

KAZUHITO & FUKE

# FÍSICA

PARA O ENSINO MÉDIO

3

ELETRICIDADE  
FÍSICA MODERNA

MANUAL DO PROFESSOR

COMPONENTE  
CURRICULAR  
**FÍSICA**

3º ANO  
ENSINO MÉDIO

 Editora  
**Saraiva**



## **Kazuhito Yamamoto**

Licenciado em Física pela Universidade de São Paulo  
Professor de Física na rede particular de ensino

## **Luiz Felipe Fuke**

Licenciado em Física pela Universidade de São Paulo  
Professor de Física na rede particular de ensino



COMPONENTE  
CURRICULAR  
**FÍSICA**  
3º ANO  
ENSINO MÉDIO

4ª edição – 2016  
São Paulo

Física para o Ensino Médio 3  
© Luiz Felipe Fuke, Kazuhito Yamamoto, 2016

Direitos desta edição:  
Saraiva Educação Ltda., São Paulo, 2016  
**Todos os direitos reservados**

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

Yamamoto, Kazuhito  
Física para o ensino médio, vol. 3 : eletricidade,  
física moderna / Kazuhito Yamamoto, Luiz Felipe  
Fuke. -- 4. ed. -- São Paulo : Saraiva, 2016.

Suplementado pelo manual do professor.  
Bibliografia.  
ISBN 978-85-472-0577-5 (aluno)  
ISBN 978-85-472-0578-2 (professor)

I. Física (Ensino médio) I. Fuke, Luiz Felipe.  
II. Título.

16-02600

CDD-530.07

**Índices para catálogo sistemático:**

1. Física : Ensino médio 530.07

### Física para o Ensino Médio

#### Volume 3



Pesquisadores investigando a fusão de núcleos de hidrogênio em uma câmara que focaliza os feixes de 192 lasers sobre um alvo no vácuo.

<b>Diretora editorial</b>	Lidiane Vivaldini Olo
<b>Gerente editorial</b>	Luiz Tonolli
<b>Editor responsável</b>	Viviane Carpegiani
<b>Editor</b>	Marcela Maris
<b>Consultor para o Manual do Professor</b>	Bruna Graziela Garcia Potenza
<b>Gerente de produção editorial</b>	Ricardo de Gan Braga
<b>Gerente de revisão</b>	Hélia de Jesus Gonsaga
<b>Coordenador de revisão</b>	Camila Christi Gazzani
<b>Revisores</b>	Carlos Eduardo Sigrist, Lilian Miyoko Kumai, Maura Loria, Raquel Alves Taveira
<b>Produtor editorial</b>	Roseli Said
<b>Supervisor de iconografia</b>	Sílvio Kligin
<b>Coordenador de iconografia</b>	Cristina Akisino
<b>Pesquisa iconográfica</b>	Fernando Cambetas
<b>Coordenador de artes</b>	José Maria de Oliveira
<b>Design e capa</b>	Alexandre Romão com imagens de Eduardo Zappia/Pulsar Imagens
<b>Diagramação</b>	Francisco A. da Costa Filho
<b>Assistente</b>	Bárbara de Souza
<b>Ilustrações</b>	Alberto De Stefano, Alex Argozino, Luis Moura, Luiz Fernando Rubio, Hélio Senatore, Marcos Aurélio Neves Gomes, Paulo César Pereira, Rafael Herrera
<b>Tratamento de imagens</b>	Emerson de Lima
<b>Protótipos</b>	Magali Prado
077.924.004.001	<b>Impressão e acabamento</b>

O material de publicidade e propaganda reproduzido nesta obra está sendo utilizado apenas para fins didáticos, não representando qualquer tipo de recomendação de produtos ou empresas por parte do(s) autor(es) e da editora.

Nos livros desta coleção são sugeridos vários experimentos. Foram selecionados experimentos seguros, que não oferecem riscos ao estudante. Ainda assim, recomendamos que professores, pais ou responsáveis acompanhem sua realização atentamente.



**Editora**  
**Saraiva**

**SAC**

0800-0117875

De 2ª a 6ª, das 8h às 18h  
[www.editorasaraiva.com.br/contato](http://www.editorasaraiva.com.br/contato)

Avenida das Nações Unidas, 7221 – 1º andar – Setor C – Pinheiros – CEP 05425-902

# Apresentação

A Física é uma ciência que trata da interação entre matéria e energia. É um constructo humano cujo objetivo é levar à compreensão do mundo. Como outras ciências ditas “exatas”, a Física contribui para o avanço de tecnologias e se desenvolve seguindo as premissas do método científico. Física é ciência experimental, pois envolve observação, organização de dados, pesquisa, capacidade de abstração e formulação de hipóteses e trabalho colaborativo.

As ciências estão em constante desenvolvimento: não existem teorias ou modelos definitivos. Por esse motivo, em alguns momentos, você pode ter a impressão de que a Física está “pronta”, como um conjunto completo e linear de fatos conhecidos, mas isso não é verdade. Em muitos pontos desta obra, você terá oportunidade de perceber que a Ciência é um processo cumulativo de saberes nem sempre concordantes, e que avança à custa de construção e desconstrução de consensos e pressupostos metodológicos. Os conceitos que você deve assimilar estão apresentados segundo essas premissas e articulados em estratégias de trabalho centradas na solução de problemas para aproximá-lo do trabalho de investigação científica e da rotina dos processos produtivos.

A Física tem uma linguagem própria, auxiliada pela Matemática, que é o instrumento formal de expressão e comunicação para diversas ciências. Assim, você deve encarar as situações em que vai usar fórmulas, equações e gráficos como momentos privilegiados em que é possível “ver” os fenômenos físicos se manifestando por intermédio da linguagem matemática.

O estudo das ciências no Ensino Médio também tem como objetivo prepará-lo para o mundo do trabalho e o exercício da cidadania, da ética, da prática da autonomia intelectual e do pensamento crítico; isso quer dizer que esta fase de escolaridade tem a função, entre outras, de torná-lo apto a planejar, executar e avaliar ações de intervenção em sua realidade, que é a escola, o trabalho ou outras circunstâncias relevantes de sua vida.

A tecnologia e as Ciências Naturais realimentam-se mutuamente. Tanto o avanço das ciências tem reflexos no desenvolvimento tecnológico como o inverso também acontece, e você terá oportunidade de constatar isso na vida pessoal, nos processos de produção, na evolução do conhecimento e na vida social. Afinal, não é estimulante saber que na produção de um simples computador doméstico há mais tecnologia reunida do que toda a tecnologia necessária para colocar o ser humano pela primeira vez na Lua?

Bem-vindo a esta importante etapa da jornada. Esperamos que ela lhe seja prazerosa e proveitosa.

Os Autores

# Conheça este livro

Entre os instrumentos de que você pode dispor para seu aprendizado, o livro didático é um dos que lhe dará maior oportunidade de autonomia. Conheça este aliado, suas seções e as possibilidades de trabalho para aproveitá-lo da melhor maneira.

As **aberturas de unidade** mostram a essência do tema e sua importância, sua gênese, aplicações e relações com outras áreas do conhecimento, das Ciências Exatas às artes e ao mundo do trabalho.

## UNIDADE 3 Eletromagnetismo

Apesar dos esforços de William Gilbert para encontrar ligações entre o Magnetismo e a Eletricidade no século XVII, essas duas ciências permaneceram isoladas por mais dois séculos, até que Christed descobriu que a corrente que flui em um condutor pode definir a direção de uma bússola, revelando a existência de uma relação entre fenômenos elétricos e magnéticos. O “câmbio magnético” em que o Eletromagnetismo se desenvolveu ocorre entre 1820 e 1831, quando se descobriam os fenômenos básicos — as propriedades magnéticas em torno do fio em que passa a corrente, a força em condutores percorridos por corrente elétrica quando estão imersos em campos magnéticos e, finalmente, o aparecimento de corrente em condutores enrolados por campos magnéticos variáveis — e foram formuladas as leis que regem o comportamento de condutores em campos magnéticos.

A Física e a Matemática que se produziram a partir daí influenciarão profundamente a história da humanidade: basta verificar a quantidade de aparelhos e instrumentos cujo funcionamento se baseia nesses fenômenos. Os contatos da época descobriam, trabalhando cada um independentemente, muitas aplicações da notável descoberta de Hans Christian Christed, descobrindo a interação entre corrente e campo e, logo depois, a indução eletromagnética. Graças a seu trabalho, construíam os geradores eletromagnéticos, que elevavam tenções e corrente muito maiores que as que já tinham conseguido, se quiséssemos analisar a importância da Eletromagnetismo com apenas essa inovação, já estaríamos convencidos de que se tratava de um avanço formidável no cenário produtivo.

No entanto, o Eletromagnetismo ainda procurava outra revolução: a da radioatividade.

Nessa Unidade você vai conhecer o campo magnético, como se estabelecem a força magnética e a corrente elétrica, e o funcionamento de geradores, motores e transformadores.

### CAPÍTULO 13

#### Campo magnético

### CAPÍTULO 14

#### Força magnética

### CAPÍTULO 15

#### Indução eletromagnética

### CAPÍTULO 16

#### Corrente alternada



Um relógio de pêndulo com um ímã permanente e um fio enrolado em espiral. O ímã tem a capacidade de reter uma magnetização, atuando nos fenômenos elétricos, sendo capaz de produzir uma corrente elétrica.

Fenômenos eletromagnéticos e eletrodinâmica, tais como as forças magnéticas, a força eletromotriz, a corrente elétrica, a indução eletromagnética, a força de Lorentz, o campo magnético, a força de Ampère, a força de interação entre correntes elétricas, o movimento de cargas em um campo magnético, são tratados nesse capítulo.



Relógio de pêndulo com um ímã permanente e um fio enrolado em espiral. O ímã tem a capacidade de reter uma magnetização, atuando nos fenômenos elétricos, sendo capaz de produzir uma corrente elétrica.

## CAPÍTULO 14 Força magnética



O que há em comum no funcionamento de um liquidificador e um ventilador? Embora esses aparelhos tenham sido criados para executar funções bem distintas, é o que os coloca em funcionamento a atuação do ímã, um eixo com pólo (ventilador) ou bobinas (liquidificador) acopladas a uma de suas extremidades, e já sabemos que a alteração do estado de movimento de ocorre se estiverem sujeitos a forças.

No capítulo anterior, vimos que uma partícula eletricamente carregada em movimento, gera um campo magnético em sua volta — e o caso de partículas isoladas ou de fios percorridos por corrente elétrica. Esse campo magnético, por sua vez, pode influenciar outras correntes ou o movimento de outras cargas isoladas, e nessa interação aparecem forças, de natureza natural que movem os rotões dos eletrodomésticos, os fios de elétrons dentro dos tubos de imagens em monitores de vídeo ou as partículas subatômicas nos grandes aceleradores de partículas. Como essas forças são, essencialmente, o resultado da interação de cargas em movimento com campos magnéticos, vamos chamá-las de forças magnéticas. Essa interação ocorre independentemente de o movimento das cargas dar em um único sentido ou não.

A força magnética não atua no mesmo plano formado pelas direções do movimento da carga e do campo magnético que permeia o espaço onde essa carga se move. Surge aqui o seu aspecto tridimensional.

Neste capítulo serão discutidas a intensidade da força e o sentido e a intensidade da força magnética, veremos os casos em que se fazem úteis a alguns fenômenos e a ela relacionado.

### Atuação da força magnética sobre um móvel eletrizado

O que aconteceria se aproximássemos um ímã de um monitor de TV ou de um computador comum? A imagem ficaria distorcida, uma vez que há a criação a partir do bombardeio de elétrons sobre o anodo da tela, nos pontos eletromagnéticos formados de imagem, lançados por um filamento aquecido.

A presença da ímã afeta o movimento dos elétrons, pois seu campo magnético causa o surgimento de uma força magnética que passa a atuar sobre eles, desviando os deslocamentos.

Para caracterizar essa força magnética, vamos considerar uma partícula eletrizada — móvel ou carga elétrica pontiforme — com massa  $m$  e a quantidade de carga  $q$  que se move no interior de um campo magnético.

CAPÍTULO 14 • FORÇA MAGNÉTICA **195**

Dentro das unidades, cada **capítulo** detalha um aspecto do tema, em uma sequência que permite vislumbrar sua evolução histórica, retomando assuntos já tratados, permitindo assim tanto revê-los como ampliá-los, além de reconhecê-los em outros contextos.

## Outras palavras

### OUTRAS PALAVRAS

#### É possível estudar o impossível?

Leia um trecho do livro escrito por Michio Kaku, físico e professor de Física Teórica na City University of New York, e o organizador de séries e documentários científicos para a PBS, a série History Channel. Ele nos diz que o estudo do que parece ser impossível pode desenvolver a nossa capacidade de resolver o que é impossível e nos levar a grandes descobertas em Física e nos campos científicos adjacentes.

**Estudando o impossível**

Conhecemos o estudo do impossível e o conhecemos desde criança. Por exemplo, durante a infância, quando nos deparamos com uma “bateria de nove células”, levamos a conclusão de que tal quantidade de energia não é possível. Entretanto, a bateria contém uma carga elétrica que pode ser utilizada para acionar um pequeno aparelho eletrônico. Assim, a bateria em si não contém a energia de movimento necessária para gerar o campo magnético necessário para mover a carga elétrica. No entanto, a bateria contém uma carga elétrica que pode ser utilizada para acionar um pequeno aparelho eletrônico.

No final do século XIX, os cientistas concluíram que “impossível” não é uma palavra útil em física. Isso porque, embora pareça impossível, a natureza sempre encontra maneiras de fazer o que parece impossível. Isso aconteceu com o desenvolvimento da relatividade e da mecânica quântica, que nos mostram que o impossível não é tão impossível quanto parece.

Não devemos o impossível por nunca existir e não nos deixar de 1913 por Robert Goddard. Inventor da propulsão a jato, ele foi o primeiro a perceber que a propulsão a jato poderia ser usada para propulsão espacial. Ele não conseguiu desenvolver um foguete, mas sua visão inspirou outros. Em 1927, o colômbio de New York foi criado com o nome de “Goddard”. O professor Goddard não conseguiu criar um foguete, mas sua visão inspirou outros a fazer um foguete que usasse como combustível a energia nuclear. Hoje em dia, a propulsão nuclear é uma realidade.

**Organizando as ideias do texto**

- De que modo algo “impossível” pode se tornar possível?
- Faça uma pesquisa de algo que hoje em dia é considerado impossível. Em sua opinião, isso fato é realmente impossível? Ou apenas uma pesquisa feita de quem é “impossível” pode se tornar “possível”? Leia e explique e cite fontes confiáveis.

CAPÍTULO 16 • FORÇA MAGNÉTICA **279**

### ATIVIDADE PRÁTICA

#### Construindo um espectroscópio

**Análise de espectros de absorção e emissão com o modelo atômico**

Como é possível explicar a análise de espectros de absorção e emissão com o modelo atômico?

O modelo atômico de Bohr permite resolver problemas como esse? O que acontece com o modelo atômico de Bohr quando se analisa um espectro de absorção e emissão?

Como é possível explicar a análise de espectros de absorção e emissão com o modelo atômico?

Como é possível explicar a análise de espectros de absorção e emissão com o modelo atômico?

**Material**

- Um CD descartável
- Uma lâmpada de neônio
- Fita adesiva transparente
- Cartão de papelão
- Alfileres
- Esponja lupul de cortar (o CDI)

**Procedimento**

- Cortar a superfície de um CD descartável (o lado onde está impressa a música) e colar em uma folha de papelão.
- Colar uma fita adesiva transparente na superfície do lado oposto do CD.
- Cortar uma fita adesiva transparente e colá-la sobre o lado oposto do CD.
- Cortar um pedaço de fita adesiva transparente e colá-la sobre o lado oposto do CD.

**Discussão**

- Agende para a próxima aula o grupo de trabalho para discutir o trabalho realizado.
- Por que a análise de espectros de absorção e emissão é importante?
- Como é possível explicar a análise de espectros de absorção e emissão com o modelo atômico?
- Como é possível explicar a análise de espectros de absorção e emissão com o modelo atômico?

CAPÍTULO 16 • FORÇA MAGNÉTICA **251**

# A Física no cotidiano

**A FÍSICA NO COTIDIANO**

**Outros tipos de condutores de eletricidade**

Alterando as condições físicas sob as quais são manipulados certos materiais, pode-se conseguir que as cargas elétricas fluam com muita facilidade. Uma vez estabelecidas tais condições, esses materiais têm uma enorme gama de aplicações na indústria.

**Semicondutores**

Existem materiais que se comportam tanto como condutores quanto como isolantes, dependendo da temperatura e de que estão submetidos, ao tipo de elemento que os compõem ou a tensão submetida. Esses materiais são chamados de semicondutores.

O silício e o germânio — átomos com quatro elétrons na camada de valência — são semicondutores utilizados na fabricação de transistores e de circuitos integrados, fundamentais para a montagem de aparelhos eletrônicos e de computadores.

Com o aumento da temperatura, esses materiais liberam os elétrons para movimentarem-se, comportando-se como condutores, e, em temperaturas baixas, tornam-se isolantes elétricos.

Também é possível "dopar" um semicondutor para transformá-lo em um bom condutor. Isso pode ser feito com átomos contendo cinco elétrons na camada de valência, tornando-o condutor do tipo IV ou "n-type", dopando-se com átomos de cargas negativas, ou com átomos de três elétrons na camada de valência, convertendo-o em um condutor do tipo III ou "p-type", eliminando a carga de cargas positivas.

**Supercondutores**

Um bom condutor sempre ofereceu alguma oposição ao fluxo de cargas elétricas, mesmo que pequena. Mas, em 1911, o físico holandês Heike Kamerlingh Onnes (1853-1926) observou que, no caso do mercúrio, essa oposição ficou bastante reduzida e eventualmente desapareceu quando ele foi resfriado a  $4 \text{ K}$  ( $-269 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Com isso, foi feita a primeira tentativa de materiais que, quando resfriados a certa temperatura, apresentam resistência zero, permitindo o fluxo instantâneo de cargas elétricas.

Essas pesquisas são chamadas de supercondutores. Como essa característica só é observada a temperaturas próximas ao zero absoluto ( $0 \text{ K}$  ou  $-273 \text{ }^\circ\text{C}$ ), os casos de pesquisa atualmente estão orientados para a busca de materiais supercondutores que possam operar em temperaturas próximas ao zero absoluto, permitindo o fluxo instantâneo de cargas elétricas.

Há um grande potencial de aplicação dos materiais supercondutores em transmissão de energia e grandes reatâncias e ácidos.

Há um grande potencial de aplicação dos materiais supercondutores em transmissão de energia e grandes reatâncias e ácidos.

**Tipos de eletrização**

A eletrização dos corpos ocorre quando um corpo ganha ou perde elétrons. Vimos que os elétrons em movimento num dia são os responsáveis eletricamente devido ao atrito causado entre eles e a eletrização por contato. Quando encostamos na chama e tocamos um choque, como eletrização por contato.

Há também uma terceira forma de eletrização, que acontece quando dois corpos são colocados próximos, sem que haja contato e eletrização por indução. Vamos então detalhar cada uma dessas três maneiras de eletrizar os corpos.

18 UNIDADE 1 • ELETRICIDADE

Muitas decisões que tomamos em situações corriqueiras são justificadas pelos mesmos conceitos que regem os movimentos dos planetas e o comportamento dos átomos e das ondas eletromagnéticas. Na seção **A Física no cotidiano** você perceberá que a Física está em todo lugar!

# Para saber mais

**PARA SABER MAIS**

**Sites**

**Feira de Ciências — um parque de experiências**

Disponível em: [www.feiradeciencias.com.br/atividade/magnetois049616](http://www.feiradeciencias.com.br/atividade/magnetois049616). Acesso em: 1 fev. 2014.

Acesso ao site acima, você encontrará uma série de experimentos de verificação das leis de Ampère e de Biot-Savart, sugeridos e conduzidos pelo Professor Luiz Ferraz Netto.

**Magnetismo**

Disponível em: [www.feiradeciencias.com.br/atividade/magnetois1781.asp](http://www.feiradeciencias.com.br/atividade/magnetois1781.asp). Acesso em: 9 fev. 2014.

Nesse link há um ótimo texto sobre magnetismo. Além disso, há links para outras aulas de assuntos relacionados ao magnetismo.

**Exercícios resolvidos**

**EX1.** Um fio vertical longo e em posição vertical e percorrido por uma corrente elétrica de intensidade igual a  $3 \text{ A}$  a serido convencional ascendente. Determine:

- a direção e o sentido do vetor indução magnética num ponto localizado a  $5 \text{ cm}$  do fio;
- a intensidade do campo magnético num ponto que se situa a  $50 \text{ cm}$  do fio, dado  $k = 4 \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$ .

**EX2.** Dois fios retificados, longo e paralelo, são atravessados por uma corrente elétrica de intensidade igual, respectivamente, a  $3 \text{ A}$  e  $2 \text{ A}$ . Os sentidos de todos os correntes são opostos e o fio mais afastado dista  $2 \text{ m}$ .

Determine a intensidade do vetor campo magnético resultante num ponto equidistante dos fios, no plano formado por eles.

Dado:  $k = 4 \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$

**Resolução:**

Seja  $d = 1 \text{ m}$ ,  $d = 50 \text{ cm} = 0,5 \text{ m}$

- Naum ponto distante  $d$  de ambos os fios, o vetor indução magnética na direção horizontal, pois ele tangencia uma linha de força horizontal e horizontal, estando no papel.
- A intensidade do campo  $\vec{B}$  em  $0,5 \text{ m}$  de distância do fio  $3 \text{ A}$  é  $B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi d} = \frac{4 \cdot 10^{-7} \cdot 3}{2\pi \cdot 0,5} = 1,2 \cdot 10^{-7} \text{ T}$
- A intensidade do campo  $\vec{B}$  em  $1 \text{ m}$  de distância do fio  $2 \text{ A}$  é  $B_2 = \frac{\mu_0 I_2}{2\pi d} = \frac{4 \cdot 10^{-7} \cdot 2}{2\pi \cdot 1} = 4 \cdot 10^{-8} \text{ T}$

184 UNIDADE 1 • ELETRICIDADE

# A Física na História

**A FÍSICA NA HISTÓRIA**

**Tesla - Edison: a Guerra das Correntes**

Nikola Tesla foi o grande inovador da corrente alternada. Nasceu na Croácia, estudou Matemática e Física na Escola Politécnica de Graz, na Áustria, e Física na Universidade de Praga, na República Tcheca. Trabalhou como engenheiro elétrico na Bélgica, França e Alemanha. Por seus experimentos com motores de indução com corrente alternada, Tesla tornou possível a transmissão e a distribuição a longas distâncias.

Quando se mudou para os Estados Unidos em 1884, ele trabalhou para o famoso inventor e homem de negócios Thomas Edison (o inventor da lâmpada incandescente), que já havia patentado a linha baseada a corrente contínua como padrão nos Estados Unidos. Logo, logo dois se tornaram grandes rivais: Tesla, então, foi uma parceria com George Westinghouse (o mesmo Westinghouse dos equipamentos elétricos) e o mesmo Westinghouse fez o mesmo sistema de corrente contínua que Edison usava em sua fábrica de corrente contínua.

Edison utilizava esse tipo de corrente, usando a distribuição de corrente contínua por instalação nos Estados Unidos, todo o sistema operava sob tensão de  $100 \text{ V}$ . Esse nível de tensão foi escolhido devido à facilidade de fabricar lâmpadas que forneciam iluminação e também um desenvolvimento econômico: a iluminação a gás, que na época estava sendo substituída. Além disso, sabia-se que  $100 \text{ V}$  não constituía um risco grave de eletrocussão. Entretanto, a queda de tensão desde a residência dos condutores de energia era um fato comum e, por isso, se sabia que as linhas deveriam ser instaladas por entre  $2 \text{ km}$  dos centros de consumo, o que era um grande inconveniente. Sabia-se que, de modo geral, para uma determinada quantidade de energia conduzida, era necessário usar a tensão na rede. Naquela época, não havia tecnologia de base custo para fazer essa conversão de corrente contínua, mas em um sistema de corrente alternada, o uso de transformadores de tensão era técnico e economicamente viável. Assim, os transformadores permitiam que a energia fosse transmitida sem grandes custos adicionais. Como o comprimento máximo de uma linha de transmissão, dada o diâmetro do fio e a queda de tensão adicional, aumenta aproximadamente com o quadrado da tensão de distribuição, os custos poderiam variar uma área de consumo muito maior. E, assim, Nikola Tesla venceu a guerra das correntes.

Essa rivalidade, no início, talvez tenha sido alimentada pelo fato de que, para transmitir o máximo de energia possível, a tensão deveria ser elevada. Mas o fato é que, para transmitir o máximo de energia possível, a tensão deveria ser elevada. Mas o fato é que, para transmitir o máximo de energia possível, a tensão deveria ser elevada.

Entre outras descobertas, Tesla colaborou para o desenvolvimento do rádio. Também criou uma área de consumo muito maior. E, assim, Nikola Tesla venceu a guerra das correntes.

Edison lançou uma grande campanha publicitária para a utilização da corrente contínua para distribuição de eletricidade.

226 UNIDADE 1 • ELETRICIDADE

Muitas vezes optamos por apresentar assuntos segundo uma sequência diferente dos fatos históricos. Na seção **A Física na História**, vamos contar as circunstâncias que cercaram algumas descobertas, os cientistas envolvidos, as teorias paralelas, as controvérsias, a evolução de modelos e o contexto político na época.

# Exercícios propostos

**Exercícios Propostos**

**EX1.** No trecho do circuito elétrico seguinte, a intensidade da corrente é  $3 \text{ A}$ .

Determine a ddp:

- entre os pontos A e B;
- entre os pontos A e C;
- entre os pontos B e C.

**EX2.** Na carga elétrica representada na figura e constituída por uma pilha (potência), um motor (potência) e um resistor (potência).

Se a potência elétrica de ponto A é igual a  $20 \text{ W}$ , calcule o valor da potência elétrica de ponto B.

**EX3.** O circuito elétrico representado na figura é constituído por uma pilha (potência), um motor (potência) e um resistor (potência).

Considerando os dados anteriores, determine:

- a intensidade da corrente elétrica que transcorre o fio AB em termos da ddp  $U_{AB}$ ;
- a ddp nos terminais da pilha;
- a ddp nos terminais do motor;
- a ddp nos terminais do resistor.

**EX4.** No circuito elétrico da figura, a intensidade da corrente que percorre o resistor R vale  $1,5 \text{ A}$ .

Determine:

- o valor de  $E$ ;
- a ddp entre os pontos A e B;
- a ddp entre os pontos A e C;
- a ddp entre os pontos B e C;
- a carga dos capacitores.

**EX5.** O circuito elétrico representado na figura contém uma pilha de  $1,5 \text{ V}$  e dois resistores.

As correntes  $I_1$  e  $I_2$  são, respectivamente:

- $0,75 \text{ A}$  e  $1,5 \text{ A}$
- $1,5 \text{ A}$  e  $3,0 \text{ A}$
- $3,0 \text{ A}$  e  $1,5 \text{ A}$
- $6,0 \text{ A}$  e  $3,0 \text{ A}$

172 UNIDADE 1 • ELETRICIDADE

# Exercícios resolvidos

**Exercícios resolvidos**

**EX1.** Queremos transformar um galvânmetro de resistência interna  $75 \Omega$  e corrente de fundo de escala  $100 \text{ }\mu\text{A}$  num amperímetro que possa obter correntes de até  $10 \text{ A}$  de precisão. Determine:

- Qual o valor da resistência a ser adicionada para obter o que queremos?
- Qual é o fator de multiplicação da corrente máxima que o instrumento é capaz de medir e a nova corrente de fundo de escala?

**Resolução:**

Temos  $R_g = 75 \Omega$ ,  $i_g = 100 \mu\text{A} = 0,1 \text{ mA}$ .

a) A resistência de corrente que se quer montar é  $10 \text{ A}$ . Como o galvânmetro aponta no máximo  $0,1 \text{ mA}$ , ele não pode ser ligado no circuito sem que o galvânmetro seja destruído. Assim, como procedimento, o resistor a ser adicionado deve ser escolhido para fazer com que, quando o galvânmetro for usado para medir correntes de até  $10 \text{ A}$ , ele não seja destruído. Assim, vamos fazer com que a corrente máxima que o galvânmetro pode medir seja  $0,1 \text{ mA}$ .

Desse forma, o galvânmetro é conectado para medir a corrente  $I$  que queremos medir a figura.

**Resolução e montagem do circuito:**

Para calcular a resistência R, do shunt, vamos a expressão  $I = i_g \left( 1 + \frac{R_g}{R} \right)$ .

Substituindo nela os respectivos valores, temos:

$$10 = 0,1 \left( 1 + \frac{75}{R} \right) \Rightarrow 100 = 1 + \frac{75}{R} \Rightarrow 99 = \frac{75}{R} \Rightarrow R = \frac{75}{99} \approx 0,76 \text{ }\Omega$$

A resistência do shunt é baixa, pois ela deve ser escolhida para uma corrente alta. Não aproveitamos muito dessa resistência é alta.

b) A corrente de fundo de escala do aparelho passa a ser  $0,1 \text{ mA}$ .

O fator de multiplicação do shunt, representado pela letra m, é:

$$m = \frac{I}{i_g} = \frac{10}{0,1} = 100$$

134 UNIDADE 1 • ELETRICIDADE

Indica que a atividade pode ser realizada em dupla ou grupo.

Você leu os textos, as seções e verificou seu conhecimento. Se você deseja saber mais, aproveite as sugestões para conhecer outros livros, revistas, mostras, museus, filmes, aplicativos e sites da internet.

Seleção de **exercícios** escolhidos cuidadosamente para verificar que a Física funciona, para ampliar seus conhecimentos e relacioná-los com os assuntos mais atuais.

# Sumário

## UNIDADE 1

### ELETROSTÁTICA

8

#### CAPÍTULO 1 – Eletrização

10

##### Carga elétrica

12

A Física na História – A evolução dos modelos atômicos

12

##### Princípios da Eletrostática

15

A Física no cotidiano – Outros tipos de condutores de eletricidade

18

##### Tipos de eletrização

18

##### Eletroscópios

23

Outras palavras – O *versorium* de Gilbert

24

Atividade prática – Construindo um eletróforo

26

#### CAPÍTULO 2 – Força elétrica

30

##### Carga elétrica puntiforme

31

##### Força elétrica – Lei de Coulomb

32

Atividade prática – Estimando a carga eletrizada pela força elétrica

34

Outras palavras – Lei de Coulomb e Lei da Gravitação Universal

37

A Física no cotidiano – Precipitador eletrostático

38

#### CAPÍTULO 3 – Campo elétrico

40

##### Ideia de campo elétrico

40

##### Vetor campo elétrico

41

A Física na História – Fogo de santelmo

42

##### Campo elétrico devido a uma carga puntiforme

43

##### Campo elétrico devido a várias cargas puntiformes

43

##### Linhas de força

45

##### Campo elétrico uniforme

46

Atividade prática – Mapeando o campo elétrico

46

Outras palavras – O campo elétrico como uma função vetorial de ponto

47

#### CAPÍTULO 4 – Potencial elétrico

50

##### Energia potencial elétrica – potencial elétrico

51

A Física no cotidiano – A pilha elétrica

51

Outras palavras – Gerador de Van de Graaff

54

#### CAPÍTULO 5 – Trabalho da força elétrica

59

##### Energia potencial elétrica

60

A Física no cotidiano – Aterramento de instalações – Por que se atribui potencial zero ao potencial da Terra?

60

Outras palavras – O experimento de Millikan

65

#### CAPÍTULO 6 – Condutores em equilíbrio eletrostático

69

##### Condutor em equilíbrio eletrostático

69

##### Distribuição das cargas elétricas

70

A Física no cotidiano – Para-raios

71

##### Condutor esférico em equilíbrio eletrostático

72

Outras palavras – De autodidata a cientista

74

#### CAPÍTULO 7 – Capacitor

78

##### Capacidade elétrica ou capacitância

78

A Física na História – Garrafa de Leyden

79

##### Capacitor

81

A Física no cotidiano – Algumas aplicações dos capacitores

82

##### Associação de capacitores

85

## UNIDADE 2

### ELETRODINÂMICA

94

#### CAPÍTULO 8 – Corrente elétrica

96

##### Um modelo para a corrente elétrica

96

Outras palavras – Eletricidade – breve história: Da Antiguidade ao fim do século XIX

98

##### Intensidade de corrente elétrica

99

##### Efeitos provocados pela corrente elétrica

100

##### Diferença de potencial elétrico

101

##### Trabalho, energia potencial elétrica e potência elétrica

102

A Física no cotidiano – Consumo de energia elétrica

102

A Física no cotidiano – Economia de energia

105

Atividade prática – Testando circuitos

105

#### CAPÍTULO 9 – Resistores elétricos

108

##### Primeira Lei de Ohm – Resistência

109

##### Segunda Lei de Ohm – Resistividade

112

A Física no cotidiano – Supercondutores

113

##### Efeito Joule

115

A Física no cotidiano – Aplicações do efeito Joule

116

##### Associação de resistores

118

##### Curto-circuito em um resistor

125

Atividade prática – Verificando associações de resistores

128

#### CAPÍTULO 10 – Aparelhos de medição elétrica

132

##### Galvanômetro

132

##### Amperímetro

133

##### Voltímetro

135

##### Ohmímetro

137

Outras palavras – Multímetro

141

Atividade prática – Utilizando aparelhos de medição elétrica

142

#### CAPÍTULO 11 – Geradores e receptores elétricos

145

##### Gerador elétrico

145

A Física no cotidiano – Curto-circuito e segurança

150

##### Receptor elétrico

157

<b>CAPÍTULO 12 – Leis de Kirchhoff</b>	163
<b>Rede elétrica</b>	163
<b>A Física na História</b> – História da energia elétrica no Brasil	164
<b>Lei de Ohm generalizada</b>	165
<b>Leis de Kirchhoff</b>	166
<b>A Física no cotidiano</b> – Capacitores e o fator de potência	171
<b>Atividade prática</b> – Testando as Leis de Kirchhoff	172

## UNIDADE 3

### ELETROMAGNETISMO 174

<b>CAPÍTULO 13 – Campo magnético</b>	176
<b>A Física na História</b> – O campo eletromagnético e o Modelo Padrão	176
<b>O ímã</b>	177
<b>Campo magnético</b>	178
<b>Atividade prática</b> – Produzindo um eletroímã caseiro	188
<b>Outras palavras</b> – Magnetotactismo	190
<b>CAPÍTULO 14 – Força magnética</b>	195
<b>Atuação da força magnética sobre um móvel eletrizado</b>	195
<b>Corpo eletrizado sob a ação de um campo magnético uniforme</b>	197
<b>Ação de uma força magnética sobre um condutor retilíneo</b>	200
<b>A Física na História</b> – Roda de Barlow	201
<b>Atividade prática</b> – Construindo um motor elétrico simples	206
<b>CAPÍTULO 15 – Indução eletromagnética</b>	212
<b>A diferença de potencial induzida</b>	212
<b>Fluxo magnético</b>	214
<b>Atividade prática</b> – Fabricando um sinalizador com a lei de Lenz	217
<b>Outras palavras</b> – Duas aplicações da indução eletromagnética	219
<b>CAPÍTULO 16 – Corrente alternada</b>	222
<b>A Física no cotidiano</b> – Você sabe o que está comprando?	223
<b>A corrente alternada e o transformador elétrico</b>	224
<b>A Física na História</b> – Tesla x Edison: a Guerra das Correntes	226
<b>Os transformadores</b>	227
<b>A Física no cotidiano</b> – Cuidados com a alta tensão	228

## UNIDADE 4

### FÍSICA MODERNA 230

<b>CAPÍTULO 17 – Teorias da Relatividade</b>	232
<b>Referenciais e simultaneidade</b>	232
<b>Atividade prática</b> – Explorando referenciais com auxílio de uma câmera	233
<b>Transformações e invariantes</b>	234
<b>A Física na História</b> – O experimento de Michelson e Morley	235
<b>A ideia de tempo</b>	236
<b>Postulados da Teoria da Relatividade Especial</b>	238
<b>A Física no cotidiano</b> – Avião supersônico australiano bate recorde mundial de velocidade	239
<b>Outras palavras</b> – Paradoxos e o paradoxo dos gêmeos	240
<b>A massa relativística</b>	242
<b>A energia relativística</b>	242
<b>A Relatividade Geral</b>	243
<b>A Física na História</b> – Albert Einstein	245
<b>CAPÍTULO 18 – Teoria Quântica</b>	247
<b>A radiação do corpo negro</b>	249
<b>Atividade prática</b> – Construindo um espectroscópio	251
<b>O efeito fotoelétrico</b>	252
<b>A dualidade da luz e da matéria</b>	254
<b>O Princípio da complementaridade</b>	255
<b>O modelo atômico de Bohr</b>	256
<b>O Princípio da incerteza de Heisenberg</b>	257
<b>Outras palavras</b> – O gato de Schrödinger	258
<b>CAPÍTULO 19 – Física Nuclear</b>	262
<b>O átomo, até a década de 1950</b>	262
<b>A radioatividade e os processos nucleares</b>	265
<b>A Física na História</b> – Marie Curie	265
<b>As partículas do Modelo Padrão</b>	268
<b>Meia-vida</b>	270
<b>A Física no cotidiano</b> – Exames usando a Medicina Nuclear	271
<b>A datação por isótopos</b>	271
<b>Outras palavras</b> – Usinas nucleares brasileiras	273
<b>Radiações ionizantes</b>	276
<b>Outras palavras</b> – É possível estudar o impossível?	279
<b>RESPOSTAS DOS EXERCÍCIOS PROPOSTOS</b>	<b>283</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>288</b>
<b>Manual do Professor – Orientações Didáticas</b>	<b>289</b>

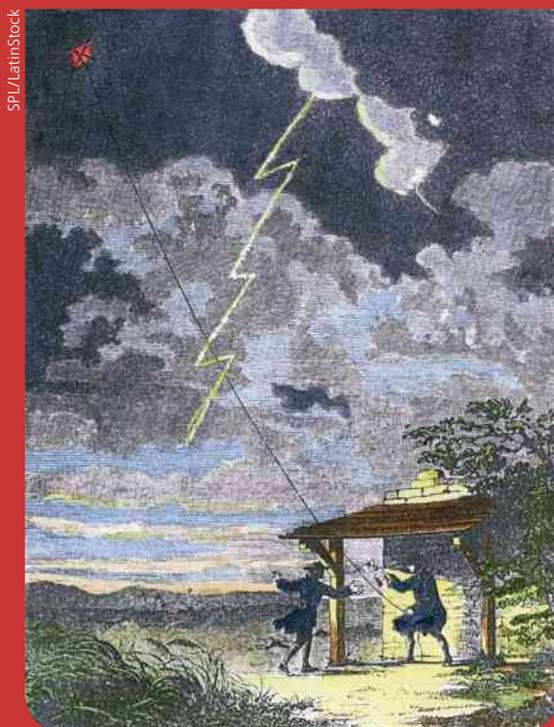
# Eletrostática

A Eletrostática é a área da Eletricidade que se interessa em estudar as cargas elétricas em repouso. De maneira mais geral, ela estuda a situação na qual as cargas elétricas (que se encontram distribuídas em determinado objeto) estão em equilíbrio. Esse é o sentido da palavra *estática* agregado ao termo *eleto*, formando a palavra *eletrostática*.

A carga elétrica é uma propriedade fundamental da matéria, encontrada em todos os corpos, que os torna sensíveis aos campos elétricos. É possível transferir cargas de um objeto ou acumular cargas nele ou, então, descarregá-lo; o movimento de partículas eletrizadas em um campo elétrico envolve trabalho, que fica armazenado em forma de energia potencial elétrica em baterias e acumuladores.

Mas quanta carga elétrica um objeto admite? Isso depende de suas características, como o material de que é feito, seu formato, dimensões e o meio onde está inserido. Ultrapassar esses limites pode ser perigoso, pois a carga pode migrar para outros materiais, criando desde centelhas até tempestades elétricas.

Nesta Unidade, você vai ver como o ser humano descobriu os dois tipos de carga muito antes de conhecer a natureza íntima da matéria, de que modo se pode eletrizar um material e como as cargas interagem entre si e, também, com o campo elétrico.



SPL/LatinStock

As manifestações elétricas já eram conhecidas desde a Antiguidade, muito antes de serem explicadas segundo bases científicas. Depois dos experimentos de Otto von Guericke com a “criação” de cargas elétricas em materiais, em 1660, e da descoberta acidental de Musschenbroek, em 1746, de como armazená-las, o livreiro e impressor estadunidense Benjamin Franklin identificou os raios atmosféricos como descargas elétricas, no célebre experimento do papagaio empenado num dia de tempestade, em 1752. Esta ilustração, em que vemos Benjamin Franklin e seu filho William, foi feita com base em uma descrição do relato do próprio Franklin a Joseph Priestley.

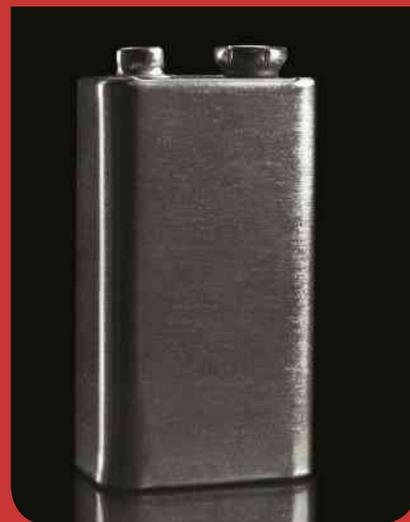
- **CAPÍTULO 1**    **Eletrização**
- **CAPÍTULO 2**    **Força elétrica**
- **CAPÍTULO 3**    **Campo elétrico**
- **CAPÍTULO 4**    **Potencial elétrico**
- **CAPÍTULO 5**    **Trabalho da força elétrica**
- **CAPÍTULO 6**    **Condutores em equilíbrio eletrostático**
- **CAPÍTULO 7**    **Capacitor**

Thinkstock/Getty Images



Dentro de certos limites, é possível armazenar eletricidade em corpos. A quantidade da carga armazenada depende das características do material e das dimensões do objeto. Quando o campo elétrico gerado por essas cargas, aplicado sobre o material isolante, excede um limite chamado rigidez dielétrica, as cargas passam a se mover pelo material. É o que acontece no ar: quando as cargas acumuladas nas nuvens excedem a rigidez dielétrica do ar, as cargas se movem (raios), criando um caminho de ionização e gerando som (trovão) e luz (relâmpago).

Clive Streeier/Dorling Kindersley/Getty Images



Lauren Nicole/Photodisc/Getty Images

O armazenamento e a produção de eletricidade de outra fonte requerem que conheçamos as características dos materiais envolvidos: sabemos que não se pode armazenar eletricidade em materiais condutores, mas ao mesmo tempo podemos lançar mão de metais, que são bons condutores, para produzir e conduzi-la. A imagem à esquerda mostra uma réplica da garrafa de Leyden, enquanto a da direita exibe uma pilha comum de 9 volts.

# Eletrização

O que é eletricidade? É muito mais fácil listar as inúmeras aplicações e os benefícios que ela traz do que propriamente defini-la. É difícil imaginar a nossa sociedade tecnológica, hoje, sem a eletricidade.

Para responder a essa questão, deveríamos retroceder na História até o período em que as residências, o comércio e a indústria começaram a ser alimentados pelas redes elétricas — isso se deu na segunda metade do século XIX — e considerar que todos os dispositivos e sistemas que dependem da eletricidade para funcionar não chegariam a existir. Com essa supressão, nossa sociedade nada teria de tecnológica nos dias atuais!

Perceba que convivemos com a tecnologia da eletricidade há cerca de 150 anos. Isso é bem pouco se compararmos com o tempo em que convivemos com a tecnologia que adveio do conhecimento acumulado da Mecânica ou da Termodinâmica.

O homem faz uso da eletricidade há menos de dois séculos, mas já havia um conhecimento acumulado sobre ela desde o século VI a.C., quando foram feitas as primeiras documentações das manifestações elétricas da matéria.

Desde então, fenômenos elétricos têm sido estudados com materiais que se comportavam bem ou nem tanto com relação à eletricidade, assim como a maneira de se produzir, conservar e quantificá-la.

Todo esse conhecimento foi produzido sem que se soubesse exatamente “o que era” a eletricidade ou quais entidades teriam tais propriedades; as partículas então chamadas “elementares” só viriam a ser descobertas entre os séculos XIX e XX, e com elas foi finalmente possível elaborar uma descrição de modelo atômico que explicava as manifestações elétricas na matéria.

Assim, o corpo organizado de conhecimento conseguido através dessas conquistas denominou-se **Eletricidade**.

Nesse desenvolvimento, outras ciências e tecnologias associadas à Eletricidade também floresceram: a Físico-Química, o Magnetismo, a Matemática, as telecomunicações, a indústria automobilística e o que viria a ser a Física Quântica. No fim do século XIX, o estudo das propriedades conjuntas da eletricidade e do magnetismo deu início ao Eletromagnetismo, o último grande ramo da chamada Física Clássica.

Reflita sobre quão extraordinário foi a descoberta da eletricidade e o tanto que pudemos obter com ela, na Física, na Engenharia, na Medicina e em muitas outras áreas. Apenas imagine (ou recorde!) o transtorno causado por um dia sem energia elétrica.



Fernando Favoretto/Criar Imagem

O semáforo utiliza uma linguagem simples e universalmente aceita para o controle do tráfego.



Thinkstock/Getty Images

Há mais tecnologia em um computador doméstico do que toda a tecnologia criada para que o homem chegasse à Lua.



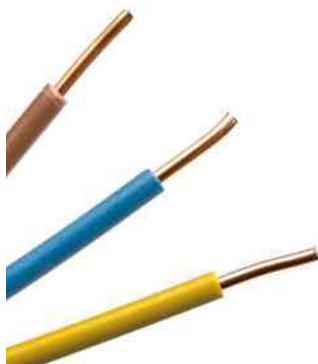
Thinkstock/Getty Images

Máquinas e dispositivos elétricos controlam desde os sinais vitais de um paciente durante uma cirurgia...



Ciforari/Thinkstock/Getty Images

...até grandes redes de tráfego, facilitando a vida de milhões de pessoas.



Nos fios elétricos, a parte interna é feita de material condutor, e a parte externa, de material isolante.

Neste capítulo começamos o estudo da Eletricidade. Veremos os conceitos iniciais de carga elétrica, os estados de eletrização e neutralidade dos corpos, os resultados obtidos pela transferência de cargas elétricas entre corpos, os processos de neutralização e eletrização da matéria. O ramo da Eletricidade que estuda os fenômenos relativos às cargas elétricas em repouso denomina-se Eletrostática.

A Eletricidade está centrada em uma entidade ou propriedade básica, de nome carga elétrica. Ela é tão importante para a Eletricidade quanto a massa o é para a Mecânica.

Você provavelmente já deve ter tomado um choque ao encostar na lataria de um veículo num dia muito seco. Essa sensação é a resposta dada pelo nosso corpo à transferência de cargas elétricas da lataria para ele (poderia ser do nosso corpo para a lataria também!).

Mas de onde vieram essas cargas elétricas? Será que a bateria do veículo está mal instalada? Bem, provavelmente não, porque o mesmo fenômeno pode ocorrer com outros objetos movimentados no ar.

Durante o movimento, o carro acumulou cargas elétricas devido ao seu atrito com o ar e não as dissipou, por estar isolado da superfície pelos pneus de borracha; então, quando encostamos no veículo, ocorre a transferência dessas cargas para o nosso corpo. Daí o choque fisiológico.

Em outra situação, você também pode sentir um choque ao encostar na maçaneta de uma porta após caminhar descalço sobre o carpete. A pele dos pés acumula cargas elétricas devido ao seu atrito com o carpete e elas são transferidas para a maçaneta, produzindo a sensação de choque.

O acúmulo de cargas elétricas nos corpos, por transferência de um para outro ou por deslocamento interno dentro dele, é chamado de eletrização. Eletrizar, então, significa criar um acúmulo de cargas.

A eletrização de corpos já havia sido observada pelos gregos, por volta do século VI a.C., através da fricção entre o âmbar, que é uma resina vegetal fóssil, e a pele de animais. Esse atrito produzia na resina a propriedade de atrair corpos pequenos e leves, como palhas, folhas secas e penas de aves. Em grego, âmbar é *élektron*. Foi a partir dessa palavra que surgiram os termos elétron, eletricidade e seus derivados.

A atração entre o âmbar e a palha é a manifestação do mesmo fenômeno observado quando se esfrega uma caneta ou pente plástico nos cabelos, tornando esses objetos capazes de atrair pedacinhos de papel, ou, em escala muito maior, quando um raio cruza o céu. As partículas eletrizadas interagem com outras e podem provocar descargas entre os objetos que as contêm.

## Âmbar

Existem insetos e bactérias que perfuram os caules das árvores para alimentar-se da seiva elaborada. Contra essas invasões, alguns pinheiros produzem uma resina que funciona como uma barreira natural. A resina, com o tempo, perde o ar e a água de seu interior, ficando endurecida, resistente às intempéries e ao tempo e adquirindo cores que vão normalmente do amarelo ao marrom. É dessa maneira que se forma o âmbar, usado em joalheria e artesanato.

Amostra de âmbar não polida. A região do Mar Báltico e a República Dominicana são os maiores produtores de âmbar do mundo.



## Carga elétrica

O termo raio canal foi cunhado por Goldstein, logo após a descoberta dos raios catódicos. Ele abriu um pequeno orifício ou canal atrás do eletrodo negativo em uma ampola de Crookes e observou a luminosidade que se estendia para além do orifício.

Em um dos modelos atômicos propostos no decorrer do século XX — apresentado por Ernest Rutherford (1871-1937) e aperfeiçoado por Niels Bohr (1885-1962), entre outros —, o átomo é constituído por partículas como elétrons, prótons e nêutrons.

Nesse modelo, os elétrons orbitam o núcleo atômico, onde estão localizados os prótons e os nêutrons (formando um aglomerado extremamente coeso), semelhantemente à representação planetária dos astros orbitando o Sol. A região onde os elétrons estão é denominada eletrosfera.

O elétron foi identificado por Joseph John Thomson (1856-1940), em 1897. Em 1919, Rutherford chamou de prótons as partículas dos raios canais, descobertos anteriormente em 1886. O nêutron foi descoberto por James Chadwick (1891-1974), em 1932.

Por meio de estudos dos fenômenos elétricos foi possível verificar experimentalmente que prótons e elétrons têm comportamentos elétricos opostos. Se em determinada circunstância um for atraído, o outro será repelido. Se um for desviado para a direita, o outro o será para a esquerda.

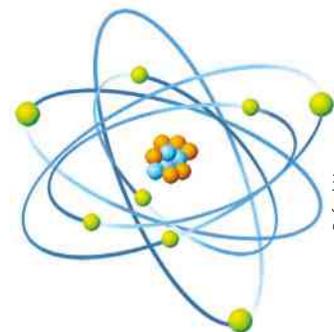
Por isso se definiu a carga elétrica como um dos atributos dessas partículas, conferindo-lhes sinais opostos para evidenciar seu caráter contrário. Por convenção, adotou-se a carga positiva para os prótons e a negativa para os elétrons. Os nêutrons não possuem carga elétrica.

Apesar de o próton ser quase 2 mil vezes mais pesado que o elétron, a quantidade de carga elétrica dos dois é igual, em valor absoluto. Esse valor absoluto é denominado carga elétrica elementar (simbolizado por  $e$ ), cujo valor foi determinado experimentalmente pela primeira vez pelo físico estadunidense Robert Andrews Millikan (1868-1953), por meio da conhecida experiência de Millikan, que será detalhada no capítulo 5.

Charles Augustin de Coulomb (1736-1806) descobriu que a intensidade da interação entre cargas elétricas dependia das quantidades de carga e da distância entre elas.

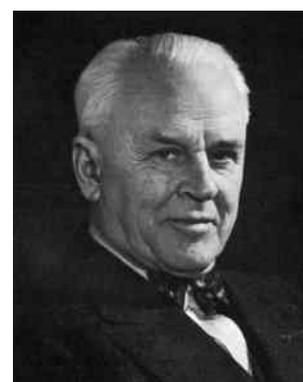
Assim, os valores das cargas de um elétron e de um próton são representados da seguinte forma:

elétron ( $e^-$ ):  $-1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$   
próton ( $p^+$ ):  $+1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$



Rafael Herrera

Representação do modelo de um átomo — com elementos sem proporção entre si e em cores fantasia — proposto por Rutherford.



Reprodução

O principal resultado do experimento de Millikan foi demonstrar que qualquer carga elétrica corresponde a um múltiplo do valor absoluto da carga elementar:  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ , em que  $C$  é o símbolo de *coulomb*, unidade de medida de carga elétrica no Sistema Internacional (SI).

## A FÍSICA NA HISTÓRIA

### A evolução dos modelos atômicos

Por volta do século V a.C., a humanidade já tentava entender como a matéria era constituída. Entretanto, como era comum nessa época, utilizava-se apenas o “pensamento filosófico” para fundamentar e justificar as teorias.

Então, perto de 450 a.C., Leucipo afirmou que a matéria podia ser dividida em partículas cada vez menores, até certo limite. Essa afirmação é fruto somente do “pensamento filosófico”, pois ele não utiliza método experimental para confirmar sua teoria.

Mais tarde, um dos discípulos de Leucipo, Demócrito, defendeu a ideia de que a matéria era descontínua e formada por partículas indivisíveis. Ele chamou essa menor partícula de átomo (que em grego significa indivisível)

vel) e postulou que toda matéria seria uma combinação dos átomos de quatro elementos: água, terra, fogo e ar.

Mas nem todos os filósofos da época partilhavam da mesma opinião. Aristóteles rejeitou a ideia de que haveria uma partícula indivisível e afirmou que a matéria era “contínua”, não sendo portanto composta de partículas indivisíveis.

Talvez pelo seu grande prestígio, a visão de Aristóteles prevaleceu e perdurou até o século XVII. Nesse século, experiências que relacionavam as massas das substâncias colocadas em interação por reações químicas demonstraram a inconsistência da teoria da matéria contínua, fazendo desmoronar o modelo proposto por Aristóteles.

Em 1808, o químico inglês John Dalton propôs uma nova teoria e um novo modelo atômico, que ficou conhecido como modelo da bola de bilhar, pois considerava que o átomo era uma esfera maciça, indestrutível, impenetrável e indivisível.

Para Dalton, todos os átomos de um mesmo elemento químico eram idênticos. Essa teoria não se sustentou, pois hoje sabemos que existem átomos de um mesmo elemento químico que diferem no número de massa.

O modelo proposto por Dalton, contudo, tem valor histórico, pois, assim como ele, as próximas representações serão sempre baseadas em resultados experimentais e apresentadas através de um esquema científico.

O modelo de Dalton vigorou por quase todo o século XIX, até que, em 1897, o físico inglês J. J. Thomson demonstrou que os raios catódicos podiam ser entendidos como um feixe de partículas carregadas.

Thomson propôs o “modelo do pudim de passas”, que considerava o átomo como uma esfera maciça, constituída por um material positivo, possuindo elétrons incrustados em sua superfície. As cargas positivas e negativas existiam em iguais quantidades para garantir a neutralidade do átomo.

Em 1911, Ernest Rutherford utilizou o polônio como fonte de partículas alfa e verificou que, se um feixe de partículas incidir em uma lâmina de ouro, a maior parte delas passará livremente pelo metal e alguns serão refletidos ou passarão sofrendo desvio.

Com esse experimento, Rutherford propôs que o átomo seria constituído por um núcleo positivo, que seria muito pequeno mas teria grande massa, e ao redor dele orbitariam os elétrons, em uma região chamada eletrosfera, com uma dimensão cerca de dez mil vezes maior do que sua região central.

Em 1913, o físico dinamarquês Niels Bohr propôs que o elétron de um átomo poderia adquirir ou perder certa quantidade de energia, e, dependendo da dimensão dela, o elétron poderia alcançar determinada órbita.

Se o elétron receber energia suficiente, ele passará para outra órbita mais afastada do núcleo e, se perdê-la, poderá deslocar-se para uma mais próxima da região central.

Os modelos seguintes trouxeram novas maneiras de entender a absorção ou emissão de energia, uma nova interpretação para o elétron, que poderia ser compreendido como matéria ou onda, e até mesmo uma melhor compreensão da estreita relação existente entre a matéria e a energia.

## O Modelo Padrão

Os físicos desenvolveram uma teoria chamada Modelo Padrão, que descreve a maioria dos fenômenos em escala microscópica e procura estar de acordo com todas as interações do Universo, desde a sua criação. É uma teoria que representa todas as centenas de partículas e interações complexas com apenas:

- 6 *quarks* — dois deles formam os prótons e os nêutrons; os outros quatro, elaborados em aceleradores de partículas, são instáveis;
- 6 léptons — o lépton mais conhecido é o elétron;
- as correspondentes antipartículas (6 *antiquarks*, 6 antiléptons);
- partículas mediadoras de força — fóton, glúon, gráviton (não detectado).

Todas as partículas de matéria conhecidas são compostas de *quarks* e léptons e interagem pelas partículas mediadoras de força.

Em breve, falaremos das cargas dos *quarks*, mas é possível que haja alguma pergunta do tipo: “Por que se fala que a carga elementar é a do elétron, ao passo que já se sabe que as cargas dos *quarks* são frações da carga do elétron?”.

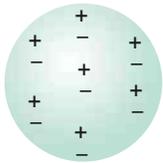
O motivo é que os *quarks* não “sobrevivem” isoladamente por muito tempo: eles se combinam com outros *quarks* formando prótons e nêutrons ou formam pares *quark-antiquark*, que são chamados mésons. Prótons e nêutrons são constituídos, cada um, por 3 *quarks*: o próton é formado por 2 *quarks* tipo *u* e um *quark* tipo *d* (*uud*), e o nêutron é formado por 2 *quarks* tipo *d* e um *quark* tipo *u* (*udd*) (a carga do *quark* tipo *u* vale  $2e/3$  e a do *quark* tipo *d* vale  $-e/3$ ). O tempo de vida do elétron e do próton é muito maior que o tempo de vida de um *quark* (para o próton, é de aproximadamente  $10^{32}$  anos).

## Corpo eletricamente neutro e corpo eletrizado

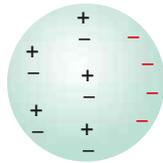
Para que um corpo se apresente eletricamente neutro, o número total de prótons (cargas positivas) e elétrons (cargas negativas) deve ser o mesmo. Quando isso acontece, dizemos que a carga líquida desse corpo é nula.

Se houver diferença entre o número de prótons e elétrons, o corpo estará eletricamente carregado. Se um corpo neutro perder elétrons, ficará eletrizado positivamente, e se receber elétrons ficará carregado negativamente.

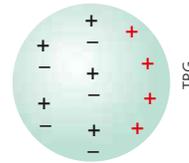
Observe que estamos pensando na eletrização como excesso ou falta de elétrons, que são as partículas eletrizadas do átomo que podem mover-se na eletrosfera com muito mais facilidade do que os prótons, que estão presos no núcleo. Nada impede, no entanto, de haver eletrização por ganho ou perda de cargas elétricas positivas, como, por exemplo, no acúmulo de íons prata ( $\text{Ag}^+$ ) em uma solução iônica, sob determinadas condições.



Corpo eletricamente neutro:  
 $n^{\circ}$  de prótons =  $n^{\circ}$  de elétrons.



Corpo eletrizado negativamente:  
 $n^{\circ}$  de prótons <  $n^{\circ}$  de elétrons.



Corpo eletrizado positivamente:  
 $n^{\circ}$  de prótons >  $n^{\circ}$  de elétrons.

A quantidade de carga elétrica  $Q$  de um corpo corresponde à quantidade total de elétrons que esse corpo ganhou ou perdeu em relação ao seu estado eletricamente neutro; para calculá-la, multiplicamos a quantidade de elétrons em excesso ou em falta pelo valor absoluto da carga elementar ( $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ ):

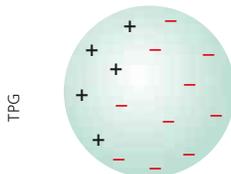
$$Q = \pm n \cdot e \quad (n \in \mathbb{Z})$$

O sinal da carga elétrica indicará o estado de eletrização do corpo. A partir dele podemos concluir que:

Se o corpo tiver carga positiva (+)	Se o corpo tiver carga negativa (-)
O número de prótons é maior que o número de elétrons.	O número de prótons é menor que o número de elétrons.
O corpo perdeu elétrons em relação ao estado inicial eletricamente neutro.	O corpo ganhou elétrons em relação ao estado inicial eletricamente neutro.

## Exercícios resolvidos

**ER1.** Considere um corpo, como mostra a figura, em que cada símbolo (+) corresponde a  $10^{19}$  prótons e cada símbolo (-) corresponde a  $10^{19}$  elétrons:



- Esse corpo está eletrizado ou está eletricamente neutro? Por quê?
- A carga desse corpo é positiva ou negativa?
- Considerando  $e$  a carga elétrica elementar, como podemos representar a quantidade de carga elétrica desse corpo?

### Resolução:

- O corpo está eletrizado negativamente, pois o número de elétrons é maior que o de prótons.
- Como o corpo está eletrizado negativamente, a carga elétrica desse corpo **é negativa** ( $Q < 0$ ).
- Como há  $5 \cdot 10^{19}$  elétrons a mais que a quantidade de prótons, então a carga desse corpo pode ser assim representada:

em excesso

$Q = 5 \cdot 10^{19} \cdot e$

carga elétrica

negativo, pois o corpo está eletrizado negativamente

em equilíbrio  $1\oplus = 10^{19}$  prótons  
 $1\ominus = 10^{19}$  elétrons

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

$$Q = n \cdot e = (5 \cdot 10^{19}) \cdot (-1,6 \cdot 10^{-19}) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow Q = -8 \text{ C}$$

**ER2.** Considere um objeto no qual se acumularam cargas de modo que sua carga vale  $-3,2 \mu\text{C}$ . Levando em conta que a carga elementar tem módulo  $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ :

- as cargas que se acumularam nesse objeto são devidas a prótons ou elétrons?
- em que quantidade?

### Resolução:

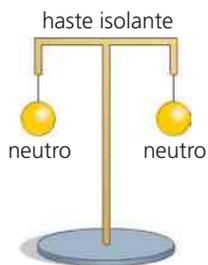
- Se  $Q = -3,2 \mu\text{C} = -3,2 \cdot 10^{-6} \text{ C}$ , então esse objeto ganhou **elétrons**, pois a sua carga elétrica resultante é negativa.

- Para achar o número de elétrons ganhos,

$$Q = n \cdot e \Rightarrow n = \frac{Q}{e} = \frac{-3,2 \cdot 10^{-6}}{-1,6 \cdot 10^{-19}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow n = 2 \cdot 10^{13} \text{ elétrons acumulados}$$

# Princípios da Eletrostática



A Eletrostática baseia-se em dois princípios: o de atração e repulsão e o de conservação das cargas elétricas.

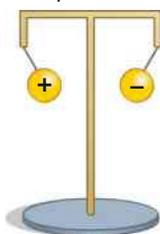
Princípio de Atração e Repulsão:

Cargas de mesmo sinal se repelem, e cargas de sinais opostos se atraem.

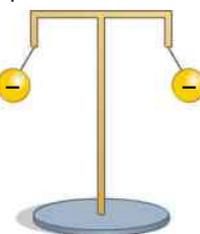
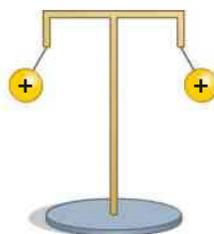
Considere dois corpos neutros, suficientemente próximos para haver atração ou repulsão, se for o caso, presos por um fio numa haste isolante. Por serem neutros, não há interação elétrica entre eles.

Se esses corpos forem eletrizados com cargas de sinais contrários, haverá atração mútua entre eles. Eletrizados com cargas de sinais iguais, vão se repelir reciprocamente.

Sinais opostos: atração



Mesmo sinal: repulsão



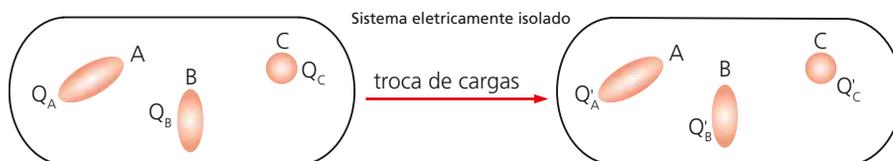
Ilustrações: Hélio Senatore

Princípio de Conservação de Cargas Elétricas:

A soma algébrica das quantidades de carga elétrica, presentes em um sistema eletricamente isolado (que não ganha nem perde carga), é constante.

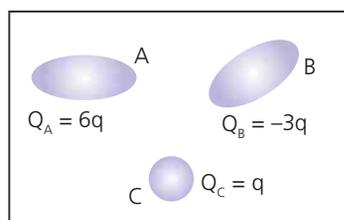
Consideremos inicialmente três corpos  $A$ ,  $B$  e  $C$  eletrizados, respectivamente, com as cargas elétricas  $Q_A$ ,  $Q_B$  e  $Q_C$ . Eles trocam cargas elétricas entre si, no interior de um sistema eletricamente isolado. Após as permutas, cada um dos corpos terá, reciprocamente, as cargas  $Q'_A$ ,  $Q'_B$  e  $Q'_C$ .

De acordo com o Princípio de Conservação de Cargas, teremos:



$$Q_A + Q_B + Q_C = Q'_A + Q'_B + Q'_C \Rightarrow \Sigma Q_{\text{antes}} = \Sigma Q_{\text{depois}}$$

Exemplo: considere três corpos  $A$ ,  $B$  e  $C$ . Cada um deles possui uma quantidade de carga que é múltipla de uma carga  $q$  qualquer.

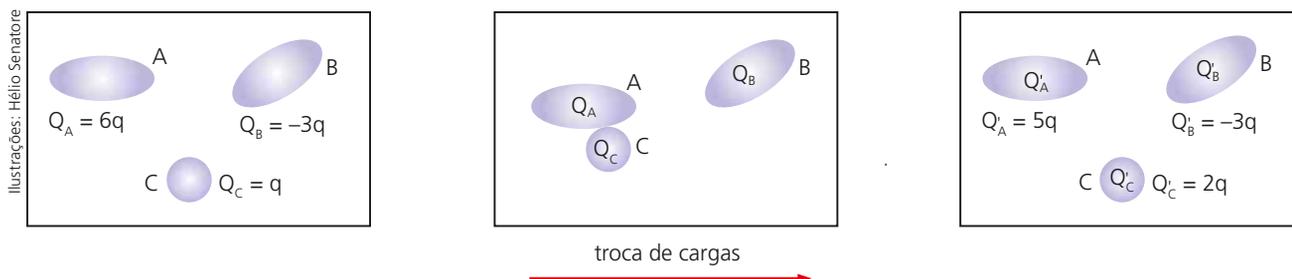


Relembre com os estudantes o significado do operador somatório representado pela letra maiúscula grega sigma ( $\Sigma$ ). Ele é utilizado para escrever de forma abreviada uma soma que tenha várias parcelas.

A soma algébrica das cargas elétricas dos corpos vale:

$$Q_A + Q_B + Q_C = 6q + q - 3q = 4q$$

Suponha que haja uma interação qualquer entre os corpos, por exemplo, o corpo A encosta momentaneamente em C e, em seguida, eles se separam:



A soma algébrica das cargas elétricas nos corpos, após o intercâmbio de cargas, ficou assim:

$$Q'_A + Q'_B + Q'_C = 5q - 3q + 2q = 4q$$

Efetuada as trocas, como  $\Sigma Q_{\text{antes}} = \Sigma Q_{\text{depois}}$ , pode-se concluir que o sistema, composto de corpos eletrizados, é isolado eletricamente.

É importante observar que, durante os processos de eletrização, os elétrons não são criados nem destruídos. Eles são apenas transferidos de um corpo para outro, por isso, o Princípio de Conservação da Carga se aplica. Esse princípio é tão importante quanto os de conservação de massa, de energia e da quantidade de movimento, que são os pilares da Física Clássica.

## Exercício resolvido

**ER3.** Dois corpos A e B estão separados e eletrizados com cargas elétricas, respectivamente, iguais a  $Q_A = -2 \text{ C}$  e  $Q_B = 5 \text{ C}$ . Colocando-os em contato, o corpo A transfere  $1,0 \cdot 10^{19}$  elétrons para o corpo B, sendo em seguida separados. Dado:  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ .

- Qual era a quantidade total de carga existente no ambiente antes de haver o contato?
- No contato, que quantidade de carga o corpo A transfere para o corpo B?
- Quais são as quantidades de carga de cada um dos corpos após a realização do contato?
- Que tipo de força (de atração ou repulsão) existe entre os corpos, antes e depois de ter havido o contato?

### Resolução:

Temos os seguintes dados:

$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ ;  $Q_A = -2 \text{ C}$ ;  $Q_B = 5 \text{ C}$ ; A transfere  $1,0 \cdot 10^{19}$  elétrons para B.

- A quantidade total de carga existente no ambiente antes de se efetuar o contato é a soma algébrica das cargas dos dois corpos:

$$\Sigma Q_{\text{antes}} = Q_A + Q_B = -2 + 5 \Rightarrow \Sigma Q_{\text{antes}} = +3 \text{ C}$$

- Se  $Q$  a quantidade de carga que A transfere para B, temos:

$$Q = n \cdot e = 1,0 \cdot 10^{19} \cdot (-1,6 \cdot 10^{-19}) \Rightarrow Q = -1,6 \text{ C}$$

(o sinal negativo significa que o corpo A perdeu carga para o corpo B).

- Após o contato, o corpo A perdeu 1,6 C ( $Q = -1,6 \text{ C}$ ), enquanto B ganhou a mesma quantidade. Assim:

$$Q'_A = Q_A - Q = -2 - (-1,6) = -2 + 1,6 \Rightarrow Q'_A = -0,4 \text{ C}$$

$$Q'_B = Q_B + Q = 5 + (-1,6) = 5 - 1,6 \Rightarrow Q'_B = +3,4 \text{ C}$$

$$\Sigma Q_{\text{depois}} = Q'_A + Q'_B = -0,4 \text{ C} + 3,4 \text{ C} = +3 \text{ C} = \Sigma Q_{\text{antes}}$$

de acordo com o Princípio de Conservação de Cargas Elétricas.

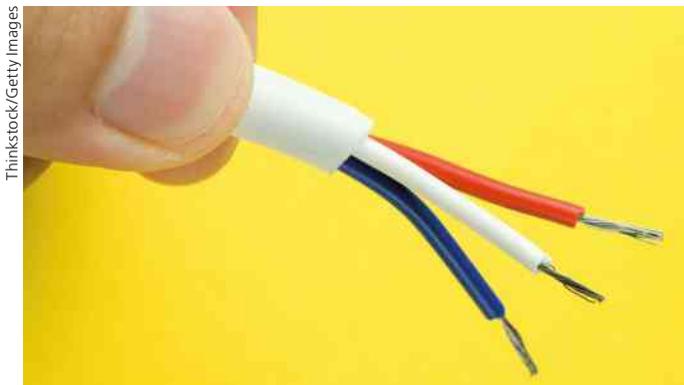
- Antes e depois do contato, a força elétrica existente entre os corpos é de atração, pois nesses dois momentos os corpos possuem sinais opostos, conforme o Princípio de Atração e Repulsão.

## Condutores e isolantes

Os meios materiais podem ser classificados como bons ou maus condutores de eletricidade. Essa classificação está relacionada com a facilidade que os elétrons desses materiais têm para movimentar-se.

Assim, esses materiais poderão ser classificados como condutores, quando as cargas não encontram grande dificuldade no deslocamento, ou como isolantes ou dielétricos, em caso contrário. A seguir, veremos suas características e alguns exemplos:

- Materiais isolantes ou dielétricos: são materiais cujos elétrons estão fortemente ligados ao núcleo e, por isso, não encontram facilidade de movimentação. Como exemplos de materiais isolantes podemos citar o ar atmosférico seco, o vidro, a borracha e a mica;



Thinkstock/Getty Images

Os materiais que classificamos hoje como condutores eram, na Antiguidade, considerados *não elétricos*, exatamente pela característica de não reter as cargas, ou seja, permitir a sua movimentação.

- Materiais condutores: são materiais cujos elétrons, mais afastados do núcleo, possuem grande facilidade de se movimentar. Os metais, o corpo humano e o solo são bons condutores de eletricidade. Nos condutores metálicos, forças de pequena intensidade são capazes de deslocar os elétrons (chamados de elétrons livres) pelos espaços interatômicos. Já o corpo humano e o solo são condutores porque há a presença de íons em meio eletrolítico, isto é, ácidos, bases ou sais em soluções aquosas, que são bons condutores de eletricidade.

Nos corpos condutores eletrizados, as cargas elétricas em excesso espalham-se rapidamente em direção às superfícies externas, devido à repulsão existente entre cargas de mesmo sinal, enquanto nos corpos isolantes os elétrons não se redistribuem internamente.

Todo material pode ser ordenado de acordo com a facilidade de ganhar ou perder elétrons em relação a outros materiais. Por isso, não existem condutores e isolantes perfeitos: existem bons condutores, como os metais e a grafita, e bons isolantes, como a mica, o enxofre e a porcelana.

Uma aplicação desses conceitos está na escolha de materiais para a construção de fios e cabos elétricos. Materiais elétricos de qualidade devem satisfazer a condição de ser bons condutores de eletricidade e, ao mesmo tempo, por questões de segurança, eles têm de ser recobertos por um bom isolante.

A tabela ao lado, chamada de série triboelétrica, ordena alguns materiais de acordo com sua facilidade de perder elétrons. O algodão ficará eletrizado negativamente, quando atritado com o vidro, e eletrizado positivamente, se for friccionado com qualquer material que esteja abaixo dele na tabela (por exemplo, o isopor).

Série triboelétrica	
pele de coelho	maior facilidade em perder elétrons ↓ maior facilidade em ganhar elétrons
vidro	
cabelo humano	
mica	
lã	
pele de gato	
seda	
algodão	
âmbar	
ebonite	
poliéster	
isopor	
poliuretano	
polietileno	
PVC	
teflon	

Fonte: LIDE, David R. (editor-chefe). *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. 90. ed. Flórida: CRC Press LCC, 2009.

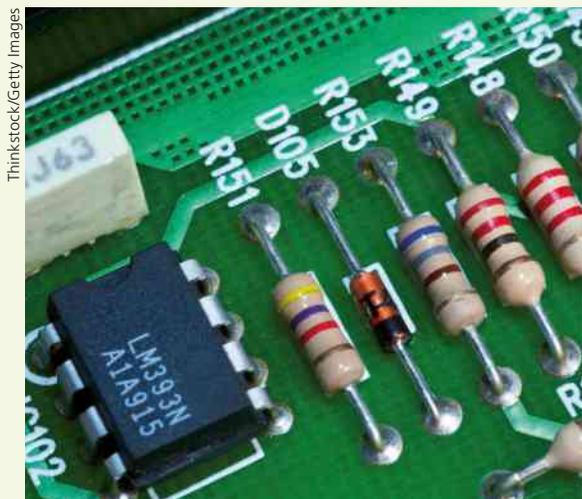


## Outros tipos de condutores de eletricidade

Alterando as condições físicas sob as quais são manipulados certos materiais, pode-se conseguir que as cargas elétricas fluam com muito mais facilidade. Uma vez estabelecidas tais condições, esses materiais têm uma enorme gama de aplicações na indústria.

### Semicondutores

Existem materiais que se comportam tanto como condutores quanto como isolantes, dependendo da temperatura a que estão submetidos, ao tipo de elemento que os acompanha ou a tensão submetida. Esses materiais são chamados de semicondutores.



Diodos e circuitos impressos são dispositivos cujo funcionamento se baseia na tecnologia de semicondutores.

O silício e o germânio — átomos com quatro elétrons na camada de valência — são semicondutores utilizados na fabricação de transistores e de circuitos integrados, fundamentais para a montagem de aparelhos eletrônicos e de computadores.

Com o aumento da temperatura, esses materiais liberam os elétrons para movimentar-se, comportando-se como condutores; e, em temperaturas baixas, tornam-se isolantes elétricos.

Também é possível “dopar” um semicondutor para transformá-lo em um bom condutor. Isso pode ser feito com átomos contendo cinco elétrons na camada de valência, tornando-o um condutor do tipo *N* (de “negativo”, denotando excesso de cargas negativas), ou com átomos de três elétrons na camada de valência, convertendo-o em um condutor do tipo *P* (de “positivo”, denotando carência de cargas negativas).

### Supercondutores

Um bom condutor comum sempre oferecerá alguma oposição ao fluxo de cargas elétricas, mesmo que pequena. Mas, em 1911, o físico holandês Heike Kamerlingh Onnes (1853-1926) observou que, no caso do mercúrio, essa oposição ficava bastante reduzida e eventualmente desaparecia quando era resfriado a 4 K ( $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Com isso, foi dada a largada à pesquisa de materiais que, quando resfriados a certa temperatura (temperatura crítica), permitem o fluxo intenso de cargas elétricas.

Esses materiais são chamados de supercondutores. Como essa característica só é observada a temperaturas próximas ao zero absoluto (0 K ou  $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), os ramos de pesquisa atualmente estão orientados para a busca de materiais supercondutores que possuam temperaturas críticas mais altas, pois o custo para manter esse nível de resfriamento é elevado.

Há um grande potencial de aplicação dos materiais supercondutores em transmissão de energia a grandes distâncias e em veículos magneticamente levitados (veja mais sobre supercondutores no capítulo 9 deste volume).

## Tipos de eletrização

A eletrização dos corpos ocorre quando um corpo ganha ou perde elétrons. Vimos que os veículos em movimento num dia seco são carregados eletricamente, devido ao atrito causado entre ele e o ar (eletrização por atrito). Quando encostamos no carro e tomamos um choque, somos eletrizados por contato.

Há também uma terceira forma de eletrização, que acontece quando dois corpos são colocados próximos, sem que haja contato: a eletrização por indução.

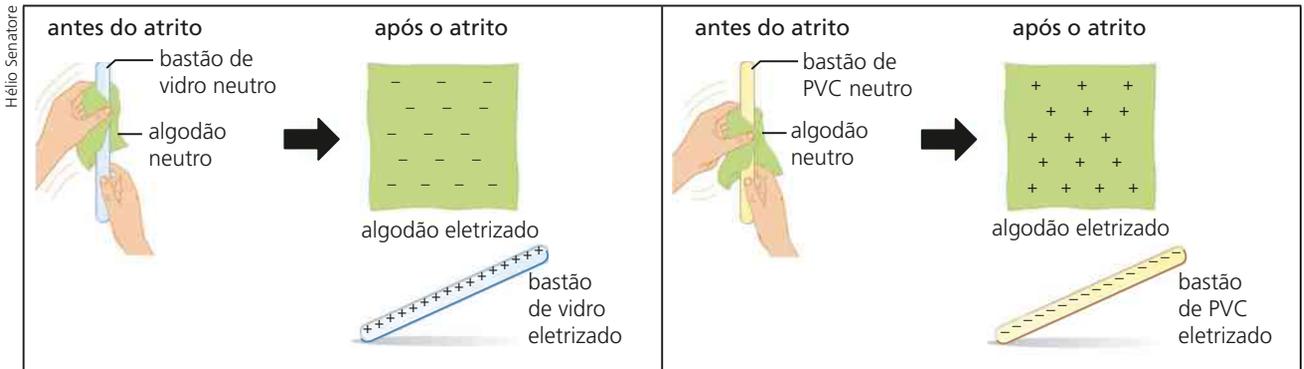
Vamos então detalhar cada uma dessas três maneiras de eletrizar os corpos.

## Eletrização por atrito

Quando atritamos dois corpos distintos, eletricamente neutros e que possuam uma facilidade mínima de ganhar ou perder elétrons, eles ficam eletrizados. Por exemplo, quando um pano de algodão neutro é esfregado num bastão de vidro também neutro, verifica-se a passagem de elétrons do vidro para o algodão.

De acordo com a série triboelétrica, após a fricção, o bastão de vidro fica eletrizado positivamente, por ter perdido uma quantidade de elétrons, e o algodão fica eletrizado negativamente, por tê-los recebido.

De modo análogo, mas com cargas inversas, ficam eletrizados o algodão e o PVC.



Verifique na série triboelétrica se os resultados das eletrizações mostradas nas figuras poderiam ser previstos. O que você espera que ocorra ao atritar uma peça de PVC contra uma superfície plana de vidro?

## Eletrização por contato

A eletrização por contato realiza-se quando dois corpos se tocam, desde que pelo menos um deles esteja eletrizado.

Mantidos em contato, os dois corpos formarão um único condutor cuja quantidade de carga será a soma algébrica das cargas iniciais dos dois corpos. Quando forem separados, a quantidade de carga que permanecerá em cada corpo dependerá de suas formas e dimensões.

No caso particular em que os corpos são esféricos, de mesmo material e mesmo raio, há uma redistribuição das cargas de forma que, na situação final, ambos ficam com o mesmo número delas.



Depois do contato, temos:  $Q'_A = Q'_B$ . De acordo com o Princípio de Conservação de Cargas:

$$Q_A + Q_B = Q'_A + Q'_B = Q'_A + Q'_A = 2Q'_A \quad \text{ou} \quad Q_A + Q_B = Q'_A + Q'_B = Q'_B + Q'_B = 2Q'_B$$

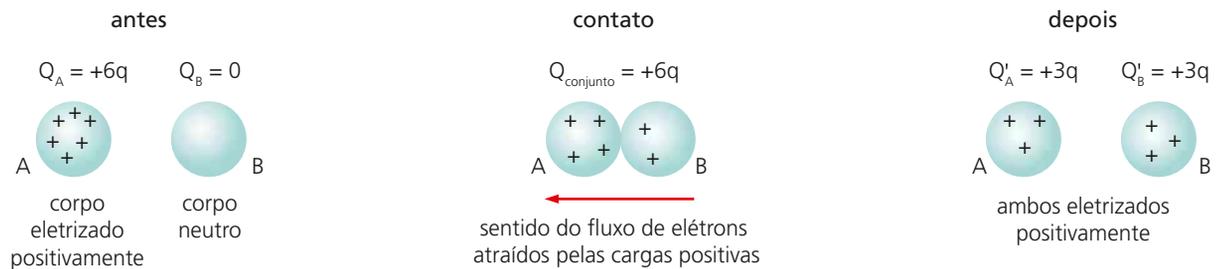
$$\text{Portanto: } Q'_A = Q'_B = \frac{Q_A + Q_B}{2}$$

No caso de  $n$  corpos idênticos, após o contato, cada um deles terá uma quantidade de carga:

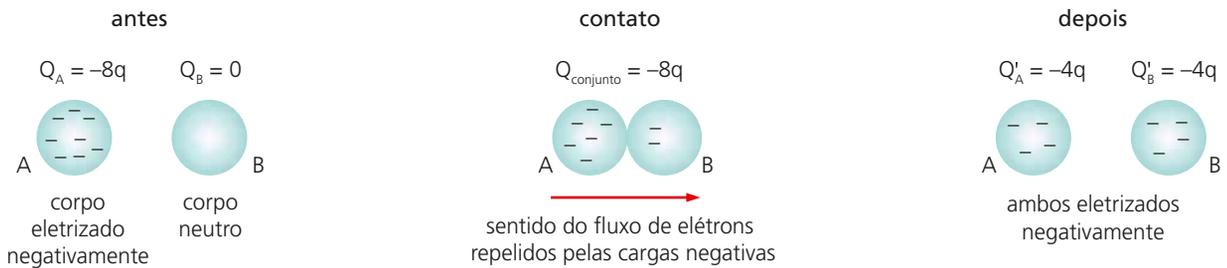
$$Q'_n = \frac{\sum Q}{n}$$

Podemos reconhecer três casos distintos em que há contato entre dois corpos esféricos idênticos:

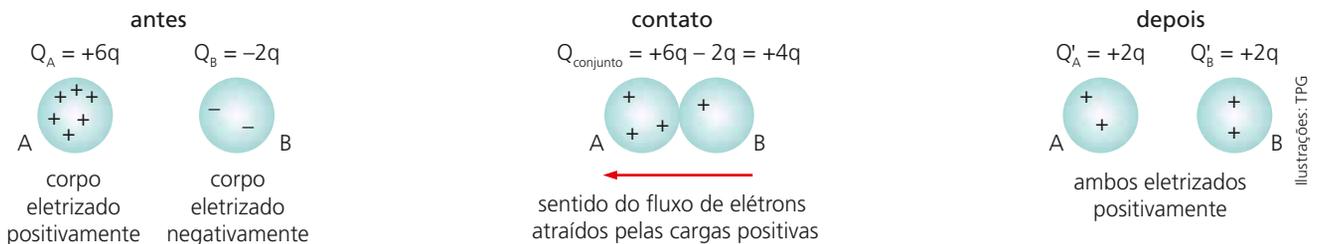
- 1ª caso: um deles está eletrizado positivamente e o outro apresenta-se neutro;



- 2ª caso: um deles está eletrizado negativamente e o outro apresenta-se neutro;



- 3ª caso: um deles está eletrizado positivamente e o outro, negativamente.



Nesse exemplo, a quantidade de carga total é positiva. Se a quantidade de carga total fosse negativa, os corpos terminariam eletrizados negativamente.

## Exercícios resolvidos

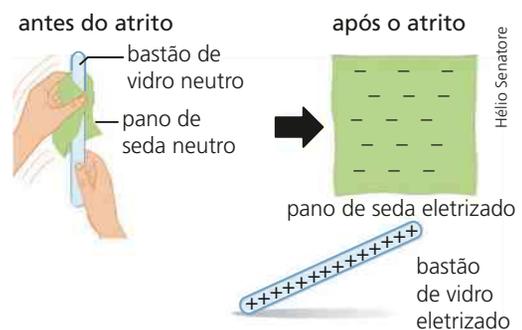
**ER4.** Um bastão de vidro perde  $3 \cdot 10^{13}$  elétrons, quando atritado com um pano de seda, sendo que ambos estavam inicialmente neutros. Considere  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  C o valor da carga de um elétron.

- Determine a quantidade de carga adquirida pelo pano de seda.
- O pano de seda já eletrizado, ao ser colocado em contato com uma bolinha de isopor inicialmente neutra e suspensa por um fio isolante, passa para ela metade de sua carga. Qual é a carga final do pano e do isopor?
- Que tipo de força de interação haverá se aproximarmos o bastão de vidro da bolinha de isopor?

### Resolução:

O bastão de vidro perde  $n = 3 \cdot 10^{13}$  elétrons para o pano de seda. Portanto, após o atrito, o vidro fica eletrizado positivamente e o pano, negativamente.

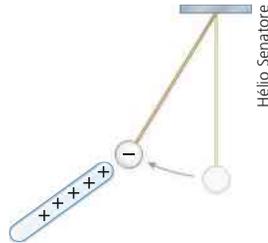
- O pano de seda adquire a seguinte quantidade de carga:  $Q = n \cdot e = 3 \cdot 10^{13} \cdot (-1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}) \Rightarrow Q = -4,8 \cdot 10^{-6} \text{ C}$ , onde o sinal negativo representa o sinal da carga do pano de seda.



b) Após o contato, tanto o pano como a bolinha de isopor ficam com cargas de mesmo sinal. Assim, do total das cargas, metade fica no pano e a outra metade vai para o isopor. Portanto, a carga final negativa de cada um deles é:

$$Q' = \frac{Q}{2} = \frac{-4,8 \cdot 10^{-6}}{2} \Rightarrow Q' = -2,4 \cdot 10^{-6} \text{ C}$$

c) Como o bastão de vidro está eletrizado positivamente e a bolinha de isopor, negativamente, na aproximação de um com o outro a força será de **atração**.



**ER5.** Considere três esferas metálicas idênticas e isoladas. Uma esfera A está eletrizada com carga  $4Q$ , e as esferas B e C têm, respectivamente, cargas neutra e  $Q$ . São colocadas em contato e depois separadas, na ordem que se segue, as seguintes esferas: A com B, B com C e, finalmente, C com A. Determine as cargas finais de A, B e C.

### Resolução:

Inicialmente, temos as esferas com suas respectivas cargas:

$$\begin{array}{ccc} \text{A} & \text{B} & \text{C} \\ Q_A = 4Q & Q_B = 0 & Q_C = Q \end{array}$$

Como as esferas são idênticas, após cada contato, elas ficam com cargas iguais. Portanto, seguindo a ordem dada, temos:

A com B:  $\begin{array}{ccc} \text{A} & \text{B} & \text{após o contato} \\ 4Q & 0 & \text{A} & \text{B} \\ & & 2Q & 2Q \end{array}$

B com C:  $\begin{array}{ccc} \text{B} & \text{C} & \text{após o contato} \\ 2Q & Q & \text{B} & \text{C} \\ & & 1,5Q & 1,5Q \end{array}$

C com A:  $\begin{array}{ccc} \text{C} & \text{A} & \text{após o contato} \\ 1,5Q & 2Q & \text{C} & \text{A} \\ & & 1,75Q & 1,75Q \end{array}$

Portanto, as cargas finais são:

$$\Rightarrow Q'_A = 1,75Q, Q'_B = 1,5Q \text{ e } Q'_C = 1,75Q.$$

De acordo com o Princípio de Conservação de Cargas Elétricas:

$$Q_A + Q_B + Q_C = Q'_A + Q'_B + Q'_C = \text{constante}$$

$$4Q + 0 + Q = 1,75Q + 1,5Q + 1,75Q = 5Q$$

## Eletrização por indução

O processo de eletrização por indução efetua-se quando um corpo previamente eletrizado (indutor) é colocado próximo (sem que haja contato) a um corpo condutor inicialmente neutro (a ser induzido) e promove uma movimentação dos elétrons pela superfície do material induzido.

Assim, por indução podemos eletrizar uma região de um corpo neutro positivamente ou negativamente.

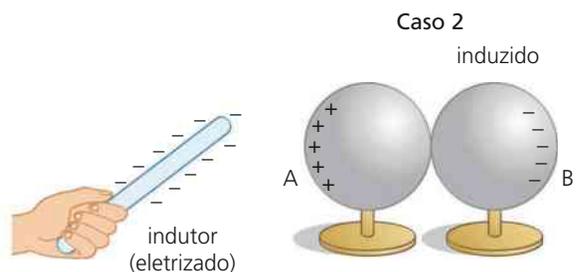
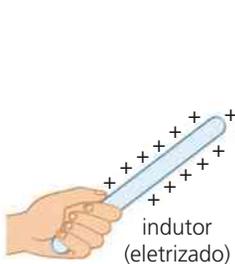
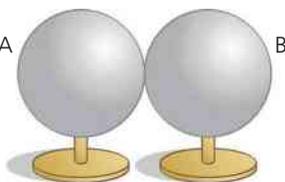
Considere duas esferas condutoras encostadas uma na outra, A e B, formando um único condutor não eletrizado, conforme a figura ao lado.

Ao aproximar um corpo indutor eletrizado positiva ou negativamente do corpo neutro, haverá uma movimentação dos elétrons livres do material de carga nula.

- Caso 1: se o indutor estiver eletrizado positivamente, os elétrons do corpo neutro serão atraídos o mais próximo possível do corpo eletrizado, de forma que a região (do corpo neutro) mais próxima do indutor fique negativa e a região oposta, positiva.
- Caso 2: análogo ao caso 1, com o indutor eletrizado negativamente.

Esse fenômeno, conhecido como indução eletrostática, confirma o Princípio de Atração e Repulsão.

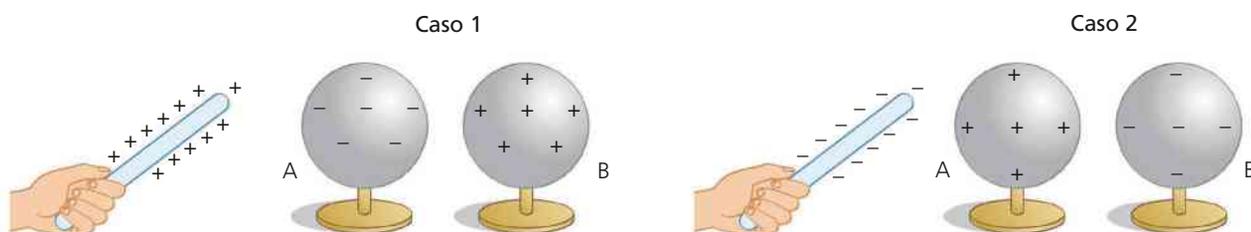
Ilustrações: Hélio Senatore



O fenômeno da indução é transitório e só acontece enquanto o indutor está próximo do corpo induzido.

Se as esferas A e B forem separadas, ainda na presença do indutor, teremos:

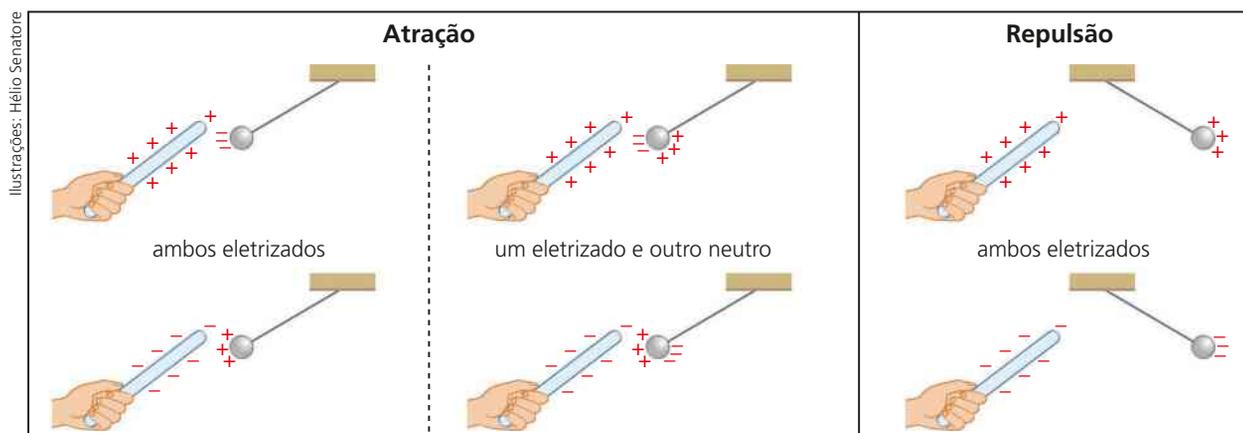
- Caso 1: a esfera A ficará eletrizada negativamente e a esfera B, positivamente;
- Caso 2: a esfera A ficará eletrizada positivamente e a esfera B, negativamente;



Ilustrações: Hélio Senatore

Assim, podemos concluir que, devido ao fenômeno da indução eletrostática, a atração entre dois corpos ocorre quando ambos estão eletrizados com cargas elétricas de sinais opostos ou um deles está eletrizado e o outro não.

A repulsão, porém, realiza-se só quando ambos os corpos estão eletrizados com cargas elétricas de mesmo sinal.



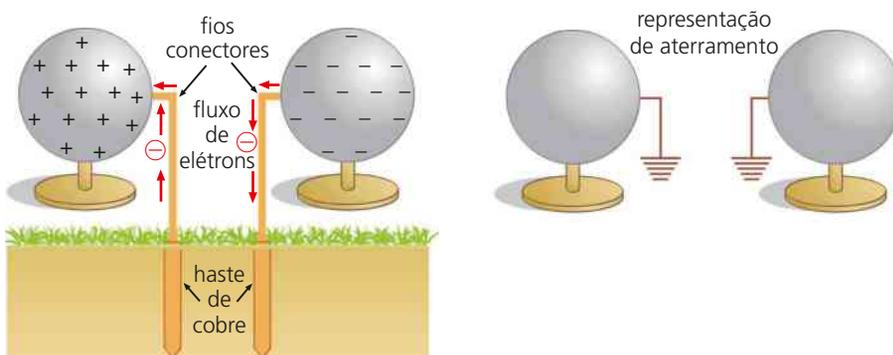
Ilustrações: Hélio Senatore

## Conectores ligados à terra

Elétrons precisam de um meio material para se deslocar. Uma vez encontrado esse meio, repelem-se mutuamente até alcançar as fronteiras do material onde eles estão.

Ora, como os elétrons procuram manter a maior distância entre si, todo condutor eletrizado negativamente e ligado à terra (dizemos que ele está aterrado) tende a descarregar-se: se estiver eletrizado positivamente, elétrons da superfície da terra serão atraídos, neutralizando-o.

O fio que faz a conexão do condutor eletrizado com a terra é chamado fio terra.





Os dois pinos chatos do plugue levam a eletricidade ao circuito, e o pino redondo faz o aterramento.

Levando em consideração esse fato, há uma lei que determina que todas as construções possuam rede de aterramento em suas instalações elétricas.

A ligação com a terra tem importância vital na preservação da segurança de pessoas e no funcionamento de aparelhos elétricos. Ela permite a descarga da eletricidade estática gerada por alguns aparelhos (geladeira, chuveiro, lavadora, secadora de roupas etc.), em razão do alto consumo de energia elétrica.

O aterramento desses eletrodomésticos evita os choques indesejáveis ao ligar um chuveiro ou abrir uma geladeira, por exemplo. Por isso, desde 2010 todos os aparelhos elétricos devem ser fabricados com plugues de três pinos, com o do meio destinado ao aterramento.

## Eletroscópios

São chamados de eletroscópios os dispositivos que verificam se um corpo ou material está ou não eletrizado, sem contudo identificar o sinal da carga elétrica. Aqui veremos dois deles.

### Pêndulo eletrostático

É um conjunto constituído por um suporte, um fio isolante (por exemplo, de náilon ou seda) preso a ele, com uma pequena esfera não eletrizada (que pode ser de isopor ou cortiça) pendurada nele.

Para verificar se um corpo está eletrizado ou não, basta aproximá-lo da esfera neutra do pêndulo. Se a esfera não se mover, o corpo é neutro; se a esfera for atraída devido à indução eletrostática, o corpo está eletrizado.



Ilustrações: Hélio Senatore



O corpo eletrizado atrai a esfera neutra por indução.

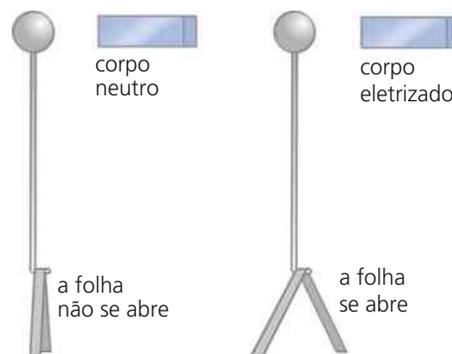


Aproximando um corpo neutro da esfera não eletrizada, não há atração nem repulsão.

### Eletroscópio de lâminas ou folhas

É um conjunto que pode ser constituído de um frasco de Erlenmeyer com uma rolha que conjuga uma esfera metálica e uma haste condutora, em cuja extremidade inferior na forma de gancho é colocada uma lâmina ou folha metálica delgada (por exemplo, de ouro ou de alumínio) dobrada ao meio. A lâmina pode se abrir ou não sob o efeito da eletrização, como mostra a figura (com a lâmina já aberta).

Para verificar se um corpo está ou não eletrizado, basta aproximá-lo da esfera metálica. Se ele estiver eletrizado, a lâmina (folha) se abrirá por repulsão, devido à indução eletrostática, ficando eletrizada com cargas elétricas de mesmo sinal. Caso ela não se abra, o corpo em questão é eletricamente neutro.



Um eletroscópio de fácil construção.

O *versorium* de Gilbert

William Gilbert (1540-1603) foi um dos médicos da rainha da Inglaterra Elizabeth I. Na época em que ele viveu, imaginava-se que fenômenos elétricos e magnéticos, tão cativantes por parecerem quase mágicos, poderiam ter algumas propriedades terapêuticas. Tendo conseguido uma carta de certo Petrus Peregrinus com a descrição de máquinas magnéticas, dedicou-se a pesquisar ímãs e a eletrização de objetos. Fruto dessa pesquisa é o livro *De Magnete*, em que Gilbert descreveu seus dezessete anos de cuidadosa pesquisa, apresentando experiências e teorias a respeito de fenômenos elétricos e magnéticos. Deve-se a ele, aliás, a distinção entre esses dois tipos de fenômeno, como veremos adiante.

Leia um trecho do livro *Faraday e Maxwell — Eletromagnetismo: da indução aos dinamos*, sobre esse cientista. Você verá que, naquela época, a eletricidade e o magnetismo eram considerados manifestações de um mesmo fenômeno.

O trabalho de Gilbert baseava-se em análises experimentais que realizou durante suas investigações. Por exemplo, para estudar os fenômenos elétricos construiu um pequeno dispositivo, denominado “*versorium*”.

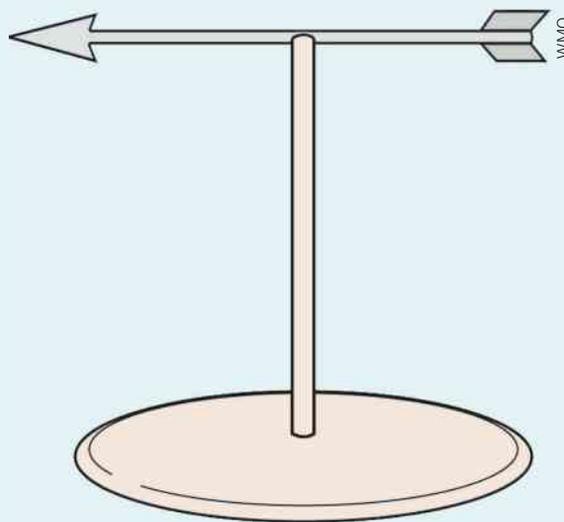
Você já deve ter experimentado situações que envolvem fenômenos similares aos estudados por Gilbert. Já deve ter observado, por exemplo, que quando atritamos papel a um pente de plástico, este se torna capaz de atrair corpos leves, como papeizinhos picados. Ou talvez tenha notado que, ao desligar uma televisão, os pelos do seu braço próximo à tela se erguem. Explicamos a atração observada dizendo que o pente e a tela da televisão ficaram eletrizados.

Até 1600, muito pouco se conhecia sobre esse tipo de fenômeno. Acreditava-se, por exemplo, que apenas uma substância era capaz de se eletrizar quando atritada: o âmbar, que é um tipo de resina natural.

O “*versorium*” de Gilbert era bem parecido com esse da nossa experiência. Nos seus trabalhos com esse dispositivo, o cientista inglês conseguiu ampliar os conhecimentos de eletricidade, concluindo que a possibilidade de se atritar não era exclusiva do âmbar. O vidro, o enxofre e algumas pedras preciosas também se tornavam eletrizados, e, portanto, atraíam para si corpos leves, quando atritados. Gilbert também dedicou atenção aos fenômenos magnéticos. Naquela época, já se conhecia a mag-

netita, uma substância especial, que atraía naturalmente corpos constituídos de ferro. Conheciam-se algumas propriedades dos fenômenos magnéticos; por exemplo, ao se dividir um magneto, um ímã, em dois, obtinham-se necessariamente dois novos ímãs; o termo polo magnético já era empregado para representar a diferença entre duas extremidades de um ímã. Os europeus utilizavam a bússola, uma agulha magnetizada, para se orientar em suas viagens. A análise desses fatos, enriquecida pelas observações registradas pelos navegadores, impulsionou Gilbert a considerar a orientação da bússola na terra, comparando o nosso planeta a um grande ímã. Tomando os ímãs como modelo, Gilbert defendeu que, no caso da Terra, um dos polos magnéticos estaria no Norte geográfico e o outro no Sul. Com base ainda na comparação do planeta a um magneto, definiu o ímã a partir de um princípio geral, em que o polo norte de um atrairia sempre o polo sul do outro.

Para melhor explorar as propriedades magnéticas da Terra, Gilbert construiu um pequeno ímã em forma de esfera, prendendo nele massas de ferro para simular as montanhas do planeta. Posicionou bússolas nesse ímã, analisando suas orientações. Tentou explicar, então, a partir do magnetismo terrestre, tanto o movimento dos planetas quanto a atração dos corpos na Terra.



O *versorium* de William Gilbert. Uma agulha metálica apoiada sobre um estilete, muito parecido com uma bússola. O *versorium* identificava as “virtudes elétricas” dos materiais.

Ainda com base nos experimentos que realizou, Gilbert mostrou que os fenômenos elétricos tinham características diferentes das dos fenômenos magnéticos. Por exemplo, o ímã não precisava de atrito para que sua propriedade magnética se manifestasse. O atrito nem aumentava nem diminuía o seu poder de atração. Além disso, os corpos eletrizados atraíam para si objetos que não sofriam influências dos ímãs. Essas e outras diferenças marcantes levaram-no a concluir que os fenômenos elétricos tinham causas distintas das dos fenômenos magnéticos.

O trabalho de Gilbert não teve muitos seguidores. Ao longo do século XVII, alguns filósofos naturais se dedicaram ao magnetismo, tentando explicar a natureza do fenômeno. A eletricidade só despertou maior curiosidade no século XVIII.

GUERRA, Andreia; BRAGA, Marco; REIS, José Claudio. *Faraday e Maxwell — Eletromagnetismo: da indução aos dinamos*. São Paulo: Atual, 2004.

O mérito de Gilbert foi ter mantido uma atitude cética em relação aos escritos de que dispunha. Esta é a capa da versão inglesa da obra, de 1628.



SSPL/Getty Images

## Organizando as ideias do texto

1. A que conclusão Gilbert chegou a partir dos experimentos realizados com o *versorium*?
2. Quais são as diferenças apontadas por Gilbert entre os fenômenos elétricos e magnéticos?

Professor, veja as [Orientações Didáticas](#).

## Exercícios resolvidos

**ER6.** Um pêndulo elétrico é formado por uma pequena esfera metálica condutora, eletricamente neutra e suspensa por um fio isolante de seda. Um bastão de vidro eletrizado por atrito com uma flanela de lã é aproximado lentamente da esfera até tocá-la.

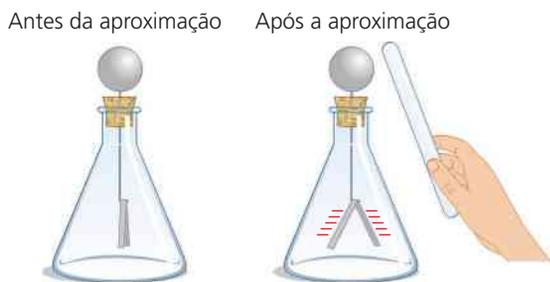


- a) O bastão de vidro está eletrizado positivamente ou negativamente? Por quê?
- b) Descreva o que acontece com a bolinha, durante a aproximação do bastão, até este tocá-la.
- c) Descreva o que acontece com a bolinha após o toque.

### Resolução:

- a) O bastão de vidro está eletrizado positivamente, porque o vidro está acima da lã na tabela da série triboelétrica, ou seja, ele possui maior facilidade em perder elétrons.
- b) Durante a aproximação, devido à indução eletrostática, a bolinha neutra é atraída pelo bastão.
- c) Com o toque do bastão, a bolinha que estava neutra fica eletrizada positivamente, por contato. Portanto, como ambos são positivos, ocorre uma repulsão entre eles.

**ER7.** As figuras mostram um eletroscópio eletricamente neutro, antes e depois da aproximação de uma barra condutora já carregada. Quando a barra estiver bem próxima da esfera, as lâminas do eletroscópio se abrem devido à repulsão causada entre suas cargas negativas.

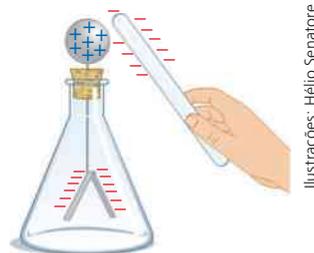


- a) Qual é o sinal da barra condutora carregada? Justifique sua resposta.
- b) O que acontece com as lâminas, se a barra condutora toca a esfera do eletroscópio e em seguida é afastada?

### Resolução:

- a) Se as lâminas estão eletrizadas negativamente, devido à indução eletrostática, a esfera do ele-

troscópio deve estar eletrizada positivamente; sendo assim, a barra só pode estar carregada com sinal negativo.



Ilustrações: Hélio Senatore

- b) Com o toque, o bastão transfere elétrons para o eletroscópio, eletrizando-o negativamente, por contato. Portanto, afastando a barra, as lâminas continuarão abertas devido à repulsão.



## ATIVIDADE PRÁTICA



### Construindo um eletróforo

Máquinas eletrostáticas são aparelhos capazes de fornecer, de modo contínuo, quantidades notáveis de carga elétrica. O eletróforo é uma máquina de indução eletrostática, desenvolvida por Alessandro Volta (1745-1827) em 1775, a partir de experimentos conduzidos por Johan Carl Wilke (1732-1796) com a série triboelétrica. Vamos construí-lo.



#### Material

- uma placa de material isolante, como PVC ou outro material plástico rígido
- um disco circular de alumínio (pode ser uma tampa de panela plana, um pratinho de alumínio ou mesmo um disco de papelão forrado com folha de papel-alumínio)
- um cabo isolante de madeira ou plástico
- um pedaço de lã ou seda



Sérgio Dotta Jr./The next

#### Procedimento

- I. Parafusem o cabo no centro do disco metálico.

II. Esfreguem a placa de material isolante com um pedaço de lã ou seda para carregá-la.



Fotografias: Sérgio Dotta Jr./The next

III. Coloquem o disco metálico sobre a placa e um estudante deve tocar a parte superior do disco com um dedo, sem levantá-lo da placa.



IV. Em seguida, o estudante deve erguer o disco metálico pelo cabo isolante. Aproximando os dedos da bandeja, o estudante pode produzir faíscas entre o disco metálico e o seu dedo ou até produzir uma centelha com uma lâmpada fluorescente.



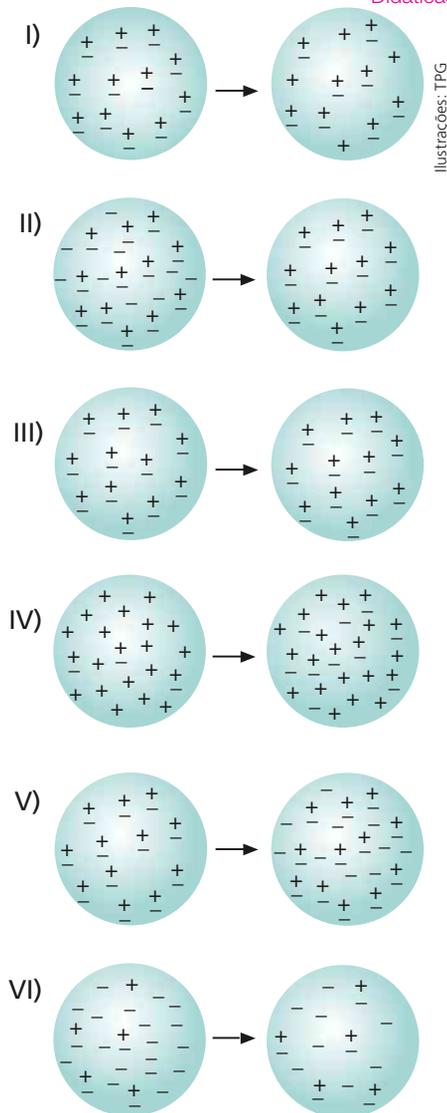
**Nota:** um aspecto interessante desse experimento é que você pode repetidamente recarregar a bandeja, simplesmente tocando-a com seu dedo, sem voltar a esfregar a base.

## Discussão

1. De onde vem a energia necessária para produzir a faísca, quando aproximamos o eletróforo da lâmpada ou do dedo?
2. Consulte a série triboelétrica, da página 17, e indique quais serão os sinais das cargas:
  - a) da placa de PVC após o atrito;
  - b) do disco de alumínio, antes de tocá-lo com o dedo;
  - c) do disco de alumínio, após tocá-lo com o dedo;
  - d) do retalho de lã ou seda.
3. Aproxime o retalho de lã ou seda do disco metálico; o que você espera que aconteça?
4. Sugira um processo pelo qual pode-se eletrizar o disco metálico com a mesma carga da placa de PVC.
5. Às vezes o eletróforo se descarrega após algumas atividades; recomenda-se, nessas ocasiões, aplicar sobre ele o ar quente de um secador de cabelos. Por que motivo isso funciona?

Ver Orientações Didáticas.

**EP1.** “Em termos elétricos”, verifique o que aconteceu com cada um dos corpos abaixo: *Respostas nas Orientações Didáticas.*



Ilustrações: TPG

**EP5. a)** O material X sucede o algodão na série triboelétrica, pois ficou eletrizado negativamente ao receber elétrons do tecido.

**EP2.** Em um laboratório, quer-se eletrizar um corpo, inicialmente neutro, por algum processo de eletrização para que ele tenha uma determinada quantidade final de carga elétrica. Então:

- o que deve ser realizado para que esse corpo se eletrize positivamente? *Deve-se retirar desse corpo certa quantidade de elétrons.*
- se a quantidade de elétrons envolvidos no processo for de  $5 \cdot 10^{20}$ , qual é o módulo da quantidade de carga do corpo após a eletrização? Dada a carga elementar:  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ . **80 C.**

**EP3.** Considere 3 corpos,  $M$ ,  $N$  e  $P$ . Em um sistema isolado,  $M$  e  $N$  se atraem e  $N$  e  $P$  se repelem. Determine os sinais das cargas de  $N$  e  $P$  nos seguintes casos:

- $M$  com carga positiva;  $N$  e  $P$  negativos
- $M$  com carga negativa.  $N$  e  $P$  positivos.

**EP4.** Em um sistema eletricamente isolado contendo três corpos,  $A$ ,  $B$  e  $C$ , com cargas iniciais  $Q_A = 4 \text{ C}$ ,  $Q_B = -8 \text{ C}$  e  $Q_C = 0$ , respectivamente, verifica-se no seu interior um processo de transferência de elétrons entre eles. Ao final, o corpo  $A$  ficou com carga  $Q'_A = 2 \text{ C}$  e o corpo  $B$  com  $Q'_B = -5,2 \text{ C}$ . Sendo  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$  o valor absoluto da carga elementar, determine:

- a quantidade total de carga elétrica existente no sistema;  **$-4 \text{ C}$**
- a carga final do corpo  $C$ ;  **$Q'_C = -0,8 \text{ C}$**
- a quantidade de elétrons que o corpo  $C$  ganhou ou perdeu. **Ganhou  $5 \cdot 10^{18}$  elétrons.**

**EP5.** Dois materiais, eletricamente neutros, são atritados: um material  $X$  em forma de placa e um tecido de algodão, que fica eletrizado positivamente com carga  $8 \mu\text{C}$ . Em seguida, o tecido de algodão é colocado em contato com uma bolinha de alumínio suspensa em um fio isolante e inicialmente neutra.

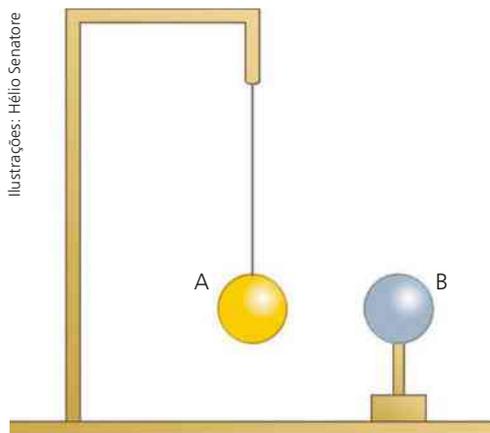
- Sabe-se que, na série triboelétrica, o algodão ocupa uma posição neutra, isto é, não possui boa tendência para doar nem para receber elétrons. Nessas condições, o material  $X$  ocupa na lista da série uma posição que precede ou sucede o algodão? Por quê?
- No contato entre o tecido de algodão e a bolinha de alumínio houve uma transferência de  $+5 \mu\text{C}$  de carga. Qual é a carga final do tecido de algodão? *A carga final do tecido é de  $+3 \mu\text{C}$ .*
- Aproximando-se a placa de material  $X$  da bolinha de alumínio suspensa, depois que ela teve contato com o algodão, haverá atração ou repulsão entre elas? Por quê? *Atração, porque ambas possuem sinais opostos, a placa eletrizada positivamente, e a bolinha, negativamente.*

**EP6.** Quatro pequenas esferas,  $A$ ,  $B$ ,  $C$  e  $D$ , de tamanhos iguais, separadas umas das outras o suficiente para não serem reciprocamente atraídas, estão inicialmente eletrizadas com cargas  $Q_A = 3Q$ ,  $Q_B = Q$ ,  $Q_C = 0$  e  $Q_D = 8Q$ . São colocadas em contato, simultaneamente, as três esferas eletrizadas. Em seguida, são feitos mais os seguintes contatos, nesta ordem:  $A$  com  $C$ ,  $B$  com  $C$  e, finalmente,  $D$  com  $C$ . Sabendo que, após cada contato, as esferas ficaram suficientemente isoladas umas das outras, determine a carga elétrica final de cada esfera.

**$A = 2Q$ ,  $B = 3Q$ ,  $C = 3,5Q$  e  $D = 3,5Q$**

**EP7.** Para demonstrar algumas propriedades da eletrização de corpos, o Paulinho, um ótimo estudante de Física, montou um dispositivo constituído de duas pequenas esferas,  $A$  e  $B$ , condutoras e idênticas, com  $A$  suspensa por um fio isolante, constituindo um pêndulo

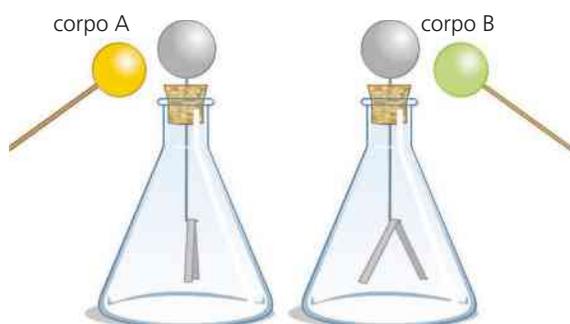
elétrico, e  $B$  apoiada em um suporte móvel de material isolante, como mostra a figura.



Para iniciar a demonstração, Paulinho eletrizou a esfera  $B$  atritando-a vigorosamente com uma escova de cobre, que recebeu elétrons com uma quantidade de carga  $-Q$ . Como o Paulinho não é bobo, ao friccionar os materiais, ele não segurou diretamente a esfera  $B$ , mas sim seu suporte, deixando-a depois afastada da esfera  $A$ , que estava neutra.

- Com que carga ficou eletrizada a esfera  $B$ ?  $Q_B = +Q$ .
- Por que Paulinho segurou pelo suporte e não diretamente a esfera  $B$ , ao atritá-la com a escova?  
*Para não descarregar a esfera  $B$ .*
- O que acontecerá quando a esfera  $B$  se aproximar da esfera  $A$ ? *Ocorrerá uma atração mútua, devido à indução eletrostática.*
- O que acontecerá quando a esfera  $B$  tocar a esfera  $A$ ? *Repulsão*
- Qual é a quantidade final de carga de cada uma das esferas, após o contato?  $Q'_A = \frac{+Q}{2}$  e  $Q'_B = \frac{+Q}{2}$

**EP8.** Foram feitas duas experiências, ambas com o eletroscópio inicialmente neutro. Aproximando um corpo  $A$  da esfera condutora do eletroscópio, as folhas permaneceram fechadas e, acercando um corpo  $B$ , as folhas abriram-se, como mostra a figura.

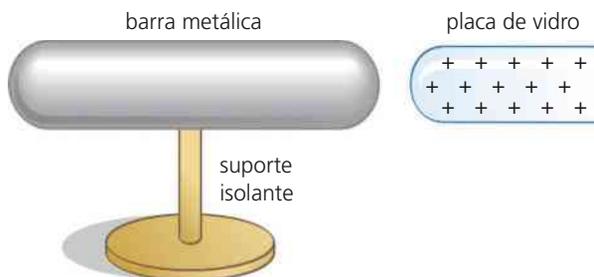


*Respostas nas Orientações Didáticas.*

- Explique o que determinou o "comportamento" das folhas em ambos os casos.

- Dê o sinal das cargas dos corpos eletrizados.
- Caso houvesse contato de cada um dos corpos, respectivamente, com a esfera condutora do eletroscópio, o que aconteceria com as folhas?
- Existe alguma maneira de descobrir o sinal da carga do corpo eletrizado?

**EP9.** (UFSC) Uma placa de vidro eletrizada com carga positiva é mantida próxima a uma barra metálica isolada e carregada com carga  $+q$ , conforme mostra a figura abaixo.



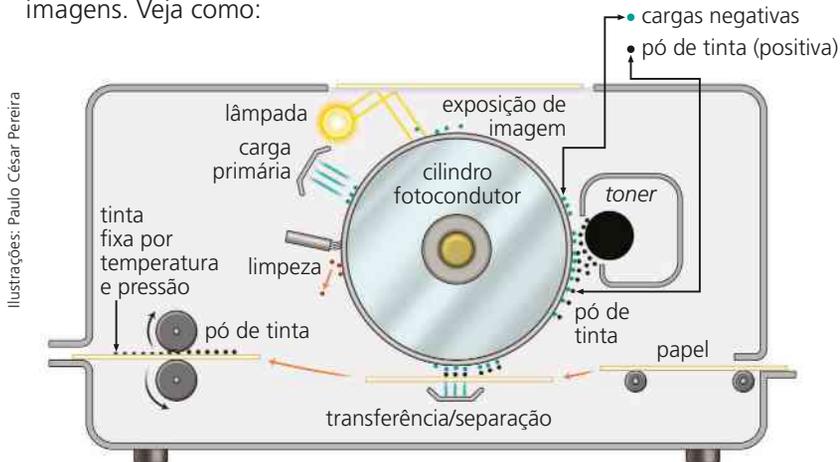
É CORRETO afirmar que:

- se a barra for conectada ao solo por um fio condutor, a placa de vidro for afastada e, a seguir, a ligação com o solo for desfeita, a barra ficará carregada negativamente.
- se a barra for conectada ao solo por um fio condutor e, a seguir, for desconectada novamente, com a placa de vidro mantida próxima, a placa de vidro ficará neutra.
- se a placa de vidro atrair um pequeno pedaço de cortiça suspenso por um fio isolante, pode-se concluir que a carga da cortiça é necessariamente negativa.
- se a placa de vidro repelir um pequeno pedaço de cortiça suspenso por um fio isolante, pode-se concluir que a carga da cortiça é necessariamente positiva. **X**
- nas condições expressas na figura, a carga  $+q$  da barra metálica distribui-se uniformemente sobre toda a superfície externa da barra.

**EP10.** Cite algumas situações em que você pode levar um choque, ou seja, situações em que ocorre uma rápida transferência de cargas elétricas entre seu corpo e outro. *Resposta nas Orientações Didáticas.*

# Força elétrica

Você certamente já viu alguém operando uma máquina fotocopidora. Essas máquinas utilizam cargas eletrostáticas para reproduzir textos e imagens. Veja como:



Processo de obtenção de fotocópias.

Dentro das máquinas fotocopadoras há um cilindro revestido com um material que funciona como condutor na presença de luz e como isolante no escuro. Vimos no capítulo anterior que os semicondutores apresentam essa característica.

No início do processo, esse cilindro é eletrizado. Em seguida, uma luz intensa ilumina o documento que será copiado. A imagem desse documento é refletida por um jogo de espelhos até chegar ao cilindro fotocondutor.

Sabemos que quanto mais escuro é um corpo, menos luz ele refletirá. Portanto, as partes mais claras do documento refletirão mais luz e as mais escuras, menos.

A luz refletida no cilindro fotocondutor promoverá uma alteração das suas cargas elétricas, de modo que as partes mais iluminadas sejam descarregadas e as áreas mais escuras permaneçam eletrizadas.

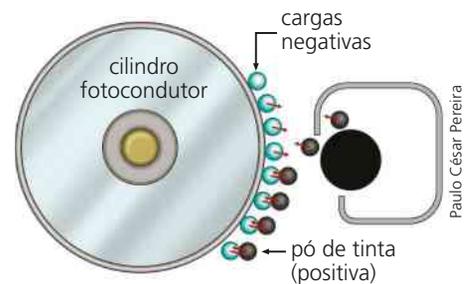
*Toner* é uma tinta em pó eletrizada com carga oposta à carga do cilindro, o que faz suas partículas serem atraídas por ele.

Na etapa seguinte, as partículas do *toner* são transferidas para o papel. Antes, a folha de papel é transportada e passa por uma unidade de transferência onde recebe carga de mesmo sinal que o cilindro fotocondutor, porém mais intensa. Assim, as partículas de tinta são atraídas pelo papel.

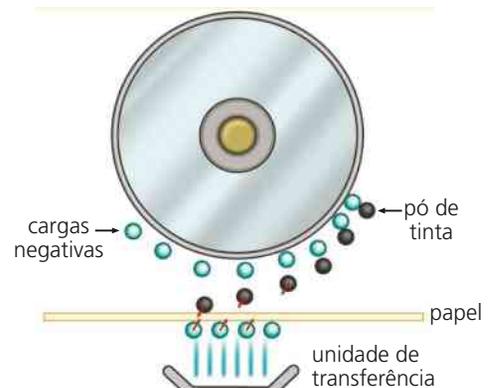
Em seguida, as partículas de tinta são fixadas nas folhas de papel com aplicação de pressão e aumento de temperatura.



As fotocopadoras funcionam por eletrização da área sombreada de um cilindro, e essa sombra é a imagem que desejamos copiar.



Aplicação do *toner*.



Transferência do *toner* para o papel — a palavra **xerografia** significa, literalmente, cópia a seco.

Veremos neste capítulo que, quando dois corpos eletricamente carregados são repelidos ou atraídos, como as partículas do *toner* e o cilindro da máquina fotocopadora, há uma interação eletrostática entre as partes, manifestada por forças de natureza eletromagnética.

As forças eletromagnéticas estão entre as quatro forças fundamentais da natureza que determinam as interações entre as partículas, desde as microscópicas até as gigantescas, como ocorre com os corpos celestes do Universo. São elas:

- **força nuclear forte:** é a que une prótons e nêutrons no núcleo do átomo.
- **força nuclear fraca:** é a que causa o decaimento radioativo do núcleo de certos átomos.
- **força gravitacional:** é a que atua em todas as partículas no Universo; ela é sempre atrativa, nunca repulsiva. É a força responsável pelo nosso peso, por manter os planetas girando em torno do Sol, por manter a Lua orbitando a Terra, por deixar as galáxias agrupadas etc. A força de atração em termos macroscópicos foi descrita pela Lei da Gravitação Universal.
- **força eletromagnética:** é a força de interação (atração ou repulsão) entre corpos possuidores de cargas elétricas e/ou corpos magnetizados.

