC = 5{,}0 \cdot 2{,}5 \Rightarrow C' = 12{,}5\ \mu\text{F}$$

b) A fonte que fornece carga para as duas armaduras é a bateria. Como o capacitor foi desligado da bateria, o valor da carga em suas armaduras **não se modifica**, isto é, temos $Q = 4{,}0 \cdot 10^{-4}$ C.

c) De $C' = Q/V'_{AB}$ vem:

$$V'_{AB} = \frac{Q}{C'} = \frac{4{,}0 \cdot 10^{-4}}{12{,}5 \cdot 10^{-6}} \Rightarrow V'_{AB} = 32\ \text{V}$$

Esse mesmo resultado poderia ser obtido lembrando-se que o valor da tensão entre as armaduras torna-se ***K* vezes** menor quando o dielétrico é introduzido entre elas. Então:

$$V'_{AB} = \frac{V_{AB}}{K} = \frac{160}{5{,}0} \Rightarrow V'_{AB} = 32\ \text{V}$$

d) O valor do campo também torna-se *K* vezes menor:

$$E' = \frac{E}{K} = \frac{40\,000}{5{,}0} \Rightarrow E' = 8\,000\ \text{N/C}$$

5. a) Temos:

$$E = \frac{1}{2} QV_{AB} = \frac{1}{2} \cdot (2{,}8 \cdot 10^{-3}) \cdot 500 \Rightarrow E = 0{,}70\ \text{J}$$

b) O trabalho $\mathcal{C}$ que foi realizado (pela bateria) para carregar o capacitor é igual à energia que fica nele armazenada. Logo, temos $\mathcal{C} = 0{,}70$ J.

6. a) Sim, pois, como as armaduras estão eletrizadas com cargas de sinais contrários, elas se atraem.

Assim, é necessário realizar um trabalho para aumentar a separação entre elas.

b) Como foi realizado trabalho sobre o capacitor, sua energia **aumentará.**

Problemas e testes

1. a) Temos (lembrando que o campo é uniforme):

$$V_{AB} = Ed = (2{,}0 \cdot 10^{5}) \cdot (1{,}5 \cdot 10^{-3}) \Rightarrow V_{AB} = 3{,}0 \cdot 10^{2}\ \text{V}$$

b) De $C = Q/V_{AB}$ vem:

$$Q = CV_{AB} = (4{,}0 \cdot 10^{-6}) \cdot (3{,}0 \cdot 10^{2}) \Rightarrow Q = 1{,}2 \cdot 10^{-3}\ \text{C}$$

2. c

Como os dois capacitores estão ligados em paralelo, ambos estão submetidos à mesma voltagem, isto é, $V_1 = V_2$.

De $Q = CV_{AB}$, vemos que armazena maior carga o capacitor de maior capacitância (pois V_{AB} tem o mesmo valor para ambos). Então, como $C_1 > C_2$, temos $Q_1 > Q_2$.

3. d

Estando o capacitor desligado da bateria, a carga Q em suas armaduras permanece constante. Por outro lado, sendo $C \propto (1/d)$, vemos que diminuindo do valor de C aumenta. Então, como $V_{AB} = Q/C$, concluímos que V_{AB} diminui. Além disso, a expressão $E = (1/2)QV_{AB}$ mostra-nos que a energia E diminui (pois Q é constante e V_{AB} diminui).

4. a) Correta, pois o capacitor está desligado da bateria.

b) Correta, pois a presença do dielétrico entre as armaduras torna o campo elétrico K vezes menor.

c) Correta, pois de $V_{AB} = Ed$, como d não varia e o campo E diminui, logo V_{AB} também diminui.

d) Correta, pois a presença do dielétrico torna a capacitância K vezes maior.

e) Correta, pois de Energia $= (1/2)QV_{AB}$, como Q não varia e V_{AB} diminui, então a energia diminui.

5. Podemos fazer uma análise na seguinte ordem:

1º) Como o capacitor permanece ligado à bateria, então a tensão V_{AB} entre as armaduras **não se altera** (a bateria mantém fixo o valor desta voltagem).

2º) A presença do dielétrico torna a capacitância K vezes **maior**.

3º) De $Q = CV_{AB}$, como V_{AB} não varia e C aumenta, então o valor de Q também **aumenta**.

4º) Como a intensidade do campo entre as placas é dada por $E = V_{AB}/d$ e tanto V_{AB} quanto d não variam, logo o valor de E também **não varia**.

Observação: Note que a presença do dielétrico tenderia a provocar uma diminuição no valor do campo $\vec{E}$. Entretanto, isto não ocorre porque esta tendência é anulada pelo aumento da carga nas placas, fazendo com que E permaneça constante.

5º) Como Energia $= (1/2)\,QV_{AB}$, então a energia no capacitor **aumenta** (pois Q aumenta e V_{AB} permanece constante).

Desta maneira vemos que, nestas condições, apenas a alternativa **d** está **correta.**

6. A diferença de potencial entre a nuvem e a Terra, no instante em que ocorreu o relâmpago, era:

$$V_{AB} = Ed = 3{,}0 \cdot 10^6 \cdot 200 \Rightarrow V_{AB} = 6{,}0 \cdot 10^8\ \text{V}$$

Então, a carga acumulada em uma das placas do capacitor, isto é, nas nuvens, era:

$$Q = CV_{AB} = (0{,}50 \cdot 10^{-6}) \cdot (6{,}0 \cdot 10^8) \Rightarrow Q = 300\ \text{C}$$

(deve-se observar o enorme valor desta carga acumulada nas nuvens).

7. Esta energia liberada na descarga é aquela que se encontrava armazenada no capacitor. Logo:

$$\text{Energia} = \frac{1}{2}\,QV_{AB} = \frac{1}{2} \cdot (300) \cdot (6{,}0 \cdot 10^8) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \text{Energia} = 9{,}0 \cdot 10^{10}\ \text{J (ou seja, 90 bilhões de joules)}$$

8. a) Temos:

$$E_1 = \frac{1}{2}C_1V_{AB}^2 = \frac{1}{2} \cdot (6{,}0 \cdot 10^{-6}) \cdot (200)^2 \Rightarrow E_1 = 0{,}12\ \text{J}$$

b) Nestas condições, temos os dois capacitores **ligados em paralelo**, pois suas placas positivas estão ligadas entre si, o mesmo ocorrendo com as placas negativas. Então, a capacitância da associação é:

$$C_2 = 6{,}0 + 3{,}0 \Rightarrow C_2 = 9{,}0\ \mu\text{F}$$

A carga total Q nesta associação é igual à carga que se encontrava armazenada inicialmente no capacitor de 6,0 μF. Assim:

$$Q = C_1V_{AB} = (6{,}0 \cdot 10^{-6}) \cdot 200 \Rightarrow Q = 1{,}2 \cdot 10^{-3}\text{C}$$

Portanto, podemos calcular a energia E_2 armazenada na associação:

$$E_2 = \frac{1}{2}\frac{Q^2}{C_2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{(1{,}2 \cdot 10^{-3})^2}{9{,}0 \cdot 10^{-6}} \Rightarrow E_2 = 0{,}08\ \text{J}$$

c) Como vemos, $E_2 < E_1$; isto é, há dissipação de energia quando ligamos os dois capacitores. O valor desta energia dissipada será:

$$\Delta E = E_1 - E_2 = 0{,}12 - 0{,}08 \Rightarrow \Delta E = 0{,}04\ \text{J}$$

9. c

A corrente elétrica oscilante que aparece na bobina e é transmitida ao amplificador só é produzida, por indução eletromagnética, quando há variação do fluxo magnético que atravessa a bobina. Essa variação é gerada pela oscilação das cordas de aço que por estarem magnetizadas, devido à presença do ímã permanente, geram ao seu redor um campo magnético variável. As cordas de náilon, entretanto, não são magnetizáveis e, portanto, não podem gerar um campo magnético variável na região da bobina, impedindo a criação de correntes elétricas induzidas, e fazendo com que a guitarra não transmita nenhum sinal elétrico ao amplificador.

10. b

A lâmpada incandescente emite a maior parte da radiação na região do visível e do infravermelho do espectro eletromagnético; porém, de acordo com o enunciado, a melanina é formada a partir da incidência de luz ultravioleta na nossa pele. Assim, de acordo com a figura 8.33, que mostra o espectro eletromagnético, a garota não fica bronzeada, pois a luz emitida pela lâmpada incandescente tem frequência menor que a radiação ultravioleta.