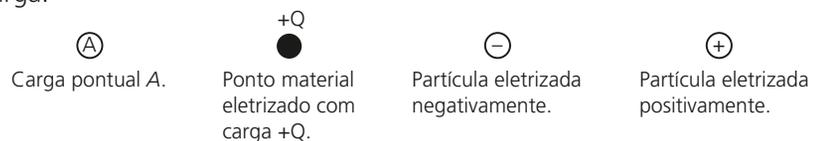
O estudo dessas quatro forças fundamentais complementa as leis de Newton da Mecânica Clássica, que descrevem todos os fenômenos que envolvem a ação de forças externas sobre corpos macroscópicos, mas que não podem ser aplicadas nos casos em que há variação de massa, quando eles se deslocam com velocidade próxima à da luz, ou ainda, em corpos microscópicos com escalas atômicas ou nucleares.

## Carga elétrica puntiforme

Sabemos que aproximando dois condutores, com pelo menos um deles eletricamente carregado, ocorrerá uma indução eletrostática entre eles, provocando alterações nas respectivas distribuições de carga.

Entretanto, se as dimensões dos corpos forem desprezíveis em relação à distância que os separa — situação em que são chamados pontos materiais —, não tem sentido dizer que há uma indução eletrostática, nem tampouco esperar alterações na distribuição de cargas. Portanto, **carga elétrica puntiforme** é a carga elétrica armazenada em um ponto material.

Ao longo deste curso, usaremos os termos “ponto material eletrizado”, “partícula eletrizada” ou “carga pontual” como sinônimos de carga elétrica puntiforme. Sua representação será como mostrado a seguir, independentemente do valor da carga.



## Submúltiplos da unidade de carga elétrica

Vimos no capítulo anterior que o módulo da carga elétrica de um elétron ou próton (carga elementar) é:  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$  (*coulomb*). Seu valor foi determinado por Robert Millikan e é a menor carga que um corpo eletrizado pode ter. A propósito, Millikan recebeu o prêmio Nobel de Física em 1923 pelo estudo da determinação da carga elementar.

Uma partícula eletrizada com carga  $Q = 1 \text{ C}$  possui uma quantidade muito grande de prótons em excesso. Isso pode ser confirmado calculando o número  $n$  de prótons:

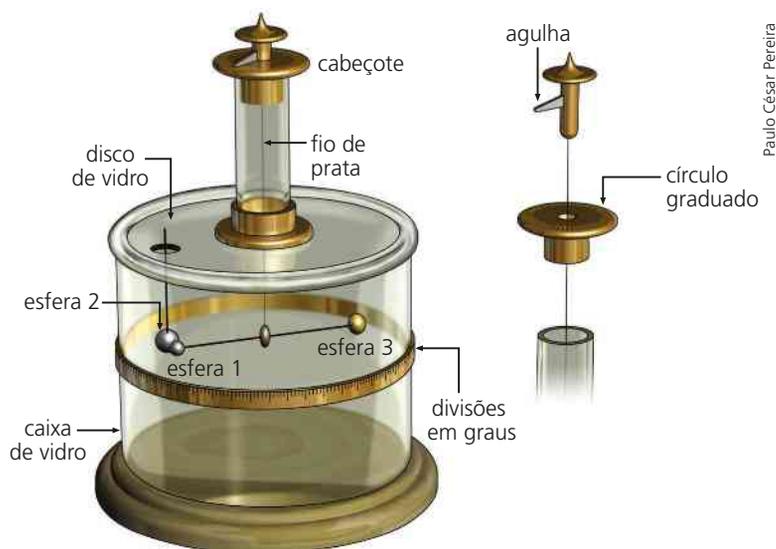
$$\text{Sendo } Q = n \cdot e \Rightarrow n = \frac{Q}{e} = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19}} \Rightarrow n = 6,25 \cdot 10^{18} \text{ prótons ou elétrons.}$$

Em geral, as quantidades de elétrons transferidos entre corpos são menores que  $6,25 \cdot 10^{18}$ . Portanto, na Eletrostática, é usual trabalhar-se com quantidade de cargas menores que 1 coulomb. Então, faz-se necessária a utilização dos seus submúltiplos, entre os quais os mais usuais são:

- milicoulomb:  $1 \text{ mC} = 10^{-3} \text{ C}$ ;
- microcoulomb:  $1 \mu\text{C} = 10^{-6} \text{ C}$ ;
- nanocoulomb:  $1 \text{ nC} = 10^{-9} \text{ C}$ .

## Força elétrica — Lei de Coulomb

A força elétrica de interação entre duas partículas eletrizadas foi determinada e comprovada experimentalmente pelo físico e engenheiro francês Charles Augustin de Coulomb (1736-1806), por meio de uma de suas invenções, a balança de torção. A denominação da unidade de carga elétrica no sistema internacional, o *coulomb* (símbolo C), foi dada em homenagem a ele.



A balança de torção foi apresentada por Coulomb à Academia Francesa de Ciências, no ano de 1785, para demonstrar sua teoria, hoje conhecida como Lei de Coulomb.

A balança de torção é constituída por uma caixa e um tubo cilíndricos de vidro — com o tubo acoplado na base superior da caixa.

Na extremidade superior do tubo está preso um cabeçote com uma agulha isolante horizontal, cujo deslocamento pode ser medido por um micrômetro de torção, um instrumento semelhante a um transferidor.

Além disso, uma barra isolante horizontal, com duas esferas metálicas (1 e 3) presas nas extremidades, é suspensa por um fino fio de prata preso ao cabeçote. A barra isolante pode girar livremente diante de uma graduação de  $0^\circ$  a  $360^\circ$ , inscrita numa fita de papel colada na caixa de vidro.

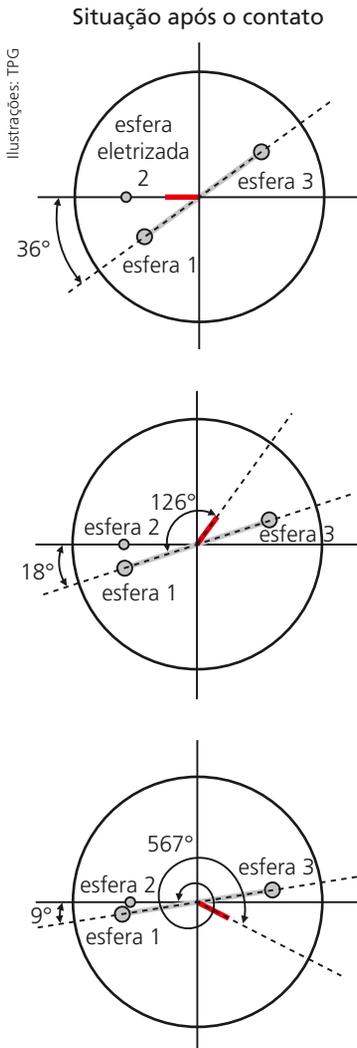
O experimento é realizado introduzindo-se uma barrinha isolante com uma esfera metálica (2) previamente eletrizada e fixada na sua extremidade inferior, por um orifício aberto próximo da borda da base superior da caixa de vidro. Veja a representação da vista superior da situação inicial do experimento.



O contato da esfera 2 com a esfera 1, inicialmente neutra, eletriza-a com cargas de mesmo sinal. Por isso, as esferas se repelem devido à ação da força elétrica, provocando uma torção no fio de prata.

O deslocamento angular efetuado pela barra isolante, no sentido anti-horário, é medido pela fita de papel colada na caixa de vidro.

Em seguida, verifica-se qual é a rotação que o cabeçote sofre, no sentido horário, aumentando-se a torção no fio de forma que o deslocamento angular sofrido pela barra isolante caia pela metade, e depois para a metade da metade, e assim sucessivamente.



Na experiência relatada por Coulomb:

- As esferas ficaram eletrizadas: a esfera da barra móvel afastou-se 36° da fixa e ali equilibrou-se (a força de repulsão elétrica entre as esferas é equilibrada pela força de torção do fio). Veja na figura ao lado como ficou a balança de torção por uma vista superior.
- Girando o cabeçote em 126° no sentido horário, diminuiu o deslocamento angular sofrido pela barra isolante para aproximadamente metade (18°). Conclui-se que, para diminuir o ângulo para a metade do valor inicial (diminuindo a distância, portanto), a força de torção no fio teve de ser aumentada 4 vezes:  $126^\circ + 18^\circ = 144^\circ = 4 \times 36^\circ$ .
- Girando o cabeçote até 567°, diminuiu novamente o ângulo para aproximadamente metade da abertura anterior (9°). Conclui-se, portanto, que, para diminuir o ângulo pela metade, a força de torção teve de ser aumentada 4 vezes, pois:  $567^\circ + 9^\circ = 576^\circ = 4 \times 144^\circ$ .

Essa experiência permite concluir que o módulo da força de interação é inversamente proporcional ao quadrado da distância; essa relação pode ser expressa com o símbolo  $\propto$ , "proporcional a":

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

Repetindo a experiência com diferentes quantidades de carga elétrica, Coulomb estabeleceu também que as intensidades das forças elétricas eram diretamente proporcionais ao produto das quantidades de carga das esferas 1 ( $Q_1$ ) e 2 ( $Q_2$ ).

Assim, Coulomb concluiu que:

A intensidade da força elétrica entre duas cargas elétricas puntiformes é diretamente proporcional ao produto dos valores das cargas e inversamente proporcional ao quadrado da medida da distância que as separa.

Matematicamente:

$$F \propto \frac{Q_1 \cdot Q_2}{d^2}$$

Entretanto, a intensidade dessas forças de interação depende do meio em que as cargas estão imersas e do sistema de unidades adotado. Para fazer esse ajuste, os valores das cargas são multiplicados por uma constante de proporcionalidade, chamada de **constante eletrostática**, representada por  $k_0$ , se o meio for o vácuo ou o ar seco, e pela letra  $k$ , para os demais meios.

Como os meios mais utilizados são o vácuo e o ar seco, a expressão final da Lei de Coulomb, nesse caso, fica:

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

No Sistema Internacional (SI), o valor da constante no vácuo, determinado empiricamente é:

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

O quadro ao lado apresenta os valores das constantes eletrostáticas  $k$  de alguns outros meios.

Meios	$k$ (em $\text{N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$ )
água	$1,1 \cdot 10^8$
quartzo	$2,1 \cdot 10^9$
benzeno	$2,3 \cdot 10^9$
papel	$2,6 \cdot 10^9$
etanol	$3,6 \cdot 10^8$
petróleo	$3,6 \cdot 10^9$
polietileno	$3,9 \cdot 10^9$

Fonte: LIDE, David R. (editor-chefe). *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. 90. ed. Flórida: CRC Press LCC, 2009.

## Sinal da força elétrica

Como as cargas elétricas  $Q_1$  e  $Q_2$  podem ter sinais diferentes, a intensidade da força elétrica calculada pode ser positiva ou negativa. Devemos interpretar os sinais da seguinte forma:

- $Q_1$  e  $Q_2$  com mesmo sinal:  $F > 0$  — força elétrica positiva significa repulsão entre as cargas.
- $Q_1$  e  $Q_2$  com sinais opostos:  $F < 0$  — força elétrica negativa significa atração entre as cargas.

Para evitar as questões de interpretação, usaremos cargas em valores absolutos na expressão da Lei de Coulomb e  $F$  representando o módulo da força elétrica. Portanto:

$$F = k_0 \cdot \frac{|Q_1| \cdot |Q_2|}{d^2}$$

Agora repare no quadro ao lado como a Lei de Coulomb é semelhante à Lei da Gravitação Universal, desenvolvida por Newton.

Fisicamente, ambas são forças de campo e, por isso, agem sem a necessidade de contato físico. A força elétrica de Coulomb pode ser de atração ou de repulsão, enquanto a força gravitacional de Newton só pode ser de atração.

Comparando as duas forças, vemos que a força elétrica  $F_e$  é muito mais intensa que a força gravitacional  $F_g$ .

Para fazer um cálculo aproximado, devemos usar como parâmetros duas partículas carregadas (por exemplo, um próton e um elétron) e calcular as forças  $F_e$  e  $F_g$  que agem entre elas, à mesma distância. A relação é impressionante:

$$\frac{F_e}{F_g} \text{ é da ordem de } 10^{39}$$

Lei de Coulomb	Lei da Gravitação Universal
$F_e = k \cdot \frac{ Q_1  \cdot  Q_2 }{d^2}$ , em que: <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>k</math> é uma constante;</li> <li>• <math>Q_1</math> e <math>Q_2</math> são medidas de cargas elétricas.</li> </ul>	$F_g = G \cdot \frac{M \cdot m}{d^2}$ , em que: <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>G</math> é uma constante;</li> <li>• <math>M</math> e <math>m</math> são medidas de massas.</li> </ul>

## ATIVIDADE PRÁTICA

FAÇA NO CADERNO NÃO ESCREVA NO LIVRO

### Estimando a carga eletrizada pela força elétrica

Elétrons, prótons e todas as partículas da natureza que possuem carga são trilhões de vezes menores que a espessura de um fio de cabelo. No entanto, quando atritados formam um conjunto grande de cargas que faz força em outros objetos. Vamos estimar, pela sua força elétrica, quantos elétrons um objeto eletrizado tem “sobrando”.



#### Material

- dois canudos
- linha de náilon (linha de pesca ou de meia fina feminina)
- papel-toalha
- fita adesiva
- régua
- canetão
- transferidor



Rita Barreto

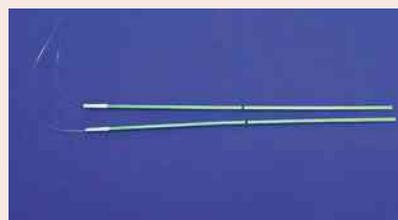
## Procedimento

- I. Façam uma marca com o canetão na metade dos canudos.
- II. Separem 30 cm da linha e cole cada extremidade na ponta de um canudo, ficando dois canudos ligados por uma linha.
- III. Juntem os canudos paralelamente e, segurando na ponta onde a linha foi fixada, atritem os dois canudos juntos com o papel.
- IV. Depois disso, segurem no meio da linha e soltem os canudos.
- V. Meçam qual é a distância entre as duas marcações dos canudos.
- VI. Meçam o ângulo entre as linhas.

## Discussão

1. O que você observou?
2. Com base na série triboelétrica, os canudos ganharam ou perderam elétrons?
3. Por que isso acontece?
4. Quais forças estão atuando nos canudos?
5. O sistema está em equilíbrio?
6. Como estimar a carga total do sistema com essa montagem?
7. Sabendo que a carga de um elétron é  $1,6 \cdot 10^{-19}$  C, é possível estimar quantos elétrons foram doados aos canudos para que tenham essa carga média e realizem essa força?

Ver Orientações Didáticas.

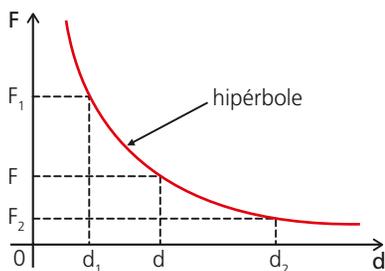


Fotografias: Rita Barreto



## Exercícios resolvidos

**ER1.** A representação gráfica da Lei de Coulomb, no diagrama força elétrica de interação  $F$  versus distância  $d$  entre duas cargas puntiformes fixas e iguais a  $Q$ , é uma hipérbole, conforme se vê na figura.



O diagrama mostra que a intensidade da força elétrica atuante entre as cargas vale  $F$ , quando a distância que as separa é igual a  $d$ .

- a) Determine as intensidades das forças elétricas  $F_1$  e  $F_2$ , quando as distâncias que separam as cargas forem, respectivamente,  $d_1 = \frac{d}{2}$  e  $d_2 = 2d$ .
- b) Faça uma análise comparativa dos resultados encontrados.

### Resolução:

As cargas puntiformes fixas que interagem são:  $Q_1 = Q_2 = Q$ . Quando a distância que as separa é  $d$ , segundo o diagrama, a força elétrica agindo entre elas vale  $F$ .

Aplicando a Lei de Coulomb, podemos escrever:

$$F = k_0 \cdot \frac{|Q_1 \cdot Q_2|}{d^2} = k_0 \cdot \frac{Q \cdot Q}{d^2} \Rightarrow F = k_0 \cdot \frac{Q^2}{d^2}$$

$$\text{a) Portanto, } F_1 = k_0 \cdot \frac{Q^2}{(d_1)^2} = k_0 \cdot \frac{Q^2}{\left(\frac{d}{2}\right)^2} = k_0 \cdot \frac{Q^2}{\frac{d^2}{4}}$$

$$= 4 \cdot k_0 \cdot \frac{Q^2}{d^2} \Rightarrow F_1 = 4 \cdot F$$

$$F_2 = k_0 \cdot \frac{Q^2}{(d_2)^2} = k_0 \cdot \frac{Q^2}{(2d)^2} = k_0 \cdot \frac{Q^2}{4d^2} =$$

$$= \frac{1}{4} \cdot k_0 \cdot \frac{Q^2}{d^2} \Rightarrow F_2 = \frac{F}{4}$$

- b) Fazendo-se uma comparação dos resultados obtidos, concluímos que, para uma dada força  $F$ , se a distância entre as cargas for reduzida à metade, a força elétrica ficará quatro vezes maior; e se a distância for dobrada, ela ficará reduzida a um quarto. Observe também que essa relação independe do meio considerado (apesar de termos usado o valor  $k_0$ ).

**ER2.** Temos duas pequenas esferas metálicas eletrizadas, respectivamente, de cargas  $Q_A = 8 \mu\text{C}$  e  $Q_B = -4 \mu\text{C}$ , atraindo-se mutuamente com força de intensidade 1,8 N, no vácuo. Elas são colocadas em contato e depois ficam separadas a uma distância de 30 cm. Considere a constante eletrostática  $k_0 = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$ .

- a) Qual é a distância que as separava antes do contato?
- b) Que tipo de força de interação existe entre as cargas após o contato? Qual é a nova intensidade?

### Resolução:

Antes do contato, temos:  $Q_A = 8 \mu\text{C} = 8 \cdot 10^{-6} \text{ C}$ ;  $Q_B = -4 \mu\text{C} = -4 \cdot 10^{-6} \text{ C}$ ;  $F = 1,8 \text{ N}$  (atração) e depois do contato:  $d' = 30 \text{ cm} = 3 \cdot 10^{-1} \text{ m}$ .

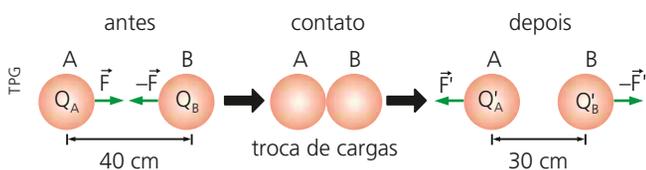
a) Pela Lei de Coulomb:

$$F = k_0 \cdot \frac{|Q_A \cdot Q_B|}{d^2}$$

$$1,8 = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{8 \cdot 10^{-6} \cdot 4 \cdot 10^{-6}}{d^2} \Rightarrow d^2 = 16 \cdot 10^{-2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow d = 4 \cdot 10^{-1} \text{ m} = 0,4 \text{ m} = 40 \text{ cm}$$

b) Quando dois corpos esféricos idênticos são colocados em contato, depois de separados ambos ficam com a mesma quantidade de carga elétrica.



Pelo Princípio de Conservação de Cargas, temos:

$$\Sigma Q_{\text{antes}} = \Sigma Q_{\text{depois}}$$

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

$$\text{Como } Q'_A = Q'_B \Rightarrow Q_A + Q_B = 2Q'_A = 2Q'_B.$$

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

$$= \frac{8 \cdot 10^{-6} + (-4) \cdot 10^{-6}}{2} = \frac{4 \cdot 10^{-6}}{2} = +2 \cdot 10^{-6}.$$

Então,  $2 \cdot 10^{-6} \text{ C}$  é o valor de cada carga. Assim, após o contato, como cada uma das esferas fica eletrizada com carga positiva, a força elétrica atuante entre elas será de **repulsão**.

Para calcular a nova intensidade de força  $F'$ , basta usar a Lei de Coulomb:

$$F' = k_0 \cdot \frac{|Q'_A \cdot Q'_B|}{d^2} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{2 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^{-6}}{(3 \cdot 10^{-1})^2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow F' = \frac{36 \cdot 10^{-3}}{9 \cdot 10^{-2}} \Rightarrow F' = 4 \cdot 10^{-1} \text{ N} = 0,4 \text{ N}$$

**ER3.** Em cada um dos vértices de um triângulo equilátero, de 30 cm de lado, estão fixas as cargas  $Q_1 = -2 \mu\text{C}$  e  $Q_2 = Q_3 = +3 \mu\text{C}$ , todas puntiformes. Sabe-se que o meio em que estão imersas é o vácuo, em que a constante eletrostática é  $9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$ . Considere  $\sqrt{3} = 1,7$ . Calcule:

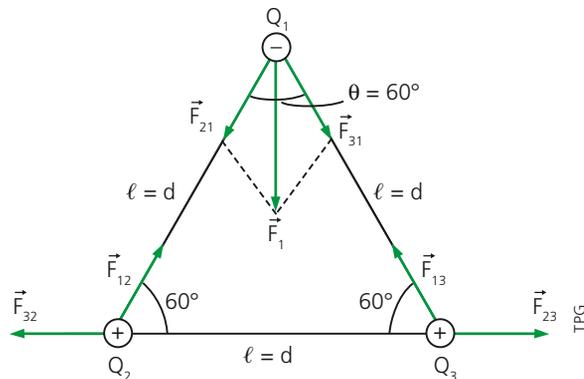
- a intensidade da força elétrica de repulsão existente entre as cargas  $Q_2$  e  $Q_3$ ;
- a intensidade da força elétrica resultante que age na carga  $Q_1$ .

### Resolução:

Dados:  $Q_1 = -2 \mu\text{C} = -2 \cdot 10^{-6} \text{ C}$ ;  $Q_2 = Q_3 = +3 \mu\text{C} = +3 \cdot 10^{-6} \text{ C}$  e  $k_0 = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$ .

Se o triângulo é equilátero, cada lado mede  $d = 30 \text{ cm} = 3 \cdot 10^{-1} \text{ m}$ .

Colocando as cargas nos vértices do triângulo equilátero e representando os vetores-força nas cargas, temos:



a) Pela Lei de Coulomb,  $F_{32} = F_{23}$  (leia-se: a força que a carga 3 aplica na carga 2 é igual à força que a carga 2 emprega na 3).

$$F_{32} = F_{23} = k_0 \cdot \frac{|Q_2 \cdot Q_3|}{d^2} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{3 \cdot 10^{-6} \cdot 3 \cdot 10^{-6}}{(3 \cdot 10^{-1})^2} = \frac{9 \cdot 9 \cdot 10^{-3}}{9 \cdot 10^{-2}} = 9 \cdot 10^{-1}$$

Portanto,  $F_{32} = F_{23} = 9 \cdot 10^{-1} \text{ N} = 0,9 \text{ N}$ .

b) Pela figura, a intensidade da força elétrica resultante que atua na carga  $Q_1$  é o  $\vec{F}_1$  resultante da soma vetorial de  $\vec{F}_{31}$  com  $\vec{F}_{21}$ . Para tanto, vamos calcular inicialmente:

$$F_{12} = F_{21} = F_{13} = F_{31} = F = k_0 \cdot \frac{|Q_1 \cdot Q_2|}{d^2}, \text{ pois } Q_2 = Q_3.$$

$$F_{21} = F_{31} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{2 \cdot 10^{-6} \cdot 3 \cdot 10^{-6}}{(3 \cdot 10^{-1})^2} =$$

$$= \frac{9 \cdot 6 \cdot 10^{-3}}{9 \cdot 10^{-2}} = 6 \cdot 10^{-1} \Rightarrow F_{21} = F_{31} = 0,6 \text{ N}$$

A intensidade da força resultante será:

$$\vec{F}_1 = \vec{F}_{21} + \vec{F}_{31}$$

Algebricamente, aplicamos no paralelogramo formado pelas forças componentes a lei dos cossenos.

$$F_1^2 = F_{21}^2 + F_{31}^2 + 2 \cdot F_{21} \cdot F_{31} \cdot \cos \theta$$

$$F_1^2 = (0,6)^2 + (0,6)^2 + 2 \cdot 0,6 \cdot 0,6 \cdot \cos 60^\circ$$

$$F_1^2 = 0,36 + 0,36 + 2 \cdot 0,36 \cdot \frac{1}{2}$$

$$F_1^2 = 0,36 + 0,36 + 0,36 = 3 \cdot 0,36 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow F_1 = \sqrt{3 \cdot 0,36} = 1,7 \cdot 0,6 = 1,02$$

Portanto,  $F_1 = 1,02 \text{ N}$ .



## Lei de Coulomb e Lei da Gravitação Universal

Veja estes quadrinhos extraídos do livro *Introdução ilustrada à Física*, traduzido e adaptado por Luís Carlos de Menezes.

UMA SIMPLICIDADE DE ARREPIAR!

MÉDIDAS PRECISAS FEITAS POR CHARLES COULOMB (1736-1806) MOSTRARAM QUE AS FORÇAS ELÉTRICAS DECRESCEM COM O QUADRADO DA DISTÂNCIA, TANTO QUANTO A GRAVIDADE. A LEI DE COULOMB PARA A ELETROSTÁTICA\* SE PARECE MUITO COM A LEI DE NEWTON PARA A GRAVITAÇÃO.

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

\* ELETROSTÁTICA SIGNIFICA QUE AS CARGAS ESTÃO PARADAS.

NA EQUAÇÃO DE COULOMB,  $Q$  E  $q$  SÃO OS VALORES DAS CARGAS,  $r$  É A DISTÂNCIA ENTRE ELAS E  $K$  É UMA CONSTANTE (ASSIM COMO  $G$  PARA A GRAVIDADE) QUE VALE  $K = 9 \times 10^9$ .

A UNIDADE DE CARGA É O

**COULOMB.**

A CARGA DE UM ELÉTRON É

$$-e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ COULOMBS}$$

UM COULOMB É UMA CARGA TÃO LOUCAMENTE GRANDE QUE FICA ATÉ ENGRAÇADO DIZER QUE ELA É UMA UNIDADE...

VOCÊ ROUBOU MINHA FÓRMULA!

$F = \frac{GMm}{r^2}$

BOBAGEM! SERÁ QUE AS FORÇAS ELETROSTÁTICAS E GRAVITACIONAL SE PARECEM MESMO?

AINDA QUE A LEI DAS FORÇAS ELETROSTÁTICAS PAREÇA SEMELHANTE À DA GRAVIDADE, HÁ GRANDES DIFERENÇAS ENTRE ELAS. POR EXEMPLO, A GRAVIDADE SEMPRE ATRAI, MAS AS FORÇAS ELÉTRICAS, PODEM TANTO ATRAIR QUANTO REPELIR.



ALÉM DISSO, AS FORÇAS ELÉTRICAS SÃO MUITÍSSIMO MAIS INTENSAS QUE A GRAVITACIONAL. SUPONDO QUE CADA BASTÃO TENHA  $10^{24}$  ÁTOMOS (MILHÃO DE MILHÃO DE MILHÃO DE MILHÃO DE ÁTOMOS), SE SÓ UM EM CADA  $10^{12}$  ELÉTRONS (UMA DE CADA MILHÃO DE MILHÃO) PASSAR DE UM BASTÃO DE PLÁSTICO PARA UM DE BORRACHA, HAVERÁ UMA FORÇA PERCEPTÍVEL ENTRE ELAS.



POR OUTRO LADO, NEM A TOTALIDADE DOS  $10^{24}$  ÁTOMOS DE UM BASTÃO É CAPAZ DE FAZER NOTAR SUA FORÇA GRAVITACIONAL, MESMO POR MÁQUINAS MUITO SENSÍVEIS.

TEM CERTEZA QUE ISSO ESTÁ LIGADO?

Fonte: GONICK, LARRY; HUFFMAN, ART. *Introdução Ilustrada à Física*. Trad. Luís Carlos de Menezes. São Paulo: Harbra, 1994.

### Organizando as ideias do texto

1. O texto cita dois exemplos de forças elementares existentes. Quais são essas forças? Existem outros tipos?
2. Proponha uma maneira de explicar por que a força elétrica é mais intensa que a gravitacional.
3. Quem são os personagens dos quadros?
4. No último quadro, há uma relação entre o desenho e o texto. Que relação é essa e por que ela é feita dessa forma? Dê exemplos que justifiquem sua resposta.

Professor, veja as [Orientações Didáticas](#).

## Precipitador eletrostático

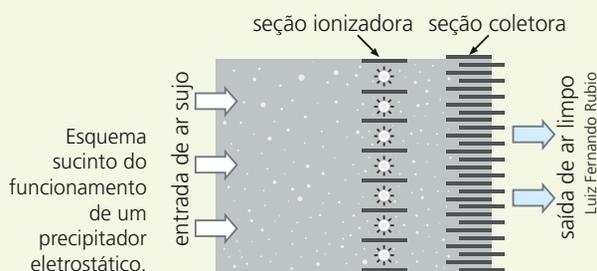
Não é necessário ser médico ou especialista em pesquisas ambientais para notar que, nas cidades com alta concentração de indústrias e com presença de muitos automóveis, o ar que se respira é inadequado para a saúde. Isso acontece em razão da grande quantidade de materiais poluentes lançada na atmosfera por indústrias de fertilizantes, refinarias de petróleo, usinas termelétricas, indústrias metalúrgicas, automóveis, entre outras coisas.

Existem vários dispositivos de controle de emissão de poluentes usados pelas indústrias. Um deles foi construído utilizando os princípios da eletrostática e está instalado nas chaminés de algumas indústrias. É o precipitador eletrostático. Mas como ele funciona? As partículas da fumaça em suspensão atravessam o precipitador, onde, por meio de dispositivos apropriados, são eletrizadas negativamente, para, em seguida, serem coletadas por atração em placas eletrizadas positivamente.



André M. Chang/Fotoarena

Vista da capital de São Paulo (SP), na qual também se vê a poluição atmosférica. Fotografia de setembro de 2014.

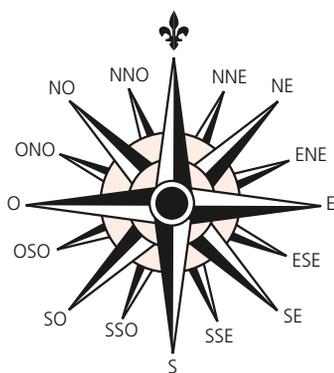


Luiz Fernando Rubio

## Exercícios propostos

FAÇA NO CADERNO NÃO ESCREVA NO LIVRO

**EP1.** A rosa dos ventos é um instrumento de orientação que adota como referenciais os quatro pontos cardeais. Existem outras direções, os pontos colaterais, localizados nas bissetrizes dos ângulos formados pelos pontos cardeais. Os pontos subcolaterais, por sua vez, estão direcionados segundo as bissetrizes dos pontos colaterais.

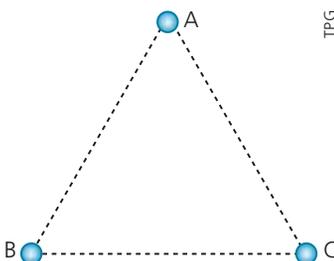


TPG

Os pontos colaterais são: nordeste (NE), sudeste (SE), sudoeste (SO) e noroeste (NO).

E os subcolaterais: nor-nordeste (NNE), les-nordeste (ENE), les-sueste (ESE), sul-sueste (SSE), sul-sudoeste (SSO), oes-sudoeste (OSO), oes-noroeste (ONO) e nor-noroeste (NNO).

Conhecidas todas essas direções, considere agora que três cargas elétricas pontuais estão posicionadas nos vértices de um triângulo equilátero, como mos-



TPG

tradas na figura. Qual é o sentido das forças resultantes em cada carga, caso a caso, considerando a referência mais próxima entre as direções da rosa dos ventos?

- Caso 1: com as três cargas positivas.
- Caso 2: com as três cargas negativas.
- Caso 3: A positiva, B e C negativas.
- Caso 4: A positiva, B negativa e C positiva.

Resposta nas Orientações Didáticas.

**EP2.** Duas cargas elétricas puntiformes de mesma intensidade, separadas uma da outra por uma distância de 30 cm e imersas no vácuo, atraem-se mutuamente com uma força elétrica de intensidade 40 N. Sendo a constante eletrostática do meio igual a  $9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$ , responda:

- Quais devem ser os sinais das cargas elétricas em questão? *Os sinais das cargas devem ser opostos para que haja atração mútua.*
- Calcule o valor de cada carga.

$Q_1 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ C}$  e  $Q_2 = -2 \cdot 10^{-5} \text{ C}$  ou  $Q_1 = -2 \cdot 10^{-5} \text{ C}$  e  $Q_2 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ C}$ .

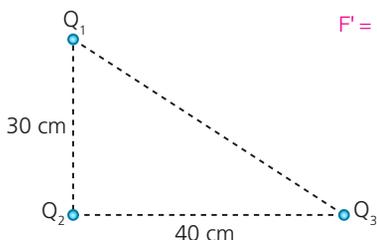
**EP3.** A força de interação entre duas cargas elétricas pontuais  $Q$ , no vácuo, separadas por uma distância  $d$ , é igual a  $F$ . Qual será o novo valor da força elétrica atuante entre elas, se a distância for triplicada?  $\frac{F}{9}$

**EP4.** Duas partículas esféricas idênticas, condutoras e puntiformes estão eletrizadas com as cargas  $-Q$  e  $5Q$ , posicionadas a uma distância  $d$  entre elas, imersas no ar seco e atraindo-se mutuamente com uma força elétrica de intensidade  $F$ . Elas então são colocadas em contato

e, em seguida, reposicionadas a uma distância de  $2d$ , uma da outra. Sendo  $k_0$  a constante eletrostática do ar seco, determine:

- o valor da força  $F$ , antes do contato;  $F = k_0 \cdot \frac{5 \cdot Q^2}{d^2}$
- a quantidade de carga de cada uma delas, após o contato;  $+2Q$
- o valor da força  $F'$  em função de  $F$ , após o contato.

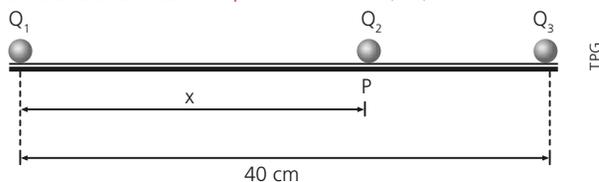
**EP5.** Nos vértices de um triângulo retângulo estão colocadas as cargas elétricas puntiformes  $Q_1 = 5 \mu\text{C}$ ,  $Q_2 = -2 \mu\text{C}$  e  $Q_3 = -5 \mu\text{C}$ , conforme mostra a figura. Supondo que o meio seja o vácuo, onde a constante eletrostática vale  $9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$ , calcule:



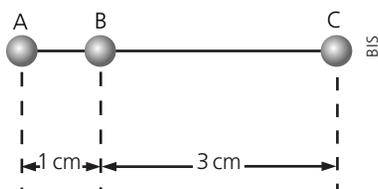
$$F' = \frac{F}{5} \text{ TPG}$$

- a intensidade da força elétrica agindo entre as cargas  $Q_1$  e  $Q_2$ ;  $1,0 \text{ N}$
- a intensidade da força elétrica atuando entre as cargas  $Q_1$  e  $Q_3$ ;  $0,9 \text{ N}$
- a intensidade da força elétrica resultante que age na carga  $Q_1$ . *Aproximadamente,  $1,8 \text{ N}$ .*

**EP6.** A figura apresenta três pequenas esferas eletrizadas, com duas delas ( $Q_1 = +8 \mu\text{C}$  e  $Q_3 = +2 \mu\text{C}$ ) fixas nos extremos de uma calha horizontal e retilínea, de material isolante. A esfera de carga  $Q_2$ , que pode deslizar livremente sobre a calha, está em equilíbrio estável na posição  $P$  indicada. Sabe-se que o conjunto está imerso no ar seco, onde o valor da constante eletrostática é  $9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$ . Qual é o valor da distância  $x$ ? *Aproximadamente,  $26,7 \text{ cm}$ .*

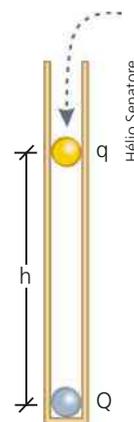


**EP7.** (Fuvest-SP) Três objetos com cargas elétricas idênticas estão alinhados como mostra a figura. O objeto  $C$  exerce sobre  $B$  uma força igual a  $3,0 \cdot 10^{-6} \text{ N}$ . A força elétrica resultante dos efeitos de  $A$  e  $C$  sobre  $B$  é:



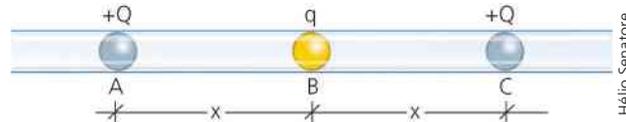
- $2,0 \cdot 10^{-6}$
- $6,0 \cdot 10^{-6}$
- $12 \cdot 10^{-6}$
- $24 \cdot 10^{-6}$
- $30 \cdot 10^{-6}$

**EP8.** Uma pequena esfera eletrizada com carga  $Q = +10 \mu\text{C}$  está fixa no fundo de um tubo cilíndrico vertical, feito de material isolante, cujo diâmetro interno corresponde ao da esfera. Outra esfera com massa  $0,2 \text{ g}$ , de mesmo diâmetro e eletrizada com carga  $q = +8 \text{ nC}$ , é abandonada na boca do tubo cuja lateral apresenta atrito desprezível. Devido à força de repulsão agindo entre as cargas, a esfera largada fica em equilíbrio estável no interior do tubo, sem chocar-se com a outra. Nessas condições, determine a distância  $h$  que separa as duas cargas. Considere a aceleração da gravidade local  $g = 10 \text{ m/s}^2$  e a constante eletrostática do meio onde é realizada a experiência com  $k = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$ .



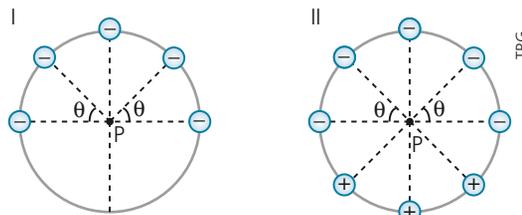
$$h = 0,6 \text{ m}$$

**EP9.** Na figura, as três pequenas esferas eletrizadas  $A$ ,  $B$  e  $C$  estão em equilíbrio, no interior de um longo tubo horizontal de vidro onde não há atrito. Nenhuma das esferas está fixa e o equilíbrio é devido somente à ação das forças elétricas. Nessas condições, determine:



- o sinal da carga  $q$ ; *A carga  $q$  deve ser negativa.*
- a razão  $\frac{Q}{q}$ .  $\frac{Q}{q} = -4$

**EP10.** Pequenas esferas, carregadas com cargas elétricas negativas de mesmo módulo  $Q$ , estão dispostas sobre um anel isolante e circular, como indicado na figura I.



Nessa configuração, a intensidade da força elétrica que age sobre uma carga de prova negativa, colocada no centro do anel (ponto  $P$ ), é  $F_1$ . Se forem acrescentadas sobre o anel três outras cargas de mesmo módulo  $Q$ , mas positivas, como na figura II, a intensidade da força elétrica no ponto  $P$  passará a ser:

- zero
- $\left(\frac{1}{2}\right)F_1$
- $\left(\frac{3}{4}\right)F_1$
- $F_1$
- $2F_1$

# Campo elétrico

Entender o que é o campo elétrico nos possibilitou desenvolver técnicas e dispositivos importantes, em áreas como a Engenharia, a Informática e a Medicina; o eletrocardiograma detecta o estado do coração pela análise de variação de grandezas elétricas na atividade cardíaca. A eletroforese, usada na análise do sangue, é uma técnica de separação de moléculas muito pequenas quando submetidas a um campo elétrico. Até a gravação e leitura de dados em HD (*hard disk*) e mídias como CD e DVD dependem de campos elétricos.

Neste capítulo, veremos como se estabelece um campo elétrico, e de quais grandezas depende a sua intensidade.

Uma primeira aproximação da ideia de **campo** é associá-lo a uma região que fica sujeita à ação de forças. Você já sabe que o campo gravitacional da Terra faz com que todo corpo sofra a ação de uma força, chamada de peso; essa força é de atração mútua, ou seja, tanto a Terra atrai o corpo como ele atrai a Terra. Campos magnéticos são gerados por ímãs ou por cargas elétricas em movimento; um pedaço de ferro imerso nesse campo é atraído pelo ímã, e vice-versa. Percebemos que todo campo é gerado por um corpo, e sua existência independe da presença de outros corpos.

Com o campo elétrico não é diferente: é gerado por um ou vários corpos eletrizados; como você já sabe, outro corpo eletrizado colocado na região desse campo fica sujeito à ação de uma força elétrica de atração ou repulsão mútua.

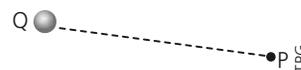
## Ideia de campo elétrico

No capítulo anterior, investigamos a interação entre cargas colocadas uma em presença da outra. Chamamos de força a interação de atração ou repulsão entre essas partículas. Em resumo, o que sabemos dessas interações é o seguinte:

- se duas cargas de mesmo sinal forem colocadas próximas, haverá uma força de repulsão entre elas, e se forem cargas de sinais contrários, haverá uma força de atração;
- a intensidade dessa interação cresce com a intensidade das cargas e decresce com o quadrado da distância entre elas.

Como no caso da força gravitacional, a força elétrica é uma força de campo, que age a distância, não havendo necessidade de os corpos carregados estarem em contato. Uma maneira de explicar o aparecimento de tais forças é admitir que uma carga elétrica altera as propriedades dos pontos do espaço nas suas redondezas, de modo a “sensibilizar” cargas próximas; desse modo, as cargas que estiverem nessa região são suscetíveis a tais propriedades. É dessa maneira que se dá a interação entre essas cargas.

Considere a figura ao lado, onde vemos uma carga de valor  $Q$  e um ponto  $P$  distante de  $Q$ . Digamos que a propriedade criada pela carga  $Q$  seja “exercer uma força  $F$  por unidade de carga no ponto  $P$ ”.



Uma carga de prova  $q$ , colocada em  $P$ , sofrerá uma força  $F$  na direção do segmento que une  $q$  e  $Q$ .

Essa "propriedade" apresenta duas características importantes. Uma delas é que está relacionada a esse ponto  $P$ , e tem então caráter vetorial, pois, dependendo da posição do ponto, a direção da força será determinada por um vetor correspondente. A outra característica é mais intrigante: a propriedade vale para o ponto  $P$ , mesmo que não haja nenhuma carga nessa posição; isso significa que não depende da carga que será colocada nessa posição, mas unicamente da carga que a criou. Este é, então, o campo elétrico: uma propriedade associada a uma posição do espaço, criada por uma carga  $Q$  a certa distância. Essa propriedade determina a intensidade da força elétrica que será exercida sobre uma carga unitária colocada nessa posição.

## Vetor campo elétrico

No interior do campo gravitacional de qualquer planeta, um corpo de massa  $m$  (corpo de prova) ficará sujeito à ação da força gravitacional de atração chamada **força peso** ( $\vec{P}$ ), determinada por:

$$\vec{P} = m \cdot \vec{g}, \text{ em que } \vec{g} \text{ é o vetor campo gravitacional do planeta.}$$

A intensidade ou módulo de  $\vec{g}$  determina a força com que um objeto de massa unitária será atraído para o centro do planeta; na superfície da Terra, a intensidade aproximada de  $\vec{g}$  é de 10 N/kg.

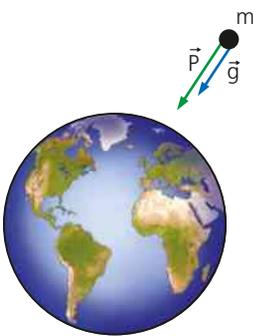
Da mesma forma, uma carga de prova  $q$ , em um ponto  $P$ , no interior do campo elétrico gerado pela carga  $Q$  fixa, ficará sujeita à ação de uma força elétrica  $\vec{F}$ , de atração ou de repulsão, cuja intensidade pode ser escrita, de modo análogo ao do peso, como:

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E}, \text{ onde } \vec{E} \text{ é o vetor campo elétrico criado pela carga } Q, \text{ no ponto } P.$$

As unidades de força e carga elétrica no SI são, respectivamente, o newton (N) e o coulomb (C). Portanto, como  $E = \frac{F}{|q|}$ , a unidade de  $E$  será N/C (newton por coulomb).

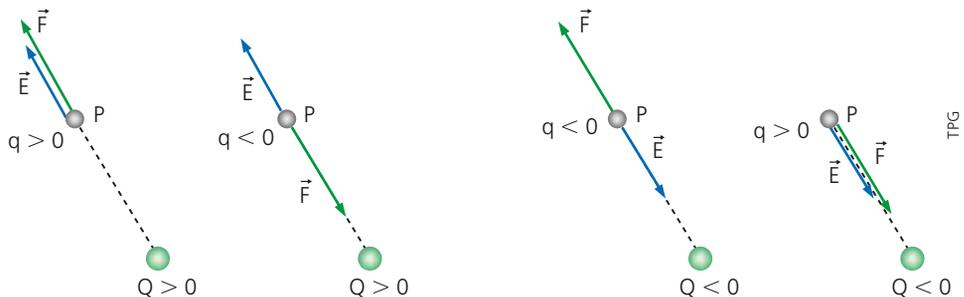
As forças gravitacionais são sempre atrativas (e esse fato se reflete na direção de  $\vec{g}$ , que é sempre vertical e aponta para o centro do planeta), mas as forças elétricas podem ser de atração ou repulsão. Como o vetor campo elétrico refletirá esse fato?

Convencionou-se que o vetor campo elétrico indica a direção e o sentido da força exercida sobre uma carga de prova positiva no ponto considerado.



Alex Argozino

Ilustração com elementos sem proporção entre si e em cores fantasia.



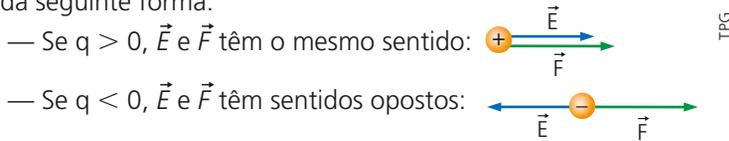
Direção e sentido do vetor  $\vec{E}$  criado por uma carga  $Q$  positiva, que dependem exclusivamente de  $Q$ . A direção da força é dada por  $\vec{E}$ , mas o sentido depende dos sinais das cargas de  $q$  e  $Q$ .

Direção e sentido do vetor  $\vec{E}$  criado por uma carga  $Q$  negativa, que dependem exclusivamente de  $Q$ .

O vetor campo elétrico  $\vec{E}$ , definido como  $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$ , possui as seguintes características:

- Módulo ou intensidade:  $E = \frac{F}{|q|}$ ;
- Direção: da reta que une  $q$  com  $Q$ ;

- Sentido: de afastamento de  $Q$  se ele é positivo e de aproximação de  $Q$  se ele é negativo. Relativamente ao vetor  $\vec{F}$ , o sentido do vetor  $\vec{E}$  pode também ser visto da seguinte forma:



## Exercícios resolvido

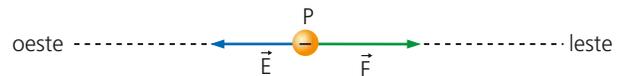
**ER1.** Em um ponto  $P$ , onde o vetor campo elétrico tem direção horizontal e sentido apontado para o oeste, é colocada uma carga puntiforme de módulo  $0,5 \mu\text{C}$ . Então, essa carga fica sujeita a uma força elétrica de intensidade  $0,5 \text{ N}$ , na direção horizontal e sentido leste. Nessas condições, determine o módulo do vetor campo elétrico e o sinal da carga puntiforme.

### Resolução:

Dados:  $|q| = 0,5 \mu\text{C} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ C}$  e  $F = 0,5 \text{ N} = 5 \cdot 10^{-1} \text{ N}$

Se os vetores campo  $\vec{E}$  e força  $\vec{F}$  têm direção horizontal e sentidos opostos, pois um aponta para o oeste e

o outro para o leste, concluímos que a carga puntiforme possui sinal negativo.



O módulo do vetor campo elétrico é calculado pela expressão:

$$E = \frac{F}{|q|} = \frac{5 \cdot 10^{-1}}{5 \cdot 10^{-7}} \Rightarrow E = 10^6 \text{ N/C}$$

Esse valor significa o seguinte: se uma carga de  $1 \text{ C}$  for colocada no ponto  $P$ , sofrerá uma força de intensidade  $10^6 \text{ N}$ .

## A FÍSICA NA HISTÓRIA

### Fogo de santelmo

Leia um trecho de *Os Lusíadas*, escrito por Luís Vaz de Camões e publicado em 1572, em que o explorador Vasco da Gama descreve sua primeira viagem e grande aventura marítima, em que ele e os marinheiros enfrentam grandes fenômenos naturais, como as trombas-d'água e o fogo de santelmo:

Os casos vi, que os rudos marinheiros,  
Que têm por mestra a longa experiência,  
Contam por certos sempre e verdadeiros,  
Julgando as cousas só pela aparência,  
E que os que têm juízos mais inteiros,  
Que só por puro engenho e por ciência  
Vêm do mundo os segredos escondidos,  
Julgam por falsos ou mal entendidos.  
Vi, claramente visto, o *lume vivo*  
Que a marítima gente tem por santo,  
Em tempo de tormenta e vento esquivo,  
De tempestade escura e triste pranto.  
Não menos foi a todos excessivo  
Milagre, e cousa, certo, de alto espanto,  
Ver as nuvens, do mar com largo cano,  
Sorver as altas águas do Oceano.

CAMÕES, Luís Vaz de. *Os Lusíadas*. Porto: Porto Editora, 1976. p. 195.

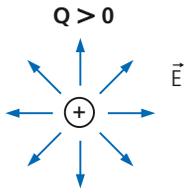
Santo Elmo é o padroeiro dos marinheiros. Conta-se que os marinheiros do passado atribuíam um significado divino — a aparição do referido santo — a um fenômeno eletrostático, o **efeito corona**, que é o efeito de as cargas tenderem a se adensar em regiões de extremidades ou de maior curvatura, como pontas. Os mastros dos navios eram envoltos por uma luminosidade suave, resultado da emissão de luz na recombinação de íons com elétrons, produzidos pela indução de nuvens eletrizadas nas pontas dos mastros. O intenso campo elétrico nas vizinhanças das pontas ionizava as partículas de ar que, posteriormente, emitiam a luz durante a recombinação. A superstição acabou denominando o fenômeno como fogo de santelmo.



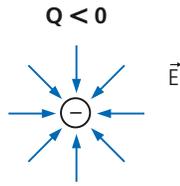
Peter Menze/SPL/Latinstock

O **efeito corona** pode ser observado, por exemplo, em linhas de transmissão elétrica com sobrecarga, que ficam envoltas por uma luminosidade ao longo de sua extensão, ou em aviões que atravessam regiões onde há nuvens eletrizadas. Se o campo criado por essa sobrecarga for muito intenso, haverá descargas elétricas.

## Campo elétrico devido a uma carga puntiforme



Se  $Q > 0$ , o vetor campo elétrico é de afastamento.



Se  $Q < 0$ , o campo elétrico é de aproximação.

Vimos que uma carga puntiforme fixa  $Q$  produz, na região que a envolve, um campo elétrico cujos vetores  $\vec{E}$  indicam **afastamento** se  $Q > 0$  e **aproximação** se  $Q < 0$ , como representados nas figuras ao lado.

O sentido do vetor campo elétrico independe da carga de prova  $q$  colocada nessa região.

### Intensidade do vetor $\vec{E}$

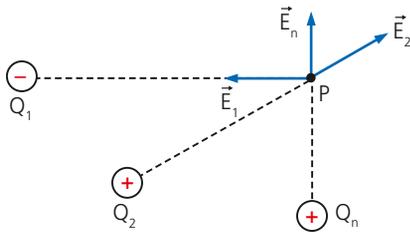
Para se calcular a intensidade  $E$  do vetor campo elétrico gerado por uma carga pontual  $Q$ , não há a necessidade da presença da carga de prova  $q$ , pois o campo independe dela, como veremos adiante. O valor de  $E$  varia de acordo com a distância  $d$  da carga  $Q$ , e é calculado como segue.

Igualando-se a expressão da força elétrica relacionada com o campo elétrico

$F = |q| \cdot E$  com a expressão da Lei de Coulomb  $F = k_0 \cdot \frac{|Q| \cdot |q|}{d^2}$ , temos:

$|q| \cdot E = k_0 \cdot \frac{|Q| \cdot |q|}{d^2}$  (independe de  $q$ ). Portanto,  $E = k_0 \cdot \frac{|Q|}{d^2}$ , em que  $k_0$  é a constante eletrostática do meio vácuo.

## Campo elétrico devido a várias cargas puntiformes



Quando tivermos várias cargas puntiformes fixas  $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$ , cada uma delas irá gerar no ponto  $P$ , respectivamente, os vetores campos elétricos  $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \dots, \vec{E}_n$ .

O vetor campo elétrico resultante  $\vec{E}_R$  é a soma vetorial desses vetores, ou seja:

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

## Exercícios resolvidos

**ER2.** Caracterize o vetor campo elétrico gerado pela carga  $Q = -2 \text{ nC}$  no ponto  $P$  da figura. O meio é o vácuo, em que a constante eletrostática vale  $9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$ .



### Resolução:

Temos pelo enunciado:  $Q = -2 \text{ nC} = -2 \cdot 10^{-9} \text{ C}$ ;  $k_0 = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$ ; pela figura:  $d = 30 \text{ cm} = 3 \cdot 10^{-1} \text{ m}$ .

Para se caracterizar o vetor campo elétrico gerado pela carga  $Q$ , devemos determinar a sua intensidade, a sua direção e o seu sentido no ponto  $P$  considerado.

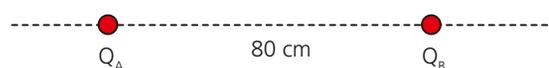
A intensidade é calculada aplicando-se a expressão:

$$E = k_0 \cdot \frac{|Q|}{d^2} \Rightarrow E = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{2 \cdot 10^{-9}}{(3 \cdot 10^{-1})^2} \Rightarrow E = 2 \cdot 10^2 \text{ N/C}$$

A direção do vetor  $\vec{E}$  é da reta que liga  $P$  com  $Q$ , portanto horizontal.

E o sentido é da esquerda para a direita, pois o vetor  $\vec{E}$  é de aproximação, pois  $Q$  é negativa.

**ER3.** Sobre um plano horizontal estão fixas duas cargas pontuais  $Q_A = Q_B = -1 \text{ μC}$ , separadas de 80 cm, conforme indica a figura. As cargas estão imersas no vácuo ( $k_0 = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$ ).

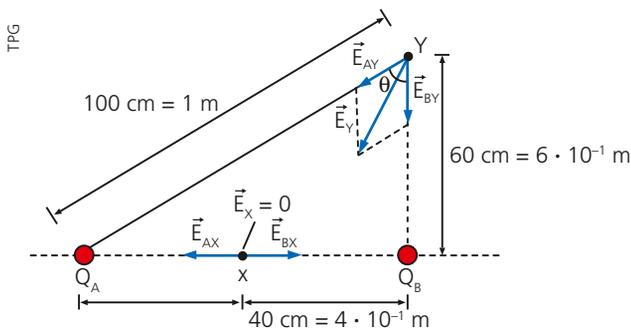


Determine:

- a) a intensidade do vetor campo elétrico resultante em um ponto  $X$ , situado a meia distância da reta que separa as duas cargas;
- b) a intensidade do vetor campo elétrico resultante em um ponto  $Y$ , distante 100 cm da carga  $Q_A$  e 60 cm da carga  $Q_B$ .

### Resolução:

Dados:  $Q_A = Q_B = -10^{-6} \text{ C}$  e  $k_0 = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$ .  
Completando a figura e colocando os dados pedidos, temos:



- a) De acordo com a figura, as cargas negativas  $Q_A$  e  $Q_B$  produzem, respectivamente, os vetores campo elétrico de aproximação de mesma intensidade no ponto  $X$ , pois ambas possuem cargas e distâncias iguais. Portanto, calculando cada uma dessas intensidades, temos:

$$E_{AX} = E_{BX} = k_0 \cdot \frac{|Q_A|}{d^2} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{10^{-6}}{(4 \cdot 10^{-1})^2} = \frac{9 \cdot 10^3}{16 \cdot 10^{-2}} = 5,625 \cdot 10^4 \Rightarrow E_{AX} = E_{BX} = 5,625 \cdot 10^4 \text{ N/C}$$

O módulo do vetor campo elétrico resultante  $\vec{E}_X$  no ponto  $X$ , será a soma vetorial  $\vec{E}_X = \vec{E}_{AX} + \vec{E}_{BX}$ . Como ambos têm a mesma direção, porém sentidos opostos, a sua intensidade é determinada pela diferença  $E_X = E_{AX} - E_{BX} = 5,625 \cdot 10^4 - 5,625 \cdot 10^4 \Rightarrow \vec{E}_X = 0$

- b) O procedimento para o ponto  $Y$  é o mesmo. Vamos inicialmente calcular os valores dos vetores campo elétrico nesse ponto, devido a cada uma das cargas. As intensidades dos vetores  $\vec{E}_{AY}$  e  $\vec{E}_{BY}$  são, respectivamente:

$$E_{AY} = k_0 \cdot \frac{|Q_A|}{d^2} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{10^{-6}}{(1)^2} = 9 \cdot 10^3$$

(de aproximação) e

$$E_{BY} = k_0 \cdot \frac{|Q_B|}{d^2} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{10^{-6}}{(6 \cdot 10^{-1})^2} = \frac{9 \cdot 10^3}{36 \cdot 10^{-2}} = 2,5 \cdot 10^4 = 25 \cdot 10^3$$

O vetor campo elétrico resultante  $\vec{E}_Y$  no ponto  $Y$

será a soma vetorial  $\vec{E}_Y = \vec{E}_{AY} + \vec{E}_{BY}$ . Vamos determinar o vetor usando a regra do paralelogramo e o seu módulo pela lei dos cossenos:

$E_Y^2 = E_{AY}^2 + E_{BY}^2 + 2 \cdot E_{AY} \cdot E_{BY} \cdot \cos \theta$ , em que, de acordo com o triângulo retângulo formado pelas

cargas e pelo ponto  $Y$ ,  $\cos \theta = \frac{60 \text{ cm}}{100 \text{ cm}} = 0,6$ . Assim:

$$E_Y^2 = (9 \cdot 10^3)^2 + (25 \cdot 10^3)^2 + 2 \cdot 9 \cdot 10^3 \cdot 25 \cdot 10^3 \cdot 0,6$$

$$E_Y^2 = 81 \cdot 10^6 + 625 \cdot 10^6 + 270 \cdot 10^6 = 976 \cdot 10^6 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow E_Y = \sqrt{976 \cdot 10^6} \cong 31,2 \cdot 10^3 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow E_Y \cong 3,12 \cdot 10^4 \text{ N/C}$$

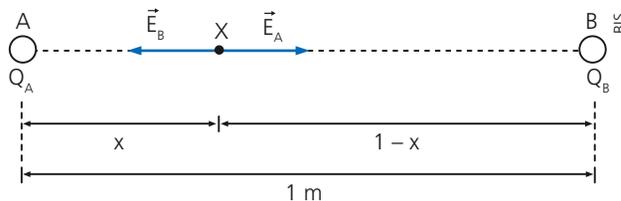
**ER4.** Considere duas cargas puntiformes  $Q_A = +1 \mu\text{C}$  e  $Q_B = +2 \mu\text{C}$  separadas por uma distância de 1,0 m e fixas, respectivamente, nos pontos  $A$  e  $B$  de um plano horizontal. Determine um ponto  $P$ , ao longo da reta que une as cargas  $A$  e  $B$ , em que o vetor campo elétrico resultante seja nulo.

Antes de iniciar ou propor o exercício resolvido ER4, leia nas Orientações Didáticas sugestão de encaminhamento e comentários.

### Resolução:

Dados:  $Q_A = +1 \mu\text{C} = +1 \cdot 10^{-6} \text{ C}$  e  $Q_B = +2 \mu\text{C} = +2 \cdot 10^{-6} \text{ C}$

Como as cargas são positivas, cada uma delas gera, no ponto  $P$  considerado, vetores campo de afastamento. O vetor campo elétrico resultante será nulo nesse ponto somente em duas situações: quando o vetor  $\vec{E}_A$  e o vetor  $\vec{E}_B$  forem ambos nulos (o que não se verifica nessa situação) ou quando tiverem a mesma intensidade, a mesma direção, porém em sentidos opostos, como mostra a figura a seguir.



Portanto, vamos determinar a que distância  $x$  do ponto  $A$  sobre a reta  $\overline{AB}$  acontece a igualdade  $E_A = E_B$ :

$$E_A = E_B \Rightarrow k_0 \cdot \frac{|Q_A|}{x^2} = k_0 \cdot \frac{|Q_B|}{(1-x)^2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{1 \cdot 10^{-6}}{x^2} = \frac{2 \cdot 10^{-6}}{x^2 - 2x + 1} \Rightarrow$$

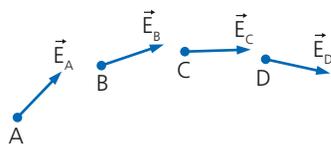
$$\Rightarrow x^2 + 2x - 1 = 0.$$

Resolvendo a equação, considerando  $\sqrt{2} = 1,41$ , temos:  $x = -2,41 \text{ m}$  (esta resposta não convém, pois significa que o ponto  $P$  estaria sobre a reta  $\overline{AB}$ , mas à esquerda de  $A$ , onde o vetor campo elétrico resultante não é nulo) e  $x = 0,41 \text{ m}$  (então, o ponto  $X$  está a 0,41 m do ponto  $A$  na reta que une as duas cargas).

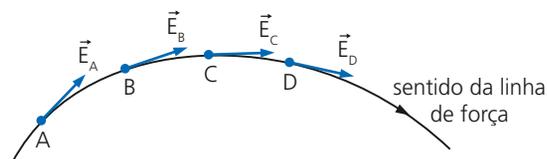


## Linhas de força

São chamadas linhas de força ou linhas de campo as linhas imaginárias que tangenciam os vetores campo elétrico em cada ponto, e são orientadas no sentido desses vetores, como mostram as figuras seguintes.



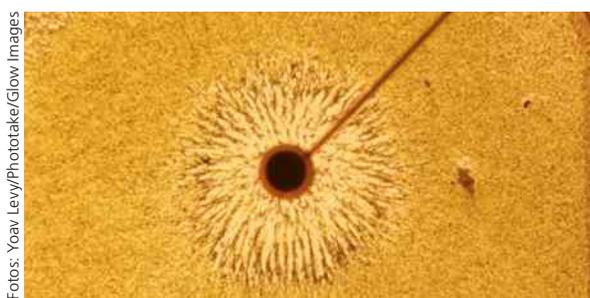
Vetores campo elétrico em quatro pontos.



Linha de força que passa pelos quatro pontos; a linha de força tangencia cada um dos vetores campo elétrico.

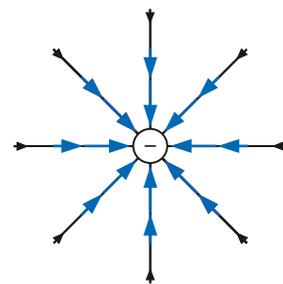
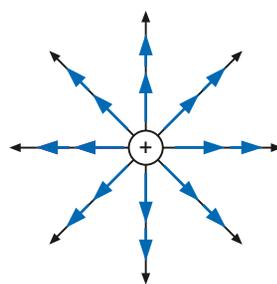
A seguir apresentamos alguns tipos de linhas de força de cargas puntiformes, com suas visualizações fotográficas.

- Cargas isoladas: as linhas de força são radiais.



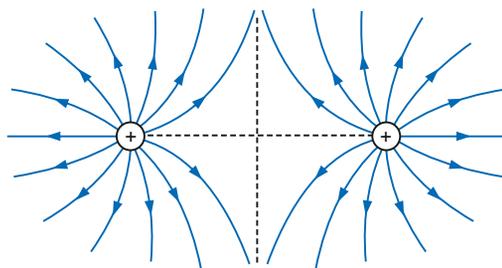
Fotos: Yoav Levy/Phototake/Glow Images

Linhas de força criadas por objeto carregado; seja qual for o sinal da carga, a configuração das linhas é a mesma.



Ilustrações: TFG

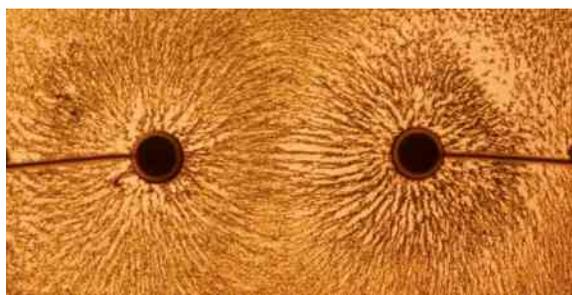
- Duas cargas positivas de mesmo módulo: o campo elétrico é nulo no ponto médio do segmento de reta que une as duas cargas.



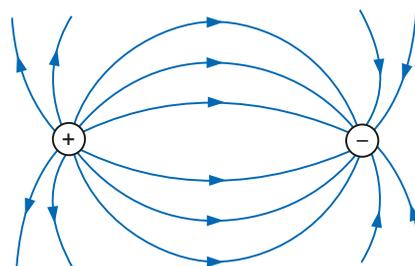
Ilustrações: Alex Argozino

Caso as duas cargas sejam negativas e de mesmo módulo, basta inverter o sentido das linhas de força, ou seja, as linhas de força entram nas cargas negativas.

- Duas cargas de sinais opostos e de mesmo módulo: as linhas de força saem da carga positiva e chegam à negativa.

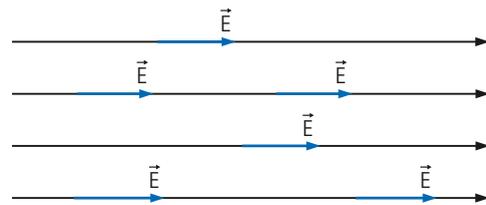


Linhas de força criadas por um dipolo elétrico.

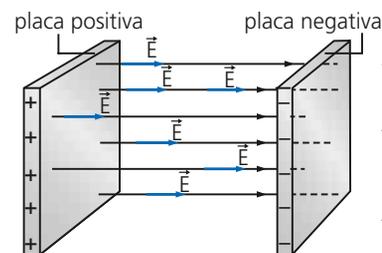


# Campo elétrico uniforme

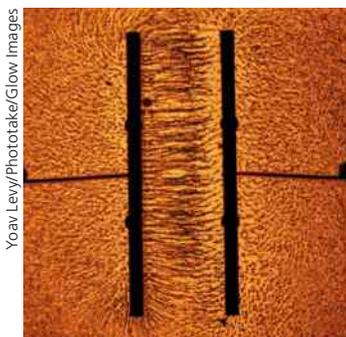
Define-se campo elétrico uniforme como sendo a região onde todos os vetores campo elétrico têm a mesma intensidade, a mesma direção e o mesmo sentido. Sabendo-se que as linhas de força tangenciam os vetores campo, podemos concluir que, no interior de um campo uniforme, as linhas de força são retas paralelas igualmente espaçadas (como ao lado).



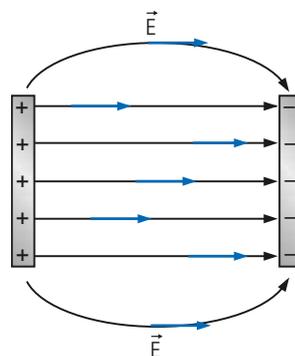
Um campo com essas características pode ser obtido por meio de duas placas paralelas condutoras, muito pouco distanciadas uma da outra, eletrizadas igualmente, mas com cargas de sinais opostos. As linhas de força saem da placa positiva e chegam à placa negativa.



O campo elétrico é uniforme apenas na parte central das placas; nas suas bordas ele não é uniforme e, por isso, as linhas de força não são paralelas, como ilustra a figura a seguir e a sua visualização.



Linhas de força criadas por placas carregadas com cargas contrárias.



Ilustrações: Alex Argozino

Como exemplo de campo uniforme, podemos citar aquele formado no interior da nuvem ou entre a base da nuvem e o solo, momentos antes de acontecer uma tempestade.

## ATIVIDADE PRÁTICA

FAÇA NO CADERNO NÃO ESCREVA NO LIVRO

### Mapeando o campo elétrico

Sabemos que a relação entre o campo elétrico e a carga é recíproca, ou seja, onde há campo há carga e onde há carga há campo, desde que o corpo não esteja neutro. Com base no capítulo que estudamos, vamos verificar em uma situação real como os campos elétricos de afastamento e de aproximação se comportam.

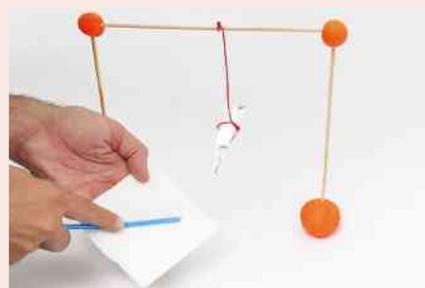


#### Material

- pedaço de papel-alumínio
- linha fina (fio de náilon ou linha de costura)
- palitos de churrasquinho para suporte
- massa de modelar
- papel-toalha
- canudinho plástico

#### Procedimento

- I. Cortem um pedaço pequeno de papel-alumínio na forma de um triângulo de uns 5 cm de altura com uma base de cerca de 1 cm.
- II. Amarrem uma linha fina no centro do triângulo de alumínio de modo que fique equilibrada na horizontal quando vocês pendurarem o fio.
- III. Com a massinha de modelar e os palitos, montem um suporte e amarrem o fio na parte superior de forma a deixá-lo pendurado.



Fernando Favoretto/Criar Imagem

- IV. Atritem o papel-toalha contra o canudo plástico.
- V. Aproximem o canudo do papel-alumínio e anotem o que acontece.
- VI. Encostem o canudo no papel-alumínio.
- VII. Aproximem o papel-toalha do papel-alumínio sem encostar um no outro e anotem o que acontece.
- VIII. Aproximem o canudo do papel-alumínio sem encostar um no outro e anotem o que acontece.

### Discussão

1. Analisando a série triboelétrica, qual é a carga que o canudo e o papel-alumínio ganham ao ser atritados?
2. No procedimento V, qual é a carga do papel-alumínio? Por que ocorre aquele comportamento?
3. Ao encostar o canudo no papel-alumínio, qual carga esse último irá receber? Por quê?
4. Nos procedimentos VII e VIII, como estão os campos elétricos do canudo e do papel-alumínio? Faça um esquema.
5. Depois que o papel-alumínio é carregado, ele vira uma espécie de ponteiro do campo elétrico. Por quê?

Ver Orientações Didáticas.

## Exercício resolvido

**ER5.** Um ponto material de massa 1 mg (miligrama) eletrizado com carga  $+2 \mu\text{C}$  é abandonado no interior de um campo elétrico uniforme de intensidade  $8 \cdot 10^4 \text{ N/C}$ . Desprezando a ação da força gravitacional, determine:

- a) o módulo da força elétrica que atua na carga;
- b) a aceleração que a carga adquire;
- c) o instante em que o ponto material possui velocidade de 320 m/s e a distância percorrida por ele nesse intervalo de tempo.

### Resolução:

Temos do ponto material:  $m = 1 \text{ mg} = 10^{-3} \cdot 10^{-3} \text{ kg} = 10^{-6} \text{ kg}$ ;  $q = +2 \mu\text{C} = +2 \cdot 10^{-6} \text{ C}$ ;  $v_0 = 0$

$E = 8 \cdot 10^4 \text{ N/C}$  (constante, pois o campo elétrico é uniforme)

Sem a ação da força gravitacional, o ponto material adquire um movimento retilíneo uniformemente va-

riado, pois a força elétrica que atua nele é constante, em consequência de o campo elétrico ser constante.

a) Da expressão:  $F = |q| \cdot E$ , temos  $F = 2 \cdot 10^{-6} \cdot 8 \cdot 10^4 = 16 \cdot 10^{-2} \Rightarrow F = 0,16 \text{ N}$

b) Como a força elétrica é constante, pela 2ª lei de Newton, temos:  $F = m \cdot a \Rightarrow 0,16 = 10^{-6} \cdot a \Rightarrow$

$$\Rightarrow a = \frac{1,6 \cdot 10^{-1}}{10^{-6}} \Rightarrow a = 1,6 \cdot 10^5 \text{ m/s}^2$$

c) Como o ponto material adquire um movimento uniformemente acelerado, podemos utilizar a equação:  $v = v_0 + a \cdot t \Rightarrow 320 = 0 + 1,6 \cdot 10^5 \cdot t \Rightarrow t = 2 \cdot 10^{-3} \text{ s}$

A distância percorrida nesse tempo é:

$$d = v_0 \cdot t + \frac{a \cdot t^2}{2} = 0 + \frac{1,6 \cdot 10^5 \cdot (2 \cdot 10^{-3})^2}{2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow d = 3,2 \cdot 10^{-1} \text{ m ou } d = 0,32 \text{ m}$$

## OUTRAS PALAVRAS

### O campo elétrico como uma função vetorial de ponto

Quando temos um conjunto de cargas dispostas em pontos determinados, temos uma distribuição de cargas. As propriedades do espaço próximo a uma distribuição de cargas podem ser descritas por meio de uma função de ponto. Leia a seguir um trecho escrito pelo prof. Edward M. Purcell, da Universidade de Harvard, sobre o campo elétrico.

Suponhamos uma distribuição de cargas  $q_1, q_2, \dots, q_N$ , fixas no espaço, e interesse-mo-nos não pelas forças que elas exercem entre si, mas pelos efeitos que produzem sobre alguma outra carga  $q_0$ , que seja trazida às suas proximidades. Sabemos calcular a força resultante nessa carga, conhecida a sua posição que podemos definir pelas coordenadas  $(x, y, z)$ . A força na carga  $q_0$  é:

$$\vec{F}_0 = \sum_{j=1}^N k \cdot q_0 \cdot q_j \frac{\vec{r}_{0j}}{r_{0j}^2}, \text{ em que } \vec{r}_{0j} \text{ é o vetor que dá a direção da } j\text{-ésima carga do sistema ao ponto } (x, y, z).$$



A força é proporcional a  $q_0$ ; assim, se dividirmos por  $q_0$ , obteremos uma grandeza vetorial que depende apenas do sistema original de cargas  $q_1, q_2, \dots, q_N$  e da posição do ponto  $(x, y, z)$ . Chamamos essa função vetorial de  $(x, y, z)$  o campo elétrico criado por  $q_1, q_2, \dots, q_N$  e usamos para ele o símbolo  $\vec{E}$ . As cargas  $q_1, q_2, \dots, q_N$  são chamadas fontes do campo. Podemos adotar como definição do campo elétrico  $\vec{E}$  de uma distribuição de cargas no ponto

$$(x, y, z) \text{ a expressão } \vec{E} = \sum_{j=1}^N \frac{k \cdot q_j \cdot \vec{r}_{0j}}{r_{0j}^2}$$

Até agora, nada de realmente novo. O campo elétrico é meramente uma outra maneira de descrever o sistema de cargas; ele o faz fornecendo a força por unidade de carga, em módulo, direção e sentido, que uma carga de prova sofre em qualquer ponto. Devemos tomar um pouco de cuidado com esta interpretação. A menos que as cargas fontes sejam realmente imóveis, a introdução de uma carga de prova  $q_0$ , finita, pode causar um deslocamento dessas cargas, de modo que o próprio campo fica diferente. É por isso que partimos da hipótese de cargas fixas. [...] Caso a introdução de uma nova carga cause deslocamentos das cargas fontes, então ela realmente produzirá modificação no campo elétrico e, se quisermos prever a força sobre a nova carga, devemos utilizar o novo campo para calculá-la.

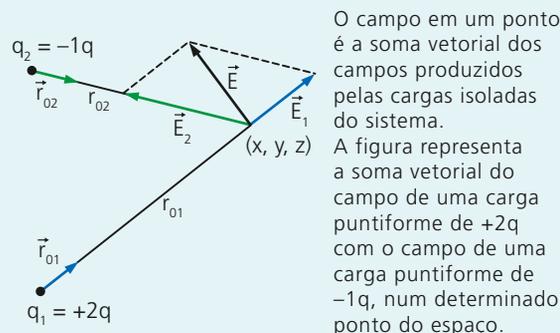
Talvez você ainda queira perguntar: o que é um campo elétrico? É alguma coisa real, ou é meramente o nome de um fator numa equação que deve ser multiplicado por alguma outra coisa para dar o valor numérico da força que medimos numa experiência?

Duas observações podem ser úteis aqui. Primeira: desde que funciona, não faz diferença. Essa não

é uma resposta frívola, mas séria. Segunda: o fato de que o vetor campo elétrico num dado ponto do espaço é tudo o que precisamos conhecer para calcular a força em *qualquer* carga naquele ponto não é, de modo algum, trivial. Poderia ser de outra forma! Se nunca tivesse sido realizada experiência nenhuma, poderíamos imaginar que, em duas posições diferentes, nas quais cargas unitárias sofrem forças iguais, cargas de prova de duas unidades poderiam sofrer forças diferentes, dependendo da natureza das outras cargas do sistema. Se isso fosse verdade, a descrição por meio de campo não funcionaria.

O campo elétrico atribui a cada ponto do sistema uma *propriedade local*, neste sentido: se conhecemos  $\vec{E}$  numa pequena vizinhança, então sabemos, *sem maiores indagações*, o que acontecerá com *quaisquer* cargas, naquela vizinhança. Não há necessidade de saber que fontes produziram o campo. Se conhecermos o campo elétrico em todos os pontos do espaço, temos uma descrição completa de todo o sistema, que inclusive poderá revelar posições e intensidades de todas as cargas.

PURCELL, E. M. *Curso de Física de Berkeley*. v. 2. São Paulo: Blucher, 1970. p. 16-17.0



## Organizando as ideias do texto

1. Retome agora o resultado do problema **ER4** e interprete o resultado obtido, considerando o campo como uma das maneiras exploradas neste texto. *Professor, veja as Orientações Didáticas.*

## Exercícios propostos

FAÇA NO CADERNO NÃO ESCREVA NO LIVRO

**EP1.** Para acelerar uma partícula em laboratório, utilizando a 2ª lei de Newton da Dinâmica, realizou-se o que está descrito a seguir. Uma carga de prova, eletrizada positivamente com carga  $2 \mu\text{C}$ , é colocada em um ponto de um campo elétrico, cujo vetor tem direção horizontal, sentido da esquerda para a direita e módulo  $4 \cdot 10^5 \text{ N/C}$ .

$F = 0,8 \text{ N}$ , direção horizontal e sentido da esquerda para a direita.

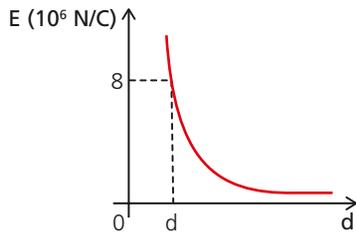
- a) Determine a intensidade, a direção e o sentido da força elétrica que atua na carga de prova.

- b) Qual é a intensidade da componente da aceleração aplicada na partícula, oriunda da força elétrica, se a massa da partícula for de  $1 \text{ g}$ ?

$$F = m \cdot a \Rightarrow 0,8 = 0,001 \cdot a \Rightarrow a = 800 \text{ m/s}^2$$

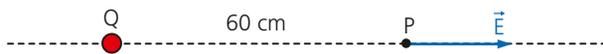
**EP2.** Uma partícula puntiforme de massa  $10 \text{ g}$ , eletrizada positivamente com carga  $q$ , é colocada em um ponto de um campo elétrico cujo vetor possui intensidade  $200 \text{ N/C}$ , direção vertical e sentido para cima. Nesse ponto, a partícula permanece em equilíbrio devido à ação da gravidade. Sendo  $g = 10 \text{ m/s}^2$ , calcule o valor da carga  $q$ .  $q = 5 \cdot 10^{-4} \text{ C}$

**EP3.** A intensidade do vetor campo elétrico  $E$  devido a uma partícula eletrizada  $Q$  varia de acordo com a distância  $d$ , conforme mostra a hipérbole esquematizada no diagrama.



Qual deve ser a intensidade do vetor campo elétrico em um ponto afastado  $2d$  da carga  $Q$ ?  $2 \cdot 10^6 \text{ N/C}$

**EP4.** A intensidade do vetor campo elétrico  $\vec{E}$  no ponto  $P$ , gerado pela carga puntiforme  $Q$  da figura, é de  $9 \cdot 10^5 \text{ N/C}$ , no vácuo, onde a constante eletrostática vale  $9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$ . Determine o sinal e o valor da carga  $Q$ .

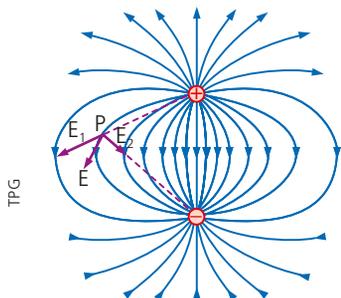


**EP5.** Em dois vértices horizontais,  $B$  e  $C$ , de um triângulo equilátero de  $30 \text{ cm}$  de lado estão colocadas, respectivamente, as cargas puntiformes  $Q_B = -2 \mu\text{C}$  e  $Q_C = +2 \mu\text{C}$ , imersas no vácuo. Sendo a constante eletrostática  $k_0 = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$ , determine o módulo, a direção e o sentido do vetor campo elétrico resultante no vértice  $A$  do triângulo.  $E_A = 2 \cdot 10^5 \text{ N/C}$ , direção horizontal e sentido da direita para a esquerda.

**EP6.** Duas pequenas esferas idênticas eletrizadas, uma positivamente e a outra negativamente, com carga  $3,6 \mu\text{C}$  cada uma, estão separadas por uma distância de  $60 \text{ cm}$ , no vácuo, onde o valor da constante eletrostática é  $k_0 = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$ .

- A força elétrica  $F$  entre elas é de atração ou de repulsão? E qual a sua intensidade? *Atração:  $F = 0,324 \text{ N}$*
- Determine o valor do campo elétrico resultante  $E$  no ponto médio entre as esferas.  $E = 7,2 \cdot 10^5 \text{ N/C}$

**EP7.** A figura representa duas cargas puntiformes  $Q$  de mesmo módulo, mas sinais opostos, imersas no vácuo ( $k_0 = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$ ). O ponto  $P$  está distante  $20 \text{ cm}$  da carga positiva e  $30 \text{ cm}$  da negativa. Sabe-se que a intensidade do vetor campo elétrico  $\vec{E}_1$ , gerado pela carga positiva no ponto  $P$ , vale  $9 \cdot 10^5 \text{ N/C}$ .



**EP4.** A carga é positiva e o seu valor é  $Q = + 36 \mu\text{C}$ .

Determine:

- o valor da carga;  $Q = 4 \cdot 10^{-6} \text{ C}$
- a intensidade do vetor campo elétrico  $\vec{E}_2$ , gerado pela carga negativa, no ponto  $P$ ;  $E_2 = 4 \cdot 10^5 \text{ N/C}$
- a intensidade do vetor campo elétrico  $\vec{E}$  resultante no ponto  $P$ , sabendo-se que o ângulo formado pelos vetores  $\vec{E}_1$  e  $\vec{E}_2$  vale  $120^\circ$ .  $E \cong 7,8 \cdot 10^5 \text{ N/C}$

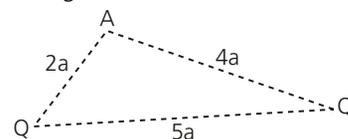
**EP8.** Um elétron é solto a partir do repouso, num campo elétrico uniforme de intensidade igual a  $4,5 \cdot 10^3 \text{ N/C}$ . Desprezando o efeito da gravidade, calcule a aceleração do elétron.

Dados do elétron: carga  $q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$  e massa  $m = 9,0 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ .  $8 \cdot 10^{14} \text{ m/s}^2$

**EP9.** Considere duas partículas eletrizadas com a mesma quantidade de carga, ambas positivas, separadas por uma distância  $d$ . Com respeito a essa situação, responda:

- Qual é o motivo de a intensidade do campo elétrico ser nulo no ponto médio do segmento cujos extremos são as duas partículas? *Respostas nas Orientações Didáticas.*
- Isso significa que a força resultante sobre uma partícula de carga negativa, colocada nesse ponto médio, é nula; essa carga está, então, em equilíbrio? O que acontece se movermos essa carga ao longo desse segmento?
- Qual(is) seria(m) a(s) modificação(ões) às respostas do item *b* se trocássemos a carga negativa por outra positiva?

**EP10.** (UFMS) Duas cargas elétricas puntiformes positivas  $Q$  estão fixas posicionadas nos vértices de um triângulo conforme figura abaixo.



Seja  $E$  o módulo do campo elétrico no vértice  $A$  gerado pela carga  $Q$  que está a uma distância  $4a$  do mesmo vértice. É correto afirmar que: *Ver comentários nas Orientações Didáticas.*

- o campo elétrico resultante no vértice  $A$ , gerado pelas duas cargas elétricas, é nulo.
- o campo elétrico resultante no vértice  $A$ , gerado pelas duas cargas elétricas, tem módulo  $3E$ .
- o campo elétrico resultante no vértice  $A$ , gerado pelas duas cargas elétricas, tem módulo  $11E$ .
- o campo elétrico resultante no vértice  $A$ , gerado pelas duas cargas elétricas, tem módulo  $E\sqrt{\frac{29}{2}}$ .
- uma carga puntiforme  $q$ , colocada no vértice  $A$ , sofrerá a ação de uma força de módulo  $\frac{3 \cdot q \cdot E\sqrt{5}}{4}$  devido às duas cargas  $Q$ .

# Potencial elétrico

Não existem evidências de que a história da maçã tenha de fato ocorrido. No entanto, é inegável que a mente preparada de Isaac Newton relacionou o movimento de queda de objetos simples — como uma maçã — com as propriedades do espaço onde essas interações ocorriam. Autor desconhecido. Sem data.



Mary Evans/Diomedea

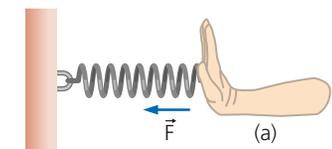
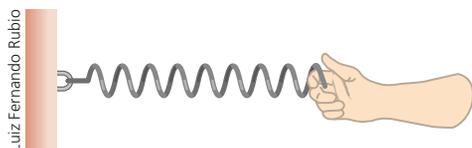
A figura acima ilustra uma das histórias mais populares da Física: a maçã de Newton. É provável que Newton tenha se inspirado nesse evento para questionar se o mesmo tipo de força que fez a maçã cair poderia atrair corpos mais afastados da Terra ou até mesmo prender a Lua à sua órbita. Assim, Newton formulou a Lei da Gravitação Universal.

Mas o que fez a maçã cair? Você viu na Mecânica que, mesmo estando inicialmente em repouso em relação à Terra, a maçã tem energia potencial armazenada, graças ao campo gravitacional da Terra, e que será transformada em energia cinética quando ela se soltar da árvore. Quanto maior for a altura onde se localiza a maçã, maior será sua energia cinética ao chegar ao solo.

Podemos verificar também a energia potencial armazenada em uma mola comprimida em relação ao seu estado natural. Essa energia armazenada é chamada de energia potencial elástica.

Veremos neste capítulo que uma carga elétrica (de prova) colocada no interior de um campo elétrico também adquire movimento, não pela ação da gravidade ou da mola, mas de outra maneira. Essa carga de prova recebe uma energia potencial armazenada de natureza elétrica chamada de energia potencial elétrica. Do mesmo modo que, para a maçã, a quantidade de energia potencial gravitacional depende da sua posição em relação ao solo, a quantidade de energia potencial de uma carga de prova também dependerá da sua posição em relação à carga que criou esse campo.

A intensidade da energia potencial elétrica dependerá das cargas que serão aproximadas, da distância entre elas e do meio no qual elas estão imersas.

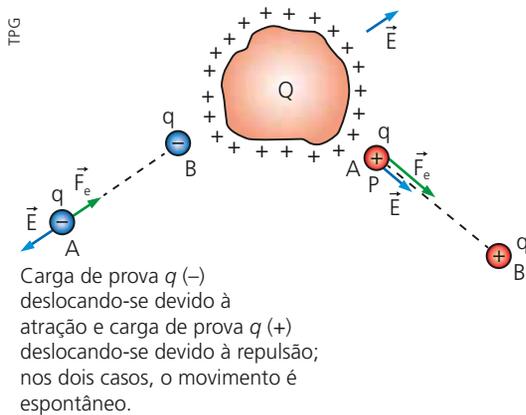


+ q



Para encurtar uma mola é necessário fornecer energia (a), que será armazenada na forma de energia potencial elástica. O mesmo se dá com as cargas elétricas: para aproximar duas cargas de mesmo sinal também será necessário fornecer energia (b), que será armazenada na forma de energia potencial elétrica.

# Energia potencial elétrica — potencial elétrico



Considere o campo elétrico gerado por uma carga fixa  $Q$  e uma carga de prova  $q$  colocada em um ponto  $A$ . Dependendo da combinação de sinais dessas cargas, a carga  $q$  poderá ser atraída ou repelida deslocando-se **espontaneamente** para um ponto  $B$ , variando sua velocidade devido à ação da força elétrica.

Vimos na Mecânica que, quando a velocidade de um corpo é modificada, graças à ação gravitacional, ocorre uma variação da sua energia cinética  $e$ , ao mesmo tempo, ocorre uma variação de energia potencial, de mesmo módulo e sinal oposto. A energia potencial associada a um campo elétrico é chamada de **energia potencial elétrica**, representada por  $E_{pe}$ . Essa energia é função da posição do ponto no campo, ou seja, a cada ponto está associado um valor de energia potencial. Toda vez que ocorre um movimento espontâneo da carga de prova, ocorre também diminuição da energia potencial elétrica; você já conhece um fato análogo, que é o movimento espontâneo da maçã para baixo, na queda, e consequente diminuição da energia potencial.

Mas, em vez de tratarmos da energia potencial elétrica de um corpo de carga  $q$  em um campo gerado por carga  $Q$ , é mais conveniente considerarmos a energia potencial elétrica por unidade de carga. Para isso, dividimos a energia potencial elétrica  $E_{pe}$  pela quantidade de carga  $q$ . A grandeza que expressa a energia potencial elétrica por unidade de carga é denominada **potencial elétrico (V)**.

$$V = \frac{E_{pe}}{q}$$

A vantagem dessa grandeza é que ela expressa a energia potencial que uma carga unitária recebe na posição  $P$  de um campo criado pela carga  $Q$ .

A unidade utilizada para medir o potencial elétrico no Sistema Internacional é o **volt (V)**. Então, um potencial de 1 volt é igual a 1 joule (J) de energia por 1 coulomb (C) de carga. Assim:

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

## A FÍSICA NO COTIDIANO

### A pilha elétrica

Os dispositivos eletrônicos e seus periféricos trouxeram mobilidade e praticidade à nossa vida. Mobilidade é a qualidade que dispositivos ou processos geram ao serem usados em contextos mais amplos que aqueles para os quais foram projetados. Celulares, *notebooks*, controles de televisão, *mouses*, marca-passos, todos esses aparelhos funcionam à base de eletricidade, sem estar ligados à rede elétrica, e isso só foi possível com a criação de pilhas e baterias portáteis.

Independentemente dos aparelhos a que se destinam, pilhas e baterias são indispensáveis para o modo de vida a que nos habituamos, e é muito difícil visualizar a sociedade como a conhecemos sem esses dispositivos. Por exemplo, antigamente, para ouvir música ou usar um telefone, as pessoas deviam se dirigir a algum lugar onde um aparelho compatível com uma dessas funções estivesse disponível. Os computadores existiam em pequeno número e, inicialmente, ocupavam grande espaço de

uma sala. Compare com a situação atual, quando podemos transportar nossos *notebooks* ou *tablets* dentro da mochila e acioná-los mesmo sem acesso a uma rede de eletricidade.

A pilha é, em essência, uma unidade isolada que fornece eletricidade a partir de reações químicas. Essa ideia é tão revolucionária que levou a comunidade científica internacional a homenagear seu inventor, o físico italiano Alessandro Giuseppe Volta (1745-1827), dando seu nome à unidade do potencial elétrico, o volt. Dependendo do tipo de reação química que fornece a corrente elétrica, as pilhas podem ser descartáveis ou recarregáveis.

No entanto, ao mesmo tempo em que cresce o número de dispositivos que utilizam pilhas e baterias, deve crescer também a responsabilidade com seu descarte. Pelo fato de não serem feitas de materiais orgânicos nem recicláveis, as pilhas devem ter uma destinação específica após o uso, pois as substâncias químicas em seu interior são tóxicas, podem vazarem e causar graves problemas ambientais. Daí a necessidade de criar lugares e métodos para o descarte correto desses dispositivos.



Fernando Favoretto/Criar Imagem

## Diferença de potencial ( $U$ )

Os valores dos potenciais elétricos dos pontos  $A$  e  $B$  dependem das distâncias respectivas que os separam da carga  $Q$ . Determina-se a diferença de potencial ( $U$ ) que existe entre eles por meio da diferença dos potenciais elétricos em  $A$  ( $V_A$ ) e em  $B$  ( $V_B$ ), ou seja:

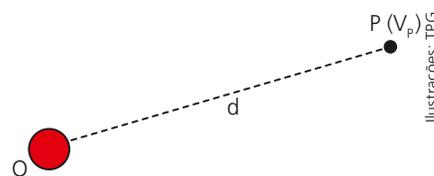
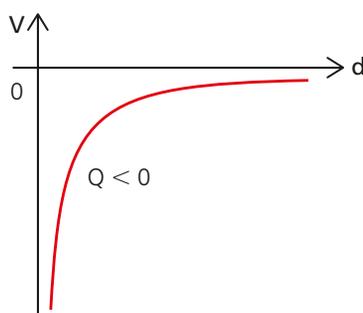
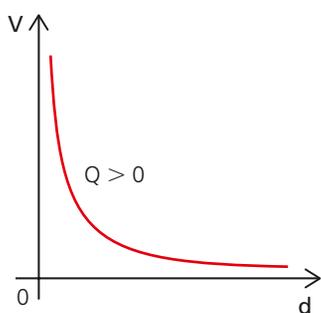
$$U = V_A - V_B$$

Então, semelhante a uma diferença de temperatura que gera a passagem (fluxo) de calor, e a um desnível que provoca o deslocamento da água em um rio ou ocasiona a queda de uma pedra, uma diferença de potencial elétrico provoca o movimento espontâneo de cargas elétricas de um ponto a outro.

## Potencial elétrico no campo de uma carga elétrica puntiforme

Considere um ponto  $P$  a uma distância  $d$  da carga  $Q$ , no vácuo como ao lado. Demonstra-se que o potencial elétrico gerado pela carga  $Q$ , no ponto  $P$ , que denotaremos  $V_p$ , é expresso por  $V_p = k_0 \frac{Q}{d}$ , em que  $k_0$  é a constante eletrostática no vácuo.

O potencial elétrico apresenta o mesmo sinal da carga  $Q$ . Representando os gráficos correspondentes do potencial elétrico  $V_p$  em função da distância  $d$  relativamente à carga geradora de campo elétrico, temos hipérbolas equiláteras.



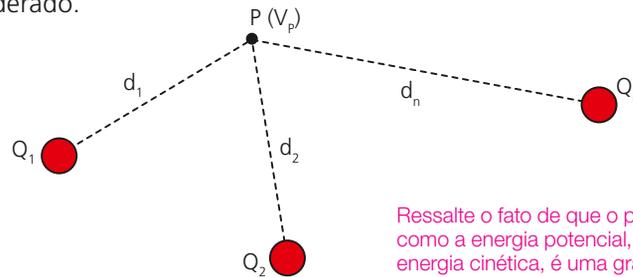
Ilustrações: TPG

Analisando os gráficos, verificamos que, à medida que a distância  $d$  aumenta, o valor do potencial elétrico  $V_p$  tende a zero. Matematicamente, o potencial elétrico  $V_p$  tenderá a zero ( $V_p \rightarrow 0$ ) quando a distância  $d$  tender ao infinito ( $d \rightarrow \infty$ ).

Lembre-se de que o valor da energia potencial sempre está relacionado com um referencial, e também é assim com o potencial elétrico ( $V$ ); o valor zero para energia potencial no infinito permite adotar o referencial no infinito (mas qualquer outra adoção também é válida). Na prática, devemos entender por “infinito” um local suficientemente afastado da carga  $Q$ , de modo que seja desprezível sua influência sobre o ponto  $P$  considerado.

## Potencial elétrico no campo de várias cargas puntiformes

Quando se tem no vácuo duas ou mais cargas puntiformes  $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$  e um ponto  $P$  sujeito ao campo criado por essas várias cargas, o potencial elétrico gerado nesse ponto  $P (V_p)$  será a soma algébrica dos potenciais de todas as cargas no ponto considerado.



Ressalte o fato de que o potencial, assim como a energia potencial, o trabalho e a energia cinética, é uma grandeza escalar, diferentemente do campo e da força, que são grandezas vectoriais.

$$\text{Portanto, } V_p = V_1 + V_2 + \dots + V_n$$

ou

$$V_p = k_0 \cdot \frac{Q_1}{d_1} + k_0 \cdot \frac{Q_2}{d_2} + \dots + k_0 \cdot \frac{Q_n}{d_n} = k_0 \cdot \left( \frac{Q_1}{d_1} + \frac{Q_2}{d_2} + \dots + \frac{Q_n}{d_n} \right)$$

O potencial elétrico resultante, no ponto  $P$ , é nulo ( $V_p = 0$ ) em duas situações: no caso em que  $P$  estiver infinitamente afastado das cargas ( $d_p \rightarrow \infty$ ) ou quando a soma algébrica dos potenciais criados pela distribuição de cargas tiver valor nulo.

## Propriedades do potencial elétrico

Já vimos que as linhas de força tangenciam os vetores campo elétrico e têm o mesmo sentido deles. Sabemos também que as linhas de força de uma carga fixa  $Q$  positiva indicam afastamento espontâneo de cargas de prova  $q$  positivas; e as linhas de uma carga  $Q$  negativa indicam aproximação.

Assim, como a expressão do potencial elétrico de  $Q$  no ponto  $A$  vale  $V_A = k_0 \frac{Q}{d_A}$ , e no ponto  $B$ ,  $V_B = k_0 \frac{Q}{d_B}$ , podemos concluir que:

Para  $Q > 0$  (figura 1): se a distância de  $Q$  ao ponto  $A$  é menor que a sua distância ao ponto  $B$  ( $d_A < d_B$ ), então o potencial elétrico no ponto  $A$  é maior que no ponto  $B$  ( $V_A > V_B$ ). Assim, uma carga de prova  $q > 0$  colocada em repouso no ponto  $A$ , movimentar-se espontaneamente em direção ao ponto  $B$  (devido à força elétrica de repulsão). Agora, uma carga de prova  $q < 0$ , colocada em repouso no ponto  $B$ , movimentar-se espontaneamente em direção ao ponto  $A$ , devido à força elétrica de atração.

Para  $Q < 0$  (figura 2): se a distância de  $Q$  ao ponto  $A$  é menor que a sua distância ao ponto  $B$  ( $d_A < d_B$ ), então o potencial elétrico no ponto  $B$  é maior que no  $A$  ( $V_A < V_B$ ). Desse modo, uma carga de prova  $q > 0$ , colocada em repouso no ponto  $B$ , movimentar-se espontaneamente em direção ao ponto  $A$  (devido à força elétrica de atração). Por outro lado, uma carga de prova  $q < 0$ , colocada em repouso em  $A$ , movimentar-se espontaneamente em direção ao ponto  $B$  devido à força elétrica de repulsão.

Ilustrações: TFG

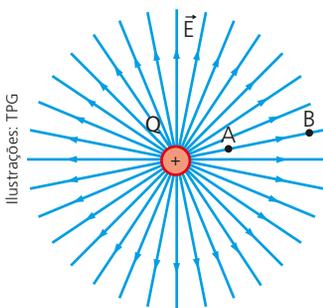


Figura 1

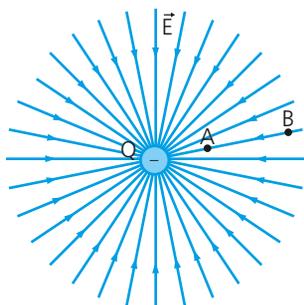


Figura 2

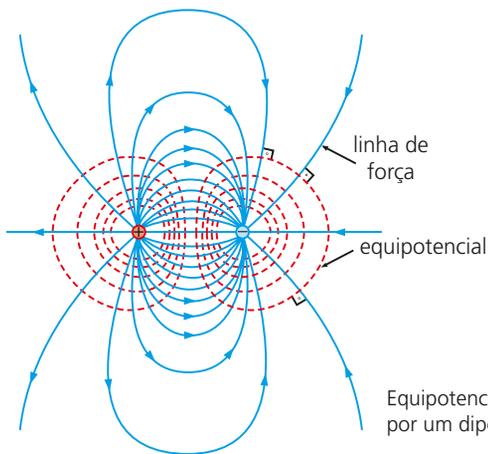
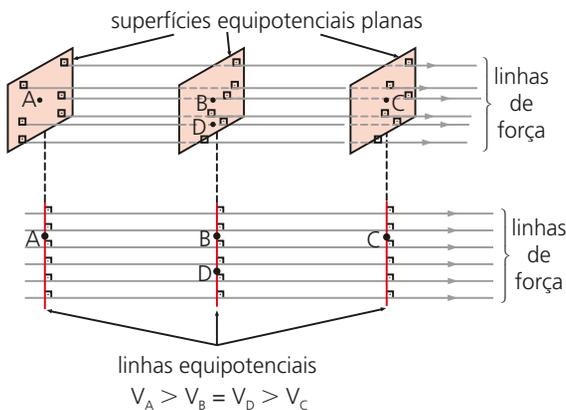
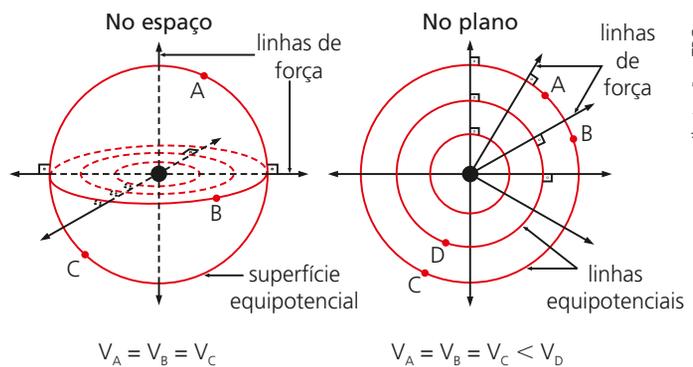
## Superfície equipotencial

Considere uma carga puntiforme  $Q$ , fixa e isolada no espaço. Já vimos que essa carga gera em seu redor um campo elétrico e que qualquer ponto no seu interior possui um potencial elétrico. No vácuo, ele é expresso por  $V = k_0 \cdot \frac{Q}{d}$ , onde  $d$  é uma distância do ponto à carga  $Q$ . O lugar geométrico dos infinitos pontos do espaço, equidistantes (a uma distância  $d$ ) de um ponto (carga  $Q$ ) é uma superfície esférica. Assim, analisando a expressão do potencial elétrico, podemos concluir que, dada uma carga puntiforme, existem infinitos pontos (constituindo uma superfície esférica) com o mesmo potencial elétrico ( $V$  constante). Essa superfície é chamada de **superfície equipotencial**.

Portanto, em um campo elétrico de uma carga pontual, a superfície equipotencial é uma superfície esférica; e no interior de um campo elétrico uniforme, a superfície equipotencial é uma superfície plana. Em qualquer caso, as linhas de força são sempre perpendiculares às superfícies equipotenciais. Existem infinitas esferas equipotenciais de diferentes raios, mas todas concêntricas com a carga  $Q$  ocupando o centro; e infinitos planos equipotenciais paralelos entre si, no interior de um campo elétrico uniforme.

Podemos observar também que os potenciais elétricos diminuem ao percorrer uma linha de força no seu sentido, como vimos nas propriedades.

Quando duas partículas eletrizadas com cargas de mesmo módulo, mas com sinais opostos, são colocadas próximas, forma-se um dipolo elétrico. As equipotenciais de um dipolo elétrico têm o aspecto da figura ao lado.



Equipotenciais do campo criado por um dipolo elétrico.

Ilustrações: TPG

## OUTRAS PALAVRAS

### Gerador de Van de Graaff

Leia o texto a seguir e conheça um aparelho muito utilizado em laboratórios para obter altas voltagens: o gerador de Van de Graaff, construído em 1931 pelo engenheiro estadunidense Robert Jamison van de Graaff. O gerador de Van de Graaff é o mais potente gerador eletrostático que se conseguiu até nossos dias.

Há modelos de todos os tamanhos, frequentemente vistos em demonstrações sobre eletricidade, pois acumulam carga com muita facilidade e provocam efei-

tos visuais expressivos, desde arrepiar cabelos até produzir faíscas elétricas.

Uma grande esfera metálica oca é sustentada por um cilindro isolante. Uma esteira de borracha movimentada por um motor, localizada no interior de um suporte cilíndrico, passa friccionando-se num conjunto de farpas de metal, como se formassem um pente, que é mantido a um grande potencial negativo com respeito ao

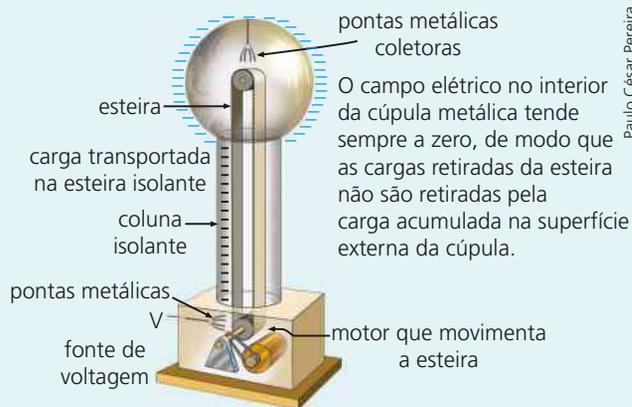
FAÇA NO CADERNO NÃO ESCREVA NO LIVRO

solo. Através das descargas que ocorrem nessas pontas metálicas, um suprimento contínuo de elétrons se deposita sobre a esteira, que circula pelo interior da cúpula oca condutora. Uma vez que o campo elétrico no interior do condutor é nulo, as cargas sobre a esteira acabam escapando por outro conjunto de farpas metálicas (minúsculos para-raios) e depositam-se no interior da cúpula. Os elétrons, então, se repelem mutuamente, dirigindo-se para a superfície exterior da cúpula condutora. A carga estática sempre fica por fora da superfície externa de qualquer condutor. Isso mantém o interior descarregado e capaz de receber mais elétrons trazidos pela esteira. O processo é contínuo e a carga na cúpula aumenta até que o potencial negativo da cúpula seja muito maior do que na fonte de voltagem na parte inferior do aparelho — da ordem de milhões de volts.

Uma esfera com um raio de 1 metro pode ser levada a um potencial de 3 milhões de volts antes que ocorra uma descarga elétrica através do ar. A voltagem pode ser elevada ainda mais, aumentando-se o raio da cúpula ou colocando o aparelho todo dentro de um

recinto preenchido com um gás a uma alta pressão. Geradores de Van de Graaff podem produzir voltagens tão altas quanto 20 milhões de volts. Essas voltagens aceleram partículas carregadas que são usadas como projéteis para penetrar nos núcleos atômicos. Tocar um desses geradores pode ser uma experiência de arrepiar os cabelos.

HEWITT, Paul G. *Física conceitual*. 9. ed. São Paulo: Bookman, 2006. p. 387.



Paulo César Pereira

## Organizando as ideias do texto

1. O autor afirma que “o campo elétrico no interior do condutor é nulo”. Por que motivo isso acontece?
2. Por que é sempre possível transportar cargas para a cúpula do gerador de Van de Graaff?
3. O que limita a quantidade de carga para a cúpula?
4. Se a pessoa tocar o chão ou mesmo outra pessoa, pode sentir um choque bastante intenso. Justifique esse fato pela movimentação de cargas e pela diferença de potencial.

Professor, veja *Orientações Didáticas*.

A cúpula e o menino estão carregados e em equilíbrio, portanto estão sob o mesmo potencial.

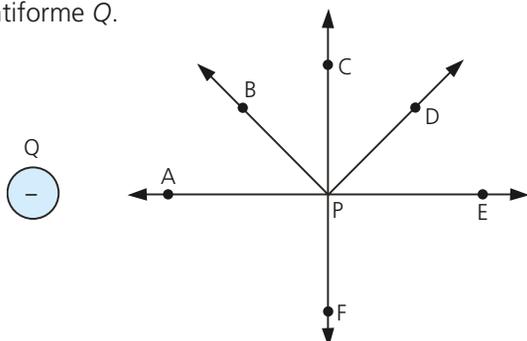


Fernando Favoretto/Criar Imagem

## Exercícios resolvidos

**ER1.** Uma carga  $q$  é colocada em repouso no ponto  $P$ , sob influência do campo elétrico gerado pela carga puntiforme  $Q$ .

Ilustrações: TPG



Com base nessas informações, responda:

- a) Que trajetória a carga  $q$  irá seguir caso ela seja positiva?
- b) E se ela for negativa?

### Resolução:

- a) Como a carga que cria o campo é negativa, as linhas de força são de aproximação. Portanto, se uma carga  $q > 0$  for colocada em repouso no ponto  $P$ , ela se moverá na direção da reta que a une à carga  $Q$ , aproximando-se do ponto  $A$ , e eventualmente ultrapassando-o, devido à atração elétrica.

b) Se uma carga  $q < 0$  for colocada em repouso no ponto  $P$ , ela se moverá na direção de  $E$ , devido à repulsão elétrica, mas nesse caso não é possível determinar se a partícula ultrapassará o ponto.

**ER2.** Em um determinado ponto de um campo elétrico, a energia potencial elétrica de uma carga puntiforme vale  $6 \cdot 10^{-5}$  J. Sendo  $+5 \mu\text{C}$  o valor da carga, determine o potencial elétrico nesse ponto.

### Resolução:

São dados:

$$E_{pe} = 6 \cdot 10^{-5} \text{ J e } q = +5 \mu\text{C} = +5 \cdot 10^{-6} \text{ C.}$$

Aplicando-se a expressão do potencial elétrico de um campo, temos:

$$V = \frac{E_{pe}}{q} = \frac{6 \cdot 10^{-5}}{+5 \cdot 10^{-6}} = 1,2 \cdot 10 = 12$$

Portanto,  $V = +12 \text{ V}$ .

**ER3.** Dois pontos,  $A$  e  $B$ , estão distantes, respectivamente, 30 cm e 60 cm de uma carga puntiforme  $Q = -1 \mu\text{C}$ , no vácuo, cuja constante eletrostática vale  $9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$ . Calcule:

- os potenciais elétricos nos pontos  $A$  e  $B$ ;
- a diferença de potencial entre os pontos  $A$  e  $B$ ;
- a diferença de potencial entre os pontos  $B$  e  $A$ .

### Resolução:

São dados:

$$d_A = 30 \text{ cm} = 3 \cdot 10^{-1} \text{ m};$$

$$d_B = 60 \text{ cm} = 6 \cdot 10^{-1} \text{ m};$$

$$Q = -1 \mu\text{C} = -1 \cdot 10^{-6} \text{ C}; k_0 = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2.$$

a) Os potenciais elétricos são calculados usando-se a expressão:

$$V_A = k_0 \cdot \frac{Q}{d_A} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{(-1 \cdot 10^{-6})}{3 \cdot 10^{-1}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_A = -9 \cdot 10^9 \cdot \frac{1 \cdot 10^{-6}}{3 \cdot 10^{-1}}$$

$$\therefore V_A = -3 \cdot 10^4 \text{ V}$$

$$V_B = k_0 \cdot \frac{Q}{d_B} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{(-1 \cdot 10^{-6})}{6 \cdot 10^{-1}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_B = -9 \cdot 10^9 \cdot \frac{1 \cdot 10^{-6}}{6 \cdot 10^{-1}} = \frac{3}{2} \cdot \frac{10^3}{10^{-1}}$$

$$\therefore V_B = -1,5 \cdot 10^4 \text{ V}$$

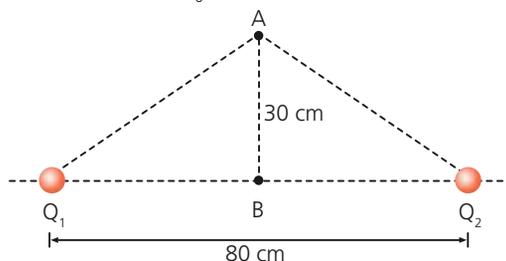
$$\text{b) } U_{AB} = V_A - V_B = -3 \cdot 10^4 - (-1,5 \cdot 10^4) = -3 \cdot 10^4 + 1,5 \cdot 10^4$$

$$\therefore U_{AB} = -1,5 \cdot 10^4 \text{ V}$$

$$\text{c) } U_{BA} = V_B - V_A = -1,5 \cdot 10^4 - (-3 \cdot 10^4) = -1,5 \cdot 10^4 + 3 \cdot 10^4$$

$$\therefore U_{BA} = +1,5 \cdot 10^4 \text{ V}$$

**ER4.** A figura mostra duas cargas pontuais  $Q_1 = -4 \mu\text{C}$  e  $Q_2 = +1 \mu\text{C}$ , fixas e separadas de 80 cm, no vácuo. O ponto  $B$  está a meia distância da reta que une as duas cargas e o ponto  $A$  está 30 cm perpendicularmente acima de  $B$ . Considere  $k_0 = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$ .



Ilustrações: TFG

Determine:

- os potenciais elétricos resultantes nos pontos  $A$  e  $B$ ;
- a localização de um ponto  $C$ , na reta que liga as duas cargas, onde o potencial elétrico resultante é nulo, além dos pontos no infinito.

### Resolução:

São dados:

$$Q_1 = -4 \mu\text{C} = -4 \cdot 10^{-6} \text{ C};$$

$$Q_2 = +1 \mu\text{C} = +1 \cdot 10^{-6} \text{ C}; k_0 = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2.$$

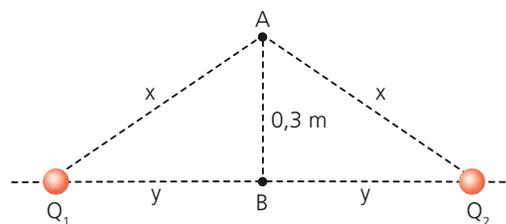
Refazendo a figura e determinando as distâncias  $x$  e  $y$ , resulta:

$$2y = 80 \text{ cm} = 0,8 \text{ m} \Rightarrow y = 0,4 \text{ m}$$

No triângulo retângulo  $ABQ_1$ :

$$x^2 = (0,3)^2 + y^2 = (0,3)^2 + (0,4)^2 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow x^2 = 0,09 + 0,16 = 0,25 \Rightarrow x = 0,5 \text{ m}$$



a) O potencial elétrico resultante de duas cargas é genericamente expresso por:

$$V_p = V_1 + V_2 = k_0 \cdot \left( \frac{Q_1}{d_1} + \frac{Q_2}{d_2} \right).$$

$$\text{Portanto, no ponto A: } V_A = k_0 \cdot \left( \frac{Q_1}{x} + \frac{Q_2}{x} \right)$$

$$V_A = 9 \cdot 10^9 \cdot \left( \frac{-4 \cdot 10^{-6}}{0,5} + \frac{1 \cdot 10^{-6}}{0,5} \right)$$

$$V_A = 9 \cdot 10^3 \cdot (-8 + 2)$$

$$V_A = 9 \cdot 10^3 \cdot (-6) = -54 \cdot 10^3$$

$$\therefore V_A = -5,4 \cdot 10^4 \text{ V}$$

E no ponto B:

$$V_B = k_0 \cdot \left( \frac{Q_1}{y} + \frac{Q_2}{y} \right)$$

$$V_B = 9 \cdot 10^9 \cdot \left( \frac{-4 \cdot 10^{-6}}{0,4} + \frac{1 \cdot 10^{-6}}{0,4} \right)$$

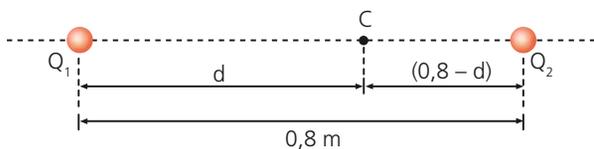
$$V_B = 9 \cdot 10^3 \cdot (-10 + 2,5)$$

$$V_B = 9 \cdot 10^3 \cdot (-7,5)$$

$$\therefore V_B = -6,75 \cdot 10^4 \text{ V}$$

- b) Além dos pontos no infinito, existe um ponto (C) localizado na reta que une as duas cargas, onde o potencial elétrico resultante é também nulo, determinado, por exemplo, através da distância  $d$  da carga  $Q_1$ , como mostra a figura.

Ilustrações: TPG



Assim,

$$V_C = V_1 + V_2 = 0$$

$$V_C = k_0 \cdot \frac{Q_1}{d} + k_0 \cdot \frac{Q_2}{0,8 - d} = 0$$

$$\frac{-4 \cdot 10^{-6}}{d} + \frac{1 \cdot 10^{-6}}{0,8 - d} = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow d = 4 \cdot (0,8 - d) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow d = 3,2 - 4d \Rightarrow 5d = 3,2$$

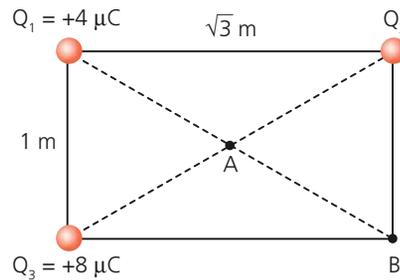
$$\therefore d = 0,64 \text{ m}$$

No ponto C colocado 0,64 m à direita de  $Q_1$ , na reta que une as duas cargas, o potencial elétrico resultante é nulo, além dos pontos infinitamente afastados.

**ER5.** Três cargas puntiformes estão fixas nos vértices de um retângulo conforme a figura. Sabe-se que o potencial elétrico resultante no ponto A é de  $9 \cdot 10^4 \text{ V}$  e que o meio é o vácuo, cuja constante eletrostática vale  $9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$ .

- a) Qual é o valor da carga  $Q_2$ ?

- b) Qual é o potencial elétrico resultante no ponto B?



### Resolução:

São dados:

$$V_A = 9 \cdot 10^4 \text{ V e } k_0 = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$$

- a) No triângulo retângulo formado por  $Q_1$ ,  $Q_2$  e  $Q_3$ , seja  $x$  a distância da carga  $Q_2$  ao ponto A. Aplicando o Teorema de Pitágoras, resulta:

$$(2x^2) = (\sqrt{3})^2 + 1^2 \Rightarrow 4x^2 = 3 + 1 = 4 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow x^2 = 1 \Rightarrow x = 1 \text{ m}$$

O potencial elétrico no ponto A devido às três cargas é expresso por:

$$V_A = V_1 + V_2 + V_3 = k_0 \cdot \left( \frac{Q_1}{x} + \frac{Q_2}{x} + \frac{Q_3}{x} \right)$$

$$9 \cdot 10^4 = 9 \cdot 10^9 \cdot \left( \frac{4 \cdot 10^{-6}}{1} + \frac{Q_2}{1} + \frac{8 \cdot 10^{-6}}{1} \right)$$

$$10^{-5} = 4 \cdot 10^{-6} + Q_2 + 8 \cdot 10^{-6} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow Q_2 = 10^{-5} - 12 \cdot 10^{-6} = 10 \cdot 10^{-6} - 12 \cdot 10^{-6}$$

$$\therefore Q_2 = -2 \cdot 10^{-6} \text{ C}$$

- b) O potencial elétrico resultante no ponto B, será:

$$V_B = V_1 + V_2 + V_3 = k_0 \cdot \left( \frac{Q_1}{2x} + \frac{Q_2}{1} + \frac{Q_3}{\sqrt{3}} \right)$$

$$V_B = 9 \cdot 10^9 \cdot \left( \frac{4 \cdot 10^{-6}}{2} + \frac{Q_2}{1} + \frac{8 \cdot 10^{-6}}{1,73} \right)$$

$$V_B = 9 \cdot 10^9 \cdot 10^{-6} \cdot (2 - 2 + 4,6)$$

$$\therefore V_B \cong 4 \cdot 10^4 \text{ V}$$

## PARA SABER MAIS

### Site

### Simulações

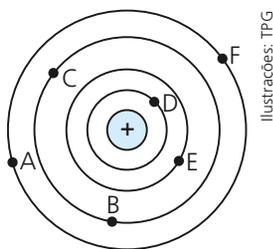
Forças de interação: Disponível em:

<[http://phet.colorado.edu/sims/charges-and-fields/charges-and-fields\\_pt\\_BR.html](http://phet.colorado.edu/sims/charges-and-fields/charges-and-fields_pt_BR.html)>.

Acesso em: 19 jan. 2016.

Nesta simulação, altere a posição das partículas, por meio do *mouse*, para observar o comportamento das forças de interação entre as partículas presentes.

**EP1.** Considere a representação das linhas equipotenciais de uma carga positiva isolada.



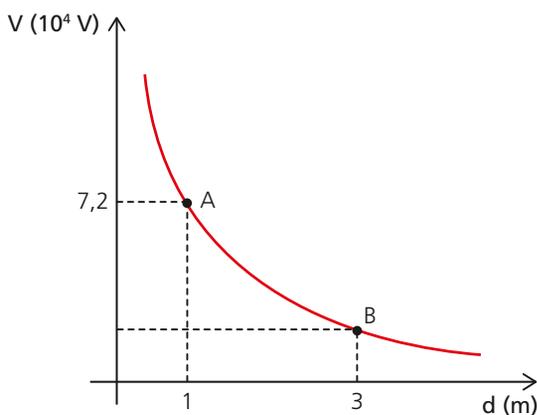
Com base na figura, responda às seguintes questões:

- Se uma carga negativa for colocada em repouso no ponto *E*, para o potencial de qual ponto ela irá espontaneamente? *Irá para o potencial do ponto D.*
- Qual a diferença de potencial entre os pontos *A* e *F*?
- A diferença de potencial entre os pontos *B* e *E* é maior, menor ou igual à diferença de potencial entre os pontos *C* e *E*? *igual*

**EP2.** Para que uma partícula eletrizada, com carga  $q$ , possa adquirir uma energia potencial elétrica de  $3 \cdot 10^{-5} \text{ J}$ , responda: *Respostas nas Orientações Didáticas.*

- O que deve ser efetuado para que isso se realize?
- Criando-se em laboratório uma região com potencial elétrico de  $-6 \text{ V}$ , onde a partícula tenha a energia potencial desejada, determine o valor da carga  $q$ .

**EP3.** No diagrama, os pontos *A* e *B* da hipérbole equilátera representam, respectivamente, os potenciais elétricos em função das distâncias relativamente a uma partícula eletrizada com carga  $Q$ , imersa no vácuo de  $k_0 = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$ .



- Qual é o valor de  $Q$ ?  $Q = +8 \cdot 10^{-6} \text{ C}$      $V_B = +2,4 \cdot 10^4 \text{ V}$
- Quanto vale o potencial elétrico no ponto *B*?
- Qual é a diferença de potencial entre os pontos *A* e *B*?  $U_{AB} = +4,8 \cdot 10^4 \text{ V}$

**EP4.** Em dois vértices de um triângulo equilátero de lado  $\ell = 1 \text{ m}$  estão fixas as cargas  $Q_1 = +3 \mu\text{C}$  e  $Q_2 = -2 \mu\text{C}$ , imersas no vácuo de constante eletrostática  $9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$ . Determine:

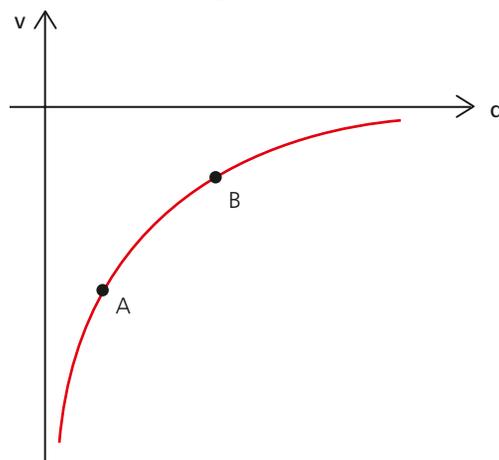
- o potencial elétrico resultante no terceiro vértice do triângulo;  $+9 \cdot 10^3 \text{ V}$
- a distância  $d$  de  $Q_1$ , na reta que liga  $Q_1$  com  $Q_2$ , onde o potencial elétrico resultante é nulo;  $d = 0,6 \text{ m}$
- a distância  $x$  de  $Q_1$  e  $y$  de  $Q_2$ , onde um ponto *P* possui potencial elétrico resultante nulo, sabendo-se que a soma dessas duas distâncias vale  $1,2 \text{ m}$ .  $x = 0,72 \text{ m}$  e  $y = 0,48 \text{ m}$

**EP5.** Duas cargas puntiformes positivas, uma  $Q_A$  com carga igual ao dobro da outra  $Q_B$  e separadas por uma distância de  $30 \text{ cm}$ , repelem-se com força elétrica de intensidade  $1,8 \text{ N}$ . As cargas estão no vácuo e fixas. Determine:

- o valor das cargas  $Q_A$  e  $Q_B$ ;  $Q_A = +6 \cdot 10^{-6} \text{ C}$  e  $Q_B = +3 \cdot 10^{-6} \text{ C}$
- o potencial elétrico resultante no ponto *X*, médio, da reta que une as cargas.  $V_X = +5,4 \cdot 10^5 \text{ V}$

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

**EP6.** O campo elétrico criado por uma carga puntiforme possui superfícies equipotenciais esféricas e concêntricas na carga. O diagrama mostra a curva característica (hipérbole equilátera) da variação do potencial elétrico de uma carga pontual  $Q$  em função da distância  $d$  de duas de suas superfícies equipotenciais representadas no gráfico pelas letras *A* e *B*.