11. a) Pela lei de Faraday-Neumann, o módulo da força eletromotriz média induzida é 2 V. Como temos 50 espiras, esse valor deve ser multiplicado por 50, resultando em 100 V.

b) No intervalo de tempo mencionado, o fluxo magnético aumenta com o tempo, ou seja, cada vez mais linhas de campo atravessam as espiras da bobina. De acordo com a lei de Lenz, a corrente induzida deve ter um sentido de tal forma que origine um campo magnético, que deve ocasionar um fluxo que se oponha ao aumento de fluxo. Portanto, a corrente induzida deve ter um sentido anti-horário na bobina, do ponto de vista de quem olha o papel.

Infográfico

1. **Impactos ambientais:** mudança climática, desaparecimento de espécies de peixes, fuga de animais para refúgios secos, apodrecimento de árvores debaixo da inundação. **Impacto social:** milhares de pessoas deixam suas casas, deslocando-se para outras regiões e vilas, e pequenas cidades podem desaparecer.
2. Permitir que os peixes migradores consigam subir o rio para acasalar.
3. As comportas são abertas e fechadas pelos técnicos, dependendo do nível das chuvas. A alteração do volume de água desordena toda a vida aquática, sobretudo nas margens, que enfrentam períodos de seca e inundação.
4. Parte da fauna que ocupava a região do lago fica ilhada com a inundação. Muitos são resgatados e levados para áreas de reserva. Alguns morrerão por não se adaptar ao novo *habitat*. Muitas espécies de peixes desaparecem e outras se multiplicam.
5. Muitas espécies vegetais serão submersas, reduzindo a biodiversidade da região. Para diminuir o problema, as construtoras das hidrelétricas têm programas de reflorestamento em suas margens, replantando mudas de espécies nativas nas margens dos reservatórios.
6. O metano causa problemas como a corrosão das turbinas e impede a reprodução de alguns peixes, permitindo a proliferação de algas, causando desequilíbrio aquático. Algumas bolhas de metano chegam a ser tão grandes que podem virar um barco de alumínio pequeno.

Unidade 4 — Física contemporânea

Capítulo 9: Teoria da relatividade e Física quântica

Orientações específicas

Essa unidade trata das duas teorias que compõem a chamada Física moderna: a Teoria da relatividade e a Física quântica. Tais teorias ganharam fama desde sua concepção, um pouco em virtude da excentricidade de alguns de seus idealizadores, mas principalmente pela suposta dificuldade em entender alguns de seus fundamentos conceituais. Por isso, acreditamos que o princípio que deve nortear o trabalho do professor ao longo deste capítulo é o de desmistificar a ideia, pertencente ao senso comum, de que a compreensão dessas teorias estaria acondicionada a atributos cognitivos especiais, presentes em poucos gênios de nossa sociedade.

Sugerimos que o professor observe os seguintes pontos específicos ao ensinar o assunto deste capítulo:

- A principal preocupação do professor deve ser a de proporcionar um entendimento básico dos fundamentos, consequências e aplicações dessas teorias, além de mostrar ao aluno a evolução histórica dos conceitos a elas relacionados.
- Sendo o último assunto da coleção, o professor poderá vincular a profundidade com que irá abordá-lo com a disponibilidade de sua programação e com o nível de interesse da turma. Caso não disponha de tempo suficiente, ele deverá elaborar um plano de estudos para auxiliar os alunos que demonstrarem interesse pelo assunto. Para isso, deverá selecionar trechos do livro para leitura, sugestões de exercícios que abarquem os principais conceitos e fundamentos dessas teorias, e elencar as dúvidas que costumam aparecer durante o estudo do capítulo.
- A Física moderna é um tema que atrai o interesse das pessoas, além de ser também um assunto comum nos veículos de comunicação, que, de forma geral, não zelam pela integridade conceitual daquilo que divulgam. Sendo assim, os erros e as interpretações distorcidas dessas duas teorias podem servir de matéria-prima para o trabalho em sala de aula e ser explorados na forma de debate e confrontamento com aquilo que está apresentado nos textos do capítulo.
- Não incluímos, em nosso livro, um tratamento matemático detalhado do atraso de relógios observados em referenciais distintos. Este é um tópico difícil e anti-intuitivo, que não deve ser explorado a fundo num primeiro contato com a cinemática relativística. Pelo mesmo motivo, as deduções das expressões numéricas que fornecem o atraso dos relógios e a contração do espaço, apesar de simples, não foram apresentadas. Assim, procuramos encaminhar a análise do tema de uma maneira que fizesse sentido para o aluno, evitando termos e exemplos que pudessem confundi-los. Demos uma ênfase especial ao paradoxo dos gêmeos, por ser um exemplo relativamente conhecido e que costuma intrigar os estudantes.