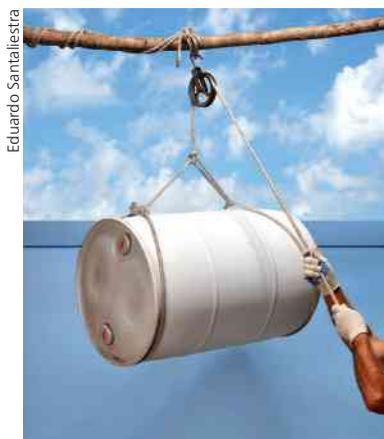


- Qual é o sinal da carga  $Q$ ? Justifique.
  - Entre as superfícies equipotenciais *A* e *B*, qual é a que tem maior potencial elétrico? Por quê?
- Respostas nas Orientações Didáticas.*

# Trabalho da força elétrica

Sabemos que, no interior de um campo, todo corpo possui energia potencial desde que ocupe uma posição particular em relação a um referencial. Na Mecânica, estudamos dois tipos de energia potencial: a gravitacional, que depende da posição do corpo em relação a um nível de referência, e a elástica, que depende de quão deformada está uma mola, em relação ao seu estado natural. Na Eletricidade, a energia potencial elétrica de uma carga eletrizada também depende da posição que ela ocupa em relação a uma carga geradora de campo.

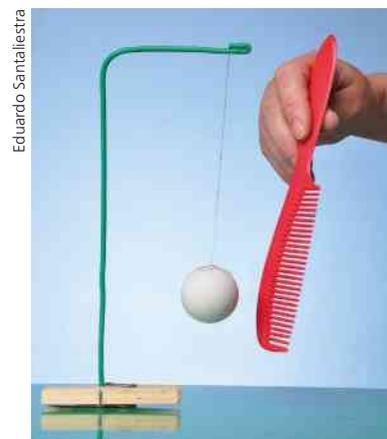
Nos casos em que uma força desloca um corpo, dizemos que há a realização de trabalho.



Eduardo Santalhestra



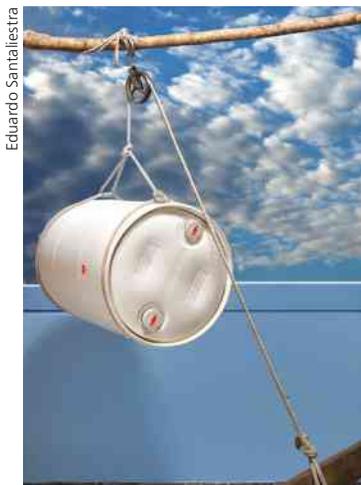
Sérgio Dotta Jr./The next



Eduardo Santalhestra

Em todas as situações acima, a energia armazenada vem do trabalho realizado pela força para mover o objeto.

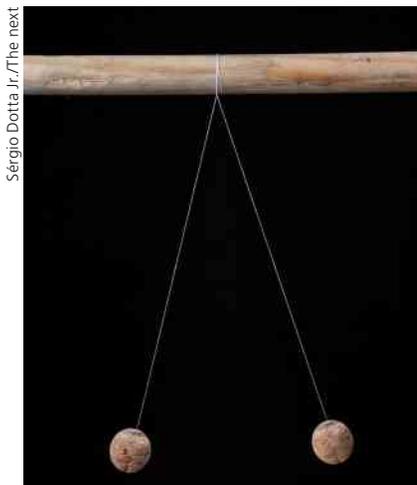
Entretanto, quando não houver deslocamentos dos corpos, não haverá transferência de energia e, portanto, a força não realiza trabalho.



Eduardo Santalhestra



Sérgio Dotta Jr./The next



Sérgio Dotta Jr./The next

Nestas três situações, os objetos estão em equilíbrio e não há realização de trabalho.

# Energia potencial elétrica

No capítulo anterior vimos que, quando uma carga de prova puntiforme  $q$  é colocada em um ponto  $P$  no interior de um campo elétrico de outra carga  $Q$ , ela adquire um potencial elétrico  $V_p$  definido por  $V_p = \frac{E_{pe}}{q}$ , em que  $E_{pe}$  é a energia potencial elétrica da carga  $q$ , no ponto  $P$ .

Também vimos que, nesse ponto, a uma distância  $d$  da carga  $Q$ , o potencial elétrico pode ser calculado como  $V_p = k_0 \cdot \frac{Q}{d}$ , onde  $k_0$  é a constante eletrostática do vácuo. Então,

$$\frac{E_{pe}}{q} = k_0 \cdot \frac{Q}{d} \Rightarrow E_{pe} = k_0 \cdot \frac{Q \cdot q}{d}$$

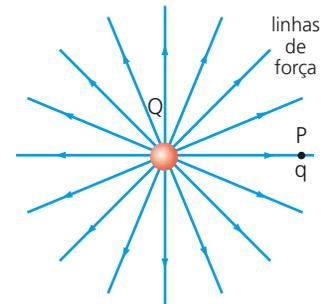
Independentemente do sinal da carga de prova  $q$ , sabemos que ela se desloca espontaneamente no sentido da diminuição da sua energia potencial elétrica, mas isso não implica diminuição do potencial.



A carga  $q$  positiva desloca-se espontaneamente do ponto A, de maior potencial, para o ponto B, de menor potencial.



A carga  $q$  negativa desloca-se espontaneamente do ponto B, de menor potencial, para o ponto A, de maior potencial.



Ilustrações: TPG

## A FÍSICA NO COTIDIANO

### Aterramento de instalações — Por que se atribui potencial zero ao potencial da Terra?

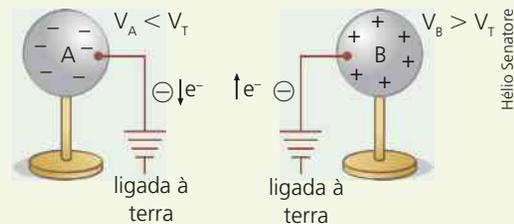
Nos últimos anos, a população brasileira vem se adaptando à padronização das tomadas e plugues dos eletroeletrônicos (antes o consumidor convivia com mais de 12 tipos de plugues e tomadas). A padronização é um fator importante para o desenvolvimento científico e tecnológico e, neste caso, também é um fator de segurança, isso porque passou a ser obrigatória a presença do pino do fio terra no plugue.

Esse pino é o responsável por evitar que uma sobrecarga, comum em dias de chuva ou falta de luz, cause estragos nos equipamentos, choques nos usuários e outros acidentes como incêndios, por exemplo. Mas como funciona o aterramento dos equipamentos? O que acontece quando ligamos um condutor carregado de cargas negativas à superfície da Terra?

Sabemos que um acúmulo de cargas negativas produz um potencial negativo. Como os elétrons se movem espontaneamente para potenciais maiores, e eles migram naturalmente para a Terra se esta ligação for estabelecida, percebemos que o potencial da superfície terrestre é maior que o potencial negativo formado pelas cargas negativas. Do mesmo modo, acumular cargas positivas em um condutor isolado para depois ligá-lo à Terra faz com que os elétrons em excesso na superfície terrestre subam para o condutor pelo mesmo motivo: o movimento espontâneo de elétrons se faz de potenciais menores para maiores.

Analisando, assim, o comportamento das cargas, vemos que o potencial da Terra é maior que um potencial negativo e menor que um potencial positivo. O único valor numérico que é maior que um número negativo e menor que um positivo é o zero.

É por esse motivo que se convencionou adotar o potencial terrestre como zero, e ligamos circuitos à Terra para recolher elétrons “fugitivos”, evitando que essa ligação se faça pelo corpo das pessoas. Essa prática minimiza danos em equipamentos, no caso de grande acúmulo de cargas.



Hélio Senatore



Fernando Favoretto/Criar Imagem

Padrão brasileiro de plugues e tomadas.

## Trabalho da força elétrica ( $\tau_{AB}$ ) em um campo elétrico qualquer

Considere uma carga de prova  $q$  deslocando-se do ponto  $A$  até o ponto  $B$ , no interior de um campo elétrico qualquer, exclusivamente sob ação de forças elétricas.

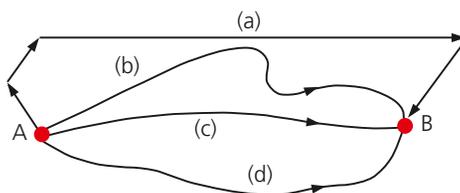


Sabemos que, no ponto inicial  $A$ , a carga de prova  $q$  tem potencial elétrico  $V_A$  e uma energia potencial elétrica  $E_{peA}$  e, ao chegar ao ponto  $B$ , a carga de prova terá um potencial elétrico  $V_B$  e energia potencial elétrica  $E_{peB}$ . A diferença da energia potencial elétrica entre os pontos  $A$  e  $B$  corresponde ao trabalho ( $\tau_{AB}$ ) realizado pela força elétrica nesse deslocamento, ou seja,  $\tau_{AB} = E_{peA} - E_{peB}$ ; como  $E_{peA} = q \cdot V_A$  e  $E_{peB} = q \cdot V_B$  então  $\tau_{AB} = q \cdot V_A - q \cdot V_B \Rightarrow \tau_{AB} = q \cdot (V_A - V_B) = q \cdot U_{AB}$ , sendo  $U_{AB} = V_A - V_B$  a diferença de potencial entre os pontos  $A$  e  $B$ .

Assim, a expressão do trabalho da força elétrica pode ser escrita como  $\tau_{AB} = q \cdot (V_A - V_B) = q \cdot U_{AB}$ ; então  $U_{AB} = \frac{\tau_{AB}}{q}$ , que é a diferença de potencial entre os pontos  $A$  e  $B$ . Nessa perspectiva, a definição de diferença de potencial no SI é a seguinte: um volt é a diferença de potencial entre dois pontos tais que, para que uma carga de um coulomb se desloque entre eles, a força elétrica realiza trabalho de um joule.

Sabemos que o potencial de um ponto  $P$  do espaço gerado por uma carga  $Q$  pode ser entendido como o trabalho realizado por uma carga unitária para mover-se espontaneamente do infinito até esse ponto  $P$ ; analogamente, o trabalho realizado por uma carga unitária para se mover de uma distância  $d$ , entre os pontos  $A$  e  $B$ , será a diferença de potencial entre dois pontos  $A$  e  $B$ .

Note que a expressão anterior não depende da distância  $d$  entre  $A$  e  $B$ : depende apenas da diferença de potencial entre esses pontos. Decorre daí que a força elétrica também é uma força conservativa; assim como as forças gravitacional e elástica, o seu trabalho não depende do caminho percorrido pela carga de prova. O trabalho só depende da posição inicial  $A$  e final  $B$ .



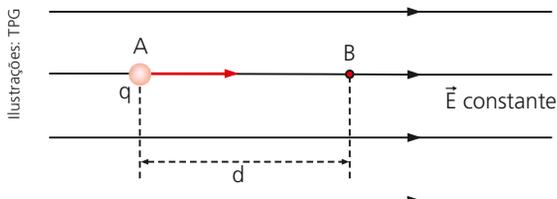
Em qualquer uma das trajetórias (a), (b), (c) ou (d), o trabalho ( $\tau_{AB}$ ) realizado pela carga é o mesmo.

Entretanto, o trabalho realizado por uma partícula pode ser positivo, negativo ou nulo, e cada um é assim classificado:

- Trabalho motor ( $\tau_{AB} > 0$ ): quando a força elétrica age a favor do movimento de  $q$ , pois  $E_{peA} > E_{peB}$ .
- Trabalho resistente ( $\tau_{AB} < 0$ ): quando a força elétrica age contra o movimento de  $q$ , pois  $E_{peA} < E_{peB}$ .
- Trabalho nulo ( $\tau_{AB} = 0$ ): a força elétrica é perpendicular ao movimento de  $q$ , pois  $E_{peA} = E_{peB}$ .

## Trabalho da força elétrica em um campo elétrico uniforme

Sabemos que, em qualquer ponto no interior de um campo elétrico uniforme, o vetor campo elétrico é constante, ou seja, possui a mesma intensidade, a mesma direção e o mesmo sentido. Por isso, resultam linhas de força paralelas entre si e igualmente espaçadas.



Quando uma carga de prova  $q$  se desloca entre pontos A e B, na direção das linhas de força, a força elétrica resultante  $\vec{F}$  sobre  $q$  é paralela ao seu deslocamento  $d$ , realizando um trabalho ( $\tau_{AB}$ ) expresso por  $\tau_{AB} = F \cdot d$ .

Como a expressão da força que age sobre a carga  $q$  é  $\vec{F} = q \cdot \vec{E}$ , então resulta em  $\tau_{AB} = q \cdot E \cdot d$ .

Além disso, para o mesmo deslocamento  $d$ , o trabalho da força elétrica também pode ser calculado através da expressão  $\tau_{AB} = q \cdot U_{AB} \Rightarrow \tau_{AB} = q \cdot (V_A - V_B)$ .

Na figura ao lado estão representadas duas linhas equipotenciais (são os dois segmentos perpendiculares às linhas de força): uma contendo o ponto A, de potencial  $V_A$ , e outra contendo os pontos B, C e D, de potenciais  $V_B = V_C = V_D$ , menores que  $V_A$ .

Como a força elétrica é conservativa, o seu trabalho depende apenas da posição inicial e final, não importando o caminho seguido. Portanto, no deslocamento da carga  $q$  do ponto A para B, o trabalho realizado pela força é igual tanto no deslocamento efetuado de A para C quanto no de A para D.

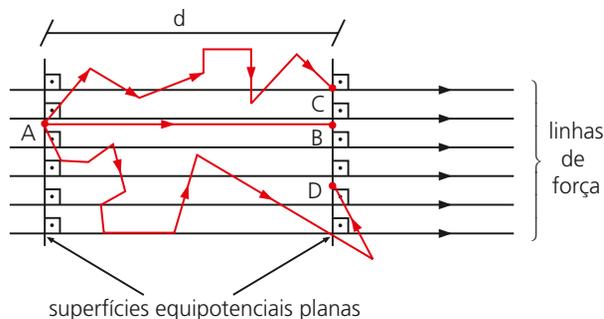
$$\text{Portanto, } \tau_{AB} = \tau_{AC} = \tau_{AD} = q \cdot (V_A - V_B) = q \cdot (V_A - V_C) = q \cdot (V_A - V_D).$$

### Elétron-volt

O **elétron-volt (eV)** é uma unidade de trabalho (ou energia) usada em deslocamentos de partículas atômicas e equivale a  $1,6 \cdot 10^{-19}$  J. Um elétron-volt equivale ao trabalho da força elétrica para deslocar a carga de um elétron sob diferença de potencial de um volt.

Na física atômica, nuclear e de partículas é comum utilizar os múltiplos do elétron-volt, tais como:

- keV (quiloelétron-volt) =  $10^3$  eV
- MeV (megaelétron-volt) =  $10^6$  eV
- GeV (gigaelétron-volt) =  $10^9$  eV
- TeV (teraelétron-volt) =  $10^{12}$  eV



## Relação entre intensidade do campo elétrico uniforme ( $E$ ) e diferença de potencial ( $U$ )

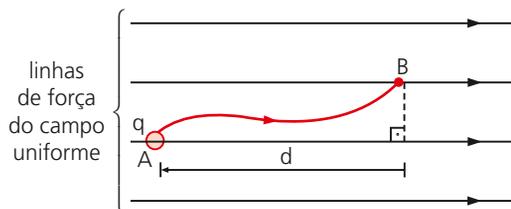
Em um campo elétrico uniforme, onde a intensidade do vetor campo elétrico  $E$  é constante, pode-se calcular o trabalho realizado pela força elétrica que desloca uma carga  $q$  a uma distância  $d$  de dois modos:

$$\begin{cases} \tau_{AB} = q \cdot E \cdot d \\ \tau_{AB} = q \cdot U \end{cases}, \text{ sendo } U \text{ a diferença de potencial elétrico}$$

entre os pontos de partida e de chegada.

Igualando-se as expressões, temos a seguinte relação entre  $E$  e  $U$ , válida para campo elétrico uniforme:

$$q \cdot E \cdot d = q \cdot U \Rightarrow E \cdot d = U \Rightarrow E = \frac{U}{d}$$



Assim, podemos concluir que, no Sistema Internacional, a unidade de campo elétrico também pode ser volt por metro (V/m), além do newton por coulomb (N/C). Uma partícula carregada que se move em um campo elétrico de intensidade 1 V/m vence uma diferença de potencial de 1 V a cada metro de deslocamento na direção da linha de força.

## Exercícios resolvidos

**ER1.** Em um ponto  $P$ , distante 50 cm de uma carga puntiforme fixa  $Q$ , a energia potencial elétrica adquirida por uma partícula de prova  $q = +1 \mu\text{C}$  é de  $9 \cdot 10^{-2} \text{ J}$ .

Estando as cargas no vácuo, onde  $k_0 = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$ , determine:

- o valor da carga  $Q$ ;
- o potencial elétrico no ponto  $P$ .

### Resolução:

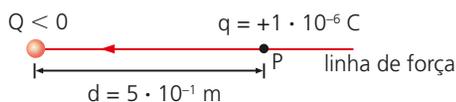
Pelos dados, temos:

$$\begin{aligned} d &= 50 \text{ cm} = 5 \cdot 10^{-1} \text{ m}; \\ q &= +1 \mu\text{C} = +1 \cdot 10^{-6} \text{ C}; \\ E_{pe} &= -9 \cdot 10^{-2} \text{ J e} \\ k_0 &= 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2. \end{aligned}$$

- Vamos determinar o valor da carga  $Q$  através da expressão:

$$\begin{aligned} E_{pe} &= k_0 \cdot \frac{Q \cdot q}{d} \Rightarrow Q = \frac{E_{pe} \cdot d}{k_0 \cdot q} = \frac{-9 \cdot 10^{-2} \cdot 5 \cdot 10^{-1}}{9 \cdot 10^9 \cdot 1 \cdot 10^{-6}} = \\ &= -\frac{5 \cdot 10^{-3}}{10^3} \Rightarrow Q = -5 \cdot 10^{-6} \text{ C} \end{aligned}$$

- Como a carga  $Q$  resultou negativa, desenhamos a seguinte figura:



O potencial elétrico no ponto  $P$  é calculado pela expressão:

$$V_P = \frac{E_{pe}}{q} = \frac{-9 \cdot 10^{-2}}{1 \cdot 10^{-6}} \Rightarrow V_P = -9 \cdot 10^4 \text{ V}$$

**ER2.** Em um campo elétrico, o potencial elétrico de um ponto  $A$  é de  $5 \cdot 10^5 \text{ V}$ . Uma carga de prova de  $-2 \mu\text{C}$  é levada desse ponto até um ponto infinitamente afastado dele. Considerando o infinito como o referencial dos potenciais, determine:

- a energia potencial elétrica no ponto  $A$ ;
- o trabalho da força elétrica nesse deslocamento.

### Resolução:

São dados:

$$V_A = 5 \cdot 10^5 \text{ V}; q = -2 \mu\text{C} = -2 \cdot 10^{-6} \text{ C}.$$

Considerando o infinito como referencial, seu potencial elétrico vale  $V_\infty = 0$ .

- A energia potencial elétrica é calculada através de:

$$\begin{aligned} E_{pe_A} &= q \cdot V_A \Rightarrow E_{pe_A} = -2 \cdot 10^{-6} \cdot 5 \cdot 10^5 = -10 \cdot 10^{-1} \Rightarrow \\ &\Rightarrow E_{pe_A} = -1 \text{ J} \end{aligned}$$

- Pela expressão do trabalho:

$$\begin{aligned} \tau_{AB} &= q \cdot (V_A - V_\infty) \Rightarrow \tau_{AB} = -2 \cdot 10^{-6} \cdot (5 \cdot 10^5 - 0) = \\ &= -10 \cdot 10^{-1} \Rightarrow \tau_{AB} = -1 \text{ J} \end{aligned}$$

Logicamente, ambos os resultados ficaram iguais  $E_{pe_A} = \tau_{AB} = -1 \text{ J}$ , pois a energia potencial armazenada em  $A$  foi toda usada para que a força elétrica realizasse o trabalho resistente de deslocar a carga de prova de  $A$  até o infinito.

**ER3.** Em dois vértices de um triângulo equilátero de 1,0 m de lado são colocadas duas cargas puntiformes  $Q_1 = Q_2 = 4 \mu\text{C}$ , no vácuo, onde a constante eletrostática vale  $9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$ .

- Calcule o potencial elétrico no ponto  $C$ , terceiro vértice do triângulo, e no ponto  $D$ , médio, entre as duas cargas.
- Qual o trabalho das forças elétricas sobre a carga  $q = 1,0 \mu\text{C}$ , que se desloca de  $C$  para  $D$ ?

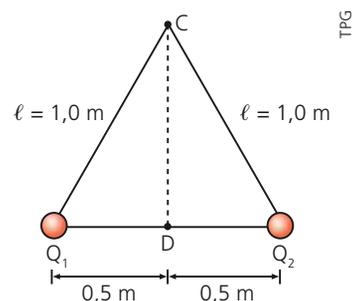
### Resolução:

Pelos dados, temos:

$$\ell = 1,0 \text{ m};$$

$$Q_1 = Q_2 = 4 \mu\text{C} = 4 \cdot 10^{-6} \text{ C}; k_0 = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2.$$

Figura mostrando a situação:



a) Cálculo dos potenciais:

$$V_C = k_0 \cdot \left( \frac{Q_1}{1,0} + \frac{Q_2}{1,0} \right)$$

$$V_C = 9 \cdot 10^9 \cdot \left( \frac{4 \cdot 10^{-6}}{1,0} + \frac{4 \cdot 10^{-6}}{1,0} \right)$$

$$V_C = 9 \cdot 10^9 \cdot 10^{-6} \cdot 8 \Rightarrow V_C = 7,2 \cdot 10^4 \text{ V}$$

$$V_D = k_0 \cdot \left( \frac{Q_1}{0,5} + \frac{Q_2}{0,5} \right)$$

$$V_D = 9 \cdot 10^9 \cdot \left( \frac{4 \cdot 10^{-6}}{0,5} + \frac{4 \cdot 10^{-6}}{0,5} \right)$$

$$V_D = 9 \cdot 10^9 \cdot 10^{-6} \cdot 16 = 144 \cdot 10^3$$

$$V_D = 14,4 \cdot 10^4 \Rightarrow V_D = 1,44 \cdot 10^5 \text{ V}$$

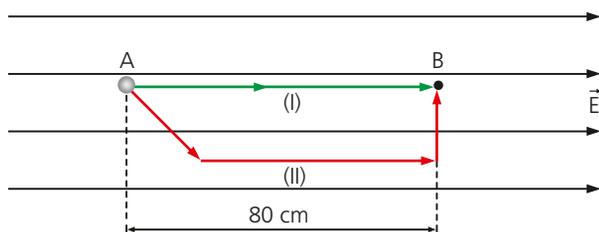
b) Sendo  $q = 1,0 \mu\text{C} = 10^{-6} \text{ C}$ , o trabalho das forças elétricas, no deslocamento de  $C$  para  $D$ , será calculado pela expressão:

$$\tau_{CD} = q \cdot (V_C - V_D)$$

$$\tau_{CD} = 10^{-6} \cdot (7,2 \cdot 10^4 - 14,4 \cdot 10^4) =$$

$$= 10^{-6} \cdot (-7,2 \cdot 10^4) \Rightarrow \tau_{CD} = -7,2 \cdot 10^{-2} \text{ J}$$

**ER4.** No interior de um campo elétrico uniforme de intensidade  $100 \text{ N/C}$ , uma carga pontual  $q$ , colocada num ponto  $A$ , atinge o ponto  $B$  através de dois caminhos de acordo com a figura. Sabe-se que o trabalho executado pela força elétrica no caminho (I) foi de  $1,6 \cdot 10^{-4} \text{ J}$ .



Determine:

- o valor da carga  $q$ ;
- o trabalho da força elétrica no deslocamento (II). Justifique;
- a diferença de potencial elétrico entre os pontos  $A$  e  $B$ .

### Resolução:

Pelos dados:

$E = 100 \text{ N/C} = 10^2 \text{ N/C}$  e  $\tau_{AB} = 1,6 \cdot 10^{-4} \text{ J}$ , no caminho (I).

Da figura,  $d = 80 \text{ cm} = 8 \cdot 10^{-1} \text{ m}$ .

a) Através da expressão do trabalho  $\tau_{AB} = q \cdot E \cdot d$ , podemos determinar o valor da carga  $q$ .

$$q = \frac{\tau_{AB}}{E \cdot d} = \frac{1,6 \cdot 10^{-4}}{10^2 \cdot 8 \cdot 10^{-1}} = \frac{16 \cdot 10^{-5}}{8 \cdot 10} \Rightarrow$$

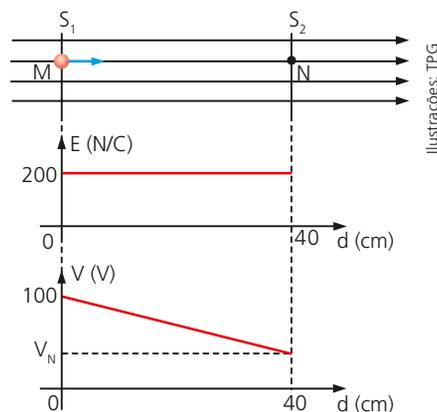
$$\Rightarrow q = 2 \cdot 10^{-6} \text{ C}$$

b) Como a força elétrica é conservativa, o seu trabalho independe da trajetória descrita pela carga; depende apenas da posição inicial e final. Portanto, no deslocamento (II), o trabalho é o mesmo da trajetória (I), ou seja,  $\tau_{AB} = 1,6 \cdot 10^{-4} \text{ J}$ .

c) Pela expressão  $U_{AB} = E \cdot d$ , temos:

$$U_{AB} = 10^2 \cdot 8 \cdot 10^{-1} \Rightarrow U_{AB} = 80 \text{ V}$$

**ER5.** No interior de um campo elétrico uniforme, uma partícula de massa  $m = 2 \text{ mg}$  e carga  $q = 5 \mu\text{C}$  colocada, em repouso, em um ponto  $M$  desloca-se em direção ao ponto  $N$ . A figura mostra as linhas de força e duas superfícies equipotenciais  $S_1$  e  $S_2$  desse campo, assim como os diagramas que caracterizam as intensidades do campo elétrico ( $E$ ) e do potencial elétrico ( $V$ ) em função, respectivamente, das distâncias ( $d$ ).



Determine:

- o trabalho realizado pela força elétrica no deslocamento  $MN$ ;
- a diferença de potencial elétrico entre os pontos  $M$  e  $N$ ;
- o potencial elétrico do ponto  $N$ ;
- a velocidade escalar da partícula ao passar pelo ponto  $N$ .

### Resolução:

Dados do enunciado:

$$m = 2 \text{ mg} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ kg},$$

$$q = 5 \mu\text{C} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ C} \text{ e } v_M = 0 \text{ (repouso).}$$

Dos diagramas, temos:  $E = 200 \text{ N/C}$  (constante),

$$V_M = 100 \text{ V} \text{ e } d_{MN} = 40 \text{ cm} = 4 \cdot 10^{-1} \text{ m}.$$

a) Cálculo do trabalho:  $\tau_{MN} = q \cdot E \cdot d_{MN} \Rightarrow$

$$\Rightarrow \tau_{MN} = 5 \cdot 10^{-6} \cdot 200 \cdot 4 \cdot 10^{-1} = 4000 \cdot 10^{-7}$$

$$\therefore \tau_{MN} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ J}$$

b) A diferença de potencial entre os pontos  $M$  e  $N$  será determinada através da expressão:

$$U_{MN} = E \cdot d_{MN} \Rightarrow U_{MN} = 200 \cdot 4 \cdot 10^{-1}$$

$$\therefore U_{MN} = 80 \text{ V}$$

c) Como a diferença de potencial elétrico é

$$U_{MN} = V_M - V_N, \text{ temos:}$$

$$80 = 100 - V_N \Rightarrow V_N = 20 \text{ V}$$

d) Vamos determinar a velocidade da partícula ao passar pelo ponto N, utilizando o Teorema da Energia Cinética, estudado na Mecânica.

$$\tau_{MN} = \frac{m}{2} (v_N^2 - v_M^2)$$

$$4 \cdot 10^{-4} = \frac{2 \cdot 10^{-6}}{2} \cdot (v_N^2 - 0^2) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow v_N^2 = \frac{8 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 10^{-6}} = 4 \cdot 10^2 \Rightarrow v_N = 20 \text{ m/s}$$

## OUTRAS PALAVRAS



## O experimento de Millikan

A revista *Physics World* é uma prestigiosa publicação do Instituto de Física, com sede em Londres, na Inglaterra, dedicada à divulgação da Física. Na edição de setembro de 2004, a revista publicou o resultado de uma enquete junto aos seus leitores, sobre os mais belos experimentos científicos, e o experimento de Millikan foi o terceiro mais votado. Os resultados desse experimento foram, primordialmente, descobrir que o valor das cargas elétricas sempre é um múltiplo inteiro do valor da carga elementar que conhecemos hoje, e que esse valor é de  $1,6 \cdot 10^{-19}$  coulomb.

Como todos os experimentos importantes, esse também não se realizou de uma só vez, nem seu mérito se deve a uma única pessoa: pelo contrário, é o resultado de uma longa sucessão de ensaios e resultados produzidos a muitas mãos.

No final do século XIX, a carga e a massa do elétron ainda não haviam sido determinadas, mas já se conhecia uma relação entre essas grandezas. Em 1897, J. J. Thomson investigou a trajetória de um feixe de raios catódicos ao atravessar uma região onde atuavam campos elétricos e magnéticos, e descobriu que esse feixe é formado de partículas com carga elétrica e massa, e a relação entre esses valores é de  $1,8 \cdot 10^{11}$  C/kg; a essa série de experimentos se reputa tradicionalmente a descoberta do elétron. Mais tarde, Thomson determinou a ordem de grandeza da carga do elétron como da ordem de  $10^{-19}$  C.

Logo, a comunidade científica se colocou em busca de um valor mais acurado para a carga do elétron. Thomson havia partido de um arranjo experimental em que uma nuvem de gotículas de água, que envolviam íons gasosos, movia-se sob a ação de um campo elétrico, e o movimento dessas gotículas (em que contribuíam os efeitos do campo elétrico e gravitacional, e a viscosidade do meio, descrita pela lei de Stokes) dava ideia da sua carga. Havia dificuldades com o movimento das gotas por causa da rápida evaporação da água; em 1911, Millikan refez

o experimento substituindo a água por óleo, aceitando uma suposta sugestão de seu aluno, Harvey Fletcher.

Você vai ler agora um trecho do livro *Os 10 mais belos experimentos científicos*, de Robert P. Crease, colunista da revista *Physics World* que conduziu a enquete. Nesse livro, o professor Crease descreve todos os experimentos como belos, porque satisfazem basicamente três critérios: todos eles apresentam fatos fundamentais, de modo eficiente e que nos façam refletir não sobre o experimento, mas sobre o mundo em que eles ocorrem.

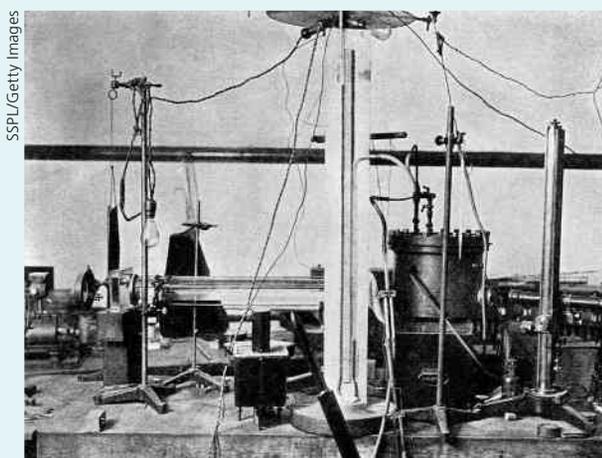
Quando o físico norte-americano Robert Millikan (1868-1953) pronunciou o costumeiro discurso ao receber o Prêmio Nobel em 1923, deixou a plateia convencida de que ele tinha visto de fato os elétrons individualmente. “Quem viu esse experimento”, disse Millikan, referindo-se ao experimento pelo qual conquistou o Nobel, “viu literalmente o elétron.”

[...]

Ele perscrutou, através de um microscópio, o interior de uma câmara que ele próprio havia desenhado. Aquela câmara era como um pequeno palco para um tipo peculiar de ação desempenhada por um tipo peculiar de ator. Os atores que apareciam, um de cada vez, nesse pequeno palco, eram pequenas gotas de óleo com uns poucos microns de diâmetro. Este é um tamanho tão mínimo — seu diâmetro tinha aproximadamente o comprimento de onda da luz visível — que a luz de fato se curvava em volta delas, e você conseguia ver a sua difração. Elas não pareciam sólidas nas retículas, e sim discos borrados, cercados por anéis de difração, — motivo pelo qual Millikan não podia medir opticamente seus tamanhos e precisou recorrer à lei de Stokes para determiná-los. Cada gota, quando iluminada por uma lâmpada de arco voltaico, aparecia para Millikan como uma estrela piscando num céu escuro. As gotículas eram extremamente sensíveis ao meio, e reagiam a qualquer corrente de ar, a colisões com moléculas de ar, e aos campos elétricos que Millikan

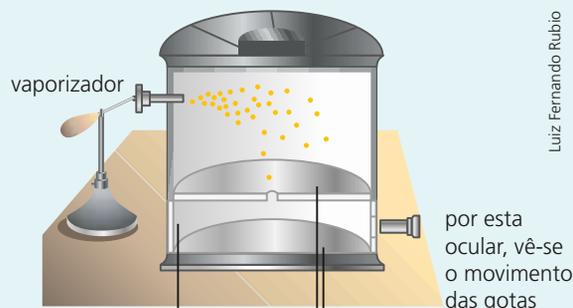
devia ajustar para fazê-las se mover. Ele viu as gotas irem para cima e para baixo em resposta às mudanças do campo elétrico. Ele as viu derivar em outras direções em virtude das correntes de ar. Ele as viu balançar para trás e para a frente em decorrência do movimento browniano. Depois de observar uma gotícula se movendo no campo elétrico, de repente ela pulava ao encontrar outro íon no ar. “Um elétron isolado pulou sobre a gota. Na verdade, podemos ver o exato instante em que ele pula para dentro ou para fora.” Quando uma gotícula de óleo estava “se movendo para cima, com a menor velocidade que podia alcançar, pude ter certeza de que apenas um elétron isolado estava pousado nela.”

CREASE, Robert P. *Os 10 mais belos experimentos científicos*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 2006. p. 123, 135-136.



Esta é a câmara utilizada por Robert Millikan no experimento da gota de óleo. Fotografia tirada em 1917, logo após o término da montagem do experimento.

Millikan sabia como fazer as gotas irem para cima ou para baixo, ou permanecerem absolutamente paradas. Ele se familiarizou com elas a ponto de reconhecer tudo o que estava acontecendo — e que o que estava acontecendo lhe mostrava algo novo a respeito do mundo. Há um prazer sensual em ver objetos se comportarem em situações complexas de acordo com leis que conhecemos intimamente — como ao olhar uma bola de basquete viajar pelo ar, quicar no aro da cesta contra a tabela, e então voltar e entrar na cesta. Só que Millikan via uma ação que lhe mostrava algo importantíssimo — a carga elétrica fundamental. Era o tipo de beleza de que Schiller<sup>(\*)</sup> falava, algo que “nos conduz para dentro do mundo das ideias sem, contudo, nos tirar do mundo dos sentidos”.



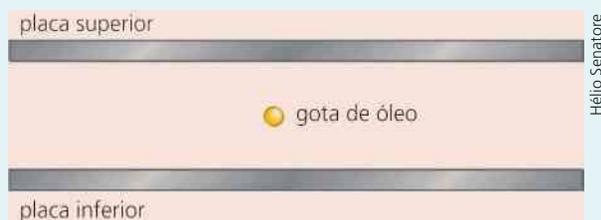
as gotas de óleo movem-se em movimento uniforme ou uniformemente variado

entre estas placas estabelece-se uma diferença de potencial U nesta região

Millikan mantinha pequenas gotas de óleo eletrizadas em equilíbrio entre duas placas horizontais e paralelas também eletrizadas. Para conseguir isso, ele fazia variar a diferença de potencial entre essas placas, alterando assim a intensidade do campo elétrico entre elas.

## Organizando as ideias do texto

1. Qual é a massa de um elétron?
2. O que é o movimento browniano?
3. Na figura, você vê o esquema em que, em uma de suas medidas, a gota tem peso  $2,4 \cdot 10^{-13}$  N e carga elétrica negativa  $4,8 \cdot 10^{-19}$  C, e que podemos desprezar os efeitos da viscosidade do ar sobre a gota.



- a) Quantos elétrons em excesso há nesta gota?
- b) Sabendo que a gota está em equilíbrio, determine as forças que atuam sobre a gota; a partir daí, infira a polaridade das placas positiva e negativa.
- c) Se essa gota atingiu o equilíbrio entre placas separadas de 1,6 cm, qual é a diferença de potencial entre estas placas? **Professor, veja as Orientações Didáticas.**

<sup>\*</sup> Johan Christoph Friedrich von Schiller (1759-1805) foi um filósofo e dramaturgo alemão, de formação e valores iluministas.

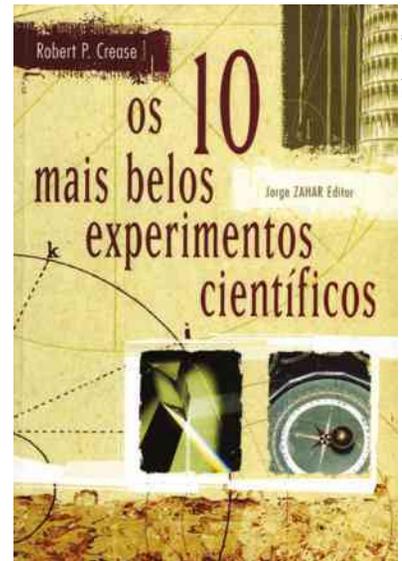
Livro

Os 10 mais belos experimentos científicos

Robert P. Crease. Jorge Zahar (editor).

Um cientista experimental deve ter talentos específicos distintos dos teóricos, porque a atividade experimental envolve método, persistência, trabalho colaborativo, multidisciplinar ou mesmo multinacional. Às vezes é preciso esperar muito tempo para obter bons resultados: quando Millikan iniciou sua série de experimentos sobre o elétron, em 1907, ele estava com quase 40 anos, e era pai de três filhos. Mas devemos ser muito gratos aos experimentais, porque os resultados dessas experiências nos ajudam a ver o mundo cada vez mais perto de sua face verdadeira.

Se você gostou da leitura da seção "Outras Palavras", decerto vai se deleitar com o livro todo.

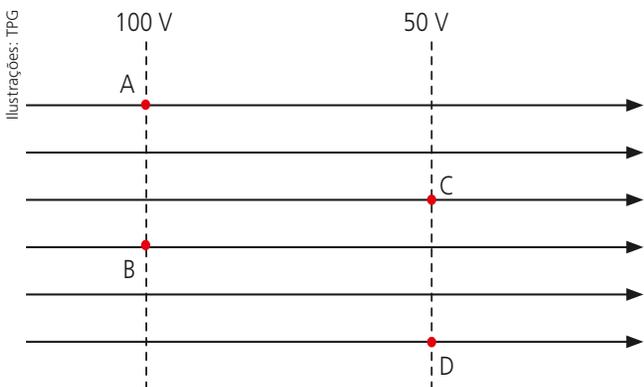


Jorge Zahar Editora

Exercícios propostos

FAÇA NO CADERNO NÃO ESCREVA NO LIVRO

EP1. Considere uma carga pontual ( $Q = +5 \mu\text{C}$ ) imersa em um meio aquoso, sob um campo elétrico constante, conforme mostra a figura.



Determine o trabalho realizado para deslocar essa carga:

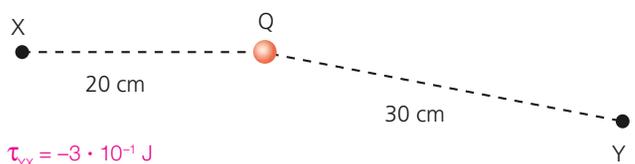
- a) do ponto A ao ponto B. zero
- b) do ponto A ao ponto C.  $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ J}$
- c) do ponto A ao ponto D.  $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ J}$
- d) do ponto C ao ponto B.  $-2,5 \cdot 10^{-4} \text{ J}$

EP2. Considere uma carga puntiforme fixa  $Q = +10 \mu\text{C}$ , no vácuo. É dada a constante eletrostática no meio considerado:  $9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$ .

- a) Calcule os potenciais elétricos nos pontos A e B, distantes, respectivamente, 0,6 m e 1,0 m de Q;  $V_A = 1,5 \cdot 10^5 \text{ V}$  e  $V_B = 9,0 \cdot 10^4 \text{ V}$
- b) Determine a diferença de potencial entre os pontos A e B;  $U_{AB} = 6,0 \cdot 10^4 \text{ V}$
- c) Quais são os valores da energia potencial elétrica de uma carga de prova  $q = +2 \mu\text{C}$  colocada, respectivamente, em A e em B?  $E_{peA} = 3,0 \cdot 10^{-1} \text{ J}$  e  $E_{peB} = 1,8 \cdot 10^{-1} \text{ J}$
- d) A carga de prova move-se espontaneamente de A para B ou de B para A? Justifique.  
Resposta nas Orientações Didáticas.

EP3. A figura mostra uma carga puntiforme fixa  $Q = 8 \mu\text{C}$  e dois pontos X e Y, no vácuo. Determine o trabalho da força elétrica para deslocar uma partícula eletrizada com carga  $q = 2,5 \mu\text{C}$ , do ponto Y ao ponto X.

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



**EP4.** Duas partículas eletrizadas,  $Q_A = -6 \text{ nC}$  e  $Q_B = +8 \text{ nC}$ , estão fixas no vácuo, respectivamente, nos pontos A e B, e separadas por uma distância de 20 cm. Dada a constante eletrostática  $k_0 = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$ , calcule:

- o potencial elétrico no ponto C, a meia distância entre A e B;  $V_C = 1,8 \cdot 10^2 \text{ V}$
- o potencial elétrico no ponto D, a 12 cm de A e 16 cm de B;  $V_D = 0$
- o trabalho realizado pelas forças elétricas sobre uma carga puntiforme  $q = 1 \text{ nC}$ , no deslocamento do ponto C para D.  $\tau_{CD} = 1,8 \cdot 10^{-7} \text{ J}$

**EP5.** Uma carga pontual  $q = 5 \text{ nC}$ , colocada no ponto X de um campo elétrico uniforme de intensidade 40 N/C, é deslocada até o ponto Y distante 60 cm de X. Calcule:

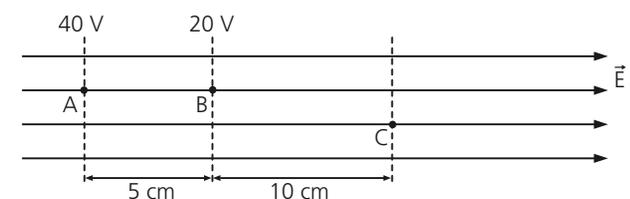
- o trabalho realizado pela força elétrica nesse deslocamento;  $\tau_{XY} = 1,2 \cdot 10^{-7} \text{ J}$
- a diferença de potencial elétrico existente entre os pontos X e Y.  $U_{XY} = 24 \text{ V}$

**EP6.** Uma partícula com carga elétrica  $q = 4,5 \text{ nC}$  e massa 0,1 mg é abandonada no ponto A do campo elétrico uniforme de intensidade  $E = 50 \text{ N/C}$ . A figura representa as linhas de força e duas das superfícies equipotenciais. Determine:



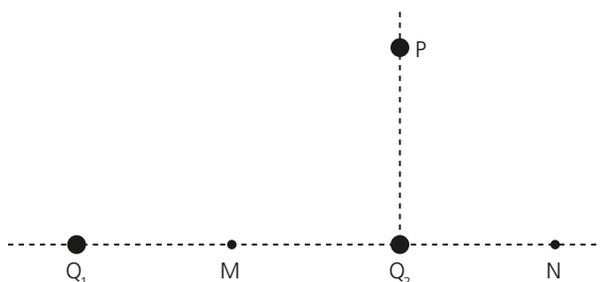
- o trabalho realizado pela força elétrica para deslocar a carga de A para B;  $\tau_{AB} = 4,5 \cdot 10^{-7} \text{ J}$   $v_B = 3,0 \text{ m/s}$
- a velocidade escalar da partícula ao passar por B;
- a distância que separa as superfícies equipotenciais dos pontos A e B.  $d = 2,0 \text{ m}$

**EP7.** A figura representa linhas de força e superfícies equipotenciais de um campo elétrico uniforme  $\vec{E}$ . Uma carga de prova  $q = +5 \mu\text{C}$ , colocada no ponto A, desloca-se espontaneamente na direção e sentido das linhas de força.



- Qual é, em V/m, o valor  $E$  do campo elétrico?  $E = 400 \text{ V/m}$
- Quanto vale o potencial elétrico no ponto C?  $V_C = -20 \text{ V}$
- Qual é o trabalho da força elétrica para deslocar a carga de prova de A para C?  $\tau_{AC} = 3 \cdot 10^{-4} \text{ J}$

**EP8.** (UFS-SE) Duas cargas puntiformes  $Q_1 = 50 \mu\text{C}$  e  $Q_2 = -8,0 \mu\text{C}$  estão fixas no vácuo, separadas por 20 cm. A constante eletrostática, no vácuo, vale  $k = 9,0 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$  e o potencial elétrico no infinito é tomado como referencial.



Analise as afirmações:

- A intensidade da força de interação elétrica entre as cargas é de 90 N. **V**
- A intensidade do vetor campo elétrico resultante no ponto M, médio do segmento que une  $Q_1$  e  $Q_2$ , é de  $3,78 \cdot 10^7 \text{ N/C}$ . **F**
- Uma carga elétrica puntiforme  $q$  ficará em equilíbrio eletrostático quando colocada no ponto N, que dista 10 cm de  $Q_2$  e 30 cm de  $Q_1$ . **F**
- O potencial elétrico no ponto P, situado a 15 cm de  $Q_2$  e 25 cm de  $Q_1$ , vale  $1,32 \cdot 10^6 \text{ V}$ . **V**
- O trabalho realizado pelas forças elétricas para deslocar uma carga puntiforme  $q = 1,0 \mu\text{C}$  do ponto M até o infinito vale 3,78 J. **V**

**EP9.** Em um campo elétrico uniforme, uma partícula eletrizada com carga  $q$  desloca-se do ponto A até um ponto B, realizando um trabalho elétrico. Mas, se ela se deslocasse de A até um ponto C, no qual o potencial elétrico fosse o mesmo de B, responda:

- A intensidade do campo elétrico seria direta ou inversamente proporcional ao valor do trabalho elétrico realizado?
- Qual seria a diferença nos valores dos trabalhos de A até B e de A até C? Justifique.

Respostas nas Orientações Didáticas.

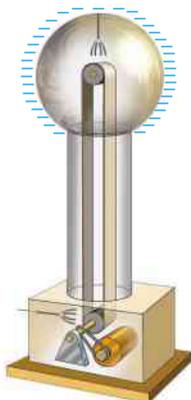
# Condutores em equilíbrio eletrostático



Kip Petricolas/Fundamental Photographs

A cúpula e a garota formam uma superfície equipotencial sob altíssimo potencial elétrico.

Paulo César Pereira



Gerador de Van de Graaff em funcionamento — a correia que se movimenta, e se eletriza por atrito, eletriza a cúpula por indução.



Cúpula eletrizada — os cabelos de uma pessoa, isolada, que encostar na parte externa da cúpula ficarão eletrizados e a repulsão entre as cargas irá arrepiá-los.



Cúpula eletrizada — se uma pessoa, isolada, encostar na parte interna da cúpula, nada acontecerá.

Alberto De Stefano

Por isso, não haverá movimento ordenado de cargas em relação a um referencial fixo e, portanto, dizemos que o condutor está em equilíbrio eletrostático.

## Condutor em equilíbrio eletrostático

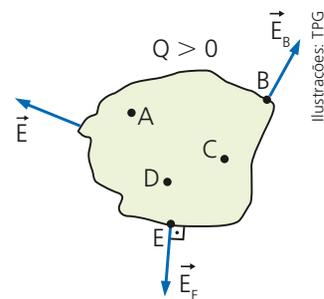
No interior de um condutor em equilíbrio eletrostático não há movimento ordenado de cargas elétricas, pois não há um agente causador do movimento, ou seja, não há diferença de potencial elétrico entre dois pontos quaisquer. Isso significa que o potencial elétrico em qualquer ponto do condutor, interno ou na superfície do condutor, é sempre o mesmo, e, assim, funciona como uma superfície equipotencial.

Quando analisamos a parte interna do condutor, vemos que o campo elétrico é nulo, pois, se assim não fosse, ele agiria nos elétrons livres, que ganhariam um movimento ordenado, contrariando a hipótese de condutor em equilíbrio eletrostático. Já nos pontos da superfície do condutor, o campo elétrico não é nulo e os vetores campo elétrico têm, nesses pontos, direção perpendicular à superfície.

Na figura ao lado, observa-se um condutor eletrizado positivamente e em equilíbrio eletrostático, onde os pontos *A*, *C* e *D* são internos e os pontos *B* e *E* são da superfície.

Assim, a descrição do condutor em função do campo e do potencial é a seguinte:

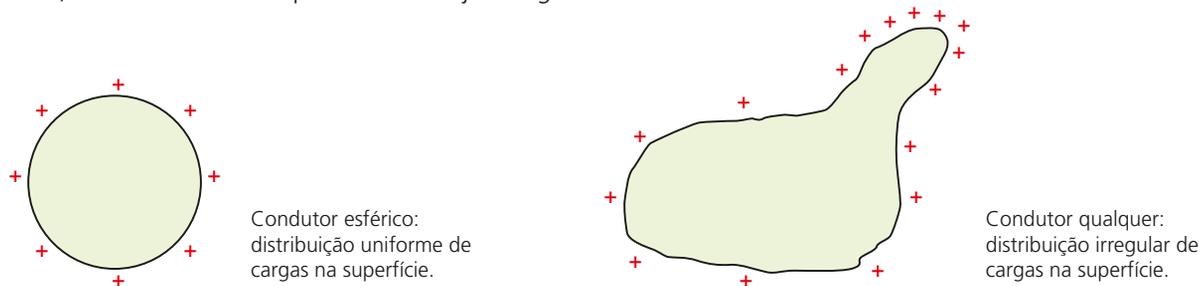
- o potencial elétrico é constante em qualquer ponto do condutor, interno ou externo ( $V_A = V_B = V_C = V_D = V_E = \text{constante}$ );
- o campo elétrico é nulo nos pontos internos ( $E_A = E_C = E_D = 0$ );
- o campo elétrico nos pontos da superfície é diferente de zero ( $E_B = E_E \neq 0$ ), de forma que os vetores campo ( $\vec{E}$ ) são perpendiculares à superfície do condutor, no ponto considerado, independentemente do sinal da carga *Q*.



## Distribuição das cargas elétricas

Os condutores eletrizados têm excesso de cargas de algum sinal; essas cargas em excesso sofrem repulsão mútua e tendem a ficar o mais longe possível uma da outra. O afastamento máximo possível entre as cargas corresponde à distribuição de cargas elétricas pela superfície do condutor, independentemente de ele ser maciço ou oco.

Entretanto, o formato do condutor influenciará na distribuição das cargas na sua superfície externa. No caso da superfície esférica, a distribuição das cargas é uniforme, mas, se o condutor tiver superfície irregular, assimétrica, a concentração das cargas será maior nas regiões pontiagudas, sempre a atender ao requisito de que a força elétrica resultante sobre qualquer carga no seu interior seja nula, assim como o campo elétrico. Veja a seguir:



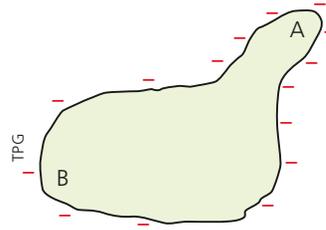
## Densidade superficial de cargas ( $\sigma$ )

Denomina-se **densidade superficial de cargas ( $\sigma$ )** à quantidade de carga ( $\Delta Q$ ) existente em uma unidade de área ( $\Delta A$ ) da superfície do condutor, ou seja:

$$\sigma = \frac{\Delta Q}{\Delta A}$$

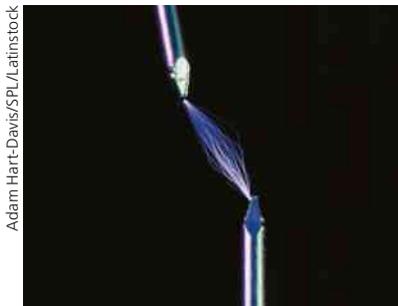
No SI, a unidade de medida da densidade superficial de cargas é o coulomb por metro quadrado ( $C/m^2$ ).

Nas superfícies irregulares, a densidade superficial de cargas também é maior nas regiões pontiagudas. Considere um objeto de forma assimétrica eletrizado negativamente:



Nesse objeto, a densidade superficial de cargas é maior na região A do que na região B. Assim:  $\sigma_A > \sigma_B$ .

## Poder das pontas



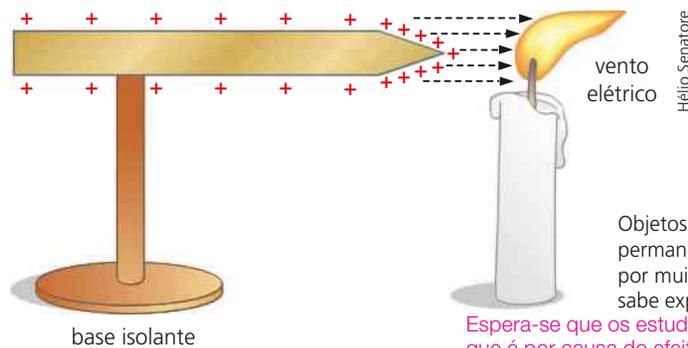
O campo elétrico na ponta dos pregos é intenso o suficiente para tornar o ar condutor e permitir a passagem de cargas elétricas.

Dado um condutor carregado, de superfície irregular, o local onde o campo elétrico é mais intenso, devido à maior densidade superficial de cargas, é a região mais pontiaguda desse condutor. Se o campo elétrico nas proximidades dessa ponta é suficientemente intenso, as moléculas do ar atmosférico à sua volta podem se ionizar, e o condutor pode se descarregar através da ponta. Quando a ionização do ar se torna muito intensa, a vizinhança da ponta poderá até emitir luz por causa das colisões entre os íons e o ar: esse é o fenômeno já visto no capítulo 3 e conhecido como **efeito corona**.

Se os íons, em volta da ponta, tiverem o mesmo sinal da região pontiaguda, esses serão repelidos, provocando o deslocamento do ar (conhecido como **vento elétrico**).



Na imagem, um condutor recebe carga continuamente de um gerador de Van de Graaff. A ionização próxima à ponta do condutor pode mover algumas camadas de ar e "soprar" a vela.



Objetos pontiagudos não permanecem eletrizados por muito tempo. Você sabe explicar o motivo?

Espera-se que os estudantes respondam que é por causa do efeito de pontas.

Esses fenômenos são conhecidos como **poder das pontas**, e é nisso que se baseia, por exemplo, o funcionamento dos para-raios.

## A FÍSICA NO COTIDIANO

### Para-raios

O raio que cai na Terra nada mais é do que uma descarga de uma grande quantidade de cargas elétricas em movimento ordenado muito rápido. Isso acontece toda vez que existe uma enorme diferença de potencial (de alguns milhões de volts) entre a parte inferior de uma nuvem e o solo ou entre duas nuvens. A parte visível do raio (relâmpago) é devida à ionização do ar, e o som característico (trovão) é por causa da sua brusca expansão devido à altíssima temperatura (cerca de  $10^4$  °C).

Você consegue relacionar o sentido da descarga elétrica com a carga da nuvem? Fotografia durante uma chuva em Londrina (PR) em 2009.



Sergio Ranalli/Pulsar Imagens

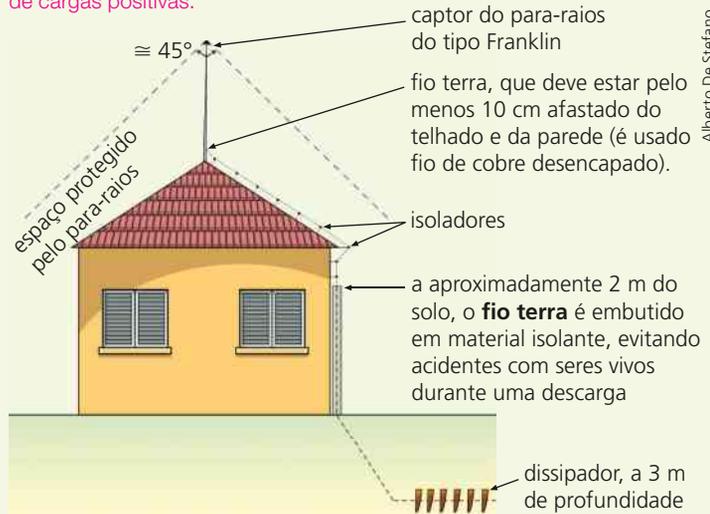
Estima-se que, no planeta, ocorram milhões de raios todos os dias! Os locais preferidos por eles são os mais altos de uma determinada região da superfície da Terra, como picos de montanhas, torres, arranha-céus, topo de árvores e antenas.

Para a proteção de casas, edifícios e outros tipos de construção, são instalados para-raios, invenção do estadunidense Benjamin Franklin (1706-1790), administrador, político e cientista.

Quando uma nuvem eletrizada passa próximo de um para-raios, aparece nele uma carga elétrica de sinal oposto ao da nuvem por indução. Por isso, a carga da nuvem é atraída pelo para-raios, e assim é escoada para a Terra.

O sistema dos para-raios é constituído, essencialmente, de condutores metálicos: o captor (ponta metálica que fica no lugar mais alto do local protegido), os condutores (fio terra apoiado em suportes isolantes) e o dissipador (instalado abaixo do solo).

Se a descarga causar um raio que desce para a terra, trata-se de um acúmulo de cargas negativas na nuvem; caso contrário, o acúmulo será de cargas positivas.

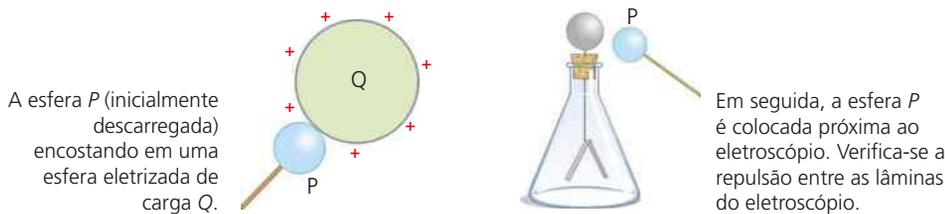


Alberto De Stefano

## Condutor esférico em equilíbrio eletrostático

Vimos que num condutor esférico em equilíbrio eletrostático, eletrizado com carga  $Q$ , a distribuição das cargas em excesso é uniforme ao longo de toda a superfície externa devido às forças de repulsão mútua entre cargas de mesmo sinal.

Isso pode ser verificado encostando uma esfera  $P$ , inicialmente descarregada, em uma esfera com carga  $Q$ . Quando a esfera  $P$  se aproximar de um eletroscópio, as lâminas vão se abrir.

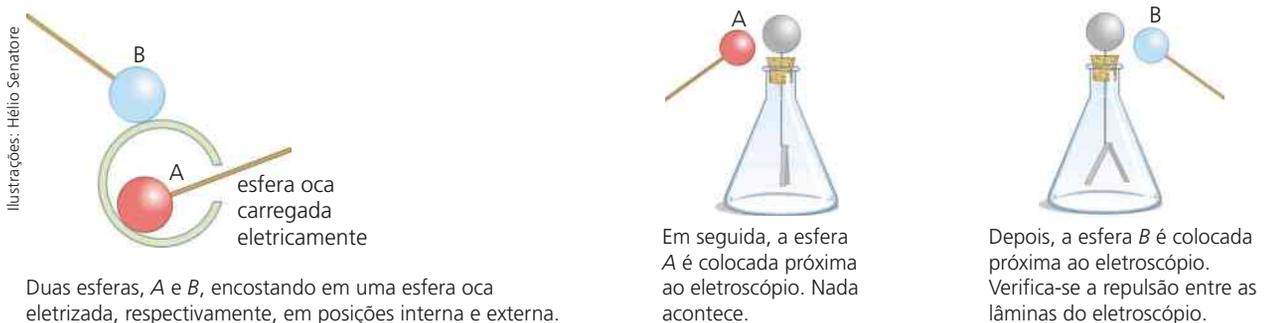


A esfera  $P$  (inicialmente descarregada) encostando em uma esfera eletrizada de carga  $Q$ .

Em seguida, a esfera  $P$  é colocada próxima ao eletroscópio. Verifica-se a repulsão entre as lâminas do eletroscópio.

Quando um condutor oco estiver carregado eletricamente e em equilíbrio eletrostático, o campo elétrico em sua cavidade é nulo e não há uma movimentação ordenada de elétrons em seu interior.

Isso pode ser verificado encostando duas esferas ( $A$  e  $B$ ), inicialmente descarregadas, na parte interna e na parte externa da esfera oca. Quando a esfera  $A$  (que encostou na parte interna da esfera oca) se aproximar de um eletroscópio, não haverá movimentação de suas lâminas. Entretanto, quando a esfera  $B$  (que encostou na parte externa da esfera oca) se aproximar de um eletroscópio, as suas lâminas serão repelidas.

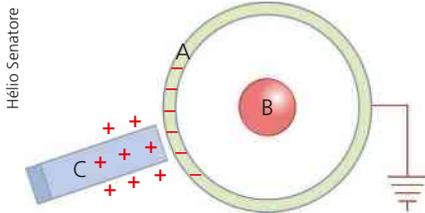


Duas esferas,  $A$  e  $B$ , encostando em uma esfera oca eletrizada, respectivamente, em posições interna e externa.

Em seguida, a esfera  $A$  é colocada próxima ao eletroscópio. Nada acontece.

Depois, a esfera  $B$  é colocada próxima ao eletroscópio. Verifica-se a repulsão entre as lâminas do eletroscópio.

Ilustrações: Hélio Senatore



Hélio Senatore

## Blindagem eletrostática

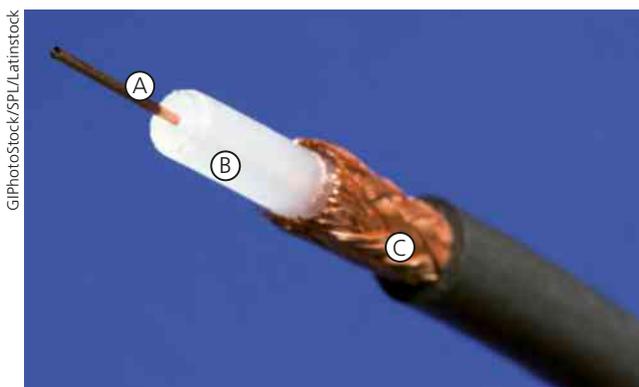
Agora considere um corpo *B* no interior de um corpo *A*, porém sem contato. Aproximando-se, pelo lado de fora, um corpo *C* eletrizado, este induzirá as cargas de *A*, mas não de *B*. Portanto, se um corpo for colocado no interior de outro condutor, porém sem contato, ele ficará protegido de qualquer ação elétrica externa.

Dessa forma, dizemos que o corpo *A* constitui uma **blindagem eletrostática** para o corpo *B*, que não sofre nenhuma influência elétrica externa.

No cotidiano, a blindagem eletrostática é muito utilizada para proteger dispositivos elétricos e eletrônicos. Aparelhos de medição mais sensíveis estão acondicionados em caixas metálicas para não sofrer influências externas indesejáveis, assim como peças de computador, aparelhos de som, TV etc. O interior dos automóveis, dos aviões e dos prédios com estruturas metálicas também constituem uma blindagem eletrostática e, por isso, é um local seguro para se proteger de raios.

Uma outra aplicação da blindagem eletrostática (figura ao lado) ocorre nos cabos coaxiais.

Esse é um tipo de cabo condutor utilizado para transmitir sinais. Ele é constituído de camadas concêntricas de condutores e isolantes, daí o nome coaxial. A parte mais interna (utilizada para a transmissão de sinais) é constituída de um fio de cobre condutor (*A*), que é revestido por um material isolante (*B*), e esses são envolvidos por uma malha metálica (*C*), que fará o papel da blindagem. Todo o conjunto é coberto por um revestimento plástico. Esse tipo de cabo permite transmissões, sem interferências, de frequências elevadas, a longas distâncias.

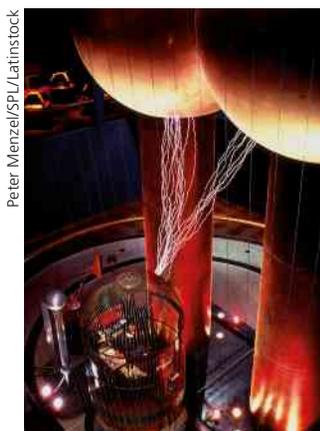


GIPhotoStock/SPL/LatinStock

Nesse cabo, o fio metálico central leva a informação, e a malha externa — entre os dois isolantes — fornece a blindagem eletrostática.

A eficácia da blindagem eletrostática foi demonstrada pelo inglês Michael Faraday (1791-1867), cientista autodidata, que construiu uma gaiola de metal carregada por um gerador eletrostático de alta voltagem e se posicionou em seu interior levando junto um eletroscópio, para mostrar que naquela região interna do condutor eram nulos os efeitos gerados pelo campo elétrico, tanto nele como no eletroscópio. A gaiola feita de tela metálica ficou conhecida como gaiola de Faraday.

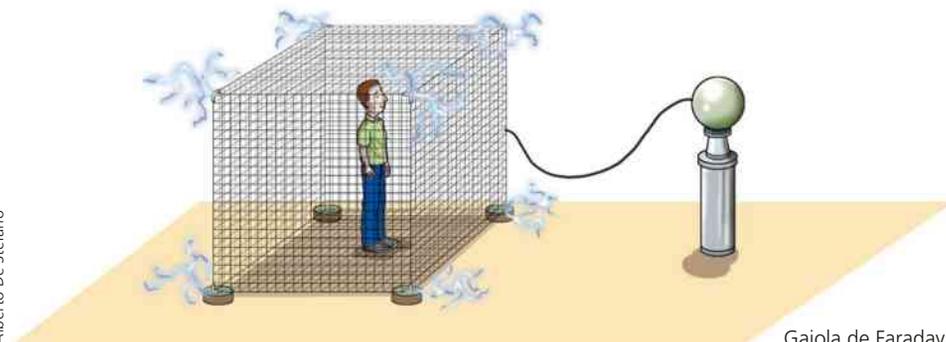
Experimente embrulhar um telefone celular ou um rádio ligado em papel-alumínio; eles deixam de receber o sinal, devido à blindagem eletrostática.



Peter Menzel/SPL/LatinStock

Descargas elétricas que incidem na tela induzirão cargas apenas na parte externa — e mantém o interior sem campo elétrico.

Alberto De Stefano



Gaiola de Faraday.

## De autodidata a cientista

Michael Faraday é considerado um dos maiores físicos experimentais de todos os tempos. Fez da Química e da Física os seus objetos de observação, contribuindo para a divulgação das descobertas nessas áreas com incontáveis palestras e conferências na Royal Institution. Leia um pouco das descobertas de Faraday nos textos a seguir; falaremos sobre algumas dessas descobertas nos capítulos dedicados à Eletrodinâmica e ao Eletromagnetismo.

Sir Humphry Davy, Thomas Phillips, Data desconhecida



Além de dedicar-se à investigação científica, Michael Faraday (1791-1867) manteve um público cativo nas conferências da Royal Institution, de adolescentes ao Príncipe Albert, consorte da Rainha Vitória.



Album/Alkg Images/Latinstock

Pioneiro da eletroquímica, descobridor do sódio, do potássio e do cloro, *sir* Humphry Davy (1778-1829) tem também o mérito de ter “descoberto” Michael Faraday, seu diretor de laboratório desde 1825. Imagem produzida por Victor Pollet. Sem data.

Filho de ferreiro, Michael Faraday nasceu em 1791, numa pequena cidade próxima a Londres. Bem jovem, começou a trabalhar numa oficina como aprendiz de encadernador. Dotado de notável inteligência e força de vontade, lia à noite os livros que encadernava durante o dia. Revelou desde cedo uma grande inclinação para o estudo da física e da química. Em 1812, passou a assistir às aulas do famoso químico Humphry Davy (1778-1829), das quais participava com grande interesse. Resolveu então enviar a Davy as anotações de aula, relatando sua vontade de dedicar-se às ciências e pedindo a ajuda do grande químico. Impressionado com a dedicação e aplicação de Faraday, *sir* Davy nomeou-o, em 1813, ajudante de laboratório e, a seguir, seu assistente. [...]

Durante as realizações de Faraday, destaca-se a construção de uma grande gaiola metálica para demonstrar que os condutores, quando carregados, eletrizam-se apenas em sua superfície externa. Ele próprio permaneceu no interior da gaiola, mantida sobre suportes isolantes, enquanto um de seus assistentes a eletrizava intensamente. Apesar de saltarem faíscas da gaiola, no seu interior Faraday não sofreu nenhum efeito elétrico, comprovando-se assim a sua tese. Até hoje essa propriedade é

utilizada em eletrotécnica: aparelhos elétricos e eletrônicos são sempre envolvidos por uma blindagem metálica, em cuja superfície externa se distribuem eventuais cargas elétricas sem afetar o funcionamento do aparelho.

FERRARO, Nicolau Gilberto. *Eleticidade: história e aplicações*. 2. ed. São Paulo: Moderna, 1991. p. 18.

Ele realizou uma quantidade enorme de experiências, descobriu a decomposição química por meio da corrente elétrica, que chamou de eletrólise, e no estudo desse fenômeno descobriu que os átomos deveriam estar de alguma forma dotados ou associados com a eletricidade. Em 1831, descobriu que deslocando um ímã próximo de um fio produzia uma corrente elétrica nesse fio. Verificou também que variando uma corrente em um fio produzia corrente noutro fio próximo. Foi o descobridor da indução eletromagnética (a geração de corrente num fio próximo a outro pelo qual passa uma corrente variável) e da rotação do plano de polarização da luz por um magneto. Inventou o dínamo, um instrumento que gera uma corrente elétrica quando um conjunto de espiras é girado próximo de um magneto.

PIRES, Antonio S. *Evolução das ideias da Física*. São Paulo: Livraria da Física, 2008. p. 271-272.

## Organizando as ideias do texto

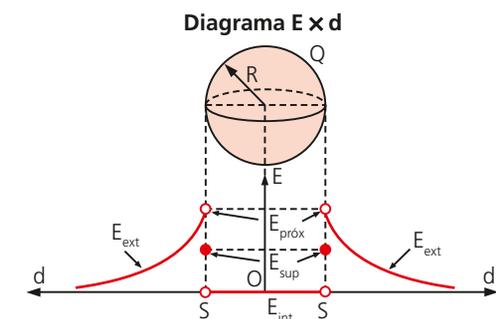
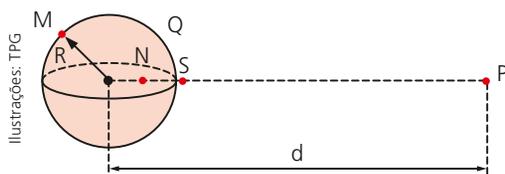
1. A respeito da experiência em que Faraday está isolado dentro de uma gaiola metálica, de quais partes da gaiola você considera que saíam mais faíscas?
2. Qual outro aparelho Faraday poderia ter levado consigo para mostrar que no interior não há nenhum efeito elétrico?
3. Considere uma situação em que você está na rua, em um dia de tempestade, com raios. Você se arriscaria a se abrigar em um automóvel? Justifique a sua escolha.
4. A Física Clássica é dividida, didaticamente, em Mecânica, Termodinâmica e Eletromagnetismo. Situando no tempo algumas das mais importantes descobertas em cada uma dessas áreas, mostre que o Eletromagnetismo é o ramo da Física Clássica que se desenvolveu mais tardiamente.

Professor, veja as Orientações Didáticas.



Index/Latinstock

## Campo elétrico ( $E$ ) de um condutor esférico em equilíbrio



Seja um condutor esférico, maciço ou não, de raio  $R$ , eletrizado com carga  $Q$  em equilíbrio eletrostático. A intensidade do seu campo elétrico vai variar de acordo com a distância  $d$  do centro da esfera.

Para pontos no interior da esfera ( $d < R$ ), sabemos que o campo elétrico ( $E_{\text{int}}$ ) é nulo, e para pontos externos da esfera ( $d > R$ ), a intensidade do campo elétrico ( $E_{\text{ext}}$ ) é calculada como se toda a carga estivesse concentrada no centro da esfera, ou seja, consideramos a esfera como carga puntiforme. Agora, para todos os pontos da superfície da esfera ( $d = R$ ), verifica-se que a intensidade do campo elétrico ( $E_{\text{sup}}$ ) vale a metade do valor determinado para um ponto infinitamente próximo ( $d \cong R$ ) da superfície ( $E_{\text{próx}}$ ). Assim, considerando que o meio seja o vácuo ( $k_0 = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$ ), temos as expressões:

- ponto interno ( $M$ ):  $E_{\text{int}} = 0$
- ponto externo ( $P$ ):  $E_{\text{ext}} = k_0 \cdot \frac{|Q|}{d^2}$
- ponto infinitamente próximo ( $S$ ):  $E_{\text{próx}} = k_0 \cdot \frac{|Q|}{R^2}$
- ponto na superfície ( $M$ ):  $E_{\text{sup}} = \frac{E_{\text{próx}}}{2} = \frac{1}{2} \cdot k_0 \cdot \frac{|Q|}{R^2}$

## Potencial elétrico ( $V$ ) de um condutor esférico em equilíbrio

Para o mesmo condutor utilizado para determinar o campo elétrico, são apenas duas as situações para se calcular o valor do potencial elétrico, que também varia de acordo com a distância  $d$  do centro da esfera. Para pontos internos e da superfície do condutor ( $d \leq R$ ), os potenciais elétricos são iguais ( $V_{\text{int}} = V_{\text{sup}}$ ) e constantes, calculado tomando-se como distância o valor do raio, independentemente da distância ao centro e, para pontos externos ( $d > R$ ), o potencial é calculado considerando a esfera como uma carga puntiforme ( $V_{\text{ext}}$ ), conforme já visto, temos a representação da página a seguir.

- Ponto interno e da superfície:

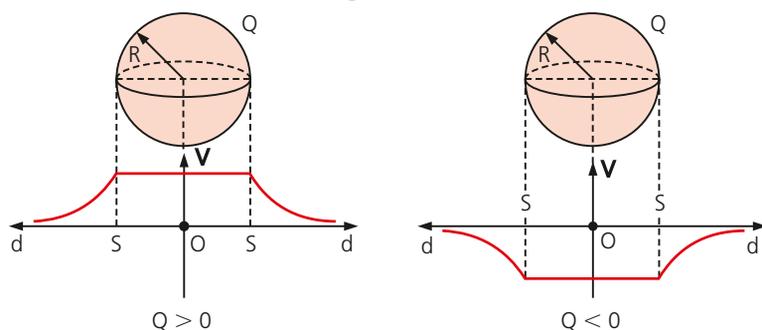
$$V_{\text{int}} = V_{\text{sup}} = k_0 \cdot \frac{Q}{R}$$

- Ponto externo:

$$V_{\text{ext}} = k_0 \cdot \frac{Q}{d}$$

Diagrama  $V \times d$

Ilustrações: TPG



## Exercícios resolvidos

**ER1.** Uma esfera condutora, de raio  $R = 20$  cm, está eletrizada por falta de  $1,57 \cdot 10^{20}$  elétrons. É dado o valor da carga elementar  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  C e a área da superfície esférica  $A = 4 \cdot \pi \cdot R^2$ . Considerando  $\pi = 3,14$ , calcule:

- a) a quantidade de carga da esfera;
- b) a densidade superficial de cargas da esfera.

### Resolução:

Temos:  $R = 20$  cm =  $2 \cdot 10^{-1}$  m e  $n = 1,57 \cdot 10^{20}$  elétrons (em falta, portanto a esfera está eletrizada positivamente).

- a) Cálculo da quantidade de carga:  $Q = n \cdot e \Rightarrow Q = 1,57 \cdot 10^{20} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \Rightarrow Q = 25,12$  C
- b) A densidade superficial de cargas é expressa por:

$$\sigma = \frac{\Delta Q}{\Delta A}$$

Para  $\Delta Q = Q$ , temos  $\Delta A = A = 4 \cdot \pi \cdot R^2$ . Portanto,

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{\Delta Q}{\Delta A} = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot R^2} = \frac{25,12}{4 \cdot 3,14 \cdot (2 \cdot 10^{-1})^2} = \\ &= \frac{25,12}{4 \cdot 3,14 \cdot 4 \cdot 10^{-2}} = \frac{25,12 \cdot 10^2}{50,24} \Rightarrow \sigma = 50 \text{ C/m}^2 \end{aligned}$$

**ER2.** Tem-se uma esfera condutora, de raio 50 cm, carregada com carga  $Q = -7,5$   $\mu\text{C}$  e isolada de outros corpos, no vácuo. Sendo  $k_0 = 9 \cdot 10^9$  N  $\cdot$  m<sup>2</sup>/C<sup>2</sup>, determine:

- a) as intensidades do campo elétrico nos pontos A, B, C e D, respectivamente, a uma distância do centro da esfera 20 cm, 50 cm, infinitamente próximo da superfície e 2,5 m;
- b) os potenciais elétricos nos mesmos pontos anteriores.

### Resolução:

Dados:  $R = 50$  cm = 0,5 m;  $Q = -7,5$   $\mu\text{C} = -7,5 \cdot 10^{-6}$  C e  $k_0 = 9 \cdot 10^9$  N  $\cdot$  m<sup>2</sup>/C<sup>2</sup>.

As distâncias dos pontos ao centro da esfera são:

$$d_A = 20 \text{ cm} = 0,2 \text{ m}; d_B = 50 \text{ cm} = 0,5 \text{ m};$$

$$d_C \cong R = 0,5 \text{ m} \text{ e } d_D = 2,5 \text{ m}.$$

- a) As intensidades do campo elétrico são:

No ponto A: como  $d_A = 0,2$  m, ele é interno à esfera, portanto:  $E_{\text{int}} = E_A = 0$

No ponto B: como  $d_B = 0,5$  m = R, ele é um ponto da superfície da esfera:

$$\begin{aligned} E_{\text{sup}} = E_B &= \frac{1}{2} \cdot k_0 \frac{|Q|}{R^2} = \frac{1}{2} \cdot 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{7,5 \cdot 10^{-6}}{(0,5)^2} = \\ &= \frac{1}{2} \cdot 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{75 \cdot 10^{-7}}{25 \cdot 10^{-2}} \Rightarrow E_B = 1,35 \cdot 10^5 \text{ V/m} \end{aligned}$$

No ponto C, infinitamente próximo da esfera:  $d_C \cong R$ , temos:  $E_{\text{próx}} = E_C = 2 \cdot E_{\text{sup}} \Rightarrow$

$$\Rightarrow E_C = 2 \cdot E_B = 2 \cdot 1,35 \cdot 10^5 \Rightarrow E_C = 2,7 \cdot 10^5 \text{ V/m}$$

No ponto D, externo:

$$\begin{aligned} E_{\text{ext}} = E_D &= k_0 \cdot \frac{|Q|}{d^2} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{7,5 \cdot 10^{-6}}{(2,5)^2} \Rightarrow \\ &\Rightarrow E_{\text{ext}} = 1,08 \cdot 10^4 \text{ V/m} \end{aligned}$$

- b) Os potenciais elétricos são:

Nos pontos A e B, respectivamente, interno e da superfície da esfera, portanto:

$$\begin{aligned} V_{\text{int}} = V_{\text{sup}} = V_A = V_B &= k_0 \cdot \frac{Q}{R} = \\ &= 9 \cdot 10^9 \cdot \left( \frac{-7,5 \cdot 10^{-6}}{0,5} \right) \Rightarrow V_A = V_B = 1,35 \cdot 10^5 \text{ V} \end{aligned}$$

Nos pontos C e D, externos à superfície:

$$\begin{aligned} V_{\text{ext}} = V_C = V_D &= k_0 \cdot \frac{Q}{d} = 9 \cdot 10^9 \cdot \left( \frac{-7,5 \cdot 10^{-6}}{2,5} \right) \Rightarrow \\ &\Rightarrow V_C = V_D = 2,7 \cdot 10^4 \text{ V} \end{aligned}$$

**EP1.** A densidade superficial de cargas positivas distribuídas uniformemente, na superfície de um condutor esférico cuja área vale  $0,8 \text{ m}^2$ , é de  $10 \text{ } \mu\text{C}/\text{m}^2$ . A constante eletrostática no vácuo  $k_0$  vale  $9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$  e a área da superfície esférica  $A$  se calcula como  $4 \cdot \pi \cdot R^2$ , em que  $R$  é o raio da superfície esférica. Supondo que a esfera esteja isolada e no vácuo, determine:

- a quantidade de carga  $Q$ , distribuída na superfície do condutor;  $Q = 8 \cdot 10^{-6} \text{ C}$
- uma estimativa do raio da esfera;  $R \approx 2,5 \cdot 10^{-1} \text{ m}$
- a intensidade do campo elétrico e do potencial elétrico a  $2,0 \text{ m}$  do centro da esfera.  $E = 1,8 \cdot 10^4 \text{ V/m}$  e  $V = 3,6 \cdot 10^4 \text{ V}$

**EP2.** Um condutor esférico, de raio  $30 \text{ cm}$ , recebe  $1,25 \cdot 10^{13}$  elétrons. Sabe-se que ele está no vácuo e livre de interferências externas. Considerando  $k_0 = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$  a constante eletrostática do vácuo e  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$  o valor da carga elementar, calcule o módulo do vetor campo elétrico criado nos pontos  $A$ ,  $B$  e  $C$ , distantes, respectivamente,  $20 \text{ cm}$ ,  $30 \text{ cm}$  e  $50 \text{ cm}$  do centro do condutor.

$E_A = 0$ ;  $E_B = 1,0 \cdot 10^5 \text{ V/m}$  e  $E_C = 7,2 \cdot 10^4 \text{ V/m}$

**EP3.** Uma esfera eletrizada com carga  $Q$ , oca, de raio  $20 \text{ cm}$ , encontra-se isolada em equilíbrio eletrostático no vácuo. Em relação a um referencial no infinito, o potencial elétrico de um ponto  $P$ , distante  $80 \text{ cm}$  do centro da esfera, vale  $4,5 \cdot 10^5 \text{ V}$ .

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

- Qual é o valor da carga  $Q$ ?  $Q = 4 \cdot 10^{-5} \text{ C}$
- Quanto vale o potencial elétrico em um ponto da superfície da esfera?  $V_{\text{sup}} = 1,8 \cdot 10^6 \text{ V}$
- Qual é a intensidade do campo elétrico em um ponto da superfície da esfera?  $E_{\text{sup}} = 4,5 \cdot 10^6 \text{ V/m}$

**EP4.** (UFMG)

1. Para testar as novidades que lhe foram ensinadas em uma aula de Ciências, Rafael faz algumas experiências, a seguir descritas. Inicialmente, ele esfrega um pente de plástico em um pedaço de flanela e pendura-o em um fio isolante. Observa, então, que uma bolinha de isopor pendurada próxima ao pente é atraída por ele, como mostrado na Figura I a seguir.

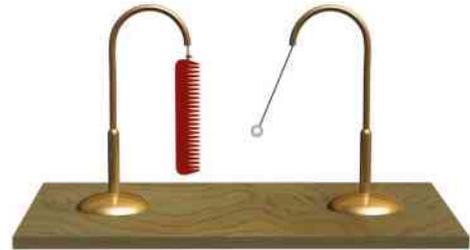


Figura I

Ilustrações: Paulo César Pereira

Explique por que, nesse caso, a bolinha de isopor é atraída pelo pente. **O pente fica eletricamente carregado e atrai a bolinha de isopor por indução.**

- Em seguida, enquanto o pente ainda está eletricamente carregado, Rafael envolve a bolinha de isopor com uma gaiola metálica, como mostrado na Figura II, abaixo, e observa o que acontece.



Figura II

Resposta: **Não. A indução é feita sobre a gaiola que isola todo o seu interior (Princípio da gaiola de Faraday).** A bolinha de isopor continua sendo atraída pelo pente? Justifique sua resposta.

- Para concluir, Rafael envolve o pente, que continua eletricamente carregado, com a gaiola metálica, como mostrado na Figura III, abaixo, e, novamente, observa o que acontece.



Figura III

Resposta: **Sim, pois as cargas tendem a se posicionar na parte externa da gaiola, atraindo a bolinha de isopor.** Nessa situação, a bolinha de isopor é atraída pelo pente? Justifique sua resposta.

# Capacitor

Você já deve ter visto um desfibrilador sendo usado, principalmente em seriados médicos da televisão. Ele é utilizado para corrigir um caos elétrico que se instalou no coração, fazendo-o bater em um ritmo propício para bombear o sangue. Essa correção é feita através de uma rápida descarga elétrica por dois eletrodos colocados adequadamente na parede torácica.

Agora, tente se lembrar da forma como esse aparelho foi utilizado (na TV ou em alguma demonstração). O aparelho é ligado, um zunido agudo é reproduzido, o operador pede às pessoas que se afastem e é feita a descarga, quase que instantânea, no paciente. Mas o que será que aquele zunido representa? É o momento em que o aparelho está sendo carregado e não demora mais que alguns segundos.

Então, o desfibrilador é um aparelho que consegue acumular e descarregar certa quantidade de carga elétrica em um curto intervalo de tempo. Repare que as pilhas ou as baterias não carregam nem descarregam rapidamente e, certamente, não há uma bateria com carga suficiente para reanimar um paciente. Por isso, o circuito eletrônico do desfibrilador deve ser composto, entre outros componentes, de um dispositivo que consiga acumular e descarregar altas quantidades de energia rapidamente. Esse dispositivo é o **capacitor**.

Neste capítulo veremos como o capacitor é constituído, as suas propriedades, os tipos, como são associados e os principais usos.

## Capacidade elétrica ou capacitância

Após a descoberta das cargas elétricas, o próximo passo seria descobrir um modo de armazená-las. Até hoje, o armazenamento de grandes quantidades de carga envolve dificuldades. As centrais geradoras de energia diminuem a sua produção nos horários de menor consumo, para que a rede não fique sobrecarregada. Mas, em pequena escala, o armazenamento de cargas é possível.

Quando falamos em armazenar qualquer coisa em algum lugar, logo pensamos que esse lugar tem uma capacidade de armazenamento. Por isso, a palavra *capacidade* sugere uma ideia de quantidade fixa, normalmente associada a fluidos — a capacidade de um balde, por exemplo, é medida em litros. Nesse sentido, o termo não seria muito apropriado para a eletricidade, mas foi adotado devido a uma concepção antiga que os físicos tinham a respeito da eletricidade. Eles achavam que a eletricidade também era um fluido. Isso, hoje, talvez pareça absurdo, mas o primeiro dispositivo criado para armazenar cargas foi feito em uma garrafa com água chamada **garrafa de Leyden**.



Desfibrilador em utilização.

Thinkstock/Getty Images



## Garrafa de Leyden

Ilustrações: Paulo César Pereira



Garrafa de Leyden original.

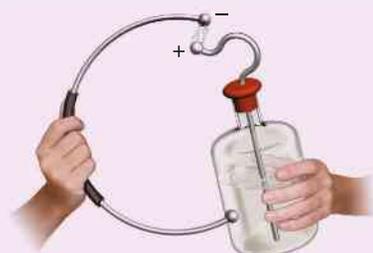
A garrafa de Leyden foi a precursora de uma das mais importantes peças utilizadas nos circuitos eletrônicos atuais: o capacitor. Esse foi o primeiro dispositivo inventado capaz de armazenar cargas elétricas. Em 1746, ela foi inventada acidentalmente por Pieter van Musschenbroek, professor da Universidade de Leyden, na Holanda, que estudou suas propriedades e a tornou popular. Mas há registros que descrevem um dispositivo similar, um ano antes da criação de Musschenbroek (1745), feito por Ewald Georg von Kleist, na atual Alemanha.

O dispositivo original era composto de uma garrafa de vidro com água no seu interior, com uma rolha perfurada por um fio metálico que ficava em contato com a água.

Enquanto a garrafa era segurada, o fio era colocado em contato com o terminal de uma máquina eletrostática. Mesmo com o fio desconectado da máquina eletrostática, se o operador tocasse o fio com a outra mão, recebia um choque elétrico.

Descobriu-se, então, que a “garrafa” acumulava grande quantidade de carga elétrica e o choque sentido era a repentina descarga da garrafa.

Com a continuidade dos experimentos, logo se descobriu que a água não era necessária e que se conseguia um acúmulo maior de cargas quando as paredes interna e externa da garrafa eram cobertas com folhas metálicas. Com o fio metálico em contato com a folha metálica interna e com o terminal de uma máquina eletrostática, verificou-se um aumento no acúmulo de carga. Essa configuração, folha metálica-vidro-folha metálica, foi a primeira versão dos atuais capacitores, que são formados por dois condutores (armaduras), separados por um dielétrico (isolante).



Descarregamento das cargas da garrafa de Leyden.

Atualmente, a garrafa de Leyden não tem aplicação prática, mas é muito estudada nos laboratórios de Física, pois, apesar de a carga acumulada não ser muito grande, é possível ver as faíscas e sentir os choques durante o descarregamento.

Para representar matematicamente o conceito de capacidade elétrica, vamos considerar um condutor esférico, de raio  $R$ , eletrizado com carga  $Q$ , imerso no vácuo. Considerando o infinito como referencial dos potenciais, sabemos que o potencial elétrico  $V$ , na superfície desse condutor isolado, é expresso por  $V = k_0 \cdot \frac{Q}{R}$ .

Verifique que, se esse condutor for eletrizado com uma carga  $Q$ , ele adquire potencial  $V$ ; se ele for eletrizado com uma carga  $2Q$ , ele adquire potencial  $2V$ ; com carga  $3Q$ , o seu potencial será  $3V$ , e assim por diante. Isso significa que a quantidade de carga ( $Q$ ) de um condutor em equilíbrio eletrostático e o seu potencial elétrico ( $V$ ) são grandezas diretamente proporcionais, ou seja, aumentando ou diminuindo o valor de uma, o valor da outra aumenta ou diminui na mesma proporção. Da matemática, sabe-se que, se  $a$  e  $b$  são grandezas diretamente proporcionais, então  $\frac{a}{b}$  é constante. Aplicando esse conceito a  $Q$  e a  $V$ , teremos  $\frac{Q}{V} = C$  (constante). A essa constante de proporcionalidade  $C$  damos o nome de **capacidade elétrica** ou **capacitância**. Então:

$$\frac{Q}{V} = C \Rightarrow Q = C \cdot V$$

Portanto, se dois condutores estiverem em um mesmo meio sob um mesmo potencial, o condutor com a maior capacidade elétrica armazenará mais cargas elétricas.

Partindo da expressão  $V = k_0 \cdot \frac{Q}{R}$ , podemos escrever  $\frac{Q}{V} = \frac{R}{k_0}$ ; daí, a capacidade elétrica de uma esfera também pode ser escrita por  $C = \frac{R}{k_0}$ , e vemos que a capacidade elétrica dependerá apenas de  $R$ , relacionado às dimensões do condutor, e de  $k_0$ , relacionado ao meio em que o condutor está imerso. A fórmula  $C = \frac{Q}{V}$  pode ser generalizada para qualquer condutor.

Como a quantidade de carga é medida em coulomb (C) e o potencial é medido em volt (V) no Sistema Internacional, a unidade de capacitância ou capacidade elétrica é:

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{1 \text{ coulomb}}{1 \text{ volt}} = 1 \text{ farad (F)}, \text{ nome dado em homenagem a Michael Faraday.}$$

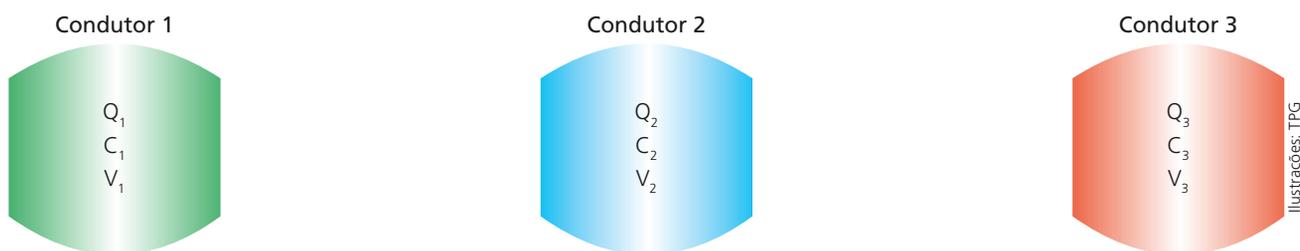
Um condutor que armazena carga de 1 coulomb quando sujeito a potencial de 1 volt tem capacidade de 1 farad.

## Equilíbrio elétrico entre condutores

Sabemos que uma condição para que ocorra um movimento espontâneo de cargas elétricas no interior de um condutor é a existência de uma diferença de potencial elétrico ( $ddp$ ) entre dois pontos quaisquer. Se não houver essa diferença de potencial, não haverá fluxo de cargas e, portanto, o condutor estará em equilíbrio.

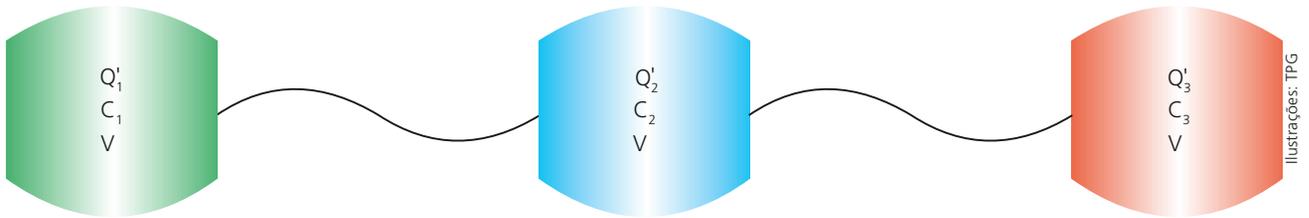
Mas se dois ou mais condutores eletrizados, sob potenciais elétricos diferentes, são conectados através de fios condutores (com capacidades elétricas desprezíveis) ou colocados reciprocamente em contato, ocorrerá um fluxo de cargas entre eles, cessando no instante em que todos ficam sob o mesmo potencial elétrico. Quando isso ocorrer, dizemos que houve um equilíbrio elétrico entre condutores.

Considere, inicialmente, três condutores 1, 2 e 3, devidamente isolados e afastados, respectivamente, com cargas  $Q_1$ ,  $Q_2$  e  $Q_3$ , sob potenciais  $V_1$ ,  $V_2$  e  $V_3$  e com capacidades elétricas  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$ .



Três condutores afastados e isolados.

No instante em que são conectados ou colocados em contato recíproco, ocorre um fluxo ordenado de cargas elétricas que passam de um condutor para outro, cessando no instante em que os três condutores atingem o potencial de equilíbrio. Como ocorre um fluxo de cargas entre os condutores, no final, as cargas de cada um deles mudam para  $Q'_1$ ,  $Q'_2$  e  $Q'_3$ , respectivamente, e o potencial de todos muda para  $V$ . Entretanto, as suas capacidades elétricas continuam as mesmas, pois independem da quantidade de carga e do potencial elétrico.



Conectando os condutores e aguardando o equilíbrio de cargas, os três adquirem o mesmo potencial.

Seendo  $C = \frac{Q}{V}$ , podemos escrever  $Q = C \cdot V$  para cada um dos condutores em duas situações distintas: antes e depois de atingir o equilíbrio elétrico. Assim:

$$\text{Antes: } Q_1 = C_1 \cdot V_1; Q_2 = C_2 \cdot V_2 \text{ e } Q_3 = C_3 \cdot V_3.$$

$$\text{Depois: } Q'_1 = C_1 \cdot V; Q'_2 = C_2 \cdot V \text{ e } Q'_3 = C_3 \cdot V.$$

Pelo Princípio da Conservação das Cargas Elétricas, temos:

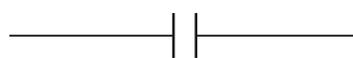
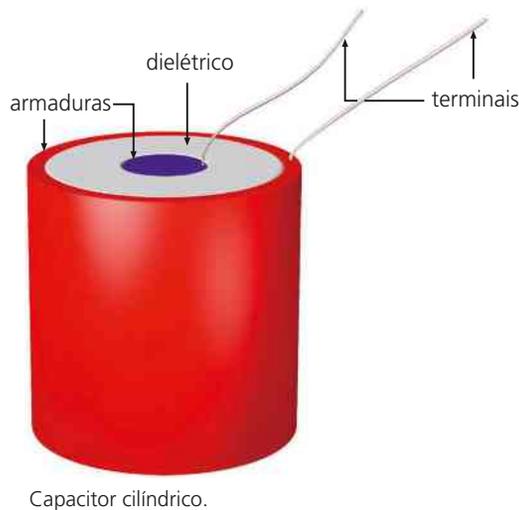
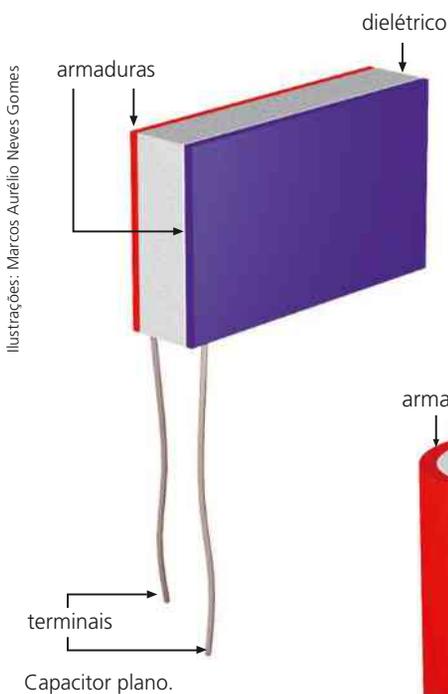
$$\Sigma Q_{\text{antes}} = \Sigma Q_{\text{depois}}$$

$$C_1 \cdot V_1 + C_2 \cdot V_2 + C_3 \cdot V_3 = C_1 \cdot V + C_2 \cdot V + C_3 \cdot V$$

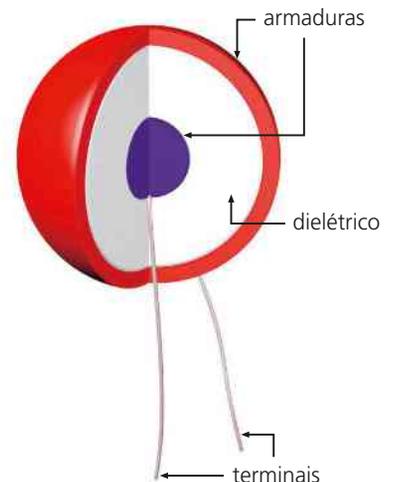
$$\text{Portanto, } V = \frac{C_1 \cdot V_1 + C_2 \cdot V_2 + C_3 \cdot V_3}{C_1 + C_2 + C_3}; \text{ então } V = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3}{C_1 + C_2 + C_3}$$

## Capacitor

**Capacitor** é um dispositivo que tem como função armazenar cargas elétricas. Ele é formado por dois condutores denominados armaduras, separados por um dielétrico (material isolante), que pode ser um tipo de plástico, mica, papel, óleo ou o próprio ar. Os capacitores podem assumir formas diferentes, dependendo da geometria dos condutores. Se os condutores forem duas placas paralelas e planas, teremos um capacitor plano.



Independentemente da forma do condutor, o capacitor é representado por dois pequenos traços iguais e paralelos.





## Algumas aplicações dos capacitores

Paul Silverman/  
Fundamental Photographs



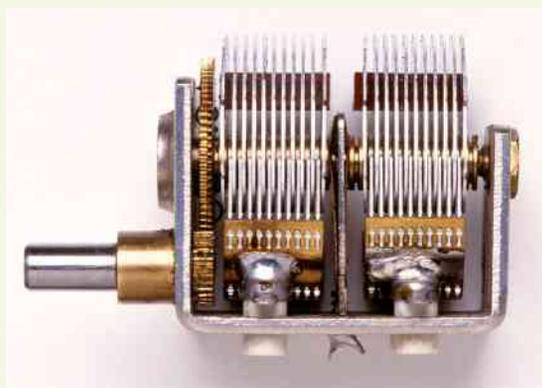
Há várias aplicações do capacitador como componente eletrônico e, por isso, os capacitadores assumem formas e tamanhos diferentes.

Se o capacitor for utilizado como um acumulador de cargas, em geral, são exploradas outras características como carregar e descarregar em frações de segundo. Por isso, é um componente utilizado nos desfibriladores e também nos *flashes* das câmeras fotográficas. O *flash* funciona da seguinte maneira: toda vez que é acionado, uma grande quantidade de carga elétrica é liberada para acender, em um curto intervalo de tempo, uma lâmpada com alto poder de iluminação. Como essa iluminação dura alguns milissegundos (o tempo de abertura do obturador da máquina), o capacitor pode descarregar por completo, mas deve se recarregar rapidamente para o próximo disparo de luz.

A capacidade de armazenamento do capacitor também é utilizada como um filtro. Durante o seu funcionamento, ele filtra os sinais elétricos, deixando passar os de alta frequência, mas se opõe à passagem de sinais de baixas frequências. Por isso, ele é utilizado, também, na instalação de som automotivo. Capacitores são instalados junto com os *tweeters* (alto-falantes específicos para sons agudos), barrando os sinais de baixa frequência (sons graves) e evitando que os *tweeters* se danifiquem.

Para que um rádio possa sintonizar diferentes frequências é necessário utilizar um capacitor variável. Esse capacitor permite que a sua capacitância varie dentro de determinada faixa de valores. Assim, ele é formado por um grupo de placas móveis condutoras articuladas em um parafuso. O parafuso possibilita que as placas condutoras girem entre um grupo de placas fixas isolantes, de forma que o movimento rotativo e o aperto do parafuso permitam variar a posição e a distância entre as placas móveis e fixas, respectivamente. Quando a distância entre as placas ou a área superposta das placas varia, variamos a capacitância.

Tim Ridley/Dorling Kindersley/Getty Images



Capacitor variável — possui armaduras fixas e móveis.



Sérgio Dotta Jr./The next

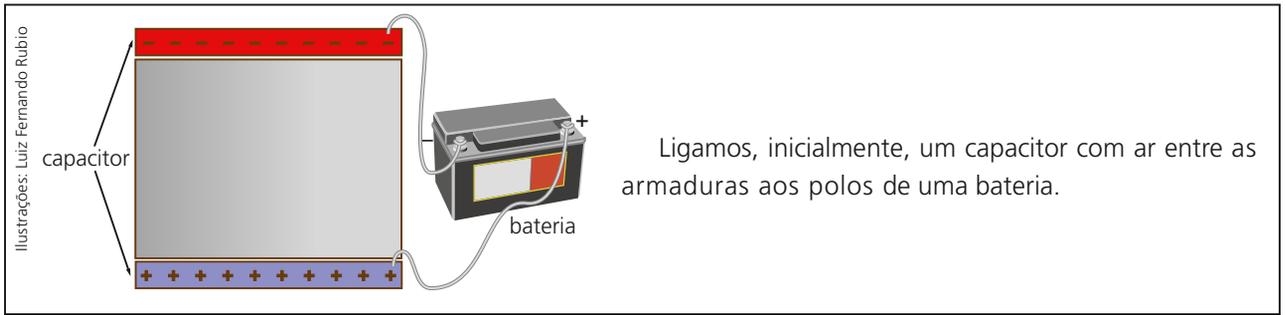
Associação entre um tweeter e um capacitor.

## Inserindo um dielétrico no capacitor

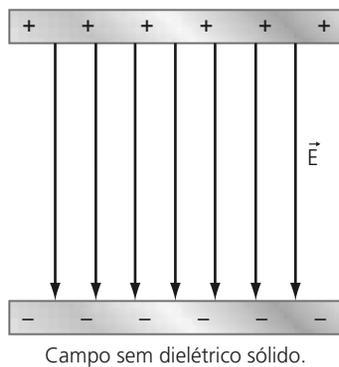
A maioria dos capacitores utiliza um dielétrico (material isolante) sólido entre os condutores. A utilização de um dielétrico sólido tem três funções, apresentadas a seguir:

- 1ª) o dielétrico consegue manter as duas armaduras a uma distância muito pequena sem ter nenhum contato;
- 2ª) como a constante dielétrica do material sólido é maior que a do ar, o capacitor consegue suportar uma maior diferença de potencial sem se danificar;

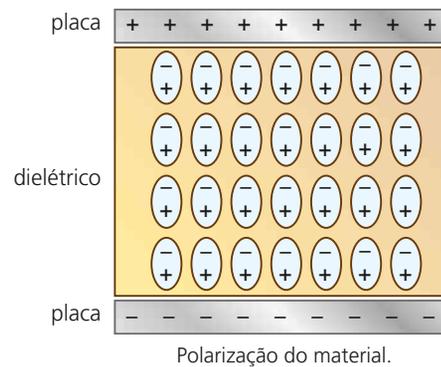
3ª) A capacitância de um capacitor com dielétrico sólido é muito maior em relação ao mesmo capacitor cujo dielétrico é o ar ou o vácuo (a constante dielétrica do vácuo e do ar são muito próximas. Veja, na sequência, como isso é possível.



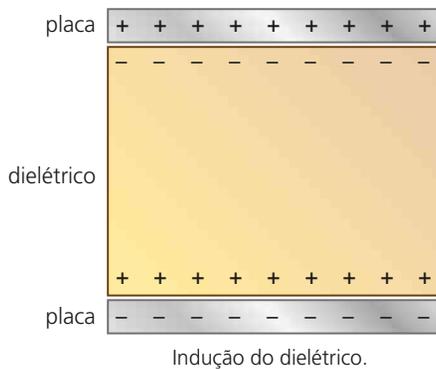
A polarização das armaduras do capacitor cria um campo elétrico  $\vec{E}$  entre elas.



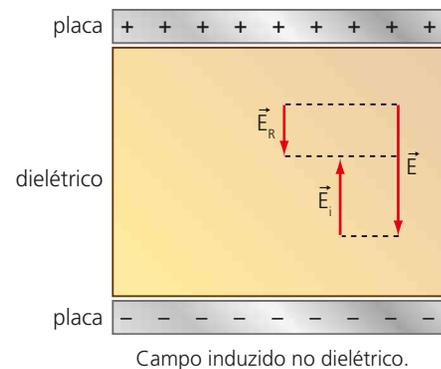
Inserindo entre as armaduras um material dielétrico, e, sob ação desse campo, o material do dielétrico se polariza.



Assim, a superfície adjacente à placa positiva adquire carga negativa induzida e a adjacente à placa negativa adquire carga induzida positiva de mesma intensidade.



Essa polarização do dielétrico cria um campo elétrico induzido  $\vec{E}_i$ , oposto ao campo elétrico  $\vec{E}$ .



Portanto, o campo elétrico resultante  $\vec{E}_R$  será a soma entre  $\vec{E}$  e  $\vec{E}_i$ .

$$E_R = E - E_i, \text{ logo } E_R < E.$$

Como a intensidade do campo ( $E$ ) e a diferença de potencial ( $U$ ) entre as armaduras, separadas da distância  $d$ , se relacionam através da expressão  $E \cdot d = U$ , verificamos que a diminuição da intensidade do campo com o dielétrico causa uma diminuição no valor do potencial das placas. Assim, como  $C = \frac{Q}{U}$  e não há alteração das cargas, uma diminuição no valor da diferença de potencial aumenta o valor da capacitância.

## Energia potencial elétrica de um capacitor

Considere um capacitor sendo carregado por um gerador — por exemplo, uma bateria ou um gerador de Van de Graaff. A carga  $Q$  armazenada em cada armadura é diretamente proporcional à diferença de potencial  $U$ , de forma que  $Q = C \cdot U$ . Se a capacitância ( $C$ ) é uma constante, podemos fazer uma analogia com a geometria analítica, de modo que a grandeza  $Q$  seja associada ao eixo das ordenadas ( $y$ ) e a grandeza  $U$  seja associada ao eixo das abscissas ( $x$ ).

$$Q = C \cdot U$$

$$\downarrow \quad \downarrow$$

$$y = C \cdot x$$

Portanto, a representação dessa relação é uma reta que passa pela origem do sistema cartesiano.

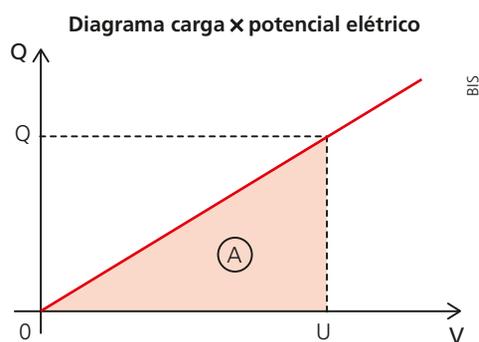
Da expressão  $Q = C \cdot U$ , se  $Q = 0$ , então  $U = 0$ . Se a sua carga for elevada de zero até  $Q$ , o seu potencial elétrico irá de zero até  $U$ . Isso significa dizer que o gráfico da relação entre carga e potencial elétrico corresponde a uma reta cujo coeficiente angular (inclinação da reta) é numericamente igual à capacidade elétrica do capacitor.

Lembre-se de que o potencial é a energia potencial armazenada por unidade de carga; desse modo, a área  $A$  (triângulo) da figura sob o gráfico é numericamente igual à energia potencial elétrica ( $E_{pe}$ ) fornecida pelo gerador ao capacitor com carga  $Q$ . Pelo diagrama ao lado, temos:

$$E_{pe} = \frac{Q \cdot U}{2}$$

Como  $Q = C \cdot U$  e  $U = \frac{Q}{C}$ , podemos ainda ter:

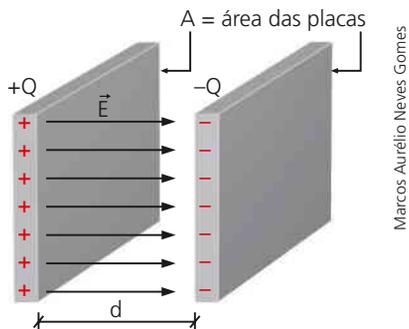
$$E_{pe} = \frac{C \cdot U^2}{2} \text{ e } E_{pe} = \frac{Q^2}{2C}$$



## Capacitor plano

As armaduras do capacitor plano são placas planas paralelas, de mesmas dimensões.

No capacitor plano da figura abaixo, cada uma das armaduras possui área  $A$  e estão separadas por uma distância  $d$ .



Representação de um capacitor plano.

Verificamos que, quanto maior a área ( $A$ ) das armaduras, maior a quantidade de carga acumulada e, quanto maior a distância entre as armaduras ( $d$ ), menor a quantidade de carga acumulada. Então, a capacidade elétrica  $C$  desse capacitor é

diretamente proporcional à área  $A$  e inversamente proporcional à distância  $d$ , ou seja:  $C \propto \frac{A}{d}$ . Mas sabemos que a facilidade do meio colocado entre as armaduras em se polarizar também influencia na capacidade elétrica: essa grandeza é chamada de **permissividade do meio ( $\epsilon$ )**. Quanto maior a permissividade, maior a carga acumulada.

Demonstra-se que a capacidade elétrica do capacitor pode ser determinada pela seguinte expressão:

$$C = \epsilon \cdot \frac{A}{d}$$

em que

- $A$  é a área das placas;
- $d$  é a distância entre as placas;
- $\epsilon$  é a permissividade do meio.

Caso o meio seja o vácuo, a sua permissividade será representada por  $\epsilon_0$ , que no Sistema Internacional vale:  $\epsilon_0 = 8,8 \cdot 10^{-12}$  F/m. A permissividade do vácuo é menor entre todos os materiais; assim, para qualquer outro material dielétrico, o seu valor é dado em relação ao do vácuo. Exemplos:

- $\epsilon_{\text{ar}} = 1,0006 \cdot \epsilon_0$
- $\epsilon_{\text{papel}} = 3,5 \cdot \epsilon_0$
- $\epsilon_{\text{quartzo}} = 4,3 \cdot \epsilon_0$
- $\epsilon_{\text{mica}} = 7 \cdot \epsilon_0$

Por isso, utilizamos a razão entre o valor da permissividade do meio e o valor da permissividade no vácuo, chamada de constante dielétrica ( $K$ ). Assim:

$$K = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$$

Veja, na tabela ao lado, valores da constante dielétrica de alguns materiais.

## Associação de capacitores

Dois ou mais capacitores conectados constituem uma **associação de capacitores**, visando o maior aproveitamento de uma ou mais de suas características elétricas. Por exemplo, eles podem ser associados de maneira que não se danifiquem sob uma diferença de potencial elevada ou de forma que aumentem a quantidade de cargas armazenadas.

Qualquer que seja o modo em que a associação é feita, podemos representar esse conjunto de capacitores por um único, chamado de capacitor equivalente. Essa representação simplifica e facilita o dimensionamento dos circuitos, pois todas as características elétricas do capacitor equivalente são as mesmas do conjunto.

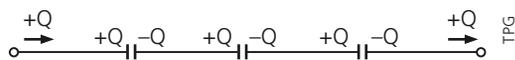
A seguir, veremos em quais formas os capacitores podem ser arranjados e as vantagens elétricas de cada tipo de associação.

Valores da constante dielétrica relativa	
Material	K
vácuo	1
ar	1,0006
alumínio	8,1-9,5
esteatita (MgO-SiO <sub>2</sub> )	5,5-7,2
mica	5,4-8,7
óleo	4,6
papel	4-6
papel parafinado	2,5
plástico	3
poliestireno	2,5-2,6
porcelana	6,0
pirex	5,1
sílica fundida	3,8
titanatos	50-10 000
vidro de cal de soda	6,9

Fonte: LIDE, David R. (editor-chefe). *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. 90. ed. Flórida: CRC Press LLC, 2009.

## Associação em série

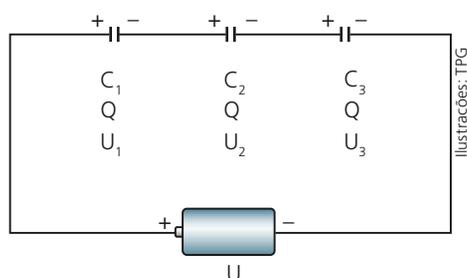
Capacitores, iguais ou não, são associados em série quando são ligados em sequência, de forma que a armadura negativa de um é ligada à armadura positiva do outro.



Associação de capacitores em série.

Se uma carga  $+Q$  é transferida à associação, ela será recebida pela armadura positiva do primeiro capacitor, que induzirá uma carga  $-Q$  na armadura negativa do primeiro capacitor. Uma carga  $+Q$  induzida escoará para a armadura positiva do segundo capacitor, que induzirá uma carga  $-Q$  para a armadura negativa do segundo capacitor, e assim sucessivamente.

Dessa forma, todos os capacitores ficam com uma mesma carga  $Q$ . Abaixo, temos uma associação em série carregada por uma pilha.

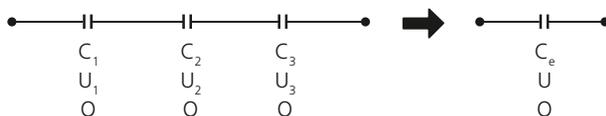


Associação de capacitores em série.

A diferença de potencial (ddp) total  $U$  entre os polos da pilha é a soma das diferenças de potencial entre as armaduras de cada capacitor  $U_1$ ,  $U_2$  e  $U_3$ . Assim,

$$U = U_1 + U_2 + U_3$$

O capacitor equivalente à associação deverá ter a mesma quantidade de carga  $Q$ , sob ddp total  $U$ , com uma capacidade equivalente  $C_e$ .



Capacitor equivalente de uma associação em série.

Sabemos que:  $U_1 = \frac{Q}{C_1}$ ;  $U_2 = \frac{Q}{C_2}$ ;  $U_3 = \frac{Q}{C_3}$ . No capacitor equivalente, teremos  $U = \frac{Q}{C_e}$ . Assim:  $U = U_1 + U_2 + U_3 \Rightarrow \frac{Q}{C_e} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \frac{Q}{C_3} \Rightarrow \frac{1}{C_e} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$

Em uma situação com  $n$  capacitores iguais associados em série, a capacitância equivalente será:

$$\frac{1}{C_e} = \frac{1}{C} + \frac{1}{C} + \frac{1}{C} + \dots + \frac{1}{C} = \frac{1 + 1 + 1 + \dots + 1}{C} \Rightarrow \frac{1}{C_e} = \frac{n}{C} \Rightarrow C_e = \frac{C}{n}$$

Para um caso particular em que dois capacitores diferentes são ligados em série, a capacitância equivalente será calculada pela expressão:

$$\frac{1}{C_e} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \Rightarrow \frac{1}{C_e} = \frac{C_1 + C_2}{C_1 \cdot C_2} \Rightarrow C_e = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$$

## Associação em paralelo

Quando  $n$  capacitores estão ligados de forma que todas as armaduras positivas estão de um lado e as negativas do outro, temos uma associação de capacitores em paralelo. Nessa configuração, todos os capacitores estão sob uma mesma diferença de potencial  $U$ .

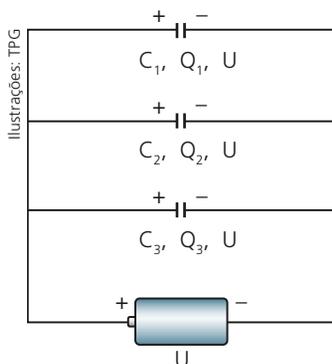
Se uma carga  $+Q$  é transferida à associação, parte dessa carga será recebida pelo primeiro capacitor ( $Q_1$ ), outra parte será recebida pelo segundo capacitor ( $Q_2$ ) e o restante da carga será recebida pelo terceiro capacitor ( $Q_3$ ).

A figura ao lado representa um esquema com três capacitores associados em paralelo, carregados por uma pilha.

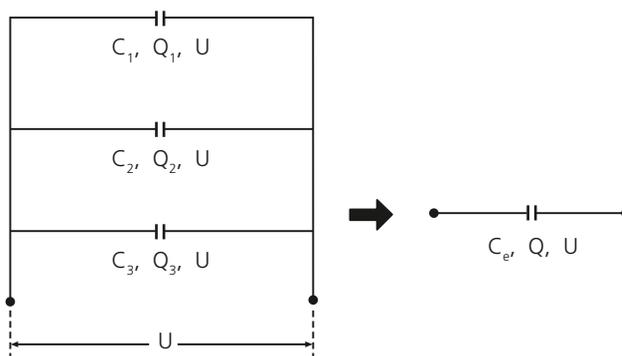
Portanto, a quantidade de carga total  $Q$  da associação será a soma das cargas  $Q_1$ ,  $Q_2$  e  $Q_3$ . Assim:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

O capacitor equivalente à associação deverá estar sob a mesma diferença de potencial  $U$ , com uma capacidade equivalente  $C_e$ .



Associação de capacitores em paralelo.



Capacitor equivalente de uma associação em paralelo.

Sendo  $Q_1 = C_1 \cdot U$ ;  $Q_2 = C_2 \cdot U$  e  $Q_3 = C_3 \cdot U$  e no capacitor equivalente  $Q_e = C_e \cdot U$ , temos:

$$\begin{aligned} Q &= Q_1 + Q_2 + Q_3 \\ C_e \cdot U &= C_1 \cdot U + C_2 \cdot U + C_3 \cdot U \\ C_e &= C_1 + C_2 + C_3 \end{aligned}$$

Então, se  $n$  capacitores iguais forem associados em paralelo, a capacitância equivalente será:

$$\begin{aligned} C_e &= \overbrace{C + C + \dots + C}^{n \text{ vezes}} \\ C_e &= n \cdot C \end{aligned}$$

Portanto, podemos verificar que, quando os capacitores são associados em paralelo, a quantidade de cargas armazenadas é maior em relação às capacidades individuais, pois a capacitância equivalente também será maior.

### PARA SABER MAIS

#### Site Simulações

Disponível em: <[http://phet.colorado.edu/pt\\_BR/simulation/capacitor-lab](http://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/capacitor-lab)>. Acesso em: 21 jan. 2016.

Neste simulador, é possível criar diversos tipos de circuito com um ou mais capacitores (em série e em paralelo), que podem ser modificados, e analisar diversas características do circuito, como a carga acumulada e a tensão.

## Exercícios resolvidos

**ER1.** Certo condutor está isolado, no vácuo e em equilíbrio eletrostático. Ele está eletrizado com carga  $Q = 6 \mu\text{C}$  sob potencial elétrico  $V = 2 \cdot 10^4 \text{ V}$ . Sendo  $k_0 = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$ , determine:

- a sua capacidade elétrica;
- o valor do raio, considerando o condutor esférico.

### Resolução:

São dados:

$$Q = 6 \mu\text{C} = 6 \cdot 10^{-6} \text{ C}; V = 2 \cdot 10^4 \text{ V e}$$

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

- A capacidade elétrica ou capacitância desse condutor vale:

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{6 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 10^4} \Rightarrow C = 3 \cdot 10^{-10} \text{ F}$$

- Para condutores esféricos, vale a relação:

$$C = \frac{R}{K_0} \Rightarrow R = C \cdot K_0 = 3 \cdot 10^{-10} \cdot 9 \cdot 10^9 \Rightarrow R = 27 \cdot 10^{-1} \text{ m}$$

**ER2.** Um determinado condutor encontra-se em equilíbrio eletrostático sob potencial elétrico de  $4 \cdot 10^3 \text{ V}$ . Qual seria o seu novo potencial, caso sua carga fosse aumentada em 50%?

### Resolução:

Sob potencial  $V = 4 \cdot 10^3 \text{ V}$  o condutor possui carga  $Q$ . Caso a quantidade de carga fosse aumentada em 50%, a sua nova carga seria  $Q' = Q + 0,5Q = 1,5Q$ .

Como para um condutor a capacidade elétrica é constante, temos:

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{Q'}{V'} \Rightarrow \frac{Q}{4 \cdot 10^3} = \frac{1,5Q}{V'} \Rightarrow V' = 6 \cdot 10^3 \text{ V}$$

**ER3.** Três esferas condutoras, de raios  $R_1 = 27 \text{ cm}$ ,  $R_2 = 9 \text{ cm}$  e  $R_3 = 54 \text{ cm}$ , estão inicialmente eletrizadas, respectivamente, com cargas  $Q_1 = 6 \text{ nC}$ ,  $Q_2 = 4 \text{ nC}$  e  $Q_3 = 5 \text{ nC}$ , no vácuo. A seguir, as esferas são colocadas em contato recíproco e depois afastadas umas das outras. Sendo  $k_0 = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$ , determine:

- as capacitâncias de cada condutor;
- o potencial de equilíbrio;
- a distribuição de cargas de cada esfera, após o contato.

### Resolução:

Dados das esferas:

$$\begin{cases} R_1 = 27 \text{ cm} = 27 \cdot 10^{-2} \text{ m} \\ Q_1 = 6 \text{ nC} = 6 \cdot 10^{-9} \text{ C} \end{cases}$$

$$\begin{cases} R_2 = 9 \text{ cm} = 9 \cdot 10^{-2} \text{ m} \\ Q_2 = 4 \text{ nC} = 4 \cdot 10^{-9} \text{ C} \end{cases}$$

$$\begin{cases} R_3 = 54 \text{ cm} = 54 \cdot 10^{-2} \text{ m} \\ Q_3 = 5 \text{ nC} = 5 \cdot 10^{-9} \text{ C} \end{cases}$$

- A capacitância do condutor esférico é calculada por:  $C = \frac{R}{K_0}$

Portanto:

$$C_1 = \frac{R_1}{K_0} = \frac{27 \cdot 10^{-2}}{9 \cdot 10^9} \Rightarrow C_1 = 3 \cdot 10^{-11} \text{ F}$$

$$C_2 = \frac{R_2}{K_0} = \frac{9 \cdot 10^{-2}}{9 \cdot 10^9} \Rightarrow C_2 = 1 \cdot 10^{-11} \text{ F}$$

$$C_3 = \frac{R_3}{K_0} = \frac{54 \cdot 10^{-2}}{9 \cdot 10^9} \Rightarrow C_3 = 6 \cdot 10^{-11} \text{ F}$$

- O potencial de equilíbrio ocorre após o contato, cuja expressão é:

$$\begin{aligned} V &= \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3}{C_1 + C_2 + C_3} = \\ &= \frac{6 \cdot 10^{-9} + 4 \cdot 10^{-9} + 5 \cdot 10^{-9}}{3 \cdot 10^{-11} + 1 \cdot 10^{-11} + 6 \cdot 10^{-11}} = \\ &= \frac{15 \cdot 10^{-9}}{10 \cdot 10^{-11}} \Rightarrow V = 1,5 \cdot 10^2 \text{ V} \end{aligned}$$

- A distribuição de cargas após o contato mútuo é calculada por:  $Q' = C \cdot V$

Portanto:

$$Q'_1 = C_1 \cdot V = 3 \cdot 10^{-11} \cdot 1,5 \cdot 10^2 \Rightarrow Q'_1 = 4,5 \cdot 10^{-9} \text{ C}$$

$$Q'_2 = C_2 \cdot V = 1 \cdot 10^{-11} \cdot 1,5 \cdot 10^2 \Rightarrow Q'_2 = 1,5 \cdot 10^{-9} \text{ C}$$

$$Q'_3 = C_3 \cdot V = 6 \cdot 10^{-11} \cdot 1,5 \cdot 10^2 \Rightarrow Q'_3 = 9,0 \cdot 10^{-9} \text{ C}$$

**ER4.** Um capacitor carregado com  $18 \mu\text{C}$  está sob diferença de potencial de  $9 \text{ V}$ , fornecida por um gerador.

- Qual é a capacidade elétrica do capacitor?
- Qual é a energia potencial elétrica armazenada nesse capacitor?

### Resolução:

São dados:

$$Q = 18 \mu\text{C} = 18 \cdot 10^{-6} \text{ C e } U = 9 \text{ V}.$$

- A capacidade elétrica é calculada através de:

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{18 \cdot 10^{-6}}{9} \Rightarrow C = 2 \cdot 10^{-6} \text{ F}$$

- Pela expressão da energia potencial, temos:

$$\begin{aligned} E_{pe} &= \frac{Q \cdot U}{2} = \frac{18 \cdot 10^{-6} \cdot 9}{2} \Rightarrow \\ &\Rightarrow E_{pe} = 8,1 \cdot 10^{-5} \text{ J} \end{aligned}$$

**ER5.** A diferença de potencial elétrico entre as placas de um capacitor plano, carregado a vácuo, é de  $200 \text{ V}$ . Sabe-se que cada placa possui área de  $9 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$  e a distância que as separa é de  $22 \text{ mm}$ . Sendo de  $\epsilon_0 = 8,8 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$  a permissividade do vácuo, determine:

- a capacidade elétrica do capacitor;
- a carga do capacitor;

- c) a densidade superficial de cargas;  
 d) a intensidade do campo elétrico entre as placas.

### Resolução:

São dados:

$$U = 200 \text{ V} = 2 \cdot 10^2 \text{ V}; A = 9 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2; d = 22 \text{ mm} = 2,2 \cdot 10^{-2} \text{ m}; \epsilon_0 = 8,8 \cdot 10^{-12} \text{ F/m.}$$

a) A capacidade elétrica do capacitor plano é dada por:

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d} = 8,8 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{9 \cdot 10^{-2}}{2,2 \cdot 10^{-2}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow C = 36 \cdot 10^{-12} \text{ F} = 36 \text{ pF}$$

b) Pela expressão  $Q = C \cdot U$ , obtemos:

$$Q = 36 \cdot 10^{-12} \cdot 2 \cdot 10^2 = 7,2 \cdot 10^{-9} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow Q = 7,2 \text{ nC}$$

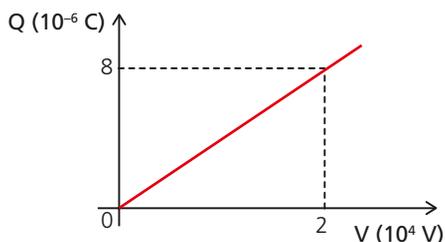
c) A densidade superficial de cargas (em cada placa) é expressa por:  $\sigma = \frac{Q}{A}$ . Portanto,

$$\sigma = \frac{7,2 \cdot 10^{-9}}{9 \cdot 10^{-2}} \Rightarrow \sigma = 8 \cdot 10^{-8} \text{ C/m}^2$$

d) A intensidade do campo elétrico constante, entre as placas, é:

$$E = \frac{U}{d} = \frac{2 \cdot 10^2}{2,2 \cdot 10^{-2}} \Rightarrow E \cong 9,1 \cdot 10^3 \text{ V/m}$$

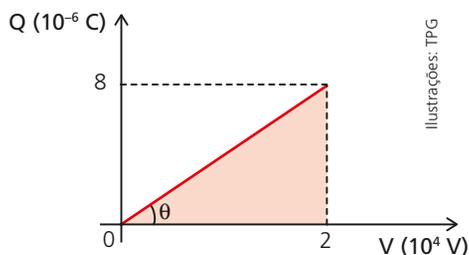
**ER6.** O diagrama seguinte mostra a quantidade de carga  $Q$  de um capacitor, em função do potencial elétrico  $V$ , fornecida por um gerador.



- a) Qual é sua capacidade elétrica?  
 b) Qual é a energia potencial fornecida pelo gerador ao variar o potencial elétrico de 0 até  $2 \cdot 10^4 \text{ V}$ ?

### Resolução:

Do diagrama, para uma diferença de potencial de  $U = 2 \cdot 10^4 \text{ V}$ , a quantidade de carga adquirida pelo capacitor é  $Q = 8 \cdot 10^{-6} \text{ C}$ .



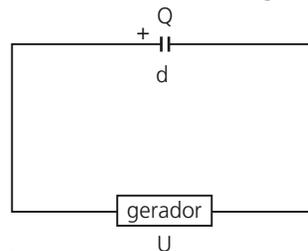
a) A capacidade elétrica do capacitor é numericamente igual ao coeficiente angular da reta, ou seja,

$$C = \text{tg } \theta = \frac{8 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 10^4} \Rightarrow C = 4 \cdot 10^{-10} \text{ F}$$

b) A área do triângulo retângulo marcado é numericamente igual à energia potencial pedida. Então,

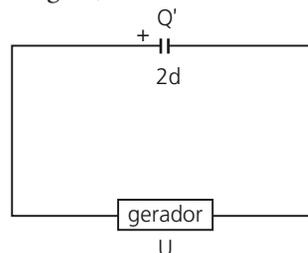
$$A = E_{pe} = \frac{2 \cdot 10^4 \cdot 8 \cdot 10^{-6}}{2} \Rightarrow E_{pe} = 8 \cdot 10^{-2} \text{ J}$$

**ER7.** A figura mostra um capacitor plano ligado aos terminais de um gerador que fornece uma ddp  $U$ , adquirindo uma carga elétrica  $Q$ . A seguir, mantendo-se o capacitor ligado ao gerador, as placas são afastadas uma da outra, de tal maneira que a distância entre elas seja o dobro da inicial. Qual será a nova carga do capacitor?



### Resolução:

Refazendo a figura, temos:



Inicialmente a capacitância vale  $C = \epsilon_0 \frac{A}{d}$ , considerando o meio vácuo. Após o afastamento, sua capacitância muda para  $C' = \epsilon_0 \frac{A}{2d}$  ou  $C' = \frac{C}{2}$ .

Como no processo a ddp é mantida constante,  $U_{\text{antes}} = U_{\text{depois}}$ , sendo

$$U_{\text{antes}} = \frac{Q}{C} \text{ e } U_{\text{depois}} = \frac{Q'}{C'}. \text{ Portanto: } \frac{Q}{C} = \frac{Q'}{C'} \Rightarrow \frac{Q}{C} = \frac{Q'}{\frac{C}{2}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow Q' = \frac{Q}{2}. \text{ A nova carga se reduz à metade.}$$

**ER8.** Considere um capacitor plano, preenchido por um dielétrico de permissividade  $1,1 \cdot 10^{-11} \text{ F/m}$ , cujas placas estão separadas por uma distância de  $4,4 \text{ mm}$ . Nessas condições, sua capacitância vale  $2,0 \text{ pF}$  e a diferença de potencial entre suas armaduras é de  $11 \text{ V}$ .

- a) Qual é a área de cada placa?  
 b) Qual é a carga do capacitor?  
 c) Qual é a energia potencial elétrica armazenada pelo capacitor?

### Resolução:

São dados:

$$\epsilon = 1,1 \cdot 10^{-11} \text{ F/m}; d = 4,4 \text{ mm} = 4,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}; C = 2,0 \text{ pF} = 2,0 \cdot 10^{-12} \text{ F} \text{ e } U = 11 \text{ V.}$$

a) Sabemos que a expressão para se calcular a capacitância de um capacitor plano, no vácuo, é

$C = \epsilon_0 \frac{A}{d}$ . Portanto, para outro dielétrico, a expressão fica  $C = \epsilon \frac{A}{d}$ . Assim,

$$A = \frac{C \cdot d}{\epsilon} = \frac{2 \cdot 10^{-12} \cdot 4,4 \cdot 10^{-2}}{1,1 \cdot 10^{-11}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow A = 80 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 = 80 \text{ cm}^2$$

b) A carga do capacitor é:

$$Q = C \cdot U = 2,0 \cdot 10^{-12} \cdot 11 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow Q = 22 \cdot 10^{-12} \Rightarrow Q = 22 \text{ pC}$$

c) A energia potencial elétrica armazenada pode ser calculada através da expressão:

$$E_{pe} = \frac{C \cdot U^2}{2} = \frac{2 \cdot 10^{-12} \cdot (11)^2}{2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow E_{pe} = 121 \cdot 10^{-12} \Rightarrow E_{pe} = 121 \text{ pJ}$$

**ER9.** Considere dois capacitores de capacidades, respectivamente, iguais a  $C_1$  e  $C_2$ , associados em série. Sabendo-se que cada um deles está eletrizado igualmente com carga  $Q$ , deduza uma fórmula que forneça diretamente a capacidade do capacitor equivalente.

### Resolução:

Temos:



Para a associação em série de dois capacitores:

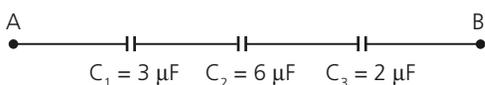
$$\frac{1}{C_e} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

entre  $C_1$  e  $C_2$  do segundo membro da igualdade:

$$\frac{1}{C_e} = \frac{C_1 + C_2}{C_1 \cdot C_2}$$

$C_e = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$ . A capacitância equivalente de dois capacitores associados em série é igual ao quociente entre o produto e a soma das capacidades dos componentes. Essa fórmula serve apenas para simplificar os cálculos.

**ER10.** A figura mostra uma associação de três capacitores com as suas respectivas capacitâncias. Sabe-se que a diferença de potencial entre os pontos  $A$  e  $B$  é de 12 V.

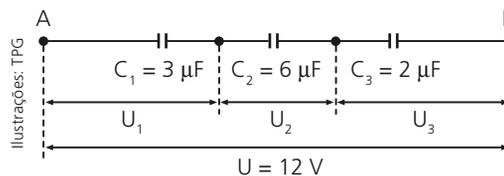


Determine:

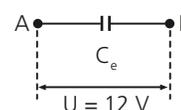
- a capacitância do capacitor equivalente;
- a carga e a ddp entre as armaduras de cada capacitor;
- a energia potencial elétrica da associação.

### Resolução:

É uma associação em série de três capacitores. A ddp total entre os pontos  $A$  e  $B$  vale:  $U = 12 \text{ V}$ . Assim, temos:



capacitor equivalente



a) A capacitância equivalente é, em  $\mu\text{F}$ :

$$\frac{1}{C_e} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \Rightarrow \frac{1}{C_e} = \frac{1}{3} + \frac{1}{6} + \frac{1}{2} = \frac{2+1+3}{6} = 1 \Rightarrow C_e = 10^{-6} \text{ F} \Rightarrow C_e = 1 \mu\text{F}$$

b) Em uma associação em série, todos os capacitores possuem a mesma carga  $Q$ . Portanto,

$$Q = C_e \cdot U = 10^{-6} \cdot 12 \Rightarrow Q = 12 \cdot 10^{-6} \Rightarrow Q = 12 \mu\text{C}$$

c) E a ddp de cada capacitor será tal que:

$$U_1 + U_2 + U_3 = U = 12 \text{ V}$$

$$U_1 = \frac{Q}{C_1} = \frac{12 \mu\text{C}}{3 \mu\text{F}} \Rightarrow U_1 = 4 \text{ V}$$

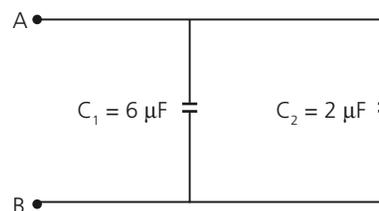
$$U_2 = \frac{Q}{C_2} = \frac{12 \mu\text{C}}{6 \mu\text{F}} \Rightarrow U_2 = 2 \text{ V}$$

$$U_3 = \frac{Q}{C_3} = \frac{12 \mu\text{C}}{2 \mu\text{F}} \Rightarrow U_3 = 6 \text{ V}$$

A energia potencial elétrica da associação corresponde à energia do capacitor equivalente. Assim:

$$E_{pe} = \frac{Q \cdot U}{2} = \frac{12 \cdot 10^{-6} \cdot 12}{2} \Rightarrow E_{pe} = 7,2 \cdot 10^{-5} \text{ J}$$

**ER11.** Dada a associação da figura, sabe-se que a ddp entre os pontos  $A$  e  $B$  vale 40 V.

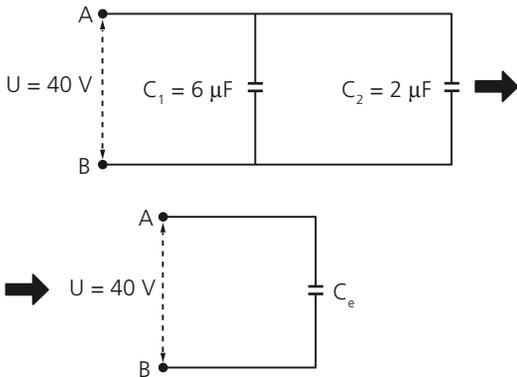


Calcule:

- a capacidade da associação equivalente;
- a ddp e a carga de cada capacitor;
- a carga total da associação;
- a energia potencial elétrica armazenada na associação.

### Resolução:

Trata-se de uma associação de dois capacitores em paralelo. Portanto, os capacitores estão sob a mesma ddp  $U = 40 \text{ V}$ .



- Numa associação em paralelo, a capacidade elétrica equivalente é a soma das capacidades dos capacitores componentes.

$$C_e = C_1 + C_2 = 6\mu + 2\mu \Rightarrow C_e = 8 \mu\text{F} = 8 \cdot 10^{-6} \text{ F}$$

- Numa associação em paralelo, a ddp é a mesma para todos os capacitores, portanto:  $U = 40 \text{ V}$   
As cargas dos capacitores são:

$$Q_1 = C_1 \cdot U = 6 \mu\text{F} \cdot 40 \text{ V} \Rightarrow Q_1 = 240 \mu\text{C} \quad \text{ou} \\ Q_1 = 2,4 \cdot 10^{-4} \text{ C}$$

$$Q_2 = C_2 \cdot U = 2 \mu\text{F} \cdot 40 \text{ V} \Rightarrow Q_2 = 80 \mu\text{C} \quad \text{ou} \\ Q_2 = 8 \cdot 10^{-5} \text{ C}$$

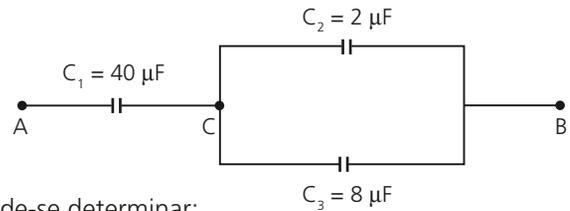
- A carga total desse tipo de associação é a soma das cargas dos capacitores componentes, ou seja:

$$Q = Q_1 + Q_2 = 240 \mu + 80 \mu \Rightarrow Q = 320 \mu\text{C} \quad \text{ou} \\ Q = 3,2 \cdot 10^{-4} \text{ C}$$

- A energia potencial elétrica armazenada na associação vale:

$$E_{pe} = \frac{Q \cdot U}{2} = \frac{3,2 \cdot 10^{-4} \cdot 40}{2} \Rightarrow E_{pe} = 6,4 \cdot 10^{-3} \text{ J}$$

**ER12.** A figura mostra uma associação mista de capacitores. A diferença de potencial entre os pontos A e B vale 40 V.



Pede-se determinar:

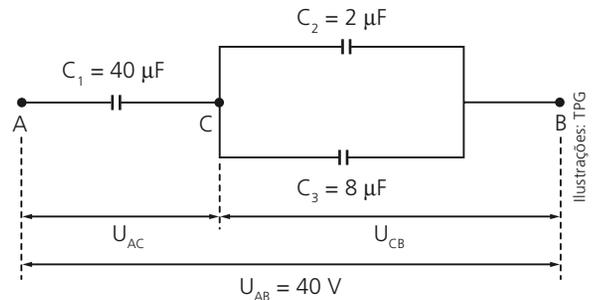
- a capacitância equivalente da associação;
- a quantidade de carga da associação;
- a ddp entre os pontos A e C e entre os pontos C e B;
- a quantidade de carga em cada um dos capacitores.

### Resolução:

- Capacitâncias dadas:

$$C_1 = 40 \mu\text{F} = 40 \cdot 10^{-6} \text{ F}; \quad C_2 = 2 \mu\text{F} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ F}; \\ C_3 = 8 \mu\text{F} = 8 \cdot 10^{-6} \text{ F}.$$

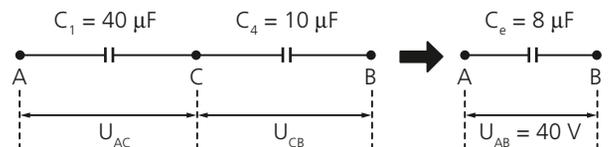
Em uma associação mista (mistura de associações em série e em paralelo), devemos resolver, em sequência, as associações mais simples até chegar ao capacitor equivalente. Assim, colocando os dados do exercício, obtemos a seguinte figura:



Primeiro, vamos determinar o capacitor equivalente entre os pontos C e B, que é uma simples associação em paralelo. Chamemos de  $C_4$  a capacidade equivalente.

$$C_4 = C_2 + C_3 = 2 + 8 \Rightarrow C_4 = 10 \mu\text{F}$$

Refazendo a figura, resulta, entre os pontos A e B, uma **associação em série** de dois capacitores  $C_1$  e  $C_4$ .



Resolvendo a associação em série, resulta o capacitor equivalente da associação dada, cuja capacidade é:  $C_e = \frac{C_1 \cdot C_4}{C_1 + C_4} = \frac{40 \cdot 10}{40 + 10} = \frac{400}{50}$ . Portanto,

$$C_e = 8 \mu\text{F} = 8 \cdot 10^{-6} \text{ F}.$$

b) A quantidade de carga  $Q$  da associação é determinada pelo capacitor equivalente, através da expressão:

$$Q = C_e \cdot U_{AB} = 8 \cdot 10^{-6} \cdot 40 = 320 \cdot 10^{-6} \Rightarrow Q = 3,2 \cdot 10^{-4} \text{ C}$$

c) A ddp entre os pontos  $A$  e  $C$  é:

$$U_{AC} = \frac{Q}{C_1} = \frac{320 \cdot 10^{-6}}{40 \cdot 10^{-6}} \Rightarrow U_{AC} = 8 \text{ V}$$

E a ddp entre os pontos  $C$  e  $B$  é:

$$U_{CB} = \frac{Q}{C_4} = \frac{320 \cdot 10^{-6}}{10 \cdot 10^{-6}} \Rightarrow U_{CB} = 32 \text{ V}$$

d) A carga de cada um dos capacitores é calculada aplicando-se:  $Q = C \cdot U$ , onde a ddp é a do capacitor considerado. Assim,

$$Q_1 = C_1 \cdot U_{AC} = 40 \mu\text{F} \cdot 8 \text{ V} = 320 \mu\text{C} = 320 \cdot 10^{-6} \text{ C} \Rightarrow Q_1 = 3,2 \cdot 10^{-4} \text{ C}$$

$$Q_2 = C_2 \cdot U_{BC} = 2 \mu\text{F} \cdot 32 \text{ V} = 64 \mu\text{C} = 64 \cdot 10^{-6} \text{ C} \Rightarrow Q_2 = 6,4 \cdot 10^{-5} \text{ C}$$

$$Q_3 = C_3 \cdot U_{CB} = 8 \mu\text{F} \cdot 32 \text{ V} = 256 \mu\text{C} = 256 \cdot 10^{-6} \text{ C} \Rightarrow Q_3 = 2,56 \cdot 10^{-4} \text{ C}$$

## Exercícios propostos

FAÇA NO  
CADERNO

NÃO ESCREVA  
NO LIVRO

**EP1.** Sabe-se que um condutor esférico de raio 36 cm está em equilíbrio eletrostático, no vácuo, eletrizado sob potencial elétrico de 2000 V. Considerando  $k_0 = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$ , calcule:

- a) a sua capacitância;  $C = 4 \cdot 10^{-11} \text{ F}$   
b) a sua quantidade de carga.  $Q = 8 \cdot 10^{-8} \text{ C}$

**EP2.** O planeta Terra pode ser considerado um grande condutor esférico. Determine a sua capacitância, supondo-a imersa no vácuo. Dados: raio da Terra igual a 6378 km e constante eletrostática no vácuo igual a  $9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$ .  $C_{\text{Terra}} \cong 7,1 \cdot 10^{-4} \text{ F}$

**EP3.** São dados dois condutores,  $A$  e  $B$ , isolados e em equilíbrio eletrostático, com cargas  $Q_A = 3 \mu\text{C}$  e  $Q_B = 5 \mu\text{C}$ , sob potenciais  $V_A = 2 \text{ kV}$  e  $V_B = 5 \text{ kV}$ , respectivamente. Os condutores são ligados por meio de fios metálicos de capacitâncias desprezíveis, até atingir o equilíbrio elétrico entre eles. Nessas condições, calcule:

- a) a capacidade elétrica de cada condutor;  
b) o potencial elétrico de equilíbrio;  
c) a nova distribuição de cargas dos condutores.

Respostas nas Orientações Didáticas.

**EP4.** Um condutor esférico 1, de raio  $R_1 = 20 \text{ cm}$ , encontra-se no vácuo, eletrizado com carga  $Q_1 = 6 \text{ nC}$ . A seguir, este condutor é colocado em contato com um condutor 2, também esférico, de raio  $R_2 = 30 \text{ cm}$ , inicialmente neutro. Atingido o equilíbrio elétrico, eles são separados. Sendo de  $9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$  a constante eletrostática no vácuo, determine:

- a) o potencial elétrico do condutor 1, antes e depois do contato com o condutor 2;  
b) o potencial elétrico do condutor 2, antes e depois do contato com o condutor 1;  
c) as novas cargas dos dois condutores.

Respostas nas Orientações Didáticas.

**EP5.** Um condensador (capacitor) de capacidade elétrica 6 nF está carregado com carga elétrica de 18  $\mu\text{C}$ . Determine a energia potencial elétrica armazenada no capacitor.  $E_{pe} = 2,7 \cdot 10^{-2} \text{ J}$

**EP6.** A energia potencial elétrica armazenada em um capacitor é de  $2 \cdot 10^{-7} \text{ J}$ . Sendo de  $4 \cdot 10^{-11} \text{ F}$  a sua capacitância, determine a quantidade de carga na armadura positiva desse capacitor e a diferença de potencial elétrica existente entre suas armaduras.  $Q = 4 \cdot 10^{-9} \text{ C}$  e  $U = 100 \text{ V}$

**EP7.** Um capacitor plano possui duas placas idênticas de superfície  $1,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$  cada, separadas por uma distância de 4 mm uma da outra. Entre elas, existe ar e uma diferença de potencial de 12 V. Considere a permissividade do ar igual à do vácuo:  $\epsilon_0 = 8,8 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$ .

- a) Qual é a intensidade do campo elétrico no interior das placas?  $E = 3 \cdot 10^3 \text{ V/m}$   
b) Qual é a capacidade elétrica desse capacitor?  
c) Qual seria a nova capacidade elétrica do capacitor se colocássemos entre as placas um material isolante com o triplo da permissividade do ar?  
b)  $C = 3,3 \cdot 10^{-12} \text{ F} = 3,3 \text{ pF}$ ; c)  $C' = 9,9 \cdot 10^{-12} \text{ F} = 9,9 \text{ pF}$

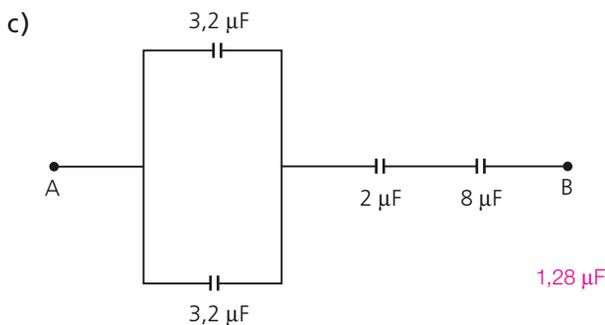
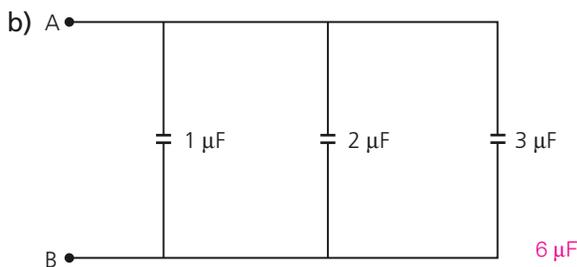
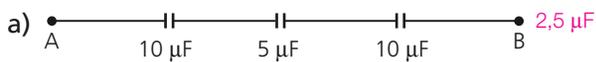
**EP8.** A capacidade elétrica de um capacitor plano pode ser alterada variando-se a distância entre as placas paralelas. Ligado a um gerador que fornece uma ddp de 9 V, a capacitância de um capacitor é de 8 nF. A seguir, ele é desligado do gerador e as placas são afastadas de tal forma que a sua capacitância seja de 5 nF, mantendo-se a mesma carga. Qual é a nova ddp entre as placas? 14,4 V

**EP9.** Quando um gerador fornece uma diferença de potencial de 200 V aos terminais de um condensador (capacitor) de placas paralelas, este armazena uma energia

potencial de 352 nJ. Cada uma das placas possui  $8 \text{ cm}^2$  de área e a distância que as separa é de 1,6 mm, sendo totalmente preenchida por um dielétrico (material isolante). Considere o valor da permissividade absoluta do vácuo  $\epsilon_0 = 8,8 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$ .

- Qual é a intensidade do campo elétrico no interior das placas?  $E = 1,25 \cdot 10^5 \text{ V/m}$
- Qual é a carga do condensador?  $Q = 3,52 \text{ nC}$
- Qual é a capacitância do condensador?  $C = 17,6 \text{ pF}$
- Quantas vezes a permissividade relativa do dielétrico é maior que a absoluta do vácuo? 4

**EP10.** Determine a capacidade elétrica equivalente, entre os pontos A e B, das associações de capacitores das seguintes figuras:



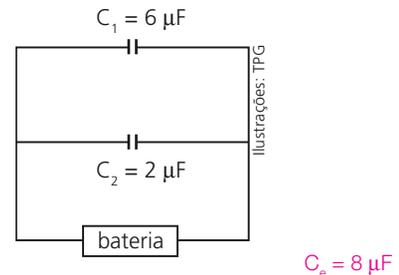
**EP11.** Associam-se em série quatro capacitores iguais, cada um com capacitância igual a  $24 \mu\text{C}$ . A diferença de potencial da associação vale 12 V. Determine:

- a capacidade equivalente à associação;  $C_e = 6 \mu\text{C}$
- a energia potencial elétrica da associação.  $E_{pe} = 4,32 \cdot 10^{-4} \text{ J}$

**EP12.** A capacidade equivalente de três capacitores iguais associados em paralelo é de  $18 \mu\text{F}$ . Pode-se determinar as capacitâncias equivalentes caso eles sejam ligados nas seguintes formas:

- os três em série;  $2 \mu\text{F}$
- dois em série, em paralelo com o terceiro;  $9 \mu\text{F}$
- dois em paralelo, em série com o terceiro.  $4 \mu\text{F}$

**EP13.** Dois capacitores inicialmente descarregados são ligados a uma bateria, conforme mostra a figura. Nessas condições, a associação recebe uma quantidade de carga de  $48 \mu\text{C}$ .

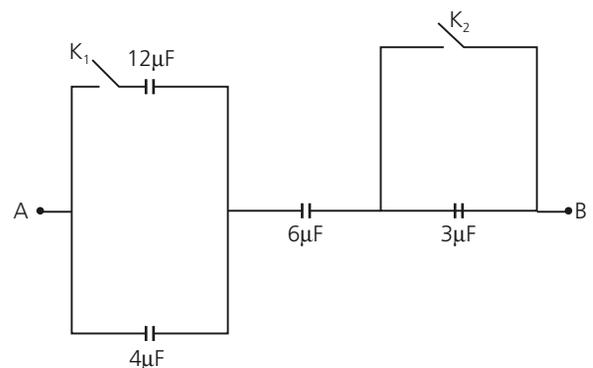


- Qual é a capacitância do capacitor equivalente?  $C_e = 8 \mu\text{F}$
- Que diferença de energia potencial elétrica é fornecida pelo gerador?  $U = 6 \text{ V}$
- Qual é a quantidade de carga de cada capacitor?  $Q_1 = 36 \mu\text{C}$  e  $Q_2 = 12 \mu\text{C}$

**EP14.** Três capacitores, respectivamente, com capacidades elétricas  $C_1 = 12 \mu\text{F}$ ,  $C_2 = 6 \mu\text{F}$ ,  $C_3 = 4 \mu\text{F}$ , estão associados em série, sob ddp total de 9 V. Calcule:

- a capacidade equivalente à associação;  $Q_e = 2 \mu\text{F}$
- a carga de cada capacitor;  $Q = 18 \mu\text{C}$ , para cada um
- a ddp de cada capacitor;  $U_1 = 1,5 \text{ V}$ ;  $U_2 = 3 \text{ V}$  e  $U_3 = 4,5 \text{ V}$
- a energia potencial elétrica da associação.  $E_{pe} = 8,1 \cdot 10^{-5} \text{ J}$

**EP15.** (UFMS) No circuito abaixo, entre A e B, estabeleça-se uma ddp de 12V. É correto afirmar que:



- a menor capacitância entre A e B é obtida fechando-se apenas a chave  $K_1$ . *incorreta*
- a menor capacitância entre A e B é obtida fechando-se as chaves  $K_1$  e  $K_2$ . *incorreta*
- a menor capacitância entre A e B é obtida com as chaves  $K_1$  e  $K_2$  abertas. *correta*
- a capacitância obtida entre A e B é  $2 \mu\text{F}$  fechando-se apenas a chave  $K_2$ . *incorreta*
- a maior capacitância entre A e B é obtida fechando-se apenas a chave  $K_1$ . *incorreta*

# Eletrodinâmica

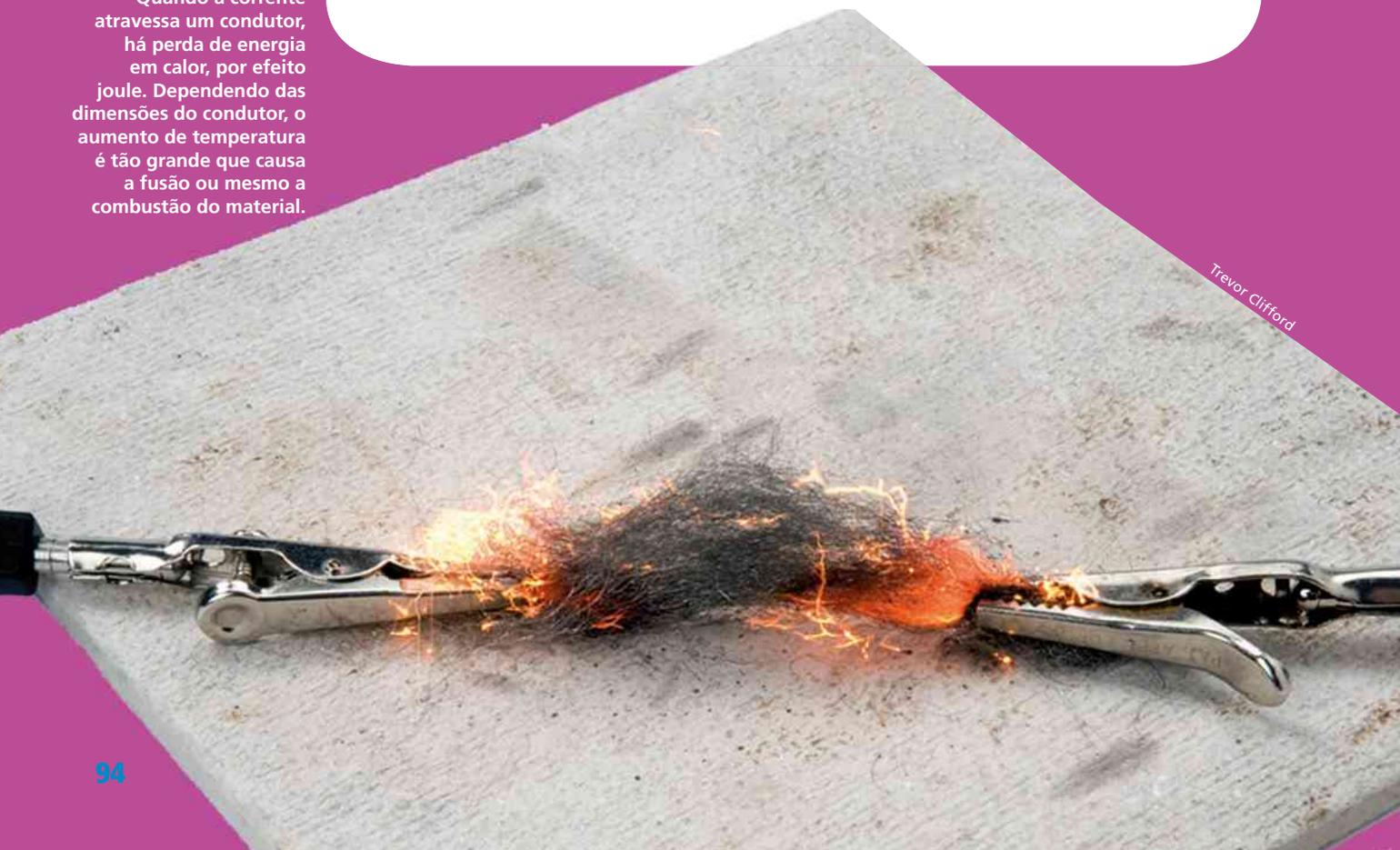
Até aqui, vimos desde as características do espaço próximo a cargas em equilíbrio até a maneira como estas interagem entre si e com outras cargas na vizinhança. Agora, veremos o que ocorre quando essas cargas se põem em movimento.

Já sabemos que o potencial de uma distribuição de cargas em equilíbrio é constante, e que há energia potencial acumulada nessa distribuição; se houver movimento, a energia potencial será convertida em trabalho e, algumas vezes, em outras formas de energia. Resumindo, uma diferença de potencial pode promover o movimento espontâneo de cargas em um sentido preferencial, mas esse movimento pode ser limitado pelas características do meio material e por suas dimensões.

A Eletrodinâmica é a parte da Física que se ocupa com os circuitos elétricos, sistemas fechados em que valem os Princípios de Conservação da Carga e de Conservação da Energia. Corrente elétrica, diferença de potencial, resistência e potência serão as grandezas relevantes nessa etapa.

Nesta Unidade, vamos estudar os circuitos elétricos, que são os meios materiais onde flui a eletricidade, e os elementos que promovem a conversão da energia elétrica em outras formas de energia, além dos circuitos de corrente contínua, em que as cargas fluem em um único sentido.

Quando a corrente atravessa um condutor, há perda de energia em calor, por efeito joule. Dependendo das dimensões do condutor, o aumento de temperatura é tão grande que causa a fusão ou mesmo a combustão do material.



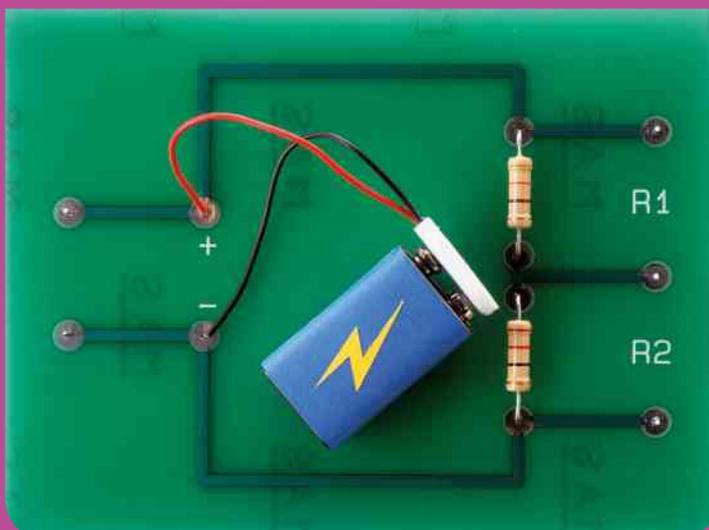
Trevor Clifford

- **CAPÍTULO 8** Corrente elétrica
- **CAPÍTULO 9** Resistores elétricos
- **CAPÍTULO 10** Aparelhos de medição elétrica
- **CAPÍTULO 11** Geradores e receptores elétricos
- **CAPÍTULO 12** Leis de Kirchhoff



Daisy Daisy/Photographer's Choice/Getty Images

Buscar fontes seguras, limpas e renováveis de energia elétrica é um desafio mundial. Do mesmo modo, o consumo consciente e sustentável desse recurso é primordial para a manutenção de nossa qualidade de vida, da saúde e do meio ambiente.



Clive Streeter/Dorling Kindersley/Getty Images



Indigo Pink/Diomeida

Um circuito pode ser compreendido como um sistema fechado de elementos que fornecem e outros que consomem energia, por onde flui corrente elétrica. Lidamos diariamente com circuitos, desde os muito simples, como baterias e resistores, até os mais complexos, como diodos e transistores.

# Corrente elétrica

Uma das maiores inovações tecnológicas já produzidas pela humanidade é o controle da energia elétrica, e é também a que causou o maior impacto no nosso modo de vida.



Fernando Favoretto/Criar Imagem



Thinkstock/Getty Images



Thinkstock/Getty Images

Basta olhar nossa própria casa para listar inúmeros aparelhos e dispositivos que funcionam com o uso de eletricidade, e como esse número vem crescendo.

Esses aparelhos são úteis e nos trazem conforto e/ou entretenimento, mas como será que eles funcionam? Cada um deles, quando conectado a uma bateria ou à rede elétrica, é percorrido por elétrons dotados de energia. Os elétrons atravessam o aparelho, perdem energia e são conduzidos até uma fonte de energia (que mais adiante chamaremos de gerador) para serem energizados outra vez.

Todo esse processo é cíclico e feito através de fios condutores; o aparelho e os fios condutores constituem um circuito. O movimento contínuo e ordenado de elétrons, deslocando-se pelo circuito, constitui a corrente elétrica, e seu estudo compete a um ramo particular da Física, a Eletrodinâmica.

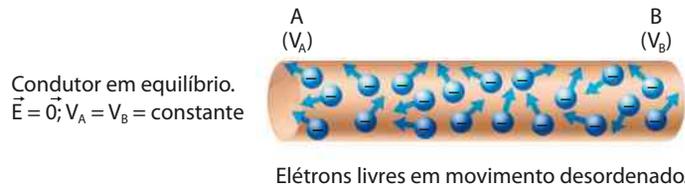
Neste capítulo, vamos estudar o que determina a movimentação desses elétrons, de que fatores depende a intensidade gerada e os efeitos que podem ser provocados. Além disso, veremos o consumo de eletricidade desses aparelhos e também seu preço, já que pagamos mensalmente a conta de energia elétrica.

## Um modelo para a corrente elétrica

Resumindo: eletricidade é o conjunto de fenômenos físicos originados por cargas elétricas estáticas ou em movimento e da interação entre elas; carga elétrica é a “grandeza característica de certas partículas que possibilita a interação eletromagnética [interação entre campos elétricos e magnéticos] e pode tomar valores negativos ou positivos” (RODIN, Itzhak (org.). *Dicionário Houaiss de Física*. Rio de Janeiro: Objetiva, 2005. p. 37). Observe que é uma definição que informa pouco sobre a natureza da carga, o que nos faz lembrar que sabemos como ela se comporta, mas não sabemos o que ela é.

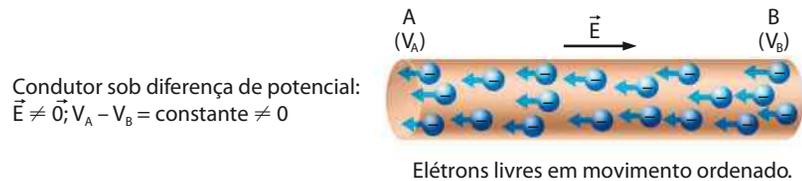
Sabemos também que, no interior de um condutor metálico em equilíbrio eletrostático, o campo elétrico resultante é nulo e o potencial elétrico é constante, conforme visto no capítulo 6. Isso quer dizer que os elétrons livres, aqueles que estão fracamente ligados ao núcleo do átomo, estão em movimento desordenado no seu interior.

Observe o segmento de condutor metálico em forma de fio, inicialmente em equilíbrio eletrostático: o campo elétrico no seu interior é nulo ( $E = 0$ ), porque não há diferença de potencial elétrico entre suas extremidades ( $V_A = V_B$ ).



Ilustrações: Marcos Aurélio Neves Gomes

Entretanto, ao estabelecer-se uma diferença de potencial elétrico entre as extremidades  $A$  e  $B$ , surge em seu interior um campo elétrico  $E \neq 0$ . Devido a isso, cada partícula eletrizada com carga elétrica  $q$  fica sujeita a uma força elétrica de intensidade  $\vec{F} = q \cdot \vec{E}$ , conforme visto no capítulo 3. Essa força é que causa o movimento ordenado dos elétrons, em sentido contrário ao do vetor  $\vec{E}$ , originando a corrente elétrica.



Como já vimos, os elétrons livres movimentam-se no interior de um condutor sempre no sentido do aumento de potencial, ou seja, do potencial elétrico menor para o maior — na figura, da extremidade  $B$  ( $V_B$ ) para a extremidade  $A$  ( $V_A$ ).

Baterias, pilhas e geradores elétricos são dispositivos que fornecem a diferença de potencial elétrico necessária para fazer fluir a corrente e funcionar um aparelho elétrico. Portanto:

**Corrente elétrica** é o movimento ordenado de elétrons livres no interior de um condutor.

Algumas observações sobre a eletricidade:

- O movimento dos elétrons livres no interior do condutor, além de ser ordenado, ocorre simultaneamente, isto é, todos os elétrons se movimentam ao mesmo tempo. Isso pode ser percebido ao se acender uma lâmpada que está longe do interruptor, pois o efeito é praticamente instantâneo. Não confunda essa rapidez com a velocidade média de locomoção dos elétrons no interior do condutor, que é bem baixa.



Eduardo Santalhestra

Quando se estabelece a diferença de potencial nos extremos do condutor, os elétrons trocam energia em colisões elásticas, de modo que se verifica um “movimento” resultante por meio de uma seção transversal do fio. Observe o modelo: um elétron não percorre o fio em toda a sua extensão, mas transfere sua energia para o próximo.

- Um condutor elétrico não precisa necessariamente ser metálico e sólido: basta que seja um meio que permita a movimentação de cargas. Existem condutores não metálicos e líquidos, e não metálicos e gasosos. As soluções eletrolíticas de baterias de automóvel e o plasma ionizado no interior das lâmpadas fluorescentes são exemplos de dispositivos que funcionam com condutores líquidos e gasosos, respectivamente.



Eduardo Santalhestra

O circuito é fechado pelo líquido, mas no líquido circulam íons, e não elétrons.



Thinkstock/Getty Images

No interior desta lâmpada não há filamento: os elétrons atravessam a lâmpada pelo gás ionizado, que é o plasma.

## OUTRAS PALAVRAS



## Eletricidade — breve história: Da Antiguidade ao fim do século XIX

(...)

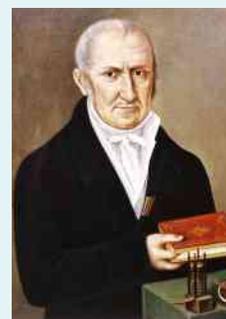
É na Grécia que surgem os primeiros estudos mais sistematizados sobre eletricidade, quando Tales (600 a.C.) descreve observações feitas sobre o âmbar — que em grego se escreve *elektron* —, resina proveniente de algumas árvores que ficava eletrizada quando friccionada e atraía folhas, penas e outros objetos leves.

(...)

William Gilbert, um inglês, escreve em latim e publica, no ano de 1600, o *De Magnete, Magneticisque Corporibus, et de Magno Magnete Tellure* (Sobre o magnetismo e os corpos magnéticos, e sobre o grande magnetismo da Terra). Paralelamente, no decorrer do século XVII, alguns físicos continuam os estudos de Tales sobre a eletricidade estática (Eletrostática), como Guericke, na região em que hoje é a Alemanha, e Boyle, na Irlanda.

Além deles, no final desse mesmo século surgem trabalhos publicados por Gray na Inglaterra, sobre a movimentação e fluidez das cargas (Eletrodinâmica), e por Du Fay, na França, sobre a possibilidade de existirem cargas diferentes (positiva e negativa) nos corpos eletrizados.

No século XVIII temos Benjamin Franklin, que desenvolve diversas pesquisas sobre a conservação das cargas, nos EUA, e Galvani, na Itália, desenvolvendo pilhas e descobrindo a íntima relação entre eletricidade e biologia, no que diz respeito ao funcionamento dos músculos (bioeletricidade). Alessandro Volta, também na Itália, constrói as primeiras pilhas, na forma de dispositivos de armazenamento das cargas elétricas, mais eficientes do que os antigos geradores eletrostáticos.



Ann Ronan Picture Library/Heritage-Images/Other Images

Alessandro Giuseppe Antonio Anastasio Volta (1745-1827) foi um físico italiano. Na investigação de fenômenos elétricos desenvolveu muitos dispositivos, entre eles a pilha, o primeiro aparelho a produzir energia elétrica a partir da energia química.

*Eletricidade — breve história: Da Antiguidade ao fim do século XIX.* UOL Educação. Disponível em: <<http://educacao.uol.com.br/disciplinas/fisica/eletricidade---breve-historia-da-antiguidade-ao-fim-do-seculo-19.htm>>. Acesso em: 22 jan. 2016.

## Organizando as ideias do texto

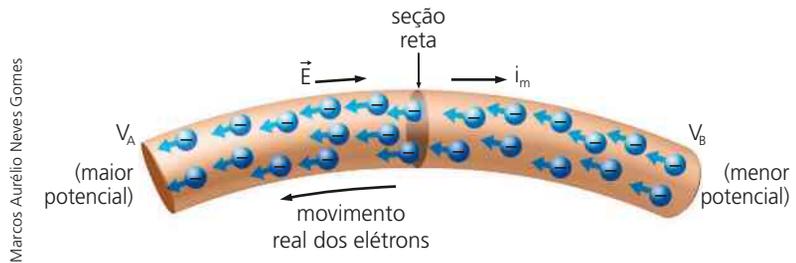
1. Em qual período ocorreu a maior parte das descobertas científicas relacionadas com a eletricidade? Com relação às outras áreas da Física Clássica (Mecânica e Termodinâmica), os estudos envolvendo eletricidade ocorreram na mesma velocidade? Justifique sua resposta.
2. Faça uma pesquisa e descreva como foi montado o experimento de Benjamin Franklin. De acordo com a história popularmente contada, o papagaio — ou pipa — de Franklin foi atingido por um raio. Essa história é verdadeira? Por que a chave que compunha o experimento ficou carregada eletricamente? Como se estabelece a diferença de potencial para que exista a descarga elétrica entre a chave e o dedo de Benjamin Franklin?

Professor, veja [Orientações Didáticas](#).

## Intensidade de corrente elétrica

Considere um condutor metálico, cujos extremos estão sujeitos a certa diferença de potencial. A intensidade média de corrente elétrica  $i_m$  pode ser obtida pelo quociente entre a quantidade de carga elétrica  $q$  que atravessa uma seção reta do condutor e o respectivo intervalo de tempo  $\Delta t$  gasto para percorrê-lo:

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



Se  $n$  é o número de elétrons que passam pela seção reta do condutor num intervalo de tempo  $\Delta t$ , e o valor absoluto da carga de um elétron (carga elementar  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  C), podemos escrever  $q = n \cdot e$ ; assim, a expressão que calcula a corrente se converte em:

$$i_m = \frac{n \cdot e}{\Delta t}$$

## Unidade de medida da intensidade de corrente elétrica

No SI, a unidade de medida da intensidade da corrente elétrica é o ampère (A), que será definida no capítulo 14, durante o estudo do Eletromagnetismo. Por enquanto, vamos manter a definição da corrente em termos da relação entre cargas e tempo. Como a unidade de medida da quantidade de carga elétrica no SI é o coulomb (C), e a do tempo, o segundo (s), temos:

$$1 \text{ A} = \frac{1 \text{ C}}{1 \text{ s}}$$

Costuma-se usar também dois submúltiplos do ampère, o miliampère (mA) e o microampère ( $\mu\text{A}$ ), cujas relações com a unidade de medida de intensidade da corrente elétrica no SI são:

$$1 \text{ mA} = 10^{-3} \text{ A} \text{ e } 1 \mu\text{A} = 10^{-6} \text{ A}$$

## Sentido da corrente elétrica

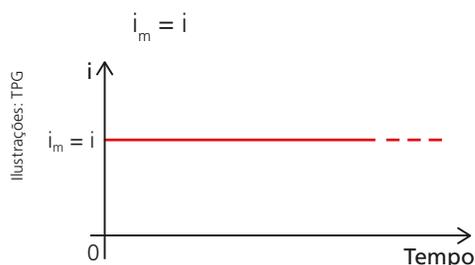
Convencionou-se que o sentido de movimentação da corrente elétrica é o sentido de movimentação das cargas positivas — ou, no caso de condutores sólidos, ao sentido que as cargas positivas teriam se pudessem se mover — portanto, com o mesmo sentido do vetor campo elétrico  $\vec{E}$  presente no interior do condutor. Esse sentido adotado é contrário ao do deslocamento real dos elétrons livres no sólido, ou dos íons negativos em líquidos e gases.

## Tipos de corrente elétrica

Quando o vetor campo elétrico  $\vec{E}$  existente no interior do condutor é constante no decorrer do tempo, a corrente é denominada contínua (CC) e, quando varia segundo uma função trigonométrica (seno ou cosseno), chama-se corrente alternada (CA).

## Corrente elétrica contínua

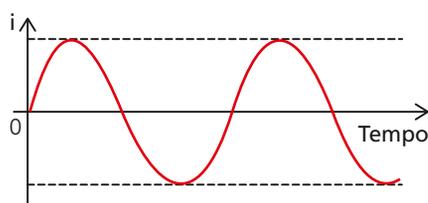
A corrente elétrica contínua CC possui sempre uma intensidade constante ao longo do tempo. Assim:



Cristina Xavier

Pilhas e baterias são exemplos de fonte de corrente elétrica contínua.

## Corrente elétrica alternada



A corrente elétrica alternada CA varia sua intensidade, em função do tempo, de forma senoidal. No Brasil, a alternância tem frequência de 60 Hz (60 ciclos por segundo).

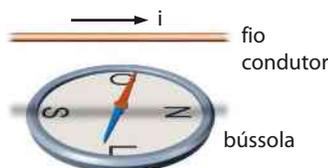
No decorrer deste livro, quando não houver especificação, todas as correntes elétricas citadas serão contínuas.

## Efeitos provocados pela corrente elétrica

Dependendo da natureza e da intensidade da corrente elétrica, ela pode implicar diferentes efeitos, entre os quais se destacam o magnético, o térmico (Joule), o químico, o luminoso e o fisiológico. Destes, o único que ocorre sempre é o efeito magnético.

### Efeito magnético

Quando a corrente elétrica percorre um condutor, aparece na sua vizinhança um campo magnético. Esse efeito é facilmente comprovado pela deflexão da agulha imantada de uma bússola, quando posicionada próxima ao condutor. Esse fenômeno será devidamente estudado em Eletromagnetismo.



Marcos Aurélio Neves Gomes



Eduardo Santalhestra

A corrente que atravessa o fio pode produzir um campo magnético capaz de defletir a agulha da bússola.

### Efeito térmico ou efeito Joule

Trata-se do aquecimento do condutor provocado pela colisão entre os elétrons livres e seus átomos. Esse efeito acontece em aparelhos que produzem calor (aquecedores elétricos: chuveiros, torneiras, ferros elétricos etc.).

### Efeito químico

Quando a corrente elétrica atravessa uma solução iônica, pode ocorrer eletrólise, isto é, o deslocamento e a descarga dos íons negativos e positivos, respectivamente, para os polos positivo e negativo da bateria que promove a corrente. Esse efeito aparece na galvanização de metais (cromação, prateação, niquelação etc.).



Eduardo Santalhestra

Eletrólise da água — decomposição da água em gases oxigênio e hidrogênio, por passagem de corrente elétrica.



Orla da praia de Iracema, em Fortaleza (CE), iluminada por lâmpadas de vapor de sódio. Fotografia tirada em abril de 2009.

## Efeito luminoso

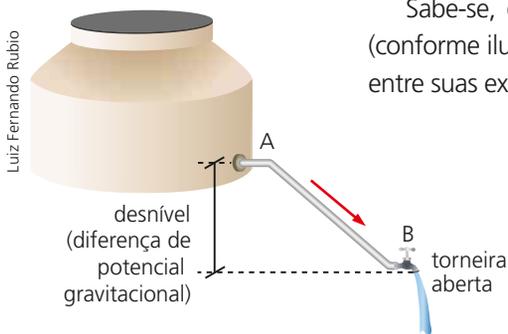
Quando a corrente elétrica atravessa um gás rarefeito, acontece a emissão de luz, decorrente da interação de partículas ionizadas com as demais partículas do gás. Esse efeito pode ser visto nas lâmpadas fluorescentes, de vapor de sódio etc.

## Efeito fisiológico

Quando transpassa um organismo vivo, a corrente elétrica produz contrações musculares conhecidas como choque elétrico. O ser humano, ao ser atravessado por uma corrente de intensidade de 10 mA ou mais, pode sofrer desde comichão ou contrações musculares com dor até queimaduras ou mesmo parada cardíaca e morte.

## Diferença de potencial elétrico

Sabe-se, da Mecânica, que certa quantidade de água escoar através do tubo AB (conforme ilustração ao lado), desde que haja uma diferença de potencial gravitacional entre suas extremidades.



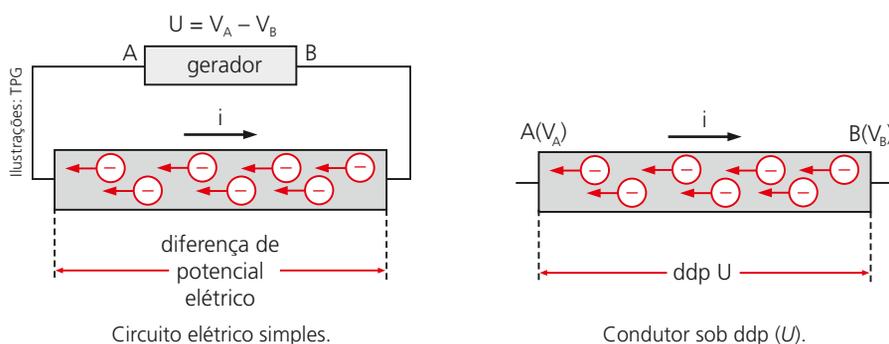
Estando a torneira acoplada à extremidade B aberta, ocorre o movimento espontâneo do líquido no sentido de A (de maior potencial) para B (de menor potencial). A corrente de água será interrompida, obviamente, se a torneira for fechada.

Analogamente, na Eletrodinâmica, a carga elétrica também se movimenta espontaneamente desde que se estabeleça uma diferença de potencial elétrico (ddp) entre as extremidades do condutor.

O dispositivo que causa o movimento das cargas elétricas é uma fonte ou gerador (bateria, pilha, tomada etc.). A diferença de potencial elétrico (ddp), também chamada tensão elétrica, tem como unidade de medida, no SI, o volt (V).

## Circuito elétrico

Ao conectar um gerador a um condutor (conforme ilustração), acontece um movimento ordenado e simultâneo dos elétrons livres no sentido de B (de menor potencial) para A (de maior potencial), sendo que a corrente elétrica  $i$  "caminha" no sentido oposto, por mera convenção. O conjunto formado pelo gerador e pelo condutor, eletricamente ligados, denomina-se circuito elétrico simples. A extremidade A tem potencial elétrico  $V_A$  maior que o potencial elétrico  $V_B$  da extremidade B. Assim, a ddp é  $U = V_A - V_B$ .

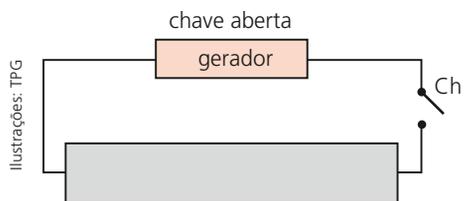


Circuito elétrico simples.

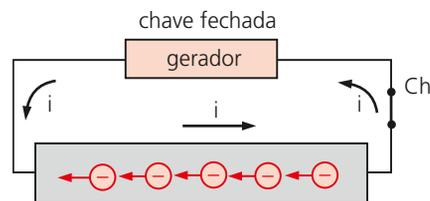
Condutor sob ddp ( $U$ ).

Da mesma maneira que a corrente de água cessa ao se fechar a torneira, também em um circuito elétrico pode-se interromper a passagem da corrente elétrica. Para isso, deve-se intercalar, em um trecho do circuito, uma chave (Ch) ou um interruptor. Dizemos que a chave está instalada *em série* com o circuito.

Observe então que não basta que o circuito seja alimentado pela bateria, que oferece a ddp entre os extremos do fio; é necessário também que esse caminho esteja fechado para que a corrente "circule".



A passagem de corrente elétrica foi interrompida.



Há corrente elétrica no circuito.

## Trabalho, energia potencial elétrica e potência elétrica

Supondo que em determinado intervalo de tempo  $\Delta t$  passe, simultaneamente, uma quantidade de carga  $q$  nas extremidades  $A$  e  $B$  de um circuito elétrico qualquer, o trabalho da força elétrica (estudado no capítulo 5) é expresso por:

$$\tau_{AB} = q \cdot U, \text{ sendo } U = V_A - V_B \Rightarrow \tau_{AB} = q \cdot (V_A - V_B) \Rightarrow \tau_{AB} = q \cdot V_A - q \cdot V_B$$

Tem-se então:

- energia potencial elétrica no ponto  $A$ :  $E_{pe_A} = q \cdot V_A$ ;
- energia potencial elétrica no ponto  $B$ :  $E_{pe_B} = q \cdot V_B$ ;
- trabalho da força elétrica (consumo de energia elétrica):  $\tau_{AB} = E_{pe_A} - E_{pe_B}$ .

Pela definição de potência ( $P$ ):

$$P = \frac{\tau}{\Delta t} = \begin{cases} \tau = \tau_{AB} = q \cdot U \\ i = \frac{q}{\Delta t} \Rightarrow \Delta t = \frac{q}{i} \end{cases}$$

$$P = \frac{q \cdot U}{\frac{q}{i}} = i \cdot U \Rightarrow P = U \cdot i \text{ (potência elétrica consumida)}$$

A unidade de potência no SI é o watt (W).



Eduardo Santalhestra

Todos os dispositivos que consomem energia elétrica devem ter gravados, em alguma parte, os valores nominais das grandezas que utilizam, isto é, a potência elétrica que consomem, a ddp em que devem ser ligados e, eventualmente, outras informações. Por exemplo, se numa lâmpada comum está gravado: 100 W – 127 V, significa que ela deve ser ligada a uma ddp de 127 V e a sua potência consumida será de 100 W.

## A FÍSICA NO COTIDIANO

### Consumo de energia elétrica

Existe uma unidade de consumo de energia elétrica usualmente utilizada, o **quilowatt-hora** (kWh), oriunda da definição de potência,  $P = \frac{\tau}{\Delta t}$ , que é  $\tau = P \cdot \Delta t$ , com a potência em quilowatt (kW) e o tempo em hora (h). A sua relação com a unidade de medida do SI, o joule (J), é:

$$1 \text{ kWh} = 10^3 \text{ W} \cdot 3600 \text{ s} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$$

Em aparelhos e máquinas que consomem energia elétrica estão inscritas determinadas especificações, entre elas a potência que consomem. A unidade do tempo usada é a hora, pois geralmente eles ficam ligados frações ou múltiplos desse período.

Portanto, se você quiser calcular quanta energia consome um aparelho elétrico, basta verificar o valor da potência que ele dissipa, em kW, e multiplicá-lo pelo número de horas que ficou em funcionamento. Se isso for feito com cada um dos aparelhos elétricos da sua casa, somando o consumo deles ao longo de um período de um mês e multiplicando o total obtido pelo preço do kWh estipulado pela companhia de eletricidade e, finalmente, acrescentando os impostos, você obterá o valor da sua conta de energia elétrica (ou conta de luz).



Nota Fiscal Série B N° 002575683

Conta de Energia Elétrica

Fatura nº	Data de Emissão	Conta Referente a	N° Instalação	Consumo kWh	Vencimento	Total a Pagar R\$
682900782043	29 ABR 2017	ABR 2017	71487786	240,0	11 MAI 2017	104,67

Luiz Fernando Rubio

No caso dessa conta de energia elétrica, o consumo do período foi de 240,0 kWh e o total a ser pago é de R\$ 104,67.

Nessa residência, o consumo foi calculado da seguinte forma: num determinado dia do mês, um funcionário da companhia elétrica efetuou a leitura do número que o medidor (relógios) registrava. Cada um dos quatro relógios marcava (lendo da esquerda para direita), por exemplo, 4, 9, 8 e 6, ou seja, 4986 kWh. No mês seguinte, passado o período de 30 dias, foi feita uma nova leitura e anotação: 5226 kWh.

Nesse período, o consumo foi de 5226 kWh – 4986 kWh = 240 kWh.

Nas residências em geral, os medidores de consumo de energia elétrica, e também os de água, são instalados em locais de acesso fácil e seguro para que o trabalho dos anotadores possa ser realizado sem maiores dificuldades.

Relógio medidor de consumo — a energia consumida é diretamente proporcional à velocidade de rotação do disco horizontal, que aparece no centro do mostrador.



Eduardo Santalhestra

## Exercícios resolvidos

**ER1.** Um fio condutor é percorrido por uma corrente de intensidade 200 mA durante 1 hora. Qual foi a quantidade de carga elétrica que passou por uma seção reta do condutor?

### Resolução:

São dados:  $i = 200 \text{ mA} = 0,2 \text{ A}$ ;  $\Delta t = 1 \text{ h} = 3600 \text{ s}$

Pela definição de intensidade de corrente:

$$i = \frac{q}{\Delta t} \Rightarrow q = i \cdot \Delta t = 0,2 \cdot 3600 = 720 \Rightarrow q = 720 \text{ C}$$

**ER2.** Quais são a intensidade e o sentido da corrente elétrica que percorre a seção reta de um condutor, sabendo-se que, em 10 s, passam por ela, da esquerda para a direita,  $5 \cdot 10^{20}$  elétrons livres?

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

### Resolução:

São dados:  $\Delta t = 10 \text{ s}$ ;  $n = 5 \cdot 10^{20}$

Pela definição de intensidade de corrente:

$$i = \frac{q}{\Delta t} = \frac{n \cdot e}{\Delta t} = \frac{5 \cdot 10^{20} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{10} = \frac{8 \cdot 10}{10} \Rightarrow i = 8 \text{ A}$$

Sentido: da direita para a esquerda (contrário ao do movimento dos elétrons).

**ER3.** Um condutor é percorrido por uma corrente de intensidade 480  $\mu\text{A}$ . Determine o número de elétrons que passam por uma seção transversal do condutor no intervalo de 2 minutos, sabendo-se que a carga elementar vale  $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ .

### Resolução:

São dados:

$$i = 480 \mu\text{A} = 480 \cdot 10^{-6} \text{ A}$$

$$\Delta t = 2 \text{ min} = 120 \text{ s}$$

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

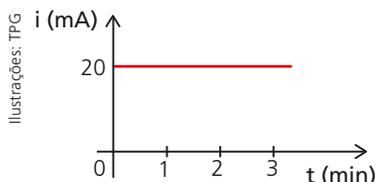
Pela definição de intensidade de corrente:

$$i = \frac{n \cdot e}{\Delta t} \Rightarrow n = \frac{i \cdot \Delta t}{e} = \frac{480 \cdot 10^{-6} \cdot 120}{1,6 \cdot 10^{-19}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow n = 360 \cdot 10^{15} \Rightarrow n = 3,6 \cdot 10^{17} \text{ elétrons}$$

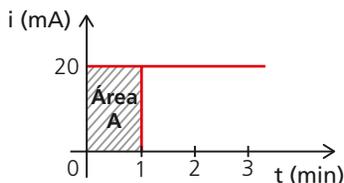
**ER4.** O diagrama abaixo representa a intensidade de corrente que atravessa um fio condutor, em função do tempo. Sendo o valor da carga do elétron  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ , determine:

- a quantidade de carga elétrica que passa por uma seção reta do condutor nos primeiros 2 minutos;
- o número de elétrons que cruza a mesma seção no referido intervalo de tempo.



### Resolução:

- a) Sabemos que a quantidade de carga  $q$  corresponde à área  $A$  sob a curva.



$$A = B \cdot h = (2 \cdot 60) \cdot (20 \cdot 10^{-3}) = 2,4$$

Portanto,  $q = 2,4 \text{ C}$ .

b) Sendo  $q = n \cdot e \Rightarrow n = \frac{q}{e} = \frac{2,4}{1,6 \cdot 10^{-19}} \Rightarrow$

$$\Rightarrow n = 1,5 \cdot 10^{19} \text{ elétrons}$$

**ER5.** No vidro de uma lâmpada está gravado: 60 W – 120 V. Estando a lâmpada conectada a uma corrente elétrica compatível com ela, determine:

- a intensidade de corrente que percorre o filamento da lâmpada;
- o consumo dessa lâmpada em 20 horas, medido em kWh.

### Resolução:

São dados:

$$P = 60 \text{ W}$$

$$U = 120 \text{ V}$$

a)  $P = U \cdot i \Rightarrow i = \frac{P}{U} = \frac{60}{120} \Rightarrow i = 0,5 \text{ A}$

b)  $\tau = P \cdot \Delta t \begin{cases} P = 0,06 \text{ kW} \\ \Delta t = 20 \text{ h} \end{cases}$

$$\tau = 0,06 \cdot 20 \Rightarrow \tau = 1,2 \text{ kWh}$$

**ER6.** Qual dos dois dispositivos consome mais energia elétrica: uma lâmpada de 100 W acesa durante 10 horas ou um chuveiro elétrico de 3000 W ligado durante 10 minutos?

### Resolução:

O consumo de energia elétrica nada mais é do que o trabalho medido na unidade kWh. Então, pela definição de potência, obtemos o trabalho:

$$P = \frac{\tau}{\Delta t} \Rightarrow \tau = P \cdot \Delta t$$

em que a potência é medida em quilowatt (kW) e o tempo em hora (h).

Lâmpada:  $P_{\text{lâmpada}} = 100 \text{ W} = 0,1 \text{ kW}$  e  $\Delta t = 10 \text{ h}$ .

Chuveiro:  $P_{\text{chuveiro}} = 3000 \text{ W} = 3 \text{ kW}$  e  $\Delta t = 10 \text{ min} = \frac{10}{60} \text{ h} = \frac{1}{6} \text{ h}$ .

Assim:

$$\tau_{\text{lâmpada}} = P_{\text{lâmpada}} \cdot \Delta t = 0,1 \text{ kW} \cdot 10 \text{ h} = 1 \text{ kWh}$$

$$\tau_{\text{chuveiro}} = P_{\text{chuveiro}} \cdot \Delta t = 3 \text{ kW} \cdot \frac{1}{6} \text{ h} = 0,5 \text{ kWh}$$

Portanto, nessas condições, como  $\tau_{\text{lâmpada}} > \tau_{\text{chuveiro}}$ , a lâmpada consome mais energia elétrica do que o chuveiro.

**ER7.** Uma dona de casa passa roupa durante meia hora, todos os dias, usando um ferro elétrico que funciona na ddp de 110 V e dissipa potência de 660 W. Assim, determine:

- a intensidade de corrente que atravessa o aparelho;
- o custo mensal (30 dias) de energia elétrica dispendido pelo aparelho, com o kWh custando R\$ 0,40 (desconsiderados os impostos).

### Resolução:

São dados:

$$\Delta t = 0,5 \text{ h}; U = 110 \text{ V}; P = 660 \text{ W} = 0,66 \text{ kW}$$

a)  $P = U \cdot i \Rightarrow i = \frac{P}{U} = \frac{660}{110} \Rightarrow i = 6 \text{ A}$

$$b) \tau_{\text{dia}} = P \cdot \Delta t = 0,66 \text{ kW} \cdot 0,5 \text{ h} = 0,33 \text{ kWh}$$

$$\tau_{\text{mês}} = 30 \cdot \tau_{\text{dia}} = 30 \cdot 0,33 \text{ kWh} = 9,9 \text{ kWh}$$

$$\text{Custo: } 9,9 \text{ kWh} \cdot \text{R\$ } 0,40/\text{kWh} = \text{R\$ } 3,96$$





## Economia de energia

Nas residências da população em geral, um dos eletrodomésticos que mais consome energia elétrica é a geladeira. Para economizar energia elétrica com a geladeira ligada, evite deixar a porta aberta por um tempo desnecessário; se possível, procure abri-la menos vezes; adote o nível de refrigeração ideal (não esfriando o que fica dentro dela mais do que é preciso); não coloque alimentos quentes nem pendure nada molhado (com o intuito de secá-los), como roupas ou tênis, na parte traseira da geladeira.

Outro aparelho que pode onerar a conta de energia elétrica é o chuveiro. Em dias quentes, coloque a chave na posição “verão” e procure tomar banhos rápidos. Dependendo do preço e da disponibilidade da oferta de gás em sua região, às vezes é vantajoso substituir o chuveiro elétrico por chuveiro a gás.

Ainda para minimizar os gastos, não deixe ligados os aparelhos de TV e de som sem necessidade, nem mantenha lâmpadas acesas em recintos vazios.

O ferro de passar roupas também consome muita energia elétrica. Para aproveitar ao máximo o calor produzido por ele, junte uma boa quantidade de roupas para passar de uma vez só.

É aconselhável testar regularmente o medidor de consumo da sua casa (o “relógio” da companhia fornecedora de energia elétrica) desligando todos os aparelhos elétricos e observando-o. Se o relógio continuar andando, você deve comunicar o fato à companhia, para que ela providencie o seu conserto ou troca. Talvez você esteja pagando pela energia elétrica que não gasta.

### ATIVIDADE PRÁTICA

FAÇA NO CADERNO

NÃO ESCREVA NO LIVRO

### Testando circuitos

Para montar um circuito, os requisitos mínimos necessários são: um dispositivo que forneça energia, um dispositivo que consuma energia e um meio material que conduza a eletricidade entre os dois. Mas de que maneira podemos unir esses elementos?

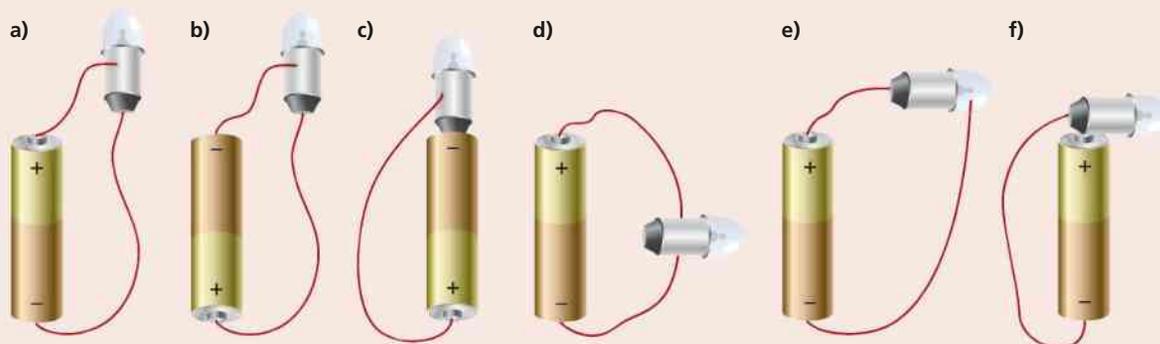


#### Material

- uma lâmpada pequena de 2,2 V
- duas pilhas pequenas
- 30 cm de fio
- fita adesiva

#### Procedimento

Vocês vão construir as seguintes montagens e verificar em quais delas a lâmpada se acende. Para isso, cortem o fio na metade e usem fita adesiva para fixar os elementos.



Ilustrações: Luiz Fernando Rubio

#### Discussão

Para cada montagem, diga qual é o caminho que as cargas estão realizando nesse circuito.

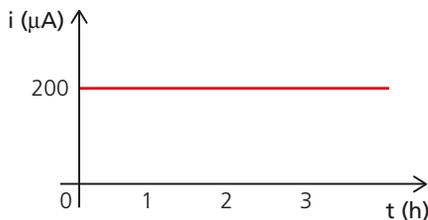
Ver Orientações Didáticas.

**EP1.** Um condutor é percorrido por uma corrente de intensidade 4,8 A, durante 5 minutos. Sendo o valor da carga elementar  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ , determine:

- a quantidade de carga elétrica que passa por uma seção reta do condutor; **1440 C**
- o número de elétrons que atravessam a mesma seção.  **$9,0 \cdot 10^{21}$  elétrons**

**EP2.** Por uma seção transversal de um fio condutor atravessam, da esquerda para a direita,  $6 \cdot 10^{16}$  elétrons por minuto. Sendo o módulo da carga de um elétron  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ , determine o sentido e a intensidade da corrente elétrica medida em *microampères*. **Da direita para a esquerda e  $i = 160 \mu\text{A}$ .**

**EP3.** A corrente elétrica que atravessa um fio condutor tem o comportamento apresentado no diagrama. Considere o valor da carga elementar  $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ .



- Determine a quantidade de carga elétrica que passa por uma seção transversal do condutor entre os instantes 1 e 3 horas. **1,44 C**
- Qual é o número de elétrons que cruza uma seção reta do fio num intervalo de 4 horas.  **$1,8 \cdot 10^{19}$**

**EP4.** Um rapaz, enquanto tomava seu banho quente, notou na plaquinha do chuveiro elétrico as seguintes especificações: 220 V – 3 960 W.

- Qual a finalidade dos dizeres da plaquinha e que intensidade de corrente atravessou as resistências do chuveiro enquanto esteve ligado?
- Qual foi o consumo de energia, em kWh, se o banho do rapaz durou 20 minutos? **1,32 kWh.**

**a) Principais finalidades: instalar corretamente o chuveiro na voltagem e verificar o consumo através da potência;  $i = 18 \text{ A}$ .**

**EP5.** (Enem-MEC) Podemos estimar o consumo de energia elétrica de uma casa considerando as principais fontes de consumo. Pense na situação em que apenas os aparelhos que constam na tabela fossem utilizados diariamente, segundo os tempos definidos.

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

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

- R\$ 135,00
- R\$ 165,00
- R\$ 190,00
- R\$ 210,00
- R\$ 230,00 **X**

**EP6.** Cada conta de energia elétrica apresenta uma série de informações. Entre elas, um histórico de consumo dos últimos doze meses, como o da figura.

### Histórico de Consumo kWh

MAR/16	200	
FEV/16	210	
JAN/16	210	
DEZ/15	220	
NOV/15	210	
OUT/15	300	
SET/15	390	
AGO/15	230	
JUL/15	260	
JUN/15	350	
MAIO/15	200	
ABR/15	220	

Luiz Fernando Rubio

Supondo que o preço do kWh tenha sido de R\$ 0,40 ao longo desse período, pode-se afirmar que a maior diferença entre dois meses quaisquer, em reais, foi de:

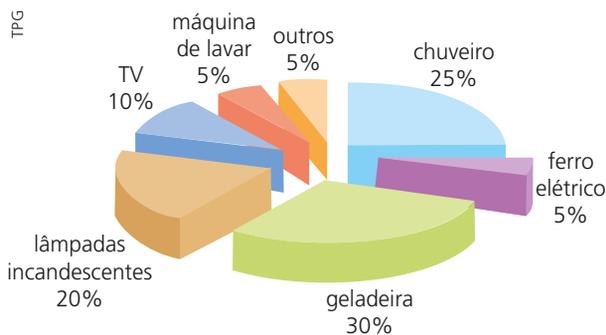
- R\$ 76,00. **X**
- R\$ 80,00.
- R\$ 120,00.
- R\$ 140,00.
- R\$ 156,00.

**EP7.** Para certificar-se de que uma lâmpada fluorescente compacta é realmente econômica, o sr. João comprou uma de 110 V – 20 W por R\$ 12,80, para substituir uma lâmpada incandescente de 110 V – 100 W, ambas com luminosidade equivalente.

Se a lâmpada fluorescente ficar acesa durante 8 horas por dia e considerando o preço do kWh de R\$ 0,40, calcule:

- a) a intensidade de corrente que percorre a lâmpada fluorescente compacta;  $\approx 0,18 \text{ A}$
- b) o tempo de uso para que o preço da nova lâmpada seja amortizado com a economia de energia elétrica; **50 dias**
- c) a importância que será economizada pelo sr. João em um mês de 30 dias. **R\$ 7,68**

O gráfico abaixo se refere às questões EP8 e EP9:



**EP8.** (Enem-MEC) A distribuição média, por tipo de equipamento, do consumo de energia elétrica nas residências no Brasil é apresentada no gráfico.

Em associação com os dados do gráfico, considere as variáveis:

- I. Potência do equipamento.
- II. Horas de funcionamento.
- III. Número de equipamentos.

O valor dos percentuais do consumo de energia depende de:

- a) I, apenas.
- b) II, apenas.
- c) I e II, apenas.
- d) II e III, apenas.
- e) I, II e III. **X**

**EP9.** (Enem-MEC) Como medida de economia, em uma residência com 4 moradores, o consumo mensal médio de energia elétrica foi reduzido para 300 kWh. Se essa residência obedece à distribuição dada no gráfico, e se nela há um único chuveiro, de 5000 W, pode-se concluir que o banho de cada morador passou a ter uma duração média, em minutos, de:

- a) 2,5.
- b) 5,0.
- c) 7,5. **X**
- d) 10,0.
- e) 12,0.



## PARA SABER MAIS

### Sites

#### Montando circuitos

Disponível em: <[http://phet.colorado.edu/pt\\_BR/simulation/circuit-construction-kit-dc](http://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/circuit-construction-kit-dc)>. Acesso em: 22 jan. 2016.

Neste simulador, é possível criar diversos tipos de circuitos de corrente contínua e inserir equipamentos de medição. Utilize-o sempre que quiser testar um circuito e ver suas características.

#### Simulação de conta de luz

Disponível em: <[www.furnas.com.br/ouvidoria/simulador/index.htm](http://www.furnas.com.br/ouvidoria/simulador/index.htm)>. Acesso em: 3 jul. 2017.

Ao longo deste capítulo, em diversas ocasiões foi visto como se dá o consumo de energia elétrica e como ele é calculado pelas companhias distribuidoras.

Esta página fornece um simulador bom para simular a conta de luz de sua casa e ver como cada aparelho doméstico contribui para seu valor.

# Resistores elétricos

Profissionais cujo ofício os coloca em contato frequente com materiais que conduzem eletricidade (cabos, fios, geradores de energia elétrica, certos aparelhos elétricos etc.) são obrigados, por lei, a utilizar luvas e calçados de borracha como equipamentos de segurança.

A borracha, assim como plástico, silicone, vidro ou óleo, é um conhecido isolante elétrico. Os isolantes elétricos têm como característica opor-se à passagem de cargas elétricas, sobretudo porque possuem um número reduzido de elétrons livres (elétrons fracamente ligados aos seus respectivos átomos). Os condutores elétricos, por sua vez, apresentam comportamento contrário ao dos isolantes. Contudo, ainda que em menor grau, mesmo os condutores elétricos exibem alguma resistência; apesar de possuírem um elevado número de elétrons livres que se deslocam com facilidade, ainda assim eles se chocam uns com os outros ou são desviados pelos núcleos dos átomos do material do qual são constituídos.

Os equipamentos de proteção individual (EPI) impedem que o trabalhador se acidente. Entre esses equipamentos estão as luvas de PVC (policloreto de vinila) e silicone, que são bons isolantes térmicos, e estes em geral também são bons isolantes elétricos. A que se deve essa correspondência?

**Resistência elétrica** é a capacidade de um objeto de opor-se à passagem de corrente elétrica, quando submetido a uma diferença de potencial.

Vimos no capítulo anterior que a passagem de corrente elétrica por um condutor pode provocar vários tipos de efeito. Nos condutores metálicos, geralmente se verifica o efeito térmico, ou efeito Joule.

Os condutores que têm exclusivamente a função de converter energia elétrica em calor são chamados de resistores. Como os demais tipos de condutores, eles também oferecem alguma resistência ao movimento dos elétrons livres, quando submetidos a uma ddp.

O objeto de estudo deste capítulo será, então, o modo como os aparelhos elétricos utilizam a energia elétrica para obter calor de um resistor qualquer.



Fernando Favoretto/Criar Imagens

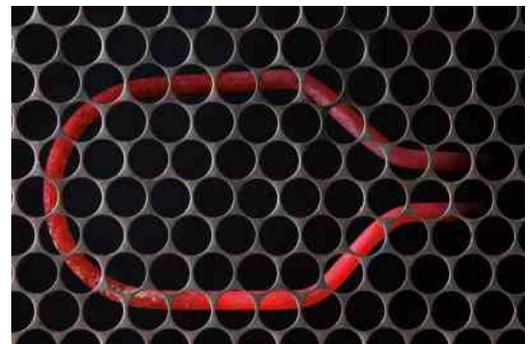
Luvas de PVC.

PVC é material isolante porque é feito de elementos químicos com poucos elétrons livres (C, H, Cl); atribuímos aos elétrons livres a transferência de energia cinética (energia térmica) que se converte em calor; esses são os mesmos elétrons livres que conduzem a corrente elétrica.



Sérgio Dotta Jr./The next

Tão contrários são os condutores e os isolantes elétricos que eles costumam andar juntos: em geral, fios elétricos são encapados com material plástico. Esse cabo pode conduzir corrente elétrica ou sinais eletromagnéticos.

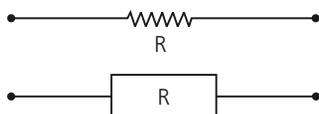


Sérgio Dotta Jr./The next

Nesta grelha elétrica, a energia elétrica é convertida principalmente em calor na grade metálica, por efeito Joule.

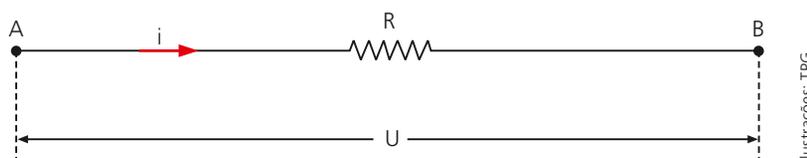
## Primeira Lei de Ohm — Resistência

Aplicando uma ddp  $U$  nos terminais de um resistor, sabemos que ele é percorrido por uma corrente elétrica  $i$ . Georg Simon Ohm (1789-1854) demonstrou experimentalmente que, se a temperatura do resistor permanecer constante, a intensidade de corrente  $i$  mantém-se diretamente proporcional à ddp  $U$  empregada:



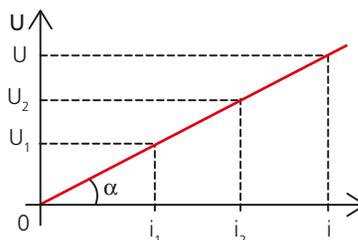
Representações de resistores em circuitos elétricos. Apesar de a resistência ser uma propriedade do resistor, é costume usar-se o termo "resistência" no lugar de resistor.

$$U = R \cdot i$$



Essa expressão é conhecida como Primeira Lei de Ohm, na qual a constante de proporcionalidade, característica do resistor, é justamente a resistência elétrica  $R$ .

Um **resistor ôhmico**, portanto, é aquele que obedece à seguinte curva característica:



em que:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{U_1}{i_1} = \frac{U_2}{i_2} = \dots = \frac{U}{i} = R$$

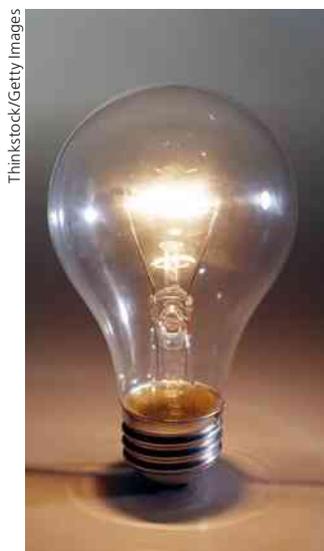
No SI a unidade de medida da resistência elétrica é o ohm ( $\Omega$ ).

O quilo-ohm ( $k\Omega$ ) corresponde a  $1000 \Omega$ :  $1 k\Omega = 10^3 \Omega$ .

Sendo  $\begin{cases} U = 1 \text{ V (volt)} \\ i = 1 \text{ A (ampère)} \end{cases}$  e  $R = \frac{U}{i}$ , temos:  $R = \frac{1 \text{ V}}{1 \text{ A}} = 1 \Omega$  (ohm).

Esse resultado fornece também a interpretação da unidade de resistência: 1 ohm é a resistência de um resistor que, sob ddp de 1 volt, é atravessado por corrente de 1 ampère.

Recorde com a classe a definição de resistor. Pergunte, então, o motivo de a lâmpada (fotografia) estar classificada como resistor; o objetivo dessa pergunta é lembrá-los de que lâmpadas incandescentes apresentam eficiência muito baixa.



São exemplos de resistores elétricos: lâmpada incandescente (filamento de tungstênio), chuveiro e torneira elétrica (níquel-cromo em forma de espiral), ferro elétrico (de mica) etc. Esses dispositivos e aparelhos elétricos foram construídos para fazer uso do efeito Joule decorrente da passagem da corrente.

## Exercícios resolvidos

**ER1.** Considerando um resistor que está sendo percorrido por corrente elétrica, que relação existe entre os elétrons livres e a resistência elétrica?

### Resolução:

Ao aplicar uma diferença de potencial nos terminais de um resistor, os elétrons livres entram em movimento ordenado, segundo determinado sentido, configurando a passagem de corrente elétrica. Como os

elétrons não podem percorrer livremente o interior do resistor, devido à colisão entre eles e sobretudo com os átomos, sua passagem é dificultada. A medida do grau dessa dificuldade é a resistência elétrica do resistor. Assim, os elétrons livres e a resistência elétrica relacionam-se de forma antagônica.

**ER2.** Calcule a intensidade de corrente que atravessa um resistor cuja resistência vale  $200 \Omega$ , sob ddp de  $100 \text{ V}$ .

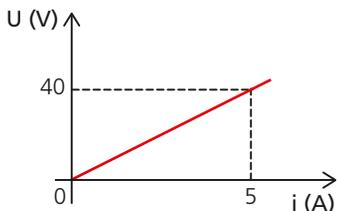
### Resolução:

São dados:  $R = 200 \Omega$ ;  $U = 100 \text{ V}$

Aplicando a 1ª Lei de Ohm:

$$U = R \cdot i \Rightarrow i = \frac{U}{R} = \frac{100}{200} \Rightarrow i = 0,5 \text{ A}$$

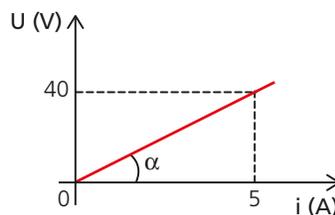
**ER3.** A curva característica de um resistor ôhmico está representada no diagrama a seguir.



Determine:

- a resistência elétrica do resistor;
- a ddp nos terminais do resistor, quando percorrido por uma corrente de 2 A.

### Resolução:



a)  $\text{tg } \alpha \stackrel{N}{=} R = \frac{40}{5} \therefore R = 8 \Omega$

b)  $U = R \cdot i = 8 \cdot 2 = 16 \Rightarrow U = 16 \text{ V}$

## Tipos de resistores

Os resistores mais comuns são os de fio e de carvão.

O primeiro tipo é constituído de um fio metálico de forma helicoidal enrolado sobre um suporte cilíndrico de material isolante — ele é utilizado nos aquecedores elétricos em geral.

O segundo tipo é composto de um suporte cilíndrico isolante recoberto por uma fina camada de carvão e ligado a dois terminais metálicos, cada um deles preso em uma de suas extremidades.

Cada resistor de carvão é identificado por um código de cores pintado em faixas coloridas, que representa o valor de sua resistência elétrica. Normalmente são quatro faixas, com cores distintas e uma posição relativa própria no resistor.

A leitura da resistência propriamente dita (as cores agrupadas próximas) deve ser feita a partir da extremidade do condutor. Uma tabela fornece o número de código para cada cor.



Resistor de fio para chuveiro.



Resistor de carvão.

### Código de cores para resistores

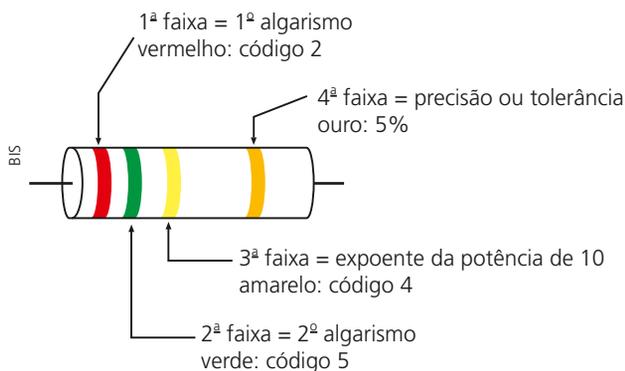
Cor	preto	marrom	vermelho	laranja	amarelo	verde	azul	violeta	cinza	branco
Código	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

As cores da primeira e da segunda faixa representam, respectivamente, os dois primeiros algarismos do valor da resistência; a da terceira indica o expoente da potência de 10 que multiplica o número formado pelos algarismos anteriores; a cor da quarta faixa, pintada próxima à outra extremidade, informa a precisão da medida da resistência, isto é, a tolerância ou margem de erro estipulada pelo fabricante (quando a tolerância for de 20%, a quarta faixa inexistente).

### Código de tolerâncias para resistores

Cor	ouro	prata	sem cor
Tolerância	$\pm 5\%$	$\pm 10\%$	$\pm 20\%$

Observe como calcular o valor da resistência elétrica do resistor apresentado a seguir.



$$R = 25 \cdot 10^4 \pm 5\% = (250\,000 \pm 12\,500) \, \Omega$$

3ª faixa (amarelo)      4ª faixa (ouro)  
 1ª faixa (vermelho)      2ª faixa (verde)

Código de cores aplicado no resistor de carvão.

Considerando-se a margem de erro, a resistência elétrica do resistor da ilustração deve estar compreendida entre  $237\,500 \, \Omega$  e  $262\,500 \, \Omega$ .

## Reostatos

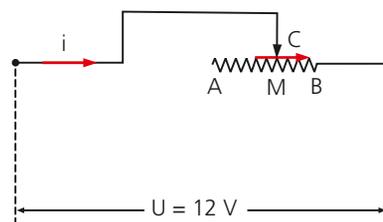


Reostato de cursor.

Reostatos são resistores que possuem resistências elétricas variáveis. Pela Primeira Lei de Ohm, aumentando a resistência do resistor, sob ddp constante, há uma diminuição da intensidade de corrente e vice-versa.

Assim, quando o botão de um rádio é girado para elevar ou baixar a intensidade sonora, está ocorrendo diminuição ou aumento da resistência elétrica no interior do aparelho.

Vejamos um exemplo: com o cursor  $C$  em  $M$ , a intensidade de corrente é de  $1 \, A$ .

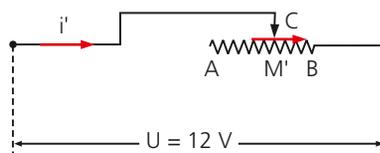


Representação de reostato em circuito elétrico.

Portanto, a resistência do resistor nessa situação vale:

$$R = \frac{U}{i} = \frac{12 \, V}{1 \, A} = 12 \, \Omega$$

Com o cursor  $C$  em  $M'$ , a intensidade de corrente  $i'$  é de  $0,75 \, A$ .

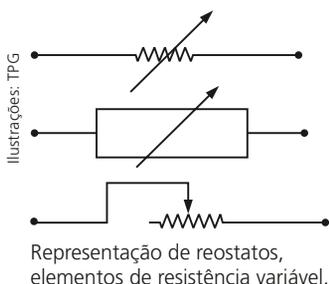


Portanto, a resistência do resistor nessa nova situação é de:

$$R' = \frac{U}{i'} = \frac{12 \, V}{0,75 \, A} = 16 \, \Omega$$

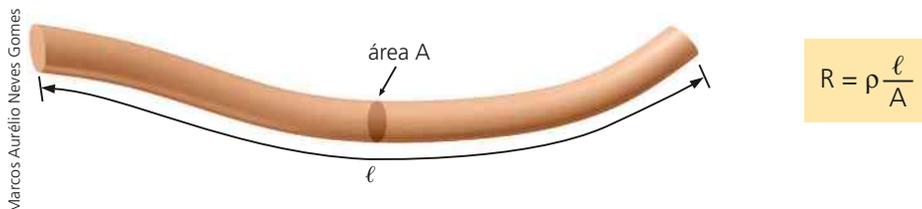
Sérgio Dotta Jr./The next

Ilustrações: TPG



## Segunda Lei de Ohm — Resistividade

A resistividade é uma grandeza característica do material de que é feito o resistor e depende também da temperatura alcançada por ele. Tendo um resistor em forma de fio, Ohm verificou experimentalmente que sua resistência elétrica  $R$  é diretamente proporcional ao seu comprimento  $\ell$  e inversamente proporcional à área  $A$  de uma seção transversal dele:



Essa expressão representa a Segunda Lei de Ohm, em que  $\rho$  (letra grega *rô*) é a constante de proporcionalidade denominada **resistividade**, grandeza que depende do material e da temperatura alcançada pelo resistor.

Como  $R = \rho \frac{\ell}{A}$ , são unidades de resistividade:

- No SI,  $\rho = \frac{1 \Omega \cdot 1 \text{ m}^2}{1 \text{ m}} = 1 \Omega \cdot \text{m}$  (ohm-metro).
- Usualmente,  $\rho = \frac{1 \Omega \cdot 1 \text{ mm}^2}{1 \text{ m}} = 1 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$  (ohm-milímetro quadrado por metro).
- Outras unidades:  $1 \Omega \cdot \text{cm}$ ,  $1 \Omega \cdot \text{cm}^2/\text{m}$ .

Nota:  $1 \Omega \cdot \text{m} = 10^6 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ .

Denomina-se condutividade elétrica  $\sigma$  (letra grega *sigma*) de um material o inverso de sua resistividade.

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

No SI:  $\sigma = \frac{1}{1 \Omega \cdot \text{m}} = 1 \frac{\Omega^{-1}}{\text{m}} = 1 \frac{\text{S}}{\text{m}}$  (siemens por metro).

### Varição da resistividade com a temperatura

A resistividade de um material modifica-se com a temperatura que ele alcança. Com a ampliação da temperatura, verifica-se uma intensificação na agitação das partículas do resistor. Isso faz com que os elétrons livres da corrente tenham um número maior de colisões, ocasionando um aumento na resistividade.

Sendo  $\rho_0$  a resistividade do resistor na temperatura  $\theta_0$  (ambiente), sua intensidade na temperatura  $\theta$  (de até 400 °C) é expressa por:

$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha(\theta - \theta_0)]$$

em que  $\alpha$  é uma constante denominada coeficiente de temperatura (unidade: °C<sup>-1</sup>), que depende da natureza do material.

Desprezando-se a dilatação térmica do resistor, sua resistência elétrica é determinada pela resistividade do material e também depende de sua temperatura, de acordo com a expressão:

$$R = R_0 [1 + \alpha(\theta - \theta_0)]$$

Sob ddp constante, um resistor metálico, ao ser aquecido, tem sua resistividade aumentada; em decorrência, eleva-se sua resistência elétrica. Assim, de acordo com a Primeira Lei de Ohm, há uma diminuição da intensidade da corrente elétrica.

A tabela abaixo fornece a resistividade a 20 °C e o coeficiente de temperatura de alguns metais.

Material	Resistividade a 20 °C (em $\Omega \cdot m$ )	Coeficiente de temperatura ( $^{\circ}C^{-1}$ )
alumínio	$2,8 \cdot 10^{-8}$	$3,9 \cdot 10^{-3}$
cobre	$1,7 \cdot 10^{-8}$	$3,9 \cdot 10^{-3}$
ferro	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$
prata	$1,6 \cdot 10^{-8}$	$3,8 \cdot 10^{-3}$
tungstênio	$5,6 \cdot 10^{-8}$	$4,5 \cdot 10^{-3}$

Fonte: LIDE, David R. (editor-chefe). *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. 90. ed. Flórida: CRC Press LCC, 2009.

## PARA SABER MAIS

### Sites

#### Resistência de um fio

Disponível em: <[http://phet.colorado.edu/sims/resistance-in-a-wire/resistance-in-a-wire\\_pt\\_BR.html](http://phet.colorado.edu/sims/resistance-in-a-wire/resistance-in-a-wire_pt_BR.html)>. Acesso em: 26 jan. 2016.

Neste simulador, é possível modificar a resistividade ( $\rho$ ), o comprimento ( $L$ ) e a área da seção transversal ( $A$ ), para alterar a resistência de um fio.

#### Primeira Lei de Ohm

Disponível em: <[http://phet.colorado.edu/sims/ohms-law/ohms-law\\_pt\\_BR.html](http://phet.colorado.edu/sims/ohms-law/ohms-law_pt_BR.html)>. Acesso em: 26 jan. 2016.

Utilize o simulador para alterar a tensão e a resistência de um circuito e ver como a Lei de Ohm se aplica a ele no cálculo da corrente no circuito.

## A FÍSICA NO COTIDIANO

### Supercondutores

Supercondutores são materiais que possuem resistividade elétrica quase nula. Neles os elétrons deslocam-se livremente, sem que haja perda de energia na forma de calor (não ocorre o efeito Joule). Como isso pode acontecer?

Vimos que a resistência elétrica dos condutores aumenta com a elevação de sua temperatura, como consequência do aumento da resistividade do material. O efeito inverso também é válido.

Dessa forma, se abaixamos a temperatura de certos materiais até próximo do zero absoluto (zero kelvin), eles se tornam supercondutores, pois suas resistividades caem praticamente a zero.

Entre os materiais supercondutores metálicos podemos citar o zinco, o cádmio, o mercúrio e o estanho, assim como os materiais cerâmicos, constituídos de uma mistura de óxidos de metais como bário, cobre, tálio, cálcio e estanho.



Trem *maglev*, Xangai, China. Sem data. O comboio flutua sobre um colchão de ar, devido a interações eletromagnéticas, sem resfriamento.

Um fenômeno interessante acontece quando um disco de material supercondutor, resfriado com nitrogênio líquido, consegue fazer levitar um magneto (pequeno ímã), devido às forças magnéticas de repulsão que passam a atuar entre eles.

Essa propriedade é chamada de levitação magnética, aplicada por exemplo no funcionamento de uma classe de trens de alta velocidade, os *maglev* (Magnetic Levitation Transport).

Os *maglev* são trens de alta velocidade que se movem sem entrar em contato com o solo, utilizando supercondutores para levitá-los e movê-los. Devido ao atrito exclusivamente com o ar, os *maglev* atingem grandes velocidades, quase 500 km/h, e causam menos impactos ambientais que outros tipos de transportes que utilizam combustíveis fósseis, inclusive aviões.

Há projetos para ampliar o uso do *maglev* em diversas partes do mundo. No Brasil, em fevereiro de 2016, começou a operar no Rio de Janeiro, como teste, o Maglev-Cobra, desenvolvido pela Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Além de causar menos impacto ambiental, o custo de implantação do *maglev* é menor do que o do metrô, por exemplo. A implantação de metrô custa de 100 a 300 milhões de reais por quilômetro, enquanto a estimativa é de que o Maglev-Cobra custe aproximadamente 33 milhões de reais por quilômetros.

## Exercícios resolvidos

**ER4.** Aplica-se a ddp de 110 V nas extremidades de um fio de 10 m de comprimento e seção transversal de área  $2,2 \text{ mm}^2$ . Sabendo que a intensidade de corrente elétrica que atravessa o fio é de 10 A, calcule a resistividade do material que o constitui.

### Resolução:

São dados:

$$U = 110 \text{ V}; \ell = 10 \text{ m}; A = 2,2 \text{ mm}^2; i = 10 \text{ A}$$

Aplicando a 1ª Lei de Ohm, temos:

$$R = \frac{U}{i} = \frac{110}{10} = 11 \Omega$$

Da 2ª Lei de Ohm:

$$\rho = \frac{R \cdot A}{\ell} = \frac{11 \cdot 2,2}{10} \Rightarrow \rho = 2,42 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$$

**ER5.** Um eletricitista quer instalar dois ventiladores de mesma potência num recinto: um situado próximo ao quadro de força; outro, na parede oposta. Para instalar o primeiro ventilador ele usou um fio de cobre de certa bitola, enquanto para o outro usou um de bitola maior. Tendo em vista a 2ª Lei de Ohm, explique o porquê desse procedimento.

### Resolução:

O quadro de força é uma caixa que contém, além do medidor de consumo de energia elétrica, os fusíveis e toda a fiação que recebe a energia elétrica que chega e é distribuída pela residência.

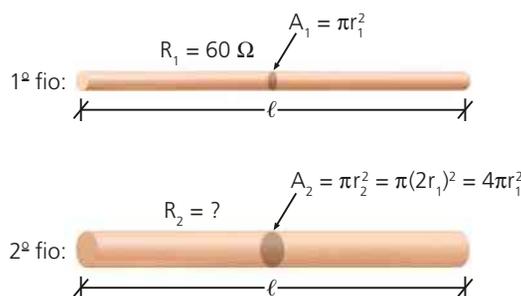
Bitola é um termo técnico de medida-padrão de alguma grandeza, aqui significando a área da seção reta do fio.

Do ponto de vista da 2ª Lei de Ohm, o eletricitista usou, ao instalar o ventilador na parede oposta ao quadro de força, o fio de bitola maior, visto que seria necessário compensar o comprimento extra dele (em relação ao do primeiro ventilador) com uma seção reta maior, para assim manter constante a resistência da fiação. Sem essa providência, ocorreria um aumento de resistência e, conseqüentemente, a diminuição da corrente elétrica, ocasionando um mau funcionamento do ventilador.

**ER6.** Um fio condutor de certo material tem resistência elétrica de  $60 \Omega$ . Qual será a resistência de outro fio de mesmo comprimento e material, mas com o dobro do raio do primeiro?

### Resolução:

$$\text{Temos: } r_2 = 2r_1$$



Marcos Aurélio Neves Gomes

Aplicando a 2ª Lei de Ohm nos dois fios e dividindo membro a membro as expressões:

$$R_1 = \rho \cdot \frac{\ell}{A_1} \text{ e } R_2 = \rho \cdot \frac{\ell}{A_2}$$

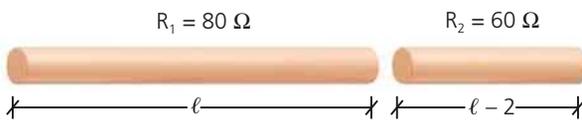
$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{\rho \cdot \frac{\ell}{A_1}}{\rho \cdot \frac{\ell}{A_2}} = \frac{A_2}{A_1} = \frac{4\pi \cdot r_1^2}{\pi \cdot r_1^2} = 4$$

$$R_2 = \frac{R_1}{4} = \frac{60}{4} \Rightarrow R_2 = 15 \Omega$$

**ER7.** A resistência elétrica de um resistor em forma de fio é de 80 Ω. Calcule o comprimento do fio, sabendo que, ao cortar 2 m dele, a resistência passa a ser de 60 Ω.

### Resolução:

Marcos Aurélio  
Neves Gomes



Aplicando a 2ª Lei de Ohm para cada uma das situações e dividindo membro a membro as expressões:

$$R_1 = \rho \cdot \frac{\ell}{A} \text{ e } R_2 = \rho \cdot \frac{(\ell - 2)}{A}$$

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{\rho \cdot \frac{\ell}{A}}{\rho \cdot \frac{(\ell - 2)}{A}} = \frac{\ell}{\ell - 2} \Rightarrow \frac{80}{60} = \frac{\ell}{\ell - 2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{4}{3} = \frac{\ell}{\ell - 2} \Rightarrow 4\ell - 8 = 3\ell \Rightarrow \ell = 8 \text{ m}$$

**ER8.** Um resistor é percorrido por uma corrente elétrica de 5,6 A, na temperatura de 20 °C. Sendo de  $4 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  o coeficiente de temperatura do material que constitui o resistor, determine a intensidade de corrente que o atravessaria sob a temperatura de 120 °C, mantida constante a tensão elétrica.

### Resolução:

São dados:

$$i_0 = 5,6 \text{ A}$$

$$\theta_0 = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\alpha = 4 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$\theta = 120 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$U = \text{cte.}$$

Sendo:

$$R = R_0 \cdot [1 + \alpha \cdot (\theta - \theta_0)]$$

$$\frac{U}{i} = \frac{U}{i_0} \cdot [1 + 4 \cdot 10^{-3} \cdot (120 - 20)]$$

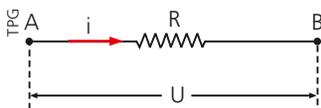
$$\frac{i_0}{i} = 1 + 4 \cdot 10^{-3} \cdot 100$$

$$\frac{5,6}{i} = 1 + 4 \cdot 10^{-1}$$

$$\frac{5,6}{i} = 1,4 \Rightarrow i = \frac{5,6}{1,4} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow i = 4,0 \text{ A}$$

## Efeito Joule



Quando um resistor é aquecido devido à passagem da corrente elétrica, diz-se que ocorre o efeito Joule. Em dado intervalo de tempo, a energia elétrica que o resistor consome é dissipada na forma de calor. Então, a potência elétrica consumida é igual à potência elétrica dissipada, ou seja:

$$P = U \cdot i$$

Substituindo-se, nessa expressão, a ddp por  $R \cdot i$  ou a corrente por  $i = \frac{U}{R}$ , temos:

$$P = (R \cdot i) \cdot i = R \cdot i^2 \therefore P = R \cdot i^2$$

Pela equação depende-se que a potência de um resistor cresce se a corrente é aumentada.

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

Assim, a potência de um resistor, sob ddp constante, aumenta quando diminui sua resistência.

Resumindo, a potência elétrica dissipada em um resistor por efeito Joule é dada por:

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

Das igualdades  $P = R \cdot i^2$  e  $P = \frac{\tau}{\Delta t}$ , obtemos:

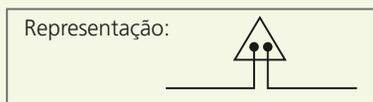
$$\frac{\tau}{\Delta t} = R \cdot i^2 \text{ ou } \tau = R \cdot i^2 \cdot \Delta t$$



## Aplicações do efeito Joule

O aquecimento de um condutor, ainda que implique perda no transporte da energia elétrica, é extremamente útil quando aproveitado em dispositivos elétricos como aquecedores, lâmpadas de filamento e fusíveis.

- Aquecedores elétricos: ferro de passar, chuveiro, torneira elétrica, torradeira, fogão elétrico, secador de cabelo etc.



Fernando Favoretto/Criar Imagens

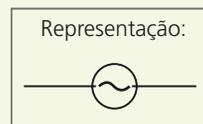
- Lâmpada de filamento: o filamento espiralado de tungstênio da lâmpada aquece até 2000 °C quando percorrido por corrente elétrica. Em temperaturas altas, os metais incandescem, isto é, emitem luz. O bulbo que protege o filamento contém gás inerte (argônio ou criptônio), que evita sua oxidação e sublimação. Uma lâmpada deve funcionar de acordo com as especificações gravadas no seu bulbo, para ter um brilho normal. Se ela for conectada numa fonte de ddp abaixo da indicada, apresentará um brilho aquém do normal e, se ligada a uma fonte de ddp maior, terá inicialmente um brilho acima do normal e, em seguida, irá “queimar” (ou seja, vai dissipar tanto calor por efeito Joule que sua temperatura se elevará até o ponto de fusão do material).



As especificações impressas nessa lâmpada são indicações ao consumidor de como ela vai funcionar: se for ligada à rede elétrica de até 127 V em corrente alternada, ela emitirá brilho equivalente a potência de 60 W.

Sérgio Dotta Jr./The next

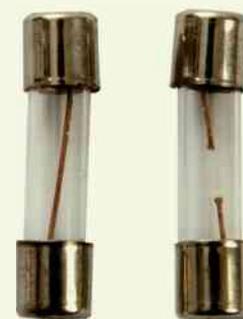
- Fusíveis: são dispositivos que servem para proteger circuitos elétricos da variação excessiva da corrente elétrica. Um fusível é constituído por um fio de estanho ou chumbo que se funde ao ser atravessado por uma corrente maior que a especificada. Existem vários tipos de fusível: de rosca, de cartucho e de lâmina.



Fusíveis de cartucho (à esquerda) e de rosca (à direita).



Fusíveis desse tipo protegem instalações elétricas de automóveis.



Quando o filamento da lâmpada se rompe ou o fio do fusível se funde, dizemos que o dispositivo “queimou”.

Fotografias: Sérgio Dotta Jr./The next

Atualmente, em muitos locais (residências, indústrias, escritórios etc.), os fusíveis são substituídos por disjuntores que cumprem a mesma função, sem, no entanto, queimarem, pois eles apenas interrompem a passagem da corrente quando ela atinge um valor limite estipulado. Quando o fusível queima ou o disjuntor se desliga, é porque houve uma sobrecarga de corrente, que poderia ter provocado um incêndio na fiação, não fosse a proteção que esses dispositivos oferecem.

## Exercícios resolvidos

**ER9.** Uma torneira elétrica tem as seguintes especificações: 1100 W – 110 V. Determine:

- a intensidade de corrente que deve circular pela sua resistência, quando corretamente utilizada;
- o valor da sua resistência.

### Resolução:

São dados:

$$P = 1100 \text{ W}$$

$$U = 110 \text{ V}$$

- a) Da expressão  $P = U \cdot i$ , temos:

$$i = \frac{P}{U} = \frac{1100}{110} \Rightarrow i = 10 \text{ A}$$

- b) Da expressão  $P = \frac{U^2}{R}$ , temos:

$$R = \frac{U^2}{P} = \frac{(110)^2}{1100} \Rightarrow R = 11 \Omega$$

**ER10.** Um aquecedor, sob ddp de 220 V, dissipa uma potência de 1000 W. Calcule:

- sua resistência elétrica;
- a potência que dissiparia, ao ser ligado numa tomada de 110 V.

### Resolução:

São dados:

$$U = 220 \text{ V}$$

$$P = 1000 \text{ W}$$

- a) Pela expressão da potência:

$$R = \frac{U^2}{P} = \frac{(220)^2}{1000} \Rightarrow R = 48,4 \Omega$$

$$b) P' = \frac{U'^2}{R} = \frac{(110)^2}{\frac{(220)^2}{1000}} = \frac{1000}{4}$$

$$\therefore P' = 250 \text{ W}$$

**ER11.** No bulbo de uma lâmpada incandescente está inscrito: 100 W – 110 V.

- Se corretamente instalada, que intensidade de corrente deve percorrer o seu filamento? Como seria o brilho?
- Qual seria a sua resistência elétrica?

- c) Se ela fosse ligada na ddp de 220 V, que intensidade de corrente atravessaria o filamento e o que aconteceria? Justifique sua resposta.

### Resolução:

Temos:

$$P = 100 \text{ W}$$

$$U = 110 \text{ V}$$

- a) Aplicando a expressão da potência dissipada:

$P = U \cdot i \Rightarrow 100 = 110 \cdot i \Rightarrow i \cong 0,9 \text{ A}$ . Com essa intensidade de corrente a lâmpada teria um brilho normal.

- b) Pela outra expressão da potência:

$$P = \frac{U^2}{R} \Rightarrow R = \frac{U^2}{P} = \frac{(110)^2}{100}$$

$$\therefore R = 121 \Omega$$

- c) Não se deve usar nenhum dispositivo elétrico fora de suas especificações. Se fosse ligada na ddp de 220 V, teríamos uma nova potência dissipada pela lâmpada:  $P' = \frac{U^2}{R}$ , onde  $U = 220 \text{ V}$  e

$R = 121 \Omega$  (a lâmpada é a mesma). Portanto,

$$P' = \frac{(220)^2}{121} = 400 \Rightarrow P' = 400 \text{ W.}$$

Assim a lâmpada seria percorrida pela corrente

$$i = \frac{P'}{U} = \frac{400}{220} \Rightarrow i \cong 1,8 \text{ A.}$$
 O filamento seria percorrido por uma corrente de aproximadamente 1,8 A, o dobro da normal.

Portanto, a lâmpada teria um brilho momentâneo acima do normal e, em seguida, queimaria.

Se uma lâmpada de 100 W – 220 V fosse conectada na ddp de 110 V, ela não queimaria, mas acenderia com um brilho abaixo do normal, pois seria atravessada por uma corrente de intensidade menor que a necessária.

Se uma lâmpada de 100 W – 220 V fosse conectada na ddp de 110 V, ela não queimaria, mas acenderia com um brilho abaixo do normal, pois seria atravessada por uma corrente de intensidade menor que a necessária.

**ER12.** Um resistor está imerso em 500 g de água, inicialmente a 20 °C. Ligando o resistor a uma fonte de ddp de 126 V, verifica-se que a água começa a ferver em 5 minutos. Desprezando as perdas de calor para o ambiente, determine a resistência do resistor. Dados: calor específico da água:  $c = 1 \text{ cal/g } ^\circ\text{C}$ ;  $1 \text{ cal} = 4,2 \text{ J}$ .

## Resolução:

São dados:

$$m = 500 \text{ g}$$

$$\theta_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$U = 126 \text{ V}$$

$$\Delta t = 5 \text{ min} = 300 \text{ s}$$

$\theta = 100 \text{ }^\circ\text{C}$  (temperatura de ebulição da água sob pressão normal)

Pela equação fundamental da Calorimetria:

$$Q = m \cdot c \cdot (\theta - \theta_0) = 500 \cdot 1 \cdot (100 - 20) = 500 \cdot 80 \Rightarrow \\ \Rightarrow Q = 40\,000$$

$$\text{Então, } Q = 4 \cdot 10^4 \text{ cal ou } 168 \cdot 10^3 \text{ J.}$$

Como não há perda de calor, a potência elétrica dissipada pelo resistor é totalmente utilizada para aquecer a água. Portanto:

$$P = \frac{Q}{\Delta t} \Rightarrow R = \frac{U^2 \cdot \Delta t}{Q} = \frac{(126)^2 \cdot 300}{40\,000 \cdot 4,2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow R = 28,35 \text{ } \Omega$$



## Associação de resistores

Uma associação de resistores consiste de resistores ligados ao mesmo circuito. Em uma residência, lâmpadas e diversos aparelhos elétricos formam uma associação de resistores.



Neste trecho de circuito vemos uma associação de resistores. A corrente que atravessa o trecho AB só pode fazê-lo de uma maneira. Para atravessar o trecho CD, a corrente vai se dividir.

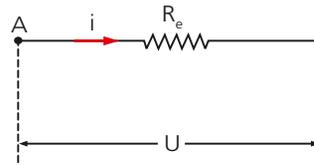
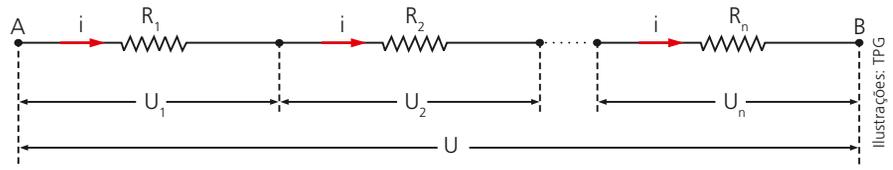
Os resistores podem ser associados em série, em paralelo ou de forma mista.

Qualquer que seja o tipo de associação, existe sempre um resistor “único”, de resistência equivalente ( $R_e$ ), que tem o valor correspondente a todos os resistores componentes da associação. Esse resistor é chamado resistor equivalente, e a resistência equivalente é o valor da resistência que, substituindo todos os resistores do conjunto, deixa passar a mesma corrente.

## Associação em série

Nesse tipo de associação, todos os resistores devem ser percorridos pela mesma intensidade de corrente. Entretanto, as ddps entre os extremos de cada um serão

diferentes, se os resistores associados forem diferentes. Abaixo, temos  $n$  resistores de resistências, respectivamente,  $R_1, R_2, \dots, R_n$  associados em série.



Verifica-se que a ddp total da associação é a soma das ddp's parciais devidas a cada resistor:

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$$

Aplicando a Primeira Lei de Ohm em cada resistor associado e somando os termos membro a membro, temos:

$$\begin{aligned} U_1 &= R_1 \cdot i \\ U_2 &= R_2 \cdot i \\ &\dots + \\ U_n &= R_n \cdot i \end{aligned}$$

$$U_1 + U_2 + \dots + U_n = R_1 \cdot i + R_2 \cdot i + \dots + R_n \cdot i \Rightarrow U = (R_1 + R_2 + \dots + R_n) \cdot i \quad (I)$$

Aplicando a Primeira Lei de Ohm no resistor equivalente, temos:

$$U = R_e \cdot i \quad (II)$$

Da igualdade das expressões (I) e (II), obtém-se:

$$R_e \cdot i = (R_1 + R_2 + \dots + R_n) \cdot i \Rightarrow R_e = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$

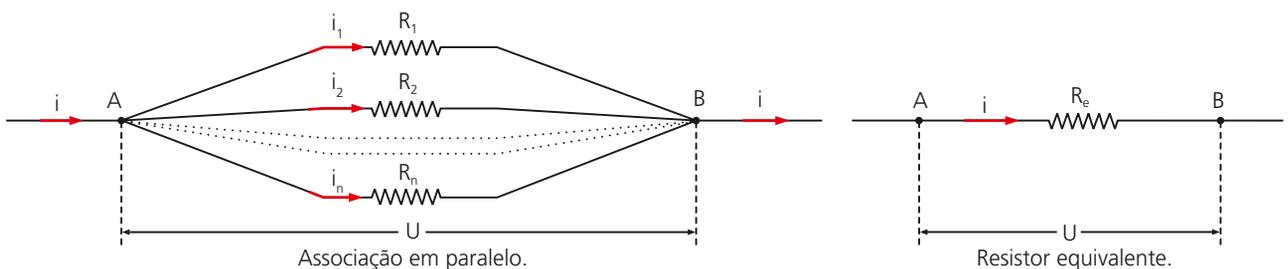
Essa é a expressão para se calcular a resistência equivalente de uma associação em série de resistores.

Quando  $n$  resistores iguais, de resistência  $R$  cada, estiverem associados em série, a resistência equivalente será:

$$R_e = \overbrace{R + R + \dots + R}^{n \text{ vezes}} = n \cdot R$$

## Associação em paralelo

Nesse tipo de associação, todos os resistores devem estar sob a mesma ddp. Entretanto, as intensidades de corrente que atravessam cada resistor são diferentes, desde que os resistores associados não sejam iguais. Na figura, temos  $n$  resistores, de resistências  $R_1, R_2, \dots, R_n$ , associados em paralelo.



Denomina-se nó o ponto de encontro de dois ou mais resistores associados em paralelo. Nele, as correntes se subdividem, em intensidades que dependem das resistências individuais. Nesse caso, os nós também são terminais da associação.

Verifica-se que a intensidade total de corrente em um nó é a soma das que atravessam cada resistor:

$$i = i_1 + i_2 + \dots + i_n$$

Aplicando a Primeira Lei de Ohm em cada resistor associado, isolando as correntes e somando-as membro a membro, obtém-se:

$$\begin{aligned} U &= R_1 \cdot i_1 \Rightarrow i_1 = \frac{U}{R_1} \\ U &= R_2 \cdot i_2 \Rightarrow i_2 = \frac{U}{R_2} \\ &\quad \vdots \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad + \\ U &= R_n \cdot i_n \Rightarrow i_n = \frac{U}{R_n} \\ \hline i_1 + i_2 + \dots + i_n &= \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \dots + \frac{U}{R_n} \\ i &= U \cdot \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \right) \text{ (I)} \end{aligned}$$

Aplicando a Primeira Lei de Ohm ao resistor equivalente:

$$U = R_e \cdot i \Rightarrow i = \frac{U}{R_e} \text{ (II)}$$

Da igualdade das expressões (I) e (II), temos:

$$\frac{U}{R_e} = U \cdot \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \right) \therefore \frac{1}{R_e} = \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \right)$$

Essa é a expressão utilizada para calcular a resistência equivalente de uma associação em paralelo de resistores.

- Quando dois resistores, de resistências  $R_1$  e  $R_2$ , estiverem associados em paralelo, a resistência equivalente será:

$$\frac{1}{R_e} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{R_2 + R_1}{R_2 \cdot R_1} \therefore R_e = \frac{R_2 \cdot R_1}{R_2 + R_1}$$

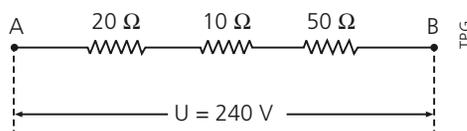
- Quando  $n$  resistores iguais, de resistência  $R$  cada, estiverem associados em paralelo, a resistência equivalente será:

$$\frac{1}{R_e} = \left( \frac{1}{R} + \frac{1}{R} + \dots + \frac{1}{R} \right) = \frac{\overbrace{1 + 1 + \dots + 1}^{n \text{ vezes}}}{R} = \frac{n}{R} \therefore R_e = \frac{R}{n}$$

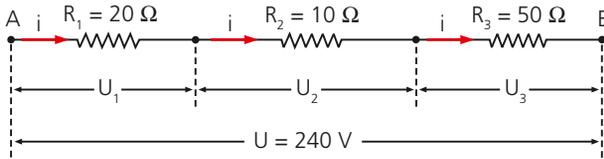
## Exercícios resolvidos

**ER13.** Dada a associação em série de resistores, determine:

- a resistência equivalente da associação;
- a intensidade de corrente na associação;
- a ddp em cada resistor da associação.



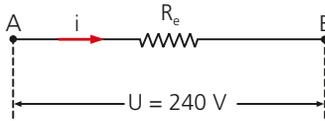
### Resolução:



a) A resistência equivalente é:

$$R_e = R_1 + R_2 + R_3 = 20 + 10 + 50 \Rightarrow R_e = 80 \Omega$$

b) Aplicando a 1ª Lei de Ohm no resistor equivalente:



$$U = R_e \cdot i \Rightarrow i = \frac{U}{R_e} = \frac{240}{80} \Rightarrow i = 3 \text{ A}$$

c) Aplicando a 1ª Lei de Ohm para cada resistor da associação:

$$\begin{aligned} U_1 &= R_1 \cdot i = 20 \Omega \cdot 3 \text{ A} = 60 \text{ V} \\ U_2 &= R_2 \cdot i = 10 \Omega \cdot 3 \text{ A} = 30 \text{ V} \\ U_3 &= R_3 \cdot i = 50 \Omega \cdot 3 \text{ A} = 150 \text{ V} \end{aligned}$$

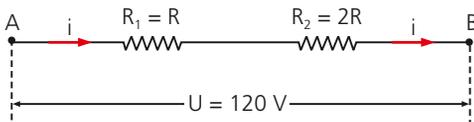
**ER14.** A potência elétrica total dissipada pela associação esquematizada é de 480 W.



Sabendo que entre os terminais A e B está aplicada uma ddp de 120 V, calcule:

- a intensidade de corrente na associação;
- a resistência equivalente da associação;
- o valor da resistência de cada resistor.

### Resolução:



a) A potência elétrica total dissipada pela associação, de 480 W, é a do resistor equivalente. Assim:

$$\begin{aligned} P &= U \cdot i \Rightarrow i = \frac{P}{U} = \frac{480}{120} \Rightarrow \\ &\Rightarrow i = 4 \text{ A} \end{aligned}$$

b) Pela 1ª Lei de Ohm:

$$\begin{aligned} U &= R_e \cdot i \Rightarrow R_e = \frac{U}{i} = \frac{120}{4} \Rightarrow \\ &\Rightarrow R_e = 30 \Omega \end{aligned}$$

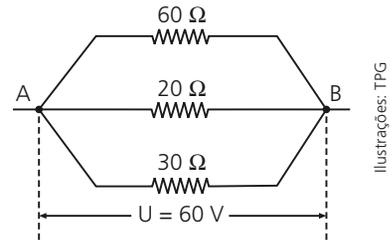
c) A resistência equivalente é:

$$R_e = R_1 + R_2 \Rightarrow 30 = R + 2R \Rightarrow$$

$$\Rightarrow R = 10 \Omega$$

$$\therefore R_1 = 10 \Omega \text{ e } R_2 = 20 \Omega$$

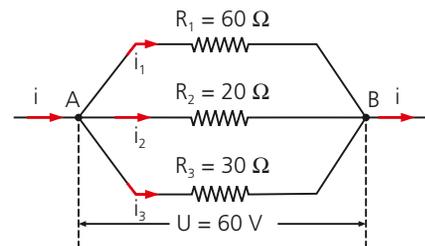
**ER15.** Dada a associação de resistores a seguir:



Determine:

- a resistência equivalente da associação;
- a intensidade de corrente em cada resistor;
- a intensidade total de corrente da associação.

### Resolução:



a) Aplicando a expressão da resistência equivalente:

$$\begin{aligned} \frac{1}{R_e} &= \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \Rightarrow \frac{1}{R_e} = \frac{1}{60} + \frac{1}{20} + \frac{1}{30} \Rightarrow \\ &\Rightarrow \frac{1}{R_e} = \frac{(1+3+2)}{60} = \frac{1}{10} \Rightarrow R_e = 10 \Omega \end{aligned}$$

b) Aplicando a 1ª Lei de Ohm em cada resistor:

$$i_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{60}{60} \Rightarrow i_1 = 1 \text{ A}$$

$$i_2 = \frac{U}{R_2} = \frac{60}{20} \Rightarrow i_2 = 3 \text{ A}$$

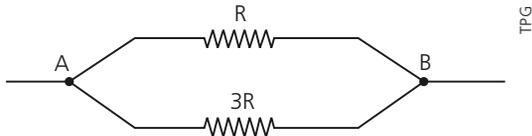
$$i_3 = \frac{U}{R_3} = \frac{60}{30} \Rightarrow i_3 = 2 \text{ A}$$

c) A corrente total é:

$$i = i_1 + i_2 + i_3 = 1 + 3 + 2 \Rightarrow i = 6 \text{ A}$$

Observe que resistores ligados à mesma ddp serão atravessados por correntes de intensidades inversamente proporcionais aos respectivos valores de resistência.