Resoluções das atividades

Para iniciar a conversa

Nos computadores tradicionais o *bit* é a menor unidade em que a informação pode ser codificada, armazenada e transmitida, que pode estar em apenas um de dois valores possíveis: 0 ou 1. O *bit* quântico ou *qubit* pode ser simultaneamente os valores equivalentes a 0 e 1, devido às propriedades da Física quântica.

As teorias envolvidas em computação quântica já foram testadas em laboratório e funcionam; entretanto, todas as demonstrações foram realizadas com número reduzido de *qubits* devido à dificuldade de controlar a interação dos *qubits* com sua vizinhança.

Uma das grandes vantagens do computador quântico será resolver cálculos complexos de forma mais rápida do que com os computadores tradicionais.

Verifique o que aprendeu

1. Não. Não sentimos um movimento retilíneo uniforme.

2. A relatividade, por englobar a teoria newtoniana, vale no nosso cotidiano. Para as velocidades do nosso dia a dia não é necessária a utilização da relatividade, a menos que se queira uma grande precisão.

Aplicações da Física: GPS – Sistema de Posicionamento Global

1. Um dos maiores desafios até a invenção do GPS foi identificar, com precisão, a posição em que um veículo se encontra e em qual direção ele se movimenta. De um modo geral, todos os mecanismos utilizavam uma combinação de informações encontradas em bússolas e mapas. No caso dos navios, utilizava-se ainda a localização pelas estrelas para identificar a posição. Em viagens terrestres, o conhecimento da geografia da região era utilizado para isso. Em navios e aviões, se utilizava, e ainda se utiliza, giroscópios: aparelhos que permanecem girando em um única direção, informando o lado para o qual um veículo virou. Em viagens para fora da Terra, onde não é possível utilizar nem GPS nem bússolas, a utilização de giroscópios é essencial.

2. A preocupação com a privacidade tem aumentado bastante à medida que as informações em relação ao indivíduo que utiliza essas tecnologias se tornam mais facilmente disponíveis. Entre os pontos negativos, podemos citar que o uso do GPS facilita controlar os locais por onde as pessoas passam. Por outro lado, existe a possibilidade de se manter o GPS desligado ou mesmo não utilizá-lo. Espera-se que os estudantes opinem em torno desses argumentos, refletindo sobre o uso adequado dessas tecnologias.

3. De acordo com o primeiro postulado, as leis físicas são as mesmas para quaisquer referenciais inerciais. Assim, se existe uma lei que faz com que se observe o encurtamento do comprimento na direção do movimento, os tripulantes da nave farão o comprimento da estação espacial, na direção do seu movimento, parecer encurtado.

4. De acordo com o primeiro postulado, as leis físicas são as mesmas para quaisquer referenciais inerciais. Assim, se existe uma lei que faz com que se observe um relógio em movimento caminhar num ritmo mais lento, para o observador *B* o relógio de *A* também deve caminhar num ritmo mais lento.