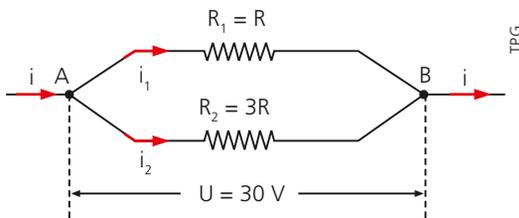
**ER16.** A potência elétrica dissipada no resistor  $R$ , da figura, é de 45 W, e a ddp entre os pontos  $A$  e  $B$  da associação é de 30 V.



Calcule:

- a intensidade total de corrente na associação;
- a resistência equivalente da associação.

### Resolução:



a) Como  $P_1 = 45 \text{ W}$ , temos:

$$P_1 = U \cdot i_1 \Rightarrow i_1 = \frac{P_1}{U} = \frac{45}{30} \Rightarrow i_1 = 1,5 \text{ A}$$

Pela 1ª Lei de Ohm:

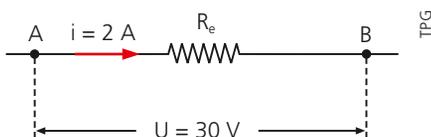
$$R_1 = \frac{U}{i_1} = \frac{30}{1,5} = 20 \Rightarrow R_1 = R = 20 \Omega$$

Portanto:  $R_2 = 3R = 3 \cdot 20 \Rightarrow R_2 = 60 \Omega$

$$i_2 = \frac{U}{R_2} = \frac{30}{60} \Rightarrow i_2 = 0,5 \text{ A}$$

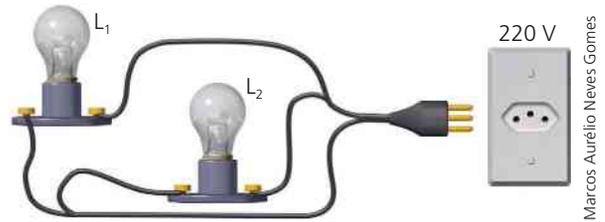
$$\text{Assim: } i = i_1 + i_2 = 1,5 \text{ A} + 0,5 \text{ A} = 2 \text{ A}$$

b) Aplicando a 1ª Lei de Ohm no resistor equivalente:



$$U = R_e \cdot i \Rightarrow R_e = \frac{U}{i} = \frac{30 \text{ V}}{2 \text{ A}} = 15 \Omega$$

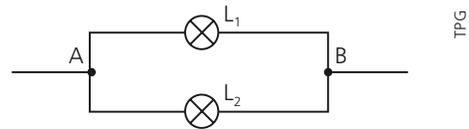
**ER17.** Duas lâmpadas,  $L_1$  e  $L_2$ , são associadas em paralelo, conforme a figura. No bulbo da lâmpada  $L_1$  está gravado 60 W – 120 V; no de  $L_2$ , 100 W – 220 V.



Marcos Aurélio Neves Gomes

- Determine a resistência equivalente da associação.
- Se o plugue for ligado a uma tomada de 220 V, o que ocorrerá com as lâmpadas?

### Resolução:



$$L_1 \begin{cases} P_1 = 60 \text{ W} \\ U_1 = 120 \text{ V} \end{cases}$$

$$L_2 \begin{cases} P_2 = 100 \text{ W} \\ U_2 = 220 \text{ V} \end{cases}$$

a) As resistências das lâmpadas são:

$$R_1 = \frac{(U_1)^2}{P_1} = \frac{(120)^2}{60} \Rightarrow R_1 = 240 \Omega$$

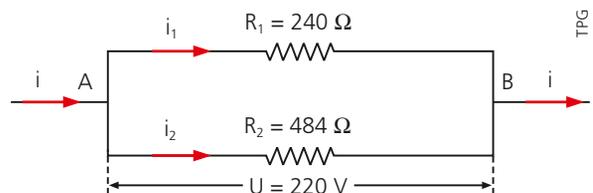
$$R_2 = \frac{(U_2)^2}{P_2} = \frac{(220)^2}{100} \Rightarrow R_2 = 484 \Omega$$

Na associação dos dois resistores em paralelo:

$$R_e = \frac{(R_1 \cdot R_2)}{(R_1 + R_2)} = \frac{(240 \cdot 484)}{(240 + 484)} = \frac{116160}{724}$$

$$\therefore R_e \cong 160,4 \Omega$$

b) Esquematizando a associação com o plugue ligado a uma tomada de 220 V, temos:



De acordo com as especificações das lâmpadas, se corretamente ligadas, elas devem ser percorridas pelas correntes  $i_1$  e  $i_2$ :

$$L_1 \begin{cases} U_1 = 120 \text{ V} \\ R_1 = 240 \ \Omega \end{cases} \Rightarrow i_1 = \frac{U_1}{R_1} = \frac{120}{240} \Rightarrow i_1 = 0,5 \text{ A}$$

$$L_2 \begin{cases} U_2 = 220 \text{ V} \\ R_2 = 484 \ \Omega \end{cases} \Rightarrow i_2 = \frac{U_2}{R_2} = \frac{220}{484} \Rightarrow i_2 \cong 0,45 \text{ A}$$

Pela ligação efetuada, temos:

$$\text{Lâmpada } L_1: i'_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{220}{240} \Rightarrow i'_1 \cong 0,92 \text{ A}$$

$$\text{Lâmpada } L_2: i'_2 = \frac{U}{R_2} = \frac{220}{484} \Rightarrow i'_2 \cong 0,45 \text{ A}$$

Desse modo, a lâmpada  $L_1$  será atravessada pela corrente  $i'_1 \cong 0,92 \text{ A}$  (maior que  $i_1 = 0,5 \text{ A}$ , a corrente permitida). Portanto, ela terá inicialmente um brilho acima do normal para, em seguida, “queimar”. A lâmpada  $L_2$  será percorrida pela corrente  $i'_2 \cong 0,45 \text{ A}$ , que é igual a  $i_2$  permitida; portanto, ela acenderá com brilho normal.

Resumindo:

Lâmpada  $L_1$ : apagará (pois “queimará”).  
Lâmpada  $L_2$ : acenderá com brilho normal.

## Associação mista

Nesse tipo de associação, os resistores estão reunidos de tal forma que podem conter associações em série e em paralelo. Para achar a resistência equivalente de uma associação mista, adota-se um recurso: simplificar por etapas a associação dada, até se chegar ao resistor equivalente final.

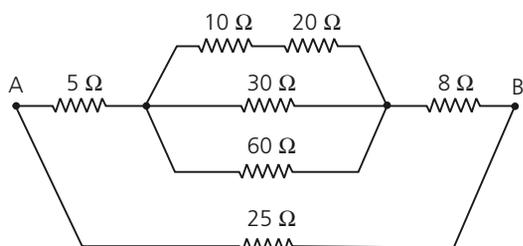
Para obter a resistência equivalente final, adotamos as seguintes regras práticas:

- Nomear com letras todos os nós da associação.
- Substituir por um resistor equivalente os resistores que estiverem associados em série ou em paralelo, desde que estejam entre dois nós consecutivos ou entre um terminal e um nó consecutivo. Redesenha-se o esquema, colocando o resistor equivalente.
- Repete-se a operação anterior, tantas vezes quantas forem necessárias, sempre desenhando o novo esquema. O resistor equivalente final é aquele que fica entre os terminais da associação.

## Exercícios resolvidos

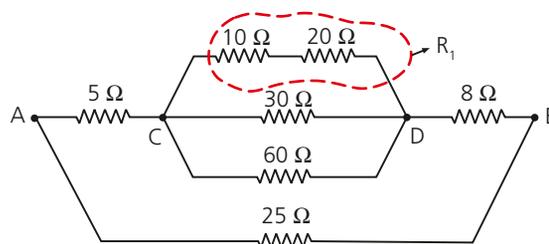
**ER18.** Determine a resistência equivalente entre os terminais A e B, da associação representada na figura abaixo.

Ilustrações: TPG



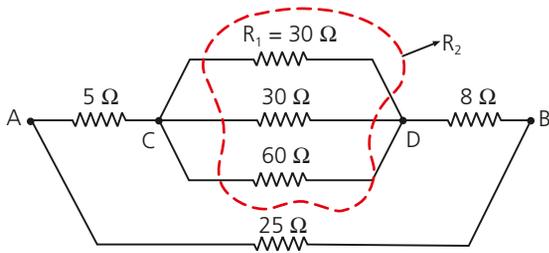
### Resolução:

Colocamos as letras C e D nos nós internos da associação. Entre eles, os resistores de 10 Ω e 20 Ω estão associados em série. A resistência equivalente a eles é:



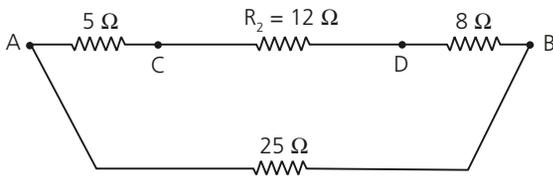
$$R_1 = 10 + 20 \Rightarrow R_1 = 30 \ \Omega$$

Redesenhando, temos agora entre os nós C e D, associados em paralelo, dois resistores de 30 Ω e um de 60 Ω, cuja resistência equivalente é apresentada na página a seguir:



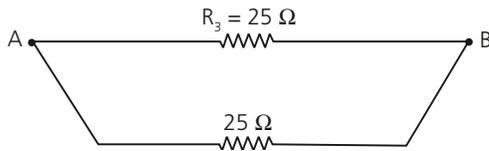
$$\frac{1}{R_2} = \frac{1}{30} + \frac{1}{30} + \frac{1}{60} = \frac{5}{60} \Rightarrow R_2 = 12 \Omega$$

Simplificando a associação, ficam entre os terminais A e B, associados em série, os resistores de 5 Ω, 12 Ω e 8 Ω, cuja resistência equivalente é:



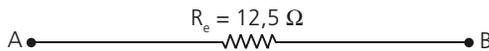
$$R_3 = 5 + 12 + 8 \Rightarrow R_3 = 25 \Omega$$

Voltando a simplificar a associação, restam entre os terminais A e B, associados em paralelo, dois resistores de 25 Ω.

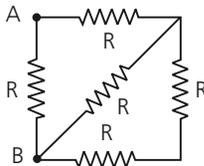


Portanto, a resistência equivalente final da associação é:

$$R_e = \frac{25}{2} \Rightarrow R_e = 12,5 \Omega$$

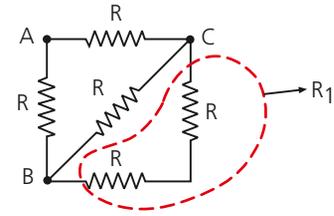


**ER19.** Dada a associação da figura, calcule a resistência equivalente entre os terminais A e B.



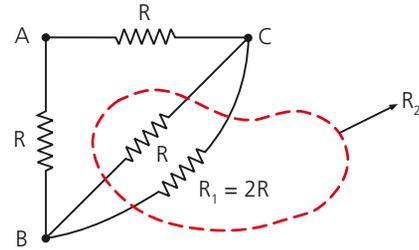
**Resolução:**

Coloca-se a letra C no nó não identificado. Entre o terminal B e o nó C existem dois resistores R, associados em série. A resistência equivalente é:



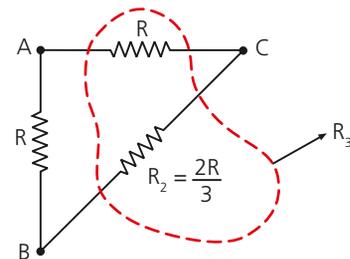
$$R_1 = R + R = 2R$$

Redesenhando a associação, há entre B e C, associados em paralelo, os resistores R e 2R. Calculando-se o resistor equivalente a eles:



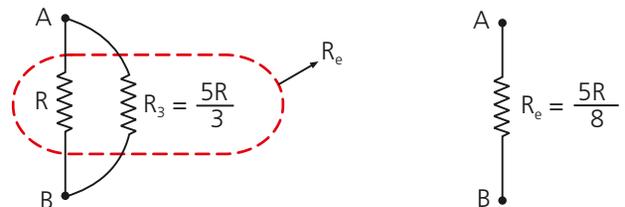
$$R_2 = \frac{R \cdot 2R}{R + 2R} = \frac{2R^2}{3R} = \frac{2R}{3}$$

Simplificando a associação, permanecem entre A e B os resistores R e  $\frac{2R}{3}$ , associados em série. A resistência equivalente a eles é:



$$R_3 = R + \frac{2R}{3} = \frac{3R + 2R}{3} = \frac{5R}{3}$$

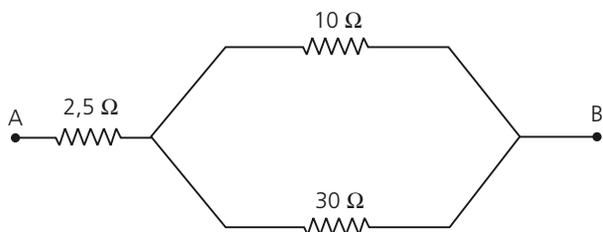
Redesenhando, temos finalmente entre os terminais A e B, associados em paralelo, os resistores R e  $\frac{5R}{3}$ . Portanto, a resistência equivalente da associação dada é:



$$\frac{1}{R_e} = \frac{1}{R} + \frac{1}{\frac{5R}{3}} = \frac{1}{R} + \frac{3}{5R} = \frac{5+3}{5R} \Rightarrow R_e = \frac{5R}{8}$$

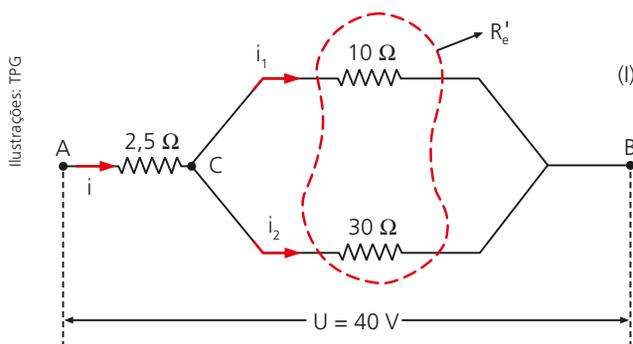
**ER20.** Dada a associação da figura, sabe-se que a ddp, entre os pontos *A* e *B*, vale 40 V. Determine:

- a resistência equivalente da associação;
- a intensidade total da corrente na associação;
- as intensidades da corrente nos resistores de 10 Ω e 30 Ω.



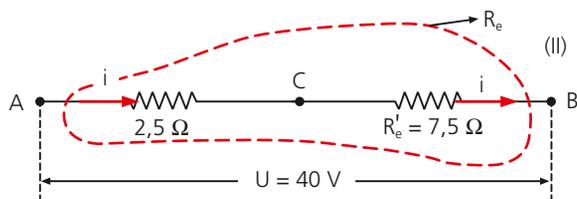
### Resolução:

- Entre os pontos *C* e *B*, os resistores de 10 Ω e 30 Ω estão associados em paralelo. Portanto, calculando a resistência equivalente, temos:



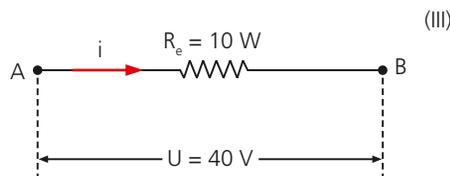
$$R'_e = \frac{(10 \cdot 30)}{(10 + 30)} = 7,5 \Rightarrow R'_e = 7,5 \Omega$$

Assim, no novo esquema há entre os extremos *A* e *B*, associados em série, os resistores de 2,5 Ω e 7,5 Ω.



A resistência equivalente será:

$$R_e = 2,5 + 7,5 \Rightarrow R_e = 10 \Omega$$



- Determina-se a intensidade total da corrente aplicando a 1ª Lei de Ohm no resistor equivalente (esquema III):

$$i = \frac{U}{R_e} = \frac{40}{10} \Rightarrow i = 4 \text{ A}$$

- Para determinar as intensidades da corrente nos resistores de 10 Ω e 30 Ω, deve-se encontrar a ddp entre os pontos *C* e *B*. No esquema II:

$$U_{CB} = R'_e \cdot i = 7,5 \cdot 4 \Rightarrow U_{CB} = 30 \text{ V}$$

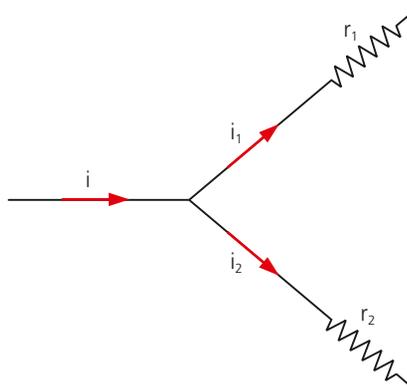
Portanto, pelo esquema I:

$$i_1 = \frac{U_{CB}}{10} = \frac{30}{10} \Rightarrow i_1 = 3 \text{ A}$$

$$i_2 = \frac{U_{CB}}{30} = \frac{30}{30} \Rightarrow i_2 = 1 \text{ A}$$

## Curto-circuito em um resistor

Observe abaixo o trecho de um circuito. Vamos considerar que  $r_1 < r_2$ , então é certo que  $i = i_1 + i_2$  e  $i_1 > i_2$ ; no caso particular em que  $r_1 = \frac{r_2}{2}$ , teremos  $i_1 = 2i_2$ ; para o caso geral, quanto menor for  $r_1$ , maior será  $i_1$ , e  $i = i_1 + i_2$ .



O que acontecerá, então, no caso em que  $r_1$  é tão pequeno que pode ser considerado nulo?

Diz-se que um resistor está em curto-circuito quando a ele é associado em paralelo outro resistor de resistência elétrica desprezível ( $R' = 0$ ). Nessas condições, a corrente elétrica  $i$  que inicialmente atravessava o resistor  $R$  é totalmente desviada para o novo resistor  $R'$ .

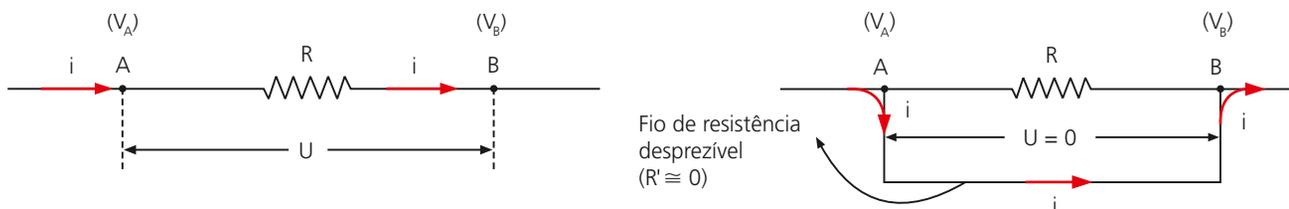
Este fato está de acordo com o outro fato já conhecido de a corrente ser inversamente proporcional à resistência do trecho.

Aplicando a Primeira Lei de Ohm no resistor curto-circuitado, temos:

$$U = R' \cdot i$$

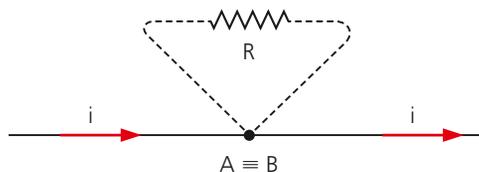
$$V_A - V_B = 0 \Rightarrow V_A = V_B$$

Conclui-se, assim, que se um resistor estiver em curto-circuito seus terminais estarão sob o mesmo potencial elétrico e ele deixará de funcionar.



Resistor  $R$  normal. A corrente  $i$  atravessa  $R$ .

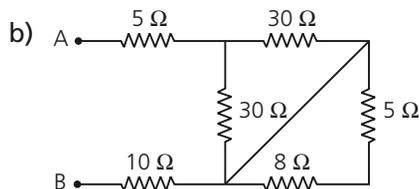
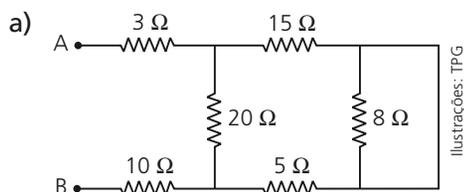
Para resolver uma associação de resistores onde há curto-circuito, deve-se seguir as regras práticas apresentadas anteriormente, tomando o cuidado de modificar e redesenhar o esquema, fazendo coincidirem os pontos (nós) em curto.



Resistor  $R$  em curto-circuito. A corrente  $i$  não atravessa  $R$ , pois desvia-se para  $R'$ .

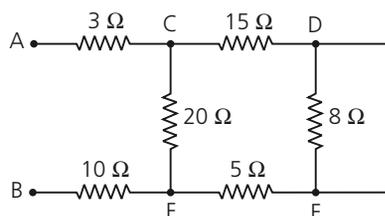
## Exercícios resolvidos

**ER21.** Determine a resistência equivalente entre os terminais  $A$  e  $B$  de cada uma das associações a seguir:

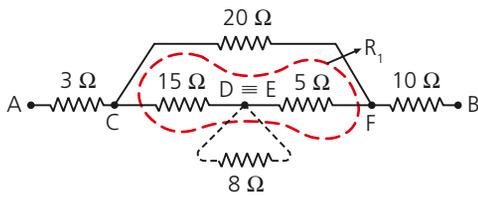


### Resolução:

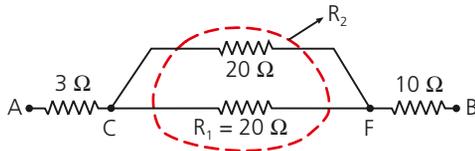
a) Identificando cada nó da associação, verifica-se que os pontos  $D$  e  $E$  estão em curto-circuito; portanto,  $D \equiv E$ .



Redesenhando a associação, com os nós  $D$  e  $E$  coincidentes ( $D \equiv E$ ), e calculando a resistência equivalente entre os resistores de  $5 \Omega$  e  $15 \Omega$ , em série, temos:

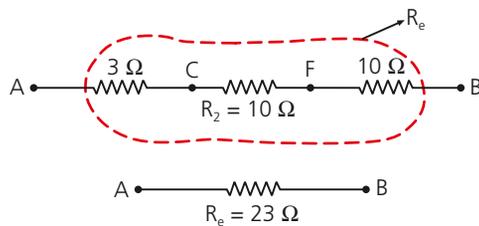


Redesenhando o esquema e calculando a resistência equivalente dos dois resistores de  $20 \Omega$ , em paralelo:

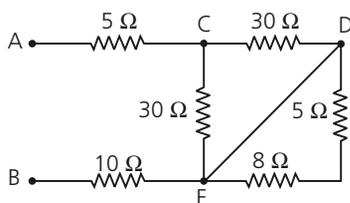


$$R_2 = \frac{20}{2} \Rightarrow R_2 = 10 \Omega$$

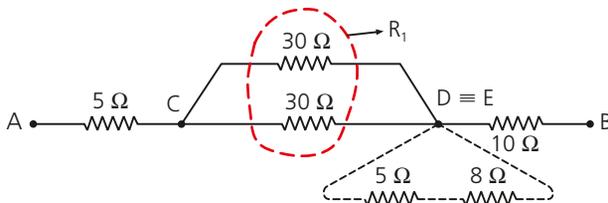
Finalmente, entre os terminais  $A$  e  $B$  todos os resistores estão associados em série. Assim, a resistência equivalente da associação é:



- b) Nomeando cada um dos nós da associação, verifica-se que os pontos  $D$  e  $E$  estão em curto-circuito. Portanto:  $D \equiv E$ .



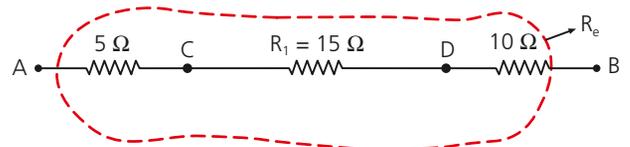
Refazendo a figura:



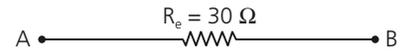
Entre  $C$  e  $D$  (resistores em paralelo), a resistência equivalente é:

$$R_1 = \frac{30}{2} \Rightarrow R_1 = 15 \Omega$$

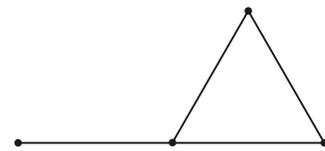
Entre os terminais  $A$  e  $B$ , os três resistores estão associados em série. Portanto, a resistência equivalente é:



$$R_e = 5 + 15 + 10 \Rightarrow R_e = 30 \Omega$$



**ER22.** Um fio homogêneo de comprimento  $\ell$  tem resistência  $R = 120 \Omega$ . Dividindo o fio em quatro partes iguais e associando-as como mostra a figura, determine a resistência equivalente dessa associação.

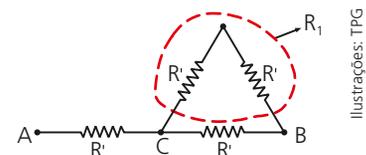


**Resolução:**

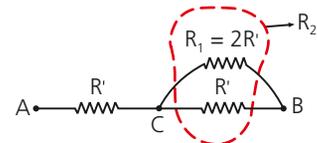
Como todo o fio possui resistência  $R = \rho \cdot \frac{\ell}{A} = 120 \Omega$ , cada pedaço do fio terá:

$$R' = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot \frac{\ell}{A} = \frac{1}{4} \cdot 120 \Rightarrow R' = 30 \Omega$$

Assim, a associação fica:

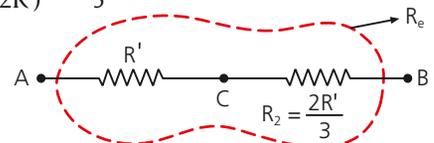


A resistência equivalente à série entre os pontos  $C$  e  $B$  é:  $R_1 = 2R'$



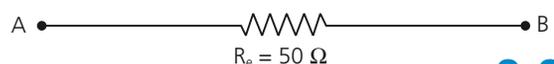
A resistência equivalente final entre os pontos  $C$  e  $B$  é:

$$R_2 = \frac{(R' \cdot 2R')}{(R' + 2R')} = \frac{2R'}{3}$$



Portanto, a resistência equivalente da associação é:

$$R_e = R' + \frac{2R'}{3} = \frac{5R'}{3} = \frac{5 \cdot 30}{3} \Rightarrow R_e = 50 \Omega$$



## Verificando associações de resistores

Nesta atividade, você vai testar as propriedades vistas no capítulo sobre associação de resistores.



### Material

- quatro pilhas de 1,5 V
- suporte para 4 pilhas (6 V)
- um galvanômetro, também chamado amperímetro ou medidor de corrente
- dois resistores de  $100\ \Omega$  cada
- uma lâmpada incandescente de 2,2 V
- um metro de fio de cobre



Fotografias: Eduardo Santalhestra



### Procedimento

- Montem um circuito (A) com um dos resistores e meçam a intensidade da corrente.
- Use agora os dois resistores em série (B) e meçam novamente a corrente.
- Montem, agora, um terceiro circuito (C) com os resistores em paralelo. Meçam mais uma vez a corrente.

### Discussão

- O que ocorre com os valores medidos em cada caso? Por quê?
- De que maneira você pode montar um circuito de modo a medir a resistência interna da lâmpada? Seu circuito usa os resistores? Em série ou em paralelo?

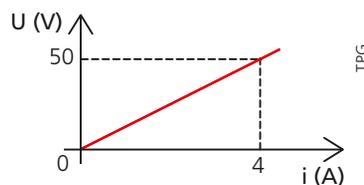
Ver Orientações Didáticas.

## Exercícios propostos

**EP1.** Faça uma análise matemática das grandezas envolvidas na Primeira Lei de Ohm. *Resposta nas Orientações Didáticas.*

**EP2.** Certo dispositivo elétrico sob ddp de 110 V é percorrido por uma corrente de intensidade 200 mA. Determine o valor da sua resistência elétrica. **550  $\Omega$**

**EP3.** Um resistor ôhmico possui a curva característica do diagrama a seguir.



- Determine o valor da sua resistência elétrica. **12,5  $\Omega$**
- Que intensidade de corrente atravessa o resistor sob a ddp de 2,5 V? **0,2 A**

**EP4.** Qual é a razão para que os resistores de fio em geral, como o filamento da lâmpada incandescente e as resistências de aquecedores, sejam espiralados?

Resposta nas Orientações Didáticas.

**EP5.** Um eletrotécnico encomendou um resistor de carvão de resistência elétrica  $6\,000\ \Omega$ . Assim que o produto chegou, ele verificou que as cores das faixas eram, respectivamente, na ordem: azul, amarelo, vermelho e prata. Consultando os códigos das tabelas, responda se o eletrotécnico recebeu a encomenda certa ou não. Justifique. Resposta nas Orientações Didáticas.

Cor	Código		
preto	0		
marrom	1		
vermelho	2		
laranja	3		
amarelo	4		
verde	5		
azul	6	Cor	Tolerância
violeta	7	ouro	$\pm 5\%$
cinza	8	prata	$\pm 10\%$
branco	9	sem cor	$\pm 20\%$

**EP6.** O que é um reostato e para que serve?

Resposta nas Orientações Didáticas.

**EP7.** A 2ª Lei de Ohm diz que a resistência elétrica de um fio condutor é diretamente proporcional ao seu comprimento e inversamente proporcional à área de sua seção transversal. Que relação deve existir entre essas duas grandezas para que não haja variação na resistência? Resposta nas Orientações Didáticas.

**EP8.** Temos 400 m de fio de cobre cuja bitola é de  $2\ \text{mm}^2$ . Considerando para a resistividade do cobre, a  $10\ ^\circ\text{C}$ , o valor de  $1,6 \cdot 10^{-8}\ \Omega \cdot \text{m}$ , calcule:

- o valor da resistência elétrica desse fio, a  $10\ ^\circ\text{C}$ ;  $3,2\ \Omega$
- a bitola que deve ter 200 m de fio de cobre para manter-se o mesmo valor da resistência encontrada no item anterior.  $1\ \text{mm}^2$

**EP9.** A resistência elétrica de um resistor em forma de fio é de  $100\ \Omega$ . Calcule o comprimento desse fio, sabendo que ao cortar 4 m dele a resistência passa a valer  $75\ \Omega$ .  $16\ \text{m}$

**EP10.** Sob ddp de 220 V, um fio de cobre com 2 km de extensão e  $3,4\ \text{mm}^2$  de seção reta conduz energia elétrica. Sendo de  $1,7 \cdot 10^{-2}\ \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$  a resistividade do cobre, determine a intensidade de corrente que percorre o fio.  $22\ \text{A}$

**EP11.** Um resistor é atravessado por uma corrente de 9,0 A, na temperatura de  $20\ ^\circ\text{C}$ . Sendo de  $5 \cdot 10^{-3}\ ^\circ\text{C}^{-1}$  o coeficiente de temperatura do material que constitui o resistor e mantida constante a ddp em seus terminais, determine a intensidade de corrente que o percorrerá na temperatura de  $120\ ^\circ\text{C}$ .  $6\ \text{A}$

**EP12.** Uma dona de casa passa roupa com um ferro elétrico a vapor de 1 200 W sob ddp de 220 V.

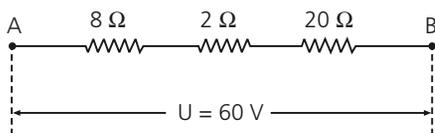
- Determine a resistência elétrica desse ferro.  $40,3\ \Omega$
- Que intensidade de corrente está percorrendo a resistência?  $5,5\ \text{A}$
- Se a dona de casa tivesse errado de tomada e estivesse passando a roupa na ddp de 110 V, que potência o ferro dissiparia?  $300\ \text{W}$

**EP13.** A água ferve a temperaturas diferentes, dependendo da altitude da localidade (ver quadro a seguir). Um *chef* de cozinha da cidade de São Paulo quer aquecer 10 litros de água a  $17\ ^\circ\text{C}$  até o começo da ebulição (fervura), com um aquecedor elétrico onde está inscrito: 220 V – 2 200 W. Dados da água: densidade  $d = 1,0\ \text{kg/L}$ , calor específico  $c = 1,0\ \text{cal/g} \cdot ^\circ\text{C}$ . Considere  $1,0\ \text{cal} = 4,2\ \text{J}$ .

Localidade	Altitude em relação ao nível do mar (m)	Temperatura aproximada de ebulição da água ( $^\circ\text{C}$ )
Rio de Janeiro	0	100
São Paulo	750	97
Campos do Jordão	1 628	95
Cidade do México	2 240	92
La Paz	3 636	88
Monte Kilimanjaro	5 895	82
Monte Everest	8 848	70

- Em quantos minutos o *chef* de cozinha paulistano conseguiria ferver a água?  $25,5\ \text{min}$
- Caso a fervura da mesma quantidade de água fosse feita na Cidade do México, quanto tempo demoraria?  $23,9\ \text{min}$
- Quais são os valores da resistência e a intensidade de corrente que percorre o aquecedor enquanto a água é esquentada?  $22\ \Omega$  e  $10\ \text{A}$

**EP14.** Dada a associação de resistores da figura, determine:



- a) a resistência equivalente da associação; **30 Ω**
- b) a intensidade de corrente na associação; **2 A**
- c) a ddp em cada resistor da associação. **16 V, 4 V e 40 V**

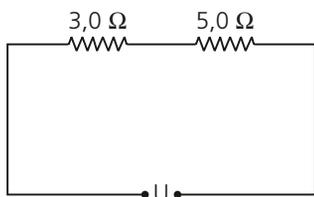
**EP15.** A potência elétrica total dissipada pela associação esquematizada é de 405 W. Sabendo que entre os terminais A e B está aplicada uma ddp de 135 V, calcule:



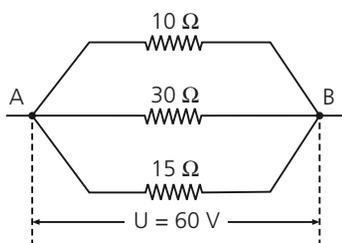
- a) a intensidade de corrente na associação; **3 A**
- b) a resistência equivalente da associação; **45 Ω**
- c) o valor da resistência de cada resistor. **15 Ω e 30 Ω**

**EP16.** No circuito representado abaixo, sabe-se que a ddp no resistor de 5,0 Ω é de 7,5 V. Portanto, o valor de U, em volts, é:

- a) 7,5
- b) 9,0
- c) 12 X
- d) 15
- e) 18



**EP17.** Dada a associação de resistores, determine:



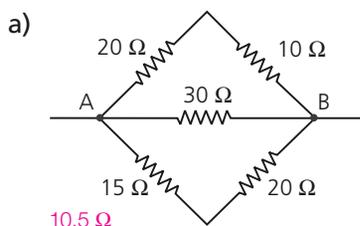
- a) a resistência equivalente da associação; **5 Ω**
- b) a intensidade de corrente em cada resistor; **6 A, 2 A e 4 A**
- c) a intensidade total de corrente na associação. **12 A**

**EP18.** A residência de dona Maria é protegida por um fusível que suporta 30 A com tolerância de 10%. Certa noite, no mesmo instante em que ela estava passando roupa, seu marido tomava banho, a geladeira e a TV estavam ligadas e a casa ainda tinha 6 lâmpadas acesas. Então sua filha usou o secador de cabelo. O quadro fornece as características dos dispositivos elétricos citados, todos associados em paralelo.

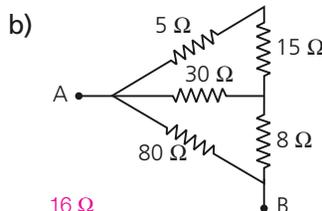
Dispositivo	Tensão	Potência
Ferro de passar	110 V	1 100 W
Chuveiro	110 V	1 375 W
Geladeira	110 V	165 W
Lâmpada	110 V	100 W
Televisor	110 V	88 W
Secador de cabelo	110 V	935 W

- a) O fusível da residência de dona Maria resistiu ou queimou no instante em que sua filha ligou o secador de cabelo? Justifique sua resposta.  
*Resposta nas Orientações Didáticas.*
- b) Qual seria o gasto mensal (30 dias) de consumo, considerando apenas os três aparelhos de maior potência da residência ligados durante meia hora todos os dias? Considere R\$ 0,40 o preço do kWh.  
**R\$ 20,46**

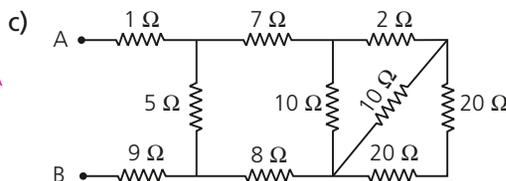
**EP19.** Determine a resistência equivalente, entre os terminais A e B, das associações representadas a seguir:



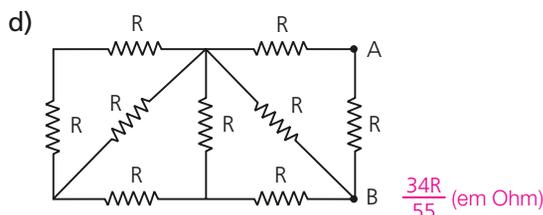
**10,5 Ω**



**16 Ω**



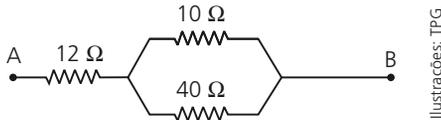
**14 Ω**



**$\frac{34R}{55}$  (em Ohm)**

Ilustrações: TFG

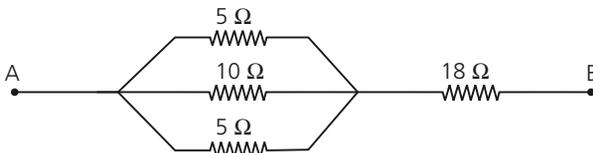
**EP20.** Na associação da figura, sabe-se que a ddp entre os pontos  $A$  e  $B$  é de  $100\text{ V}$ . Determine:



Ilustrações: TPG

- a resistência equivalente da associação;  $20\ \Omega$
- a intensidade total de corrente na associação;  $5\text{ A}$
- as intensidades de corrente no resistor de  $10\ \Omega$  e no de  $40\ \Omega$ .  $4\text{ A}$  e  $1\text{ A}$ , respectivamente

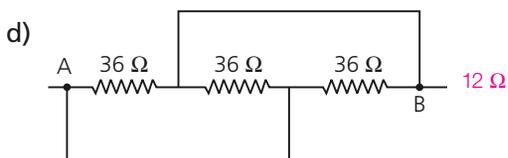
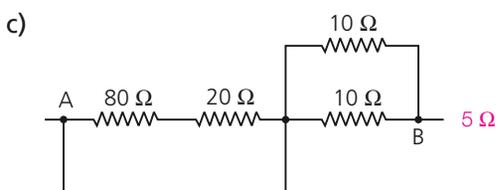
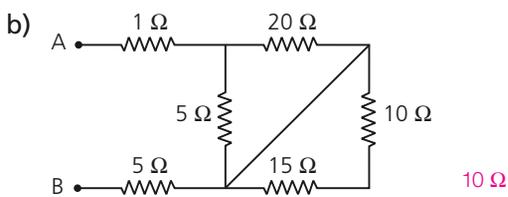
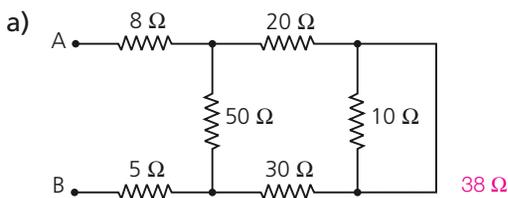
**EP21.** Na associação de resistores da figura, a tensão entre os pontos  $A$  e  $B$  vale  $60\text{ V}$ .



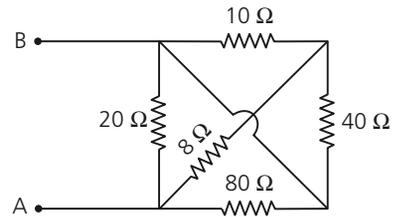
Pede-se para determinar:

- a intensidade total de corrente na associação;  $3\text{ A}$
- a tensão no resistor de  $18\ \Omega$ ;  $54\text{ V}$
- a intensidade de corrente no resistor de  $10\ \Omega$ ;  $0,6\text{ A}$
- a potência elétrica dissipada em cada um dos resistores de  $5\ \Omega$ .  $7,2\text{ W}$

**EP22.** Determine a resistência equivalente, entre os terminais  $A$  e  $B$ , de cada uma das associações seguintes:

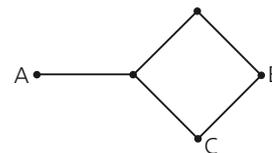


**EP23.** Na associação de resistores da figura, sabe-se que a ddp entre os terminais  $A$  e  $B$  vale  $80\text{ V}$ . Determine:



- a resistência equivalente da associação;  $8\ \Omega$
- a intensidade de corrente que atravessa o fio de resistência nula.  $2\text{ A}$

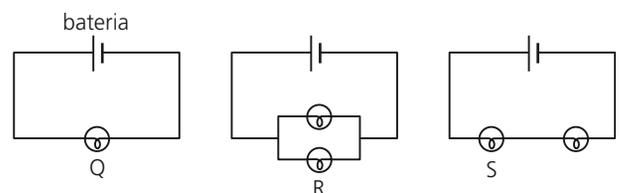
**EP24.** Um fio homogêneo de comprimento  $\ell$  tem resistência  $R = 100\ \Omega$ . Divide-se o fio em cinco partes iguais, que são associadas como mostra a figura:



Determine a resistência equivalente dessa associação:

- entre os pontos  $A$  e  $B$ ;  $40\ \Omega$
- entre os pontos  $A$  e  $C$ .  $35\ \Omega$

**EP25.** (UFMG) Em uma experiência, Nara conecta lâmpadas idênticas a uma bateria de três maneiras diferentes, como representado nestas figuras:



Considere que, nas três situações, a diferença de potencial entre os terminais da bateria é a mesma e os fios de ligação têm resistência nula. Sejam  $P_Q$ ,  $P_R$  e  $P_S$  os brilhos correspondentes, respectivamente, às lâmpadas  $Q$ ,  $R$  e  $S$ . Com base nessas informações, é correto afirmar que

- $P_Q > P_R$  e  $P_R = P_S$
- $P_Q = P_R$  e  $P_R > P_S$  X
- $P_Q > P_R$  e  $P_R > P_S$
- $P_Q < P_R$  e  $P_R = P_S$

# Aparelhos de medição elétrica

Painéis de controle de automóveis, navios, aviões, máquinas industriais, aparelhos médicos etc. possuem instrumentos de medição que permitem aos seus usuários conhecer e controlar os valores das mais variadas grandezas — com maior ou menor precisão —; o velocímetro de um automóvel, como todo instrumento, indica um valor aproximado.

Boa parte desses aparelhos, dispositivos e instrumentos funcionam movidos a eletricidade.



Thinkstock/Getty Images



Delfim Martins/Pulsar Imagens



Fernando Favoretto/Criar Imagem

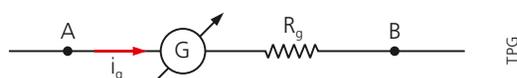
Estes medidores indicam valores de velocidade, espessura e massa. A maneira como esses valores estão apresentados está relacionada com a medida indireta de alguma grandeza elétrica: corrente, resistência ou voltagem.

Neste capítulo vamos estudar alguns aparelhos de medição elétrica que permitem determinar, por exemplo, a intensidade de corrente que percorre determinado resistor ou a voltagem de uma rede elétrica. Você já trabalhou com um medidor de corrente na atividade prática do capítulo anterior.

## Galvanômetro

O galvanômetro é um aparelho capaz de detectar e medir correntes elétricas de pequena intensidade. Seu funcionamento se dá pela utilização de um efeito magnético. No circuito elétrico, um galvanômetro comporta-se como um resistor.

Eis a representação de um galvanômetro:



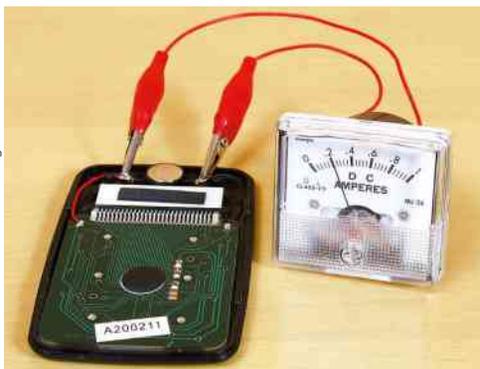
Na figura,  $R_g$  é a resistência interna do galvanômetro e  $i_g$  é a intensidade da corrente que o atravessa.

Para um galvanômetro, a máxima intensidade de corrente que ele pode medir sem se danificar é denominada corrente de fundo de escala.

Quando é inserido num circuito elétrico, o galvanômetro acaba interferindo no seu funcionamento. Como um aparelho de medida não deve afetar o circuito elétrico, corrige-se esse inconveniente associando ao galvanômetro um resistor apropriado para funcionar como amperímetro (amperômetro) ou como voltímetro (voltômetro).

# Amperímetro

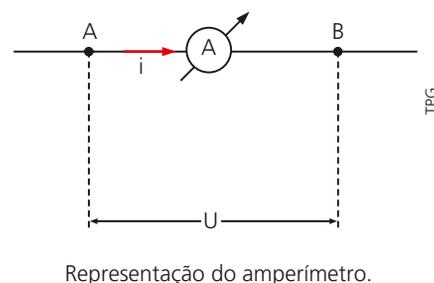
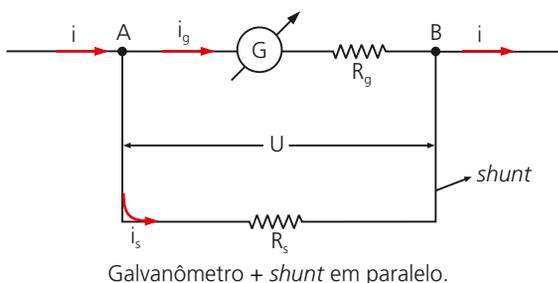
Sérgio Dória Jr./The next



Amperímetro.

O amperímetro, aparelho destinado a medir intensidades de corrente elétrica, nada mais é do que um galvanômetro com o qual se associa, em paralelo, um resistor de resistência  $R_s$ , muito menor se comparada com a do galvanômetro ( $R_s \ll R_g$ ).

O resistor  $R_s$  é denominado *shunt* ("desvio", em inglês). A finalidade do *shunt* é fazer passar por ele praticamente toda corrente que se deseja medir.



Pela Primeira Lei de Ohm, pode-se escrever:

$$\left. \begin{aligned} U &= R_g \cdot i_g \\ U &= R_s \cdot i_s \end{aligned} \right\} \text{ de onde: } R_g \cdot i_g = R_s \cdot i_s \Rightarrow i_s = \frac{R_g}{R_s} \cdot i_g$$

No nó A:  $i = i_g + i_s$ .

$$i = i_g + \frac{R_g}{R_s} \cdot i_g = i_g \cdot \left(1 + \frac{R_g}{R_s}\right) = \left(1 + \frac{R_g}{R_s}\right) \cdot i_g$$

Note que  $i$  e  $i_g$  são, respectivamente, a intensidade de corrente que se quer medir e aquela que é lida no galvanômetro.

A expressão  $\left(1 + \frac{R_g}{R_s}\right) = m$  é denominada fator de multiplicação do *shunt*.

Usualmente o fator de multiplicação  $m$  tem valores como 10, 50, 100, 1000... Para tanto,  $\frac{R_g}{R_s}$  deve valer, respectivamente: 9, 49, 99, 999...

Portanto, a expressão da intensidade  $i$  de corrente que se quer aferir por meio do amperímetro é:

$i = m \cdot i_g$ ; em que  $m$  é o fator de multiplicação do *shunt* e  $i_g$  é a corrente de fundo de escala.

Quando a resistência do *shunt* é nula ( $R_s = 0$ ), o amperímetro tem resistência nula e é chamado de amperímetro ideal.

Se o amperímetro for dimensionado para efetuar medidas de correntes de pequena intensidade, ele é denominado miliamperímetro.

O amperímetro deve ser ligado em série no trecho do circuito onde se quer determinar a intensidade da corrente.

Um amperímetro com determinada corrente de fundo de escala pode medir intensidades de corrente superiores às que ele comporta, desde que se troque o *shunt* (amperímetro de escala múltipla). Observe então que o *shunt* é um artifício para utilizarmos um aparelho na medida de valores fora de seu fundo de escala.

## Exercícios resolvidos

**ER1.** Queremos transformar um galvanômetro de resistência interna  $79,2 \Omega$  e corrente de fundo de escala  $100 \text{ mA}$  num amperímetro que possa aferir correntes de até  $10 \text{ A}$  de intensidade.

- Qual é o procedimento a ser adotado para obter o que queremos?
- Qual é o fator de multiplicação da corrente máxima que se quer mensurar e a nova corrente de fundo de escala?

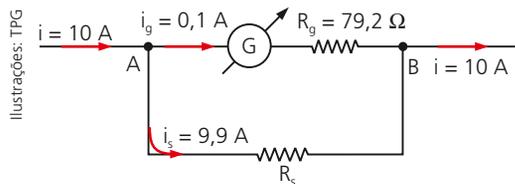
### Resolução:

Temos:  $R_g = 79,2 \Omega$  e  $i_g = 100 \text{ mA} = 0,1 \text{ A}$ .

- A intensidade de corrente que se quer mensurar é de até  $10 \text{ A}$ . Como o galvanômetro suporta no máximo  $0,1 \text{ A}$ , ele não poderia ser ligado em um circuito percorrido por  $10 \text{ A}$ .

Assim, como procedimento, é necessário que  $9,9 \text{ A}$  de corrente não passem pelo galvanômetro, devendo ser desviados para outro caminho. Por isso, temos que associar ao galvanômetro, em paralelo, um *shunt* ( $R_s$ ) que comporte até  $i_s = 9,9 \text{ A}$ .

Dessa forma, o galvanômetro é transformado num amperímetro, conforme mostra a figura.



Para calcular a resistência  $R_s$  do *shunt*, usamos a expressão:

$$i = \left(1 + \frac{R_g}{R_s}\right) \cdot i_g$$

Substituindo nela os respectivos valores, temos:

$$10 = \left(1 + \frac{79,2}{R_s}\right) \cdot 0,1 \Rightarrow 100 = \left(1 + \frac{79,2}{R_s}\right) \Rightarrow$$

$$99 = \frac{79,2}{R_s} \Rightarrow R_s = \frac{79,2}{99} \Rightarrow R_s = 0,8 \Omega$$

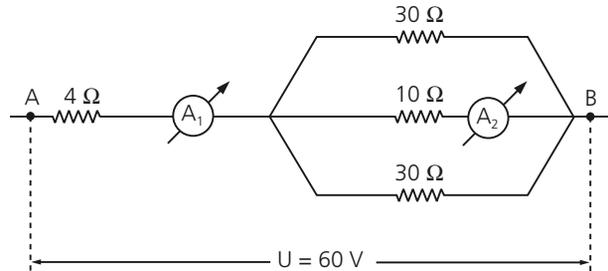
A resistência do *shunt* é baixa, pois ela deve ser percorrida por uma corrente alta. Nos amperímetros ideais, sua resistência é nula.

- A corrente de fundo de escala do aparelho passa a ser de  $10 \text{ A}$ .

O fator de multiplicação do *shunt*, representado pela letra  $m$ , é de:

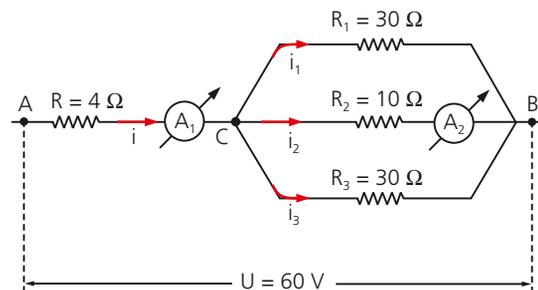
$$i = m \cdot i_g \Rightarrow m = \frac{i}{i_g} = \frac{10}{0,1} \Rightarrow m = 100$$

**ER2.** Na associação esquematizada, determine as indicações dos amperímetros ideais  $A_1$  e  $A_2$ .



### Resolução:

O amperímetro  $A_1$  indicará a intensidade de corrente  $i$  e o amperímetro  $A_2$  indicará  $i_2$ .

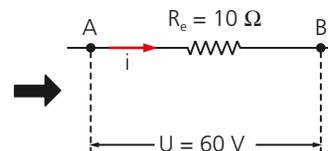
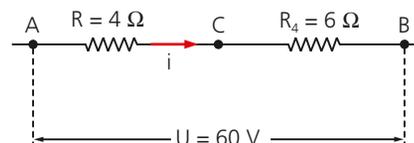


Resolvendo a associação dada:

$$\frac{1}{R_4} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{30} + \frac{1}{10} + \frac{1}{30} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{1}{R_4} = \frac{1+3+1}{30} = \frac{5}{30} \Rightarrow R_4 = 6 \Omega$$

$$R_e = R + R_4 = 4 + 6 \Rightarrow R_e = 10 \Omega$$



Aplicando a Primeira Lei de Ohm, temos:

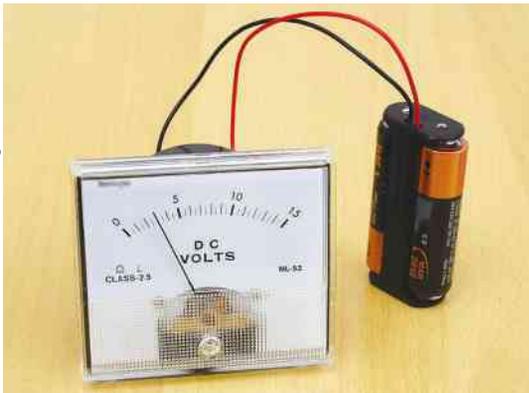
$$i = \frac{U}{R_e} = \frac{60}{10} \Rightarrow i = 6 \text{ A}$$

$$U_{CB} = R_4 \cdot i = 6 \Omega \cdot 6 \text{ A} = 36 \text{ V}$$

$$\therefore i_2 = \frac{U_{CB}}{R_2} = \frac{36}{10} \Rightarrow i_2 = 3,6 \text{ A}$$

# Voltímetro

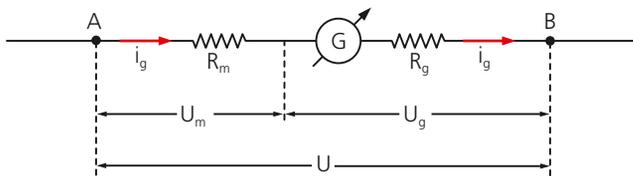
Sérgio Dotta Jr./The next



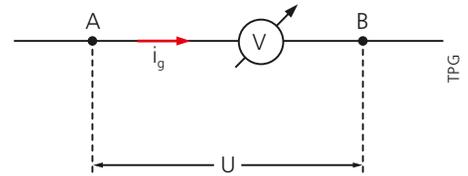
Voltímetro.

O voltímetro é um aparelho destinado a medir diferenças de potencial elétrico. Ele nada mais é do que um galvanômetro ao qual se associa em série um resistor de resistência  $R_m$ , muito maior que a do galvanômetro ( $R_m \gg R_g$ ).

O resistor  $R_m$  é denominado multiplicador.



Galvanômetro com  $R_m$  em série.



Representação do voltímetro.

Pela Primeira Lei de Ohm, podemos escrever:

$$\begin{aligned} U_m &= R_m \cdot i_g \\ U_g &= R_g \cdot i_g \quad (+) \\ \hline U_m + U_g &= (R_m + R_g) \cdot i_g \end{aligned}$$

$$U = U_m + U_g \text{ e } i_g = \frac{U_g}{R_g} \Rightarrow U = (R_m + R_g) \cdot \frac{U_g}{R_g} = \left( \frac{R_m + R_g}{R_g} \right) \cdot U_g \Rightarrow U = \left( 1 + \frac{R_m}{R_g} \right) \cdot U_g$$

Note que  $U$  é a ddp que se quer medir e  $U_g$  é a ddp medida pelo galvanômetro.

A expressão  $\left( 1 + \frac{R_m}{R_g} \right) = M$  é denominada fator de multiplicação do multiplicador.

Na prática,  $M$  geralmente vale 10, 20, 50, 100, 1000...

Portanto, a expressão da ddp que se quer medir através do voltímetro é:  $U = M \cdot U_g$ ; em que  $M$  é o **fator de multiplicação do multiplicador** e  $U_g$  é a ddp nos terminais do galvanômetro.

No caso ideal em que a resistência do multiplicador é infinita ( $R_m \rightarrow \infty$ ), o voltímetro tem resistência infinita e é chamado de voltímetro ideal.

O voltímetro deve ser ligado em paralelo no trecho do circuito onde se quer medir a ddp.

## Exercícios resolvidos

**ER3.** Queremos transformar um galvanômetro de resistência interna  $2 \text{ k}\Omega$ , que acusa intensidades de corrente de até  $5 \text{ mA}$ , em um voltímetro que meça diferenças de potencial de no máximo  $110 \text{ V}$ .

- O que devemos fazer para obter o voltímetro?
- Quanto é o fator de multiplicação do resistor multiplicador?

### Resolução:

Temos:  $R_g = 2 \text{ k}\Omega = 2 \cdot 10^3 \Omega$  e corrente de fundo de escala  $i_g = 5 \text{ mA} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ A}$ .

Com esses dados podemos calcular a tensão nos terminais desse galvanômetro, aplicando a Primeira Lei de Ohm:

$$U_g = R_g \cdot i_g = 2 \cdot 10^3 \cdot 5 \cdot 10^{-3} \Rightarrow U_g = 10 \text{ V}$$

a) Para transformar o galvanômetro no voltímetro especificado, devemos associá-lo em série com uma resistência multiplicadora  $R_m$ . Vejamos como determinar o valor dessa resistência:

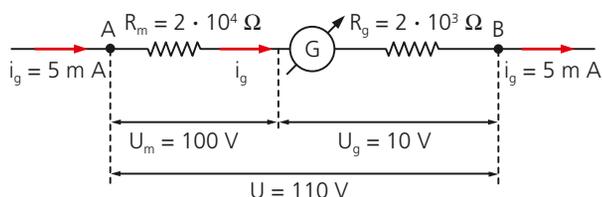
$$U = \left(1 + \frac{R_m}{R_g}\right) \cdot U_g \Rightarrow 110 = \left(1 + \frac{R_m}{2 \cdot 10^3}\right) \cdot 10 \Rightarrow$$

$$11 = 1 + \frac{R_m}{2 \cdot 10^3} \Rightarrow R_m = 2 \cdot 10^4 \Omega$$

Assim, com o galvanômetro, devemos associar em série uma resistência multiplicadora de  $2 \cdot 10^4 \Omega$ . A ddp nos terminais dessa resistência multiplicadora é, de acordo com a Primeira Lei de Ohm:

$$U_m = R_m \cdot i_g = 2 \cdot 10^4 \cdot 5 \cdot 10^{-3} \Rightarrow U_m = 100 \text{ V}$$

Um esquema possível desse voltímetro:

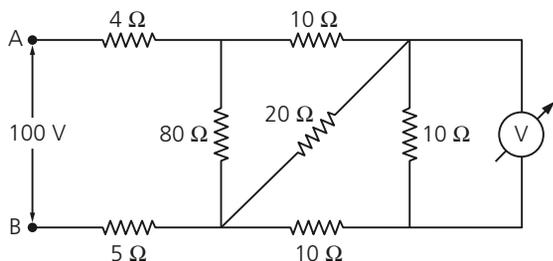


O valor da resistência multiplicadora é alto, pois ela deve ser percorrida por uma corrente elétrica baixa. Nos voltímetros ideais seu valor é infinito.

b) O fator de multiplicação  $M$  do resistor multiplicador é:

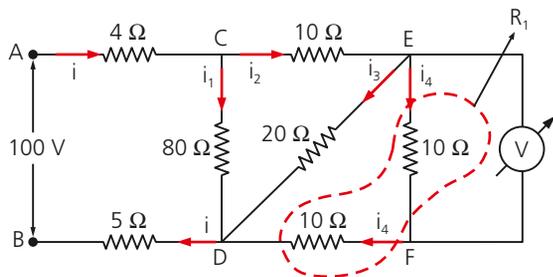
$$U = M \cdot U_g \Rightarrow 110 = M \cdot 10 \Rightarrow M = 11$$

**ER4.** Dada a associação da figura, determine a indicação do voltímetro ideal  $V$ .



### Resolução:

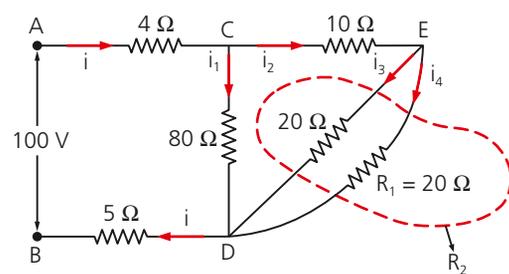
O voltímetro indicará a ddp entre os pontos  $E$  e  $F$ :



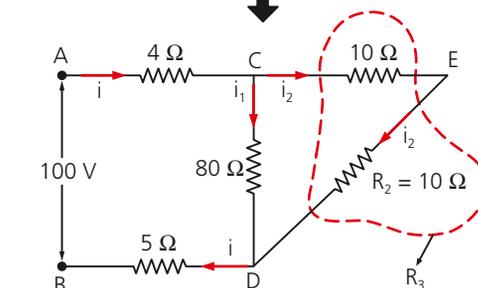
$$U_{EF} = 10 \cdot i_4$$

$$R_1 = 10 + 10 \Rightarrow R_1 = 20 \Omega$$

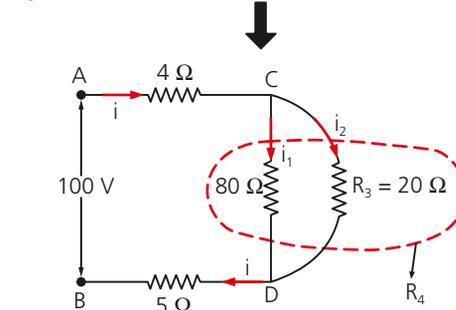
Resolvendo a associação:



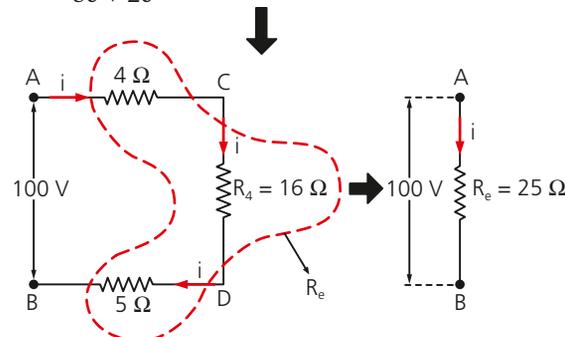
$$R_2 = \frac{20 \cdot 10}{20 + 10} = 10 \Omega$$



$$R_3 = 2 \cdot 10 \Omega = 20 \Omega$$



$$R_4 = \frac{80 \cdot 20}{80 + 20} \Omega = 16 \Omega$$



$$R_e = (4 + 16 + 5) \Omega = 25 \Omega$$

Aplicando a Primeira Lei de Ohm, temos:

$$i = \frac{U_{AB}}{R_e} = \frac{100}{25} \Rightarrow i = 4 \text{ A}$$

$$U_{CD} = 16 \cdot i = 16 \cdot 4 \Rightarrow U_{CD} = 64 \text{ V}$$

$$\therefore i_2 = \frac{U_{CD}}{20} = \frac{64}{20} \Rightarrow i_2 = 3,2 \text{ A}$$

$$U_{ED} = 10 \cdot i_2 = 10 \cdot 3,2 \Rightarrow U_{ED} = 32 \text{ V}$$

$$\therefore i_4 = \frac{U_{ED}}{20} = \frac{32}{20} \Rightarrow i_4 = 1,6 \text{ A}$$

$$\text{Finalmente, } U_{EF} = 10 \cdot i_4 = 10 \cdot 1,6 \Rightarrow U_{EF} = 16 \text{ V}$$

# Ohmímetro

O ohmímetro é um dispositivo produzido para determinar valores de resistências elétricas desconhecidas. Estudaremos dois tipos parecidos de ohmímetro: a ponte de Wheatstone e a ponte de fio.

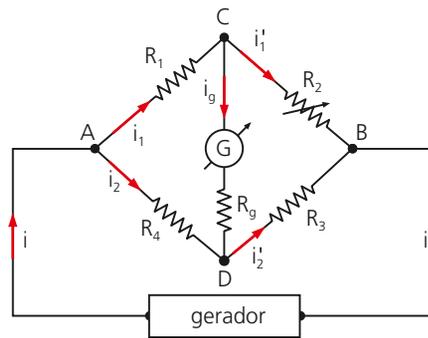
## Ponte de Wheatstone

Um jeito de medir resistências elétricas é utilizando uma ponte de Wheatstone, como esta mostrada no esquema:



Sérgio Dotta Jr./The next

Ponte de Wheatstone portátil. A ponte de Wheatstone é um dispositivo que associa um gerador a um sistema de resistores, para determinar resistências desconhecidas.



Ilustrações: TPG

Nela, um gerador alimenta uma associação de resistores, que tem junto um galvanômetro e:

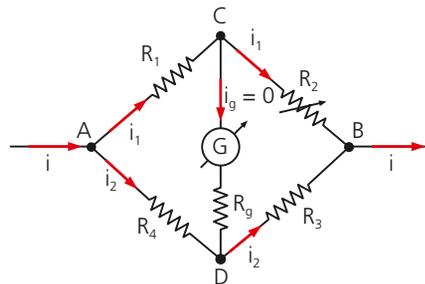
- $R_1$ : resistor de resistência desconhecida;
- $R_2$ : reostato (de resistência variável, mas conhecida);
- $R_3$ : resistor de resistência conhecida;
- $R_4$ : resistor de resistência conhecida.

## Ponte de Wheatstone em situação de equilíbrio

Para determinar  $R_1$ , fazemos variar a resistência do reostato  $R_2$  até que o galvanômetro não acuse mais passagem de corrente:  $i_g = 0$ .

Nessa condição, dizemos que a ponte de Wheatstone está em equilíbrio e temos  $V_C = V_D$ .

Desse modo, pode-se dizer que:  $i_1 = i'_1$  e  $i_2 = i'_2$ .



Ponte de Wheatstone em equilíbrio.

Aplicando a Primeira Lei de Ohm nos diversos resistores, temos:

$$\begin{cases} V_A - V_C = R_1 \cdot i_1 \\ V_A - V_D = R_4 \cdot i_2 \end{cases} \quad \text{Como } V_C = V_D \Rightarrow R_1 \cdot i_1 = R_4 \cdot i_2 \quad (\text{I})$$

$$\begin{cases} V_C - V_B = R_2 \cdot i'_1 \\ V_D - V_B = R_3 \cdot i'_2 \end{cases} \quad \text{Como } V_C = V_D \Rightarrow R_2 \cdot i'_1 = R_3 \cdot i'_2 \quad (\text{II})$$

Dividindo-se, membro a membro, (I) e (II):

$$\frac{R_1 \cdot i_1}{R_2 \cdot i_1} = \frac{R_4 \cdot i_2}{R_3 \cdot i_2} \Rightarrow \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3} \Rightarrow R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_4$$

Com a ponte de Wheatstone em equilíbrio, os produtos das resistências opostas do losango são iguais entre si.

## Ponte de fio

Na ponte de fio, os resistores  $R_3$  e  $R_4$  são substituídos por um fio condutor homogêneo, de seção reta constante, esticado ao longo de uma régua graduada. Um cursor ligado ao galvanômetro desliza pelo fio, mantendo sempre contato com ele.

A ponte de fio entra em equilíbrio quando, fixado o valor de  $R_2$  (chamada de resistência de comparação), a corrente elétrica  $i_g$  do galvanômetro se iguala a 0, com cursor parado numa posição específica da régua.

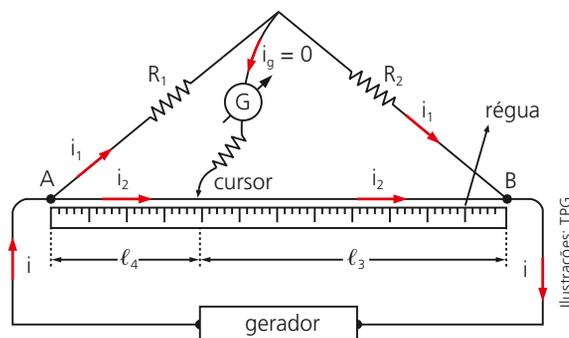
Como  $R_3 = \rho \cdot \frac{\ell_3}{A}$  e  $R_4 = \rho \cdot \frac{\ell_4}{A}$ , temos:

$$R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_4 \Rightarrow R_1 \cdot \rho \cdot \frac{\ell_3}{A} = R_2 \cdot \rho \cdot \frac{\ell_4}{A} \Rightarrow$$

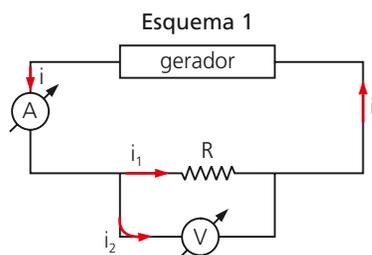
$$\Rightarrow R_1 \cdot \ell_3 = R_2 \cdot \ell_4 \Rightarrow R_1 = R_2 \cdot \frac{\ell_4}{\ell_3}$$

Como  $\ell_3$  e  $\ell_4$  são lidos diretamente na régua, determinamos  $R_1$  utilizando essa expressão.

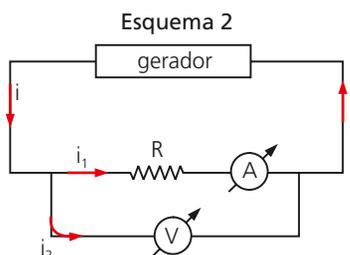
Existem outros métodos para determinar as resistências elétricas, além do método da ponte de Wheatstone e da ponte de fio. Um deles é o método amperímetro-voltímetro, que leva em consideração a Primeira Lei de Ohm:  $R = \frac{U}{i}$ , em que a ddp  $U$  e a intensidade da corrente  $i$  são medidas, respectivamente, por um volímetro e um amperímetro, montados de acordo com os seguintes esquemas:



Ponte de fio em equilíbrio.



Esquema 1



Esquema 2

Como nesse método a leitura não é muito precisa, geralmente se utiliza o esquema 1 para realizar a tomada de valores de  $R$  baixos e o esquema 2, para valores de  $R$  maiores — de qualquer forma, em ambos os casos os valores de  $R$  obtidos são aproximados.

Observe que, no primeiro esquema, o amperímetro lê a corrente total  $i$ , fornecida pelo gerador, e, no segundo, lê a corrente  $i_1$  (que passa também pela resistência  $R$ ).

## Revista

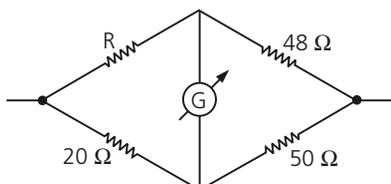
### Medidores elétricos de umidade de madeira

Disponível em: <www.iflorestal.sp.gov.br/RIF/RevistaF/RIF18/RIF18\_71-78.pdf> p. 71-78. Acesso em: 29 jan. 2016.

Medidas elétricas são relevantes não apenas no contexto dos circuitos elétricos. Na Revista do Instituto Florestal você obtém importantes informações sobre o assunto.

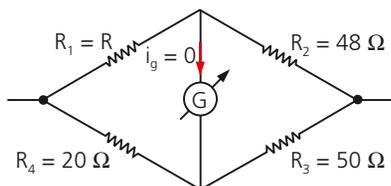
## Exercícios resolvidos

**ER5.** No trecho do circuito dado, sabe-se que o galvanômetro não é atravessado por corrente elétrica ( $i_g = 0$ ). Determine o valor de  $R$ .

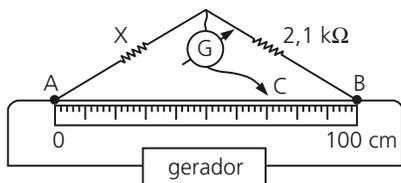


### Resolução:

Temos aqui uma ponte de Wheatstone equilibrada. Portanto:  $R \cdot R_3 = R_2 \cdot R_4 \Rightarrow R \cdot 50 = 48 \cdot 20 \Rightarrow R = 19,2 \Omega$



**ER6.** Na figura, temos uma ponte de fio. Determine o valor da resistência  $X$ , sabendo que o equilíbrio da ponte é estabelecido quando o cursor  $C$  estiver 70 cm à direita do ponto  $A$ .



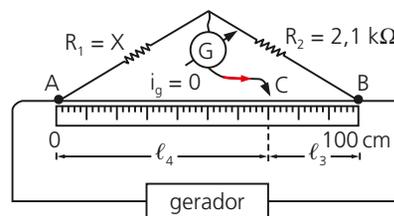
### Resolução:

Como o equilíbrio da ponte de fio se estabelece com o cursor  $C$  a 70 cm de  $A$ , temos:  $\ell_4 = 70$  cm.

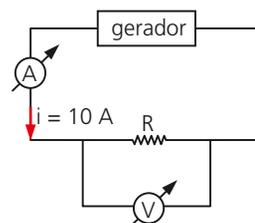
Portanto,  $\ell_3 = 100 - \ell_4 = 100 - 70 \Rightarrow \ell_3 = 30$  cm.

Utilizando a expressão:

$$R_1 = R_2 \cdot \frac{\ell_4}{\ell_3} \Rightarrow X = 2,1 \cdot \frac{70}{30} \therefore X = 4,9 \text{ k}\Omega$$



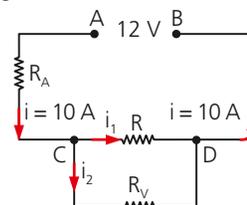
**ER7.** O gerador da figura fornece uma tensão de 12 V. O amperímetro e o voltímetro possuem, respectivamente, resistências elétricas iguais a  $0,1 \Omega$  e  $1100 \Omega$ . Sabendo que o amperímetro acusa uma corrente de 10 A, determine:



- a queda de tensão que se verifica nos extremos do amperímetro;
- a corrente que percorre o voltímetro;
- o valor da resistência  $R$ .

### Resolução:

Refazendo a figura:



Temos os seguintes dados:  $U_{AB} = 12 \text{ V}$ ;  $R_A = 0,1 \Omega$ ;  $R_V = 1100 \Omega$  e  $i = 10 \text{ A}$ .

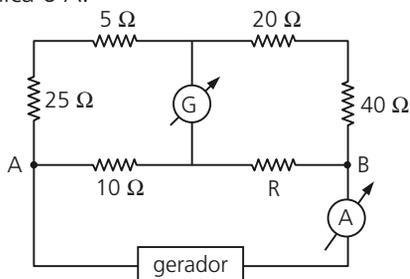
- Sendo  $U_{AC}$  a queda de tensão que acontece no trecho onde está o amperímetro, pela Primeira Lei de Ohm temos:  $U_{AC} = R_A \cdot i = 0,1 \cdot 10 \Rightarrow U_{AC} = 1,0 \text{ V}$

- b) A corrente que atravessa o voltímetro é  $i_2$ ; para sabermos seu valor devemos achar a tensão entre C e D, onde  $U_{CD} = U_{AB} - U_{AC} = 12 - 1,0 \Rightarrow U_{CD} = 11 \text{ V}$ :
- $$i_2 = \frac{U_{CD}}{R_V} = \frac{11}{1100} \Rightarrow i_2 = 0,01 \text{ A}$$
- c) A determinação do valor da resistência  $R$  será feita utilizando o método amperímetro-voltímetro. Assim, pela Primeira Lei de Ohm:

$$R = \frac{U_{CD}}{i_1}, \text{ onde } i_1 = i - i_2 = 10 - 0,01 = 9,99 \Rightarrow$$

$$R = \frac{11}{9,99} \cong 1,1 \Omega$$

**ER8.** No galvanômetro do circuito elétrico da figura não passa corrente elétrica alguma. O amperímetro A, ideal, indica 6 A.

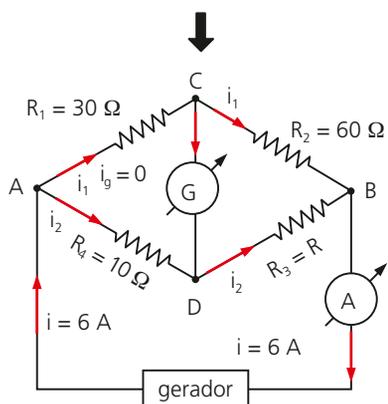
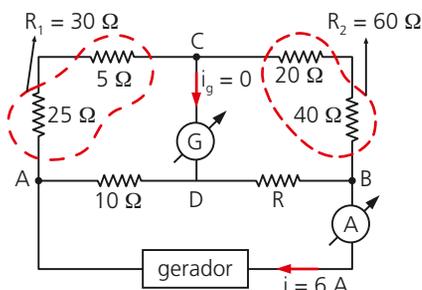


Determine:

- o valor da resistência  $R$ ;
- o valor da resistência equivalente entre os pontos A e B;
- a ddp que o gerador fornece ao circuito;
- a potência dissipada no resistor  $R$ .

**Resolução:**

Verificamos que há, entre os pontos A e B, uma ponte de Wheatstone em equilíbrio, pois  $i_g = 0$ . Colocando-a no esquema convencional, temos:



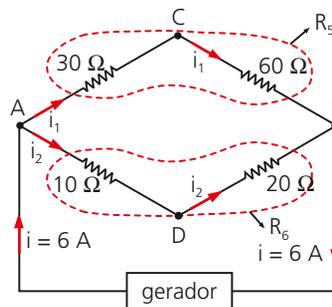
- a) Com a ponte em equilíbrio:

$$R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_4 \Rightarrow 30 \cdot R = 60 \cdot 10 \Rightarrow R = 20 \Omega$$

- b) Com a ponte em equilíbrio, os resistores de 30 Ω e 60 Ω estão instalados em série, assim como os de 10 Ω e 20 Ω. Assim:

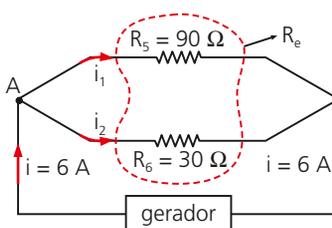
$$R_5 = 30 \Omega + 60 \Omega = 90 \Omega$$

$$R_6 = 10 \Omega + 20 \Omega = 30 \Omega$$



Ilustrações: TFG

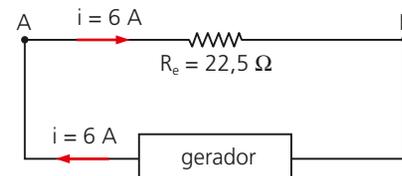
A resistência equivalente, entre os pontos A e B, será:



$$R_e = \frac{R_5 \cdot R_6}{R_5 + R_6} = \frac{90 \cdot 30}{90 + 30} = \frac{2700}{120} \therefore R_e = 22,5 \text{ k}\Omega$$

- c) Calcula-se a ddp  $U$  que o gerador fornece ao circuito, aplicando a Primeira Lei de Ohm:

$$U = R_e \cdot i = 22,5 \cdot 6 \Rightarrow U = 135 \text{ V}$$

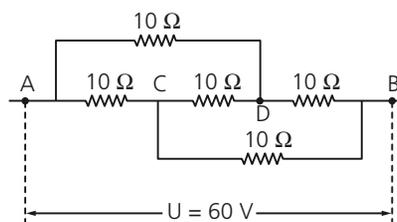


- d) A potência dissipada por  $R$  será:

$$i_2 = \frac{U}{R_6} = \frac{135}{30} \Rightarrow i_2 = 4,5 \text{ A}$$

$$P = R \cdot i_2^2 = 20 \cdot 4,5^2 \Rightarrow P = 405 \text{ W}$$

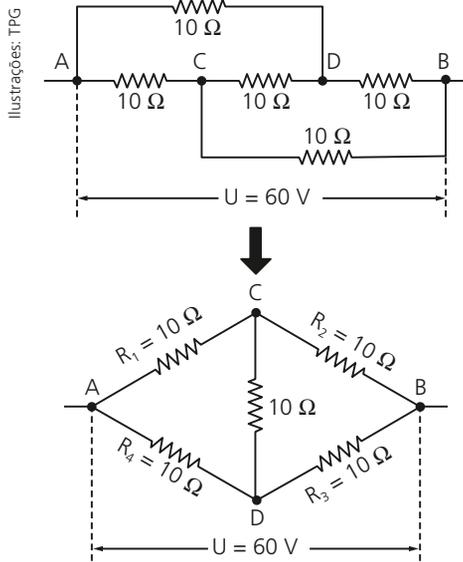
**ER9.** Dada a associação da figura, calcule:



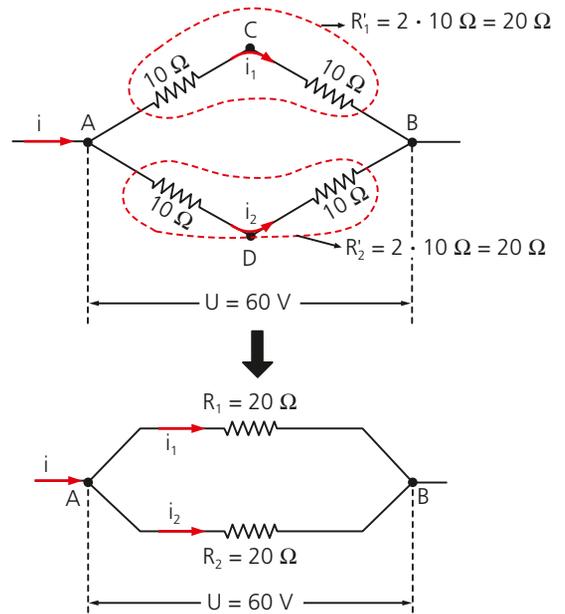
- a resistência equivalente entre os pontos A e B;
- a ddp entre os pontos C e D;
- a intensidade de corrente no ramo AD.

## Resolução:

a) Reorganizando os resistores, vemos que esse circuito é uma ponte de Wheatstone. Colocando-a no esquema convencional, temos:



A intensidade de corrente no ramo CD é nula, pois todas as outras resistências são de igual valor, satisfazendo  $R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_4$  (ponte de Wheatstone em equilíbrio). Podemos, portanto, eliminar o ramo CD, pois por ele não passa corrente. Assim o novo esquema fica:



Portanto, a resistência equivalente entre A e B é de:

$$R_c = \frac{R'_1 \cdot R'_2}{R'_1 + R'_2} = \frac{20 \cdot 20}{20 + 20} \Rightarrow R_c = 10 \Omega$$

- b) Como não passa corrente no ramo CD, então  $U_{CD} = 0$ .  
 c) O ramo AD é percorrido pela corrente  $i_2$ . Aplicando a Primeira Lei de Ohm:

$$i_2 = \frac{U}{R'_2} = \frac{60}{20} \Rightarrow i_2 = 3 \text{ A}$$

## OUTRAS PALAVRAS

### Multímetro

Medimos as grandezas dos circuitos elétricos (correntes, diferenças de potencial, resistências) com medidores isolados ou com um único medidor que reúne as três características. Esse aparelho é o multímetro. O texto a seguir faz uma breve descrição desse aparelho.

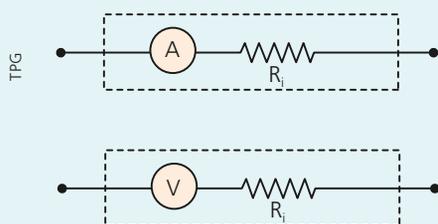
A peça central do multímetro, assim como da maioria dos indicadores elétricos, é um detector sensível de intensidade de corrente. Nos instrumentos digitais, faz-se passar a corrente por resistores de alta precisão e o sinal de tensão assim gerado é digitalizado por um *chip* conversor analógico-digital e apresentado numericamente no mostrador do aparelho. Por sua construção os aparelhos digitais são bem precisos, fornecendo resolução dentro de fração de por cento.

Os multímetros apresentam diversas funções e escalas, selecionáveis ou pelo giro de uma chave seletora, ou por diferentes orifícios de conexão; podem assim ser transformados em amperímetros (indicadores de corrente), em voltímetros (indicadores de diferença de potencial ou tensão elétrica) e ohmímetros (medidores de resistência) de diversos fundos de escala. Essa mudança é obtida intercalando-se resistores apropriados em paralelo (amperímetro) ou em série (voltímetro), no circuito do indicador. Nas medidas de resistência é intercalada, além dos resistores, uma fonte de tensão fixa, em geral apresentada por pilhas elétricas.

Por um voltímetro ideal não passa nenhuma corrente; igualmente, a queda de tensão através de um amperímetro ideal é zero. Na prática nenhum aparelho é ideal e eles podem ser representados

FAÇA NO  
CADERNO NÃO  
ESCREVA  
NO LIVRO

como um medidor acompanhado por um resistor em série,  $R_i$ :



No caso de um amperímetro, a resistência interna deve ser bem pequena (idealmente zero), assim não vai haver queda de tensão quando o aparelho é inserido no circuito. Da mesma maneira, a resistência interna do voltímetro deve ser muito grande, assim a corrente no circuito não passa pelo voltímetro, interferindo na medida.

Quando a opção é por medidas de corrente alternada (AC – *alternating current*), em função da intensidade de corrente ou tensão, são intercalados diodos retificadores, permitindo, então, a leitura de valores eficazes, que são uma espécie de média temporal.

O multímetro, descrição do aparelho. Disponível em: <<http://stoa.usp.br/ewout/files/69/2780/conductividade-2007.pdf>>. Acesso em: 29 jan. 2016.

## Organizando as ideias do texto

A leitura de uma medida em um multímetro analógico — não digital — segue o mesmo método de leitura de qualquer escala: o valor da grandeza  $x$  que está sendo medida está envolvido em uma relação de proporcionalidade entre o fundo de escala ( $A$ ), o número de divisões desta escala entre 0 e  $A$  ( $N$ ), e o número ( $n$ ) de divisões indicadas na leitura pela agulha do aparelho:

$$\frac{x}{A} = \frac{n}{N}$$

Sabemos também que toda medida envolve imprecisão, a que chamamos de erro; é comum estimarmos a incerteza da medida como sendo a metade da menor divisão da escala do equipamento utilizado. De acordo com essas informações, responda:

- Quais são os valores e respectivas incertezas nas medidas obtidas na imagem ao lado, se o multímetro foi usado como:
  - medidor de tensão em corrente alternada e fundo de escala 10 V?
  - medidor de tensão em corrente contínua e fundo de escala 250 V?

Professor, veja Orientações Didáticas.

Multímetro Analógico



Luiz Fernando Rubio

## ATIVIDADE PRÁTICA

FAÇA NO CADERNO NÃO EScreva NO LIVRO

### Utilizando aparelhos de medição elétrica

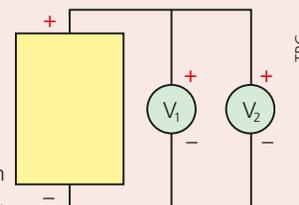
#### Material

- uma bateria como fonte de 1,5 V
- um amperímetro que afere correntes elétricas de 0 a 30 A ( $\pm 0,25$  A)
- um voltímetro  $V_1$ , que mede voltagens de 0 V a 30 V ( $\pm 0,25$  V)
- um voltímetro  $V_2$ , que mede voltagens de 0 V a 60 V ( $\pm 0,1$  V)
- um resistor
- cabos e grampos



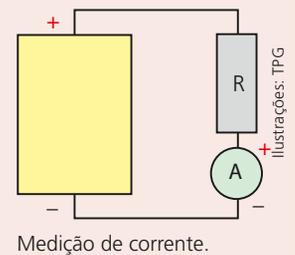
#### Procedimento

**Situação 1.** Meçam com ambos os voltímetros a diferença de potencial elétrico existente entre os terminais da bateria. Anotem os resultados e respectivas imprecisões numa tabela. Conectem à bateria os voltímetros 1 e 2 associados em paralelo.



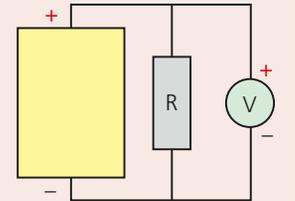
Medição de tensão da bateria com um ou dois voltímetros.

**Situação 2.** Conectem o resistor, o amperímetro e a bateria. Determinem a escala do amperímetro que será usada, calculando a corrente esperada quando o resistor for conectado à bateria. Meçam a intensidade da corrente que atravessa o resistor nas escalas do amperímetro em que isso for possível. Anotem os resultados e respectivas imprecisões numa tabela.



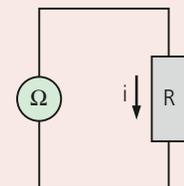
Medição de corrente.

**Situação 3.** Refaçam agora o circuito com o resistor, o voltímetro  $V_2$  e a bateria. Meçam a tensão (diferença de potencial) existente entre os terminais do resistor nas escalas que o voltímetro permitir. Comparem a diferença de potencial medida sem o resistor e com ele. Anotem os resultados e respectivas imprecisões numa tabela.



Medição da tensão no resistor.

**Situação 4.** Usando o ohmímetro, dimensionem o valor da resistência utilizada. Anotem o resultado e a respectiva imprecisão. Comparem o valor nominal (indicado pelo fabricante), o obtido pela equação  $U = R \cdot i$  e o aferido no ohmímetro. Como se justificam as diferenças observadas?



Medição da resistência com o ohmímetro.

## Discussão

1. Considere a situação 1:
  - a) Qual é a tensão real da bateria?
  - b) A qualidade do voltímetro afetou o resultado obtido?
  - c) O que acontece quando os voltímetros 1 e 2 são conectados em paralelo?
2. Com relação à situação 3:
  - a) Há alguma razão para a diferença nas medições realizadas com o resistor e sem ele?
  - b) Calcule a resistência  $R$  e a imprecisão  $\Delta R$  dessa medida.
3. Compare o valor da resistência aferido no ohmímetro (situação 4), o valor nominal (indicado pelo fabricante), e o obtido pela equação  $U = R \cdot i$ . Como se justificam as diferenças observadas?

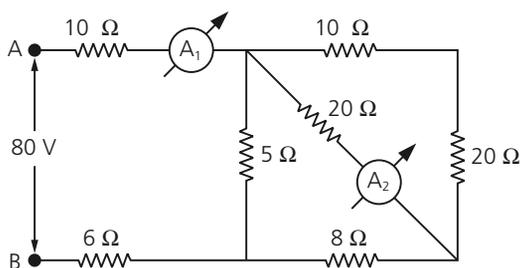
Ver Orientações Didáticas.

## Exercícios propostos



**EP1.** Um galvanômetro possui resistência interna de  $297 \Omega$  e corrente de fundo de escala de  $10 \text{ mA}$ . Associa-se em paralelo ao galvanômetro uma resistência de  $3 \Omega$  (*shunt*). Determine o valor máximo da corrente elétrica que esse aparelho pode suportar. **1 A**

**EP2.** Na associação esquematizada, determine as indicações dos amperímetros ideais  $A_1$  e  $A_2$ .

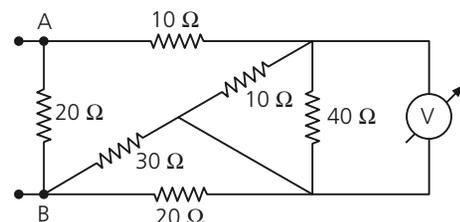


$A_1$  indica 4 A e  $A_2$  indica 0,48 A.

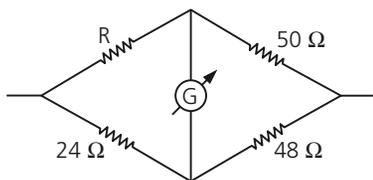
Ilustrações: TPG

**EP3.** Um galvanômetro possui resistência interna de  $20 \Omega$  e corrente de fundo de escala de  $2 \text{ mA}$ . Qual é o valor da resistência que tem de ser associada em série com o galvanômetro para que o conjunto se transforme num voltímetro que afira até  $100 \text{ V}$ ? **49980  $\Omega$**

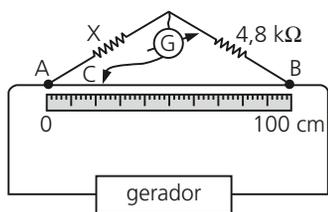
**EP4.** Dada a associação da figura, determine a indicação do voltímetro ideal  $V$ , sabendo que a ddp entre os pontos  $A$  e  $B$  vale  $120 \text{ V}$ . **32 V**



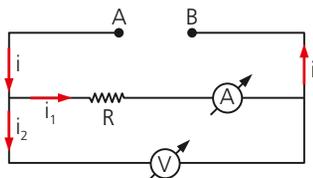
**EP5.** No trecho do circuito dado, sabe-se que o galvanômetro não é atravessado por corrente elétrica. Determine o valor de  $R$ .  $R = 25 \Omega$



**EP6.** Na figura vemos montada uma ponte de fio. Determine o valor da resistência  $X$ , sabendo-se que o equilíbrio da ponte é estabelecido quando o cursor  $C$  está 25 cm à direita do ponto  $A$ .  $X = 1,6 \text{ k}\Omega$



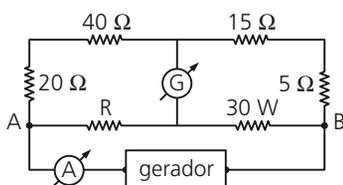
**EP7.** Um método utilizado para determinar o valor de uma resistência elétrica desconhecida é a aplicação do conjunto amperímetro-voltímetro, como o do esquema apresentado na figura. Sabemos que entre os pontos  $A$  e  $B$  existe um gerador que fornece uma tensão de  $U_{AB} = 12 \text{ V}$  e uma corrente de intensidade  $i = 10 \text{ A}$ .



Considerando que as resistências do amperímetro e do voltmímetro valem, respectivamente,  $0,1 \Omega$  e  $1200 \Omega$ , determine:

- a) a voltagem que o voltmímetro acusa;  $12 \text{ V}$
- b) a corrente que o amperímetro acusa;  $i_1 = 9,99 \text{ A}$
- c) o valor da resistência  $R$ .  $1,2 \Omega$

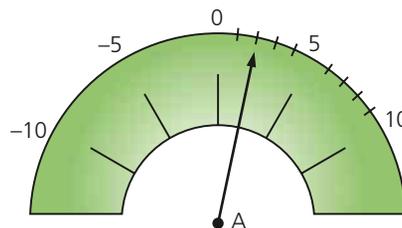
**EP8.** O galvanômetro do circuito apresentado na figura não é atravessado por corrente elétrica e sabe-se que o amperímetro  $A$ , ideal, indica  $5 \text{ A}$ . Assim, determine:



Ilustrações: TPG

- a) o valor da resistência  $R$ ;  $90 \Omega$
- b) o valor da resistência equivalente entre os pontos  $A$  e  $B$ ;
- c) a ddp que o gerador fornece ao circuito;  $240 \text{ V}$   $48 \Omega$
- d) a potência dissipada no resistor  $R$ .  $360 \text{ W}$

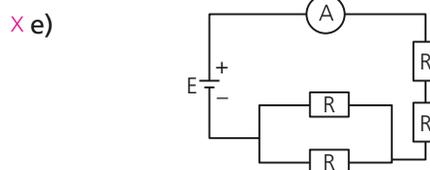
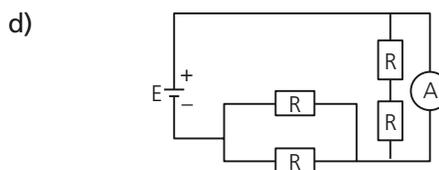
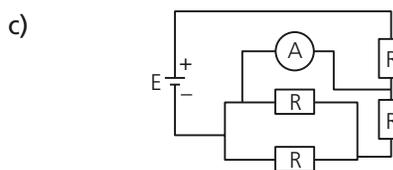
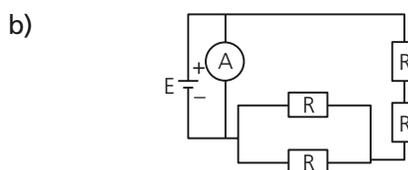
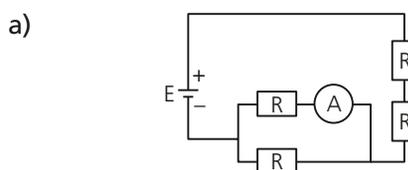
**EP9.** (UFMT) A figura abaixo apresenta a leitura de um amperímetro.



Indique o circuito cujo amperímetro apresenta a mesma leitura indicada na figura.

Dados: Considere em cada circuito:

- $E = 10 \text{ V}$
- $R = 2 \Omega$  em cada um dos resistores



**EP10.** Se no circuito da alternativa  $d$  do exercício anterior (**EP9**), ainda com  $E = 10 \text{ V}$  e  $R = 2 \Omega$ , o amperímetro  $A$  fosse substituído por um voltmímetro ideal  $V$ , quantos volts ele acusaria?  $U_{AB} = 8 \text{ V}$

# Geradores e receptores elétricos



Andersen Ross/Blend Images/Getty Images

Brinquedos que funcionam com controle remoto, como esse carrinho da fotografia, precisam ter uma fonte de alimentação no brinquedo e também no console.



Sérgio Dotta Jr./The next

Reações de oxirredução, no interior de baterias e pilhas, convertem energia química em eletricidade.

Para que um carrinho de brinquedo se movimente, ele precisa receber energia, que é convertida em trabalho. Nesse caso, a energia elétrica vem de pilhas ou baterias. Da mesma maneira, as hélices de um liquidificador, ligado a uma tomada, também se movimentam porque há transformação de energia elétrica em trabalho. Pilhas, baterias ou tomadas fornecem energia elétrica, e os motores do carrinho e do liquidificador consomem essa energia.

Dispositivos como pilhas, baterias ou tomadas, que fornecem energia elétrica, são chamados de **geradores elétricos**; os que consomem essa energia, de **receptores elétricos**, no caso, os motores do carrinho e do liquidificador.

Neste capítulo estudaremos tanto o gerador como o receptor, caracterizando-os através de equações que envolvem os seus elementos, assim como os correspondentes diagramas, a potência que eles fornecem ou dissipam e os respectivos rendimentos.

## Gerador elétrico

No capítulo 8, vimos que, para a corrente elétrica poder fluir através de um resistor, é necessário que haja, entre seus terminais, uma ddp  $U$  fornecida por um gerador elétrico.

Um **gerador elétrico** é todo sistema capaz de transformar em energia elétrica qualquer outra modalidade de energia.

Como exemplos de geradores elétricos, podemos citar as usinas hidrelétricas (que convertem energia mecânica em elétrica), as pilhas e baterias ou acumuladores (que transformam energia química em elétrica).

A principal função do gerador elétrico é aumentar a energia potencial elétrica das cargas que por ele passam, fornecendo então eletricidade a um circuito externo.



Christian Rizzi/Fotoarena

Nas usinas hidrelétricas, a energia potencial gravitacional das grandes massas de água se converte em energia cinética e depois em eletricidade. Fotografia da usina de Itaipu (PR), em novembro de 2015.

## Força eletromotriz

A força eletromotriz (fem)  $E$  de um gerador é a ddp medida em seus terminais quando ele não está sendo percorrido por corrente elétrica. Por essa razão, ela pode ser também chamada de tensão em vazio. Sua unidade de medida, no SI, é o volt (V).

Observe que a denominação *força* é inadequada, uma vez que a grandeza não é uma força, mas uma diferença de potencial. Optamos, no entanto, por utilizá-la, por ser uma denominação amplamente disseminada.

Quando é atravessado por corrente elétrica, o gerador consome uma potência total não elétrica ( $P_t$ ), que depende da natureza da energia transformada (química, mecânica, térmica, nuclear etc.), da qual parte ( $P_d$ ) é dissipada internamente por efeito Joule e a potência restante ( $P$ ) é lançada no circuito externo.

Assim:

$$P_t = P + P_d$$

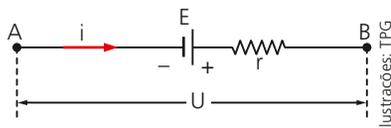
A fem  $E$  é definida como o quociente entre a potência total fornecida pelo gerador e a intensidade da corrente que o atravessa:

$$E = \frac{P_t}{i}$$

Quando dizemos que uma pilha tem 1,5 V ou que a bateria de um automóvel é de 12 V, esses valores correspondem à fem dos respectivos geradores.

## Representação e elementos de um gerador elétrico

Observe a representação a seguir:



- A e B: terminais do gerador elétrico;
- Barra menor (-): polo negativo (menor potencial elétrico);
- Barra maior (+): polo positivo (maior potencial elétrico);
- E: força eletromotriz;
- r: resistência interna;
- i: intensidade de corrente que atravessa o gerador elétrico;
- U: ddp fornecida pelo gerador elétrico.

Observe que a ddp entre os terminais do gerador é diferente da ddp oferecida ao circuito "externo", representado nesse esquema pelo conjunto de dispositivos que se ligarão aos pontos A e B. Isso ocorre porque o gerador consome uma parte da energia não elétrica recebida para lançar energia elétrica no circuito "externo"; para justificar essa diferença, atribuímos ao circuito "interno" do gerador uma resistência interna, que consome a diferença entre essas energias.

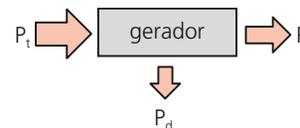
Como o sentido tomado pela corrente elétrica no gerador elétrico é sempre o de aumento de potencial elétrico,  $i$  entra pelo polo negativo e sai pelo positivo. A corrente elétrica só circula no gerador elétrico quando ele estiver ligado a um circuito externo fechado.

## Equação do gerador elétrico

Do que vimos anteriormente, temos:

$$P_t = P + P_d \quad (I) \quad \text{e} \quad E = \frac{P_t}{i} \Rightarrow P_t = E \cdot i \quad (II)$$

em que  $P_t$  é a potência não elétrica consumida pelo gerador elétrico.



Sinais dos polos na pilha e na bateria.

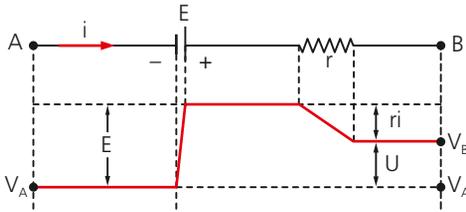
Sabemos que:

$$P = U \cdot i \quad (\text{III}) \quad \text{e} \quad P_d = r \cdot i^2 \quad (\text{IV})$$

em que  $P$  é a potência elétrica lançada no circuito pelo gerador elétrico e  $P_d$  é a potência elétrica dissipada internamente por ele.

Substituindo (II), (III) e (IV) em (I):

$$E \cdot i = U \cdot i + r \cdot i^2 \Rightarrow E = U + r \cdot i \Rightarrow U = E - r \cdot i$$



Essa é a equação do gerador elétrico. Note que, quando o gerador não é percorrido por corrente elétrica,  $i = 0$  e  $U = E$ , caracterizando um circuito aberto.

Considerando a equação do gerador elétrico, veja ao lado como varia o potencial elétrico entre os pontos A e B.

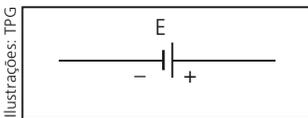
## Rendimento do gerador elétrico

Rendimento do gerador elétrico é o quociente entre a potência elétrica lançada no circuito fechado e a potência total não elétrica consumida pelo gerador:

$$\eta = \frac{P}{P_t} \quad \text{ou} \quad \eta = \frac{U \cdot i}{E \cdot i} = \frac{U}{E}$$

em que  $0 \leq \eta \leq 1$ . O rendimento percentual é  $\eta_{\%} = \eta \cdot 100\%$ .

Gerador elétrico ideal é aquele que, teoricamente, lança toda a potência recebida no circuito como potência elétrica. Esse gerador possui rendimento de 100% ( $\eta = 1$ ). Nesse caso, temos  $U = E$ , pois  $r = 0$  (resistência interna desprezível).



Representação do gerador ideal.

## Lei de Ohm-Pouillet

Considere o circuito simples (fechado) constituído por um gerador elétrico e um resistor conforme mostrado na figura 1.

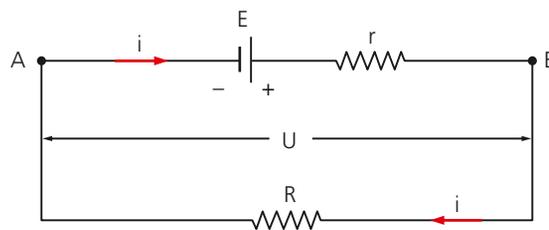


Figura 1

Como a ddp  $U$  é compartilhada por ambos os medidores elétricos, temos:

$$U = E - r \cdot i \quad (\text{equação do gerador elétrico})$$

$$U = R \cdot i \quad (\text{Primeira Lei de Ohm})$$

$$E - r \cdot i = R \cdot i \Rightarrow E = R \cdot i + r \cdot i \Rightarrow E = (R + r) \cdot i$$

Essa é a Lei de Ohm-Pouillet (Claude S. M. Pouillet, 1790-1868, físico e político francês).

Se o circuito externo for uma associação de resistores, temos o que está representado na figura 2.

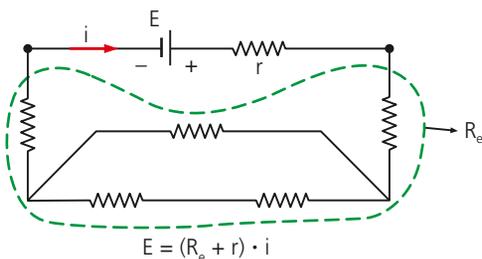


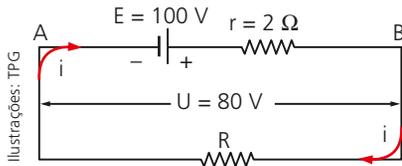
Figura 2

$$E = (R_e + r) \cdot i$$

## Exercícios resolvidos

**ER1.** Um gerador elétrico, de fem 100 V e resistência interna  $2 \Omega$ , alimenta um resistor de resistência  $R$ . Sabendo que a ddp entre os terminais do gerador é de 80 V, calcule:

- a intensidade da corrente no circuito;
- o valor de  $R$ ;
- o rendimento do gerador elétrico.



### Resolução:

Dados:  $E = 100 \text{ V}$ ;  $r = 2 \Omega$ ;  $U = 80 \text{ V}$

- a) Pela equação do gerador elétrico:

$$U = E - r \cdot i \Rightarrow 80 = 100 - 2i \Rightarrow i = 10 \text{ A}$$

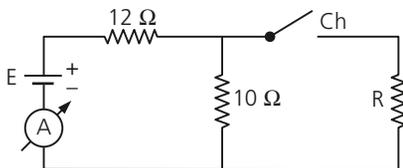
- b) Aplicando a Primeira Lei de Ohm no resistor  $R$ :

$$U = R \cdot i \Rightarrow 80 = R \cdot 10 \Rightarrow R = 8 \Omega$$

- c) Pela expressão do rendimento:

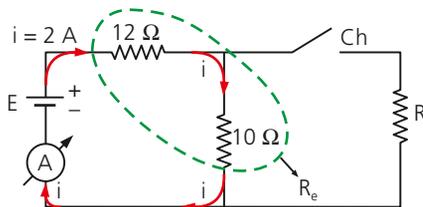
$$\eta = \frac{U}{E} = \frac{80}{100} = 0,8 \Rightarrow \eta_{\%} = 80\%$$

**ER2.** No circuito esquematizado, o gerador elétrico e o amperímetro são ideais. Com a chave Ch aberta, o amperímetro indica 2 A, e com ela fechada, marca 2,2 A. Determine o valor da resistência  $R$ .

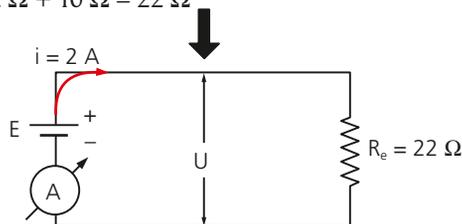


### Resolução:

Com a chave aberta:  $i = 2 \text{ A}$ .

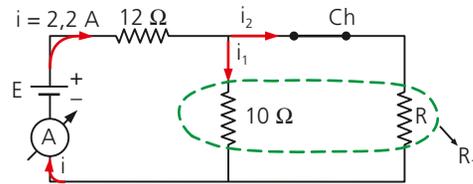


$$R_e = 12 \Omega + 10 \Omega = 22 \Omega$$

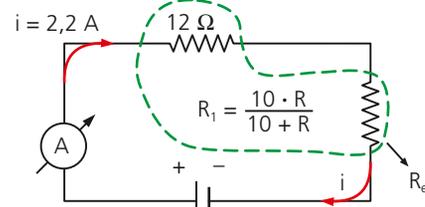


Como o gerador é ideal:  $U = E = R_e \cdot i = 22 \cdot 2 \Rightarrow U = E = 44 \text{ V}$ .

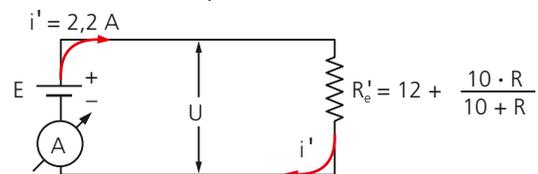
Com a chave fechada:  $i' = 2,2 \text{ A}$ .



$$R_1 = \frac{10 \cdot R}{10 + R}$$



$$R'_e = 12 + \frac{10 \cdot R}{10 + R}$$



Como  $U = 44 \text{ V}$  e  $U = R'_e \cdot i'$ :

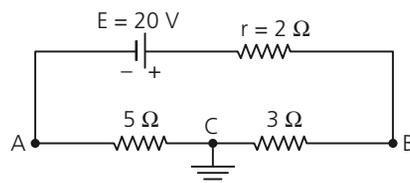
$$R'_e = 12 + \frac{10 \cdot R}{10 + R} \Rightarrow U = \left(12 + \frac{10 \cdot R}{10 + R}\right) \cdot i' \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 44 = \left(12 + \frac{10 \cdot R}{10 + R}\right) \cdot 2,2 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow R = 40 \Omega$$

Lembre-se de que geradores e amperímetros ideais são abstrações. Para um caso real, deveríamos considerar as respectivas resistências internas  $r$  e  $r_A$  no cálculo da ddp lançada para o circuito externo:  $U = (R_e + r + r_A) \cdot i$ .

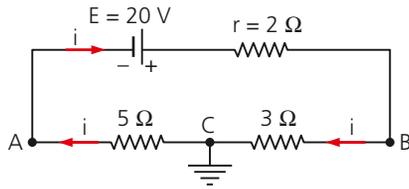
**ER3.** Dado o circuito da figura, determine os potenciais elétricos nos pontos  $A$  e  $B$ .



O símbolo ( $\oplus$ ) significa que o ponto  $C$  está aterrado.

### Resolução:

Inicialmente calculamos a intensidade da corrente no circuito elétrico, aplicando a Lei de Ohm-Pouillet:



Se o ponto C está aterrado, o potencial elétrico nele é nulo ( $V_C = 0$ ).

$$E = (R_e + R) \cdot i \Rightarrow 20 = (3 + 5 + 2) \cdot i \Rightarrow i = 2 \text{ A}$$

Aplicando a Primeira Lei de Ohm entre os pontos B e C:

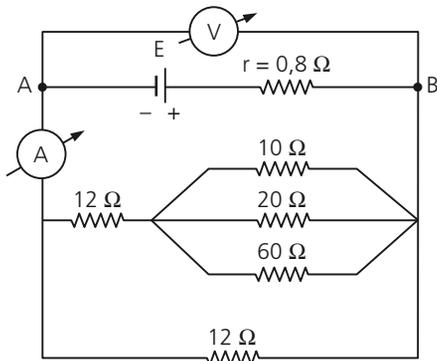
$$V_B - V_C = 3 \cdot i \Rightarrow V_B - 0 = 3 \cdot 2 \Rightarrow V_B = 6 \text{ V}$$

Do mesmo modo, entre os pontos A e C:

$$V_C - V_A = 5 \cdot i \Rightarrow 0 - V_A = 5 \cdot 2 \Rightarrow V_A = -10 \text{ V}$$

**ER4.** No circuito elétrico da figura, sabe-se que o resistor de  $10 \Omega$  dissipa uma potência de  $14,4 \text{ W}$ .

- Qual é a leitura no amperímetro ideal A?
- Qual é a leitura no voltmímetro ideal V?
- Qual é a fem E do gerador?
- Qual é o rendimento do gerador elétrico?



### Resolução:

O amperímetro A indica a intensidade de corrente  $i$  e o voltmímetro V indica a ddp  $U$ .

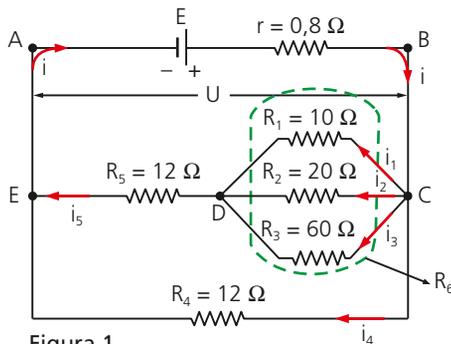


Figura 1

$$\frac{1}{R_6} = \frac{1}{10} + \frac{1}{20} + \frac{1}{60} = \frac{6 + 3 + 1}{60} = \frac{10}{60} \Rightarrow R_6 = 6 \Omega$$

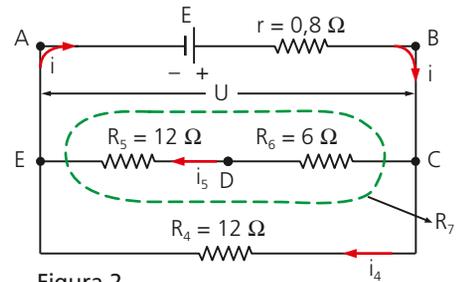


Figura 2

$$R_7 = 12 + 6 \Rightarrow R_7 = 18 \Omega$$

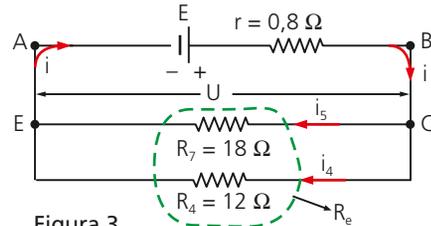


Figura 3

$$R_e = \frac{18 \cdot 12}{18 + 12} \Rightarrow R_e = 7,2 \Omega$$

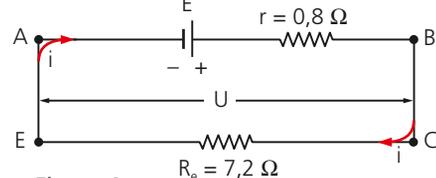


Figura 4

- a) Sabemos que  $P_1 = 14,4 \text{ W}$ .

Pela figura 1:

$$P_1 = R_1 \cdot i_1^2 \Rightarrow 14,4 = 10 \cdot i_1^2 \Rightarrow i_1 = 1,2 \text{ A}$$

$$U_{CD} = R_1 \cdot i_1 = 10 \cdot 1,2 \Rightarrow U_{CD} = 12 \text{ V}$$

$$i_2 = \frac{U_{CD}}{R_2} = \frac{12}{20} \Rightarrow i_2 = 0,6 \text{ A}$$

$$i_3 = \frac{U_{CD}}{R_3} = \frac{12}{60} \Rightarrow i_3 = 0,2 \text{ A}$$

$$i_5 = i_1 + i_2 + i_3 = 1,2 + 0,6 + 0,2 \Rightarrow i_5 = 2 \text{ A}$$

Pela figura 3:  $U_{CE} = R_7 \cdot i_5 = 18 \cdot 2 \Rightarrow U_{CE} = 36 \text{ V}$

$$i_4 = \frac{U_{CE}}{R_4} = \frac{36}{12} \Rightarrow i_4 = 3 \text{ A}$$

$$\text{Portanto: } i = i_4 + i_5 = 3 + 2 \Rightarrow i = 5 \text{ A}$$

- b) Pela figura 4:  $U = R_e \cdot i = 7,2 \cdot 5 \Rightarrow U = 36 \text{ V}$

- c) Aplicando a equação do gerador:

$$U = E - R \cdot i \Rightarrow 36 = E - 0,8 \cdot 5 \Rightarrow E = 40 \text{ V}$$

- d) Utilizando a expressão do rendimento:

$$\eta = \frac{U}{E} = \frac{36}{40} = 0,9 \Rightarrow \eta\% = 90\%$$

Esse valor significa que, da potência total fornecida pelo gerador, 90% são aproveitados nos resistores  $R_1$  a  $R_5$  e 10% são consumidos na resistência interna.

## Curto-circuito em um gerador elétrico

Dizemos que um gerador está em **curto-circuito** quando seus terminais estão ligados por um condutor de resistência elétrica desprezível ( $R = 0$ ). A intensidade da corrente, nessa condição, é denominada **corrente de curto-circuito** ( $i_{cc}$ ).

Sabemos que os terminais  $A$  e  $B$  em curto-circuito têm o mesmo potencial elétrico:

$$V_A = V_B$$

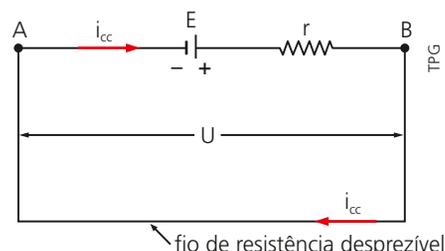
Portanto,  $U = U_A - U_B = 0$ .

Aplicando a equação do gerador elétrico:

$$U = 0 \Rightarrow i = i_{cc}$$

$$U = E - r \cdot i \Rightarrow 0 = E - r \cdot i_{cc} \Rightarrow i_{cc} = \frac{E}{r}$$

Quando um gerador está curto-circuitado, a intensidade da corrente  $i_{cc}$  que circula por ele é a máxima possível. Além disso, sua resistência interna  $r$  dissipa toda a potência elétrica — o que pode danificar o gerador —, sem deixar resto para o circuito externo.



Gerador curto-circuitado.

## A FÍSICA NO COTIDIANO

### Curto-circuito e segurança

Com frequência ouvimos que o provável causador de incêndio em uma construção foi um curto-circuito na rede elétrica, mas como isso acontece?

Como vimos, a resistência elétrica do curto-circuito é desprezível, ou seja, praticamente toda a corrente elétrica gerada é devolvida ao gerador e, com isso, toda a energia é dissipada quase que instantaneamente no gerador, o que pode causar explosões, faíscas e calor. Normalmente, numa construção, o curto-circuito se dá por dois motivos: fios desencapados que se encostam ou por um aumento súbito na tensão da rede elétrica.

Para evitar o primeiro tipo de curto-circuito é necessário garantir a qualidade dos fios e cabos utilizados na rede elétrica durante a construção e que todas as emendas de fios estejam bem isoladas. Além disso, o diâmetro do fio deve ser adequado para a quantidade de energia que será requisitada pelos equipamentos que serão ligados à tomada, a fim de evitar o derretimento da proteção de borracha, razão do efeito Joule. Por exemplo, os fios do chuveiro, que usa muita energia para esquentar a resistência, são mais grossos que a maioria dos fios utilizados no restante de sua casa.

O segundo curto-circuito é evitado utilizando-se fusíveis e disjuntores específicos para cada tipo de rede. Os disjuntores (como visto no capítulo 9) interrompem a passagem da corrente ou, como se diz comumente, o disjuntor desarma. Nesse caso, basta que, depois de solucionado o problema, se arme manualmente o disjuntor novamente. Em alguns casos, o disjuntor desarma constantemente. Isso significa que, de algum modo, a rede está mal dimensionada — ou porque o disjuntor tem corrente nominal muito baixa para o circuito ou porque o próprio circuito está sobrecarregado. Nesse caso, devemos verificar o que está causando o aumento da corrente e redimensionar o circuito.

O funcionamento do fusível é semelhante, no entanto, ele se funde e interrompe a passagem da corrente elétrica. Nesse caso, dizemos que o fusível está “queimado”, e é preciso substituí-lo por um novo depois de sanar o problema. Para cada tipo de rede existe um fusível e um disjuntor adequados, além de uma quantidade desses elementos a serem usados.



Conjunto de disjuntores.

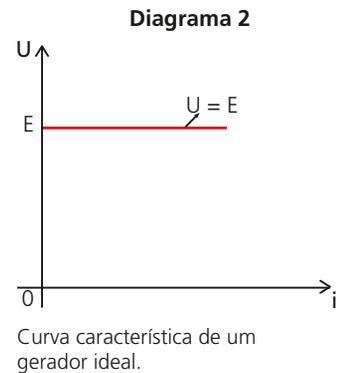
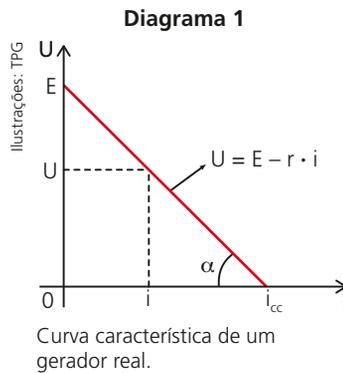
## Curva característica do gerador elétrico

Pela equação do gerador ( $U = E - r \cdot i$ ) permanecem constantes a fem  $E$  e a resistência interna  $r$ . A ddp  $U$  em seus terminais varia em função da intensidade da corrente  $i$  que o atravessa.  $U = E - r \cdot i$  é uma função do 1º grau em  $i$ . Portanto, a curva característica do gerador é uma reta.

Pelo diagrama 1, apresentado abaixo, se  $i = 0 \Rightarrow U = E$  (circuito fechado); se  $U = 0 \Rightarrow i = i_{cc} = \frac{E}{r}$ . Repare que o coeficiente angular da reta ( $-r$ ) é, em valor absoluto:

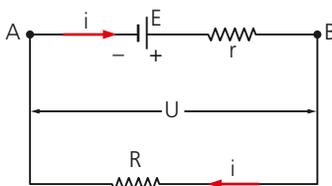
$$\text{tg } \alpha \stackrel{N}{=} r$$

Para um gerador elétrico ideal ( $r = 0$ ):  $U = E = \text{constante}$ . Veja o diagrama 2.



Não há um limite para a corrente em circuitos alimentados por geradores ideais. Em termos mais reais, podemos dizer que, quanto menor for a resistência interna de um gerador, maior será a corrente de curto-circuito que o atravessa.

## Potência elétrica lançada em um resistor



Um circuito gerador-resistor é um sistema isolado: toda a potência lançada no circuito externo (resistor  $R$ ) pelo gerador é integralmente consumida por  $R$ .

Considere um circuito simples constituído de um gerador e um resistor.

A potência elétrica que o gerador lança no resistor é expressa por  $P = U \cdot i$ .

Tomando a equação do gerador elétrico e multiplicando todos os termos por  $i$ , temos a expressão da potência elétrica lançada pelo gerador no resistor:

$$U = E - r \cdot i \Rightarrow U \cdot i = (E - r \cdot i) \cdot i \Rightarrow P = E \cdot i - r \cdot i^2$$

Trata-se de uma função de 2º grau em  $i$ . Portanto, a curva de  $P = f(i)$  é uma parábola com a concavidade voltada para baixo, como a representada a seguir.

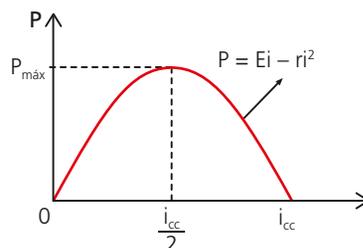


Diagrama de  $P = f(i)$ .

Note que para  $P = 0$  o gerador não lança potência no resistor. Há duas situações em que isso acontece:

$$0 = E \cdot i - r \cdot i^2 \Rightarrow i \cdot (E - r \cdot i) = 0 \Rightarrow i = 0 \text{ ou } E - r \cdot i = 0 \Rightarrow i = \frac{E}{r} = i_{cc}$$

Na situação  $i = 0$ , o gerador elétrico está em circuito aberto; quando  $i = i_{cc}$ , o gerador apresenta-se em curto-circuito.

## Potência máxima lançada por um gerador elétrico

Pelo diagrama da página anterior,  $P = f(i)$ , a potência elétrica máxima ( $P_{\text{máx}}$ ) lançada por um gerador corresponde ao vértice da parábola. Nesse ponto, a intensidade da corrente que o atravessa vale a metade da corrente de curto-circuito. Assim, o gerador lança sua máxima potência quando:

$$i = \frac{i_{cc}}{2} = \frac{E}{2r}$$

Para calcular a potência elétrica máxima, basta substituir  $i$  por  $\frac{E}{2r}$  na expressão:

$$P = E \cdot i - r \cdot i^2 \Rightarrow P_{\text{máx}} = E \cdot \frac{E}{2r} - r \cdot \left(\frac{E}{2r}\right)^2 \Rightarrow P_{\text{máx}} = \frac{E^2}{2r} - \frac{E^2}{4r} = \frac{E^2}{4r}$$

Portanto,  $P_{\text{máx}} = \frac{E^2}{4r}$  é expressão da potência elétrica máxima lançada por um gerador.

Substituindo  $i = \frac{E}{2r}$  na equação do gerador elétrico:

$$U = E - r \cdot i \Rightarrow U = E - r \cdot \frac{E}{2r} = \frac{E}{2} \Rightarrow U = \frac{E}{2}$$

Desse modo, a ddp nos terminais do gerador, na situação em que é lançada a potência máxima, vale a metade de sua fem.

Como o rendimento do gerador é  $\eta = \frac{U}{E}$ , quando ele estiver disponibilizando a potência máxima, seu rendimento será de apenas 50%:

$$\eta = \frac{U}{E} = \frac{\frac{E}{2}}{E} = \frac{1}{2} \Rightarrow \eta = 0,5$$

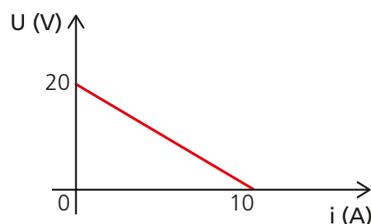
Substituindo  $i = \frac{E}{2r}$  na equação da Lei de Ohm-Pouillet (circuito simples gerador-resistor), temos:  $E = (R + r) \cdot i = (R + r) \cdot \frac{E}{2r} \Rightarrow R = r$

A resistência do resistor associado é igual à resistência interna do gerador quando ele estiver lançando a potência elétrica máxima.

## Exercícios resolvidos

**ER5.** A figura ao lado mostra a curva característica de um gerador elétrico. Determine:

- a fem  $E$  e a corrente de curto-circuito do gerador;
- a resistência interna do gerador;
- a ddp nos terminais do gerador quando ele é ligado a um resistor de resistência  $R = 8 \Omega$ .



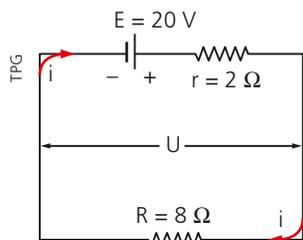
Ilustrações: TPG

### Resolução:

a) Pelo diagrama, temos  $E = 20 \text{ V}$  e  $i_{cc} = 10 \text{ A}$

b)  $\text{tg } \alpha \stackrel{N}{=} r = \frac{E}{i_{cc}} = \frac{20}{10} \Rightarrow r = 2 \Omega$

c) Esquematizando o circuito elétrico e aplicando a Lei de Ohm-Pouillet, encontramos a intensidade de corrente que circula no gerador:



$$E = (R + r) \cdot i \Rightarrow 20 = (8 + 2) \cdot i \Rightarrow i = 2 \text{ A}$$

Pela equação do gerador elétrico:

$$U = E - r \cdot i \Rightarrow U = 20 - 2 \cdot 2 \Rightarrow U = 16 \text{ V}$$

**ER6.** Um gerador elétrico obedece à seguinte função:  $U = 40 - 5 \cdot i$ , com as unidades de medida do SI. Calcule:

- a) sua corrente de curto-circuito;
- b) a potência lançada pelo gerador quando nele circula uma corrente de 5 A.

### Resolução:

a) Fazendo uma leitura da equação apresentada:

$$E = 40 \text{ V e } r = 5 \Omega.$$

Portanto:  $i_{cc} = \frac{E}{r} = \frac{40}{5} \Rightarrow i_{cc} = 8 \text{ A}$

b)  $U = 40 - 5 \cdot 5 = 40 - 25 \Rightarrow U = 15 \text{ V}$

$$P = U \cdot i = 15 \cdot 5 \Rightarrow P = 75 \text{ W}$$

**ER7.** A potência elétrica lançada por um gerador é expressa por:  $P = 12 \cdot i - 2 \cdot i^2$ ; unidades de medida do SI. Calcule:

- a) a potência máxima que o gerador elétrico pode disponibilizar;
- b) a intensidade da corrente de curto-circuito do gerador;
- c) a intensidade da corrente no gerador quando estiver produzindo 10 W de potência.

### Resolução:

a) Aplicando a expressão da potência elétrica máxima lançada:

$$P_{\text{máx}} = \frac{E^2}{4r} = \frac{12^2}{4 \cdot 2} = \frac{144}{8} \Rightarrow P_{\text{máx}} = 18 \text{ W}$$

b) Utilizando a expressão da corrente de curto-

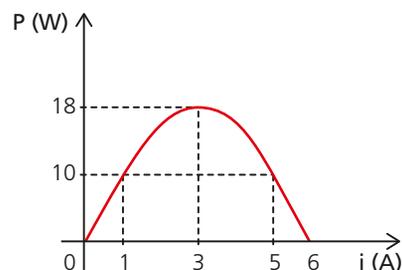
circuito:  $i_{cc} = \frac{E}{r} = \frac{12}{2} \Rightarrow i_{cc} = 6 \text{ A}$

c) Substituindo  $P = 10 \text{ W}$  na expressão da potência elétrica, obtemos:

$$P = 12 \cdot i - 2 \cdot i^2 \Rightarrow 10 = 12 \cdot i - 2 \cdot i^2 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 2 \cdot i^2 - 12 \cdot i + 10 = 0 \Rightarrow i = 1 \text{ A ou } 5 \text{ A}$$

Esboçando o diagrama de  $P = f(i)$ , temos:



**ER8.** Um gerador, quando percorrido por uma corrente de intensidade 10 A, está fornecendo potência elétrica máxima ao circuito externo. Sendo de 500 W essa potência, determine sua fem  $E$  e sua resistência interna  $r$ .

### Resolução:

$$i = 10 \text{ A e } P_{\text{máx}} = 500 \text{ W}$$

Quando um gerador elétrico está produzindo sua potência máxima, temos:

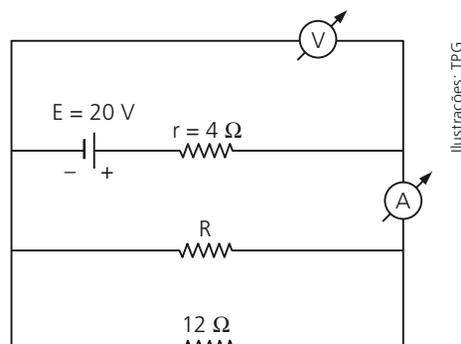
$$i = \frac{i_{cc}}{2} = \frac{E}{2r} \Rightarrow 10 = \frac{E}{2r} \Rightarrow E = 20r \quad (\text{I})$$

$$P_{\text{máx}} = \frac{E^2}{4r} \Rightarrow 500 = \frac{E^2}{4r} \Rightarrow E^2 = 2000r \quad (\text{II})$$

Substituindo (I) em (II), obtemos:  $E = 100 \text{ V e } r = 5 \Omega$

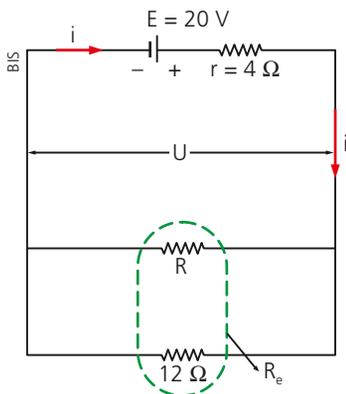
**ER9.** O gerador elétrico da figura a seguir está lançando a máxima potência ao circuito. Determine:

- a) o valor da resistência  $R$ ;
- b) as indicações do voltímetro  $V$  e do amperímetro  $A$ , ambos ideais.



### Resolução:

O voltímetro indicará a ddp  $U$  nos terminais do gerador, e o amperímetro, a intensidade da corrente  $i$ .



Como o gerador está produzindo a potência máxima, temos:

$$a) R_e = r = 4 \Omega$$

$$R_e = \frac{12 \cdot R}{12 + R} = 4 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 12 \cdot R = 48 + 4 \cdot R \Rightarrow R = 6 \Omega$$

$$b) U = \frac{E}{2} = \frac{20}{2} \Rightarrow U = 10 \text{ V}$$

$$U = R_e \cdot i \Rightarrow 10 = 4 \cdot i \Rightarrow i = 2,5 \text{ A}$$



## Associação de geradores elétricos

Dois ou mais geradores podem ser associados do mesmo modo que os resistores. Assim, eles podem ser associados em série, em paralelo ou de forma mista.

O **gerador elétrico equivalente** é o gerador unitário que deve manter em seus terminais a mesma tensão e a mesma corrente total da associação. Na prática, muitos dispositivos elétricos precisam de algum tipo de associação para oferecer alguma vantagem.

Se os aparelhos ou dispositivos requerem, para seu funcionamento, duas ou mais pilhas, elas constituem uma associação de geradores elétricos. Assim, quando você abre um aparelho de controle remoto ou outro dispositivo eletrônico qualquer, normalmente existem duas ou mais pilhas associadas.



Fotografias: Sérgio Dotta Jr./The next

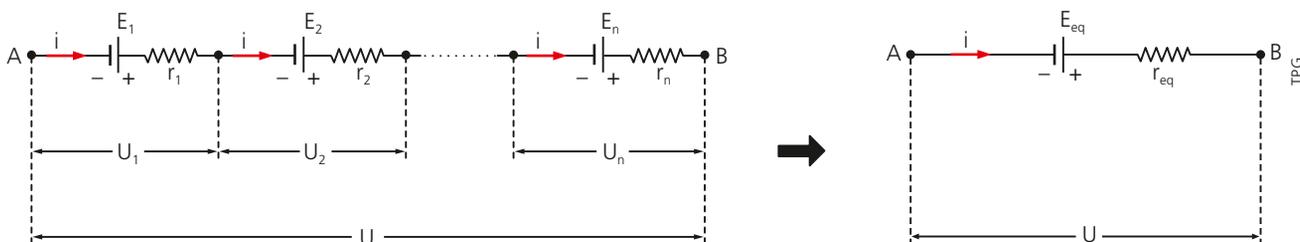
### Associação em série

Nesse tipo de associação, todos os geradores devem ser atravessados pela mesma intensidade de corrente e, para que isso ocorra, o polo positivo de um gerador deve ser ligado ao polo negativo do outro, e assim por diante.



Associação de três pilhas em série.

No esquema abaixo, temos  $n$  geradores associados em série, bem como o gerador equivalente a essa associação.



Associação de geradores em série.

Gerador equivalente.

Note que a ddp total  $U$  é a soma das ddp's parciais de cada gerador associado:

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$$

Escrevendo a equação de cada gerador elétrico da associação e somando-as membro a membro, temos:

$$\begin{array}{r}
 U_1 = E_1 - r_1 \cdot i \\
 U_2 = E_2 - r_2 \cdot i \\
 + \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \\
 U_n = E_n - r_n \cdot i \\
 \hline
 U_1 + U_2 + \dots + U_n = (E_1 + E_2 + \dots + E_n) - (r_1 + r_2 + \dots + r_n) \cdot i \\
 U = (E_1 + E_2 + \dots + E_n) - (r_1 + r_2 + \dots + r_n) \cdot i
 \end{array}$$

Comparando essa expressão com a equação do gerador equivalente,  $U = E_{eq} - r_{eq} \cdot i$ , concluímos que:

$$\begin{aligned}
 E_{eq} &= E_1 + E_2 + \dots + E_n \\
 r_{eq} &= r_1 + r_2 + \dots + r_n
 \end{aligned}$$

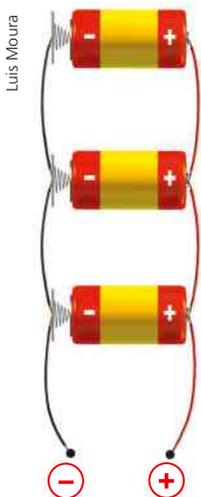
Numa associação de geradores elétricos em série, aumentam a fem (o que é uma vantagem) e a resistência interna (em compensação, uma desvantagem).

No caso particular da associação em série de  $n$  geradores iguais, de fem  $E$  e resistência interna  $r$  cada, temos:  $E_{eq} = n \cdot E$  e  $r_{eq} = n \cdot r$

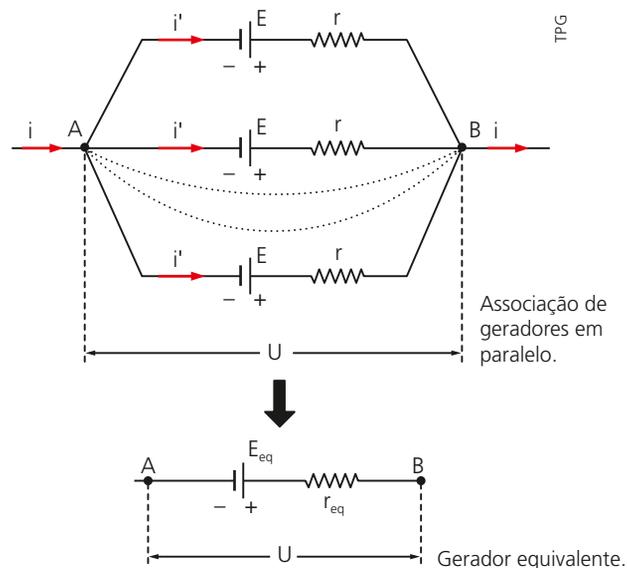
### Associação em paralelo

Nesse tipo de associação, todos os geradores elétricos estão sob a mesma ddp. Para que isso possa acontecer, os polos de mesmo sinal devem ser ligados um com o outro, o outro com o próximo e assim sucessivamente (positivo com positivo e negativo com negativo). Aqui estudaremos apenas associações em paralelo com geradores iguais.

No esquema abaixo, temos  $n$  geradores iguais associados em paralelo, bem como o gerador equivalente.



Pilhas associadas em paralelo devem ter sempre a mesma fem. Por esse motivo, recomenda-se sempre utilizar pilhas novas ou substituir todas, se necessário.



Repare que a corrente que atravessa cada gerador associado é:

$$i' = \frac{i}{n} \Rightarrow i = i' \cdot n, \text{ pois } i = i' + i' + \dots + i'$$

Escrevendo a equação de cada gerador da associação e somando-as membro a membro, temos:

$$\begin{array}{r}
 U = E - r \cdot i' \\
 U = E - r \cdot i' \\
 \vdots \\
 U = E - r \cdot i' \\
 \hline
 n \cdot U = n \cdot (E - r \cdot i) \Rightarrow U = E - r \cdot i' = E - r \cdot \frac{i}{n} \Rightarrow U = E - \frac{r}{n} \cdot i
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{r} U = E - r \cdot i' \\ U = E - r \cdot i' \\ \vdots \\ U = E - r \cdot i' \end{array}} \right\} n \text{ vezes}$$

Comparando essa expressão com a equação do gerador elétrico equivalente,  $U = E_{eq} - r_{eq} \cdot i$ , concluímos que:  $E_{eq} = E$  e  $r_{eq} = \frac{r}{n}$

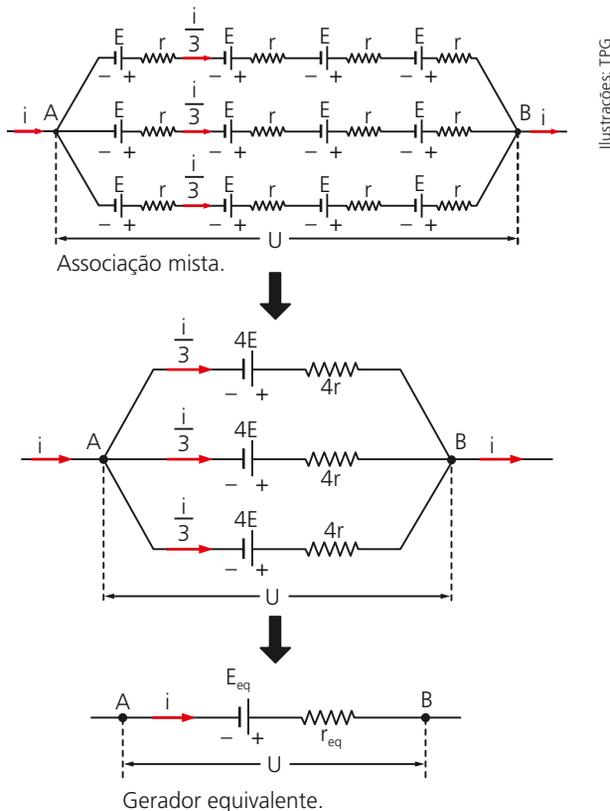
Numa associação de geradores em paralelo, fica mantida a fem  $E$  do gerador associado (desvantagem) e diminui a resistência interna (vantagem). Outra vantagem é que a potência desse tipo de associação é maior se comparada com um único gerador.

### Associação mista ou simétrica

Nesse tipo de associação, combinam-se  $p$  ramos de geradores elétricos em paralelo, cada um contendo  $s$  geradores iguais ligados em série.

No exemplo do esquema seguinte, temos 3 ramos em paralelo, cada um contendo 4 geradores iguais associados em série.

Para  $p = 3$  e  $s = 4$ , o número total de geradores da associação é  $n = s \cdot p$ .



Portanto, o gerador equivalente possui:  $E_{eq} = s \cdot E$  e  $r_{eq} = \frac{s}{p} \cdot r$

No exemplo,  $E_{eq} = 4E$  e  $r_{eq} = \frac{4}{3} \cdot r$ .

## Exercícios resolvidos

**ER10.** Dois geradores elétricos estão associados em série: o primeiro possui fem  $E_1 = 1,5 \text{ V}$  e resistência interna  $r_1 = 0,5 \Omega$ , e o segundo, fem  $E_2 = 4,5 \text{ V}$  e resistência interna  $r_2 = 1,0 \Omega$ . Determine a fem, a resistência interna e a corrente de curto-circuito do gerador equivalente.

### Resolução:

$$E_1 = 1,5 \text{ V}; r_1 = 0,5 \Omega; E_2 = 4,5 \text{ V}; r_2 = 1,0 \Omega$$

Na associação em série:

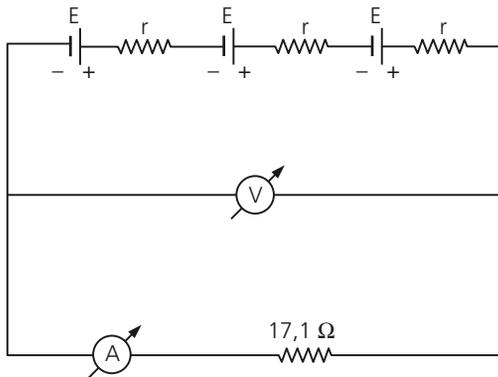
$$E_{\text{eq}} = E_1 + E_2 = 1,5 + 4,5 \Rightarrow E_{\text{eq}} = 6,0 \text{ V}$$

$$r_{\text{eq}} = r_1 + r_2 = 0,5 + 1,0 \Rightarrow r_{\text{eq}} = 1,5 \Omega$$

A corrente de curto-circuito é:

$$i_{\text{cc}} = \frac{E_{\text{eq}}}{r_{\text{eq}}} = \frac{6,0}{1,5} \Rightarrow i_{\text{cc}} = 4 \text{ A}$$

**ER11.** No circuito esquematizado na figura, cada gerador elétrico possui fem  $E = 1,5 \text{ V}$  e resistência interna  $r = 0,3 \Omega$ .

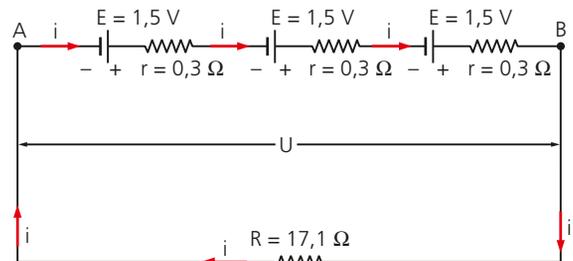


Determine as indicações do amperímetro  $A$  e do voltímetro  $V$ , ambos ideais.

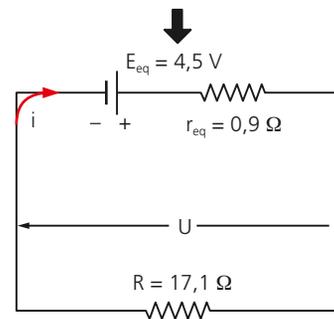
### Resolução:

$$E = 1,5 \text{ V e } r = 0,3 \text{ A}$$

O amperímetro indicará a intensidade da corrente  $i$  do circuito, e o voltímetro, a ddp  $U$  entre os terminais  $A$  e  $B$  da associação:



Ilustrações: TPG



Como os geradores associados em série são iguais:

$$E_{\text{eq}} = n \cdot E = 3 \cdot 1,5 \text{ V} = 4,5 \text{ V}$$

$$r_{\text{eq}} = n \cdot r = 3 \cdot 0,3 \Omega = 0,9 \Omega$$

Aplicando a Lei de Ohm-Pouillet no esquema final:

$$E_{\text{eq}} = (R + r_{\text{eq}}) \cdot i \Rightarrow 4,5 = (17,1 + 0,9) \cdot i \Rightarrow i = 0,25 \text{ A}$$

Aplicando a Primeira Lei de Ohm no resistor  $R$ :

$$U = R \cdot i = 17,1 \cdot 0,25 \Rightarrow U = 4,275 \text{ V}$$

## Receptor elétrico

Se num resistor há transformação de energia elétrica exclusivamente em térmica, o mesmo não acontece no receptor, pois há a conversão dela em outras formas de energia, principalmente a mecânica.

**Receptor elétrico** é todo aparelho que transforma energia elétrica em outras modalidades que não seja exclusivamente a térmica.

Como exemplos, podemos citar os motores elétricos que acionam liquidificadores, enceradeiras e outras máquinas domésticas e industriais.

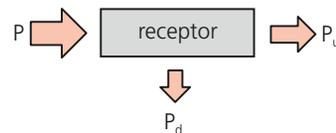
A função do receptor (motor) elétrico, como o deste liquidificador, é receber energia elétrica de um gerador e convertê-la em energia mecânica útil — o restante é dissipado internamente como energia térmica. Assim, o receptor, ao fornecer energia mecânica, perde parte da energia potencial das cargas que por ele passam.



Fernando Favoretto/Criar Imagem

## Força contraeletromotriz

Quando um receptor é percorrido por corrente elétrica, recebe uma potência elétrica ( $P$ ), da qual parte é utilizada ( $P_u$ ) para realizar trabalho e o restante é dissipada internamente por efeito Joule ( $P_d$ ). Assim:  $P = P_u + P_d$ .

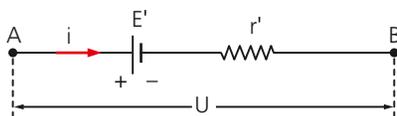


A **força contraeletromotriz** ( $f_{cem}$ )  $E'$  é definida como o quociente entre a potência elétrica útil fornecida pelo receptor e a intensidade da corrente que o atravessa.

$$E' = \frac{P_u}{i}$$

Por essa expressão, a  $f_{cem}$   $E'$  tem como unidade, no SI, o volt, pois:  $V = \frac{W}{A}$ . Assim como a força eletromotriz, a grandeza força contraeletromotriz não é uma força, mas uma diferença de potencial.

Veja a seguir a representação de um receptor elétrico e seus elementos.



- $A$  e  $B$ : terminais do receptor;
- Barra maior (+): polo positivo (maior potencial elétrico);
- Barra menor (-): polo negativo (menor potencial elétrico);
- $E'$ : força contraeletromotriz;
- $r'$ : resistência interna;
- $i$ : intensidade da corrente que atravessa o receptor;
- $U$ : ddp nos terminais do receptor.

Como o sentido de movimentação da corrente elétrica no receptor vai do ponto de maior para o de menor potencial elétrico,  $i$  entra pelo polo positivo e sai pelo negativo. A corrente só circulará no receptor elétrico quando ele fizer parte de um circuito fechado.

## Equação do receptor elétrico

Como:

$$P = P_u + P_d \quad (I) \quad E' = \frac{P_u}{i} \Rightarrow P_u = E' \cdot i \quad (II)$$

E sabendo-se que:

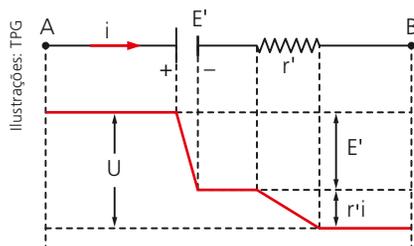
$$P = U \cdot i \quad (III) \quad P_d = r' \cdot i^2 \quad (IV)$$

Deduz-se a equação do receptor elétrico substituindo (II), (III) e (IV) em (I):

$$U \cdot i = E' \cdot i + r' \cdot i^2 \quad (\text{dividindo os termos por } i)$$

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

Veja como varia o potencial elétrico entre os terminais  $A$  e  $B$  do receptor:



## Rendimento do receptor elétrico

O rendimento de um receptor elétrico é o quociente entre a potência elétrica útil fornecida no sistema e a potência elétrica consumida pelo receptor:

$$\eta' = \frac{E' \cdot i}{U \cdot i} = \frac{E'}{U} \Rightarrow \eta' = \frac{P_u}{P} = \frac{E'}{U} \quad (0 \leq \eta' \leq 1)$$

O rendimento percentual é:

$$\eta'_{\%} = \eta' \cdot 100$$

Receptor elétrico ideal é aquele que tem um rendimento de 100% ( $\eta' = 1$ ). Nesse caso, temos  $U = E'$ , com toda a potência elétrica sendo consumida para realizar trabalho, sem haver dissipação de parte dela por aquecimento.

No motor elétrico, a energia útil corresponde normalmente à realização de trabalho mecânico de rotação do seu eixo. Se o eixo for bloqueado,  $P_u = 0 \Rightarrow E' = 0$ , então temos como resultado um rendimento nulo. Nesse caso, toda a energia elétrica converte-se em térmica, havendo o risco de que o motor se queime, passando a funcionar como um simples resistor.

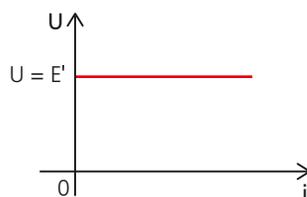
## Curva característica do receptor elétrico

Na equação do receptor elétrico, que é uma função de 1ª grau em  $i$ , são constantes suas fcm  $E'$  e resistência interna  $r'$ . A ddp  $U$  em seus terminais modifica-se em função da intensidade da corrente  $i$  que o atravessa. Portanto, a curva característica de um receptor é uma reta.

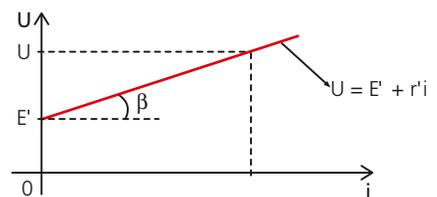
Se  $i = 0$ ,  $U = E'$ , caracterizando um circuito aberto (figura 1).

Note que o coeficiente angular da reta  $r'$  é:

$$\text{tg } \beta \stackrel{N}{=} r'$$



**Figura 1:** Curva característica de um receptor ideal.



**Figura 2:** Curva característica de um receptor real.

Ilustrações: TPG

Para um receptor elétrico ideal ( $r' = 0$ ):  $U = E' = \text{constante}$ .

As baterias (acumuladores) dos automóveis, ao contrário das pilhas secas, podem funcionar tanto como geradores quanto como receptores, dependendo do sentido percorrido pela corrente no circuito em que estão instaladas. Atuando como geradores, elas transformam energia química em elétrica e, como receptores, a transformação é inversa (e feita pelo seu dínamo).

## Exercícios resolvidos

**ER12.** Temos um motor elétrico, de fcm 20 V e resistência interna  $2 \Omega$ , atravessado por corrente elétrica de 10 A. Nessas condições, calcule:

- a ddp em seus terminais;
- o rendimento do motor.

### Resolução:

a) Aplicando a equação do receptor elétrico:

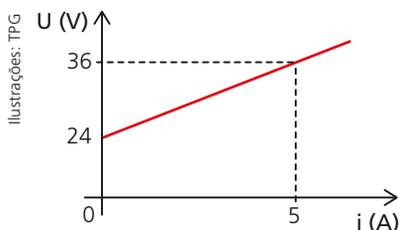
$$U = E' + r'i$$

$$U = 20 + 2 \cdot 10 = 20 + 20 \Rightarrow U = 40 \text{ V}$$

b) O rendimento do motor é expresso por:

$$\eta' = \frac{E'}{U} = \frac{20}{40} = 0,5 \Rightarrow \eta'_{\%} = 50\%$$

**ER13.** A figura mostra a curva característica de um receptor elétrico.

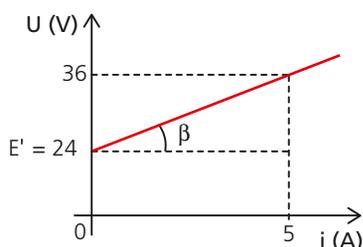


Determine:

- sua fcm;
- sua resistência interna;
- seu rendimento quando percorrido por uma corrente de intensidade 8 A.

### Resolução:

Temos:



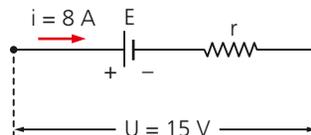
- Pelo diagrama:  $E' = 24 \text{ V}$
- $\text{tg } \beta \cong r' = \frac{36 - 24}{5} = \frac{12}{5} \Rightarrow r' = 2,4 \Omega$
- Se  $i = 8 \text{ A}$ :  
 $U = E' + r' \cdot i = 24 + 2,4 \cdot 8 \Rightarrow U = 43,2 \text{ V}$   
 $\eta' = \frac{E'}{U} = \frac{24}{43,2} \cong 0,5556 \Rightarrow \eta'_{\%} \cong 55,56\%$

**ER14.** Uma bateria, quando recebe do circuito externo a potência de 120 W, é atravessada pela corrente  $i = 8 \text{ A}$ .

Invertendo-se seus terminais, a bateria passa a entregar ao circuito externo a potência de 40 W e a corrente passa a ser  $i' = 4 \text{ A}$ . Determine a fem (ou fcm) e a resistência interna da bateria.

### Resolução:

Trata-se de uma bateria reversível, isto é, ora funciona como gerador, ora como receptor.



Na primeira situação, ela recebe do circuito externo 120 W de potência e é percorrida pela corrente de 8 A, portanto atua como receptor elétrico:

$$P = 120 \text{ W}$$

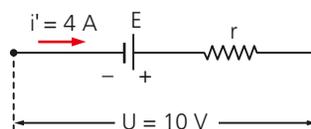
$$i = 8 \text{ A}$$

$$U = \frac{P}{i} = \frac{120}{8} \Rightarrow U = 15 \text{ V}$$

A equação do receptor elétrico é:

$$U = E + r \cdot i \Rightarrow 15 = E + r \cdot 8 \quad (\text{I})$$

Invertendo os terminais, a bateria passa a funcionar como um gerador, pois lança ao circuito uma potência de 40 W e é percorrida pela corrente de 4 A.



Assim:

$$P' = 40 \text{ W}$$

$$i' = 4 \text{ A}$$

$$U' = \frac{P'}{i'} = \frac{40}{4} \Rightarrow U' = 10 \text{ V}$$

A equação do gerador elétrico é:

$$U' = E - r \cdot i \Rightarrow 10 = E - r \cdot 4 \quad (\text{II})$$

Resolvendo o sistema formado pelas equações (I) e (II), resulta:

$$E \cong 11,67 \text{ V} \quad \text{e} \quad r \cong 0,42 \Omega$$

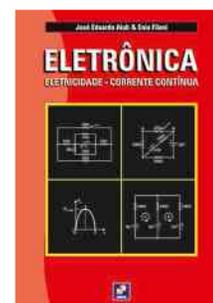
## PARA SABER MAIS

### Livro

#### Eletrônica: Eletricidade — Corrente contínua

José Eduardo Aiub e Enio Filoni. Editora Érica

Este livro é referência no estudo de circuitos. Seu objetivo é ensinar as primeiras noções de eletricidade e eletrônica a estudantes de Ensino Médio e aos que desejam aprofundar seus conhecimentos na área. Você terá oportunidade de rever os conceitos fundamentais de eletricidade e as leis de Ohm, além de analisar circuitos em um texto objetivo e bem ilustrado.



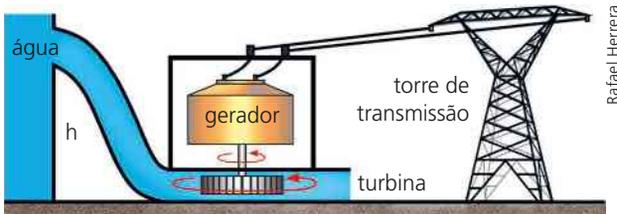
Editora Érica

# Exercícios propostos

**EP1.** Um gerador elétrico de fem  $80\text{ V}$  e resistência interna  $5\ \Omega$  alimenta um resistor de resistência  $R$ . Sabendo que a ddp entre os terminais do gerador é de  $60\text{ V}$ , calcule:

- a) a intensidade da corrente no circuito;  **$4\text{ A}$**
- b) o valor de  $R$ ;  **$15\ \Omega$**
- c) o rendimento do gerador elétrico.  **$75\%$**

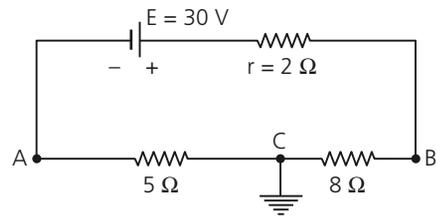
**EP2.** (Enem-MEC) Na figura abaixo está esquematizado um tipo de usina utilizada na geração de eletricidade.



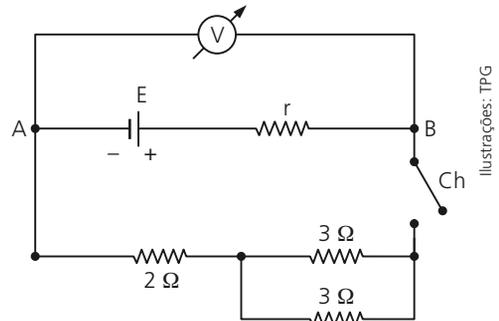
- 1) Analisando o esquema, é possível identificar que se trata de uma usina:
  - a) hidrelétrica, porque a água corrente baixa a temperatura da turbina.
  - b) hidrelétrica, porque a usina faz uso da energia cinética da água. **X**
  - c) termoeétrica, porque no movimento das turbinas ocorre aquecimento.
  - d) eólica, porque a turbina é movida pelo movimento da água.
  - e) nuclear, porque a energia é obtida do núcleo das moléculas de água.
- 2) A eficiência de uma usina, do tipo da representada na figura da questão anterior, é da ordem de  $0,9$ , ou seja,  $90\%$  da energia da água no início do processo se transforma em energia elétrica. A usina Ji-Paraná, do estado de Rondônia, tem potência instalada de  $512$  milhões de watts e a barragem tem altura de aproximadamente  $120\text{ m}$ . A vazão do rio Ji-Paraná, em litros de água por segundo, deve ser da ordem de:
  - a)  $50$ .
  - b)  $500$ .
  - c)  $5000$ .
  - d)  $50000$ .
  - e)  $500000$ . **X**
- 3) No processo de obtenção de eletricidade, ocorrem várias transformações de energia. Considere duas delas:
  - I. Cinética em elétrica
  - II. Potencial gravitacional em cinética
 Analisando o esquema, é possível identificar que elas se encontram, respectivamente, entre:
  - a) I — a água no nível  $h$  e a turbina.  
II — o gerador e a torre de distribuição.

- b) I — a água no nível  $h$  e a turbina.  
II — a turbina e o gerador.
- c) I — a turbina e o gerador.  
II — a turbina e o gerador.
- d) I — a turbina e o gerador.  
II — a água no nível  $h$  e a turbina. **X**
- e) I — o gerador e a torre de distribuição.  
II — a água no nível  $h$  e a turbina.

**EP3.** Dado o circuito da figura, determine os potenciais elétricos nos pontos  $A$  e  $B$ .  **$V_A = -10\text{ V}$  e  $V_B = 16\text{ V}$** .

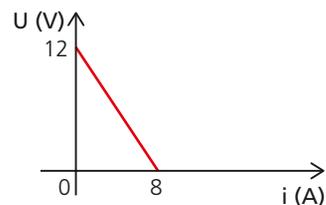


**EP4.** No circuito elétrico esquematizado, quando a chave  $Ch$  está aberta, o voltímetro ideal marca  $9,0\text{ V}$  e quando está fechada,  $7,0\text{ V}$ . Considerando os dados da figura, determine:



- a) o valor da força eletromotriz do gerador;  **$E = 9,0\text{ V}$**
- b) a intensidade de corrente que atravessa o gerador com a chave fechada;  **$i = 2,0\text{ A}$**
- c) o valor da resistência interna do gerador;  **$r = 1\ \Omega$**
- d) o rendimento do gerador;  **$77,8\%$**
- e) a potência elétrica dissipada no resistor de  $2\ \Omega$ .  **$8,0\text{ W}$**

**EP5.** O diagrama representa a curva característica de uma bateria de automóvel.



- a) O que representa a corrente de intensidade  $8\text{ A}$  no diagrama dado? **Resposta nas Orientações Didáticas.**
- b) Quanto vale a resistência interna da bateria?  **$r = 1,5\ \Omega$**

- c) Escreva no caderno a equação do gerador elétrico (bateria).  $U = 12 - 1,5 \cdot i$  (unidades SI)
- d) Conectando à bateria um resistor de  $8,5 \Omega$ , que intensidade de corrente percorre o circuito?  $i = 1,2 \text{ A}$

**EP6.** Dada a equação de um gerador elétrico:  $U = 30 - 5 \cdot i$ , onde  $U$  é medido em volts e  $i$  em ampères, determine:

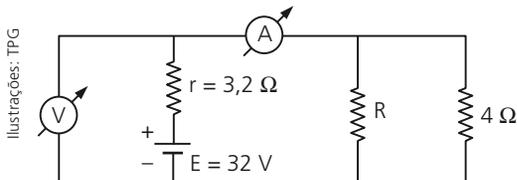
- a) sua corrente de curto-circuito;  $6 \text{ A}$
- b) a intensidade de corrente quando em seus terminais estiver ligada uma lâmpada de  $40 \text{ W}$ .  $2 \text{ A}$  ou  $4 \text{ A}$

**EP7.** A potência elétrica fornecida por um gerador é expressa por:  $P = 16 \cdot i - 2 \cdot i^2$ ; unidades de medida do SI. Calcule:

- a) a potência máxima que o gerador pode lançar;  $32 \text{ W}$
- b) a intensidade da corrente de curto-circuito do gerador;  $8 \text{ A}$
- c) a intensidade da corrente no gerador quando estiver desenvolvendo  $30 \text{ W}$  de potência.  $3 \text{ A}$  ou  $5 \text{ A}$

**EP8.** Um gerador elétrico, quando percorrido por uma corrente de intensidade  $6 \text{ A}$ , fornece potência máxima ao circuito externo. Sendo de  $144 \text{ W}$  essa potência elétrica, determine sua fem  $E$  e sua resistência interna  $r$ .  
 $E = 48 \text{ V}$  e  $r = 4 \Omega$ .

**EP9.** O gerador da figura está lançando a potência elétrica máxima no circuito. Determine:



- a) o valor da resistência  $R$ ;  $16 \Omega$
- b) as indicações do voltímetro  $V$  e do amperímetro  $A$ , ambos ideais.  $16 \text{ V}$  e  $5 \text{ A}$

**EP10.** O que diferencia uma associação de geradores elétricos em série de outra em paralelo?

Resposta nas Orientações Didáticas.

**EP11.** Uma câmera fotográfica digital usa duas pilhas alcalinas de tamanho AA associadas em série, cada uma com fem  $1,5 \text{ V}$  e resistência interna  $0,6 \Omega$ .

- a) Qual é a vantagem de as pilhas estarem associadas em série? *A vantagem da associação em série é possibilitar o aumento da fem.*
- b) Determine a fem e a resistência interna equivalentes à associação.  $E_{eq} = 3,0 \text{ V}$  e  $r_{eq} = 1,2 \Omega$

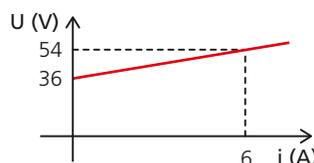
**EP12.** Numa associação em paralelo de três pilhas, cada uma tem fem de  $1,5 \text{ V}$  e resistência interna de  $1,2 \Omega$ . Calcule a fem e a resistência interna equivalentes.  $E_{eq} = 1,5 \text{ V}$  e  $r_{eq} = 0,4 \Omega$ .

**EP13.** Uma associação mista de pilhas é constituída de três ramos, cada um contendo quatro pilhas em série. Se cada uma delas possui fem  $E = 1,5 \text{ V}$  e resistência interna  $r = 1,2 \Omega$ , determine a fem e a resistência interna equivalentes.  $E_{eq} = 6 \text{ V}$  e  $r_{eq} = 1,6 \Omega$ .

**EP14.** Temos um motor elétrico de fem  $80 \text{ V}$  e resistência interna  $5 \Omega$  que é atravessado por uma corrente elétrica de  $8 \text{ A}$ . Nessas condições, calcule:

- a) a ddp em seus terminais;  $120 \text{ V}$
- b) o rendimento do motor.  $66,7\%$

**EP15.** A figura mostra a curva característica de um receptor elétrico.



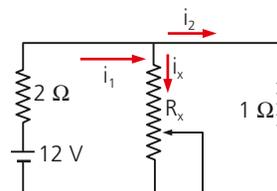
Determine:

- a) sua fem;  $36 \text{ V}$
- b) sua resistência interna;  $3 \Omega$
- c) seu rendimento quando percorrido por uma corrente de intensidade  $12 \text{ A}$ .  $50\%$

**EP16.** Uma dona de casa, querendo fazer uma bela vitamina para seu filho, colocou as frutas devidamente descascadas e cortadas junto com alguns cubos de gelo para bater no liquidificador. Ao ligar o aparelho, as pás não giraram, pois ficaram travadas pelo gelo.

- a) Que providência imediata a dona de casa deve tomar? *Desligar imediatamente o aparelho.*
- b) O que pode acontecer se nenhuma providência for tomada? *Se não for desligado, toda a energia elétrica será convertida em calor, acarretando um superaquecimento do motor a ponto de queimá-lo, inutilizando o aparelho.*

**EP17.** (UFMS) No circuito abaixo, um gerador de força eletromotriz  $12 \text{ V}$  e resistência interna de  $2 \Omega$  está ligado a um reostato de resistência  $R_x$ , onde  $0 \leq R_x \leq 10 \Omega$ , em paralelo com um resistor de  $1 \Omega$ . As intensidades de corrente  $i_x$ ,  $i_1$  e  $i_2$  estão representadas no circuito.



É correto afirmar que

- 01)  $i_x = 0$  quando  $R_x = 0$ . *incorreta*
- 02)  $i_2 = R_x \cdot i_x$ . *correta*
- 04)  $-R_x \cdot i_x + 12 + 2i_1 = 0$ . *incorreta*
- 08) o valor máximo que  $i_x$  pode assumir é  $0,6 \text{ A}$ . *incorreta*
- 16) o gerador não poderá operar com potência máxima. *correta*



# Leis de Kirchhoff

A energia elétrica que chega em nossa casa percorre um longo caminho. Ele se inicia numa usina (hidroelétrica, termoelétrica, nuclear etc.), onde estão instalados os geradores elétricos, e trafega através de linhas de transmissão.

Ao longo desse trajeto, a energia elétrica vai passando por várias subestações que, utilizando transformadores, vão reduzindo sua alta tensão, de alguns milhares de volts até atingir cerca de 240 V, alcançando lares, estabelecimentos comerciais, fábricas etc.

Esse conjunto, que é gigantesco, constitui um circuito complexo ou rede elétrica.

## Rede elétrica

A rede elétrica é uma associação de geradores, receptores, resistores, indutores, capacitores e outros dispositivos elétricos, interligados entre si. Como exemplo de rede elétrica, podemos citar o conjunto de todos os componentes elétricos de um automóvel, de uma residência ou de uma indústria, assim como os de aparelhos de rádio, TV etc.



Daniel Cymbalista/Pulsar Imagens

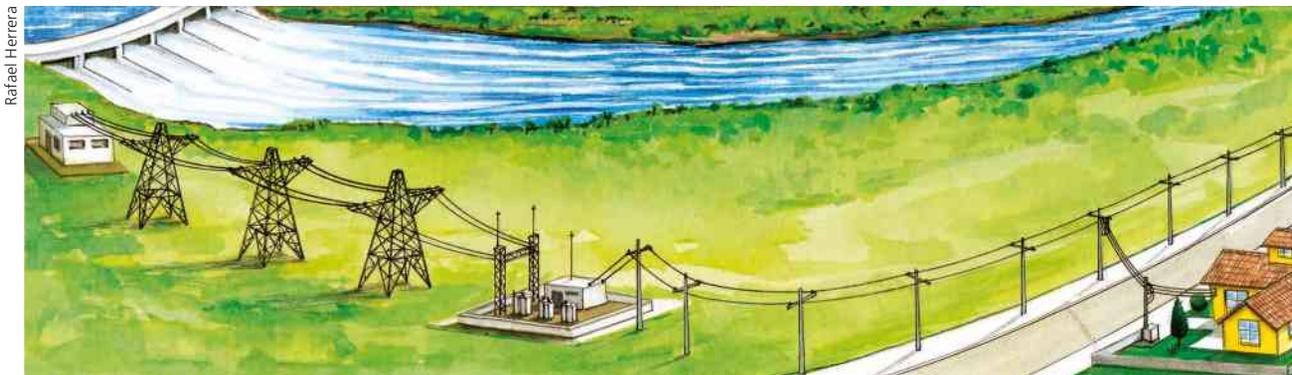
Emaranhado de fios elétricos.



Thinkstock/Getty Images

Placa composta de componentes eletroeletrônicos.

Bobinas ou indutores só serão estudados em circuitos AC, fora do escopo desta obra.



Rafael Herrera

Representação de rede de transmissão de energia elétrica: desde sua origem na usina até alcançar uma residência. Imagem com elementos sem proporção entre si e em cores fantasia.

Para determinar a intensidade de corrente elétrica que percorre os diversos ramos de uma rede elétrica, utilizamos as Leis de Kirchhoff.

## A FÍSICA NA HISTÓRIA

### História da energia elétrica no Brasil

O uso da eletricidade no lugar dos lampiões a óleo para a iluminação de vias se iniciou no Brasil em 1879, mesma época da Europa e Estados Unidos, graças ao invento do dínamo e da lâmpada elétrica. A estrada de ferro D. Pedro II no Rio de Janeiro foi a que recebeu as primeiras luminárias elétricas no Brasil, de origem termelétrica.

Depois disso, foi-se expandindo a rede de distribuição juntamente com as empresas operadoras (nacionais e estrangeiras), além da criação das primeiras usinas termelétricas e hidrelétricas ainda no século XIX.

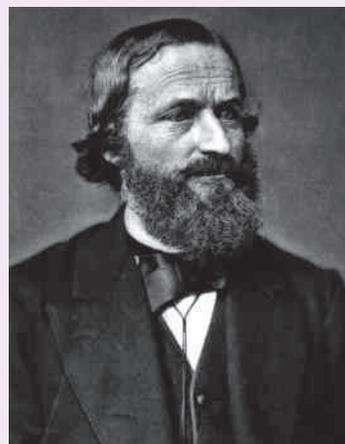
Um grande passo para a soberania nacional foi a promulgação, em 1937, do Código de Águas, que atribuiu à União exclusividade para o aproveitamento hidrelétrico destinado ao serviço público, ou seja, o potencial hidrelétrico destinado a esse serviço pode ser utilizado somente pelo governo brasileiro, o único que pode fazer concessões às empresas privadas.

Com o crescimento da quantidade de empresas operadoras estaduais e federais, fez-se necessária a criação, em 1960, do Ministério de Minas e Energia, que passou a ser o responsável pela regulamentação de toda a rede produtora e distribuidora de energia elétrica.

A partir daí iniciou-se a integração da rede elétrica nacional, visando aumentar o alcance da produção de energia elétrica e a expansão do número de usinas, como a de Itaipu e as usinas nucleares de Angra dos Reis.

Em 2013, iniciou-se a construção da usina de Belo Monte, no Pará, alvo de grandes polêmicas entre grupos contra a sua construção e grupos a favor. De um lado, a preocupação com os impactos ambientais e consequências para as comunidades indígenas locais e, de outro, o potencial econômico e energético que a usina pode representar para o Brasil.

Outros recursos energéticos também estão sendo explorados, como a energia nuclear, solar, eólica e o biodiesel.

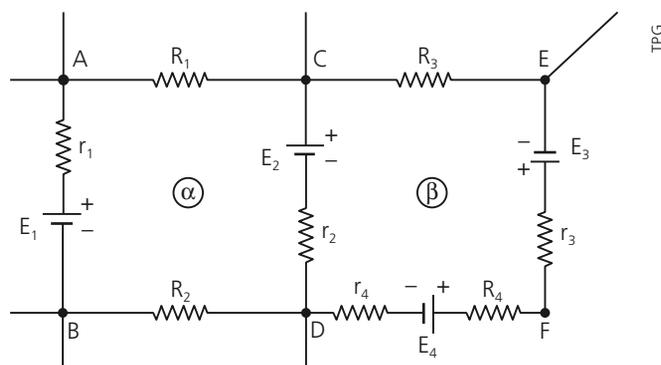


Library of Congress

Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887), físico alemão.

### Representação de uma rede elétrica e seus principais elementos

- Nó: ponto de encontro de três ou mais elementos do circuito elétrico. No exemplo dado, os pontos *C* e *D* são nós.
- Ramo: trecho do circuito elétrico que liga dois nós consecutivos. No exemplo, *CD*, *CABD* e *CEFD* são ramos do circuito.
- Malha: conjunto de ramos que forma um circuito elétrico fechado. No exemplo, vemos três malhas: *ACDBA* ( $\alpha$ ), *CEFD* ( $\beta$ ) e *ACEFD* (*parte de*  $\alpha$  + *parte de*  $\beta$ ).



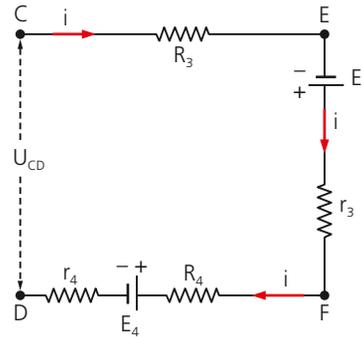
Trecho de uma rede elétrica e seus elementos.

## Lei de Ohm generalizada

Considerando determinado ramo de um circuito elétrico contendo em série resistores, geradores e receptores, é possível determinar a ddp entre seus extremos aplicando a Lei de Ohm generalizada:

$$U = i \cdot \Sigma \text{resistores} + \Sigma f_{\text{cem}} - \Sigma f_{\text{em}}$$

Observe que a expressão reflete a lei da conservação da energia no ramo, bastando multiplicá-la por unidade de carga elétrica.



O ramo CEFD.

Tomando o ramo CEFD do circuito elétrico anterior e supondo-o percorrido pela corrente elétrica  $i$  no sentido de  $C$  para  $D$ , a expressão da Lei de Ohm generalizada fornece:

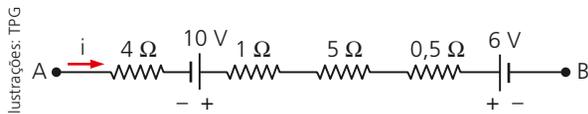
$$U_{CD} = V_C - V_D = i \cdot (R_3 + r_3 + R_4 + r_4) + E_4 - E_3$$

Qual o motivo da igualdade? Considerando que os ramos  $CD$  e  $CEFD$  estão em paralelo, a ddp entre os extremos de  $CD$  e entre os extremos de  $CEFD$  são iguais. Também o sentido da corrente nos informa que  $E_3$  funciona como receptor e  $E_4$ , como gerador.

$$\text{Naturalmente, } U_{DC} = V_D - V_C = -(V_C - V_D) = -i \cdot (R_3 + r_3 + R_4 + r_4) - E_4 + E_3.$$

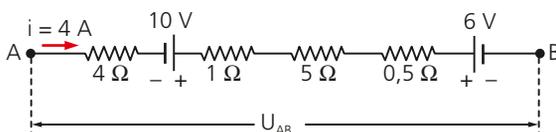
## Exercício resolvido

**ER1.** No trecho do circuito elétrico representado, a intensidade de corrente é de 4 A. Determine a ddp:



- entre os pontos  $A$  e  $B$ ;
- entre os pontos  $B$  e  $A$ .

### Resolução:



- Aplicando a Lei de Ohm generalizada, temos:

$$U_{AB} = i \cdot \Sigma \text{resistores} + \Sigma f_{\text{cem}} - \Sigma f_{\text{em}}$$

$$U_{AB} = 4 \cdot (4 + 1 + 5 + 0,5) + 6 - 10$$

$$\therefore U_{AB} = 38 \text{ V}$$

- Para obter a ddp entre os pontos solicitados, basta multiplicar o resultado obtido anteriormente por  $-1$ . Portanto:

$$U_{BA} = -38 \text{ V, pois } U_{BA} = V_B - V_A = -(V_A - V_B) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow U_{BA} = -(U_{AB}) = -38 \Rightarrow U_{BA} = -38 \text{ V}$$

# Leis de Kirchhoff

São duas as leis de Kirchhoff que podem ser aplicadas na resolução de exercícios envolvendo redes elétricas. Verifique que ambas também refletem a conservação da energia nos trechos do circuito em que se aplicam.

## Primeira Lei de Kirchhoff ou Lei dos Nós

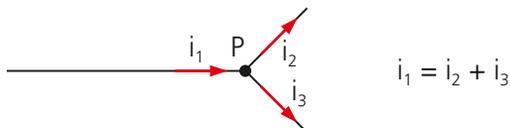
Em qualquer nó, a soma das intensidades de correntes elétricas que nele chegam é igual à soma das que dele saem. Aqui, você deve se lembrar de que a corrente “sai” ou “entra” de acordo com o sentido que teriam as cargas positivas se estas pudessem se mover no circuito.

Os estudantes têm grande dificuldade em associar a corrente com um escalar. Ressalte que “entrar” ou “sair” aqui é uma mera questão de convenção.

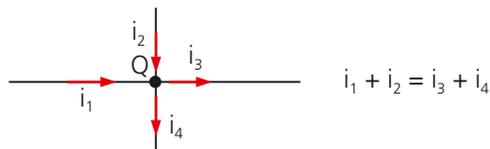
$$\sum i_{\text{chegam}} = \sum i_{\text{saem}}$$

Exemplificando:

- nó P: nele chega  $i_1$  e dele saem  $i_2$  e  $i_3$ .



- nó Q: nele chegam  $i_1$  e  $i_2$  e dele saem  $i_3$  e  $i_4$ .

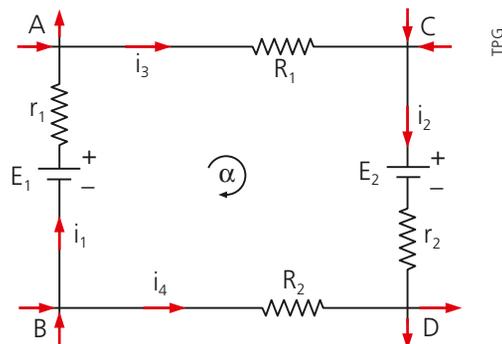


## Segunda Lei de Kirchhoff ou Lei das Malhas

Em qualquer malha, a soma algébrica das ddps ao longo de seus ramos, percorridos em um sentido arbitrário, é nula.

$$\sum U = 0$$

Vamos retomar a malha ACDBA:



Não conhecemos o sentido das correntes nessa malha, então adotamos um sentido arbitrário para cada corrente e um sentido arbitrário para percorrer o circuito, digamos sentido horário; durante a resolução da malha, essas adoções se mostrarão corretas ou não, pelo sinal que obtivermos para o valor dessa corrente. Assim, considerando a malha  $\alpha$  atravessada por corrente elétrica no sentido horário, a partir do ponto A até completar o circuito, temos as seguintes variações do potencial:

- $R_1 \cdot i_3$ : sinal positivo, pois o sentido da corrente no ramo AC coincide com o sentido adotado para a corrente na malha;
- $E_2$ : sinal positivo, pois a corrente do ramo CD entra pelo polo positivo, configurando  $E_2$  como um receptor;
- $r_2 \cdot i_2$ : sinal positivo, pois o sentido da corrente no ramo CD coincide com o sentido adotado para a corrente na malha;
- $R_2 \cdot i_4$ : sinal negativo, pois o sentido da corrente no ramo BD não coincide com o sentido adotado para a corrente na malha;
- $E_1$ : sinal negativo, pois a corrente do ramo AB entra pelo polo negativo, configurando  $E_1$  como um gerador;
- $r_1 \cdot i_1$ : sinal positivo, pois o sentido da corrente no ramo AB coincide com o sentido adotado para a corrente na malha.

Portanto, a Segunda Lei de Kirchhoff para a malha ACDBA se torna:

$$R_1 \cdot i_3 + E_2 + r_2 \cdot i_2 - R_2 \cdot i_4 - E_1 + r_1 \cdot i_1 = 0$$

## Roteiro de resolução de redes elétricas

Esse roteiro é, de modo geral, como o apresentado a seguir:

- nomear com letras todos os nós da rede elétrica;
- marcar todas as malhas;
- sinalizar arbitrariamente o sentido da corrente nos diversos ramos da rede elétrica, tomando o cuidado para que em um nó não estejam só entrando ou só saindo correntes;
- adotar arbitrariamente um sentido de percurso nas malhas (horário ou anti-horário);
- considerando que há  $n$  nós em  $m$  malhas na rede:
  - aplicar a Primeira Lei de Kirchhoff para  $n - 1$  nós;
  - aplicar a Segunda Lei de Kirchhoff para as  $m$  malhas principais.
- aplicadas as leis, devem resultar tantas equações quantas forem as incógnitas (sempre verificar isso);
- resolver o sistema de equações. Caso o valor da intensidade de corrente que atravessa determinado ramo seja negativo, deve-se inverter o sentido adotado arbitrariamente, colocando-o na orientação convencional e expressando o resultado em valor absoluto. Se esse ramo tiver um gerador elétrico, a corrente convencional deve entrar pelo polo negativo e sair pelo positivo; caso contrário, será um receptor.

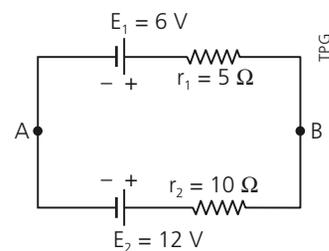
## Exercícios resolvidos

**ER2.** Existe alguma semelhança entre as Leis de Kirchhoff e a Lei de Ohm-Pouillet? Justifique sua resposta.

### Resolução:

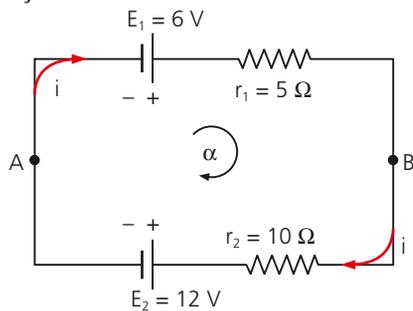
Sim, pois ambas servem para determinar intensidades de corrente. A Lei de Ohm-Pouillet só define correntes elétricas em circuitos simples de uma malha, enquanto as Leis de Kirchhoff as estabelecem também para redes elétricas mais complexas.

**ER3.** No esquema apresentado, temos duas baterias ligadas em paralelo:



- Qual é a intensidade de corrente que circula pelas baterias?
- Qual é o valor da diferença de potencial entre os pontos  $A$  e  $B$  e qual o ponto de maior potencial?
- Qual das duas baterias está funcionando como receptor?

## Resolução:

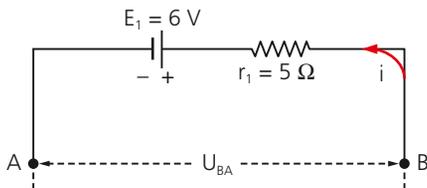


- a) O circuito elétrico apresentado é constituído apenas de uma malha e, portanto, não possui um nó. Assim, aplicando a Segunda Lei de Kirchhoff na malha  $\alpha$ , a partir do ponto A, com o sentido de percurso coincidente com o da corrente  $i$ , ambos adotados arbitrariamente, temos:

$$-E_1 + r_1 \cdot i + r_2 \cdot i + E_2 = 0 \Rightarrow -6 + 5 \cdot i + 10 \cdot i + 12 = 0 \Rightarrow 15 \cdot i = -6 \Rightarrow i = -0,4 \text{ A}$$

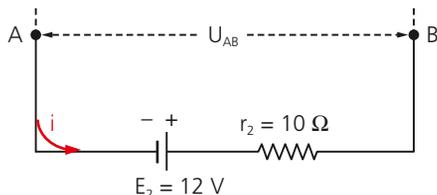
Como a corrente elétrica resultou negativa, significa que o sentido adotado é contrário ao convencional. Portanto, em valor absoluto:  $i = 0,4 \text{ A}$ .

- b) Tomando o ramo AB, que contém a bateria ( $E_1, r_1$ ), já com a determinação do sentido correto da corrente elétrica  $i$  e aplicando a Lei de Ohm generalizada, temos:



$$U_{BA} = V_B - V_A = i \cdot \Sigma \text{resistores} + \Sigma \text{fcm} - \Sigma \text{fem} \Rightarrow U_{BA} = 0,4 \cdot 5 + 6 \Rightarrow U_{BA} = +8 \text{ V}$$

Analogamente, no outro ramo da bateria ( $E_2, r_2$ ) temos:



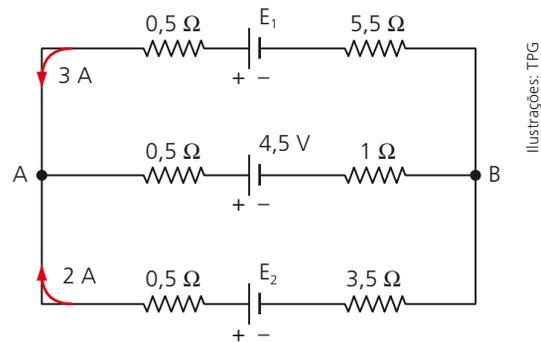
$$U_{AB} = V_A - V_B = i \cdot \Sigma \text{resistores} + \Sigma \text{fcm} - \Sigma \text{fem} \Rightarrow U_{AB} = 0,4 \cdot 10 + 0 - 12 \Rightarrow U_{AB} = -8 \text{ V}$$

Portanto, a ddp entre os pontos A e B, em valor absoluto, é  $U = 8 \text{ V}$  e o ponto de maior potencial elétrico é o B.

- c) A bateria ( $E_1, r_1$ ) está funcionando como receptor, pois o sentido convencional de corrente entra pelo polo positivo e sai pelo negativo.

ER4. Dada a rede elétrica apresentada abaixo, calcular:

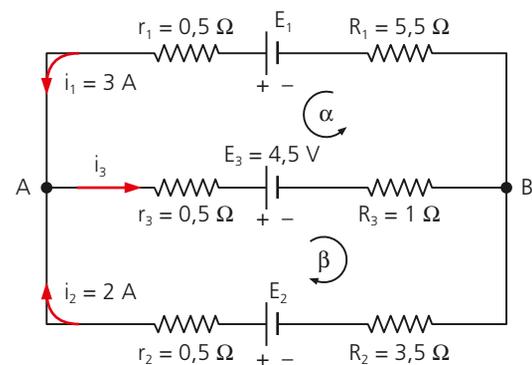
- a)  $E_1$ ; b)  $E_2$ ; c) a tensão entre A e B.



## Resolução:

A rede apresentada possui  $n = 2$  nós (A e B). Portanto, aplicando a primeira Lei de Kirchhoff para  $n - 1$  nós, temos:

$$i_1 + i_2 = i_3 \text{ (no nó A)} \Rightarrow 3 + 2 = i_3 \Rightarrow i_3 = 5 \text{ A}$$



- a) Aplicando a Segunda Lei de Kirchhoff na malha  $\alpha$ , no sentido de percurso adotado:

$$r_3 \cdot i_3 + E_3 + R_3 \cdot i_3 + R_1 \cdot i_1 - E_1 + r_1 \cdot i_1 = 0 \\ 0,5 \cdot 5 + 4,5 + 1 \cdot 5 + 5,5 \cdot 3 - E_1 + 0,5 \cdot 3 = 0 \Rightarrow E_1 = 30 \text{ V}$$

- b) Procedendo do mesmo modo com a malha  $\beta$ :

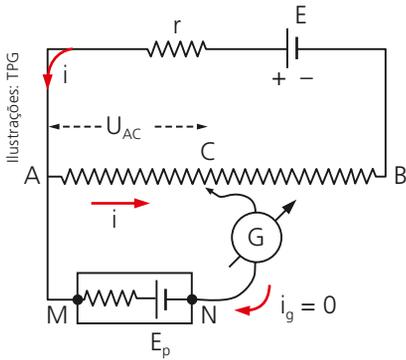
$$r_3 \cdot i_3 + E_3 + R_3 \cdot i_3 + R_2 \cdot i_2 - E_2 + r_2 \cdot i_2 = 0 \\ 0,5 \cdot 5 + 4,5 + 1 \cdot 5 + 3,5 \cdot 2 - E_2 + 0,5 \cdot 2 = 0 \Rightarrow E_2 = 20 \text{ V}$$

- c) Aplicando a Lei de Ohm generalizada no ramo central AB temos:

$$U_{AB} = V_A - V_B = i \cdot \Sigma \text{resistores} + \Sigma \text{fcm} - \Sigma \text{fem} \Rightarrow U_{AB} = i_3 \cdot (r_3 + R_3) + E_3 - 0 \Rightarrow U_{AB} = 5 \cdot (0,5 + 1) + 4,5 \Rightarrow U_{AB} = 12 \text{ V}$$



## Potenciômetro de Poggendorff



O físico alemão Johann C. Poggendorff (1796-1877) idealizou um circuito, como o do esquema ao lado, denominado potenciômetro, que permite determinar precisamente a força eletromotriz de uma pilha (bateria) com os seguintes elementos:

- um gerador elétrico ( $E, r$ ) alimenta o circuito.
- inicialmente, intercala-se entre os pontos  $M$  e  $N$  uma pilha padrão de fem  $E_p$  previamente conhecida. Ajusta-se o cursor no ponto  $C$  do fio homogêneo de seção transversal constante até que o galvanômetro acuse corrente nula ( $i_g = 0$ ); dizemos que nesse caso o potenciômetro está em equilíbrio.

Nessas condições, temos:

- pela Primeira Lei de Ohm:

$$U_{AC} = R_{AC} \cdot i \quad (I)$$

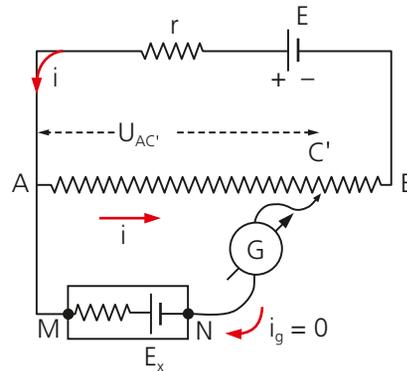
- pela equação da pilha padrão:

$$U_{AC} = E_p - r_p \cdot i_g \Rightarrow \text{como } i_g = 0 \Rightarrow U_{AC} = E_p \quad (II)$$

Comparando (I) e (II), concluímos que:

$$R_{AC} \cdot i = E_p \quad (III), \text{ sendo } E_p < E$$

- Em seguida, substitui-se no circuito a pilha padrão pela pilha de fem  $E_x$  desconhecida e ajusta-se novamente o cursor numa posição  $C'$  tal que  $i_g = 0$ .



Assim, temos:

- pela Primeira Lei de Ohm:

$$U_{AC'} = R_{AC'} \cdot i \quad (IV)$$

- pela equação da pilha desconhecida:

$$U_{AC'} = E_x - R_x \cdot i_g \Rightarrow \text{como } i_g = 0 \Rightarrow U_{AC'} = E_x \quad (V)$$

Comparando (IV) e (V), concluímos que:

$$R_{AC'} \cdot i = E_x \quad (VI), \text{ sendo } E_x < E$$

- Como a intensidade de corrente  $i$  fornecida pelo gerador elétrico que alimenta o circuito é a mesma, podemos eliminar  $i$ , dividindo membro a membro as expressões (III) e (VI):

$$\frac{R_{AC} \cdot i}{R_{AC'} \cdot i} = \frac{E_p}{E_x} \Rightarrow \frac{E_x}{E_p} = \frac{R_{AC'}}{R_{AC}}$$

Exemplificando: se uma pilha padrão possui fem  $E_p = 1,5 \text{ V}$  e o equilíbrio do potenciômetro acontece quando  $R_{AC} = 5 \Omega$ , qual deve ser o valor de  $R_{AC'}$  de outra pilha de fem  $E_x = 6 \text{ V}$ ?

$$\frac{E_x}{E_p} = \frac{R_{AC'}}{R_{AC}} \Rightarrow \frac{6}{1,5} = \frac{R_{AC'}}{5} \Rightarrow R_{AC'} = 20 \Omega$$

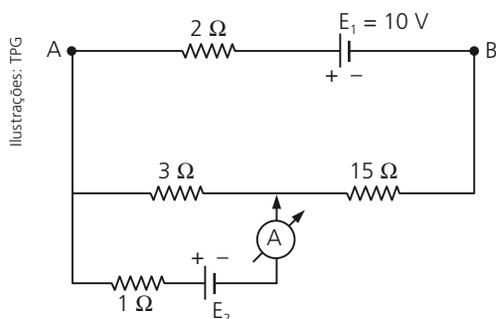
Se a pilha padrão possui fem  $E_p = 1,5 \text{ V}$  e o equilíbrio do potenciômetro ocorre quando  $R_{AC} = 5 \Omega$ , qual deve ser a fem  $E_x$  de uma pilha desconhecida, sabendo-se que com ela o equilíbrio dá-se para  $R_{AC'} = 20 \Omega$ ?

Como  $E_p = 1,5 \text{ V}$ , o equilíbrio do potenciômetro ( $i_g = 0$ ) ocorre para  $R_{AC} = 5 \Omega$ , e como na pilha de fem  $E_x$  desconhecida o equilíbrio acontece quando  $R_{AC'} = 20 \Omega$ , teremos:

$$\frac{E_x}{E_p} = \frac{R_{AC'}}{R_{AC}} \Rightarrow \frac{E_x}{1,5} = \frac{20}{5} \Rightarrow E_x = 6 \text{ V}$$

## Exercício resolvido

**ER5.** No circuito elétrico dado, sabe-se que o amperímetro não acusa passagem de corrente.

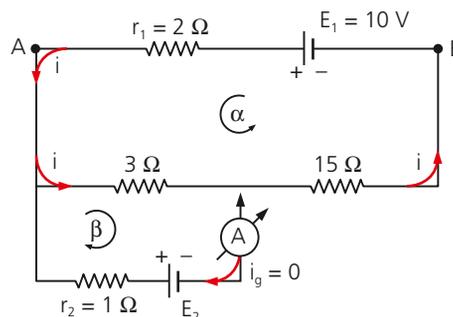


Assim, determine:

- o valor de  $E_2$ ;
- a ddp entre os pontos A e B.

### Resolução:

Trata-se do esquema do potenciômetro de Poggen-dorff em equilíbrio. Portanto, não circula corrente por  $E_2$ .



- Aplicando a Segunda Lei de Kirchhoff na malha  $\alpha$ :  
 $3 \cdot i + 15 \cdot i - 10 + 2 \cdot i = 0 \Rightarrow 20 \cdot i = 10 \Rightarrow i = 0,5 \text{ A}$

Na malha  $\beta$ :

$$3 \cdot i - E_2 + 1 \cdot r = 0 \Rightarrow 3 \cdot 0,5 - E_2 + 1 \cdot 0,5 = 0 \Rightarrow E_2 = 2,0 \text{ V}$$

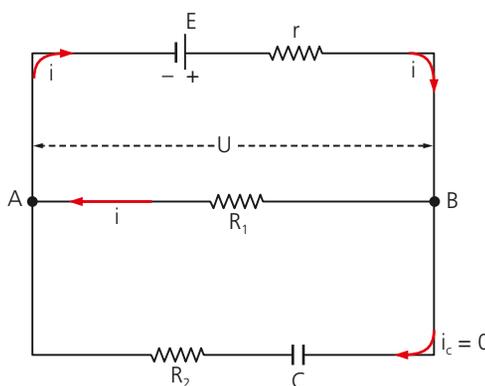
- Aplicando a equação do gerador elétrico entre os pontos A e B, temos:

$$U_{AB} = E_1 - r_1 \cdot i \Rightarrow U_{AB} = 10 - 2 \cdot 0,5 = 10 - 1 \Rightarrow U_{AB} = 9 \text{ V}$$

## Redes elétricas com capacitores

Para resolver redes elétricas com capacitores, estamos admitindo que eles já estão carregados.

Assim, o ramo do circuito que contiver o capacitor não estará sendo percorrido por corrente elétrica contínua.



No exemplo apresentado na figura anterior, o ramo AB que contém o capacitor não é atravessado por corrente contínua. Portanto, determina-se a ddp  $U$  entre os pontos  $A$  e  $B$ , que será aquela verificada entre as armaduras (cada uma das placas de material condutor ou eletrodos) do capacitor. Dessa maneira, podemos calcular o valor da carga  $Q$  e da energia potencial elétrica  $E_{\text{pot}}$  do capacitor usando as seguintes expressões:

$$Q = C \cdot U \text{ e } E_{\text{pot}} = \frac{Q \cdot U}{2} = \frac{C \cdot U^2}{2}$$

## A FÍSICA NO COTIDIANO

### Capacitores e o fator de potência

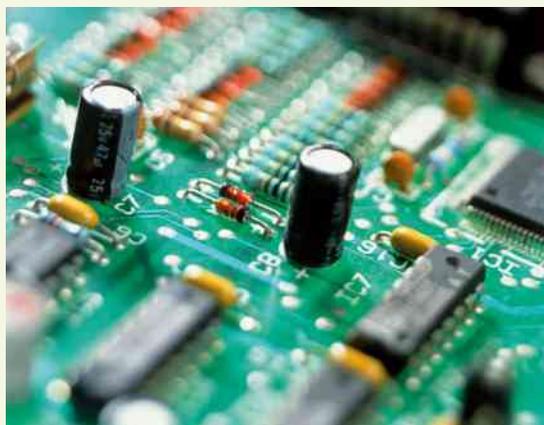
Em 2001, uma crise de fornecimento e distribuição de energia elétrica ocorreu no Brasil. Entre os principais motivadores dessa crise estiveram a falta de chuvas na época, a dependência do país na produção de energia via hidrelétricas e os baixos investimentos em infraestrutura.

Inicialmente esse problema poderia gerar racionamento de energia e blecautes por todo o país; devido a essa possibilidade, deu-se o nome à crise de *Apagão*. Para evitar essas medidas, diversas campanhas foram implementadas no país, entre elas a de aumentar o fator de potência dos equipamentos industriais.

O fator de potência de um equipamento é um valor entre 0 e 1, dado pela razão entre a potência real (utilizada pelo equipamento) e a potência total (fornecida ao equipamento). Esse valor representa o rendimento do equipamento, ou seja, o que se perdeu às indústrias foi que aumentassem a eficiência de suas máquinas.

Para isso, as indústrias instalaram capacitores em paralelo aos circuitos dos equipamentos. Ao receber a carga fornecida pela fonte, o circuito utiliza a carga necessária, e o restante (que seria perdido, pelo efeito Joule, por exemplo) é acumulado no capacitor que devolve ao circuito quando esse está carregado, aumentando o rendimento da máquina.

A medida funcionou tão bem que em 9 de setembro de 2010, a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) criou o artigo 95 da resolução 414 exigindo fator de, no mínimo, 0,92 para as unidades que forem supridas com mais de 1 000 V e obrigando a medição do fator dessas unidades pelas concessionárias. Dessa forma, as residências ficam fora dessa exigência.



Sheila Terry/SPL/Latinstock

Rede elétrica dotada com capacitores.

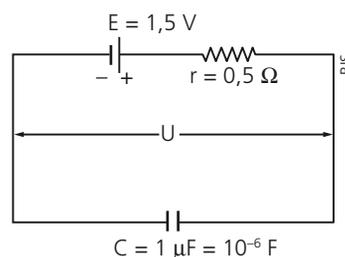
## Exercícios resolvidos

**ER6.** Um gerador elétrico de fem  $E = 1,5 \text{ V}$  e resistência interna  $r = 0,5 \ \Omega$  está associado a um capacitor de capacidade  $1 \ \mu\text{F}$ , já carregado. Determine:

- a carga do capacitor;
- a energia potencial elétrica armazenada pelo capacitor.

### Resolução:

Esquematizando a rede, temos:



Como o capacitor elétrico está carregado, não circula corrente contínua pela associação. Assim, a ddp  $U$  entre  $A$  e  $B$  será:

$$U = E = 1,5 \text{ V}$$

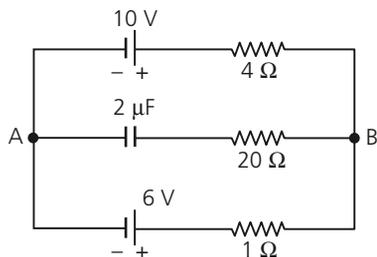
Portanto:

$$\text{a) } Q = C \cdot U = 10^{-6} \cdot 1,5 \Rightarrow Q = 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ C}$$

$$\text{b) } E_{pe} = \frac{C \cdot U^2}{2} = \frac{10^{-6} \cdot 1,5^2}{2} \Rightarrow E_{pe} = 1,125 \cdot 10^{-6} \text{ J}$$

**ER7.** Dado o circuito elétrico da figura, determine:

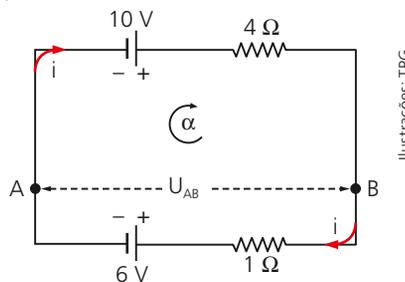
- a ddp entre os pontos  $A$  e  $B$ ;
- a carga do capacitor.



### Resolução:

Supondo que o capacitor está carregado, não circula corrente pelo ramo  $AB$  que o contém. Assim, utilizando a Segunda Lei de Kirchhoff determinamos a corrente  $i$  na malha  $\alpha$ :

$$-10 + 4 \cdot i + 1 \cdot i + 6 = 0 \Rightarrow 5 \cdot i - 4 = 0 \Rightarrow i = 0,8 \text{ A}$$



Ilustrações: TPG

- Aplicando a equação do gerador elétrico, temos:

$$U_{AB} = 10 - 4 \cdot i = 10 - 4 \cdot 0,8 \Rightarrow U_{AB} = 6,8 \text{ V}$$

- $U = 6,8 \text{ V}$  e  $C = 2 \mu\text{F}$ , então:

$$Q = C \cdot U = 2 \cdot 10^{-6} \cdot 6,8 \Rightarrow Q = 13,6 \mu\text{C}$$

## ATIVIDADE PRÁTICA



### Testando as Leis de Kirchhoff

Esta atividade deve ser realizada na sala de aula. Nela vamos testar a primeira e a segunda Leis de Kirchhoff.

#### Material

- duas fontes de tensão contínua, uma de 9 V e outra de 1,5 V;
- dois resistores, um de 680 Ω e o outro de 1 000 Ω;
- um amperímetro cuja escala suporte as condições definidas neste experimento.



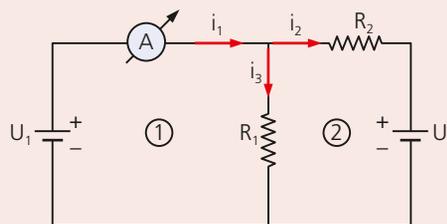
#### Procedimento

Montem, com o professor, o circuito elétrico de corrente contínua especificado na figura ao lado. Não se esqueçam de que o amperímetro deve ser sempre instalado em série com o circuito.

#### Discussão

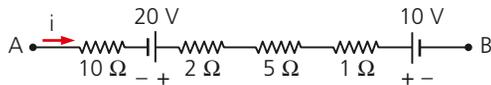
- Escreva a Primeira Lei de Kirchhoff para as correntes  $i_1$ ,  $i_2$  e  $i_3$ .
- Escreva a Segunda Lei de Kirchhoff para as malhas 1 e 2.
- Determine, usando as leis de Kirchhoff, os valores de  $i_1$ ,  $i_2$  e  $i_3$ .
  - Qual desses valores pode ser obtido diretamente da leitura do amperímetro, tal como está montado o circuito? Esse valor concorda com o valor teórico? A quais fatores você atribuiria eventuais desvios entre os valores teórico e experimental?
  - Que alterações deveriam ser feitas no circuito de modo a verificar experimentalmente se as demais correntes concordam ou não com os valores teóricos?
- Compare os valores calculados de  $i_1$ ,  $i_2$  e  $i_3$  com aqueles medidos pelo amperímetro.
- Monte outro circuito e repita os passos anteriores. Se for o caso, agregue novo material.

Ver Orientações Didáticas.



# Exercícios propostos

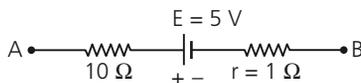
**EP1.** No trecho do circuito elétrico seguinte, a intensidade de corrente é 3 A.



Determine a ddp:

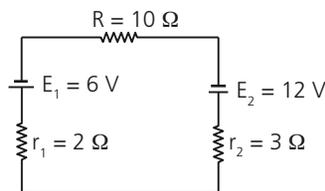
- a) entre os pontos A e B; **44 V**
- b) entre os pontos B e A. **-44 V**

**EP2.** No ramo elétrico da figura a seguir, circula uma corrente elétrica de intensidade 2 A, do ponto A para B.



Se o potencial elétrico do ponto A é igual a 20 V, calcule o valor do potencial elétrico do ponto B.  **$V_B = -7 V$**

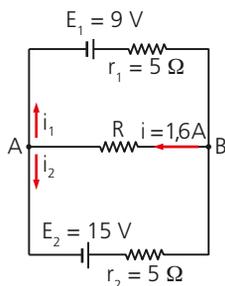
**EP3.** O circuito elétrico apresentado na figura é constituído por uma pilha (gerador), um motor (receptor) e um resistor R (lâmpada).



Considerando os dados indicados, determine:

- a) a intensidade de corrente elétrica que percorre o circuito, identificando a pilha e o motor;
  - b) a ddp nos terminais da lâmpada; **4 V**
  - c) a ddp nos terminais da pilha; **10,8 V**
  - d) a ddp nos terminais do motor. **6,8 V**
- a)  $i = 0,4 A$ , ( $E_1, r_1$ ) é o motor e ( $E_2, r_2$ ) é a pilha

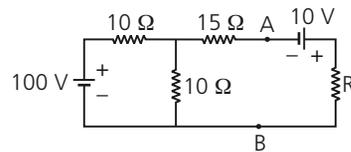
**EP4.** No circuito elétrico da figura, a intensidade de corrente que percorre o resistor R vale  $i = 1,6 A$ .



Determine:

- a) os valores das correntes  $i_1$  e  $i_2$ ;  **$i_1 = 0,2 A$  e  $i_2 = 1,4 A$**
- b) o valor de R;  **$R = 5 \Omega$**
- c) a potência dissipada no resistor R; **12,8 W**
- d) a ddp entre os pontos A e B.  **$U_{AB} = 8 V$**

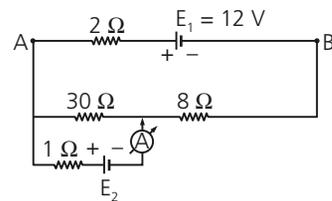
**EP5.** No circuito elétrico da figura,  $U_{AB} = 0$ .



O valor de R será:

- a)  $10 \Omega$
- b)  $8 \Omega$
- c)  $1 \Omega$
- d)  $20 \Omega$
- e)  $4 \Omega$  **X**

**EP6.** No circuito elétrico da figura apresentada, sabe-se que o amperímetro não acusa passagem de corrente.



Ilustrações: TPG

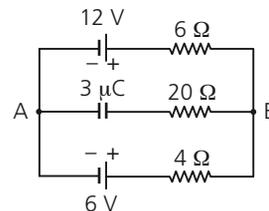
Determine:

- a) o valor de  $E_2$ ;  **$E_2 = 9 V$**
- b) a ddp entre os pontos A e B.  **$U_{AB} = 11,4 V$**

**EP7.** Um gerador de fem  $E = 6 V$  e resistência interna  $r = 2 \Omega$  está associado a um capacitor de capacidade  $2 \mu F$ , já carregado. Determine:

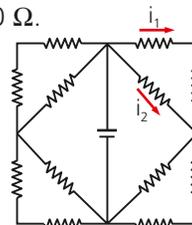
- a) a carga do capacitor;  **$12 \cdot 10^{-6} C$**
- b) a energia potencial elétrica armazenada pelo capacitor.  **$36 \cdot 10^{-6} J$**

**EP8.** Dado o circuito elétrico da figura, determine:



- a) a ddp entre os pontos A e B;  **$U_{AB} = 8,4 V$**
- b) a carga do capacitor.  **$Q = 25,2 \mu C$**

**EP9.** (UFG-GO) No circuito representado na figura abaixo, a força eletromotriz é de 6 V e todos os resistores são de  $1,0 \Omega$ .



As correntes  $i_1$  e  $i_2$  são, respectivamente,

- a) 0,75 A e 1,5 A
- b) 1,5 A e 3,0 A **x**
- c) 3,0 A e 1,5 A
- d) 3,0 A e 6,0 A
- e) 6,0 e 3,0 A

# Eletromagnetismo

Apesar dos esforços de William Gilbert para encontrar ligações entre o Magnetismo e a Eletricidade no século XVII, essas duas ciências permaneceram isoladas por mais dois séculos, até que Oersted descobriu que a corrente que flui em um condutor pode defletir a agulha de uma bússola, revelando a existência de uma relação entre fenômenos elétricos e magnéticos.

Os “anos milagrosos” em que o Eletromagnetismo se desenvolveu estão entre 1820 e 1831, quando se descobriram os fenômenos básicos — as propriedades magnéticas em torno de fios em que passa a corrente, a força em condutores percorridos por corrente elétrica quando estão imersos em campos magnéticos e, finalmente, o aparecimento de corrente em condutores atravessados por campos magnéticos variáveis — e foram formuladas as leis que regem o comportamento de condutores em campos magnéticos.

A Física e a Matemática que se produziram a partir daí influenciariam profundamente a história da humanidade: basta verificar a quantidade de aparelhos e instrumentos cujo funcionamento se baseia nesses fenômenos.

Os cientistas da época descobriram, trabalhando cada um independentemente, muitas aplicações da notável descoberta de Hans Christian Oersted, descrevendo a interação entre correntes e campos e, logo depois, a indução eletromagnética. Graças a isso foi possível construir os geradores eletromecânicos, que oferecem tensões e correntes muito maiores que as pilhas químicas; se quiséssemos avaliar a importância do Eletromagnetismo com apenas essa inovação, já estaríamos convencidos de que se tratou de um avanço formidável no sistema produtivo.

No entanto, o Eletromagnetismo ainda provocaria outra revolução: a da Relatividade.

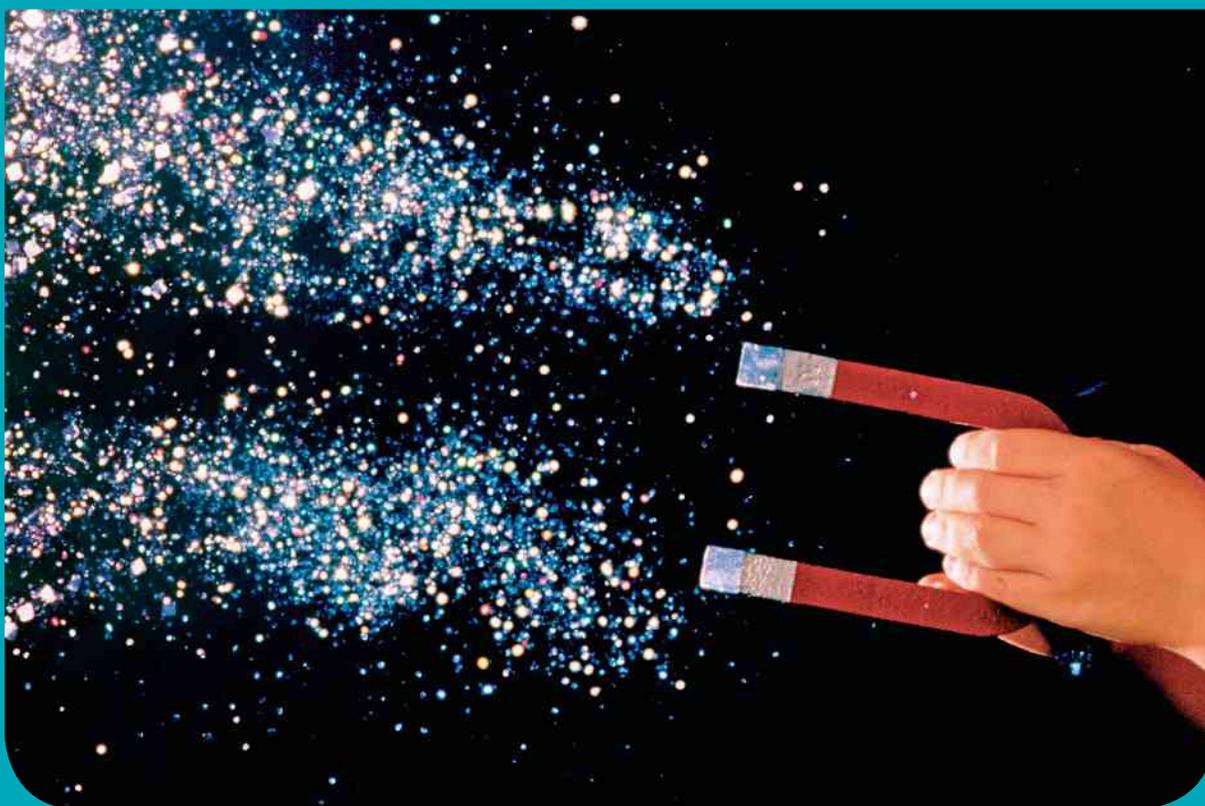
Nesta Unidade você vai conhecer o campo magnético, como se estabelecem a força magnética e a corrente induzida, e o funcionamento de geradores, motores e transformadores.

Bobinas percorridas por correntes induzem campos magnéticos na sua vizinhança, e a intensidade do campo depende do tamanho da bobina e da intensidade da corrente elétrica. Essa enorme bobina que funciona como eletroímã pertence ao LHC, o grande acelerador de partículas que investiga as energias e as partículas criadas na colisão de prótons confinados por intensos campos magnéticos. A energia gerada nessas colisões é muito grande para partículas tão pequenas — da ordem de TeV (teraeletrons-volt). O LHC confirmou a existência do Bóson de Higgs.



CERN/SPL/Lainstock

- **CAPÍTULO 13** Campo magnético
- **CAPÍTULO 14** Força magnética
- **CAPÍTULO 15** Indução eletromagnética
- **CAPÍTULO 16** Corrente alternada



K. Glaser/SPL/Latinstock

O ímã induz campos magnéticos em objetos feitos de ferro, cobalto ou níquel, chamados de materiais ferromagnéticos. Estes têm a capacidade de manter essa magnetização, parcial ou totalmente, mesmo quando são afastados do campo externo.

Estudos mostram que alguns microrganismos, insetos, aves, peixes e mesmo mamíferos são sensíveis à ação de campos magnéticos. Em vários desses animais já foram encontradas partículas de material magnético produzidas pelo próprio organismo.

Ao lado, fotografia do morcego *Eudermia maculatum*, que habita a América do Norte e se orienta por campos magnéticos.



Merlin D. Tuttle/Bat Conservation International/Latinstock

# Campo magnético

Decerto você já viu ou tem cartões com tarja magnética — cartões de banco, de crédito ou débito, para identificação e permissão em locais de acesso restrito (laboratórios, escritórios, bibliotecas etc.), bilhete único para transporte —, que são, hoje, dispositivos muito comuns. A tarja magnética de cartões é feita de pequenas partículas de ferro num filme plástico, que podem ser magnetizadas com orientações diferentes, e com isso se gravam as diversas informações. Esses pequenos ímãs exibem as mesmas propriedades dos ímãs maiores, que são as de se atraírem ou repe- lirem, bem como a de atrair objetos de metais específicos.

Além dos cuidados naturais com documentos, os órgãos emissores desses cartões também recomendam que se evite dobrar, aquecer ou guardá-los próximos a aparelhos eletroeletrônicos. De fato, ímãs são sensíveis a campos elétricos. Essa constatação fez surgir o Eletromagnetismo.

O Eletromagnetismo estuda o conjunto de fenômenos que dizem respeito à interação entre eletricidade e magnetismo. Na verdade, ainda que identificados em separado, esses fenômenos começaram a ser estudados conjuntamente: vimos no capítulo 1 que em 1600 o médico William Gilbert publicou *De Magnete*, que descreve o magnetismo terrestre e a eletricidade. O tratamento que se dá hoje ao magnetismo e à eletricidade apresenta os dois fenômenos sempre associados.

Os mais diversos aparelhos e equipamentos eletroeletrônicos — fones de ouvido e caixas acústicas, fornos de micro-ondas, discos rígidos de computadores, motores etc. — possuem entre seus componentes um ímã ou magneto.

Qualquer material que tenha a propriedade de atrair certos materiais metálicos é denominado ímã; o exemplo mais comum desses materiais é o ferro. Magnetismo é a força de atração que existe entre o ímã e determinadas substâncias.

O fenômeno magnético é conhecido há mais de dois milênios. Historicamente, as primeiras amostras com materiais de propriedades magnéticas foram encontradas na região chamada de Magnésia, na atual Turquia, que legou o nome **magnetismo** a esse fenômeno.



A tarja magnética é apenas uma das inúmeras aplicações propiciadas pelo avanço do Eletromagnetismo.



O campo magnético aplicado, associado à radiofrequência de vibração do hidrogênio, faz com que sejam possíveis imagens em camadas de praticamente qualquer parte do corpo.

Fotografias: Thinkstock/ Getty Images

## A FÍSICA NA HISTÓRIA

### O campo eletromagnético e o Modelo Padrão

No começo do século XIX, a noção de *campo* era uma construção matemática conveniente para descrever as *forças*, conceitos centrais da Mecânica de Newton. Após os trabalhos de Maxwell (1862), o conceito de campo passa a ocupar o papel central na descrição física da realidade.

Na obra de Maxwell, surge a primeira grande unificação das teorias físicas: a relação entre campos elétricos e magnéticos, bem como o reconhecimento de que a luz visível é uma manifestação particular desse campo eletromagnético.

O Eletromagnetismo provocou crises na física clássica, que levaram ao advento da Física Moderna a partir de 1905 com suas duas vertentes: a Relatividade e a Mecânica Quântica.

A Eletrodinâmica Quântica (QED) é a teoria quântica do campo eletromagnético, desenvolvida em meados da década de 1950 por Feynman, Tomonaga e Schwinger. Serviu como ponto de partida para uma teoria quântica mais ambiciosa, que tratasse de todos os campos e das partículas fundamentais que neles interagem.

Essa teoria foi desenvolvida entre 1970 e 1973 e é conhecida como Modelo Padrão. Veremos mais do Modelo Padrão no capítulo 19.

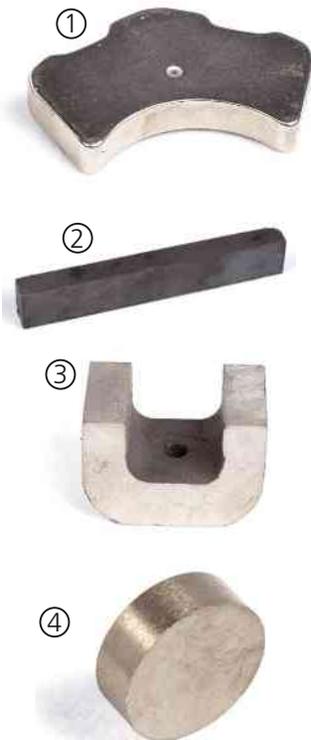
## O ímã



DeAgostini/Getty Images

Os pedaços de rocha que apresentam propriedades magnéticas têm óxidos metálicos em sua composição (como a magnetita,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , que é um ímã natural).

Fotografias: Pepe Melega



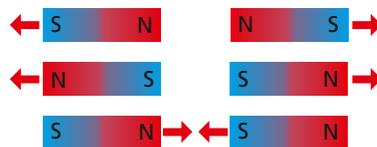
Diversos tipos de ímãs, usados em enfeites de geladeira e até em leitores de *hardisc* de computadores, feitos em metais ferromagnéticos ou ligas (1 — neodímio, 2 — ferrite, 3 — alnico, 4 — samário-cobalto).

Muitas pessoas têm o primeiro contato com os ímãs pelas bússolas, pequenas agulhas que se alinham com o campo magnético da Terra e indicam a direção do polo geográfico norte. Para produzir uma agulha magnetizada, basta atritar sempre no mesmo sentido uma agulha metálica com um ímã. Note que nem todos os materiais metálicos se prestam a esse fim: devem ser feitos de ferro, ou níquel, ou cobalto e suas ligas. Nesses materiais, chamados de ferromagnéticos, a presença de um campo magnético externo faz com que os elétrons se alinhem de modo a produzir um campo magnético permanente; outros materiais exibem propriedades magnéticas muito fracas ou mesmo não as exibem.

Materiais ferromagnéticos também respondem à presença do campo magnético sendo atraídos na direção do material que produz o campo; neste caso, se a magnetização não é permanente, são chamados de ímãs temporários.

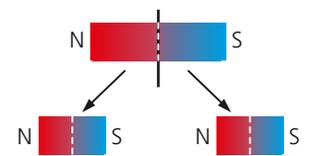
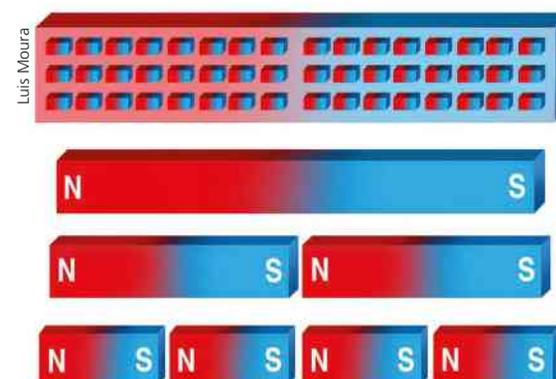
No último século, o desenvolvimento industrial gerou a necessidade de se obter campos magnéticos mais intensos, e assim ímãs que pudessem produzir esses campos, e que durassem mais tempo que os naturais. Assim, na década de 1930, surgiu o *alnico* — um ímã artificial que é resistente a corrosões, suporta altas temperaturas (até aproximadamente 800 K) e tem como componentes o alumínio, o níquel e o cobalto. Depois, foram criados outros tipos de ímãs artificiais: cerâmico (*ferrite*); samário-cobalto; neodímio-boro etc.

Todos os ímãs possuem dois polos: o norte (N) e o sul (S). Eles interagem entre si da seguinte forma: os polos “norte e sul” se atraem e os polos “norte e norte” e “sul e sul” se repelem.



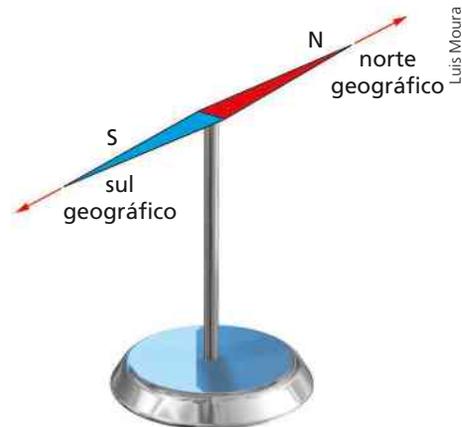
Num ímã, um polo não aparece isolado; se um ímã for partido, cada pedaço terá seus próprios polos norte e sul.

Isso ocorre porque um ímã é constituído de ímãs elementares ou moleculares (são os menores deles, em escala microscópica) que estão previamente orientados com seus pares de polos norte e sul.

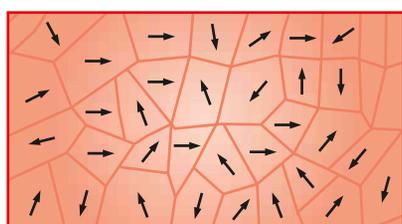


A indicação dos polos de um ímã pode ser determinada pelos polos geográficos: se um ímã puder mover-se livremente, a extremidade que apontar para o polo norte geográfico é o polo norte do ímã e a extremidade oposta é o sul. Portanto, uma bússola é um pequeno ímã que pode girar com liberdade.

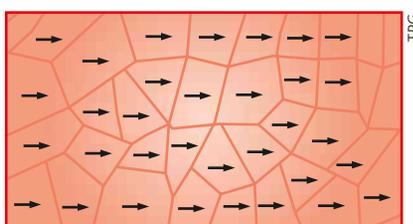
Se um material ferromagnético é aproximado de um ímã, ele se torna magnetizado: você pode notar esse fato colocando um clipe de papel próximo de um ímã, e esse clipe também passa a atrair outros materiais metálicos. No entanto, se o ímã for afastado, o efeito não perdura; dizemos que o clipe foi magnetizado por indução. Para transformá-lo em um ímã permanente, é preciso friccioná-lo repetidas vezes, sempre com a mesma orientação, com um dos polos de um ímã. Mas também é possível imantar um metal por meio de eletricidade, como veremos mais adiante.



Luis Moura



Todos os materiais apresentam microscópicos domínios magnéticos; com exceção dos ímãs naturais, a maioria deles é, naturalmente, desorganizada. Esses domínios são gerados pelo movimento dos elétrons.



Se o material é levado à presença de um campo magnético externo, esses microscópicos domínios magnéticos podem se orientar; temos neste caso um material ferromagnético.

Se o campo magnético externo for afastado e a orientação organizada dos domínios magnéticos se mantiver, o material terá se transformado em um ímã; caso contrário, será um ímã temporário.

Vemos, então, que a magnetização depende de propriedades intrínsecas do material — que chamaremos mais tarde de momento angular orbital dos elétrons, denotado por uma grandeza de nome *spin* — e também da estabilidade externa, macroscópica, do material. Por esse motivo, um ímã pode perder suas propriedades magnéticas ao sofrer um choque mecânico ou se for aquecido em demasia — a temperatura a partir da qual isso acontece é chamada de Ponto Curie, que para o ferro é de 770 °C. O nome dessa grandeza é uma homenagem a Pierre Curie (1859-1906), que estudou a influência da temperatura na magnetização. Voltaremos a falar sobre ele quando formos falar de Física Nuclear.

## Campo magnético

Como vimos em capítulos anteriores, o campo é uma propriedade do espaço próximo a uma partícula dotada de certa característica. O conceito de campo se fez necessário para explicar fenômenos nos quais a atuação da força acontece a distância. Assim, quando um corpo atrai outro, pode existir um campo gravitacional criado por corpos com massa; se corpos eletrizados se atraem ou se repelem, temos um campo elétrico, que é criado por corpo dotado de carga elétrica; do mesmo modo, aproximando um ímã de um prego, percebemos uma atração porque o prego se encontra no campo magnético criado pelo ímã.



Jeffrey Coolidge/The Image Bank/Getty Images

O ímã atrai materiais ferromagnéticos e essa atração é mais intensa em partes específicas do ímã, próximas aos polos.

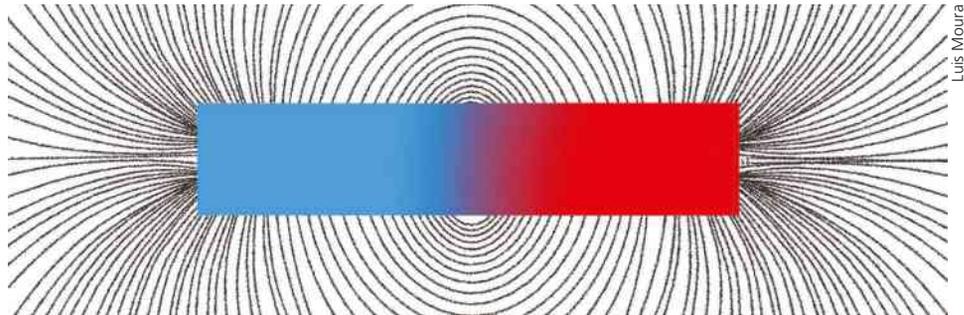
Para visualizar um campo magnético, podemos espalhar limalha de ferro em torno de um ímã. Assim teremos a seguinte configuração:



Cordeila Molloy/SPL/Latinstock

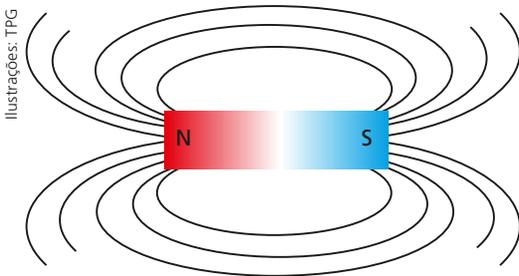
Configuração da limalha de ferro nas proximidades de um ímã em barra.

Os traços formados pela limalha de ferro correspondem às linhas de força do campo magnético que envolve o ímã. Repare que elas estão mais concentradas nas extremidades do ímã, o que indica que o campo magnético é mais intenso nos polos.



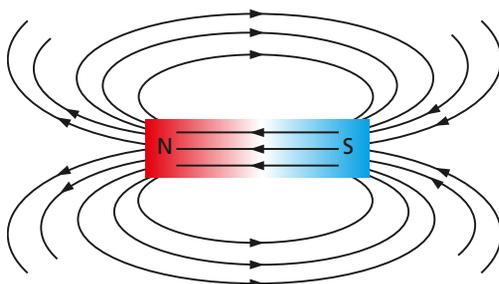
Luis Moura

Linhas de campo magnético, reveladas pelo alinhamento da limalha de ferro.



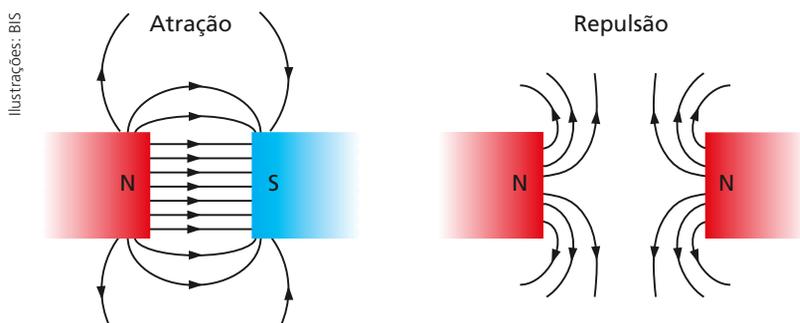
Ilustrações: TPG

Observando a figura ao lado podemos constatar semelhanças entre os campos elétrico e magnético: a presença de “linhas” que revelam a direção das forças, chamadas linhas de indução; enquanto as linhas de força do campo elétrico se originam em corpos eletrizados, dotados de carga de um tipo, as linhas de indução do campo magnético são contínuas (elas atravessam o ímã de um polo a outro); é por esse motivo que os ímãs se organizam de modo a ter sempre dois polos (lembre-se dos microscópicos domínios magnéticos) e por isso não há como isolar um monopolo magnético apenas norte, ou apenas sul.



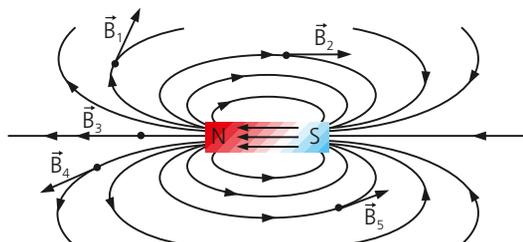
Um prego sem imantação sempre será atraído por qualquer um dos polos de um ímã que esteja próximo a ele; assim, não há como orientar as linhas de campo magnético segundo esse comportamento, como fizemos anteriormente com as linhas do campo elétrico (que foram orientadas de acordo com o comportamento de uma carga positiva), então vamos adotar a seguinte convenção: orientaremos essas linhas de modo que, no exterior do ímã, as linhas de força do campo magnético saiam do polo norte e dirijam-se ao polo sul; dentro dele, linhas longitudinais (na direção do comprimento) destacam-se do polo sul e rumam para o polo norte. Mais tarde veremos que essa convenção é adequada na combinação com fenômenos elétricos.

Quando dois polos de ímãs diferentes interagem, temos as linhas de força magnética reconfiguradas, como mostram as figuras.



É importante frisar que **as linhas de força magnética nunca se cruzam umas com as outras**.

O campo magnético  $B$  é constituído por infinitos vetores indução magnética  $\vec{B}$ , todos com direção sempre tangente à linha de força do campo magnético e com o mesmo sentido dela — como acontece com o vetor campo elétrico  $\vec{E}$  e suas linhas de força.



## O campo magnético terrestre

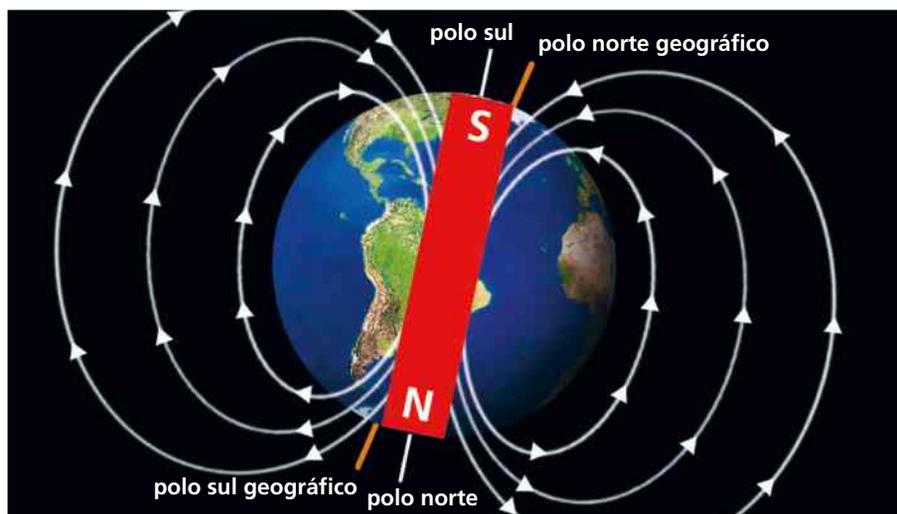
Como já foi dito, um ímã girando livremente (bússola) orienta-se na direção norte-sul, evidenciando que a Terra tem um campo magnético capaz de guiá-lo. Assim, o nosso planeta comporta-se como um gigantesco ímã. Acredita-se, embora isso não tenha sido comprovado, que sua propriedade magnética deriva do movimento circular das correntes elétricas no núcleo de ferro fundido do planeta.

O eixo que passa por seus polos magnéticos está inclinado aproximadamente  $11^\circ$  em relação ao eixo de rotação do planeta. Além disso, por convenção, o polo magnético sul do planeta corresponde ao polo geográfico norte e vice-versa.

Na bússola, a ponta imantada como polo norte indica o polo magnético sul (o polo geográfico norte) do planeta, porque norte e sul magnéticos se atraem. Por isso dizemos que a ponta norte da agulha do ímã nos *norteia* para o sentido norte da Terra.

As bússolas são conhecidas pelos chineses desde o século VI, mas acredita-se que foi apenas a partir do século X ou XI que eles começaram a utilizá-la na navegação.

William Gilbert foi o primeiro a afirmar que o planeta se comportava como um gigantesco ímã em forma de barra — ele também descobriu o processo de imantação por indução.

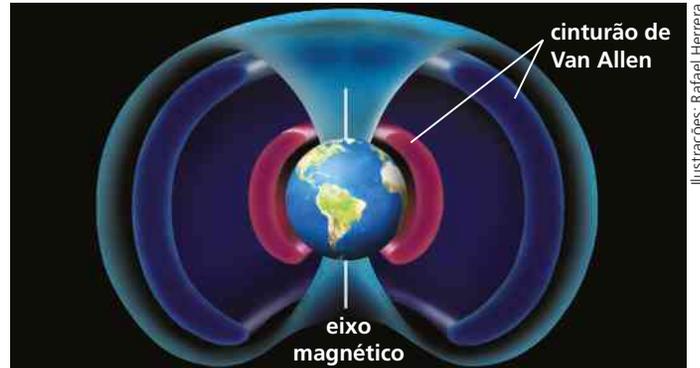


Representação do campo magnético terrestre. Ilustração com elementos sem proporção entre si e em cores fantasia.

Rafael Herrera

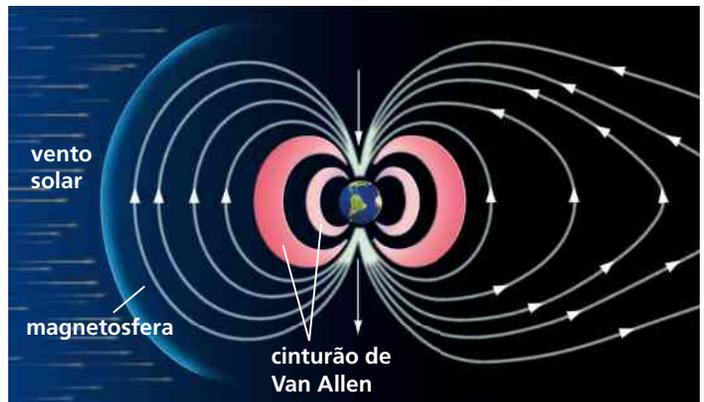
Em torno da Terra temos a magnetosfera, a região envoltória do seu campo magnético. Uma das evidências de que as partículas eletrizadas interagem com campos magnéticos está na região do espaço que envolve a Terra, onde ficam represadas as partículas ionizadas presentes no vento solar (plasma solar carregado de prótons e elétrons provenientes da estrela) e nos raios cósmicos vindos do espaço, formando o chamado cinturão de Van Allen, descoberto em 1958 por James Van Allen (1914-2006). Veja a representação abaixo .

O cinturão de Van Allen apresenta dois estratos: o interior, que está situado entre 2 200 e 5 000 km da superfície da Terra; e o exterior, entre 13 000 e 55 000 km. Ilustração com elementos sem proporção entre si e em cores fantasia.



A face da magnetosfera voltada frontalmente para o Sol estende-se até cerca de 57 000 km da superfície da Terra, enquanto na face oposta ela tem um alcance de 200 000 km. Essa forma comprimida da magnetosfera, na face voltada para o Sol, resulta da influência exercida pelo vento solar.

O vento solar é uma corrente de partículas eletrizadas da coroa solar. A cauda dos cometas é o resultado da interação das partículas do núcleo e da coma dos cometas com o vento solar. Os campos magnéticos dos planetas também interagem com o vento solar, produzindo deformações como a que se vê ao lado. Ilustração com elementos sem proporção entre si e em cores fantasia.

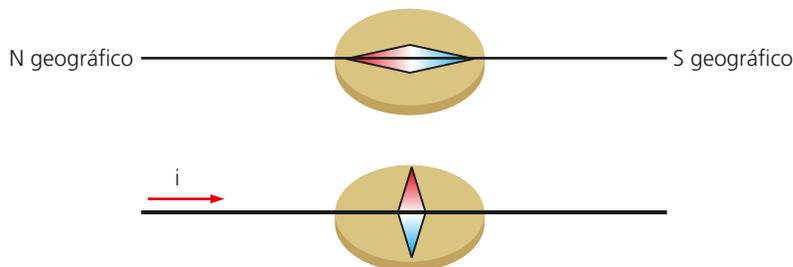


## Campo magnético gerado por corrente elétrica

No ano de 1820, o físico e químico dinamarquês Hans Christian Oersted (1777-1851) demonstrou que a passagem de corrente elétrica por um fio condutor produzia efeitos magnéticos (que ele descreveu como um “conflito”) em torno dele. Hoje, sabemos que cargas elétricas em movimento geram campos magnéticos ao seu redor, que podem eventualmente interagir com objetos magnetizados em sua vizinhança, como é o caso dos cartões magnéticos; e é por esse motivo que não é conveniente deixar cartões magnéticos nas proximidades de aparelhos elétricos!

No artigo *Experimenta circa effectum conflictus electriciti in acum magnetica* (Experiências sobre o efeito do conflito elétrico sobre a agulha magnética), Oersted descreveu os procedimentos necessários para determinar a direção da força magnética que atua sobre um polo magnético de um ímã, nas proximidades de fios condutores atravessados pela corrente elétrica. Considera-se esse evento como o início do Eletromagnetismo.

No experimento de Oersted, uma bússola é colocada com os ponteiros em equilíbrio na direção paralela a um fio retilíneo sem passagem de corrente elétrica. Quando a corrente atravessa o fio, os ponteiros da bússola sofrem um desvio, equilibrando-se numa direção ortogonal (perpendicular) a ele.

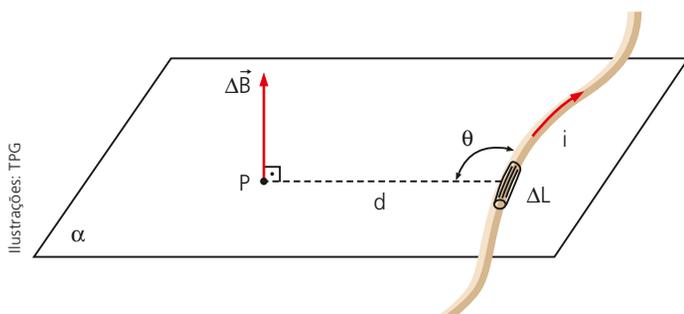


Mary Evans/Diomecia

Depois de Luigi Galvani e William Gilbert, o trabalho de Oersted relacionando à eletricidade o magnetismo foi o grande incentivador para físicos como Biot, Savart e Ampère desenvolverem os resultados do Eletromagnetismo. Retrato de 1820 de Christian Oersted na Universidade de Copenhague durante a demonstração do desvio da agulha da bússola na presença de corrente elétrica.

## Lei de Biot-Savart

Coube a dois físicos franceses, Jean-Baptiste Biot (1774-1862) e Félix Savart (1791-1841), a formulação da equação que permitiu calcular a intensidade do campo magnético gerado por uma corrente elétrica. É o que vamos ver agora.



Consideremos um trecho bem pequeno, de comprimento  $\Delta L$ , de um fio condutor sendo percorrido por uma corrente elétrica de intensidade  $i$ , cuja unidade de medida no SI é o ampère (A). Essa corrente gera um campo magnético de intensidade  $\Delta B$ , num ponto situado a uma distância  $d$  do trecho em questão. Se essa distância for medida de modo a formar com  $\Delta L$  um ângulo  $\theta$ , então a intensidade  $\Delta B$  será dada por:

$$\Delta B = \frac{\mu \cdot i \cdot \Delta L \cdot \text{sen } \theta}{4\pi \cdot d^2}$$

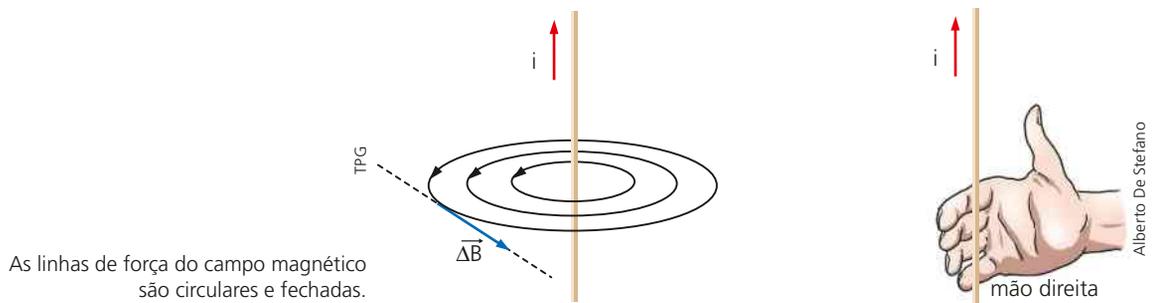
A unidade de medida do campo magnético no SI é o tesla (T), em homenagem a Nicola Tesla, engenheiro croata e multi-inventor. Falaremos mais sobre Tesla no capítulo 16.

A grandeza  $\mu$  é uma medida da facilidade de produzir magnetização nesse meio, é chamada permeabilidade magnética do meio e seu valor, no vácuo, é de

$$\mu = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{T} \cdot \text{m}}{\text{A}}$$

O vetor indução magnética  $\vec{\Delta B}$ , que representa cada ponto do campo magnético, é perpendicular ao plano  $\alpha$  formado por  $\Delta L$  e  $d$ . Seu sentido e direção são dados pelo produto vetorial, uma operação entre vetores que está fora do escopo desta obra; assim, vamos utilizar a *regra da mão direita*, apresentada na página a seguir, para sermos coerentes com as demais convenções adotadas no Eletromagnetismo.

- O polegar é posicionado no sentido da corrente elétrica convencional (o sentido que as cargas positivas teriam se pudessem se movimentar no interior do material).
  - O sentido de percurso das linhas (circulares e fechadas) de força magnética é dado pelos demais dedos, envoltos no fio.
- Veja isso nas ilustrações que se seguem:



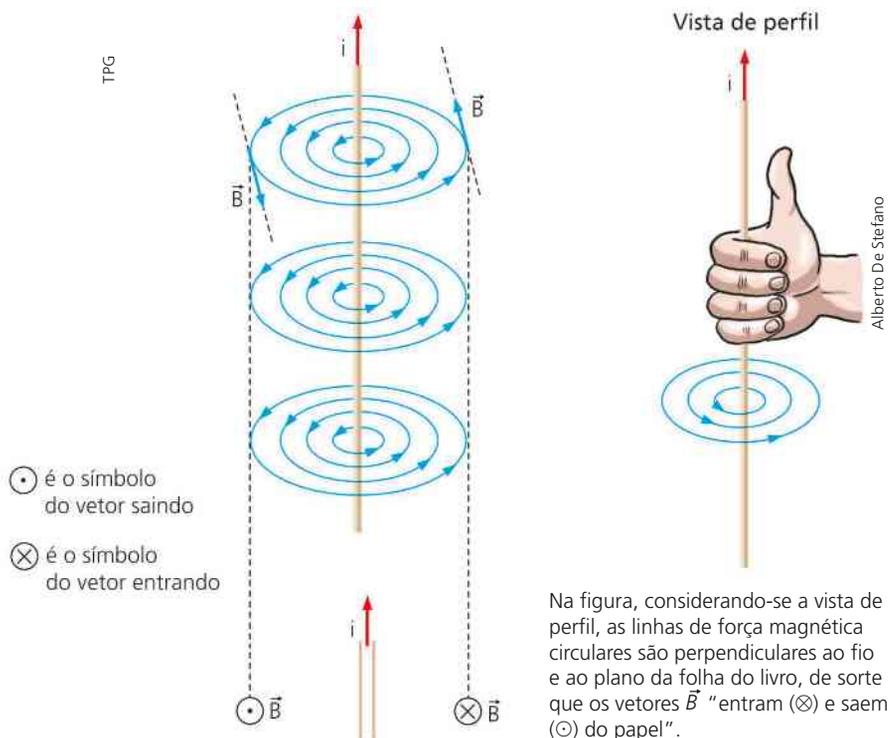
Em cada ponto do campo magnético, o vetor indução magnética  $\vec{\Delta B}$  tangencia a linha de força e adota o mesmo sentido.

### Campo magnético ao redor de condutor retilíneo longo — Lei de Ampère

A Lei de Biot-Savart é aplicada para calcular a intensidade do campo magnético ao redor de condutores com os mais variados formatos.

No caso particular de condutores retilíneos e longos, como os fios que usamos rotineiramente, a corrente elétrica de intensidade  $i$  gera um campo magnético cujas linhas de força são circunferências concêntricas, situadas em planos perpendiculares ao fio. Em cada circunferência (de raio  $R = d$ , que é a distância do fio até um ponto  $P$  da circunferência), a intensidade do vetor indução magnética  $\vec{B}$  é determinada pela Lei de Ampère:

$$B = \frac{\mu \cdot i}{2\pi \cdot d}$$



Na figura, considerando-se a vista de perfil, as linhas de força magnética circulares são perpendiculares ao fio e ao plano da folha do livro, de sorte que os vetores  $\vec{B}$  "entram ( $\otimes$ ) e saem ( $\odot$ ) do papel".

## Sites

### Feira de Ciências — um parque de experimentos

Disponível em: <[www.feiradeciencias.com.br/sala20/magnetismo.asp#01](http://www.feiradeciencias.com.br/sala20/magnetismo.asp#01)>. Acesso em: 3 fev. 2016.

Acessando o *link* acima, você encontrará uma série de experimentos de verificação das leis de Ampère e de Biot-Savart, sugeridos e conduzidos pelo Professor Luiz Ferraz Netto.

### Magnetismo

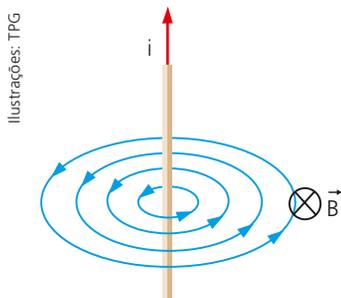
Disponível em: <[www.feiradeciencias.com.br/sala13/13\\_T01.asp](http://www.feiradeciencias.com.br/sala13/13_T01.asp)>. Acesso em: 3 fev. 2016.

Nesse *link* há um ótimo texto sobre magnetismo. Além disso, há *links* para outras aulas de assuntos relacionados ao magnetismo.

## Exercícios resolvidos

**ER1.** Um fio retilíneo longo e em posição vertical é percorrido por uma corrente elétrica de intensidade igual a 3 A e sentido convencional ascendente. Determine:

- a direção e o sentido do vetor indução magnética num ponto localizado à direita do fio;
- a intensidade do campo magnético num ponto que se situa a 50 cm do fio, dado  $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{T} \cdot \text{m}}{\text{A}}$ .



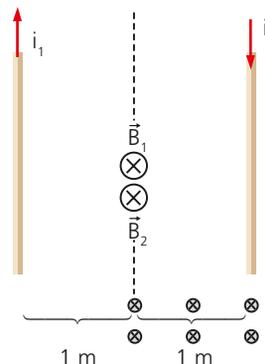
### Resolução:

São dados:  $i = 3 \text{ A}$ ;  $d = 50 \text{ cm} = 0,5 \text{ m}$

- Num ponto à direita do fio temos o vetor indução magnética na direção horizontal, pois ele tangencia uma linha de força circular e horizontal, entrando no papel.
- A intensidade do campo a 0,5 m de distância do fio é:

$$B = \frac{\mu \cdot i}{2\pi \cdot d} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 3}{2\pi \cdot 0,5} = 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ T}$$

**ER2.** Dois fios retilíneos, longos e paralelos, são atravessados por correntes elétricas de intensidades iguais, respectivamente, a 1 A e 2 A. Os sentidos de tráfego das correntes são opostos e os fios estão distanciados 2 m.



Determine a intensidade do vetor campo magnético resultante num ponto equidistante dos fios, no plano formado por eles.

Dado:  $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{T} \cdot \text{m}}{\text{A}}$ .

### Resolução:

São dados:  $i_1 = 1 \text{ A}$ ;  $i_2 = 2 \text{ A}$ ;  $d_{12} = 2 \text{ m}$

O ponto equidistante aos fios, no mesmo plano deles, fica a  $d = 1 \text{ m}$ .