5. De acordo com a mecânica newtoniana, temos:
$v = 0{,}6c + 0{,}8c = 1{,}4c$
Com a correção relativística, temos:
$v = \dfrac{(0{,}6c + 0{,}8c)}{(1 + 0{,}6 \cdot 0{,}8)} = \dfrac{1{,}40c}{1{,}48} = 0{,}95c$

6. a) $E_0 = mc^2 = 8{,}2 \cdot 10^{-14}\ \text{J}$

b) $\dfrac{1}{\gamma} = \left(1 - \dfrac{v^2}{c^2}\right)^{1/2} = \left(1 - \dfrac{0{,}995^2 \cancel{c^2}}{\cancel{c^2}}\right)^{1/2} = 0{,}1 \Rightarrow \gamma = 10$
Então:
$E = \gamma mc^2 = 10 \cdot 8{,}2 \cdot 10^{-14}\ \text{J} \Rightarrow E = 8{,}2 \cdot 10^{-13}\ \text{J}$

c) $E_c = \dfrac{1}{2} mv^2 = \dfrac{1}{2} \cdot 9{,}1 \cdot 10^{-31} \cdot (0{,}995 \cdot 3 \cdot 10^8)^2 \Rightarrow$
$\Rightarrow E_c = 4{,}1 \cdot 10^{-14}\ \text{J}$
Logo:
$K = (\gamma - 1)mc^2 = 9 \cdot 8{,}2 \cdot 10^{-14} \Rightarrow K = 7{,}4 \cdot 10^{-13}\ \text{J}$

d) $Q = mv = 9{,}1 \cdot 10^{-31} \cdot 0{,}995 \cdot 3 \cdot 10^8 \Rightarrow$
$\Rightarrow Q = 2{,}7 \cdot 10^{-22}\ \text{kg} \cdot \text{m/s}$
Então:
$q = \gamma mv = 10 \cdot 2{,}7 \cdot 10^{-22} \Rightarrow q = 2{,}7 \cdot 10^{-21}\ \text{kg} \cdot \text{m/s}$

7. a) A teoria de 1905 só vale para referenciais inerciais. Já a teoria de 1915 é geral, valendo também para referenciais acelerados.

b) O princípio da equivalência. De acordo com esse princípio, não se podem distinguir os efeitos sentidos em um referencial acelerado daqueles produzidos por um campo gravitacional.

c) A relatividade geral trabalha com o espaço-tempo curvo.

8. A teoria geral da relatividade, por englobar a física newtoniana, também vale para a gravidade de massas como a da Terra.

9. Do ponto de vista do piloto de caça, os efeitos da aceleração são equivalentes aos efeitos gravitacionais. Essa frase já contém a ideia do princípio de equivalência.

10. Um campo gravitacional influencia no ritmo de avanço do tempo de cada relógio a ele sujeito. Dois relógios idênticos, submetidos a esse campo em altitudes diferentes, andarão em ritmos diferentes. O ritmo de avanço do tempo do relógio numa maior altitude aparentará estar mais lento, se comparado com o relógio na menor altitude.

Pratique Física

Em equipe

1. O acelerômetro ilustra bem as questões discutidas a respeito dos referenciais inerciais e dos referenciais acelerados. A pessoa que estiver junto do acelerômetro toma conhecimento de acelerações, mesmo sem olhar seu movimento em relação à vizinhança.

Este dispositivo mostra também como a utilização do princípio de equivalência num referencial acelerado possibilita, em alguns casos, entender mais facilmente um problema do que a utilização de um referencial inercial.

Problemas e testes

1. a

Um material só se torna emissor de radiação quando ele é contaminado com uma substância radioativa, ou seja, quando entra em contato com a fonte de radiação e não quando é apenas irradiado. Se assim acontecesse, por exemplo, toda pessoa ao tirar uma radiografia e ser irradiada com raios X passaria a emitir essa radiação, e sabemos que isto não acontece.

2. O feixe de *laser* possui momento linear dado por E/c, em que E é a energia do feixe e c é a velocidade da luz no vácuo.

Assim, a interação entre o espelho e o feixe de luz pode ser tratada como uma colisão perfeitamente elástica.

Pela conservação da quantidade de movimento:

$$Q_{após} = Q_{antes} \Rightarrow mV + \left(-\frac{E}{c}\right) = \frac{E}{c} \Rightarrow mV = \frac{2E}{c} \Rightarrow V = \frac{2E}{mc}$$

E ainda, pela conservação da energia:

$$E_p = E_c \Rightarrow mgh = \frac{mV^2}{2} \Rightarrow h = \frac{\left(\frac{2E}{mc}\right)^2}{2g}$$

$$Ec = \frac{4E^2}{m^2c^2 2g}$$

$$h = \frac{2E^2}{m^2c^2 g}$$

3. d

Como no efeito fotoelétrico, a energia cinética dos elétrons ejetados de uma superfície é proporcional à diferença entre a energia da luz e a função de corte do material, e a energia da luz é proporcional à frequência da luz que determina sua cor.