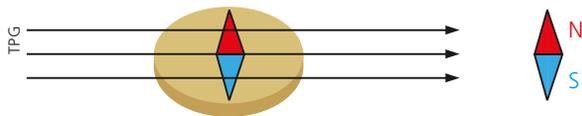
Nesse ponto, os vetores  $\vec{B}_1$  e  $\vec{B}_2$  têm o mesmo sentido: “entrando ( $\otimes$ ) no papel”, na figura. Logo, a resultante será a soma dos módulos desses vetores:

$$B_1 = \frac{\mu \cdot i_1}{2\pi \cdot d} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1}{2\pi \cdot 1} \Rightarrow B_1 = 2 \cdot 10^{-7} \text{ T}$$

$$B_2 = \frac{\mu \cdot i_2}{2\pi \cdot d} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 2}{2\pi \cdot 1} \Rightarrow B_2 = 4 \cdot 10^{-7} \text{ T}$$

$$B_{\text{res}} = B_1 + B_2 = 6 \cdot 10^{-7} \text{ T}$$

**ER3.** A agulha de uma bússola é colocada em um campo magnético cujas linhas de força estão representadas na figura.



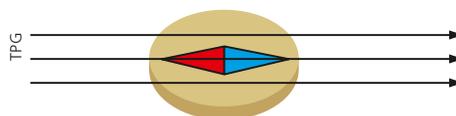
Então, responda:

a) com que sentido de rotação a agulha iniciará o movimento?

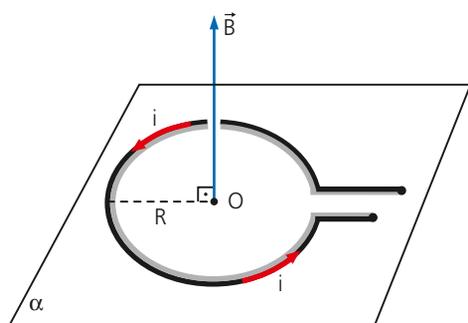
b) em que posição ela ficará em equilíbrio?

### Resolução:

- a) O sentido de uma linha de força magnética é tal que ela vem do polo norte e vai para o polo sul. Logo, a parte norte da agulha tende a entrar em movimento no mesmo sentido da linha de força, pois é repelida pelo polo norte e atraída pelo polo sul. Então a rotação da agulha acontecerá no sentido horário.
- b) O equilíbrio da agulha ocorrerá na mesma direção das linhas de força magnética (com o polo norte para a direita).



## Campo magnético no centro de uma espira



Vamos analisar agora um condutor circular (espira), como mostra a figura ao lado, no qual  $O$  é o centro da espira,  $R$  é o seu raio,  $\alpha$  é o plano que a contém e  $i$  é a intensidade de corrente que a atravessa.

É possível verificar experimentalmente que o campo magnético que se cria em torno do condutor circular é de tal forma que no centro  $O$  da espira o vetor indução magnética  $\vec{B}$  tem direção perpendicular ao plano  $\alpha$ , sendo seu sentido dado pela regra da mão direita.

Sua intensidade pode ser determinada pela Lei de Biot-Savart, com  $\theta = 90^\circ$  ( $\text{sen } \theta = 1$ ) e  $d = R$ .

Então, cada trecho  $\Delta L$  da espira produz um campo  $\Delta B$  de intensidade:

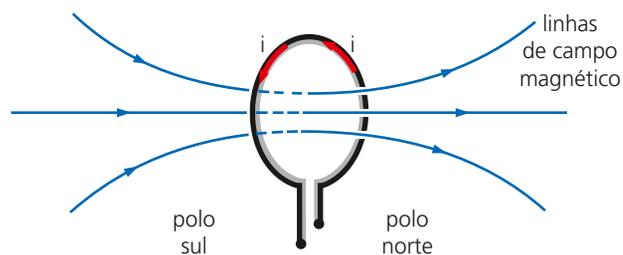
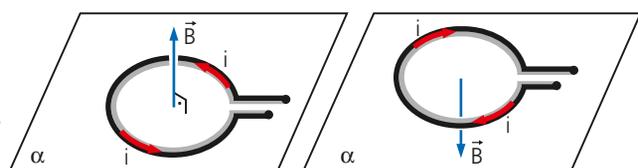
$$\Delta B = \frac{\mu \cdot i \cdot \Delta L}{4\pi \cdot R^2}$$

A intensidade  $B$  do campo no centro  $O$ , determinada por todos os trechos dessa espira ( $L = 2\pi \cdot R$ ):

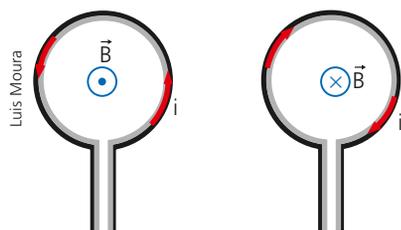
$$B = \frac{\mu \cdot i \cdot 2\pi \cdot R}{4\pi \cdot R^2} \Rightarrow B = \frac{\mu \cdot i}{2R}$$

Podemos fazer uma analogia entre os campos magnéticos gerados numa espira e aqueles que estão presentes num ímã (as linhas de campo saem do polo norte e dirigem-se para o do sul). A face da espira por onde "saem" as linhas de força corresponde ao polo norte; e a face contrária, por onde "entram" as linhas de força é o polo sul.

Ilustrações: Luis Moura



Numa observação frontal das faces, temos os seguintes esquemas:



Quando a espira apresenta a corrente elétrica girando no sentido anti-horário, trata-se de um polo norte; portanto as linhas de força magnética estão saindo do plano do papel. O contrário se verifica quando a movimentação da corrente acontece no sentido oposto.

Caso tenhamos um conjunto de  $n$  espiras iguais justapostas, cujo nome é **bobina chata**, a intensidade do campo magnético no seu centro será de:

$$B_{\text{bobina}} = n \cdot \frac{\mu \cdot i}{2R}$$



Aspecto do campo magnético em torno de uma bobina chata.

© 1990 Richard Megna/Fundamental Photographs

## Exercícios resolvidos

**ER4.** Uma espira, de raio 20 cm, está sendo percorrida por uma corrente elétrica de intensidade 3 A. Calcule o campo magnético no centro dela. Dado:  $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{T} \cdot \text{m}}{\text{A}}$ .

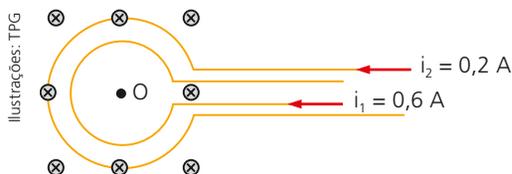
### Resolução:

São dados:  $R = 20 \text{ cm} = 0,2 \text{ m}$  e  $i = 3 \text{ A}$ .

Independentemente de qual seja o sentido da corrente, a intensidade do campo magnético no centro da espira é dada por:

$$B = \frac{\mu \cdot i}{2R} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 3}{2 \cdot 0,2} \Rightarrow B = 3\pi \cdot 10^{-6} \text{ T}$$

**ER5.** Duas espiras estão situadas no mesmo plano. Elas são concêntricas e têm raios de  $0,3\pi \text{ m}$  e  $0,4\pi \text{ m}$ , sendo percorridas por correntes elétricas, cujas intensidades e sentidos estão indicados na figura.



Calcule a intensidade do vetor indução magnética resultante no centro dessas espiras, sendo  $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{T} \cdot \text{m}}{\text{A}}$ .

### Resolução:

São dados os raios:  $R_1 = 0,3\pi \text{ m}$  e  $R_2 = 0,4\pi \text{ m}$ . Além disso, temos as intensidades de correntes:  $i_1 = 0,6 \text{ A}$  e  $i_2 = 0,2 \text{ A}$ .

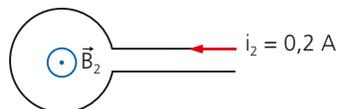
A espira interna cria no centro um campo cujo vetor indução entra no papel e seu módulo é:

$$B_1 = \frac{\mu \cdot i_1}{2R_1} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,6}{2 \cdot 0,3\pi} \Rightarrow B_1 = 4 \cdot 10^{-7} \text{ T}$$



A espira externa cria no centro um campo cujo vetor indução sai do papel, sendo o seu módulo igual a:

$$B_2 = \frac{\mu \cdot i_2}{2R_2} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,2}{2 \cdot 0,4\pi} \Rightarrow B_2 = 1 \cdot 10^{-7} \text{ T}$$



O vetor indução resultante  $\vec{B}_{\text{res}}$  estará “entrando no papel”, pois  $\vec{B}_1$  tem o módulo maior que  $\vec{B}_2$ . Logo, a intensidade resultante do campo magnético é:

$$B_{\text{res}} = B_1 - B_2 = 3 \cdot 10^{-7} \text{ T}$$

## Campo magnético no interior de um solenoide

Ao tocar uma campainha ou acionar a trava elétrica de um carro estamos utilizando um solenoide. Mas o que é um solenoide e o que ele tem a ver com o fenômeno descrito por Oersted?

Tanto no funcionamento de uma campainha tipo cigarra (A) como no dos grandes eletroímãs (B), necessitamos de enrolamentos de fios metálicos (por exemplo, cobre) atravessados por corrente contínua.

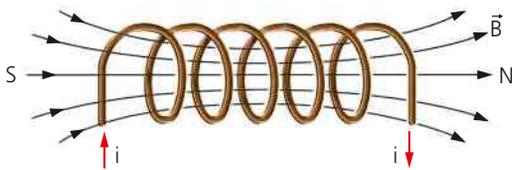


David Taylor/SPL/Latinstock



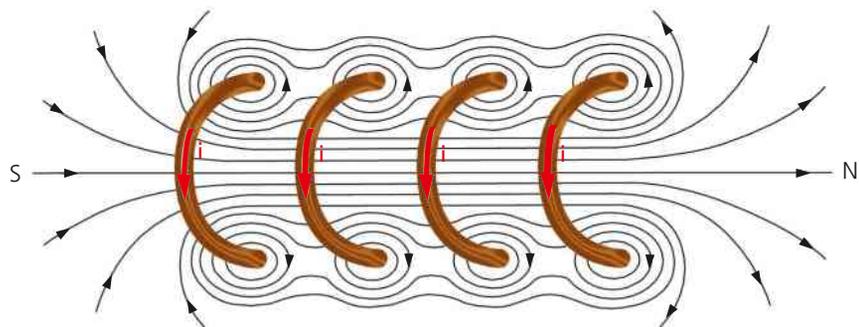
Simon Fraser/SPL/Latinstock

Um **solenóide** é um fio condutor elétrico em forma de espiras.



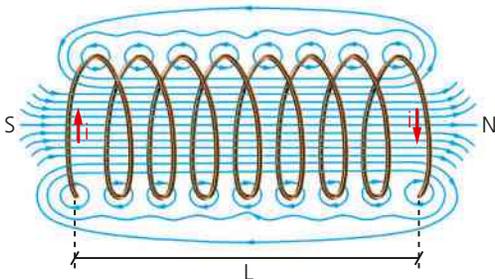
O solenoide, quando percorrido pela corrente elétrica, comporta-se como um ímã em barra: dentro dele é criado um campo magnético, tal que a extremidade de onde saem as linhas de força corresponde ao polo norte e o outro extremo, o local de entrada delas, é o polo sul.

Sendo o comprimento do solenoide muito maior que seu diâmetro, podemos dizer que o campo magnético em seu interior tem intensidade praticamente constante e suas linhas de força são paralelas entre si e equidistantes. Esse tipo de campo magnético é denominado **campo magnético uniforme**.



Ilustrações: Luis Moura

Na parte interna do solenoide, o campo magnético é uniforme.



No campo magnético uniforme o vetor indução magnética apresenta direção coincidente com o eixo longitudinal do solenoide e o sentido é determinado pela regra da mão direita. A intensidade do campo magnético uniforme, aplicada a Lei de Ampère, é determinada por:

$$B = \frac{\mu \cdot n \cdot i}{L}$$

Nessa expressão,  $n$  é a quantidade de espiras e  $L$  é o comprimento do solenoide.

A razão entre  $n$  e  $L$  é chamada de densidade linear de espiras  $\left(\frac{n}{L}\right)$ .

## Produzindo um eletroímã caseiro



É possível fabricar um ímã e fazer com que ele ora atraia materiais ferrosos, ora não atraia? Construindo um eletroímã, o que pode ser feito para aumentar o campo magnético gerado por ele? Encontrem as respostas para essas questões realizando a atividade.

### Material

- cinco metros de fio de cobre esmaltado (pode ser comprado em autoelétrica ou casas de material de construção)
- duas pilhas alcalinas novas ou uma bateria nova de 9,0 V
- um prego pequeno e outro grande, de comprimentos 3 cm e 9 cm, aproximadamente, ambos em aço galvanizado
- uma lixa
- objetos ferrosos



Fotografias: Eduardo Santalhestra

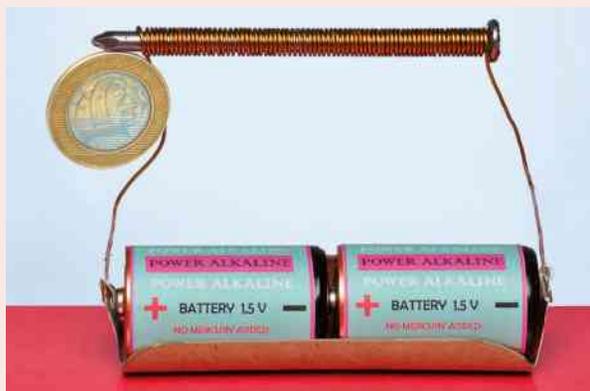
### Procedimento

- Cortem o fio de cobre em dois pedaços de 1,0 m e 4,0 m.
- Tendo enrolado o fio de cobre com 1,0 m de comprimento em volta do prego, retirem-no e terão uma bobina. Deixem duas extremidades livres, onde a pilha será adaptada.
- Lixem as duas extremidades do fio.
- Façam o mesmo com o outro pedaço de fio de cobre e com o prego grande.



- Liguem a segunda bobina (fio de 4,0 m) nas pilhas ou na bateria, com o prego inserido em seu interior, e aproximem-na de um objeto ferromagnético, como uma moeda de 1 real. Observem que a moeda é atraída pela bobina. O que acontece ao desligar a corrente elétrica?
- Repitam o procedimento anterior com a primeira bobina (fio de 1,0 m). Vocês perceberam a diferença da intensidade de atração gerada por uma bobina e pela outra?

VII. Ligue novamente a bobina maior nas pilhas ou na bateria, só que desta vez retirem o prego do seu interior. E agora, houve aumento ou diminuição na intensidade da atração gerada, se comparada com o experimento anterior?



## Discussão

1. O número de voltas dadas no fio da bobina afeta a intensidade com que ela atrai a moeda. Quanto maior for o número de voltas, a atração será maior ou menor?
2. Com o prego no interior da bobina, aumentou ou diminuiu a intensidade da atração?
3. Analisando a equação do campo magnético para uma bobina, é evidente a relação de proporcionalidade direta que há entre campo magnético e o número de espiras, mas a presença do prego no interior da bobina afeta qual outro fator?

$$B_{\text{bobina}} = n \cdot \frac{\mu \cdot i}{2R}$$

4. Este é o instrumental básico para muitos dispositivos eletromagnéticos, por exemplo a campainha. Com base no que foi descrito nesta atividade, você pode descrever o seu funcionamento?

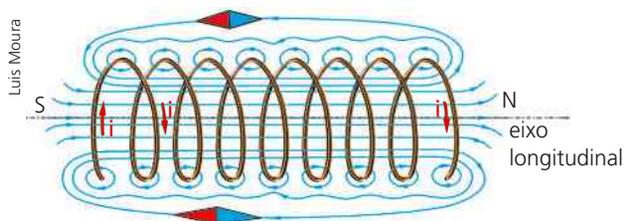
Ver Orientações Didáticas.

## Exercícios resolvidos

**ER6.** Em que posição uma agulha de bússola ficará em equilíbrio nas proximidades de um solenoide, de modo que fique paralela ao eixo longitudinal do solenoide?

### Resolução:

A agulha ficará no referido equilíbrio numa posição lateral e paralela ao eixo longitudinal do solenoide, pois as linhas de força magnética nas suas proximidades estão dispostas conforme mostra a seguinte figura:



**ER7.** Um solenoide tem 20 cm de comprimento e é composto por 500 espiras. A intensidade da corrente elétrica que o atravessa é de 0,2 A. É dado:  $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{T} \cdot \text{m}}{\text{A}}$ .

a) Calcule a densidade linear de espiras.

b) Calcule o módulo do campo magnético uniforme formado no interior do solenoide.

### Resolução:

São dados:

$$L = 20 \text{ cm} = 0,2 \text{ m}$$

$$n = 500 \text{ espiras}$$

$$i = 0,2 \text{ A}$$

a) A densidade linear de espiras é:

$$\frac{n}{L} = \frac{500}{0,2} = 2\,500$$

2 500 espiras por metro ou 25 espiras por centímetro.

b) O campo magnético uniforme formado no interior do solenoide tem sua intensidade dada por:

$$B = \frac{\mu \cdot n \cdot i}{L} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 500 \cdot 0,2}{0,2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow B = 2\pi \cdot 10^{-4} \text{ T}$$

## Magnetotactismo

Como sabemos, uma das motivações de William Gilbert para o estudo das tecnologias de eletricidade e magnetismo era a sua provável aplicação terapêutica. Esse interesse perdura até hoje, embora não se tenha encontrado qualquer relação entre exposição a campos magnéticos e cura de alguma enfermidade.

Isso não significa que não haja interação do campo magnético com os seres vivos.

Sabemos hoje que algumas espécies de insetos, de aves e de mamíferos aquáticos (cetáceos) se orientam por intermédio do campo geomagnético, e que esse mecanismo se manifesta com maior intensidade em microrganismos. Leia agora um trecho do artigo de Henrique G. P. Lins de Barros e Darci M. S. Esquivel do Departamento de Matéria Condensada e Espectroscopia (CBPF), pesquisadores da área e colaboradores da *Revista Brasileira de Ensino de Física*, a respeito do magnetotactismo, uma característica de alguns organismos de responderem a um campo magnético externo.

Células magnetotáticas são capazes de produzir cristais magnéticos no interior do citoplasma. É importante compreender o mecanismo de orientação bem como sua utilidade. O movimento de bactérias é em geral produzido por uma organela específica, o flagelo. O flagelo é uma longa “cauda” que gira, produzindo uma força que produz o deslocamento da célula. No caso das células magnetotáticas observa-se a existência de cristais magnéticos biomineralizados pelo organismo. Estes cristais possuem um momento magnético de tal forma que a resultante da soma dos diversos momentos magnéticos de cada um dos cristais encontrados no interior do citoplasma fornece um momento magnético resultante aproximadamente alinhado com a direção de movimento. A interação do momento magnético celular com o campo externo produz um binário que orienta o movimento celular com respeito à linha de campo. Trata-se de uma interação semelhante à da agulha da bússola. Como o momento magnético resultante é aproximadamente alinhado à direção do movimento, a célula migra na direção do campo externo. Se uma perturbação tira a célula de sua orientação, a interação com o campo faz com que ela novamente se alinhe. Este mecanismo de orientação é muito eficiente: a velocidade de migração da célula é praticamente igual à velocidade de deslocamento.



D. Balkwill-D. Maratea/Visuals Unlimited, Inc./Science VU/Getty Images

Bactéria magnética (*Aquaspirillum magnetotacticum*) ampliada 123 mil vezes.

Como o campo terrestre possui uma inclinação (que depende da posição na superfície da Terra), organismos magnetotáticos nadam ou para baixo ou para cima, dependendo do sentido do momento magnético celular em relação ao sentido do movimento. Células que migram para a superfície sentem os efeitos do oxigênio molecular e morrem. Células que migram para baixo vão ao encontro de uma região rica em nutrientes e com pouca concentração de oxigênio molecular. Um aspecto interessante está relacionado com a polaridade do momento magnético. O campo geomagnético pode ser descrito por um campo de dipolo. No hemisfério Norte ele aponta para baixo enquanto no hemisfério Sul ele aponta para cima. Assim, bactérias que possuem o momento magnético antiparalelo ao flagelo sobrevivem no hemisfério Sul e morrem no outro hemisfério. Assim podemos distinguir dois tipos de bactérias no que diz respeito às propriedades magnéticas: as do tipo sul, encontradas em grande quantidade no hemisfério sul magnético, em que o momento magnético resultante é antiparalelo à direção do movimento, e as do tipo norte, características do hemisfério norte magnético, em que o oposto ocorre. Ocorre, dessa forma, uma seleção caracterizada por

uma propriedade física. A direção do momento magnético celular não é definida biologicamente.

[...]

Um outro aspecto diz respeito à influência de campos eletromagnéticos presentes no ambiente tecnologicamente desenvolvido. Trata-se, sem dúvida, de um efeito diferente, pois o campo envolvido é outro. Mas como não se supunha a interação do ser vivo com o campo geomagnético, o estudo da interação com campos eletromagnéticos passou a despertar o interesse.

Assim sendo, como ficamos nós, os seres humanos, sujeitos cada vez mais a campos magnéticos produzidos por aparelhos, produtos da crescente tecnologia? Como é a resposta do ser vivo a campos eletromagnéticos de baixa frequência, como os pro-

duzidos por redes de transmissão? O número crescente de publicações a este respeito [...], entretanto, não tem ainda respondido a esta questão. O que é aceito pela Ciência é o papel do meio ambiente na vida na Terra, onde cada organismo está em completa harmonia com este meio, constituindo algo mais que simples equilíbrio ecológico e que é sensível a estímulos muito mais fracos do que aqueles que a Ciência tem esperado [...]. Esta percepção necessita de estudos mais aprofundados para se compreender um pouco mais sobre a vida na Terra.

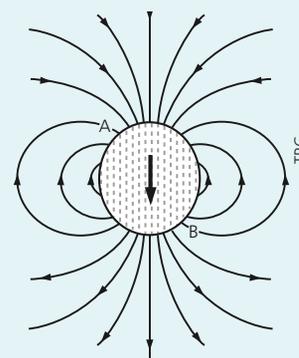
DE BARROS, Henrique G. P.; ESQUIVEL, Darcy M. S. Interação do campo magnético da Terra com os seres vivos. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 22, n. 3, p. 312-316, 3 set. 2000.

## Organizando as ideias do texto

1. De que tipo são as bactérias consideradas no texto: aeróbicas ou anaeróbicas?
2. No esquema ao lado, está representada a Terra e o campo de dipolo no seu interior.

Com base nesse esquema, faça o que se pede:

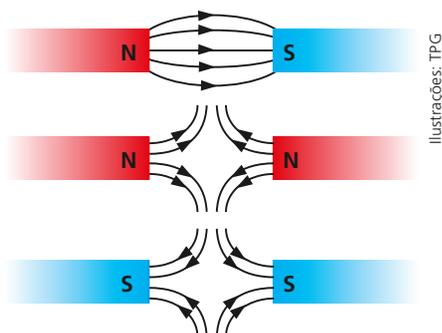
- a) Em qual hemisfério há predominância de bactérias tipo "norte" e em qual hemisfério há predominância de bactérias tipo "sul"? Justifique sua resposta.
  - b) Desenhe no caderno, nas posições A e B representadas, as orientações dos campos magnéticos de duas bactérias bem-sucedidas pelo magnetotactismo.
  - c) Que tipo de bactérias você espera encontrar na altura do Equador?
3. Você tem uma amostra de microrganismos e deseja descobrir se, nessa amostra, há indivíduos com características magnetotáticas. Projete um dispositivo que ajude nessa identificação.
  4. Qual é a importância desse estudo?  
Professor, veja *Orientações Didáticas*.



## Exercícios propostos



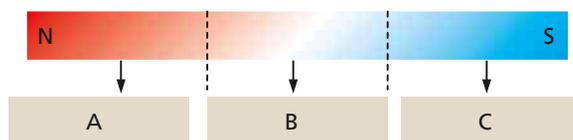
**EP1.** A figura a seguir mostra como são representadas as linhas de força magnética atuando nas proximidades dos polos de ímãs que foram posicionados próximos um do outro.

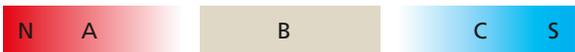
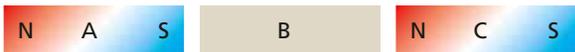


Na referida figura vemos a interação de três pares de ímãs. O percurso das linhas de força:

- a) é arbitrário.
- b) depende das posições ocupadas pelos ímãs e não pelos seus polos.
- c) é sempre no sentido do polo norte para o sul. X
- d) na repulsão, é orientada para fora dos ímãs.
- e) na atração, é orientado para dentro dos ímãs.

**EP2.** Ao partir um ímã na forma de barra em três partes poderemos ter qual dessas configurações?

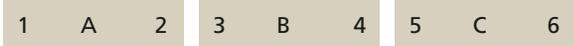


- a) 
- b) 
- c) 
- x d) 
- e) 

**EP3.** O polo norte do ponteiro de uma bússola deve indicar:

- a) o polo sul geográfico.
- b) o polo norte magnético.
- c) o polo norte geográfico, se a bússola estiver no hemisfério norte; e sul, estando no hemisfério sul.
- d) o polo sul magnético, independentemente do hemisfério onde esteja a bússola. **x**
- e) o polo norte geográfico, apenas quando a bússola estiver na Linha do Equador.

**EP4.** Três ímãs são mostrados a seguir.



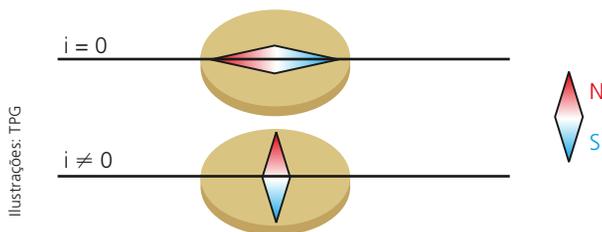
Neles, os polos 1 e 5 se atraem, assim como os polos 2 e 3. Então, podemos concluir que os polos:

- a) 6 e 1 se atraem.
- b) 4 e 6 se repelem.
- c) 2 e 5 se atraem.
- d) 1 e 4 se repelem.
- e) 4 e 6 se atraem. **x**

**EP5.** Cogita-se que o campo magnético terrestre se deva:

- a) à grande quantidade de gelo existente nas duas regiões dos polos do planeta.
- b) às correntes de ar eletrizadas na atmosfera.
- c) às correntes marítimas que eletrizam as costas dos continentes.
- d) às radiações provenientes do Sol (plasma solar).
- e) às correntes elétricas que circulam no núcleo de ferro fundido do planeta. **x**

**EP6.** No experimento de Oersted, um fio longo e retilíneo passa sobre a agulha de uma bússola.



Ilustrações: TFG

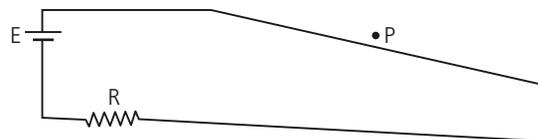
De acordo com a figura, qual é o sentido da corrente elétrica quando ela passa pelo fio?

Da esquerda para a direita.

**EP7.** Com relação à intensidade do campo magnético gerado pela corrente elétrica em movimento num condutor retilíneo e longo, podemos afirmar que:

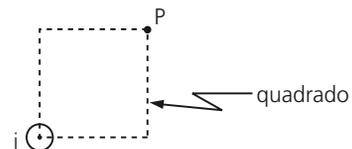
- a) é constante, qualquer que seja a distância em relação ao fio.
- b) aumenta conforme se afasta do fio.
- c) permanece constante nos pontos localizados num segmento de reta paralelo ao fio. **x**
- d) permanece constante em pontos situados numa reta ortogonal ao fio.
- e) diminui à medida que se aproxima do fio.

**EP8.** Observando o esquema elétrico representado na figura, determine o sentido do vetor campo magnético resultante no ponto  $P$ .



- a)  $\uparrow$
- b)  $\rightarrow$
- c)  $\leftarrow$
- d)  $\otimes$
- e)  $\odot$  **x**

**EP9.** Imagine um fio longo e retilíneo entrando perpendicularmente no papel e a corrente que o atravessa, saindo do papel. Quais são a direção e o sentido do vetor indução magnética no ponto  $P$  da figura?



- a) 
- b)  **x**
- c) 
- d) 
- e) 

**EP10.** Um fio condutor retilíneo, longo e em posição horizontal, é percorrido por uma corrente elétrica de intensidade igual a 0,5 A. Determine a intensidade do campo magnético num ponto que se situa a 20 cm do fio. É dado:  $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{T \cdot m}{A}$ .  $5 \cdot 10^{-7} T$

**EP11.** Dois fios muito longos e retilíneos estão dispostos paralelamente. Eles são percorridos por correntes elétricas, respectivamente, de 6 A e 8 A de intensidade. Os sentidos das correntes são iguais e os fios estão distantes 4 m. Qual é a intensidade do vetor campo magnético resultante num ponto equidistante dos fios, sobre o plano formado por eles?

Dado:  $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{T \cdot m}{A}$ .  $2 \cdot 10^{-7} T$

**EP12.** Qual dos itens a seguir representa o vetor indução magnética no centro da espira mostrada na figura?



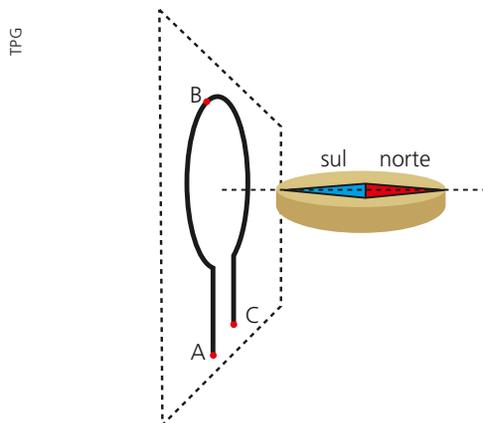
- a)  $\rightarrow$     b)  $\uparrow$     c)  $\leftarrow$     d)  $\otimes$     e)  $\odot$

**EP13.** Por uma espira, de raio 50 cm, passa uma corrente elétrica cuja intensidade é de 10 A. Qual é o módulo do campo magnético criado no centro dela?

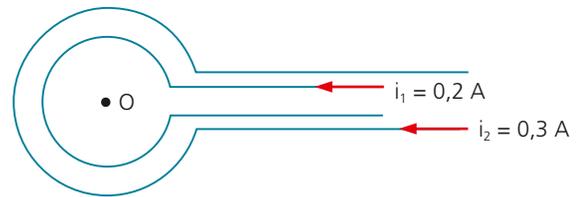
Dado:  $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{T \cdot m}{A}$ .  $4\pi \cdot 10^{-6} T$

**EP14.** Para que o ponteiro da bússola fique em equilíbrio na posição mostrada na figura, tendo sido desprezado o efeito do campo magnético terrestre, o sentido da corrente elétrica que atravessa a espira circular deve:

- a) ser de A para C.  
 b) ser de C para A.  $\times$   
 c) alternar-se, ora num sentido, ora noutro.  
 d) ser qualquer um.  
 e) ser de B para A e de B para C.



**EP15.** Duas espiras coplanares e concêntricas, de raios  $0,10\pi$  m e  $0,15\pi$  m, são percorridas por correntes elétricas, de intensidades 0,2 A e 0,3 A, como estão mostradas na figura abaixo.



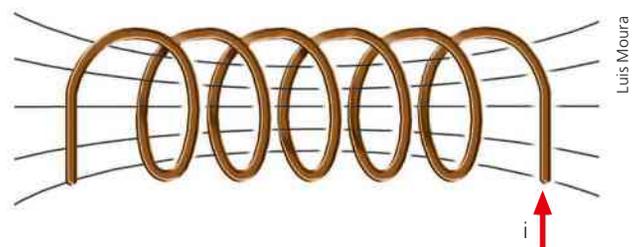
Calcule o módulo do vetor indução magnética resultante no centro das duas espiras.

Dado:  $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{T \cdot m}{A}$ .  $\text{Módulo nulo, pois os campos criados pelas correntes têm sentidos opostos e mesmo módulo: } 4 \cdot 10^{-7} T.$

**EP16.** O vetor indução magnética no interior de um solenoide tem:

- a) intensidade variável de acordo com a posição.  
 b) direção perpendicular ao eixo longitudinal do solenoide.  
 c) módulo constante, independentemente do ponto considerado.  $\times$   
 d) sentido que se alterna de um ponto para outro.  
 e) direção oblíqua ao eixo longitudinal do solenoide.

**EP17.** Qual é o polo magnético da extremidade à direita do solenoide mostrado a seguir?  $\text{Polo sul.}$



**EP18.** Qual é a alternativa *incorreta*?

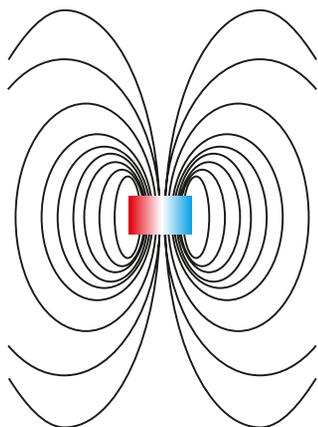
A intensidade do campo magnético no interior de um solenoide é:

- a) inversamente proporcional ao seu comprimento.  
 b) diretamente proporcional à intensidade de corrente elétrica que o atravessa.  
 c) inversamente proporcional à densidade linear de espiras.  $\times$   
 d) diretamente proporcional ao número de espiras.  
 e) diretamente proporcional à densidade linear de espiras.

**EP19.** Um solenoide, com 10 cm de comprimento e 200 espiras, é percorrido por uma corrente elétrica de 0,1 A. Sendo dado:  $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{T \cdot m}{A}$ , calcule o módulo do campo magnético uniforme no interior do solenoide.  $8\pi \cdot 10^{-5} T$

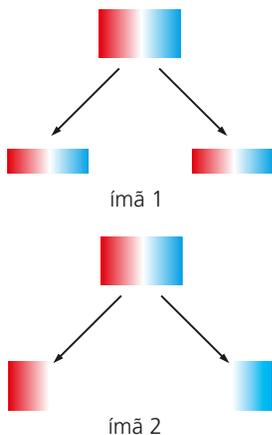
**EP20.** Um solenoide tem densidade linear de 10 espiras por centímetro. A intensidade da corrente elétrica que o atravessa é  $i$  e a medida do campo magnético em seu interior é  $3\pi \cdot 10^{-4} T$ . Calcule o valor de  $i$ , dado:  $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{T \cdot m}{A}$ .  $i = 0,75 A$

**EP21.** (UFSCar-SP) Dois pequenos ímãs idênticos têm a forma de paralelepípedo de base quadrada. Ao seu redor, cada um produz um campo magnético cujas linhas se assemelham ao desenho esquematizado.



Ilustrações: TPG

Suficientemente distantes um do outro, os ímãs são cortados de modo diferente. As partes obtidas são então afastadas para que não haja nenhuma influência mútua e ajustadas, conforme indica a figura seguinte.



Se as partes do ímã 1 e do ímã 2 forem aproximadas novamente na região em que foram cortadas, mantendo-se as posições originais de cada pedaço, deve-se esperar que:

- a) as partes correspondentes de cada ímã atraiam-se mutuamente, reconstituindo a forma de ambos os ímãs.
- b) apenas as partes correspondentes do ímã 2 se unam reconstituindo a forma original desse ímã.
- c) apenas as partes correspondentes do ímã 1 se unam reconstituindo a forma original desse ímã. **X**
- d) as partes correspondentes de cada ímã repilam-se mutuamente, impedindo a reconstituição de ambos os ímãs.
- e) devido ao corte, o magnetismo cesse por causa da separação dos polos magnéticos de cada um dos ímãs.

**EP22.** (ITA-SP) Coloca-se uma bússola nas proximidades de um fio retilíneo, vertical, muito longo, percorrido por uma corrente elétrica contínua  $i$ . A bússola é disposta horizontalmente e, assim, a agulha imantada pode girar livremente em torno de seu eixo. Nas figuras, o fio é perpendicular ao plano do papel, com a corrente no sentido indicado (saindo).

- a)
- b)
- c)
- d)
- e) n.d.a.





Nick Veasey/untitled X-Ray/Getty Images

O movimento propiciado pelo rotor resulta da interação entre dois campos magnéticos, um estacionário e outro produzido por um condutor percorrido por corrente elétrica.



Digital Vision/Getty Images

Ventilador.

O que há em comum no funcionamento de um liquidificador e um ventilador? Embora esses aparelhos tenham sido criados para executar funções bem distintas, o que os coloca em funcionamento é a rotação do rotor, um eixo com pás (ventilador) ou lâminas (liquidificador) acopladas a uma de suas extremidades, e já sabemos que a alteração do estado de movimento só ocorre se estiverem agindo forças.

No capítulo anterior, vimos que uma partícula eletricamente carregada, em movimento, gera campo magnético em sua vizinhança — é o caso de partículas isoladas ou de fios percorridos por corrente elétrica. Esse campo magnético, por sua vez, pode influenciar outras correntes ou o movimento de outras cargas isoladas, e nessa interação aparecem forças, da mesma natureza que movem os rotores dos eletrodomésticos, os feixes de elétrons dentro dos tubos de imagens em monitores de vídeo ou as partículas subatômicas nos grandes aceleradores de partículas. Como essas forças são, essencialmente, o resultado da interação de cargas em movimento com campos magnéticos, vamos chamá-las de forças magnéticas. Essa interação ocorre independentemente de o movimento das cargas se dar em um único sentido ou não.

A força magnética não atua no mesmo plano formado pelas direções do movimento da carga e do campo magnético que permeia o espaço onde essa carga se move. Surge aqui o seu aspecto tridimensional.

Neste capítulo serão discutidas a orientação (direção e sentido) e a intensidade da força magnética; veremos os usos que se fazem dela e alguns fenômenos a ela relacionados.

## Atuação da força magnética sobre um móvel eletrizado

O que acontecerá se aproximarmos um ímã de um monitor de TV ou de um computador comum? A imagem ficará distorcida, uma vez que ela é criada a partir do bombardeio de elétrons sobre os *pixels* da tela, ou pequenos elementos formadores de imagem, lançados por um filamento superaquecido.

A presença do ímã afeta o movimento desses elétrons, pois seu campo magnético causa o surgimento de uma força magnética que passa a atuar sobre eles, afetando seu deslocamento.

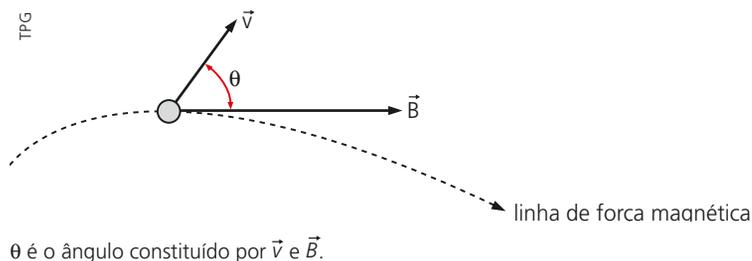
Para caracterizar essa força magnética, vamos considerar uma partícula eletrizada — móvel ou carga elétrica puntiforme — com massa  $m$  e quantidade de carga  $q$  que se move no interior de um campo magnético.



© 2008 Richard Megna/Fundamental Photographs

Imagem de um monitor, distorcida pela ação de um ímã.

Em dado instante, a partícula passa com uma velocidade  $\vec{v}$  por um ponto onde o vetor indução magnética é  $\vec{B}$  e o ângulo formado entre ambos os vetores é  $\theta$ .



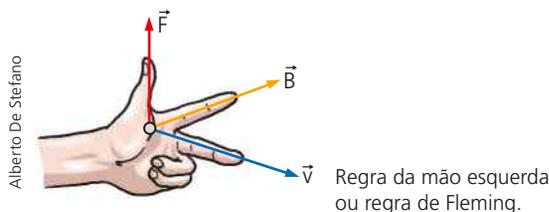
Por definição, o valor da intensidade da força magnética é dado pela expressão:

$$F_m = |q| \cdot v \cdot B \cdot \text{sen } \theta$$

Essa força é perpendicular ao plano definido pelos vetores  $\vec{v}$  e  $\vec{B}$ . Seu sentido, assim como o do vetor indução magnética, é determinado pelo produto entre os dois vetores, que foge ao escopo desta obra.

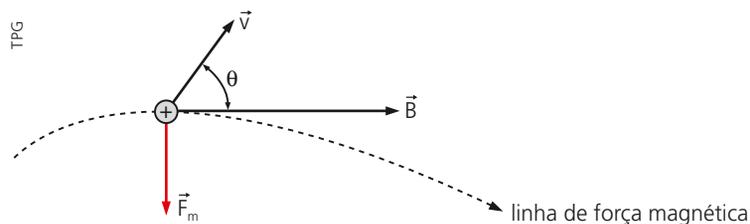
Por isso, como alternativa, vamos utilizar um recurso prático chamado de “regra da mão esquerda” ou regra de Fleming, em que se deve:

- apontar o indicador na direção e segundo o sentido de  $\vec{B}$ ;
- ajustar o dedo médio (se for preciso, girando a mão) na direção e sentido de  $\vec{v}$ ;
- verificar o sentido de  $\vec{F}_m$  utilizando o polegar (perpendicular ao plano formado pelos dedos indicador e médio), quando  $q > 0$ ; caso contrário,  $\vec{F}_m$  terá o sentido oposto.

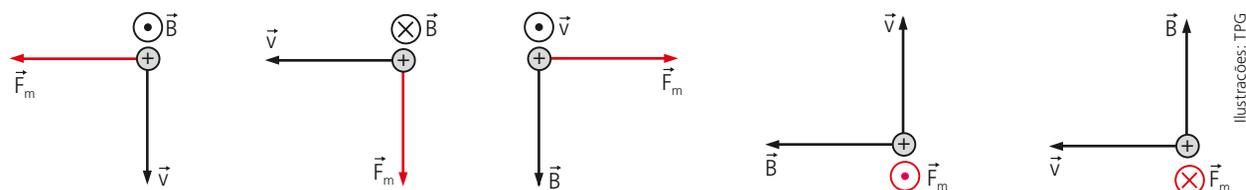


Veja abaixo as direções e sentidos de atuação da força magnética em alguns casos, estabelecidos através da utilização da regra da mão esquerda:

- com partículas de carga positiva:

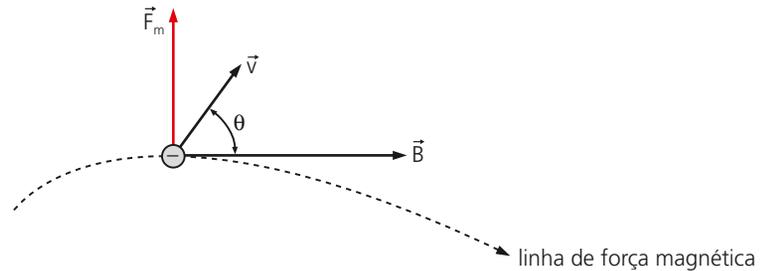


Determinação de direção e sentido da força magnética pela utilização da regra de Fleming, para cargas positivas.

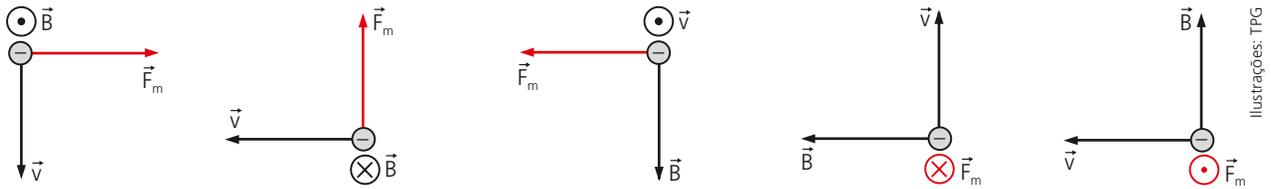


Outros exemplos de determinação de direção e sentido pela regra da mão esquerda, para cargas positivas.

- com partículas de carga negativa:



Determinação de direção e sentido da força magnética pela utilização da regra de Fleming, para cargas negativas.

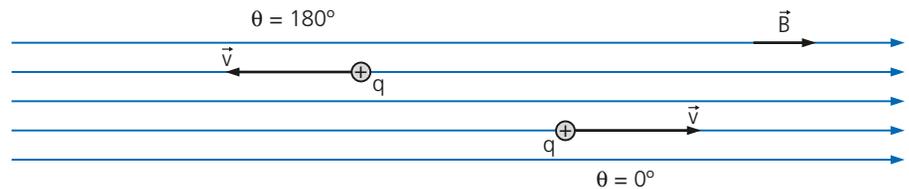


Outros exemplos de determinação de direção e sentido da força magnética, para cargas negativas.

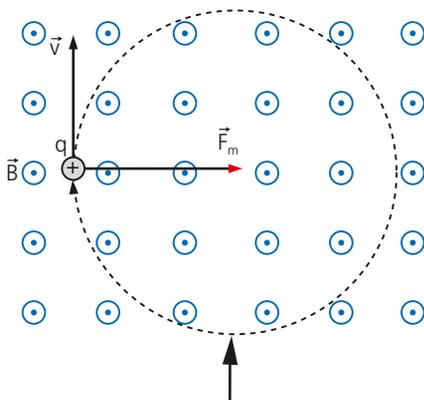
## Corpo eletrizado sob a ação de um campo magnético uniforme

Quando uma partícula eletrizada de massa  $m$  e quantidade de carga  $q$  movimenta-se numa região em que há a presença de um campo magnético uniforme, ela poderá seguir algumas trajetórias, que dependerão das direções de  $\vec{v}$  e de  $\vec{B}$ . Veja quais são seus tipos:

- Trajetória retilínea: quando as direções de  $\vec{v}$  e de  $\vec{B}$  forem paralelas entre si.



Trajétoria com os vetores indução e velocidade posicionados perpendicularmente; desenho "planificado". Na imagem, o vetor indução aparece saindo da folha de papel.



trajétoria circular em um plano perpendicular às linhas de força magnética

Trajétórias da partícula eletrizada quando as direções do campo magnético e da velocidade forem paralelas.

Como  $\sin 0^\circ = \sin 180^\circ = 0$ , não haverá força magnética alguma se manifestando sobre a partícula. Assim, por inércia, ela conservará seu movimento retilíneo e uniforme.

- Trajetória circular: quando as direções de  $\vec{v}$  e de  $\vec{B}$  forem perpendiculares entre si. Veja a representação ao lado.

Quando o vetor da força magnética é perpendicular ao vetor velocidade da partícula, ele cumpre a função de força centrípeta. Então, para analisar o movimento sob o aspecto dinâmico, vamos aplicar a 2ª lei de Newton. Desse modo, a trajetória percorrida pela partícula assume uma forma circular, cujo raio pode ser assim determinado:

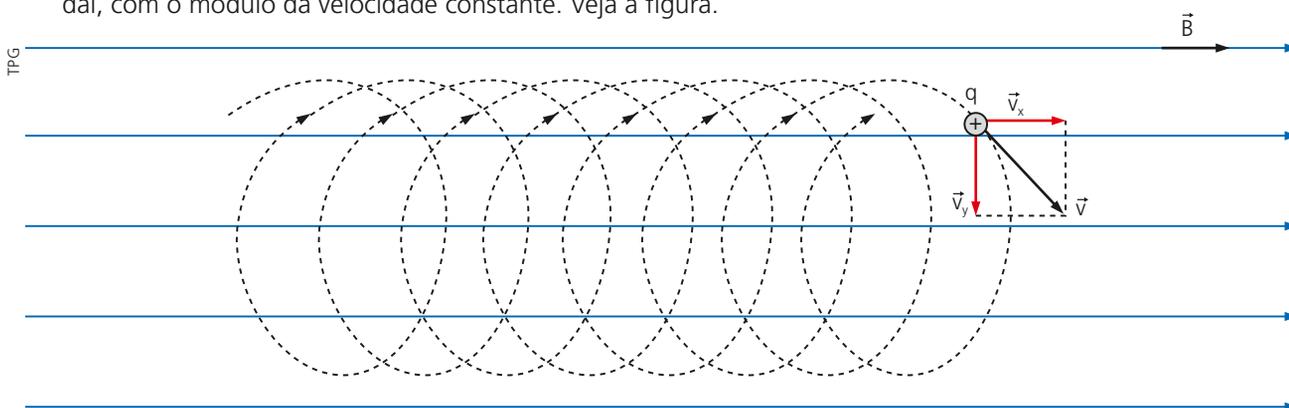
$$F_{cp} = F_m \Rightarrow m \cdot \frac{v^2}{R} = |q| \cdot v \cdot B \cdot \sin 90^\circ \therefore R = \frac{m \cdot v}{|q| \cdot B}$$

Dado que o módulo da velocidade se mantém constante, teremos um movimento circular uniforme.

E, como em todo movimento periódico, é importante determinar o período  $T$  do movimento (tempo necessário para completar uma volta); para isso temos:

$$v = \frac{2\pi \cdot R}{T} \Rightarrow T = \frac{2\pi \cdot R}{v} = \frac{2\pi \cdot m \cdot v}{q \cdot B} \Rightarrow T = \frac{2\pi \cdot m}{q \cdot B}$$

- Trajetória helicoidal: quando as direções de  $\vec{v}$  e de  $\vec{B}$  forem oblíquas entre si. Neste caso, devemos decompor o vetor velocidade, de forma que um de seus componentes tenha a mesma direção das linhas de campo de força magnética e o outro seja perpendicular a elas. Assim, chamaremos de  $\vec{v}_x$  a componente da velocidade  $\vec{v}$  na direção do campo magnético (que determina o movimento retilíneo e uniforme) e  $\vec{v}_y$  a componente na direção perpendicular a ele (responsável pelo movimento circular e uniforme). Composto esses movimentos, obtemos um deslocamento em trajetória helicoidal, com o módulo da velocidade constante. Veja a figura.



Trajétória da carga elétrica com os vetores campo e velocidade oblíquos entre si.

## Aurora polar

O céu das regiões polares apresenta, em certos momentos, um brilho resultante da emissão de luz das altas camadas da atmosfera, criando imagens fascinantes como a que podemos ver ao lado.

Como se formam essas auroras polares? Para responder à questão, devemos entender como ocorre o movimento de um corpo eletrizado dentro de um campo magnético.

O Sol emite, além de radiação eletromagnética, um plasma constituído principalmente por prótons e elétrons; esse fenômeno recebe o nome de vento solar.

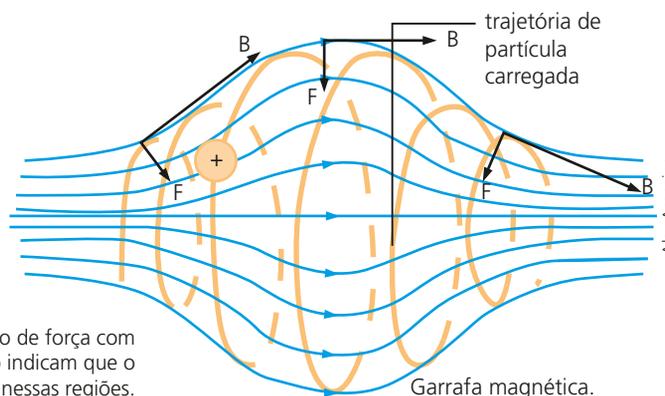
Essas partículas eletrizadas, quando se aproximam da Terra, formam um ângulo oblíquo com o campo magnético terrestre; por isso, tendem a realizar um movimento helicoidal.

Como o campo magnético terrestre não é uniforme, sendo mais intenso nos polos e mais fraco na região central do planeta, as partículas deslocam-se em espiral de uma região à outra. Assim, as partículas ficam confinadas dentro de uma "garrafa magnética", aprisionadas no cinturão de Van Allen, já visto em capítulo anterior (veja ao lado).



Look/Latinstock

Fotografia tirada no norte da Noruega. Sem data. As cores da aurora estão relacionadas com os átomos que são excitados; o do oxigênio emite luz azul-esverdeada e o do nitrogênio, uma luz avermelhada.



Alex Argozino

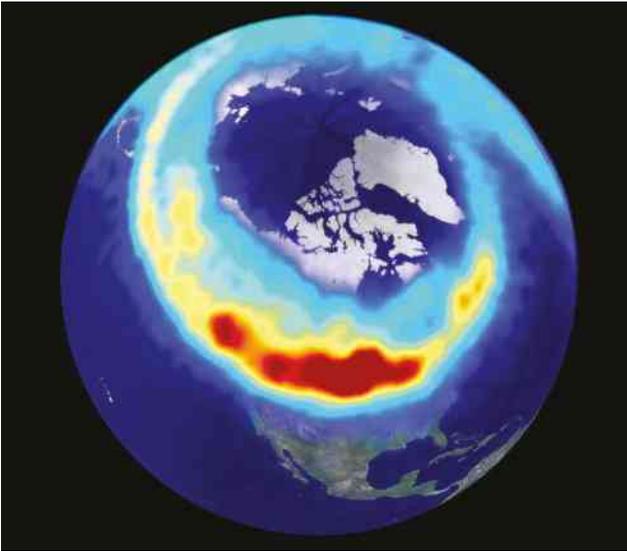
Ilustração da "garrafa magnética": as linhas de campo de força com menor espaçamento nos lados direito e esquerdo indicam que o campo magnético é mais intenso nessas regiões.

Quando a quantidade de partículas eletrizadas dentro do cinturão aumenta, uma parte escapa pelas suas extremidades (polos) e, ao colidirem com moléculas da atmosfera, excitam-se e emitem luz, ocasionando assim as auroras polares.

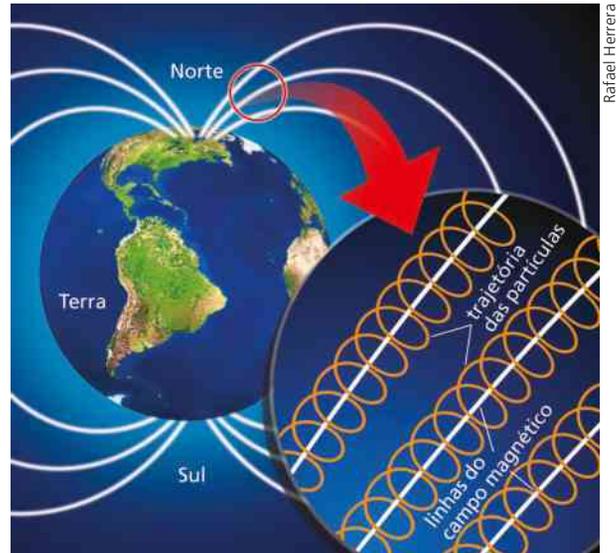
Quando o fenômeno acontece próximo ao polo Norte, ele é chamado de aurora boreal e, quando se dá perto do polo Sul, recebe o nome de aurora austral.

Muito raramente ocorre uma aurora tropical (quando as partículas eletrizadas escapam do cinturão para regiões próximas ao Equador). Para que isso se concretize, o vento solar tem que estar muito intenso.

NASA/SPL/Latinstock



Vista de cima, via satélite, a aurora polar tem formato de um anel de luz em torno do polo Norte, com milhares de quilômetros de extensão.



Rafael Herrera

Representação das linhas do campo magnético e da trajetória das partículas eletrizadas. Ilustração com elementos sem proporção entre si e em cores fantasia.

## O plasma

O plasma, também conhecido como quarto estado físico da matéria, é formado por uma massa de gás ionizado em altíssima temperatura.

O **plasma**, também conhecido como **quarto estado físico da matéria**, é formado quando uma substância no estado gasoso é aquecida até atingir um valor tão elevado de temperatura que faz com que a agitação térmica molecular supere a energia de ligação que mantém os elétrons na órbita do núcleo do átomo. Os elétrons acabam "soltando-se" e a substância torna-se uma massa disforme, eletricamente neutra e formada por elétrons e núcleos dissociados.

É comum no nosso cotidiano encontrarmos as substâncias em seus três estados físicos: sólido, líquido ou gasoso. Apesar de não ser fácil a obtenção do plasma na superfície do nosso planeta, ele constitui 99% de tudo o que existe no universo. Isso porque grande parte dos astros celestes é formada por substâncias nesse estado de agregação. Embora raros, podemos citar alguns exemplos da presença do plasma, como o fogo, lâmpadas fluorescentes, televisão com tela de plasma, os raios, entre outros.

Para compreender melhor como se forma o plasma, tomemos como exemplo o caso da água. Ao fornecermos energia (calor) ao gelo, ele derrete e transforma-se em água. Ao fornecer energia à água, ela evapora e transforma-se em vapor. Se fornecermos mais energia ainda ao vapor, a agitação térmica molecular será maior do que as forças de ligação que mantêm os elétrons em órbita e ocorrerá ionização dos gases (oxigênio e hidrogênio), o que fará com que a substância torne-se condutora de eletricidade e calor.

[...]

Os gases e o plasma apresentam algumas características em comum, como a baixa densidade e a capacidade de fluir. Apesar disso, eles não podem ser classificados de forma igual, pois, a nível atômico e molecular, apresentam estruturas e propriedades completamente diferentes. O plasma pode conduzir corrente elétrica melhor do que o cobre, fluir como um líquido viscoso e interagir com campos elétricos e magnéticos, diferentemente dos gases.

Apesar de o plasma ser um bom condutor de eletricidade, uma das suas características mais importantes é a tendência que ele tem de permanecer eletricamente neutro, já que possui a mesma quantidade de cargas elétricas negativas e positivas. A interação entre essas cargas é a responsável pelas propriedades já citadas.

Além disso, o plasma sempre emite luz ao entrar em contato com alguma excitação elétrica e com campos magnéticos. Um exemplo disso são as auroras polares, que se formam a partir da interação entre as partículas solares carregadas e o campo magnético terrestre.

Disponível em: <<http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/fisica/plasma.htm>>. Acesso em: 11 fev. 2016.

## PARA SABER MAIS

### Sites

#### Como funciona um microfone

Disponível em: <<http://tecnologia.hsw.uol.com.br/questao309.htm>>. Acesso em: 4 fev. 2016.

Nessa página, podemos ler que a tecnologia de fabricação de um microfone mudou muito com o passar do tempo. Acompanhe a evolução e as características de cinco tipos distintos de microfone.

Atente para as propriedades físicas envolvidas em cada uma das soluções de manufatura mencionadas.

Para complementar a informação, navegue por mais *links* na página associados a esse, por exemplo: como funcionam os alto-falantes e como funcionam os eletroímãs.

#### Laboratório de eletromagnetismo

Disponível em:

<[http://phet.colorado.edu/pt\\_BR/simulation/magnet-and-compass](http://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/magnet-and-compass)>. Acesso em: 4 fev. 2016.

Trata-se de um grande laboratório para testar praticamente todas as situações envolvendo campos eletromagnéticos.

Você pode utilizar ímãs, eletroímãs, mudar de corrente contínua para alternada, detectar campos etc. Utilize o simulador e teste todas as possibilidades que sua imaginação criar.

## Ação de uma força magnética sobre um condutor retilíneo

Neste tópico, vamos descrever a maneira como a força magnética atua em um fio condutor de corrente elétrica. Veremos que os motores elétricos necessitam dessa força para funcionar.

Vimos que o sentido convencional da corrente elétrica é o da movimentação das cargas elétricas positivas. Portanto, mantendo a convenção, o vetor velocidade  $\vec{v}$  de cargas positivas estará orientado de acordo com a corrente elétrica (de intensidade  $i$ ).

Marcos Aurélio  
Neves Gomes

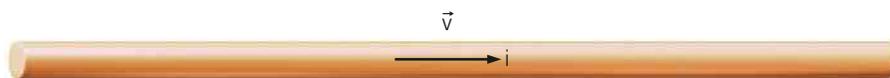
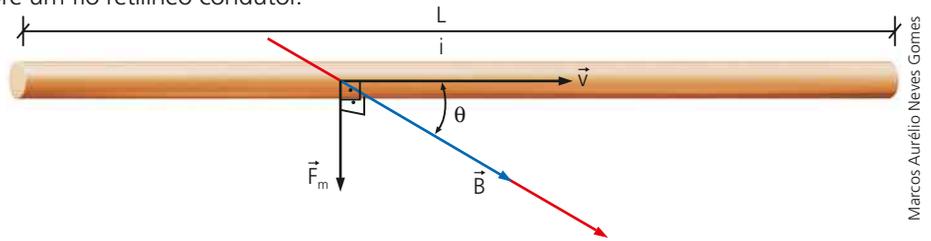


Ilustração de um fio retilíneo que é percorrido por corrente elétrica.

Considerando um fio condutor retilíneo único, percorrido por uma corrente elétrica  $i$ , de comprimento  $L$  e imerso num campo magnético uniforme  $\vec{B}$ , ele estará sob a ação de uma força magnética  $\vec{F}$ , cuja direção e sentido são dados pela regra da mão esquerda.

Veja no esquema abaixo um exemplo de determinação da força magnética que age sobre um fio retilíneo condutor.



Força magnética atuando sobre um fio condutor retilíneo percorrido por corrente elétrica.

Para determinar o módulo da força magnética atuante, vamos resgatar o conhecimento adquirido quando estudamos Eletrodinâmica, Cinemática e Eletromagnetismo. Assim, sabemos que:

- da Eletrodinâmica:  $i = \frac{|q|}{\Delta t}$  ou  $|q| = i \cdot \Delta t$ ;
- da Cinemática:  $v = \frac{L}{\Delta t}$ ;
- do Eletromagnetismo:  $F_m = |q| \cdot v \cdot B \cdot \text{sen } \theta$

Substituindo  $i$  e  $v$  na expressão de  $F_m$ , obtemos:

$$F_m = i \cdot \Delta t \cdot \frac{L}{\Delta t} \cdot B \cdot \text{sen } \theta \Rightarrow F_m = B \cdot i \cdot L \cdot \text{sen } \theta$$

## A FÍSICA NA HISTÓRIA

### Roda de Barlow

Para comprovar a ação da força magnética em um condutor de corrente elétrica submetido a um campo magnético, Peter Barlow (1776-1862) inventou em 1806 um dispositivo que hoje é conhecido como **roda de Barlow**.

Esse dispositivo é um tipo de motor elétrico bem elementar, precursor dos motores hoje existentes, constituído essencialmente de um disco metálico que gira em torno do seu eixo devido à ação de uma força magnética.

As figuras a seguir mostram seu esquema:

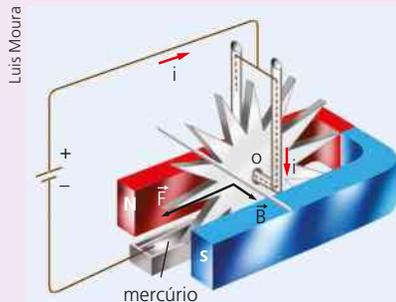
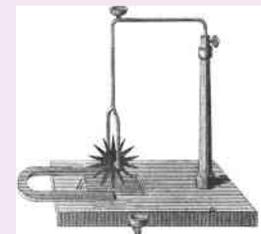
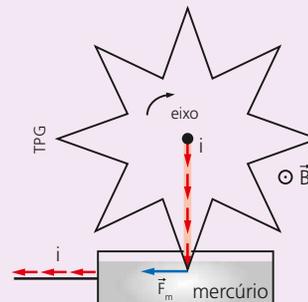


Ilustração da roda de Barlow funcionando sob a ação de força magnética.



A roda de Barlow.



Roda de Barlow, vista frontal.

Na roda de Barlow, a corrente elétrica circula por um percurso fechado: vai do gerador elétrico ao eixo da roda, passa pela própria roda em direção radial a ela, rumo à parte mergulhada em mercúrio, que está ligado ao polo negativo do gerador.

A corrente que percorre a roda, na direção radial, atravessa o campo magnético gerado pelo ímã. Assim, uma força magnética atua sobre a roda, fazendo-a girar num determinado sentido.

A inversão do sentido da corrente elétrica ocasiona a mudança do sentido de movimentação da roda, pois a força magnética assume orientação contrária.

### Efeito motor

Efeito motor é o efeito de rotação produzido pela ação de uma força magnética, que movimenta um dispositivo condutor de corrente elétrica submetido à atuação de um campo magnético — é o caso da rotação da roda de Barlow.

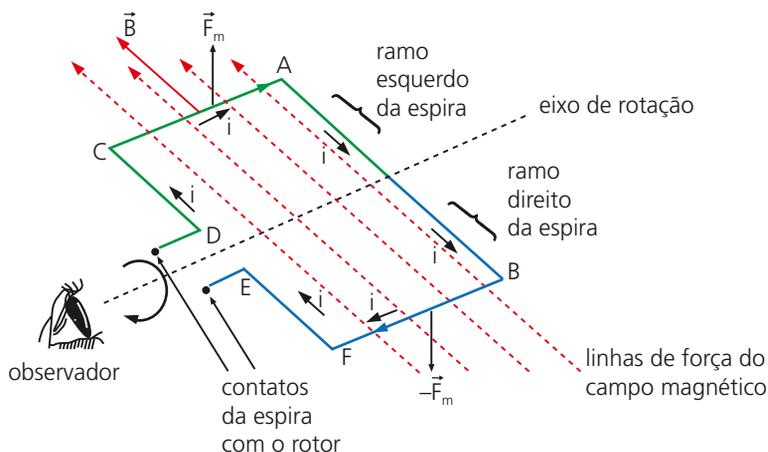
Para explicar melhor esse efeito, vamos analisar o movimento de uma espira (parte de uma bobina) retangular, livre para girar em torno de seu eixo, que é percorrida por uma corrente elétrica  $i$  e que se submete à atuação de um campo magnético  $\vec{B}$ .



Bobinas e espiras retangulares e circulares.

Como a espira está mergulhada num estator — região de atuação de um campo magnético —, cria-se um binário de forças magnéticas em dois lados opostos, fazendo a espira retangular girar em torno do eixo de rotação do rotor. Esse binário é a conjugação de duas forças paralelas de sentidos opostos, aplicadas em pontos distintos da espira, a determinada distância um do outro.

Todavia, isso não é suficiente para fazer a espira completar uma volta. Para entender o motivo, vamos analisar o modo como a força magnética atua sobre a espira, do ponto de vista de um observador situado na posição definida na ilustração ao lado.

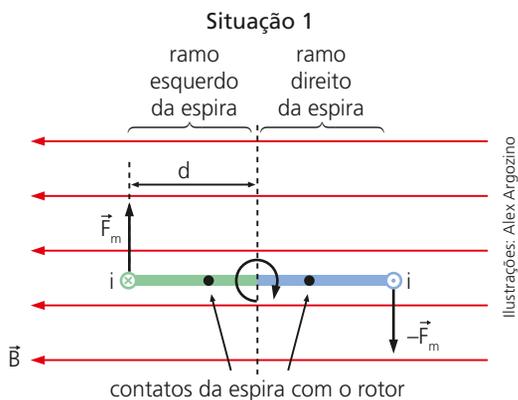


Alex Argozzino

Uma espira percorrida por corrente elétrica, sob a ação de uma força magnética.

Quando a espira está paralela às linhas do campo magnético (ver situação 1 abaixo), os segmentos  $\overline{AB}$ ,  $\overline{CD}$  e  $\overline{EF}$  têm a mesma direção delas. Por isso, nenhuma força atua sobre os segmentos.

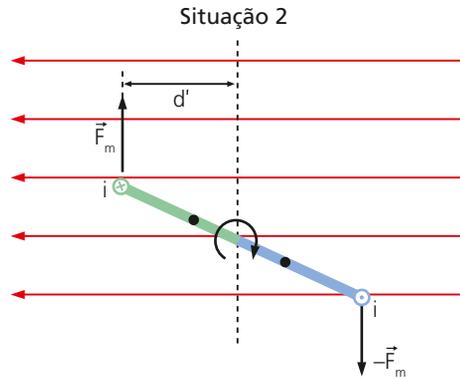
Como os segmentos  $\overline{AC}$  e  $\overline{BF}$  são perpendiculares às linhas de campo magnético, neles agem as forças  $\vec{F}_m$  e  $-\vec{F}_m$ , como consequência da interação que há entre a corrente elétrica e o campo magnético.



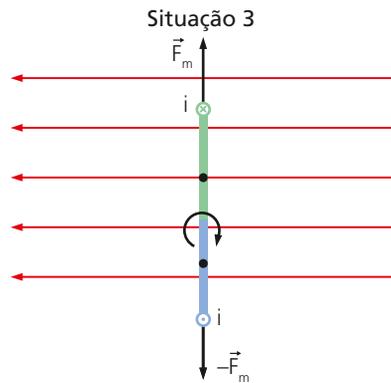
Ilustrações: Alex Argozzino

Essas forças produzem um momento de rotação na espira, fazendo-a girar.

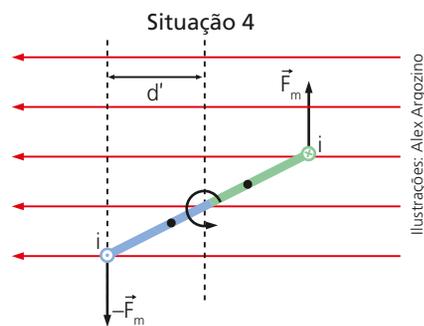
Entretanto, durante a rotação, o valor do momento vai diminuindo, apesar de a intensidade das forças permanecer constante (situação 2). Isso ocorre devido à diminuição da distância da aplicação da força em relação ao plano vertical que contém o eixo de rotação do rotor ( $d' < d$ ). Esse plano é perpendicular à direção das linhas de indução.



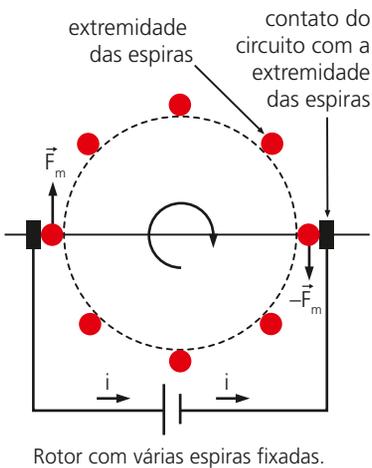
Quando a espira fica perpendicular ao campo magnético (situação 3), as forças não produzem mais momento. Isso significa que, nessa posição, nenhuma força magnética contribui para fazer a espira girar.



Mas, por inércia, ela continuará girando até colocar-se na situação 4.



Ilustrações: Alex Argozino



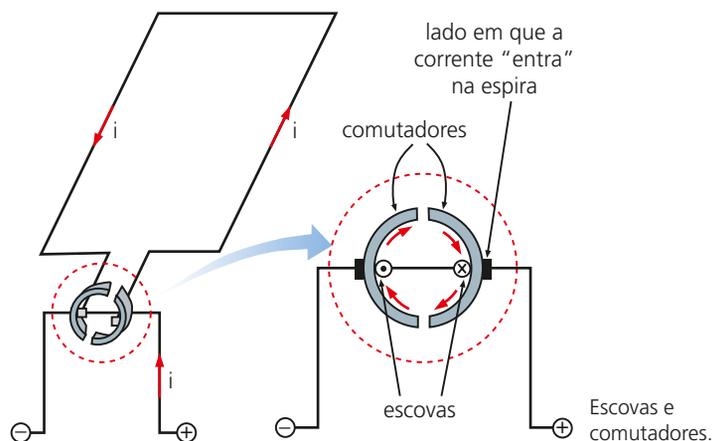
Quando os ramos da espira “mudam de lado”, aparecem forças magnéticas que produzem momentos contrários ao de rotação inicial, impedindo-a de completar a volta.

Para superar essa dificuldade, pode-se, por exemplo, fixar várias espiras ao redor de um único rotor.

Desse modo, a corrente elétrica percorrerá as espiras quando cada uma delas encostar nos pontos de contato do circuito. Assim, a força magnética será aplicada apenas nessa posição, fazendo o eixo girar continuamente em um único sentido.

Uma outra forma de montar um eixo que permita completar o ciclo de rotação é fixando escovas nas extremidades da espira, que deslizarão dentro de dois semicilindros, chamados de comutadores, ligando-os aos pontos de corrente elétrica.

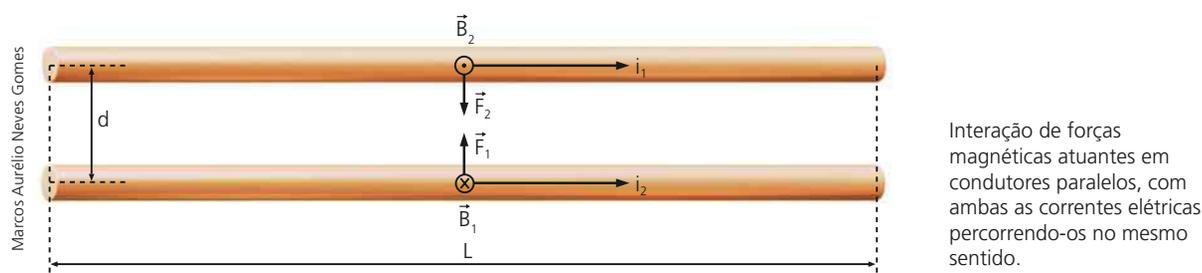
Assim, quando as escovas mudarem de lado nos comutadores, o sentido da corrente elétrica permanecerá o mesmo, de modo que o momento produzido terá continuamente a mesma orientação da rotação da espira.



## Atuação mútua das forças magnéticas geradas por condutores paralelos

Quando dois condutores retilíneos e paralelos são percorridos por corrente elétrica, há uma interação entre seus campos magnéticos de tal sorte que eles se atraem ou se repelem, de acordo com os sentidos de  $i$ .

Se dois condutores têm corrente elétrica deslocando-se no mesmo sentido, ocorre o seguinte:



Interação de forças magnéticas atuantes em condutores paralelos, com ambas as correntes elétricas percorrendo-os no mesmo sentido.

O campo magnético criado pela corrente elétrica de intensidade  $i_1$  (de módulo  $B_1$ ), com o condutor posicionado a uma distância  $d$  do outro, tem intensidade:

$$B_1 = \frac{\mu \cdot i_1}{2\pi \cdot d}$$

A direção de  $\vec{B}_1$  é perpendicular à da corrente elétrica e com o sentido orientado "para dentro" do plano da figura.

De modo análogo, o outro campo magnético criado pela corrente  $i_2$  tem módulo  $B_2$ :

$$B_2 = \frac{\mu \cdot i_2}{2\pi \cdot d}$$

A direção de  $\vec{B}_2$  é a mesma de  $\vec{B}_1$  e seu sentido, o inverso (orientado "para fora" do plano da figura).

As **forças de interação magnética** constituem um par de forças de ação e de reação, com intensidades iguais em módulo. De acordo com a lei de Ampère,

$$F_1 = B_1 \cdot i_2 \cdot L \cdot \sin 90^\circ \quad \text{e} \quad F_2 = B_2 \cdot i_1 \cdot L \cdot \sin 90^\circ$$

Então:

$$F_1 = \frac{\mu \cdot i_1}{2\pi \cdot d} \cdot i_2 \cdot L \quad \text{e} \quad F_2 = \frac{\mu \cdot i_2}{2\pi \cdot d} \cdot i_1 \cdot L$$

Assim, os módulos das intensidades das duas forças são iguais:

$$F_1 = F_2 = \frac{\mu \cdot i_1 \cdot i_2 \cdot L}{2\pi \cdot d}$$

Analisando os sentidos das correntes nos fios e a orientação dos vetores  $\vec{B}$  e  $\vec{F}$  resultantes, podemos dizer que, quando as correntes elétricas que percorrem os condutores paralelos têm o mesmo sentido, as forças magnéticas geradas são de atração e, se apresentarem orientações opostas, elas se repelirão mutuamente.

## Um sistema de unidades (quase) completo

Você já conhece o Sistema Internacional de Unidades, um conjunto de normas e grandezas que regula padrões de medição em unidades específicas. Já usamos extensamente as grandezas inicialmente relacionadas à mecânica e à termodinâmica — comprimento, massa, tempo, temperatura e quantidade de matéria — e agora chegamos às grandezas elétricas. Fizemos no capítulo 8 uma definição provisória da corrente, sendo a relação entre a quantidade de carga que atravessa uma seção reta de um fio e o tempo necessário para que isso ocorra. Assim, a unidade de corrente em ampère se estabeleceu como  $1 \text{ A} = 1 \text{ C/s}$  e, com a introdução das demais grandezas,  $1 \text{ A} = 1 \text{ V}/\Omega$ .

Sendo necessário introduzir uma unidade fundamental do eletromagnetismo, escolheu-se entre as grandezas mais comumente utilizadas e que fosse usada igualmente nos dois ramos (eletricidade e magnetismo), e então foi eleita a corrente.

A definição de corrente para essa finalidade está baseada na expressão que calcula a força entre fios percorridos por corrente, que por sua vez é derivada da Lei de Ampère.

De acordo com o texto do Inmetro:

O ampère é a intensidade de uma corrente elétrica constante que, mantida em dois condutores paralelos, retilíneos, de comprimento infinito, de seção circular desprezível, e situados à distância de 1 metro entre si, no vácuo, produz entre esses condutores uma força igual a  $2 \cdot 10^{-7}$  newton por metro de comprimento.

*SI – Sistema Internacional de Unidades – 8. ed.; Inmetro – Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial, Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <[www.inmetro.gov.br/inovacao/publicacoes/SI.pdf](http://www.inmetro.gov.br/inovacao/publicacoes/SI.pdf)> p.23. Acesso em: 4 fev. 2016.*

Observe que a escolha de uma grandeza fundamental (ou a definição de uma unidade para o Sistema Internacional) não é uma decisão ditada pela Ciência, mas tem motivações técnicas e também históricas; de fato, se o conceito de velocidade fosse tão bem conhecido e manipulável quanto as medidas de comprimento, não haveria problema em se definir a velocidade como unidade fundamental. Repare também que as definições de um ampère como “a corrente que causa a passagem de 1 coulomb de carga por uma seção reta de fio em 1 segundo” ou “a corrente que atravessa um fio de resistência 1 ohm que está submetido à diferença de potencial de 1 volt” são tão boas quanto a escolhida pelo Sistema Internacional.

O que causou a escolha da corrente como unidade fundamental é que esta permeia igualmente os domínios da eletricidade e do magnetismo. Além disso, essa escolha permite definir, de modo independente, a unidade de carga no SI como sendo o coulomb (você consegue formular essa definição?) e a determinação experimental da constante de permissividade no vácuo.

Com esta, completamos o quadro de grandezas fundamentais: comprimento, massa, tempo, temperatura, quantidade de matéria e corrente elétrica. Ou quase: restaria ainda definir a intensidade luminosa, que se mede em candelas. Visite o *site* do Inmetro, no qual, entre outras informações, você pode encontrar a definição da intensidade luminosa. O endereço está na seção “Para saber mais” da página 206.



Album/Akg-Images/Latinstock

Andre-Marie Ampère (1775-1836) fez importantes descobertas no campo do eletromagnetismo, principalmente a interação entre fios percorridos por corrente elétrica.

## PARA SABER MAIS

### Site

## Inmetro – Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial

Disponível em: <www.inmetro.gov.br/>. Acesso em: 11 fev. 2016.

O Inmetro é uma secretaria executiva vinculada ao Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. Visite o portal e conheça os serviços prestados em calibração, metrologia e padronização de medidas comerciais.

## ATIVIDADE PRÁTICA

FAÇA NO  
CADERNO NÃO  
ESCREVA  
NO LIVRO

### Construindo um motor elétrico simples

Isso mesmo, vocês aprenderão a montar um motor elétrico básico (realmente básico), com uma rotação de até 10 000 rpm, em apenas 30 segundos!

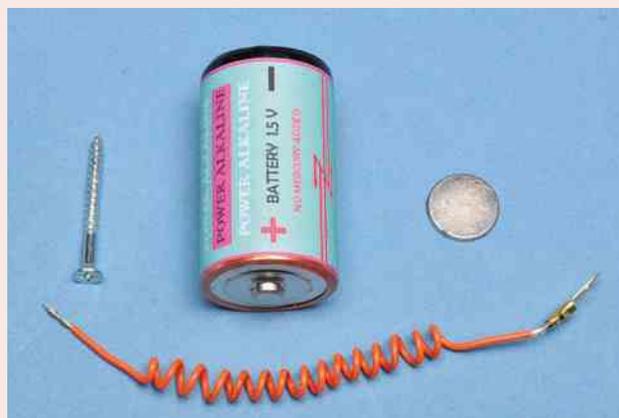


Trata-se de montar uma composição com elementos simples que atuam com base nos princípios de funcionamento de um motor elétrico.

Vamos lá? Então pegue os acessórios necessários e mãos à obra!

#### Material

- um parafuso simples de rosca soberba (usado em madeira)
- uma pilha alcalina tamanho grande (1,5 V)
- um fio de cobre (condutor) de aproximadamente 8 polegadas (20 cm)
- um ímã de neodímio (pode ser obtido em HD de computador)



Fotografias: Eduardo Santallestra

#### Procedimento

- I. Juntem o ímã de neodímio com a base do parafuso.
- II. Feito isso, coloquem a ponta do parafuso no polo positivo da pilha, pressionando uma extremidade do fio de cobre no seu lado oposto (polo negativo).

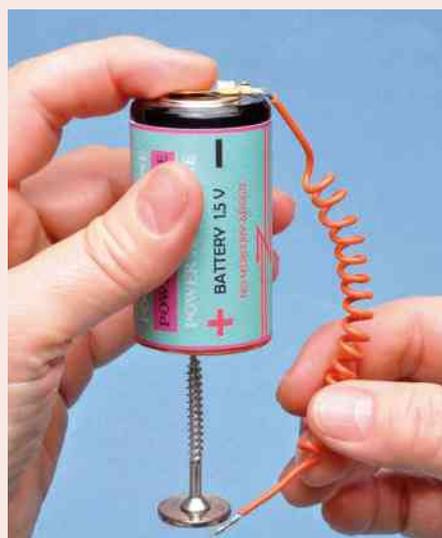
Pronto, o motor elétrico está finalizado.

Para “dar a ignição”, basta tocar o ímã de neodímio com a outra ponta do fio de cobre. O parafuso passará a executar voltas o suficiente para estampar um sorriso em seu rosto.

#### Discussão

1. Como podemos variar a velocidade de giro do parafuso?
2. O que acontecerá se o parafuso ficar do lado negativo da pilha? Justifique.

Ver Orientações Didáticas.



## Exercícios resolvidos

**ER1.** Se a direção do deslocamento de uma partícula eletrizada, numa região em que há a atuação de um campo magnético, for paralela ao vetor indução magnética, qual será o módulo da força magnética originada?

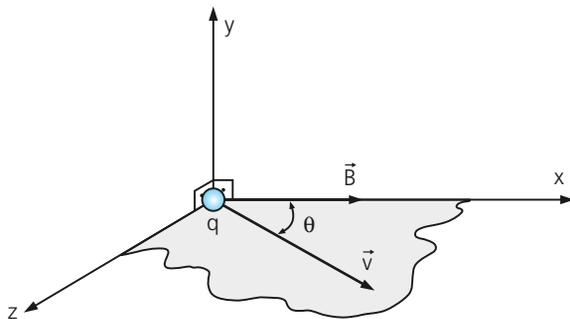
### Resolução:

Se as direções de  $\vec{B}$  e  $\vec{v}$  forem paralelas, o ângulo formado entre esses vetores é  $\theta = 0^\circ$  (se tiverem o mesmo sentido) ou  $\theta = 180^\circ$  (com sentidos opostos) — a direção da velocidade é a do deslocamento da partícula, no instante considerado.

Tanto num caso como no outro, o valor do seno é nulo ( $\text{sen } 0^\circ = \text{sen } 180^\circ = 0$ ). Consequentemente, o módulo da intensidade da força magnética será nulo:  $F_m = |q| \cdot v \cdot B \cdot \text{sen } \theta = |q| \cdot v \cdot B \cdot 0 = 0$

**ER2.** Uma partícula eletrizada, de carga positiva  $q$  de  $3 \mu\text{C}$ , está em movimento com velocidade instantânea de  $5 \text{ m/s}$ , num ponto de um campo magnético cujo vetor indução tem intensidade de  $2 \cdot 10^{-5} \text{ T}$ . Observe a figura a seguir, em que o ângulo entre os vetores  $\vec{B}$  e  $\vec{v}$  é de  $30^\circ$ .

Ilustrações: TPG



Determine o vetor força magnética, dando a direção, o sentido e seu módulo.

### Resolução:

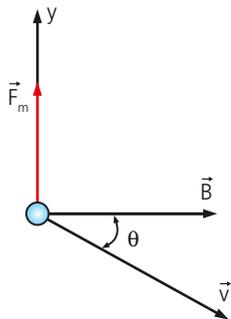
São dados:

$$q = 3 \mu\text{C} = 3 \cdot 10^{-6} \text{ C}; v = 5 \text{ m/s}; \\ B = 2 \cdot 10^{-5} \text{ T}; \theta = 30^\circ$$

A regra de Fleming nos dá a direção e o sentido de  $\vec{F}_m$  sobre o eixo  $y$  e apontando para cima, conforme a figura ao lado.

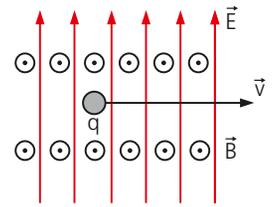
O módulo é assim calculado:

$$F_m = |q| \cdot v \cdot B \cdot \text{sen } \theta = \\ = 3 \cdot 10^{-6} \cdot 5 \cdot 2 \cdot 10^{-5} \cdot \text{sen } 30^\circ \Rightarrow F = 1,5 \cdot 10^{-10} \text{ N}$$



**ER3.** Uma partícula iônica, de carga positiva  $q$ , desloca-se numa região do espaço. Nela, coexistem um campo elétrico vertical  $E$  e um campo magnético horizontal  $B$ , ambos uniformes.

Suas intensidades são:  $E = 3 \cdot 10^2 \text{ N/C}$  e  $B = 5 \cdot 10^{-1} \text{ T}$ . Então, com que velocidade a partícula (cuja massa é desprezível) deve movimentar-se para que a força resultante (entre a elétrica e a magnética) seja nula sobre ela?



### Resolução:

São dados:  $q$  positivo ( $q > 0$ );  $\theta = 90^\circ$  ( $\vec{v} \perp \vec{B}$ );

$$E = 3 \cdot 10^2 \text{ N/C}; B = 5 \cdot 10^{-1} \text{ T}$$

As forças elétrica e magnética são tais que possuem sentidos opostos, como ao lado.

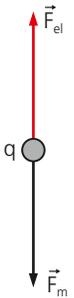
Logo, para que a resultante delas seja nula, uma deve ter o mesmo módulo da outra:

$$F_m = F_{el} \Rightarrow |q| \cdot v \cdot B \cdot \text{sen } \theta = |q| \cdot E \Rightarrow$$

$$\Rightarrow v \cdot B \cdot \text{sen } \theta = E \Rightarrow v \cdot 5 \cdot 10^{-1} \cdot 1 = 3 \cdot 10^2 \Rightarrow$$

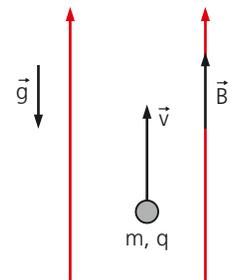
$$\Rightarrow v = 600 \text{ m/s}$$

Observação: a partícula estará em movimento retilíneo e uniforme se as outras forças que atuam sobre ela tiverem intensidades desprezíveis, como pode ser o caso da força gravitacional.



**ER4.** Numa região do espaço onde existem apenas o campo gravitacional e um campo magnético, ambos constantes, uma partícula eletrizada de massa  $m$  e quantidade de carga  $q$  desloca-se, num dado instante, conforme mostra a figura ao lado.

Que tipo de movimento essa partícula fará nos próximos instantes?

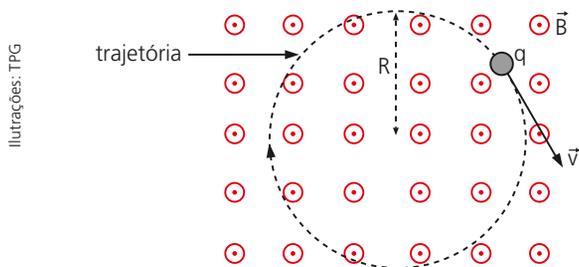


### Resolução:

Como os vetores  $\vec{v}$  e  $\vec{B}$  são paralelos, portanto com  $\theta = 0^\circ$  ( $\text{sen } 0^\circ = 0$ ), não há a manifestação de força magnética alguma sobre a partícula eletrizada:  $F_m = 0$ .

Se a força resultante fosse nula, a partícula, por inércia, manteria seu movimento ascendente, retilíneo e uniforme. Mas a ação da força gravitacional trata de retardar seu deslocamento, devido ao peso da própria partícula,  $P = m \cdot g$ , que tem direção vertical e sentido para baixo. Portanto, nos instantes seguintes, o movimento será retilíneo, uniformemente retardado, com o sentido voltado para cima. Mais tarde, haverá a inversão do sentido de deslocamento e a partícula terá movimento uniformemente acelerado para baixo, em trajetória retilínea.

**ER5.** Uma partícula eletrizada, com quantidade de carga elétrica  $q = 0,02 \mu\text{C}$  e massa  $m = 2 \cdot 10^{-11} \text{ g}$ , move-se perpendicularmente às linhas de força de um campo magnético uniforme, com velocidade de  $3 \cdot 10^6 \text{ m/s}$ . A figura ilustra a situação e mostra o raio da trajetória, que é  $R = 3 \text{ cm}$ .



Desprezando-se os efeitos de outros campos, qual é a intensidade desse campo magnético?

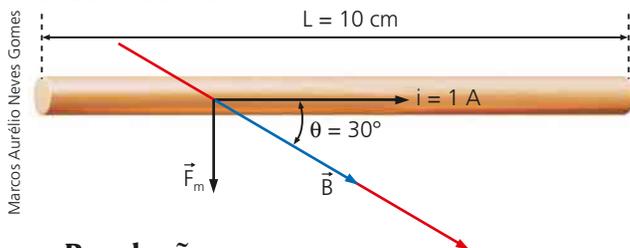
**Resolução:**

Dados:  $q = 0,02 \mu\text{C} = 2 \cdot 10^{-8} \text{ C}$ ;  
 $m = 2 \cdot 10^{-11} \text{ g} = 2 \cdot 10^{-14} \text{ kg}$ ;  $v = 3 \cdot 10^6 \text{ m/s}$ ;  
 $R = 3 \text{ cm} = 3 \cdot 10^{-2} \text{ m}$

Nessa situação, a força magnética tem a função de força centrípeta:

$$F_m = F_{cp} \Rightarrow |q| \cdot v \cdot B \cdot \sin 90^\circ = m \cdot \frac{v^2}{R} \Rightarrow B = \frac{m \cdot v}{|q| \cdot R} = \frac{2 \cdot 10^{-14} \cdot 3 \cdot 10^6}{2 \cdot 10^{-8} \cdot 3 \cdot 10^{-2}} = 1 \cdot 10^2 \Rightarrow B = 100 \text{ T}$$

**ER6.** Um fio condutor retilíneo é percorrido por uma corrente elétrica de intensidade 1 A. Ele está mergulhado num campo magnético uniforme de 0,8 T. O ângulo formado pelas direções do condutor e das linhas de força magnética é de  $30^\circ$ . Qual é o módulo da força magnética que atua num trecho de 10 cm desse condutor elétrico?

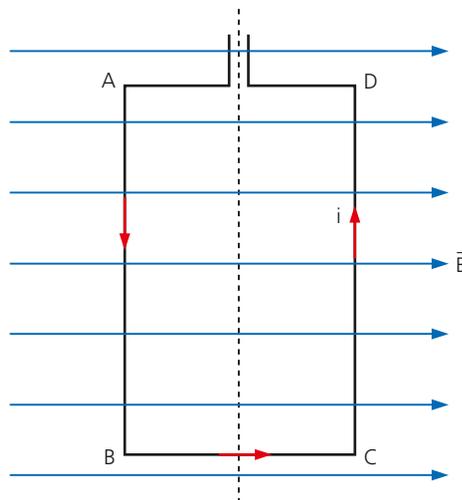


**Resolução:**

São dados:  $i = 1 \text{ A}$ ;  $B = 0,8 \text{ T}$ ;  $\theta = 30^\circ$ ;  $L = 10 \text{ cm} = 0,1 \text{ m}$   
A direção e o sentido de  $\vec{F}_m$ , determinados pela regra de Fleming, já estão indicados na figura.  
Seu módulo é dado por:  $F_m = B \cdot i \cdot L \cdot \sin \theta = 0,8 \cdot 1 \cdot 0,1 \cdot 0,5 \Rightarrow F_m = 0,04 \text{ N}$

**ER7.** Um condutor com formato retangular, de dimensões iguais a  $AD = BC = 15 \text{ cm}$  e  $AB = CD = 30 \text{ cm}$ , é submerso num campo magnético uniforme, de intensidade 0,2 T. Num dado instante, a corrente que atravesa o condutor tem 5 A de intensidade. Então, calcule, segundo a configuração apresentada na ilustração:

a) o módulo da força magnética que atua em cada lado do condutor;  
b) a intensidade do momento da força de rotação do condutor em torno de seu eixo.



**Resolução:**

São dados:  $i = 5 \text{ A}$ ;  $B = 0,2 \text{ T}$ ;  
 $AD = BC = 15 \text{ cm} = 0,15 \text{ m}$ ;  $AB = CD = 30 \text{ cm} = 0,3 \text{ m}$

a) Pela regra de Fleming, a força magnética é perpendicular ao plano da figura:

- no segmento: a força “sai” do plano;
- em  $\overline{BC}$  e  $\overline{AD}$ : a força é nula, pois as linhas de campo e a direção da corrente elétrica são paralelas;
- no segmento  $\overline{CD}$ : a força “entra” no papel.

Tanto no segmento  $\overline{AB}$  como no  $\overline{CD}$ , onde  $\theta = 90^\circ$ , o módulo da força magnética vale:

$$F_m = B \cdot i \cdot L \cdot \sin \theta = 0,2 \cdot 5 \cdot 0,3 \cdot 1 \Rightarrow F_m = 0,3 \text{ N}$$

b) O binário composto pelas duas forças produz a rotação do condutor em torno do próprio eixo, que é equidistante aos segmentos  $\overline{AB}$  e  $\overline{CD}$ , de

$d = \frac{0,15 \text{ m}}{2}$ ; o momento de força é a grandeza cujo módulo é calculado por:  $M = 2 \cdot F \cdot d$ ; então, temos:

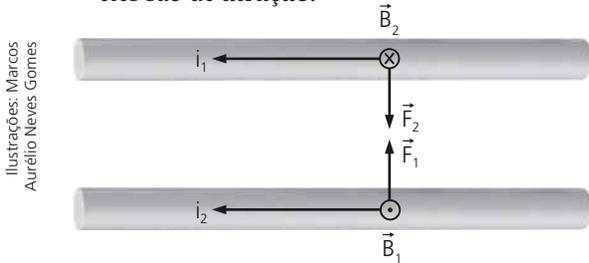
$$M = 2 \cdot F_m \cdot d = 2 \cdot 0,3 \cdot \frac{0,15}{2} \Rightarrow M = 0,045 \text{ N} \cdot \text{m}$$

**ER8.** Que tipo de interação magnética (de atração ou repulsão) ocorre quando dois condutores retilíneos e paralelos são percorridos por correntes elétricas de:

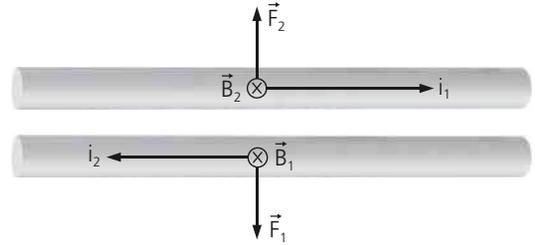
- a) mesmo sentido?  
b) sentidos opostos?

## Resolução:

a) Quando as correntes atravessam os condutores no mesmo sentido, os campos magnéticos gerados por elas são tais que as forças que atuam sobre eles são de **atração**.



b) Se as correntes passarem pelos condutores em sentidos opostos, as forças magnéticas que surgem são de **repulsão**.



## Exercícios propostos



**EP1.** Se uma partícula eletrizada com carga positiva  $q$  for colocada em estado cinemático de repouso no interior de um campo magnético uniforme, responda:

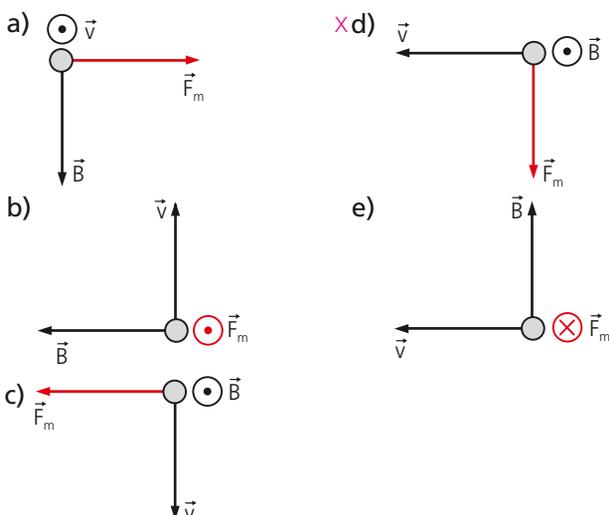
- Haverá atuação de força magnética sobre a partícula?
- Se a carga  $q$  fosse negativa, o que aconteceria com a intensidade da força magnética?

Respostas nas Orientações Didáticas.

**EP2.** Se o vetor da força magnética que age sobre um móvel eletrizado for perpendicular ao seu vetor velocidade ( $\vec{v} \perp \vec{F}_m$ ), então:

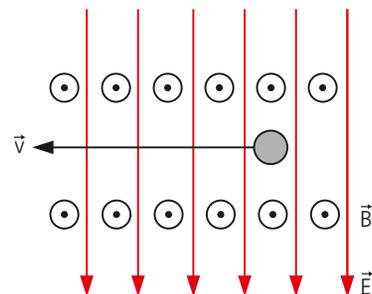
- a força magnética acelera o móvel, aumentando o módulo de sua velocidade;
- a força magnética não altera a direção da velocidade;
- o trabalho da força magnética é nulo; **X**
- a força magnética é equilibrada pela força centrípeta;
- a força magnética não é perpendicular ao vetor indução magnética.

**EP3.** Uma partícula eletrizada negativamente sofre, ao atravessá-lo, a ação de um campo magnético. Qual dos seguintes esquemas vetoriais está correto?



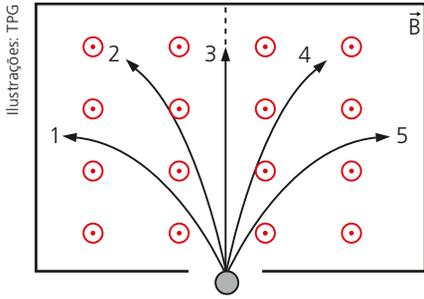
**EP4.** Uma partícula ionizada positivamente, com carga elétrica de  $1 \mu\text{C}$ , movimenta-se com velocidade instantânea de  $100\sqrt{2} \text{ m/s}$ , num ponto de um campo magnético uniforme em que a intensidade da força magnética é igual a  $4 \cdot 10^{-3} \text{ T}$ . O ângulo formado entre os vetores indução magnética e velocidade é de  $45^\circ$ . De acordo com essas informações, qual é a intensidade do vetor força magnética que atua sobre a partícula?  $4 \cdot 10^{-7} \text{ N}$

**EP5.** Uma partícula eletrizada, de carga negativa ( $q < 0$ ), move-se numa região do espaço onde coexistem um campo elétrico uniforme vertical (de intensidade  $E = 4 \cdot 10^2 \text{ N/C}$ ) e um campo magnético uniforme horizontal (de intensidade  $B = 8 \cdot 10^{-2} \text{ T}$ ). Determine a velocidade com que essa partícula, de massa desprezível, deve deslocar-se para que seu movimento seja retilíneo e uniforme.  $5 \cdot 10^9 \text{ m/s}$



Ilustrações: TPG

**EP6.** Uma câmara de bolhas, onde atua um campo magnético uniforme, é utilizada nas observações de trajetos realizados por partículas atômicas: elétrons, pósitrons (elétrons de carga positiva), prótons e nêutrons. Todas as partículas penetram na câmara com a mesma velocidade, cuja direção é perpendicular ao vetor indução magnética, que "sai" do plano da figura onde está representada sua seção transversal.



Qual das seguintes associações *não* apresenta a correspondência mais adequada entre a partícula e a sua respectiva trajetória?

- a) elétron – 1.                      d) próton – 4.  
 b) pósitron – 5.                    e) próton – 2. X  
 c) nêutron – 3.

**EP7.** Numa situação como a descrita na questão anterior:

a) qual é o trabalho realizado pela força magnética que age sobre uma partícula, no trecho mostrado na figura? São dados: **trabalho nulo**

$m$ : massa da partícula;

$q$ : quantidade de carga elétrica da partícula;

$B$ : intensidade do campo magnético;

$R$ : raio da trajetória descrita;

$v$ : módulo da velocidade da partícula.

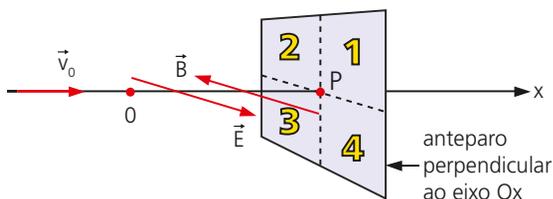
b) expresse o valor da massa  $m$  em função das demais variáveis do item anterior.  $m = \frac{B \cdot |q| \cdot R}{v}$

**EP8.** Uma partícula, de massa  $1 \cdot 10^{-11}$  g, é eletrizada positivamente com quantidade de carga igual a  $0,01 \mu\text{C}$ . Ela se movimenta perpendicularmente às linhas de força de um campo magnético uniforme, com velocidade de  $5 \cdot 10^6$  m/s. O raio da trajetória descrita pela partícula é de 2 cm. Os efeitos de outros campos que possam estar atuando sobre a partícula são desprezados. Então, qual deve ser a intensidade do campo magnético onde a partícula está inserida?  **$B = 250$  T**

**EP9.** Na questão anterior, qual seria o valor do raio do trajeto da partícula, se o módulo de sua velocidade fosse quadruplicado?

- a) 0,5 cm                              d) 8 cm X  
 b) 1 cm                                e) 32 cm  
 c) 2 cm

**EP10.** Um feixe de pósitrons (elétrons de carga positiva) tem, inicialmente, uma velocidade vetorial cuja direção e sentido são coincidentes com o eixo Ox (ver figura).



A partir do ponto  $O$  até  $P$ , que ficam bem próximos um do outro, passam a atuar simultaneamente um campo elétrico uniforme, com direção horizontal e sentido para a direita, e um campo magnético uniforme, também horizontal e orientado para a esquerda, relativamente ao vetor  $\vec{v}_0$ .

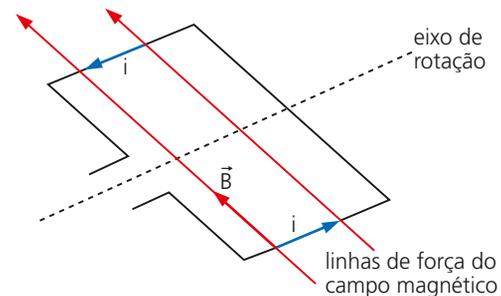
De acordo com essas informações, o feixe de pósitrons irá sofrer desvios de modo que poderá atingir o anteparo no quadrante de número:

- a) 1 X  
 b) 2  
 c) 3  
 d) 4  
 e) nenhum, pois o feixe não sofre desvios e atinge o ponto  $P$ .

**EP11.** Qual é a razão pela qual um condutor elétrico, imerso num campo magnético, deve sofrer a ação de uma força originada por ele, quando estiver sendo percorrido por uma corrente elétrica?

Resposta nas Orientações Didáticas.

**EP12.** Determine o sentido de rotação da espira retangular mostrada na figura.

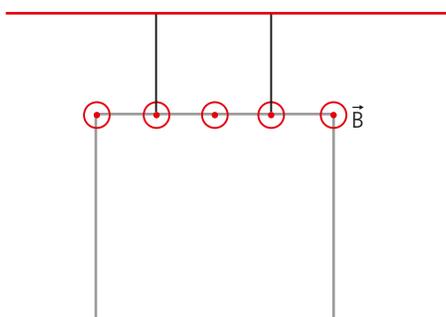


- a)   
 b) X  
 c) Não ocorre rotação, pois as forças de cada lado da espira têm momentos de força que se anulam.  
 d) O eixo de rotação é deslocado da seguinte forma:   
 e) A tendência é de que o eixo gire desse modo:

**EP13.** Um condutor elétrico retilíneo, percorrido por uma corrente de intensidade igual a 4 A, está colocado perpendicularmente às linhas de força de um campo magnético uniforme, cujo vetor indução tem módulo de 2 T. Determine a intensidade da força magnética exercida sobre cada milímetro desse condutor.  **$0,008$  N**

**EP14.** Uma força magnética de 20 N atua sobre um condutor elétrico retilíneo, num dado trecho. A corrente elétrica tem intensidade de 8 A. A direção do condutor é perpendicular à da do campo magnético, que tem a intensidade de 2 T. Determine o comprimento do referido trecho desse condutor. **1,25 m**

**EP15.** Uma espira condutora, quadrada e rígida, de massa 10 g e de lado 5 cm, está suspensa por dois fios ideais, conforme mostra a figura. O lado horizontal superior dessa espira está imerso num campo magnético uniforme, cuja intensidade é de 2 T e sua direção é perpendicular ao plano formado por ela.



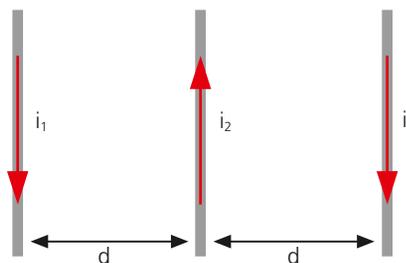
Sendo dado  $g = 10 \text{ m/s}^2$ , qual é:

- a) a intensidade de corrente elétrica mínima que deve percorrer a espira a fim de anular as tensões nos fios? **1 A**  
 b) o sentido dessa corrente? **anti-horário**

**EP16.** Dois fios condutores longos, retilíneos e paralelos entre si, são percorridos por correntes elétricas de tal forma que eles se atraem. Então, qual das seguintes afirmações está *incorreta*?

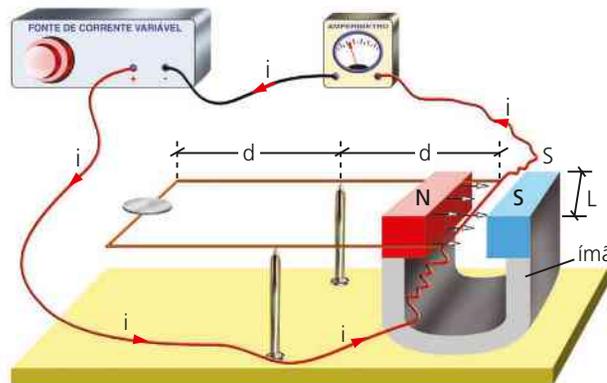
- I) As correntes têm sentidos coincidentes.
- II) Para aumentar a força de atração, basta que uma das correntes seja intensificada.
- III) Para diminuir a intensidade da força de atração, ambas as correntes podem ser reduzidas.
- IV) Se a distância entre os condutores elétricos for duplicada, a intensidade da força magnética será reduzida para a metade do valor inicial.
- V) Se uma das correntes tiver seu sentido trocado, o módulo da força de atração terá o seu valor invertido (de  $F$  para  $\frac{1}{F}$ ). **X**

**EP17.** Três condutores retilíneos, longos e paralelos entre si, são posicionados num plano horizontal, conforme definido na figura a seguir, onde  $d = 1 \text{ m}$ . As correntes que passam por eles são tais que seus módulos são relacionados pela igualdade  $i_1 = 2 \cdot i_2 = i_3 = 1 \text{ A}$ .



Qual é a intensidade da força magnética resultante, por unidade de comprimento, sobre cada condutor, na interação entre os três campos magnéticos criados? Dado:  $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$ . **Todas as forças são nulas.**

**EP18.** (UFBA) A figura mostra a representação esquemática de uma balança de corrente que equivale a uma balança convencional de dois pratos, um instrumento de medida milenar, que, além do seu emprego usual, é o símbolo da justiça na tradição romana. Em uma balança de dois pratos, a determinação da quantidade de massa de um corpo é feita por comparação, ou seja, quando a balança está equilibrada, sabe-se que massas iguais foram colocadas nos dois pratos. Na balança de corrente da figura, o “prato” da direita é um fio de comprimento  $L$  submetido a uma força magnética. Quando uma certa massa é colocada no prato da esquerda, o equilíbrio é obtido, ajustando-se a corrente medida no amperímetro. Considerando que o campo magnético no “prato” da direita é igual a 0,10 T, que o amperímetro indica uma corrente igual a 0,45 A, que  $L = 10 \text{ cm}$  e que a aceleração da gravidade local é igual a  $10 \text{ m/s}^2$ , calcule o valor da massa que deve ser colocada no prato da esquerda para equilibrar a balança. Suponha que, na ausência de corrente e de massa, a balança esteja perfeitamente equilibrada.  **$m = 0,45 \text{ g}$**



Ilustrações: Luis Moura

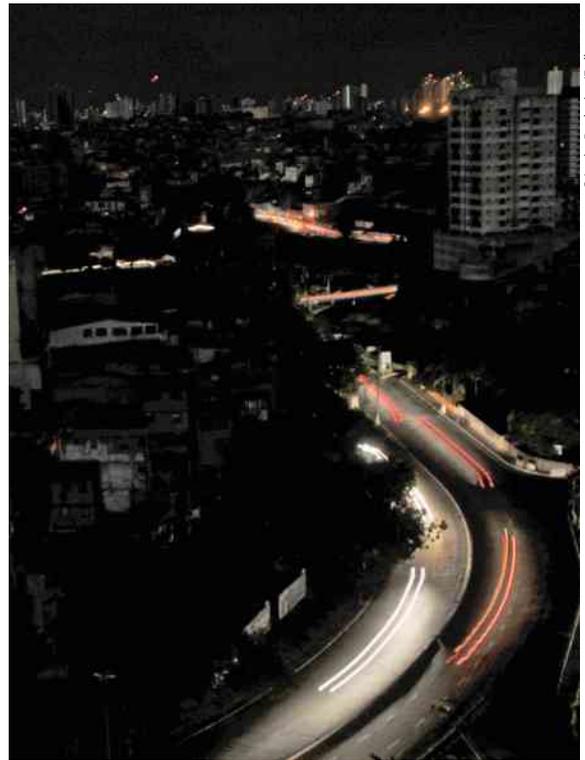
# Indução eletromagnética

Você deve se lembrar das dificuldades que surgem quando falta energia, mesmo que por um curto período. Nessas ocasiões, fica claro que, pelo modelo de desenvolvimento de nossa civilização, é praticamente impossível vivermos sem energia elétrica.

Toda a energia elétrica que consumimos é resultado de transformações energéticas, com a queima de combustíveis fósseis (termoelétrica), com os ventos (eólica), com a queda da água represada em barragens (hidrelétrica) ou com a manipulação dos átomos (nuclear).

De Tales de Mileto a Michael Faraday e Joseph Henry, aprendemos como eletrizar objetos, como controlar a corrente elétrica em circuitos e como interagem os campos elétricos e magnéticos; hoje, os geradores e os transformadores elétricos utilizam os princípios da indução eletromagnética estudados por Faraday e por Henry.

No capítulo anterior, vimos como se constrói um motor; neste capítulo, vamos estudar como a corrente elétrica é gerada por fenômenos eletromagnéticos. Veremos como surge a diferença de potencial induzida, responsável pela circulação de cargas elétricas e pelo funcionamento de circuitos elétricos e eletrônicos.

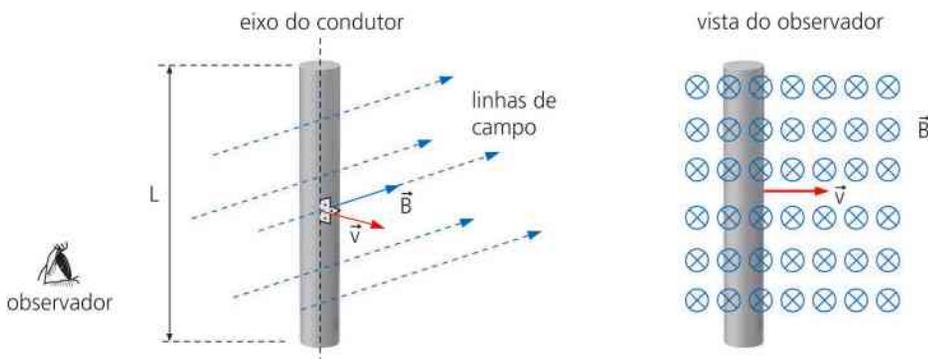


Sérgio Pedreira/Folhapress

Vista noturna de Salvador, Bahia, durante o apagão que atingiu a Região Nordeste e parte dos estados do Pará e de Tocantins. Fotografia de outubro de 2012.

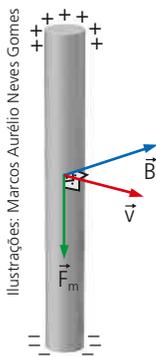
## A diferença de potencial induzida

Inicialmente, vamos considerar um condutor retilíneo de comprimento  $L$  em movimento de velocidade  $\vec{v}$  no interior de um campo magnético uniforme caracterizado pelo vetor indução  $\vec{B}$ , conforme a figura a seguir. Sem perda de generalidade, vamos considerar que a direção do eixo do condutor e os vetores  $\vec{B}$  e  $\vec{v}$  são perpendiculares dois a dois.



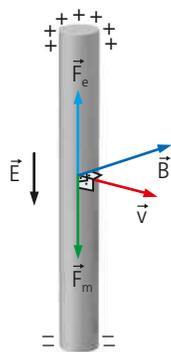
Marcos Aurélio Neves Gomes

Indução da força magnética.



Ilustrações: Marcos Aurélio Neves Gomes

A força magnética induzida promove o deslocamento de elétron; sua direção e sentido sobre as cargas positivas são dados pela regra da mão esquerda.



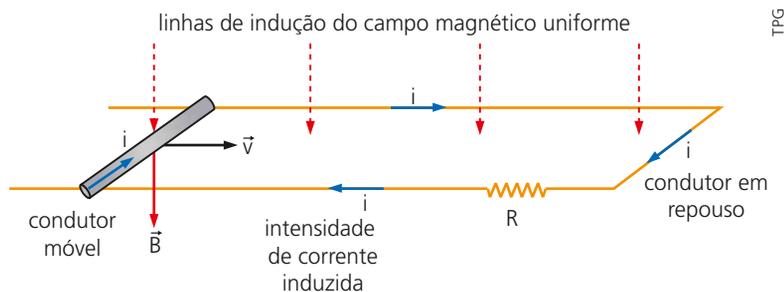
Campo elétrico induzido.

Quando o condutor se movimenta, os seus elétrons ficam sujeitos à ação de uma força magnética  $\vec{F}_m$ . Dessa forma, elétrons livres do condutor deslocam-se para uma de suas extremidades, fazendo com que essa extremidade fique eletrizada negativamente e a outra extremidade seja eletrizada positivamente, devido à falta de elétrons.

Por isso, um campo elétrico de intensidade  $E$  é criado entre essas extremidades, surgindo uma força elétrica  $\vec{F}_e$  sobre outros elétrons livres ao longo do condutor, em sentido oposto ao da força magnética. Com o equilíbrio das forças, obteremos uma diferença de potencial  $U$  entre as duas extremidades, cujo módulo é calculado por  $U = E \cdot d$ , em que a distância  $d$  é igual ao comprimento  $L$  do condutor. Então:  $U = E \cdot L$ .

De que maneira esse fenômeno interfere em circuitos fechados imersos em campos magnéticos? Se montarmos um circuito fechado conectado a um resistor (ou outro dissipador de energia), de modo que uma de suas partes seja um condutor móvel que se desloca a uma velocidade  $\vec{v}$  perpendicular a um campo magnético caracterizado por  $\vec{B}$ , uma corrente elétrica passará a circular no circuito, denominada **corrente induzida**; e como há corrente elétrica induzida, há também uma diferença de potencial a que chamaremos **diferença de potencial induzida**.

Você verá, em algumas situações, que ainda se usa o termo força eletromotriz induzida; lembre-se de que esse termo não é o mais indicado para caracterizar essa grandeza.



Como a força elétrica terá a mesma intensidade da força magnética, temos uma expressão que determina o valor da diferença de potencial induzida  $\mathcal{E}$ :

$$F_e = F_m$$

$$|q| \cdot E = |q| \cdot v \cdot B$$

$$E = v \cdot B$$

$$\frac{U}{L} = v \cdot B$$

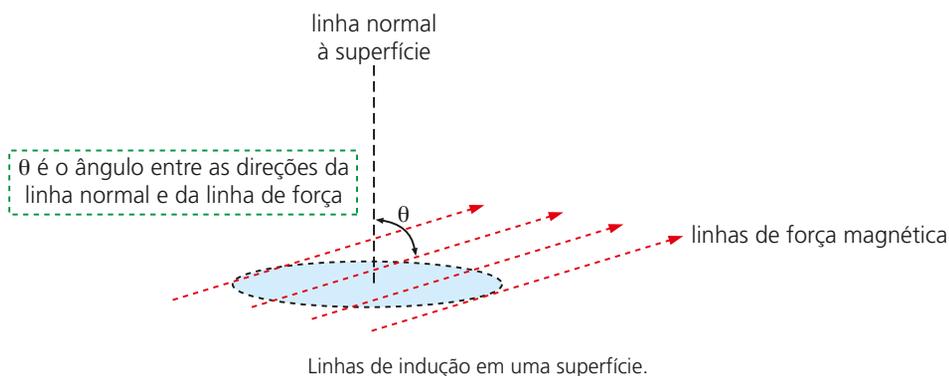
$$\frac{\mathcal{E}}{L} = v \cdot B$$

$$\mathcal{E} = B \cdot L \cdot v$$

Assim, a corrente induzida terá intensidade igual a:  $i = \frac{\mathcal{E}}{R} = \frac{B \cdot L \cdot v}{R}$ , em que  $R$  é a resistência equivalente do circuito.

## Fluxo magnético

Uma maneira de medir a ação do campo magnético sobre uma superfície é definindo uma grandeza física escalar denominada fluxo magnético ou fluxo de indução magnética, cujo símbolo é  $\Phi$  (que é uma letra grega, e lê-se *fi*). Para ilustrar essa grandeza, vamos considerar uma superfície plana de área  $A$ , em um campo magnético cujo vetor indução é  $\vec{B}$ , que forma um ângulo  $\theta$  com a reta normal à superfície.

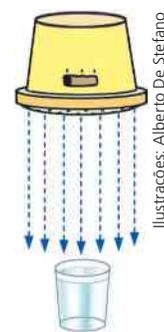


Assim, o fluxo magnético é definido por:  $\Phi = B \cdot A \cdot \cos \theta$ .

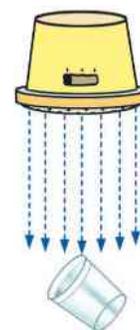
A unidade de medida do fluxo magnético no SI é  $T \cdot m^2$ , também chamada de weber (Wb).

Se o vetor indução  $\vec{B}$  for perpendicular à superfície em estudo (ou paralelo à normal,  $\theta = 0^\circ$ ), o fluxo magnético será máximo, pois  $\cos 0^\circ = 1$ . Se esse ângulo aumentar, então o fluxo será reduzido, pois, para qualquer  $\theta$ ,  $0^\circ < \theta < 180^\circ$  teremos  $\cos \theta < 1$ . Observe também que esse fluxo será anulado quando o ângulo for  $90^\circ$ : esta é a situação em que o vetor indução magnética é paralelo à superfície.

Para entendermos como o fluxo magnético varia com o ângulo formado entre o vetor  $\vec{B}$  e a normal à superfície, podemos recorrer a uma situação física análoga e analisar a velocidade com que um copo é enchido quando colocado embaixo de um chuveiro aberto. Se a boca do copo estiver perpendicular ao trajeto das gotas de água, o volume retido no copo será maior, se comparado a uma situação em que a boca do mesmo copo estiver inclinada em relação à horizontal, durante o mesmo período. Veja as ilustrações ao lado.



Nesta posição, o copo recebe mais água por unidade de tempo.



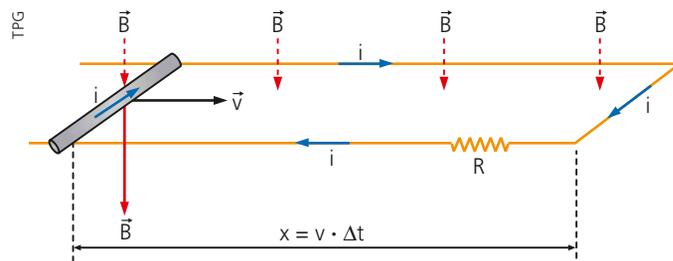
Quanto mais inclinado o copo, menos água por unidade de tempo entrará nele.

## Lei de Faraday ou Lei da Indução Eletromagnética

Experimentalmente, verifica-se que, se, em um circuito elétrico fechado, o fluxo magnético for alterado em um certo intervalo de tempo, surgirá nele uma corrente elétrica induzida.

Foi o que percebeu o físico Michael Faraday. Ele verificou que, variando o campo magnético que permeia um circuito fechado — ou movimentando o próprio circuito em um campo magnético — surge corrente elétrica induzida nesse circuito, cuja intensidade é proporcional à variação temporal do fluxo magnético que atravessa a área ocupada pelo circuito.

Vejam agora de que maneira essas grandezas se relacionam, retomando a expressão  $\Phi = B \cdot A \cdot \cos \theta$  para o caso simples em que  $A$  é a área de um circuito retangular de lados medindo  $L$  e  $x$ , e  $\theta = 0^\circ$ , como se vê na figura a seguir.



Mas, em um intervalo  $\Delta t$ , a medida  $x$  é  $x = v \cdot \Delta t$ , então podemos escrever  $\Delta\Phi = B \cdot \Delta A = B \cdot L \cdot v \cdot \Delta t$ ,

$$\text{e finalmente } \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{B \cdot L \cdot v \cdot \Delta t}{\Delta t} = B \cdot L \cdot v = \mathcal{E}.$$

Portanto, o módulo da diferença de potencial induzida  $\mathcal{E}$  é igual ao módulo da razão  $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ .

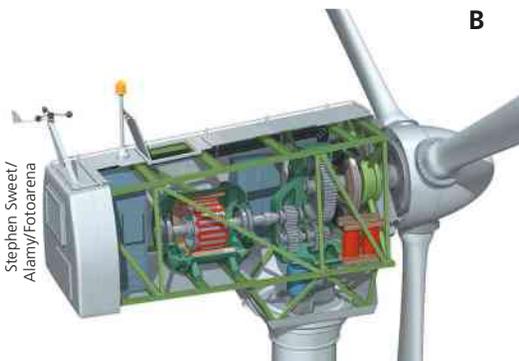
A expressão  $|\mathcal{E}| = \left| \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right|$ , formulada em 1845 por Faraday, é hoje conhecida como **lei de Faraday**, cuja unidade no SI é weber (Wb) por segundo (s) e 1 Wb/s corresponde a 1 V (volt) de ddp induzida.

É importante salientar que o que gera a corrente induzida não é a existência de um fluxo magnético, mas a **variação** desse fluxo. Portanto, se não houver variação do fluxo magnético, não ocorrerá o fenômeno da indução eletromagnética.

A expressão  $\Delta\Phi = B \cdot \Delta A$  também dá indícios de como podemos variar o fluxo: variando o próprio vetor indução magnética ou a área considerada. Essas variações justificam o funcionamento de aparelhos elétricos como o motor de corrente contínua e o gerador.



A



B

Acima vemos dois aparelhos que intercambiam energia mecânica e elétrica. Em A: o motor transforma energia elétrica em energia mecânica; em B: o gerador transforma energia mecânica em elétrica.

## PARA SABER MAIS

### Sites

#### Geradores e alternadores

Cepa é a sigla para Centro de Ensino e Pesquisa Aplicada, ligado ao Instituto de Física da USP. O Cepa oferece uma grande quantidade de materiais didáticos, cursos e outros materiais. Confira o que aprendeu neste capítulo, acesse o *link* e responda à questão.

Disponível em: <[www.cepa.if.usp.br/energia/energia1999/Grupo2B/Hidraulica/alternada.htm](http://www.cepa.if.usp.br/energia/energia1999/Grupo2B/Hidraulica/alternada.htm)> e em <[www.cepa.if.usp.br/walterfendt/phbr/generator\\_e\\_br.htm](http://www.cepa.if.usp.br/walterfendt/phbr/generator_e_br.htm)>. Acesso em: 31 mar. 2016.

Como funciona um gerador de corrente alternada?

Disponível em: <[www.cepa.if.usp.br/energia/energia1999/Grupo2B/Hidraulica/continua.htm](http://www.cepa.if.usp.br/energia/energia1999/Grupo2B/Hidraulica/continua.htm)>. Acesso em: 31 mar. 2016.

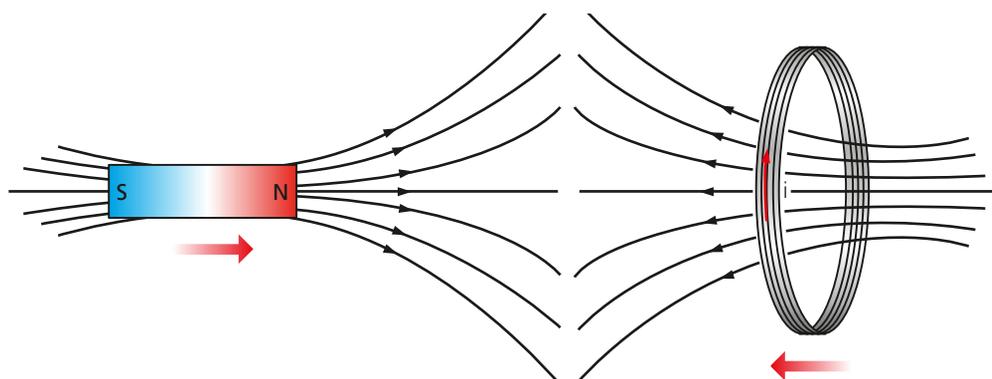
Como funciona o gerador de corrente contínua e o comutador?

## Lei de Lenz

O físico alemão Heinrich Lenz (1804-1895) contribuiu com a compreensão do fenômeno da indução. A lei que leva o seu nome ajuda a determinar o sentido da corrente elétrica induzida, complementando a lei de Faraday, que permite determinar apenas a intensidade da ddp induzida. Com suas pesquisas, Lenz concluiu que a corrente elétrica induzida é criada de modo que seu efeito compense a variação do campo magnético gerado por essa corrente.