Aplicações da Física: Amplificação da luz por emissão estimulada de radiação – *Laser*

1. a) Um feixe de raio *laser* possui muito mais energia concentrada que um feixe de luz comum, e, como a retina humana não está preparada para receber tamanha energia, pode sofrer algum dano.

b) A quantidade de energia que um feixe de *laser* carrega depende de sua frequência (E=hf). Assim, os *lasers* das cores verde e azul, por possuírem uma frequência maior, irão carregar mais energia também.

2. A diferença entre as tecnologias está no comprimento de onda do *laser* que cada uma utiliza.

Integrando... o fazer ciência ao mundo moderno

1. Os princípios de funcionamento da pilha elétrica surgiram com as pesquisas lideradas pelo médico italiano Luigi Galvani. Galvani percebeu que a perna de uma rã morta se contraía quando era tocada por duas lâminas de metais diferentes. Esse trabalho entusiasmou cientistas da época, em especial, Alessandro Volta e sua equipe, que repetiram os experimentos de Galvani e reformularam as explicações teóricas para os efeitos observados na rã. A partir dessas novas explicações e influenciados pelos resultados de outro experimento realizado pelo químico Giovanni Valentino, Alessandro Volta e sua equipe, construiu, no ano de 1800, a primeira pilha elétrica.

2. Os cientistas não concebem explicações científicas para fenômenos naturais a partir do "zero" e individualmente. Suas ideias surgem a partir do estudo de teorias e pesquisas anteriores, bem como da troca com colegas de profissão. A frase de Newton expressa, pelo menos em parte, essa forma de entender a construção da Ciência. Ele estava ciente que suas explicações e modelos, por mais sofisticados que fossem, estavam embasados nas pesquisas de grandes nomes da História da Ciência, como Galileu, Copérnico, Ptolomeu, Kepler e muitos outros.

Infográfico

1. Os rejeitos radioativos são classificados segundo o estado físico (líquido, sólido e gasoso), natureza da radiação (emissores de partículas alfa, beta ou radiação gama) e níveis de radioatividade (alta, média e baixa).

2. Rejeitos radioativos, desde que não sejam quimicamente tóxicos, podem ser reciclados quando o nível de radiação presente for igual ao do meio ambiente. Partes de equipamentos e luvas utilizadas no setor de Medicina Nuclear, por exemplo, quando são contaminados com material radioativo de baixa atividade, são guardados no próprio local de trabalho em embalagens especiais até sua atividade baixar a níveis adequados, daí são encaminhados para o descarte comum. Os elementos combustíveis queimados, ou seja, que foram utilizados nos reatores nucleares, ainda possuem cerca de 96% do urânio original, 3% de produtos residuais e 1% de plutônio, podendo então ser reciclados em um procedimento conhecido como reprocessamento, que permitirá ao urânio, por exemplo, ser novamente empregado como combustível. Entretanto, os rejeitos radioativos com alta atividade e meia vida longa não podem ser reciclados e devem ser guardados em depósitos de contenção especialmente projetados para isso.

3. A piscina é o local de armazenamento e de resfriamento do rejeito radioativo que é produzido nos reatores nucleares decorrente do processo de geração de energia elétrica.

4. Os rejeitos radioativos de média atividade (RMA) usualmente são armazenados em depósitos temporários na própria usina nuclear.

5. A técnica, conhecida como reprocessamento, permite separar quimicamente o urânio e o plutônio, além dos actinídeos, que podem ser reaproveitados para serem utilizados novamente como combustível nuclear.

6. MOX (Mixed Oxide) é um combustível misto (urânio e plutônio) que pode ser obtido no reprocessamento do combustível nuclear. O MOX pode ser usado como combustível novamente em reatores do tipo rápido.

7. São transportados em navios quando possível. Mas para ir do porto à usina, são transportados em caminhões ou trens especialmente adaptados.

ISBN 978-85262992-4-5