Quando se reduz a intensidade do campo magnético original que atua em um circuito, surgirá um campo magnético gerado pela corrente induzida na mesma direção e sentido do campo magnético original, a fim de se opor à diminuição. Mas, se a intensidade do campo magnético (original) aumentar, o campo magnético gerado pela corrente induzida terá sentido oposto ao do campo original, para se opor ao aumento.

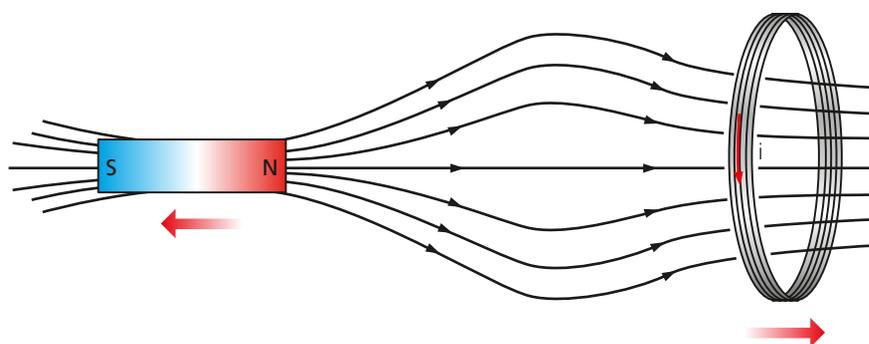
Então, quando um ímã se aproxima de uma espira, isso provoca uma variação de fluxo magnético através dessa espira, originando uma ddp e uma corrente induzida, que deverá produzir um fluxo magnético induzido em oposição à variação de fluxo que a induziu. Assim, o campo magnético induzido fará oposição à aproximação do ímã:



Ilustrações: TFG

Ímã se aproximando de uma espira. O campo magnético induzido se opõe à aproximação do ímã.

E quando o ímã se afastar, o campo magnético induzido fará oposição ao afastamento do ímã:



Ímã se afastando de uma espira. O campo magnético induzido se opõe ao afastamento do ímã.

Com relação à expressão de Faraday  $|\mathcal{E}| = \frac{|\Delta\Phi|}{\Delta t}$ , a lei de Lenz agrega um sinal negativo para denotar a natureza de oposição. Assim, passaremos a escrever:

$$\mathcal{E} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Perceba que as observações de Lenz estão de acordo com o princípio de conservação de energia. De onde vem a energia que produz a corrente elétrica? Para induzir corrente, é necessário consumir energia, que vem do trabalho de se variar a posição do ímã em relação ao condutor.

## Exercício resolvido

**ER1.** Um condutor retilíneo, de comprimento  $L$ , é imerso num campo magnético uniforme. Qual é a condição para que uma corrente elétrica seja induzida nesse condutor? Suponha que o condutor seja parte de um circuito fechado.

### Resolução:

Haverá circulação de corrente induzida somente quando houver **um movimento relativo** entre o **condutor** e as **linhas de indução** do campo magnético.

### PARA SABER MAIS

#### Site

#### Simulador da lei de Lenz

Disponível em: <[http://phet.colorado.edu/sims/faradays-law/faradays-law\\_pt.html](http://phet.colorado.edu/sims/faradays-law/faradays-law_pt.html)>. Acesso em: 11 fev. 2016.

Na Atividade Prática abaixo você terá a oportunidade de testar a lei de Lenz através de um experimento bem simples de se fazer.

No entanto, caso você queira testar antes essa lei para ver qual o resultado esperado, você pode simulá-la no computador com esse aplicativo.

### ATIVIDADE PRÁTICA



## Fabricando um sinalizador com a lei de Lenz

Vimos até agora que o campo magnético interage com o campo elétrico. Um fio percorrido por corrente gera um campo magnético à sua volta, e um ímã em movimento induz corrente elétrica num circuito próximo a ele.



Com base nesses princípios de indução eletromagnética, vamos montar um dispositivo em que esses fenômenos são observados: um “sinalizador”, no qual um LED é aceso sempre que o aparelho é agitado.

Ao final, esperamos que vocês compreendam melhor a indução eletromagnética e sua relação com os fenômenos que nos cercam.

### Material

- um pedaço de papel-cartão do tamanho de uma folha sulfite A4 (21 cm x 29,7 cm)
- fita adesiva (isolante)
- cola
- régua
- três ímãs de neodímio de 22 mm x 10 mm (ver imagem)
- lápis
- borracha
- tesoura sem ponta
- 50 cm de fio de cobre (número entre 30 e 35 [AWG] 0,20 e 0,15 mm)
- uma lâmpada de LED (NCM: 8541.40.22) (ver imagem)



Ímã de neodímio.

Fernando Favoretto/Criar Imagem

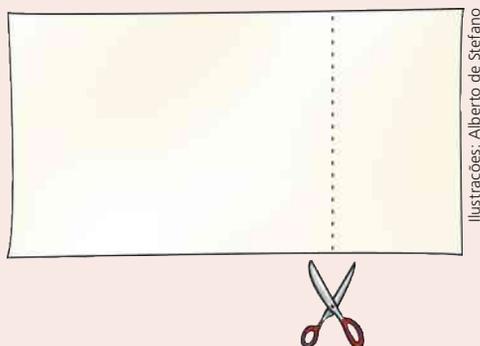


Lâmpada de LED.

Martyn F. Chillmaid/SPL/Latinstock

## Procedimento

- I. No pedaço de papel-cartão, na posição horizontal, meçam a partir de uma de suas extremidades 8 cm (veja a figura); tracem uma linha com lápis e cortem o papel. Reservem o pedaço menor de papel-cartão e cortem-no em dois pedaços para tampar as extremidades do tubo.



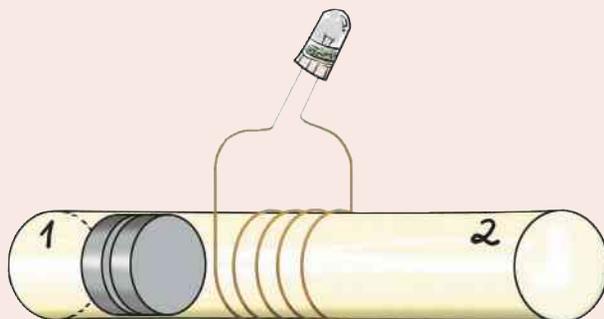
- II. Enrolem o pedaço maior de papel-cartão até que vire um cilindro (com um diâmetro de aproximadamente o tamanho de uma moeda de 5 centavos), de maneira que caibam os ímãs de neodímio. Usem a cola para garantir que o papel não desenrole. Em uma ponta do cilindro, escrevam o número 1 e, na outra, o número 2. Veja a figura:



- III. Façam uma tampa com a sobra do papel-cartão e fechem uma das extremidades do cilindro. Na extremidade que ficou aberta, coloquem os ímãs de neodímio. Façam mais uma tampa para fechar a outra extremidade.

Obs.: Dividam ao meio a sobra do papel-cartão para garantir o fechamento da outra extremidade.

- IV. Peguem o fio e desencapem 1 cm em cada ponta até que apareça o cobre. Enrolem o fio no cilindro de forma a deixar um bem rente ao outro (como em uma mola), até completar 2 cm de espiral sobre a superfície, e encaixem as pontas do fio nos dois terminais do diodo emissor (LED).



- V. Para garantir que as tampas de cada extremidade do cilindro não abrião, utilizem a fita isolante para adesão completa.

- VI. Pronto! Quando vocês deixarem cair o ímã, chacoalhando o cilindro, o LED acenderá.

## Discussão

1. Por que o LED acende?
2. Quando o ímã vai de 1 para 2, qual é o sentido da corrente estabelecida?
3. A intensidade da luz depende da velocidade com que os ímãs passam pela espira?
4. O que é preciso fazer para que a luz fique acesa constantemente?

Ver Orientações Didáticas.

## OUTRAS PALAVRAS

FAÇA NO CADERNO NÃO ESCREVA NO LIVRO

## Duas aplicações da indução eletromagnética

Rereko é uma menina com dificuldades em aprender eletricidade e conta com a ajuda do prof. Hikaru para ter um bom desempenho em uma prova de recuperação. Essa é a motivação do *Guia mangá de eletricidade*, escrito pelo engenheiro Kazuhiro Fujitaki, com ilustrações de Matsuda. Veja com a garota Rereko como funcionam o motor e o gerador.

### Motor de corrente contínua

Chamamos de corrente contínua a corrente que flui em um único sentido. Você já sabe que, se fizermos uma corrente contínua fluir em um circuito fechado imerso em uma região de campo magnético, pode haver forças que agem sobre os condutores. Que tal se fizermos essas forças girarem o condutor?

**REGRA DA MÃO ESQUERDA DE FLEMING (PARA MOTORES CC)**

PROFESSOR HIKARU!! É CLARO!

VOCE ESTÁ ATIRANDO PAPEL, TESOURAS, E PEDRAS! ISSO É IMBATIVEL!

REREKO, VOCÊ SABE O QUE ISTO SIGNIFICA?

NÃO... EU NÃO QUIS DIZER O JOGO DE PEDRAS, PAPEL E TESOURAS.

SE UM CONDUTOR FOR COLOCADO EM UM CAMPO MAGNÉTICO E PASSAR CORRENTE, UMA FORÇA É EXERCIDA SOBRE O CONDUTOR QUE SE MOVIMENTA CONFORME A REGRA DA MÃO ESQUERDA DE FLEMING.

QUANDO A SUA MÃO ESQUERDA É COLOCADA DESTA FORMA...

O CONDUTOR SE MOVIMENTA NESTA DIREÇÃO

O CAMPO MAGNÉTICO APONTA DE NORTE PARA SUL NESTA DIREÇÃO

A CORRENTE FLETA NESTA DIREÇÃO

ESSA REGRA DIZ QUE O DEDO INDICADOR APONTA NA DIREÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO (O PARA S), O DEDO MEIO APONTA NA DIREÇÃO EM QUE A CORRENTE SE MOVIMENTA, E O CONDUTOR SE MOVIMENTA NA DIREÇÃO INDICADA PELO POLGAR, COMO RESULTADO DA FORÇA QUE AGE NA MESMA DIREÇÃO.

FORÇA (MOVIMENTO) CAMPO MAGNÉTICO CONDUTOR FORÇA CORRENTE CAMPO MAGNÉTICO CORRENTE

QUANDO PASSA CORRENTE EM UM CONDUTOR COLOCADO ENTRE OS POLOS NORTE (N) E SUL (S) DE UM CAMPO MAGNÉTICO, O CONDUTOR RECEBE IMPULSO PARA CIMA.

UM MOTOR CC GIRA USANDO ESSA FORÇA.

ESSE É REALMENTE UM JEITO FÁCIL DE LEMBRAR A REGRA!

SERÁ QUE VOCÊ PODE USAR A REGRA DA MÃO ESQUERDA DE FLEMING PARA VER POR QUE UM MOTOR CC GIRA PRIMEIRO, CONSIDERE O LADO ESQUERDO DO ANEL - A CORRENTE ESTÁ ENTRANDO NA PILHA, LEVANDO A FORÇA DO ANEL PARA CIMA. NO LADO DIREITO DO ANEL, A CORRENTE ESTÁ SAINDO DA PILHA, CRIANDO UMA FORÇA PARA BAIXO.

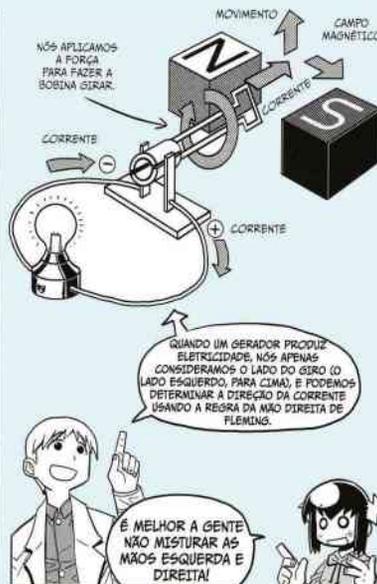
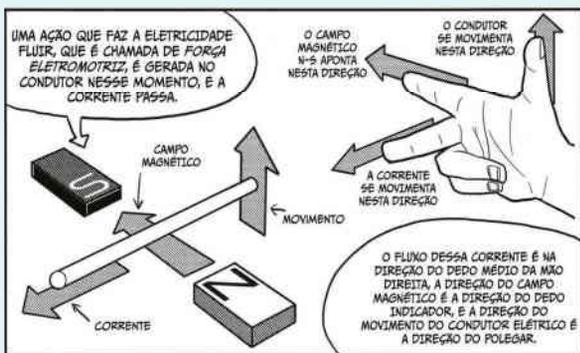
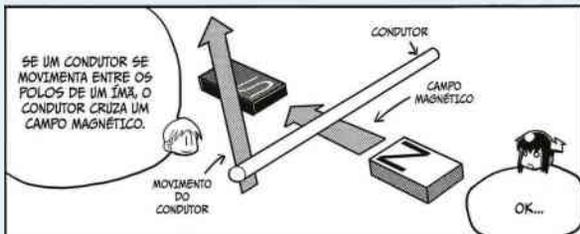
O ANEL VAI CONTINUAR VIRANDO NESTA DIREÇÃO POIS O CONTATO TROCA QUANDO O ANEL FICA NA VERTICAL, O QUE SIGNIFICA QUE A DIREÇÃO DAS FORÇAS NÃO VAI MUDAR.

Mangá de Wakaru Denki

FUJITAKI, Kazuhiro. *Guia mangá de eletricidade*, Novatec Editora em parceria com a Ohmsha, Ltd. e No Starch Press, Inc., 2010, p. 88-89.

## Gerador

Nesta montagem, precisamos garantir o movimento da espira (por meio de uma manivela, por exemplo). Dessa forma, uma corrente induzida aparece na espira.



FUJITAKI, Kazuhiro. *Guia mangá de eletricidade*, Novatec Editora em parceria com a Ohmsha, Ltd. e No Starch Press, Inc., 2010, p. 100-101.

## Organizando as ideias do texto

1. O que acontece com a força no momento em que a espira está na vertical?
2. Observe o sentido da corrente induzida no gerador. Ela é produzida sempre no mesmo sentido?
3. Observe que a função do comutador é trocar a polaridade dos contatos a cada meia volta da espira. O que aconteceria com a corrente na espira do gerador se em lugar do comutador houvesse um contato simples?

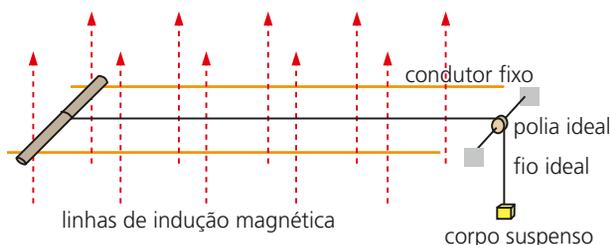
Professor, veja [Orientações Didáticas](#).

## Exercícios propostos

FAÇA NO CADERNO NÃO ESCREVA NO LIVRO

O enunciado a seguir é referente às questões de EP1 a EP4.

Um condutor retilíneo, em posição horizontal, move-se com a velocidade de 0,4 m/s, sem atritos, sobre dois condutores fixos, retos e paralelos, cuja distância entre si é de 20 cm. O condutor móvel tem movimento uniforme graças à tração exercida por um fio ideal, conforme mostra a figura.



TPG

O conjunto todo é imerso num campo magnético uniforme, de intensidade igual a 2 T. Os condutores fixos não têm resistência considerável, mas o condutor móvel, de secção transversal com  $0,05 \text{ cm}^2$  de área, tem resistividade igual  $1,2 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ .

**EP1.** Por que a manutenção do movimento uniforme do condutor móvel necessita de um corpo suspenso no fio?  
Resposta nas Orientações Didáticas.

**EP2.** Determine o módulo da força eletromotriz, entre as extremidades do condutor móvel.  $0,16 \text{ V}$

**EP3.** Calcule a intensidade da corrente elétrica induzida.  $\cong 0,33 \text{ A}$

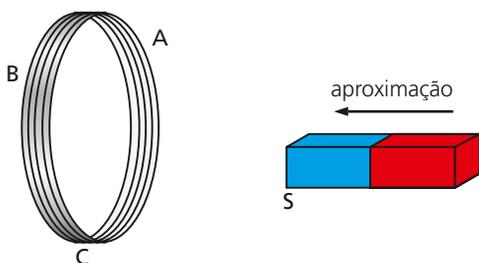
**EP4.** Qual é a massa (em gramas) do corpo suspenso, sendo  $g = 10 \text{ m/s}^2$ ?  $\cong 13,2 \text{ g}$

**EP5.** Quais são as afirmativas corretas dentre as apresentadas a seguir?

- I. A variação do fluxo magnético pode ser obtida através da variação da intensidade do campo magnético produzida por movimento relativo entre a fonte do campo e o circuito.
- II. A variação do fluxo magnético pode ser obtida através da variação da área da superfície delimitada pelo circuito.
- III. A variação do fluxo magnético também pode ser obtida através da variação do ângulo entre as linhas de força magnética e a linha normal à superfície delimitada pelo circuito.

Todas estão corretas.

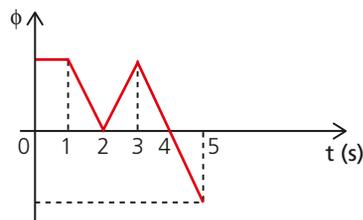
**EP6.** Determine o sentido da corrente induzida na espira, na situação mostrada pela figura:



- a) sentido  $A \rightarrow C \rightarrow B$  X
- b) sentido  $A \rightarrow B \rightarrow C$
- c) sentido  $B \rightarrow C \rightarrow A$
- d) sentido  $C \rightarrow A \rightarrow B$
- e) sentido qualquer

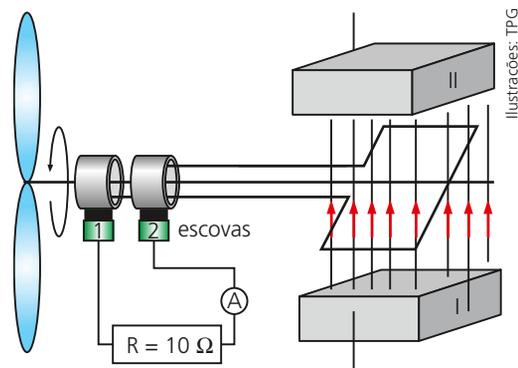
**EP7.** O diagrama a seguir registra os valores do fluxo magnético através de um aro metálico em função do

tempo. Em que intervalo de tempo não ocorre o fenômeno da indução de corrente elétrica no aro?



No intervalo de 0 a 1 s.

**EP8.** (UnB-DF)



A figura acima apresenta os elementos básicos de um gerador de eletricidade ligado a uma hélice: uma espira retangular que gira entre as peças polares de um ímã. A energia elétrica gerada é coletada por escovas conectadas a um resistor de  $10 \Omega$  em série com um amperímetro. Considerando as informações acima, julgue os itens a seguir.

- F a) Com base nas linhas de campo magnético mostradas na figura, é correto associar a peça polar indicada por I ao polo sul magnético.
- V b) Quando a espira estiver perpendicular às linhas de campo magnético, o fluxo de linhas magnéticas através dela será máximo.
- F c) Haverá diferença de potencial elétrico induzido não nulo no resistor  $R$  somente quando a espira estiver perpendicular às linhas de campo magnético.
- F d) Com base na figura, é correto inferir que a corrente induzida medida no amperímetro é contínua.

**EP9.** A partir da questão anterior, responda:

- a) qual é o sentido da corrente elétrica na espira retangular, no instante da configuração mostrada pela figura? Sentido anti-horário.
- b) qual é o sentido da corrente elétrica que passa pelo resistor de  $10 \Omega$ ? Sentido da direita para a esquerda.

# Corrente alternada

No capítulo 15, vimos que, se houver uma variação de fluxo magnético em um circuito elétrico fechado, surge nesse circuito uma corrente elétrica induzida, cuja intensidade é variável com o tempo. Contudo, dependendo do dispositivo utilizado, é possível gerar dois tipos de corrente elétrica: a corrente elétrica contínua e a alternada. Que diferenças existem entre essas correntes?

Ao contrário da corrente contínua, em que os elétrons se movimentam num único sentido e com intensidade constante, na corrente alternada o sentido de movimentação dos elétrons é invertido constantemente, portanto a sua intensidade também varia. Mais adiante, veremos como ocorre a inversão no sentido da corrente induzida.

A corrente alternada é mais comumente gerada com frequência de 60 Hz, ou seja, a inversão de sentido ocorre 60 vezes por segundo (como a produzida no Brasil e nos Estados Unidos) e de 50 Hz (como na Europa, parte da América do Sul e no Japão).

As duas formas de corrente estão presentes em nosso cotidiano. Circuitos elétricos de automóveis, circuitos internos de computadores, rádios de pilhas e telefones são exemplos de circuitos que funcionam com corrente contínua.

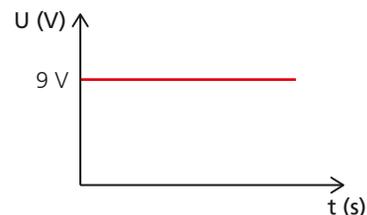
No entanto, qualquer aparelho elétrico ligado à rede elétrica pública é alimentado com corrente alternada. Repare que no circuito não se usa necessariamente a corrente alternada; muitos aparelhos convertem-na para corrente contínua e vice-versa.

A diferença básica entre os dois tipos de corrente está no tipo de tensão elétrica associada a cada uma delas. Se a corrente elétrica for contínua, a tensão gerada será constante e, se a corrente elétrica for alternada, a tensão gerada será variável no tempo.

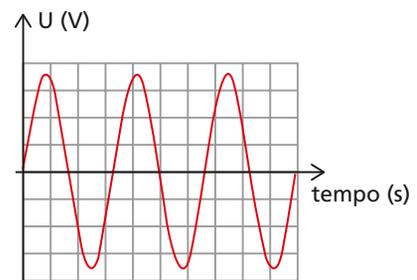


Thinkstock/Getty Images

A bateria de 9 V alimenta circuitos elétricos como telefones, brinquedos, rádios controlados etc. com corrente contínua e mantém a tensão nesse circuito constante.



Quando a corrente elétrica é contínua, a tensão gerada é constante.



Quando a corrente elétrica é alternada, a tensão gerada é variável no tempo. Qualquer aparelho elétrico ligado à rede elétrica é alimentado com uma corrente alternada.



Geração, transmissão e distribuição de energia elétrica em uma usina hidrelétrica. Imagem com elementos sem proporção entre si e em cores fantasias.

Mas, quando pensamos na produção, transmissão e distribuição dessa energia até os consumidores finais (residenciais e industriais), a utilização da corrente alternada é a mais viável, tanto em termos técnicos, quanto em termos econômicos.

Para a produção de energia, os geradores de corrente alternada são mais baratos. Para diminuir perdas, a energia deve ser transmitida com baixa intensidade de corrente e, para isso, elevam-se as tensões de transmissão em até 440 kV, utilizando transformadores. Essas transformações podem ser feitas com muito mais facilidade e com menor custo utilizando as correntes alternadas. Para distribuir a energia elétrica até os consumidores finais é necessário rebaixar as tensões para 110 V ou 220 V, que com o uso de transformadores, privilegia o uso da corrente alternada.

Entretanto, como a transmissão por corrente contínua utiliza dois cabos (bifásico) e a transmissão por corrente alternada utiliza três cabos (trifásico), o custo de transmissão da energia elétrica por corrente contínua se torna mais viável para longas distâncias (acima de 800 km), mesmo sendo maiores os custos de transformação (aumento e redução das tensões).



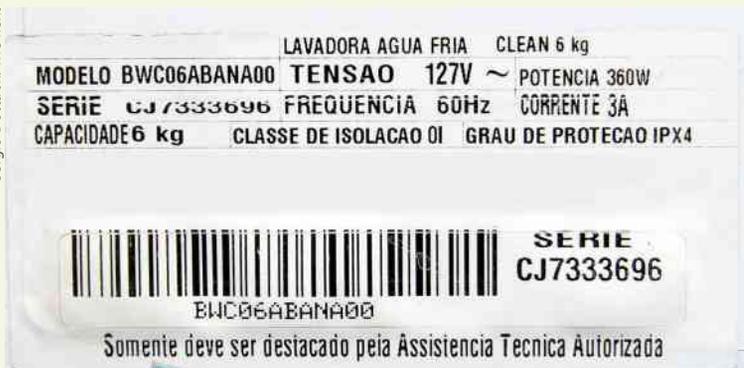
Dellim Martins/Pulsar Imagens

A transmissão de energia elétrica, em altas potências e ligando grandes centros, necessita de torres, isoladores, cabos e subestações. Nos centros urbanos, a transmissão passa a ser uma questão de distribuição. Fotografia de Rondonópolis (MT).

## A FÍSICA NO COTIDIANO

### Você sabe o que está comprando?

Sergio Dotta Jr./The next



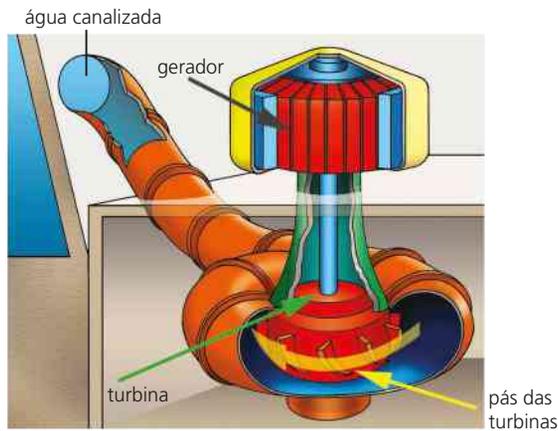
Energia (Elétrica)		LAVADORA AUTOMÁTICA
Fabricante	Marca	CWC 10A/127
Modelo/tensão (V)		
Mais eficiente	A B C D E	<b>A</b>
Menos eficiente		
CONSUMO DE ENERGIA (kWh/ciclo) (Programa de lavagem normal - água fria)		<b>0,31</b>
Eficiência de lavagem		<b>0,88</b>
Melhor 0,99		Pior 0,65
Eficiência de centrifugação	A B C D E	<b>A B C D E</b>
A: melhor E: pior		
Capacidade de lavagem (kg)		<b>10,0</b>
Consumo de água (litro/ciclo)		<b>135</b>
<small>Programa Nacional de Etiquetagem de Energia Elétrica            Instruções de instalação e recomendações de uso, veja o Manual de Instruções.  <b>PROCEL</b> PROGRAMA NACIONAL DE ETIQUETAGEM DE ENERGIA ELÉTRICA  <b>INMETRO</b> INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA  <b>IMPORTANTE: A REMOÇÃO DESTA ETIQUETA ANTES DA VENDA ESTÁ EM DESACÓRDO COM O CÓDIGO DE DEFESA DO CONSUMIDOR.</b> </small>		

Fernando Favoretto/Criar Imagem

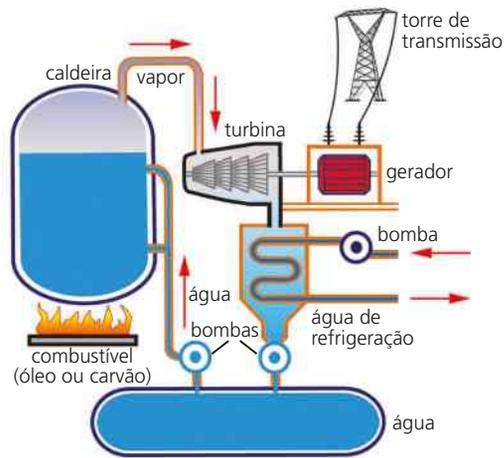
A etiqueta de especificações de um eletrodoméstico (esq.) deve indicar, entre outras informações, a tensão elétrica em corrente alternada de 60 Hz. O Inmetro (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia) controla o Programa Brasileiro de Etiquetagem, que determina que produtos apresentem etiquetas informativas (dir.) com o objetivo de alertar o consumidor quanto à eficiência energética de alguns dos principais eletrodomésticos nacionais. As imagens acima mostram as especificações e a eficiência energética de duas máquinas de lavar.

# A corrente alternada e o transformador elétrico

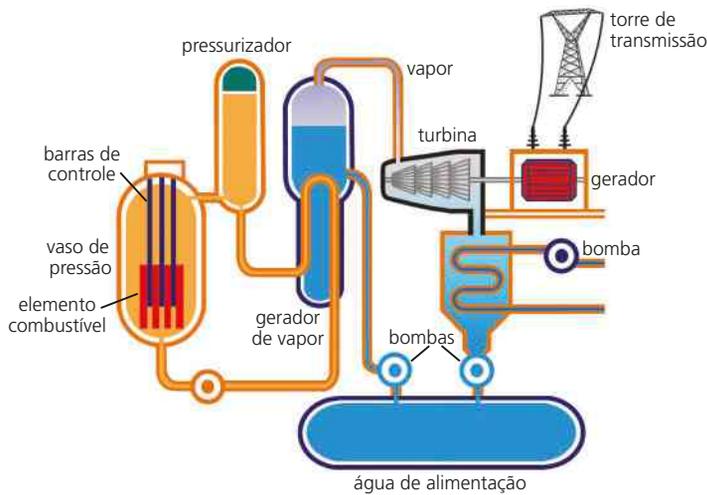
A corrente alternada é gerada obedecendo aos princípios da indução eletromagnética. Assim, seja em uma usina hidrelétrica, termelétrica, nuclear ou em um aerogerador, um gerador elétrico, cujo eixo gira devido à movimentação de uma turbina acoplada a ele, converte energia mecânica em energia elétrica.



Esquema de gerador elétrico de uma hidrelétrica.



Esquema de central termelétrica.



Esquema de central nuclear.



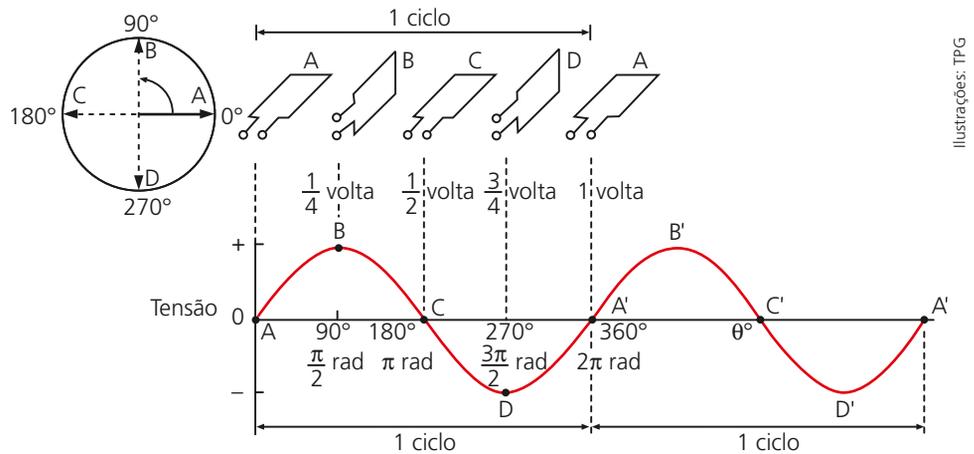
Parque gerador de energia eólica. Compare com o tamanho do caminhão: cada aerogerador tem mais de 100 m de altura.

Ilustrações: Rafael Herrera

No caso da hidrelétrica, a turbina é movimentada aproveitando a energia cinética das águas canalizadas até ela. Na termelétrica e na nuclear, a turbina é movimentada pela expansão dos vapores-d'água; a diferença está na matéria-prima utilizada para ferver a água. Na termelétrica, o calor é gerado pela queima de combustíveis fósseis e, na nuclear, o calor é gerado pela fissão dos átomos de urânio. No aproveitamento da energia eólica, as turbinas (aerogeradores) são movimentadas pela força dos ventos.

Assim, seja qual for a matéria-prima utilizada para a movimentação das turbinas, esse movimento de rotação é transmitido ao gerador. Dentro do gerador, as espiras que estão imersas em campos magnéticos giram, induzindo correntes elétricas. Dependendo da posição das espiras, a intensidade da corrente induzida aumenta, diminui e o seu sentido é invertido. Em seguida, o ciclo é iniciado novamente, dando origem à corrente alternada.

Daí, verifica-se que a intensidade da corrente alternada varia no tempo de acordo com uma função senoidal.



Ilustrações: TPG

Quando a espira gira, a tensão e a corrente induzida variam de intensidade e sentido, e, após uma rotação da espira, completa-se um ciclo de variações.

No diagrama  $i \times t$ , temos  $T$  indicando o período da função, ou seja, o tempo necessário para se completar um ciclo, em que  $T = \frac{1}{f}$ .

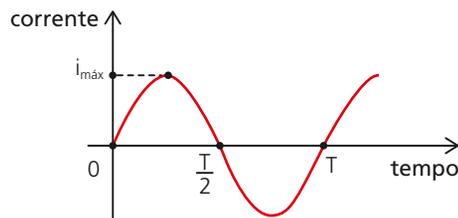


Diagrama representando o período.

Esse princípio de geração é o mesmo idealizado por Nikola Tesla (1856-1943), cujos geradores construídos são muito parecidos com os de hoje.

O gerador de Tesla era constituído por um núcleo de ferro enrolado com fios de cobre, um rotor, que rotacionava no interior de um campo magnético intenso, movimentado por uma turbina em uma queda-d'água ou por vapor. Nesse rotor são acopladas as espiras que rotacionam devido ao campo magnético criado por um eletroímã, produzindo, assim, voltagem e corrente alternada.



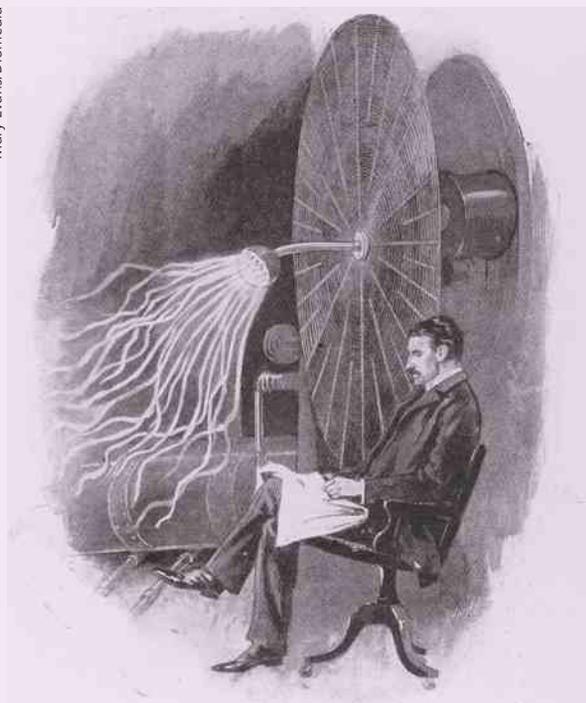
## Tesla × Edison: a Guerra das Correntes

Nikola Tesla foi o grande incentivador da corrente alternada. Nasceu na Croácia, estudou Matemática e Física na Escola Politécnica de Graz, na Áustria, e Filosofia na Universidade de Praga, na República Tcheca. Trabalhou como engenheiro elétrico na Hungria, França e Alemanha. Por seus experimentos com motores de indução com corrente alternada, Tesla tornou possíveis a transmissão e a distribuição a longas distâncias.

Quando se mudou para os Estados Unidos em 1884, ele trabalhou para o famoso inventor e homem de negócios Thomas Edison (o inventor da lâmpada incandescente), que já havia patenteado e tinha tornado a corrente contínua como padrão nos Estados Unidos.

Logo, os dois se tornaram grandes rivais. Tesla, então, fez uma parceria com George Westinghouse (o mesmo Westinghouse dos equipamentos elétricos), um grande empresário norte-americano, que comprou com antecedência os direitos das patentes do sistema polifásico de Tesla e passou a comercializá-lo.

Mary Evans/Diomedea



Nikola Tesla (1856-1943) em seu laboratório em Colorado Springs, Estados Unidos, em 1900.

A disputa entre Tesla-George Westinghouse e Thomas Edison nas duas últimas décadas do século XIX ficou conhecida na história como a Guerra das Correntes. Edison lançou uma grande campanha publicitária pela utilização da corrente contínua para distribuição de ele-

tricidade, contrapondo-se à corrente alternada, defendida por Westinghouse e Tesla. As propagandas de Edison consistiam na divulgação de notícias com acidentes fatais, visando desestimular o uso da corrente alternada; citava até o fato de que, mesmo sendo contra a pena de morte, Tesla teria participação indireta na primeira morte em cadeira elétrica, por ter sido feita com corrente alternada.

Edison utilizava esse mote porque, quando a distribuição de corrente contínua foi instituída nos Estados Unidos, todo o sistema operava sob tensão de 100 V. Esse nível de tensão foi escolhido devido à facilidade de fabricar lâmpadas que forneciam iluminação e tinham um desempenho econômico similar à iluminação a gás, que na época estava sendo substituída. Além disso, sabia-se que 100 V não constituía um risco grave de eletrocussão. Entretanto, a queda de tensão devida à resistência dos condutores do sistema era um fato comum e, por isso, as usinas geradoras deveriam se localizar por volta de 2 km dos centros de consumo, o que era um grande inconveniente. Sabia-se que, de modo geral, para uma determinada quantidade de energia conduzida, era necessário elevar a tensão na rede. Naquela época, não havia tecnologia de baixo custo para fazer essa conversão em corrente contínua, mas em um sistema de corrente alternada, o uso de transformadores de tensão era técnica e economicamente viável. Assim, os transformadores permitiam que a energia fosse transmitida sob tensões muito mais elevadas. Como o comprimento máximo de uma linha de transmissão, dados o diâmetro do fio e a queda de tensão admissível, aumenta aproximadamente com o quadrado da tensão de distribuição, as usinas poderiam cobrir uma área de consumo muito maior. E, assim, Nikola Tesla venceu a Guerra das Correntes.

Essa rivalidade, no início, talvez tenha sido alimentada por questões econômicas e até por sentimentos pessoais. Mas o fato é que, para entender o mecanismo da corrente alternada era necessário um bom conhecimento de Matemática e Física, e Tesla os possuía. Edison, apesar de ser um experimentador, não tinha o conhecimento matemático necessário.

Entre outras descobertas, Tesla colaborou para o desenvolvimento do rádio. Ganhou muito dinheiro, mas morreu com poucos recursos, sem ver seu sonho de distribuir energia gratuita para todos realizado.

## Usina hidrelétrica de Itaipu

Delifim Martins/Pulsar Imagens

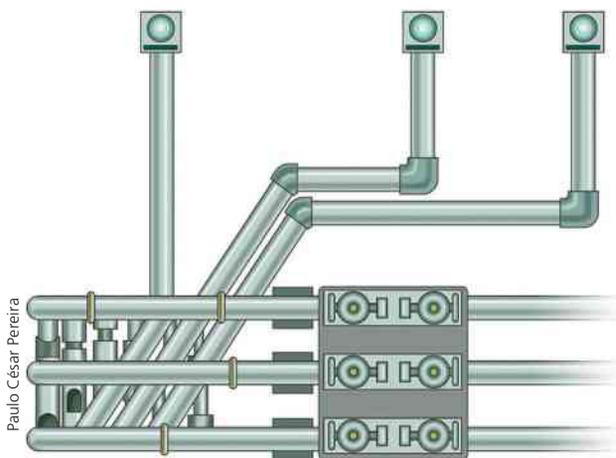


Usina hidrelétrica de Itaipu.

### Unidades geradoras

Existem 20 unidades geradoras, sendo dez na frequência da rede elétrica paraguaia (50 Hz) e dez na frequência da rede elétrica brasileira (60 Hz). As unidades de 50 Hz têm potência nominal de 823,6 MVA, fator de potência de 0,85 e 3 343 toneladas. As unidades de 60 Hz têm potência nominal de 737,0 MVA, fator de potência de 0,95 e 3 242 toneladas. Todas as unidades têm tensão nominal de 18 kV.

As turbinas têm potência nominal de 715 MW e vazão nominal de 645 metros cúbicos de água por segundo.



Paulo César Pereira

A usina hidrelétrica de Itaipu foi instalada no rio Paraná, na fronteira entre o Brasil e o Paraguai. A obra começou em 1974, terminando em 1982 com a construção de uma barragem de mais de 7 km de extensão e um lago com área de 1 350 km<sup>2</sup>, pertencente a 16 municípios brasileiros e outra área no Paraguai. Itaipu Binacional é a empresa que gerencia a usina.

### Dados sobre os geradores

Quantidade	20 unidades
Geradores em frequência 60 Hz	10 unidades
Geradores em frequência 50 Hz	10 unidades
Potência nominal 50/60 Hz	823,6 a 737,0 MVA
Tensão nominal	18 kV
Peça mais pesada – rotor	1 760 t
Peso de cada unidade 50/60 Hz	3 343/3 242 t

### Dados sobre as turbinas

Quantidade	20 unidades
Potência nominal unitária	715 MW
Velocidade de projeto – 50/60 Hz	90,9/92,3 rpm
Queda líquida de projeto	118,4 m
Vazão nominal unitária	645 m <sup>3</sup> /s
Peça indivisível mais pesada – rotor	296 t
Peso de cada unidade	3 360 t

Fonte das tabelas: *Itaipu Binacional*. Unidades geradoras. Disponível em: <[www.itaipu.gov.br/energia/unidades-geradoras](http://www.itaipu.gov.br/energia/unidades-geradoras)>. Acesso em: 9 fev. 2016.

A subestação da usina é blindada em gás de hexafluoreto de enxofre (SF<sub>6</sub>), que permite uma grande compactação do projeto. Para cada grupo gerador existe um banco de transformadores monofásicos, elevando a tensão de 18 kV para 500 kV.

Fernando Favoretto/Criar Imagem



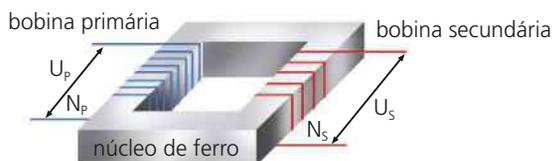
## Os transformadores

Para que os consumidores residenciais possam utilizar a energia elétrica distribuída pelas concessionárias, a tensão elétrica deve ser rebaixada para intensidades que os aparelhos eletrodomésticos possam suportar. O equipamento que tem essa função é o transformador.

Um transformador, portanto, é um dispositivo elétrico que opera com correntes alternadas e transmite a energia elétrica de um circuito para outro, modificando a tensão. Ele funciona seguindo os princípios da indução eletromagnética.

Dependendo dos detalhes, como número de espiras enroladas em cada bobina, um transformador pode aumentar ou reduzir a tensão de entrada.

Esse aparelho é composto basicamente de um núcleo de ferro, envolto por fios enrolados: de um lado (bobina primária) é ligado ao circuito que fornece a energia elétrica e, de outro (bobina secundária), a um segundo circuito que consome a energia.



Esquema de um transformador.

Luis Moura

A variação de fluxo magnético em torno da bobina primária produz a indução de corrente alternada na bobina secundária. Em caso ideal, a energia fornecida pelo circuito primário é igual à energia transmitida ao circuito secundário:

$$E_p = E_s \text{ ou } P_p \cdot \Delta t = P_s \cdot \Delta t \Rightarrow P_p = P_s \Rightarrow U_p \cdot i_p = U_s \cdot i_s$$

A transformação da tensão ou ddp (U) pode ser calculada, em caso ideal, por regra de três, onde  $N_p$  é o número de espiras na bobina primária e  $N_s$  é o número de espiras na bobina secundária:

$$\frac{U_p}{U_s} = \frac{N_p}{N_s}$$

Por exemplo, se a rede elétrica fornecer energia sob tensão de 220 V e um transformador fizer a conversão para 110 V, a razão entre os números de espiras na bobina primária e na secundária deve ser de:  $\frac{N_p}{N_s} = \frac{220}{110} = 2$ . Isso é o que acontece em transformadores pequenos para aparelhos residenciais em cidades onde a tensão na rede é de 220 V e precisa alimentar um equipamento que funciona a 110 V, ou vice-versa.



Sérgio Dotta Jr./The next

Transformador elétrico para potências relativamente baixas.

## A FÍSICA NO COTIDIANO

### Cuidados com a alta tensão

Caso você encontre sinalizações como as mostradas ao lado, tome bastante cuidado e se afaste do local. As altas tensões podem causar acidentes graves, se os equipamentos não forem utilizados corretamente.

O Instituto de Eletrotécnica e Energia (IEE), da Universidade de São Paulo, que tem por objetivo a pesquisa avançada na área de energia elétrica, define alta tensão como qualquer tensão elétrica em corrente alternada acima de 1 000 V.



Fotografias: Thinkstock/Getty Images

Placas de alerta sobre o perigo da alta tensão.

O Comitê Internacional de Eletrotécnica define alta tensão como sendo uma tensão maior que 1 000 V, baixa tensão como sendo entre 50 V e 1 000 V e extra-baixa tensão (EBT) como sendo abaixo de 50 V.

Em transmissões de energia elétrica, utilizam-se as expressões extra-alta tensão (EAT ou EHV) para tensões entre 138 kV a 800 kV, e ultra-alta tensão (UAT ou

UHV) para tensões superiores (usualmente 1 000 kV ou 1 MV).

De acordo com a Norma Regulamentadora número 10 (NR 10) do Ministério do Trabalho e Emprego do Brasil, são consideradas de alta tensão as instalações em corrente contínua com valores superiores a 1 500 V.

## Exercícios resolvidos

**ER1.** Quando qualquer aparelho é ligado em uma tomada, seja em 110 V ou 220 V, ele é alimentado com uma corrente alternada. Entretanto, o circuito do computador, por exemplo, funciona com corrente contínua. Como isso é possível?

### Resolução:

Isso é possível, pois dentro das CPUs dos computadores há uma fonte de alimentação que modifica o tipo de

corrente, de alternada para contínua, além de abaixar a tensão de alimentação.

**ER2.** A usina hidrelétrica de Itaipu produz para o Brasil energia com correntes alternadas com a frequência de 60 Hz e para o Paraguai, com 50 Hz. O que isso significa?

### Resolução:

Significa que, no Brasil, o sentido da corrente muda 60 vezes por segundo e no Paraguai, 50 vezes por segundo.

## Exercícios propostos



**EP1.** Na corrente alternada, a corrente muda de sentido com frequência, tornando-se positiva, negativa ou nula. Se uma lâmpada está sendo alimentada por uma corrente alternada, ela não deveria apagar quando a corrente fica nula? *Resposta nas Orientações Didáticas.*

**EP2.** A corrente alternada gerada, por exemplo, em usinas hidrelétricas difere da corrente contínua fornecida por uma pilha comum quanto à movimentação dos elétrons livres nos condutores. Caracterize-as. *Resposta nas Orientações Didáticas.*

**EP3.** Qual é a função dos transformadores elétricos? *Resposta nas Orientações Didáticas.*

**EP4.** Calcule a razão entre os números de espiras no primário e no secundário, de um transformador elétrico que reduz a tensão de 440 V para 110 V. *razão = 4*

**EP5.** Um equipamento de eletrônica é projetado para funcionar sob ddp de 10 V. Para utilizá-lo, devemos conectá-lo à bobina secundária de um transformador que é ligado à rede elétrica de 220 V. Esse transformador também funcionaria se fosse ligado a uma rede de corrente elétrica contínua? Justifique sua resposta. *Resposta nas Orientações Didáticas.*

**EP6.** Com dois transformadores idênticos, normalmente usados para converter 220 V em 110 V, é possível criar

uma ligação (associação) para converter 220 V em 55 V? Como? Esquematize.

*Resposta nas Orientações Didáticas.*

**EP7.** (UEM-PR) Um transformador tem os seguintes valores nominais de especificação: 110 V de entrada e 220 V de saída, com potência de 660 W. Sabendo que o enrolamento primário do transformador tem 300 espiras e que não há dissipação de energia no interior do transformador, assinale o que for correto.

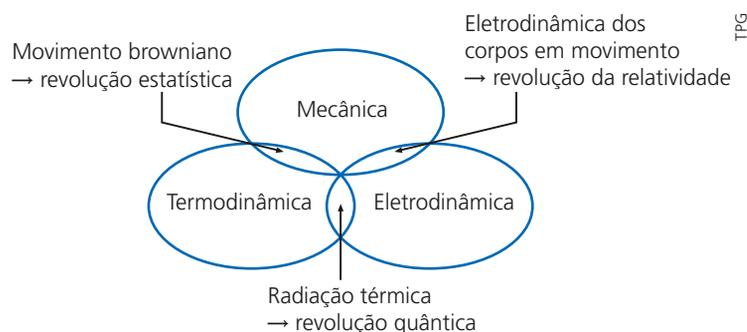
- 01) O enrolamento secundário do transformador possui 600 espiras. **X**
- 02) A corrente elétrica que flui no enrolamento primário é 1,0 A.
- 04) A variação do fluxo magnético no enrolamento secundário do transformador induz o aparecimento de uma diferença de potencial elétrico nos terminais desse enrolamento. **X**
- 08) Se ligarmos o enrolamento primário a uma bateria de 12 V, o transformador funcionará com uma potência de 66 W até a carga da bateria se extinguir.
- 16) A corrente elétrica induzida no enrolamento secundário do transformador aparece sempre no sentido tal que o campo magnético que ela cria tende a contrariar a variação do fluxo magnético gerado pelo enrolamento primário. **X**

# Física Moderna

Vimos, ao longo do Ensino Médio, os tópicos principais da Física Clássica — a Mecânica, a Termodinâmica e o Eletromagnetismo — e conhecemos os objetos de que tratam por nossas experiências cotidianas.

No final do século XIX, o conhecimento relacionado a essas áreas estava tão bem estabelecido que dava a sensação de que nada mais existia para ser descoberto. Era tal a confiança nos resultados obtidos que William Thomson (conhecido como Lorde Kelvin) chegou a afirmar que não havia mais nada a ser descoberto, restando aos físicos apenas a tarefa de aumentar a precisão nas medidas obtidas.

Nas palavras de Lorde Kelvin, a Física era “um céu azul, com algumas nuvens”, representando fatos cuja explicação não era completa: átomos absorviam ou emitiam energia correspondente a radiações eletromagnéticas de apenas determinadas frequências, objetos mudavam de cor quando aquecidos e metais emitiam elétrons quando iluminados por luz ultravioleta. Esses pequenos problemas se situavam em áreas limítrofes de seus respectivos domínios, longe das questões, as quais estavam todas respondidas.



“Os problemas das fronteiras da Física Clássica nos obrigam a repensar os conceitos existentes ou mesmo reelaborá-los, e ensinam que áreas diferentes podem ter conceitos compatíveis e abrangentes. As ‘nuvens no horizonte’ terminaram por fazer a revolução da mecânica quântica, da mecânica relativística e da mecânica estatística” (RENN, J. A Física Clássica de cabeça para baixo: Como Einstein descobriu a Teoria da Relatividade Especial. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 27, n. 1, p. 27-36, 2004).

O conhecimento que se produziu para dar respostas a esses problemas foi o ponto de partida para o que denominamos, hoje, Física Moderna: a mecânica estatística, a mecânica quântica e a Teoria da Relatividade.

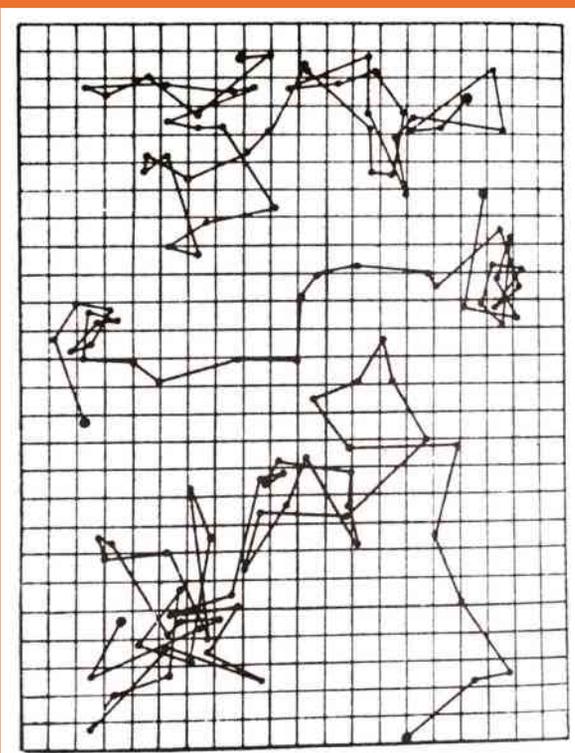
Veremos nesta última unidade o conjunto de fatos que deu origem a esta verdadeira revolução do pensamento clássico.

▀ **CAPÍTULO 17** Teorias da Relatividade

▀ **CAPÍTULO 18** Teoria Quântica

▀ **CAPÍTULO 19** Física Nuclear

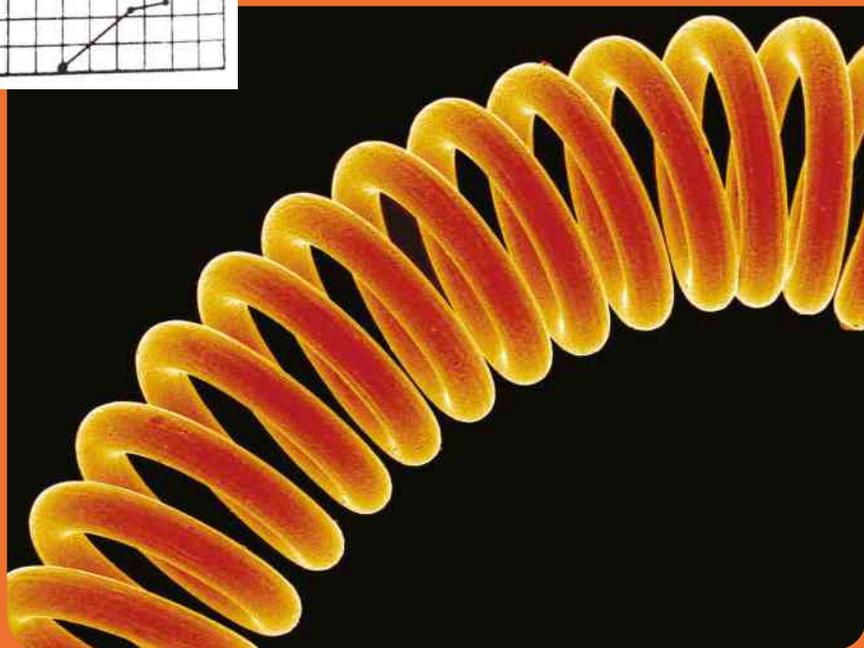
SPL/Latinstock



A mecânica estatística nasceu da observação do movimento browniano — deslocamento aleatório de partículas macroscópicas imersas em fluidos descoberto pelo botânico Robert Brown em 1827 e explicado somente em 1905 por Albert Einstein.

O gráfico mostra as posições de três grãos de pólen suspensos em água, observados em intervalos de 30 segundos.

A mecânica quântica veio apresentar novas características das partículas e a quantização da energia; teve origem no problema da radiação térmica do corpo negro e no efeito fotoelétrico, sendo o modelo atômico de Bohr seu primeiro grande paradigma. Imagem ampliada do filamento de uma lâmpada.



Susumu Nishinaga/SPL/Latinstock

# Teorias da Relatividade

Assim como há muito mais objetos e situações que desconhecemos do que conhecemos, também é razoável considerar que há um bocado de ciência que se aplica a essas situações, e que talvez não nos pareça assim tão familiar. Mas o que nos parece familiar?

Sentimo-nos confortáveis em nosso mundo e nossa vizinhança porque ambos funcionam segundo as regras que conhecemos e com as quais estamos tão familiarizados que nem pensamos nelas. A Teoria da Relatividade Especial é o resultado do trabalho de cientistas — físicos, matemáticos, filósofos — que, trabalhando em áreas aparentemente desconexas como a Mecânica e o Eletromagnetismo, levantaram singularidades que não podemos perceber em nosso cotidiano, mas mudaram completamente a maneira como entendemos o espaço e o tempo.

A Teoria da Relatividade foi publicada em 1905 por Albert Einstein como um artigo teórico que parte de dois pressupostos: a velocidade da luz é a mesma para todos os observadores, não importa qual seja sua velocidade relativa; e as leis físicas são as mesmas em qualquer sistema inercial de referência.

Os resultados levantados por Einstein englobaram muito da produção científica produzida até então e influenciariam de forma ímpar a ciência a ser produzida. Nas palavras do filósofo e matemático Bertrand Russell (1872-1970), “Todos sabem que Einstein fez uma coisa assombrosa, mas muito poucos sabem exatamente o que foi.” (RUSSEL, Bertrand. *ABC da Relatividade*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 2005). O que sugere que pode haver alguns equívocos em sua formulação e, possivelmente, na inferência de suas consequências.

## Referenciais e simultaneidade

Uma regra que aceitamos como óbvia é a simultaneidade: consideramos simultâneos os fatos que ocorrem ao mesmo tempo, e isso não depende da maneira como os observamos. Mas será isso sempre verdade?

Imaginemos a situação em que duas lâmpadas são acesas em dois locais, A e C, separados por uma grande distância, ao mesmo tempo por um mesmo indivíduo; podemos garantir que esses eventos serão também vistos simultaneamente por qualquer outro observador?



Dependendo de onde o observador estiver, os eventos podem ser simultâneos ou não; a ordem em que serão observados também depende de sua posição.

Se o observador estiver no ponto B, ponto médio do segmento de reta, que separa os dois locais, ele verá as duas lâmpadas serem acesas ao

mesmo tempo, como o indivíduo que as acendeu; caso esteja em qualquer outro ponto desse segmento, a luz deve percorrer distâncias distintas para chegar até o observador, usando para isso intervalos de tempo diferentes. Sem saber a posição do observador, não se pode sequer prever a *ordem* em que ele verá as lâmpadas se acenderem. Isso acontece porque as informações não viajam instantaneamente, e a velocidade limite para isso é a velocidade da informação (no nosso caso, é a velocidade da luz, mas também poderia ser a velocidade do som de dois sinos disparados ao mesmo tempo). Logo, um mesmo fenômeno tem três interpretações (pode ser percebido em instantes diferentes), e todas são verdadeiras.

O que você deve observar aqui é que, escolhendo uma posição adequada, é possível que esses eventos classificados como simultâneos para um observador também o sejam para outro — como para o observador que acende as lâmpadas e para o que se posta a meia distância entre elas. Mas isso só acontece se estiverem em repouso um em relação ao outro. O que aconteceria se um deles estivesse em movimento? Veja a figura:



A luz que vem das lâmpadas deve percorrer distâncias diferentes para chegar ao observador de bicicleta, e ele então não observará simultaneidade nos dois eventos. Compare este resultado com o anterior e perceba que nem sempre podemos observar eventos simultâneos em referenciais distintos.

Essa discussão levanta a questão do referencial. Lembre-se de que um referencial é uma situação arbitrada a partir da qual descrevemos situações, por tomada de medidas ou aplicação de leis físicas. Até aqui, estabelecemos um referencial por um ponto no espaço, conhecidas suas coordenadas. Agora, anexaremos a essas informações uma variável temporal, porque não podemos separar o espaço e o tempo quando estamos descrevendo eventos.

Damos o nome de contínuo espaço-tempo a essa maneira de articular a posição e o momento em que ocorrem os eventos.

## ATIVIDADE PRÁTICA

FAÇA NO CADERNO NÃO ESCREVA NO LIVRO

### Explorando referenciais com auxílio de uma câmera

Crescemos em um mundo aparentemente estático. Os primeiros modelos explicativos de nosso Sistema Solar colocavam a Terra como o centro do Universo, pois, relativamente a nós, o Sol nasce no leste e se põe no oeste, ou seja, é ele que parece estar se mexendo. Em relatividade, uma questão essencial a ser compreendida é a dimensão geométrica do sistema de coordenadas dos diferentes referenciais. Diante disso, vamos fazer algumas experiências para explorar melhor os referenciais e a descrição de seus movimentos.



#### Material

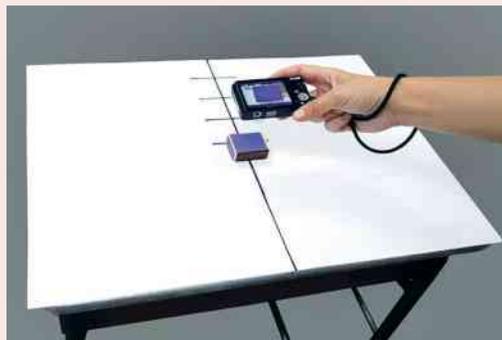
- uma filmadora (pode ser de celular)
- cartolina
- caneta hidrográfica do tipo “pincel atômico”
- mesa de apoio
- caixas de fósforos
- cronômetro



Fernando Favoretto/Criar Imagem

## Procedimento

- I. Fixem a cartolina sobre a mesa da sala de aula. Façam uma reta no meio da cartolina e, iniciando em uma das extremidades, marquem riscos espaçados de 5 cm em 5 cm.
- II. A 20 cm do começo das marcações, fixem a caixa de fósforos sobre a cartolina (identifiquem a caixa, desenhando alguma figura para que seja válida como referencial).
- III. Procurem um lugar de chão liso, bem iluminado, e coloquem a mesa bem próximo a uma parede de cor única, de preferência branca. É importante que não haja sombra nem pontos de luz atrás da montagem.
- IV. Coloquem a lente da câmera bem próximo à cartolina, de forma que fique na mesma altura da caixa de fósforos. Ao filmar, é importante que não haja objetos por perto que possam servir de referencial absoluto.
- V. Devem ser feitas duas gravações com a câmera. Na primeira, a câmera se aproximará da caixa lentamente. Na segunda, a câmera estará fixa e alguém (sem ser visto) empurrará a mesa para perto da câmera.
- VI. Gravem os dois vídeos no computador com títulos diferentes, de modo que só vocês saibam a diferença entre os dois.
- VII. Agora, outro grupo pode analisar seus dois vídeos (sem o áudio) e elaborar parâmetros para diferenciar os dois movimentos. Reciprocamente, o seu grupo pode analisar a gravação do outro grupo.



Fernando Favoretto/Criar Imagem

## Discussão

1. Identifique o que está em movimento em cada vídeo.
2. Qual o parâmetro utilizado para fazer tal afirmação? Justifique.

Não é fácil encontrar parâmetros. Então, vamos adotar um referencial  $(x, y, z)$  para um dos dois objetos — escolha entre a câmera e a caixa de fósforos.

Coloque os números na cartolina. Se escolher a caixa de fósforos, o  $x = 0$  será nela e o valor de  $x$  aumentará conforme se aproxima do ponto onde está a câmera (não há, nesse caso, deslocamento em  $y$  e  $z$ , então podemos considerar o movimento como unidimensional).

Repita o procedimento anterior das gravações e responda:

3. Em cada caso, qual o espaço inicial e qual o espaço final?
4. Quanto tempo demorou a aproximação? Conte com um cronômetro.
5. Qual a velocidade de aproximação em cada caso?

Converse com os colegas e com o professor sobre isso.

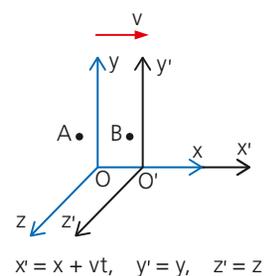
[Ver Orientações Didáticas.](#)

## Transformações e invariantes

Já na época de Galileu Galilei, sabia-se que as leis da Mecânica são as mesmas em todos os referenciais inerciais, mas isso não significa que vamos obter os mesmos resultados medindo os mesmos objetos em referenciais distintos. É possível transformar os dados obtidos por um observador em um referencial  $A(x, y, z)$  para outro referencial  $B(x', y', z')$  que se move com velocidade  $v$  na direção  $x$ , usando as transformações de Galileu, como mostram a imagem e as equações ao lado.

A finalidade das equações de transformação é descrever estes resultados em qualquer sistema de referência inercial, ou seja, para qualquer observador, pois o movimento é um conceito relativo e não existe referencial privilegiado.

Para os conhecimentos científicos existentes até o século XIX, a mecânica newtoniana atendia perfeitamente às necessidades nas explicações dos fenômenos físicos estudados até então. A relatividade galileana dava aval à Física Clássica, afirmando que as leis da Mecânica são as mesmas em referenciais que estejam em movimento retilíneo e uniforme, um em relação ao outro.



TPG

Se com os fatos da Mecânica as transformações de Galileu funcionavam bem, o mesmo não ocorria com as equações de Maxwell para o Eletromagnetismo: estas previam o aparecimento de novos fenômenos não observados conforme o observador estivesse em repouso ou movimento. Tudo indicava que a velocidade da luz era um invariante (isto é, constante) em qualquer sistema de referências, e esse era um resultado inesperado.

Havia duas correntes conceituais a respeito da luz: a corpuscular e a ondulatória; segundo a interpretação ondulatória, a luz é uma perturbação que se propaga em um meio impalpável, o éter, com velocidade finita, de maneira análoga ao som que se propaga no ar, e Einstein estava interessado nos efeitos medidos por um observador em movimento por causa da velocidade de arrasto do éter, tanto nos efeitos luminosos quanto nos eletromagnéticos.

## A FÍSICA NA HISTÓRIA

### O experimento de Michelson e Morley

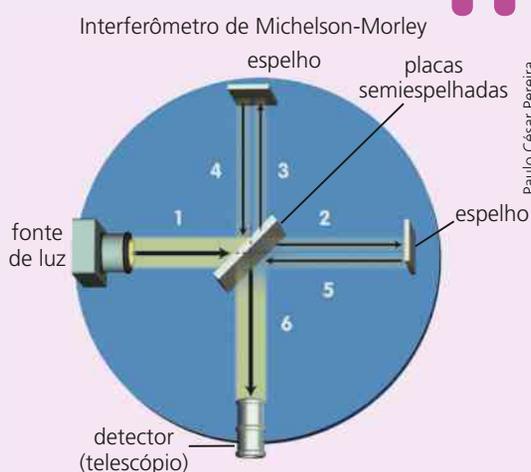
Em 1887, Albert Michelson e Edward Morley haviam produzido a primeira evidência forte de que o éter não existia. Sabendo que em 1904 o físico holandês Hendrik Lorentz havia aplicado novas transformações nas equações de Maxwell, para mantê-las invariantes, Einstein propôs que fossem aplicadas não apenas aos fenômenos eletromagnéticos, mas a toda a Física, de modo que essas leis se tornassem invariantes em qualquer referencial.

O experimento de Michelson e Morley foi levado a cabo em fins do século XIX para determinar a velocidade da luz em diversas direções, investigando a ação de arrasto de um suposto “éter”.

Um raio de luz (1) incide na superfície de uma placa semiespelhada; parte desse raio de luz (2) atravessa o espelho sem alteração de direção, enquanto a outra parte (3) é refletida; os dois raios de luz sofrem reflexões (4 e 5) em outros espelhos, voltando à placa semiespelhada, sofrendo reflexão ou atravessando-a. Esses raios de luz (6) são colhidos por um detector ao mesmo tempo, mostrando que não houve alteração de velocidade de nenhum dos raios de luz em qualquer trajeto e que, portanto, o suposto éter não exerce nenhuma ação de arrasto.

O experimento foi repetido exaustivamente, em vários locais, com vários experimentadores e com o máximo de precisão alcançável. Todos os experimentos deram resultado negativo, ou seja: a velocidade da luz não é afetada pela presença de nenhum meio material.

Ao falhar no experimento, Michelson e Morley descobriram que o éter não existia. Isso mostra que, na Ciência, errar também é importante.



Paulo César Pereira

Quando aplicamos as transformações de Lorentz a referenciais em velocidades muito altas, observamos que a velocidade da luz não se altera em nenhum referencial. Esse resultado vai contra todas as nossas expectativas, contraria nosso bom senso. No entanto, o bom senso não é um bom conselheiro, pois é calibrado pelas experiências do dia a dia, e movimentos próximos à velocidade da luz não podem ser classificados como situações rotineiras — para estas, as transformações de Galileu funcionam muito bem. Se é verdade que a velocidade da luz não se altera em referenciais em movimento — quando esperamos que se satisfaçam as regras da composição de movimento —, é porque alguma coisa deve estar errada com nossa noção de medição do tempo e/ou distância percorrida.

Veremos que as transformações de Lorentz, para baixas velocidades, reduzem-se às transformações de Galileu.

## A ideia de tempo

Isaac Newton, baseado em seus estudos, havia deixado o seguinte registro: *o tempo absoluto, verdadeiro e matemático, por si só e por sua própria natureza, flui de modo uniforme, não tendo relação com quaisquer coisas externas. Ele é também denominado duração.* Essa ideia de tempo está correta? Será que ela é ainda aceita pelos físicos nos dias atuais?

Artisticamente, por exemplo, o tempo é um tema que inspira compositores, como Caetano Veloso. Leia esta letra de **Oração ao tempo**.

És um senhor tão bonito Quanto a cara do meu filho Tempo, tempo, tempo, tempo Vou te fazer um pedido Tempo, tempo, tempo, tempo...	De modo que o meu espírito Ganhe um brilho definido Tempo, tempo, tempo, tempo E eu espalhe benefícios Tempo, tempo, tempo, tempo...
Compositor de destinos Tambor de todos os ritmos Tempo, tempo, tempo, tempo Entro num acordo contigo Tempo, tempo, tempo, tempo...	O que usaremos pra isso Fica guardado em sigilo Tempo, tempo, tempo, tempo Apenas contigo e migo Tempo, tempo, tempo, tempo...
Por seres tão inventivo E pareceres contínuo Tempo, tempo, tempo, tempo És um dos deuses mais lindos Tempo, tempo, tempo, tempo...	E quando eu tiver saído Para fora do teu círculo Tempo, tempo, tempo, tempo Não serei nem terás sido Tempo, tempo, tempo, tempo...
Que sejas ainda mais vivo No som do meu estribilho Tempo, tempo, tempo, tempo Ouve bem o que te digo Tempo, tempo, tempo, tempo...	Ainda assim acredito Ser possível reunirmo-nos Tempo, tempo, tempo, tempo Num outro nível de vínculo Tempo, tempo, tempo, tempo...
Peço-te o prazer legítimo E o movimento preciso Tempo, tempo, tempo, tempo Quando o tempo for propício Tempo, tempo, tempo, tempo...	Portanto peço-te aquilo E te ofereço elogios Tempo, tempo, tempo, tempo Nas rimas do meu estilo Tempo, tempo, tempo, tempo...

Para a percepção e interpretação do autor, o tempo é *compositor de destinos, tambor de todos os ritmos*, e ao qual ele pede um *movimento preciso*.

Como você interpreta o que Caetano Veloso fala do tempo?

A propósito, Santo Agostinho de Hipona, há dezesseis séculos, dizia que se ninguém o questionasse sobre o que é o tempo, ele saberia a respeito; mas, se o quisesse explicar a alguém, já não saberia.

E as pessoas em geral? Como elas percebem o tempo? A nossa percepção é confiável para efetuarmos as medidas de durações dos acontecimentos e das ações?

Neste ponto, sugerimos uma atividade simples a fim de que sirva de assunto para discussão com seus colegas. O objetivo não está em determinar as durações exatas. Você vai apenas estimar ou imaginar os tempos decorridos (durações) em alguns eventos, sem efetuar medidas com relógios nem cronômetros:

1. Solte uma borracha de uma altura aproximada de 1 metro e meio. Qual é o tempo de queda até atingir o chão?
2. Quanto tempo, em média, você demora para andar da porta da sala de aula até o portão de saída da escola?

3. Qual é a duração aproximada da execução completa do hino nacional brasileiro? Anote no caderno os tempos estimados para cada caso. Depois, compare os valores anotados com os dos colegas.

O que terá acontecido com esses valores? As percepções de tempo de vocês, e das pessoas em geral, são iguais? As durações estimadas são confiáveis?

A noção de tempo é uma coisa inerente a nós, seres humanos. Somos capazes de colocar em ordem cronológica os fatos captados pelos sentidos. Só que a percepção da duração de eventos dada por nossos sentidos é um processo psicossomático. Isso quer dizer que variáveis psicológicas participam da percepção, podendo dar sensações de que certos eventos ocorrem de forma lenta ou rápida. Com certeza, você já fez algo em que pareceu que o tempo passou mais devagar, enquanto que em outros momentos (mesmo que se tenha passado o mesmo tempo) ele aparentemente transcorreu voando.

Por isso, na Física, o tempo é uma grandeza escalar que deve ser medida por instrumentos que permitam demarcar intervalos ou durações iguais, e não pode depender de sensações pessoais de quem realiza as medições. Para tal, quaisquer fenômenos naturais que se repetem de modo uniforme podem ser adotados como referência. Um exemplo é o intervalo entre duas emissões de radiação de um elemento químico. Atualmente, o padrão de um segundo (1 s) é o tempo de duração de 9 192 631 770 vibrações da radiação, de um comprimento de onda específico, do átomo de Césio 133 (padrão adotado desde 1967, na 13ª Conferência Geral de Pesos e Medidas).

## Um experimento de pensamento

Agora, vamos pensar um pouco a respeito de composições de velocidades em que a luz esteja envolvida. Diferentemente do que acontece com as velocidades dos nossos deslocamentos cotidianos, a velocidade da luz faz acontecer algo fora do senso comum das pessoas. Começamos, então, com um experimento de pensamento. Nele, vamos considerar o seguinte:

- um vagão de trem completamente fechado, de paredes opacas e negras;
- uma lâmpada acesa no teto, dentro do vagão;
- uma caixa vermelha, no piso do vagão, livre de atritos;
- Um obstáculo intransponível ( $O$ ) ao vagão, colocado no trilho retilíneo;
- um observador, em repouso relativamente ao solo, localizado sobre o trilho a uma distância  $x$  do obstáculo  $O$ .

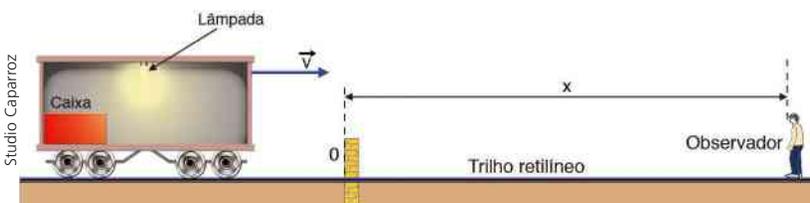


Imagem com elementos sem proporção entre si.

De início, o vagão desloca-se em MRU, ou seja, em trajetória retilínea e mantendo constante sua velocidade vetorial. Veja a figura. A caixa vermelha permanece em repouso relativamente ao vagão, isto é, desloca-se com a mesma velocidade vetorial do vagão em relação ao solo.

Assim que o vagão atinge o obstáculo  $O$ , ele para em relação ao solo. Instantaneamente, a parte frontal do vagão se abre e deixa à mostra o conteúdo interior ao observador. Estando o vagão já parado, a luz que parte da parte frontal do vagão, levando a sua imagem (do momento da abertura) ao observador, tem a velocidade  $c$  (que é a velocidade própria da luz).

Internamente ao vagão, porém, a caixa vermelha manterá a sua velocidade vetorial, por inércia, até que encontre o obstáculo. A Física Clássica permitiria dizer que a luz que parte da caixa na direção do nosso observador teria o módulo de sua velocidade dada pela soma  $c + v$ . Então, haveria a luz (com velocidade  $c + v$ ) que leva a imagem da caixa em movimento e que estaria saindo do vagão no exato instante da abertura da parte frontal.

Mas o que aconteceria então com as duas imagens a que nos referimos? Elas seriam levadas com velocidades diferentes, percorrendo a mesma distância  $x$ , até o

observador. Ou seja, a imagem da caixa vermelha que se move dentro do vagão (sendo levada por uma luz mais rápida) seria vista antes da imagem da abertura da parte frontal do vagão, pelo observador.

Há algo de errado nesse resultado! Ninguém pode ver o que acontece lá dentro do vagão antes que veja a abertura de uma de suas paredes. É como se fosse possível observar o efeito antes da causa. E isso jamais foi constatado. Assim, se houver algo incorreto, isso deve estar no fato de termos adicionado as velocidades da luz e do vagão ( $c + v$ ).

Então, para que a ordem da causa e do efeito seja respeitada, a caixa vermelha somente pode ser observada quando a parte frontal do vagão tiver sido aberta. Assim, para que as duas imagens em questão cheguem ao mesmo tempo ao observador, as luzes devem ter a mesma velocidade  $c$ . Ou seja, não podemos efetuar a soma  $c + v$ , pois estaríamos cometendo uma violação do princípio da causalidade.

Logo, a velocidade da luz deverá sempre apresentar o módulo  $c$ , de modo que tenha o mesmo valor ( $c$ ) para quaisquer observadores, independentemente da velocidade com que se mova o corpo que emite ou recebe a luz.

De modo geral, afirmaremos que **a velocidade  $c$ , da luz no vácuo, é a mesma para quaisquer sistemas inerciais de referência. Logo, ela independe da velocidade do móvel que esteja emitindo ou recebendo um sinal luminoso.**

## Postulados da Teoria da Relatividade Especial

**1º postulado:** as leis da Física valem da mesma maneira em quaisquer sistemas inerciais de referência. Assim, os respectivos processos naturais decorrem igualmente nesses referenciais.

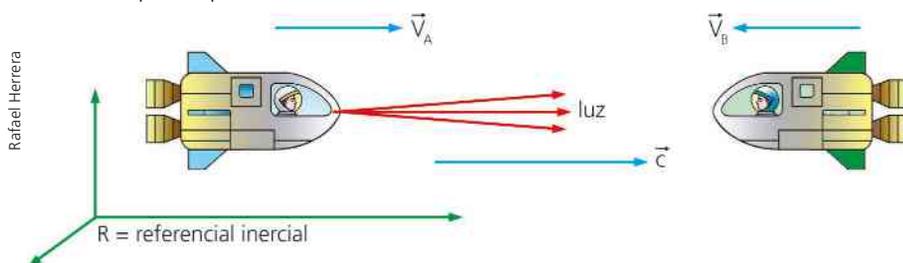
Isso é o mesmo que dizer: não existe referencial privilegiado.

Atribui-se erroneamente a Einstein a afirmação de que “tudo é relativo”: o correto é “todo movimento é relativo”. Na verdade, o nome que Einstein deu ao seu trabalho foi Teoria dos Invariantes. Observe que esse postulado é uma afirmação de invariância, e confirma a independência das leis da natureza em relação ao ponto de vista do observador.

O 1º postulado, então, difere da ideia de Galileu Galilei ao incluir todos os processos naturais e não somente os processos relativos a movimentos.

**2º postulado:** a velocidade da luz no vácuo sempre tem o mesmo valor, em todos os sistemas inerciais de referência. Ela é independente da velocidade do móvel que emite ou recebe um sinal luminoso.

Aqui no 2º postulado, Einstein tira o caráter absoluto do espaço e do tempo. O absoluto passa para o valor da velocidade da luz.



Astronautas em qualquer das duas naves veem a outra nave se aproximando com velocidade de módulo  $v_A + v_B$ , mas o raio de luz se aproxima da nave  $B$  com velocidade de módulo  $c$ .

Na mecânica clássica, a velocidade relativa com que as duas naves se aproximam é dada pela soma dos módulos de suas velocidades. Seguindo esse mesmo raciocínio, a luz emitida pela nave  $A$ , à esquerda, deveria se aproximar da nave  $B$  com uma velocidade  $v_B > c$ , o que não é possível de acordo com o segundo postulado. Em outras palavras, os valores das velocidades  $c$  e  $v_B$  não se somam algebricamente.



## Avião hipersônico australiano bate recorde mundial de velocidade

O avião hipersônico australiano HyCAUSE bateu o recorde mundial de velocidade em 15/06/2007 ao alcançar 11 000 km/h, o equivalente a Mach 10 — 10 vezes a velocidade do som (na altitude de voo). O recorde anterior era do X43- A, o protótipo de avião hipersônico da Nasa, que atingiu Mach 7 em março de 2004.

O HyCAUSE utiliza uma turbina especial, que exige uma pressão extremamente alta do ar que entra em sua abertura frontal. Essa pressão só é atingida a velocidades extremamente elevadas, o que impede que ele decole normalmente de um aeroporto, como os jatos normais.

No teste australiano, um foguete Talos levou-o para fora da atmosfera terrestre, atingindo 530 km de altitude. Ao reentrar na atmosfera, o jato atingiu a velocidade necessária para que seu motor funcionasse, batendo o recorde mundial de velocidade.

Enquanto um foguete precisa levar seu próprio oxigênio a bordo, o HyCAUSE queima seu combustível utilizando o oxigênio da atmosfera.

Além do próprio motor a combustão, os aviões hipersônicos estão exigindo o desenvolvimento de tecnologias totalmente novas, diferentes das tecnologias dos aviões tradicionais e dos foguetes. Entre os novos desenvolvimentos destacam-se os sistemas de controle de voo em velocidades hipersônicas e novos sistemas de telemetria e comunicação.



Department of Defense

Fotografia da decolagem do avião hipersônico HyCAUSE. Fotografia de junho de 2007.

Fonte: <[www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=010130070618](http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=010130070618)>. Acesso em: 11 fev. 2016.

## A dilatação do tempo

Os aviões supersônicos exibem atrasos sistemáticos em seus relógios, após voos em altas velocidades, e não se trata de mau funcionamento. Quando estão em repouso, os relógios funcionam da maneira “comum” ou esperada, e voltam a atrasar quando em altas velocidades; quanto maior a velocidade, maiores os atrasos. Parece, então, que o tempo escoava de modo distinto para diferentes referenciais.

Na Física Clássica, a ideia de que o tempo pudesse passar em ritmos diferentes para referenciais distintos não tinha qualquer cabimento. Como é possível haver diferenças entre as medições de intervalos de tempo realizadas em referenciais inerciais distintos? Os esquemas a seguir irão ajudar a entender a questão.

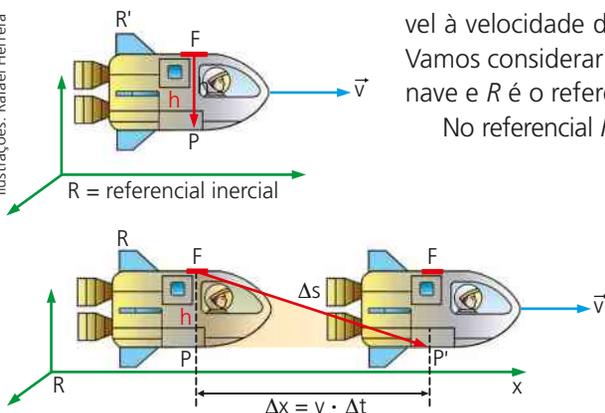
Do teto de uma nave de altura  $h$  que se move com velocidade  $v$ , comparável à velocidade da luz, sai um raio de luz da fonte  $F$ , que se dirige ao piso  $P$ . Vamos considerar dois referenciais:  $R'$  é o referencial em repouso em relação à nave e  $R$  é o referencial que se move com velocidade constante.

No referencial  $R'$ , o intervalo de tempo  $\Delta t'$  para o raio de luz chegar ao piso é

$\Delta t' = \frac{h}{c}$ , enquanto no referencial  $R$  a nave deslocou-se de  $\Delta x = v \cdot \Delta t$ ; ainda em relação ao referencial  $R$ , o raio de luz percorreu uma distância  $(\Delta s)^2 = h^2 + (\Delta x)^2$  até chegar a  $P'$ , que é a nova posição do piso.

Como  $\Delta s = c \cdot \Delta t$  e  $\Delta x = v \cdot \Delta t$ , a expressão  $(\Delta s)^2 = h^2 + (\Delta x)^2$  se torna  $c^2 \cdot (\Delta t)^2 = h^2 + v^2 \cdot (\Delta t)^2 \Rightarrow (\Delta t)^2 \cdot (c^2 - v^2) = h^2$ .

Ilustrações: Rafael Herrera



Multiplicando os membros da expressão anterior por  $\frac{1}{c^2}$ , obtemos uma relação entre  $\Delta t$  e  $\Delta t'$  que não é intuitiva:

$$(\Delta t)^2 \cdot \frac{c^2 - v^2}{c^2} = \frac{h^2}{c^2} \Rightarrow (\Delta t)^2 \cdot \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) = (\Delta t')^2 \Rightarrow (\Delta t)^2 = \frac{(\Delta t')^2}{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$$\therefore \Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Como o termo  $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$  é menor que 1, pois  $v < c$ , então teremos sempre  $\Delta t > \Delta t'$ . Ou seja: o tempo ( $\Delta t$ ) medido no referencial  $R$  é maior que o tempo ( $\Delta t'$ ) medido no referencial  $R'$ , caracterizando, assim, a **dilatação do tempo**.

Mas como não percebemos isso? Na nossa vida rotineira, as velocidades que desenvolvemos são desprezíveis em relação a  $c$ , e o termo  $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$  é muito próximo de 1 ou  $\Delta t = \Delta t'$ , tornando válidas as expressões das transformações de Galileu.

## OUTRAS PALAVRAS



### Paradoxos e o paradoxo dos gêmeos

Talvez o maior impacto dos resultados da Teoria da Relatividade sobre a opinião pública foi, e ainda é, a dilatação do tempo. Mas a Teoria da Relatividade é um conjunto **teórico** de pressupostos e equações matemáticas; Einstein não foi laureado com o prêmio Nobel por este trabalho porque, entre outros motivos, não havia comprovações experimentais dos resultados.

Einstein “testava” suas hipóteses pensando em experimentos hipotéticos, possíveis em princípio, em um processo que em alemão se denomina *Gedankenexperiment* (experimento mental); foi dessa maneira que ele se aproximou do problema de medir a velocidade da luz em vários referenciais.

Um desses experimentos mentais derivou em um paradoxo. Como você sabe, um paradoxo é um raciocínio aparentemente correto, mas é fundamentado em certas incorreções estruturais, e que leva a uma contradição ou falta de nexos. O paradoxo mais famoso da Relatividade é o dos gêmeos. Vamos lê-lo nas palavras do professor Antonio S. Pires, da UFMG:

Temos dois gêmeos, Paulo e Diana, e um deles, Diana, viaja em uma nave espacial em direção a uma estrela distante, com uma velocidade de 80 por cento da velocidade da luz, durante dez anos (medidos na Terra), a nave faz meia volta e retorna. Paulo está vinte anos mais velho, mas Diana só envelheceu doze anos.

Um paradoxo aparente aparece ao aplicar o fator de dilatação temporal da perspectiva de Diana que “vê” o relógio de Paulo mais lento e conclui

que ele é que deve estar mais jovem. Durante a viagem tanto faz dizer que a Terra ou a nave se deslocam uma em relação ao outro. A mesma consideração pode ser aplicada, sem diferença, à viagem em um sentido [de] trem. Diana embarca no trem com a velocidade anterior em uma estação deixando lá Paulo. Viaja por 60 minutos, marcados em seu relógio, e desembarca em uma estação. Ela verifica que, pelo tempo indicado no relógio da estação, sua viagem durou 100 minutos. Mas como os movimentos são relativos, poderíamos imaginar que Diana embarcou no trem, mas foi a Terra que se deslocou no sentido oposto. [...] Neste caso, Paulo é que estaria em movimento e 60 minutos para ele corresponderiam a 100 minutos no trem. Durante o tempo em que um observador se move uniformemente, um em relação ao outro, não temos base para dizer que um dos relógios está realmente indicando a passagem de menos tempo do que o outro relógio; fazer assim seria dar preferência a um dos dois sistemas de coordenadas.

A resolução do paradoxo é simples. As duas situações não são simétricas. A nave em que viajou Diana sofreu uma aceleração quando parou e retornou à Terra. Paulo permaneceu em um sistema inercial durante todo o tempo. Posições e velocidades são grandezas relativas na Teoria da Relatividade, mas aceleração não o é. [...]

Simetria de observações só existe para observadores não acelerados.

PIRES, Antonio S. T. *Evolução das ideias da Física*. São Paulo: Livraria da Física, 2008. p. 315-316.

## Organizando as ideias do texto

- Segundo o que está dito até aqui, você pode supor que o tempo fica mais lento conforme a velocidade aumenta. Isso significa que em uma espaçonave muito rápida o tempo passa mais devagar?
- Suponha uma outra situação, em que Paulo está na Terra no instante em que Diana abandona a estrela Alfa de Centauro (4,3 anos-luz da Terra) e se dirige para cá com uma velocidade muito alta, digamos, 0,8 c. Diana não vai parar na Terra, mas passará por aqui com velocidade constante.
  - Quanto tempo levaria no relógio de Paulo para que Diana chegasse até aqui?
  - E quanto tempo levaria no relógio de Diana?
  - Supondo que Diana iniciasse a sua viagem no dia em que ambos estivessem comemorando seu 18º aniversário, que idade pareceria a Diana que Paulo teria na passagem de Diana pela Terra? E que idade teria Diana para Paulo, nesse mesmo instante? *Professor, veja Orientações Didáticas.*

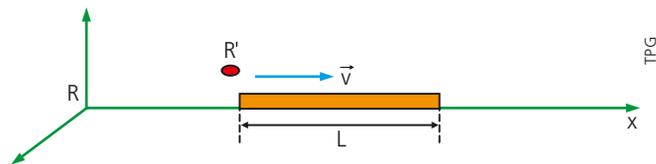
## A contração do espaço

O que acontece, agora, com o espaço a um observador fixo no referencial  $R'$  que está em movimento uniforme em relação a  $R$ , com velocidade de módulo  $v$ ? Considere uma barra em repouso em relação a  $R$ . O observador em  $R'$  pode medi-la indiretamente, medindo o tempo necessário para que  $R'$  passe ao longo do comprimento da barra:

Sidney Harris/Cartoonstock



“Se Einstein estiver correto, quando voltarmos, meu carro terá excedido o tempo de estacionamento em 320 anos!”



$L$  é o comprimento da barra medido sobre o eixo  $x$  no referencial  $R$ , em que  $L = v \cdot \Delta t$ . Para o observador fixo no referencial em  $R'$ , a barra (de comprimento  $L'$ ) move-se, relativamente, para a esquerda. Esse observador  $R'$  pode medir a mesma barra, pelo mesmo processo, e obter  $L' = v \cdot \Delta t'$ .

$$\text{Como } \Delta t' = \Delta t \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}, \text{ concluímos que } L' = v \cdot \Delta t \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \Rightarrow \\ \Rightarrow L' = L \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}.$$

Mas sabemos que o fator  $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$  é menor que 1, então  $L' < L$ .

Isso é o mesmo que dizer que o comprimento  $L'$  medido no referencial  $R'$  é menor que o comprimento  $L$  medido no referencial  $R$ , caracterizando, assim, a contração do espaço.

Caso a barra, agora de comprimento  $L'$ , esteja em MRU em relação a  $R$ , valerá  $L = L' \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ . Quem vai observar a contração do espaço é, desta vez, o observador em  $R$ .

A expressão  $L' = L \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$  é a chamada transformação de Lorentz, ou contração de Lorentz.

Observe que esse efeito pode ser visto na direção do movimento relativo: a única dimensão da barra que sofre deformação é o comprimento. A largura e a espessura continuam preservadas.

## A massa relativística

Em consequência dos postulados da Relatividade Especial, a Física Moderna fornece uma expressão para o cálculo da massa relativística ( $m$ ), que varia de acordo com a velocidade ( $v$ ) do corpo em movimento:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Os valores de  $m$  e de  $m_0$  são medidos em relação a um mesmo referencial inercial, em que  $m_0$  = massa de repouso do corpo.

Note que massa não é quantidade de matéria. Portanto, o que aumenta com a velocidade não é a quantidade de matéria, mas a massa que mede a inércia do corpo.

## A energia relativística

Quando você imaginaria que reduzindo a temperatura do seu suco de laranja, por exemplo, a massa dele diminui? E, ao contrário, aquecendo os alimentos, a massa deles aumenta? Evidentemente, a variação da massa relativística é tão ínfima que uma pessoa jamais poderia sentir a diferença.

Mas por que razão existe essa variação de massa, mesmo sem alterar a velocidade das coisas?

A razão é que existe uma equivalência entre energia e massa. A relação entre a energia relativística ( $E$ ) e a massa ( $m$ ) é determinada pela famosa fórmula de Einstein:

$$E = m \cdot c^2$$

A propósito, a energia de repouso ( $E_0$ ) de um corpo é dada por:

$$E_0 = m_0 \cdot c^2$$

É fácil, então, concluir que a diferença entre a energia relativística e a energia de repouso estabelece o valor da energia cinética do corpo em movimento:

$$E_c = m \cdot c^2 - m_0 \cdot c^2 \quad \text{ou} \quad E_c = (m - m_0) \cdot c^2$$



Thinkstock/Getty Images

A massa dos alimentos aumenta com o aumento da temperatura.

### PARA SABER MAIS

#### Livro

#### O tempo e o espaço do Tio Albert

Russell Stannard. Companhia das Letras.

Russell Stannard é professor emérito de Física da Open University e dedica grande parte do seu tempo à literatura de divulgação científica. Nesta obra, de leitura fluente e agradável, somos levados a passeios mentais nos balões de pensamento, junto com Tio Albert e sua sobrinha Gedanken, em que muita coisa ocorre de modo um pouco diferente do comum. Nas suas páginas você terá oportunidade de refletir sobre as características do contínuo espaço-tempo e a simultaneidade.



Capa de Helen Nakao/Editora Cia das Letras

# A Relatividade Geral

Diversos experimentos e descobertas feitos no final do século XIX e início do século XX sobre o comportamento das ondas eletromagnéticas levaram Albert Einstein a postular sua Teoria da Relatividade Especial (ou Restrita).

Quando observamos em uma linha do tempo todos esses estudos, é fácil notar que a comunidade científica estava produzindo um tipo de conhecimento tal que a proposição da Relatividade seria uma consequência natural; em outras palavras, essa teoria viria pelas mãos de Albert Einstein ou de outro cientista da época, pois todas as descobertas convergiam para isso.

No entanto, 10 anos após a publicação de sua Relatividade Restrita, Albert Einstein surpreendeu a mesma comunidade científica ao publicar sua Teoria da Relatividade Geral, considerada um grande avanço na maneira de observar o Universo, pois, diferentemente da Relatividade Especial, não havia nenhum conhecimento que preconizasse essa ideia.

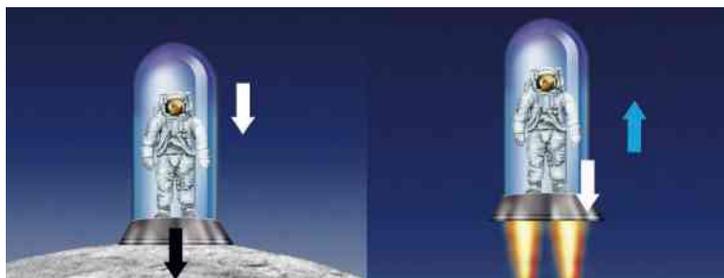
## O Princípio da equivalência

Sabemos, desde o século XVIII, da equivalência entre massa gravitacional e massa inercial, pois Isaac Newton havia comprovado experimentalmente que o período do pêndulo simples independe da massa pendular. Em 1909, Loránd Eötvös aumentou a precisão dessa igualdade com a balança de torção.

Sabendo desse fato, com outro *Gedankenexperiment*, Einstein declarou ter tido o pensamento mais feliz de sua vida: um observador que caísse livremente do teto de uma casa não saberia se estaria sendo acelerado pelo campo gravitacional do seu planeta ou por uma aceleração inercial regida pelo princípio fundamental da Dinâmica. Se estivesse dentro de uma nave espacial, impossibilitado de ter uma visão externa, e a nave se movesse com uma aceleração equivalente à da Terra, esse observador não saberia distinguir se está na Terra ou em uma nave em movimento acelerado. Inclusive se ele caísse junto com outros objetos — um livro, por exemplo —, não haveria sequer como saber se estava em movimento ou repouso, pois o livro seria acelerado da mesma maneira e ambos pareceriam em repouso.

Esse fato fez com que Einstein considerasse que as leis da Relatividade deveriam ser estendidas a sistemas de referenciais não inerciais. Nascia, daí, a Teoria da Relatividade Geral, em 1915.

Marcos Aurélio Neves Gomes



Nessas imagens, as setas brancas indicam a força com que o astronauta empurra o piso da nave, a seta preta representa a aceleração gravitacional e a seta azul representa a aceleração da nave. Note que o astronauta não tem como saber se a força exercida no piso da nave se deve ao campo gravitacional ou à aceleração da nave.

## Diferenças entre as teorias

Enquanto na Relatividade Especial Einstein analisou as leis da Física em referenciais inerciais, na Geral, entendendo que uma lei física deve servir para todo o Universo, ele buscou generalizá-las para qualquer referencial.

A Relatividade Geral tem como base o postulado conhecido como Princípio da Equivalência. Esse princípio mostra que um sistema submetido a um campo gravitacional e um sistema acelerado são equivalentes, ou seja, se uma pessoa estiver em uma sala fechada, sob ação de uma força, ela não terá como saber se a sala está acelerada ou se ela está submetida a um campo gravitacional; essa diferença só pode ser percebida pela presença de um referencial.

Outro fator importante é que o espaço-tempo apresentado por ele na Relatividade Especial podia ser deformado por uma quantidade de massa (ou energia) e, quanto maior a massa (ou energia) do corpo, maior a deformação do espaço-tempo.

De uma maneira bem simples, podemos imaginar o espaço-tempo sendo representado por um colchão e diversas esferas de massas diferentes sobre esse colchão representando corpos celestes; quanto maior a massa de uma esfera, maior a deformação do colchão.

Para Einstein, a deformação produzida é o campo gravitacional exercido pelo corpo. Assim, diferentemente da Relatividade Especial, que somente une o espaço e o tempo em uma única entidade espaço-tempo, a Relatividade Geral mostra o comportamento desse tecido, da massa e da energia de partículas livres quando estes interagem, incluindo o comportamento dos raios de luz. Com isso, ele mostra um novo modo de ver a gravidade, diferente da de Newton, ou seja, a Relatividade Geral é uma teoria de gravitação.

## Implicações da Relatividade Geral

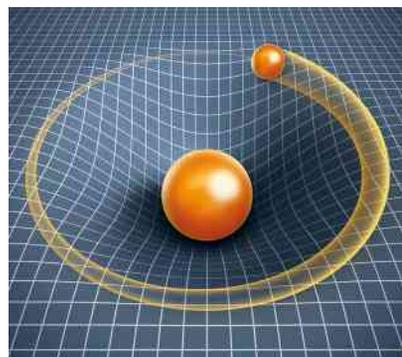
Entender o comportamento da luz quando esta interage com um corpo no espaço-tempo e entender que ela pode ser desviada pelo campo gravitacional provocado por esse corpo ajudou cientistas a realizarem diversas descobertas.

Por exemplo, em 1915, pouco depois de publicado o trabalho de Einstein, foram identificados os primeiros buracos negros. Identificá-los fez com que entendêssemos por que alguns corpos celestes parecem ter uma órbita, mas não se via em torno de que outro corpo eles orbitavam.

Além disso, ao identificar buracos negros, pudemos, em 1924, descobrir outras galáxias, mostrando que a Via Láctea é apenas uma das muitas existentes, isso porque as galáxias têm seu centro em um buraco negro.

Com todas essas descobertas, criou-se em 1927 a Teoria do Big Bang, que hoje é a teoria mais aceita para a criação do Universo e, a partir dela, foi criada a lei de Hubble-Humason da expansão do Universo em 1929.

Dessa forma, vemos que um grande salto na cosmologia, na compreensão e na exploração do Universo teve seu estopim na Teoria da Relatividade Geral.



Representação do campo gravitacional gerado pela curvatura do espaço-tempo.

## Exercícios resolvidos

**ER1.** Vamos fazer a suposição de que uma nave espacial possa viajar com 80% da velocidade da luz. Sendo os tempos de aceleração e de desaceleração desprezíveis, qual será o tempo medido na Terra se os astronautas a bordo medirem o tempo de 6 horas?

### Resolução:

A velocidade da nave é 80% de  $c$ , ou seja,  $v = 0,80c$ . Sendo  $\Delta t$  o tempo medido na Terra, temos:

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{6}{\sqrt{1 - \frac{(0,8c)^2}{c^2}}} = \frac{6}{\sqrt{0,36}} = 10$$

Portanto, o tempo medido na Terra será de **10 horas**.

**ER2.** Uma espaçonave, de 300 m de comprimento próprio, desloca-se em MRU, relativamente a um referencial  $R$ . Um observador em repouso nesse referencial, ao medir o comprimento da nave, constata o valor de 180 m. Calcule a velocidade da espaçonave, em função de  $c$ , em relação ao referencial  $R$ .

### Resolução:

$$L = L' \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$$\begin{aligned} 180 &= 300 \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \Rightarrow 0,6 = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \Rightarrow \\ \Rightarrow 0,36 &= 1 - \frac{v^2}{c^2} \Rightarrow \frac{v^2}{c^2} = 0,64 \Rightarrow \frac{v}{c} = 0,8 \\ \therefore v &= 0,8 \cdot c \text{ ou } v = 80\% \text{ de } c \end{aligned}$$

**ER3.** Uma aeronave, de massa de repouso  $m_0 = 100$  t (100 toneladas), voa imaginariamente a 1 080 000 km/h (3 mil vezes a máxima velocidade de um carro de Fórmula 1). Qual será o valor de sua massa relativística nessa velocidade?

### Resolução:

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

$$m_0 = 100 \text{ toneladas} = 100\,000 \text{ kg} = 10^5 \text{ kg}$$

$$v = 1\,080\,000 \text{ km/h} = 300\,000 \text{ m/s} = 3 \cdot 10^5 \text{ m/s}$$

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \Rightarrow m = \frac{10^5}{\sqrt{1 - \frac{(3 \cdot 10^5)^2}{(3 \cdot 10^8)^2}}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow m = \frac{10^5}{\sqrt{0,999999}} \therefore m \cong 100\,000,05 \text{ kg}$$

Mesmo com a altíssima velocidade da aeronave, o aumento de massa foi de apenas 50 gramas em 100 toneladas, o que corresponde a 0,00005% da massa de repouso.

Essa velocidade é muito grande em comparação com as velocidades rotineiras na vida das pessoas. Mas, ainda assim, 1 080 000 km/h só representa 0,1% da velocidade da luz no vácuo ( $c \cong 300\,000\,000$  km/s ou 1 080 000 000 km/h), que parece ser o limite máximo de velocidade neste Universo tridimensional. Devido ao elevado valor de  $c$ , os fenômenos físicos rotineiros (que ocorrem a baixas velocidades) for-

necem uma imagem fragmentada e restrita do mundo à nossa percepção.

**ER4.** Se aquecermos uma porção de macarrão, ao fazermos com que ela absorva uma quantidade de calor de 180 kJ, em quanto a sua massa irá aumentar? Utilize:  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s.

#### Resolução:

É dada a quantidade de calor:  $Q = 180$  kJ ou 180 000 J. Então, aplicamos a expressão  $E = m \cdot c^2$ :

$$180\,000 = m \cdot (3 \cdot 10^8)^2 \Rightarrow m = 2 \cdot 10^{-12} \text{ kg}$$

A massa irá aumentar 2 milionésimos de miligramas.

## A FÍSICA NA HISTÓRIA

### Albert Einstein

“Eu nunca penso no futuro. Ele não tarda a chegar.”

Albert Einstein nasceu em Ulm, Alemanha, no dia 14 de março de 1879.

Tentou ingressar na Universidade Politécnica Federal da Suíça, em 1895, mas não foi aprovado. Concluiu a escola secundária em Aarau, Suíça, em 1896.

No ano de 1901, obteve a nacionalidade suíça.

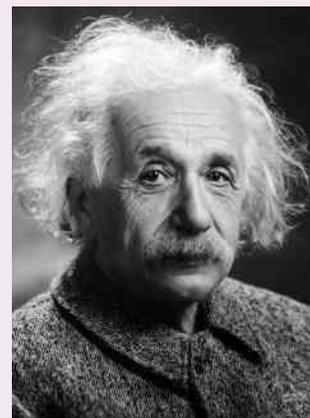
Em 1905, concluiu o doutorado, com o estudo do efeito fotoelétrico, que lhe valeria o prêmio Nobel de Física de 1921.

Suas famosas teorias foram publicadas em artigos datados de:

- 1905: Teoria da Relatividade Especial ou Restrita;
- 1915: Teoria da Relatividade Geral.

Einstein foi diretor do Instituto Kaiser Wilhelm de Física. Deu aulas na Universidade de Berlim. Na década de 1930, teve de emigrar para os EUA, devido à perseguição dos nazistas. Foi professor do Instituto de Estudos Avançados de Princeton. Adotou a cidadania americana e participou do Projeto Manhattan. Reconheceu o erro do uso da energia nuclear para fins militares após constatar o que ocorreu com as cidades de Hiroshima e Nagasaki, no Japão.

Faleceu no dia 18 de abril de 1955, em Princeton, nos EUA, aos 76 anos de idade.



Orren Jack Turner

Além da descrição da relatividade e da relação entre massa e energia,  $E = mc^2$ , Einstein explicou o movimento browniano.

## Exercícios propostos



**EP1.** A dialética é a arte de desenvolvimento do pensamento com diálogo, argumentação e confronto de ideias. Heráclito de Éfeso (540 a.C.-470 a.C.) foi o maior representante da Antiguidade dessa corrente filosófica. A frase que a ele se atribui: “No mesmo rio entramos e não entramos; somos e não somos; não se pode tomar dois banhos no mesmo rio” resume a ideia de que tudo é movimento, ou seja, de que nada pode permanecer estático e tudo está em contínua evolução. Justifique a afirmativa contida na frase, usando o conceito do contínuo espaço-tempo.

Resposta nas Orientações Didáticas.

**EP2.** (Enem-MEC) Suponha que uma espaçonave viaje com velocidade  $v = 0,8c$ , onde  $c$  é a velocidade da luz.

Supondo que se possa desprezar os tempos de aceleração e desaceleração da nave durante uma jornada de ida e volta que leva 12 anos, medidos por um astronauta a bordo, pode-se afirmar que um observador que permaneceu na Terra terá envelhecido, em anos:

- a) 9,6
- b) 10
- c) 12
- d) 15
- e) 20 X

**EP3.** Uma espaçonave de ficção científica viaja com velocidade igual a 60% da velocidade da luz. Desprezando os tempos de aceleração e de desaceleração da espaçonave durante uma viagem, de ida e volta, em

um total de 8 anos, medidos por uma astronauta a bordo da nave, calcule o tempo decorrido para a gêmea da astronauta que permaneceu na Terra. **10 anos**

**EP4.** (Enem-MEC) Segundo se conta, desde a adolescência, Einstein refletia sobre algumas questões para as quais as respostas dadas pela Física da sua época não o satisfiziam. Uma delas, conhecida como “o espelho de Einstein”, era a seguinte: se uma pessoa pudesse viajar com a velocidade da luz, segurando um espelho à sua frente, não poderia ver a sua imagem, pois a luz que emergisse da pessoa nunca atingiria o espelho. Para Einstein, essa era uma situação tão estranha que deveria haver algum princípio ou lei física ainda desconhecida que a “impedisse” de ocorrer. Mais tarde, a Teoria da Relatividade Restrita formulada pelo próprio Einstein mostrou que essa situação seria:

- a) impossível, porque a velocidade da luz que emerge da pessoa e se reflete no espelho não depende da velocidade da pessoa nem da velocidade do espelho. **X**
- b) impossível, porque a luz refletida pelo espelho jamais poderia retornar ao observador, estando no mesmo referencial.
- c) impossível, porque estando à velocidade da luz, a distância entre a pessoa e o espelho se reduziria a zero, tornando os dois corpos indistinguíveis entre si.
- d) possível, porque a pessoa e o espelho estariam num mesmo referencial e, neste caso, seriam válidas as leis da Física Clássica que admitem essa situação.
- e) possível, porque a luz é composta de partículas, os fótons, que nesse caso permanecem em repouso em relação à pessoa e, portanto, nunca poderiam atingir o espelho.

**EP5.** Identifique as afirmativas corretas dentre as que se seguem:

- I. A velocidade com que a luz se propaga no vácuo não depende do sistema de referência inercial relativamente ao qual ela é medida.
- II. A Teoria da Relatividade Especial não vale para referenciais inerciais.
- III. Para a percepção de um cozinheiro a bordo de uma nave espacial com 70% da velocidade da luz, os pratos que ele prepara na nave ficam prontos mais rapidamente do que se fizesse o mesmo serviço na Terra, com os mesmos equipamentos utilizados da mesma forma.
- IV. A Teoria da Relatividade limita o valor da velocidade que uma partícula pode adquirir.
- V. Se um relógio que funciona corretamente for colocado a bordo de um satélite espacial, ele irá marcar o tempo cada vez mais atrasado em relação a um relógio na Terra, e necessitará de correções relativísticas. **I, IV e V**

**EP6.** Uma cosmonave, cujo comprimento próprio é de 100 m, move-se em MRU, relativamente a um sistema de referências  $S$ . Um observador em repouso, em  $S$ , mede o comprimento desta nave na direção do movimento: ele é de 80 m.

Qual é a velocidade da cosmonave relativamente a  $S$ ?  
Use:  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s

$$v = 1,8 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

**EP7.** Uma partícula desloca-se a  $2,994 \cdot 10^8$  m/s. Uma distância de 9 000 m em relação à Terra, quando percorrida pela partícula, vale para esta partícula, aproximadamente:

- a) 569 m **X**
- b) 5 689 m
- c) 402 m
- d) 4 025 m
- e) 3 596 m

**EP8.** Uma partícula, de massa de repouso igual a 10,00 mg, move-se com a velocidade  $v = 0,30c$ , em que  $c$  é a velocidade da luz no vácuo. Determine sua massa nessa velocidade.

$$m \cong 10,48 \text{ mg}$$

**EP9.** Com que velocidade um objeto cuja massa de repouso é  $m_0$  deve se mover para que sua massa aumente em 0,001%?  $v \cong 1,342 \cdot 10^8$  m/s

**EP10.** Um volume de água de  $1 \text{ m}^3$  é aquecido, de 273 K até 300 K. Qual é a variação de massa relativística da água nesse aquecimento, em miligramas? Dados: massa específica da água =  $1 \text{ g/cm}^3$ ; calor específico da água =  $1 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot ^\circ\text{C}}$ ; velocidade da luz no vácuo =  $3 \cdot 10^8$  m/s;  $1 \text{ cal} \cong 4,2 \text{ J}$ .  $m \cong 0,00126 \text{ mg}$

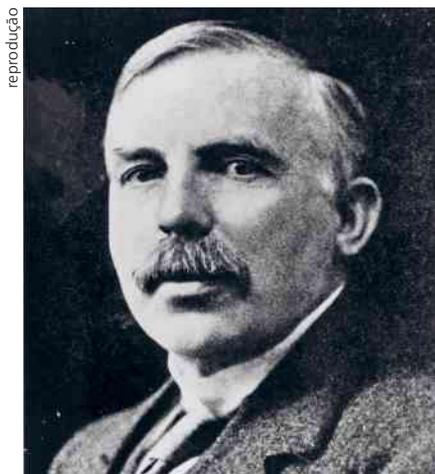
**EP11.** Na 2ª lei da Dinâmica, de Isaac Newton, não temos restrições aos valores da velocidade que pode ser atingida por um móvel. Então, em quanto tempo, aproximadamente, um móvel atingiria a velocidade da luz no vácuo, a partir do repouso, se fosse acelerado a  $10 \text{ m/s}^2$ ?

- a) 1 dia
- b) 1 semana
- c) 1 mês
- d) 1 semestre
- e) 1 ano **X**

**EP12.** Isaac Newton, sem sombra de dúvidas, é um dos nomes mais importantes na história da Física. Foi ele quem afirmou que: *o tempo absoluto, verdadeiro e matemático, por si só e por sua própria natureza, flui de forma uniforme, sem relações com quaisquer coisas externas.*

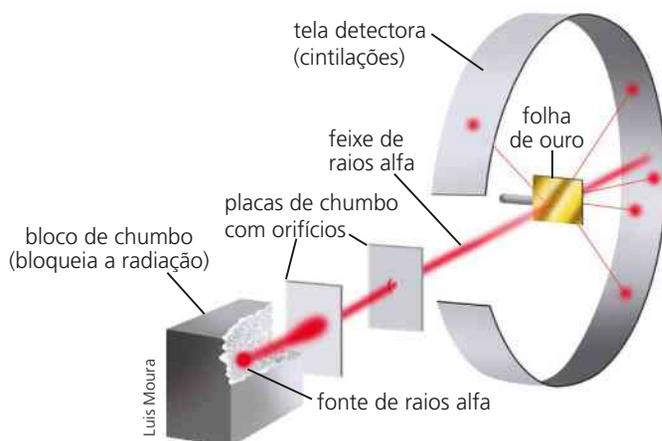
Em sua opinião, essa ideia de tempo deixada por Newton pode ser considerada correta no nosso cotidiano? Justifique sua resposta. **Resposta pessoal.**





reprodução

Ernest Rutherford (1871-1937) foi um cientista neozelandês. Tendo iniciado sua carreira no laboratório Cavendish sob orientação de J. J. Thomson, autor do “modelo de pudim de passas” para o átomo, Rutherford propôs um modelo nucleado para o átomo, em que predomina o vazio. Foi laureado com o prêmio Nobel de Química de 1908 pelo estudo de materiais radioativos.



Esquema do instrumental do experimento conduzido por Rutherford que levou à proposição do novo modelo do átomo. Uma folha de ouro muito fina era bombardeada por partículas radioativas — raios alfa —, e algumas ricocheteavam após chocarem-se contra algo muito mais pesado. Nas palavras de Rutherford, “... foi a coisa mais incrível que já aconteceu em minha vida. Era como se você atirasse um obus de 15 polegadas contra uma folha de papel, e ele voltasse e o atingisse de volta”.

PAIS, Abraham. *Inward Bound — of Matter and Forces in the Physical World*. Nova York: Oxford University Press, 1986. p. 189.

O que chamamos de realidade é um conjunto formado por idealizações e elementos diversos — sejam eles concretos ou abstratos — que variam de acordo com as percepções de cada indivíduo. Logo, realidade é um conceito relativo. Quando falamos de realidade física, nos referimos a algo resultante de estudos científicos, bem organizados, com base em representações coerentes com o mundo físico. Sendo assim, a realidade está condicionada ao modo como é representada. As realidades de cada momento histórico são mutáveis, pois os conhecimentos estão em contínua evolução e profundamente influenciados pelas necessidades humanas.

Novas realidades, antes consideradas pura ficção, passam a ser estudadas e aceitas pela comunidade científica. No início do século XXI, já se fala em “multiversos” e universos paralelos ao nosso.

Neste capítulo, estudaremos um pouco a respeito de uma “nova” realidade descoberta há cerca de um século pelos físicos: o mundo da Física Quântica.

No capítulo anterior, vimos como os esforços despendidos em resolver um problema de fronteira, entre o Eletromagnetismo e a Mecânica, resultaram no surgimento da Teoria da Relatividade.

O fato de que a velocidade da luz é um invariante, qualquer que seja o referencial adotado, nos trouxe novas maneiras de encarar o espaço e o tempo, a matéria e a energia.

Essas inovações, no entanto, não explicavam certas anomalias que se verificavam nos domínios do microscópico, e que se manifestavam novamente num terreno fronteiriço, situado desta vez entre a Termodinâmica e o Eletromagnetismo.

A explicação para essas anomalias não pôde ser encontrada no âmbito da Física Clássica, onde, para cada objeto físico e um determinado conjunto de causas e efeitos, existe um conjunto de leis matemáticas capazes de descrever seu comportamento.

Na virada do século XIX para o século XX, matéria e energia eram componentes do Universo que apresentavam naturezas distintas.

Para a descontinuidade da matéria, obteve-se uma explicação com a descoberta dos elétrons em 1897 e do núcleo por Ernest Rutherford em 1911, mas a energia seguiria sendo um fluido contínuo.

O que havia de mais notável na energia luminosa era o fato de existir um modelo ondulatório para explicar alguns fenômenos como a difração, enquanto outros como a reflexão e a refração eram explicados com base no modelo corpuscular. Essa dualidade era um incômodo na visão determinista da Física Clássica.

Esse determinismo estava fundamentado na premissa de que, conhecendo-se as condições iniciais de um sistema e suas variáveis, seria possível prever, com toda certeza, seu comportamento em qualquer instante posterior, independentemente da presença do observador. Em outras palavras, a Física praticava uma visão de mundo eminentemente causal.

Havia outras nuvens escuras no céu azul da Física Clássica:

- a distribuição de energia na radiação do corpo negro não coincidia com os resultados previstos pela teoria;
- os valores experimentais para o calor específico de sólidos eram menores que os esperados pela teoria;
- o efeito fotoelétrico, ou a emissão de elétrons de uma chapa metálica em que se incide um feixe de luz ultravioleta, não parecia obedecer ao Princípio da Conservação da Energia;
- no efeito Compton, em que a energia de um feixe de raios X diminui na interação com certos materiais como o carbono, tal como no efeito fotoelétrico, não se sabia o que ocorria com a diferença de energia entre o estado inicial e o final;
- a discrepância entre os espectros de absorção e emissão dos gases e de sólidos;
- até o final do século XIX, não se compreendia a estrutura da matéria. O gás era o único estado da matéria que tinha um modelo convincente e de acordo com as observações efetuadas. Era incompreensível como os átomos podiam formar corpos sólidos; lembre-se de que as estruturas cristalinas dependem da rede de elétrons, que sequer haviam sido descobertos ainda!

Nenhum desses fenômenos podia ser explicado em termos das leis causais da Física que haviam sido formuladas até então.

Um dos grandes sucessos da teoria eletromagnética no século XIX foi o modelo proposto por James C. Maxwell, que postulou que a luz seria uma forma de radiação eletromagnética, fato comprovado por Heinrich Hertz.

Mas o grande problema teórico era entender de que modo se dava a interação da matéria com a radiação. Historicamente, a teoria quântica surgiu da tentativa de compreender essa interação e da interpretação dada para a matéria, visto que algumas leis objetivas da Física Clássica simplesmente não se encaixavam.

Como todo processo de desenvolvimento, também a história da teoria quântica não foi linear: as outras discrepâncias acima citadas também empurraram a pesquisa na direção da teoria quântica, porém os resultados obtidos se mostraram tão desconcertantes que, a princípio, os cientistas que se envolveram nessa empreitada sequer estavam certos da validade de suas descobertas, como Max Planck (1858-1947) e o próprio Albert Einstein.

A Teoria Quântica é o modelo teórico de maior sucesso construído até hoje, pois concorda no grau de precisão obtido até agora com dados experimentais; ela confirma dados da suposta existência do *big bang*, há quatorze bilhões de anos, até trilionésimos de segundos depois de sua ocorrência! A tecnologia envolvida na produção de semicondutores e computadores, na criogenia, na eletrônica fina e no desenvolvimento de novos materiais fundamenta-se na Teoria Quântica.



Archives Charmet/The Bridgeman Art Library/Grupo Keystone

James Clerk Maxwell (1831-1879) foi um cientista escocês. Seus trabalhos propiciaram grandes avanços na Termodinâmica e no Eletromagnetismo e produziram os subsídios para a Relatividade Restrita e a Mecânica Quântica.

Segundo o professor Elcio Abdalla, do Instituto de Física da USP, 30% do produto interno bruto norte-americano depende dos resultados obtidos na aplicação da Teoria Quântica à tecnologia.

Apenas na década de 1920, com as contribuições de Louis de Broglie, Erwin Schrödinger, Werner Heisenberg, Niels Bohr e outros para uma compreensão mais profunda da dualidade onda-partícula, a Teoria Quântica transformou-se na mecânica quântica.

Você verá a seguir um breve relato histórico dos experimentos que levaram à formulação da Teoria Quântica. Estão listados de modo sucinto os principais resultados alcançados e nomeados os autores da teoria.

É importante que você perceba que as inovações propostas eram tão radicais que a comunidade científica não acolheu ou acatou imediatamente todos os resultados, e muitas controvérsias ainda perduram.

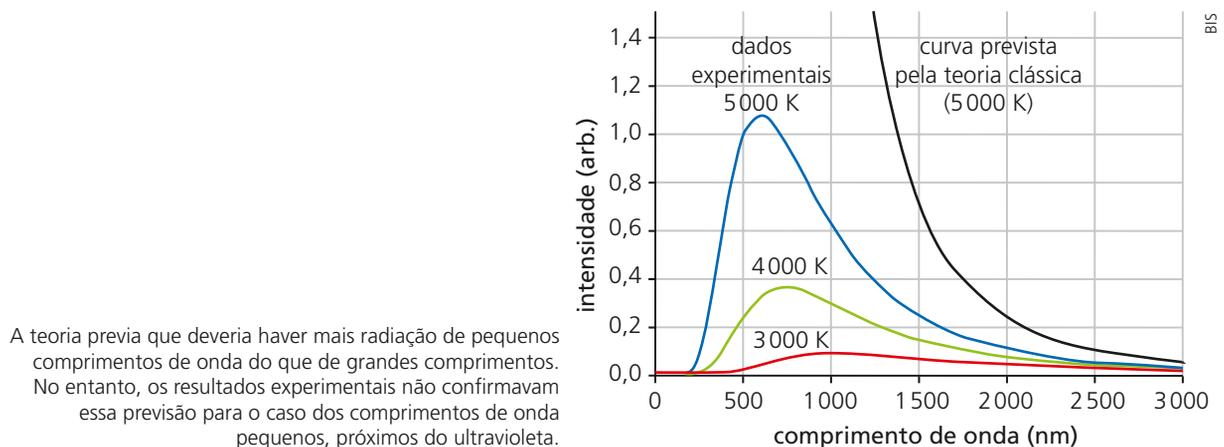
## A radiação do corpo negro

Em Termodinâmica, estudamos os conceitos de estado de um gás e de distribuição de energia, que se baseiam em leis probabilísticas.

Vimos também as características do objeto teórico chamado corpo negro, que, quando em equilíbrio térmico com a vizinhança, emite toda a radiação que recebe, de forma contínua.

Aprendemos que o poder emissor  $E$  de um corpo negro ideal (potência irradiada por unidade de área), a certa temperatura absoluta  $T$ , é função de  $T$  segundo a expressão  $E = \sigma \cdot T^4$ , onde  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann.

O que indica essa expressão? Aumentando-se a temperatura, a intensidade da radiação aumenta. De fato, as curvas de intensidade para um corpo negro tem o seguinte aspecto:



Segundo a teoria clássica, a energia emitida deveria tender ao infinito à medida que o comprimento de onda da radiação fosse diminuindo. A esse fenômeno deu-se o nome de "catástrofe do ultravioleta".

O primeiro passo na direção do desenvolvimento da Teoria Quântica foi dado por Max Planck, em 1900, ao tentar resolver essa discordância.

Ele retomou a expressão que previa o aumento da intensidade de radiação e fez alterações consistentes com as leis da Termodinâmica e do Eletromagnetismo, tornando-a compatível com os resultados experimentais obtidos.

No entanto, para que a nova expressão fizesse sentido, Planck supôs que a radiação fosse produzida por elétrons oscilando de maneira que gerassem uma energia de intensidades específicas, múltiplas, sempre de um valor definido que fosse função adequada da frequência de radiação:

$$E = h \cdot f$$

em que  $h$  é uma constante de proporcionalidade denominada pelo próprio Planck de *quantum* de ação, cujo valor é  $6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ .

Os corpúsculos de energia que compunham a luz e quaisquer radiações eletromagnéticas receberam o nome de **quanta** (*quantum* no singular) e passaram a ser considerados como se fossem compostos de “pacotes energéticos” ou partículas.

O que Planck construiu foi um modelo em que a energia não é uma grandeza contínua, mas quantizada ou compartimentada em pequenos pacotes ou *quanta* de energia.

A hipótese pareceu tão bizarra que só foi aceita plenamente pela comunidade científica anos mais tarde.

Mesmo o próprio Planck declarou, em várias oportunidades posteriores à publicação do trabalho, em 1901, que aquela interpretação tinha sido uma tentativa desesperada de dar uma solução teórica ao problema da radiação, ainda que “a qualquer custo”.

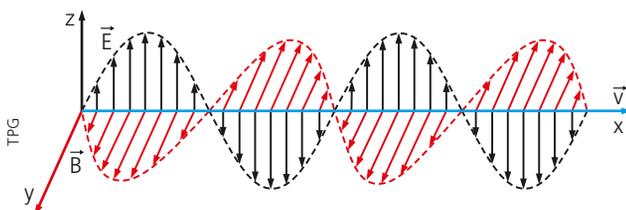
## O espectro eletromagnético

No estudo do Eletromagnetismo, vimos que os campos elétrico e magnético estão relacionados de modo que a variação de um deles induz ou origina o outro.

Os resultados dessa interação foram sintetizados admiravelmente nas equações de James Clerck Maxwell (1831-1879), na segunda metade do século XIX. Ele também previu a existência de um tipo de onda que viria a ser denominada **onda eletromagnética**.

Experimentalmente, as propriedades das ondas eletromagnéticas previstas por Maxwell só foram confirmadas após sua morte, por Heinrich Hertz (1857-1894).

Sabemos hoje que as ondas eletromagnéticas são perturbações oriundas da interação entre campos **elétrico** ( $\vec{E}$ ) e **magnético** ( $\vec{B}$ ), variáveis no tempo, em induções recíprocas, perpendiculares entre si e perpendiculares à direção de propagação, com a velocidade  $v$  igual à da luz no meio de propagação.



Representação dos campos magnético e elétrico em uma onda eletromagnética.

Maxwell havia demonstrado que, no vácuo, a propagação da onda eletromagnética teria a velocidade  $v = c$ :

$$c = \sqrt{\frac{1}{\epsilon_0 \cdot \mu_0}}, \text{ em que } \epsilon_0 = \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} \frac{\text{F}}{\text{m}} \text{ e } \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \frac{\text{m}}{\text{A}}.$$

Assim,  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ .

As ondas eletromagnéticas possuem uma ampla variedade de frequências, podendo ir, em princípio, de zero a infinito. De acordo com a faixa de frequências, essas ondas recebem nomes distintos.



Edgard Fahs Smith Collection/Deutsches Museum, Germany

Contrariando os resultados obtidos pela teoria ondulatória, o físico alemão Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858-1947) propôs que a interação entre matéria e energia só poderia ocorrer em determinados valores de energia, múltiplos de um valor mínimo. Mas nem o próprio Planck ficara satisfeito com a teoria e, por várias vezes, tentou encontrar algum modo de explicar a radiação de corpo negro que preservasse o caráter contínuo da luz. A despeito de suas próprias dúvidas, o trabalho mostrou-se de tamanha relevância que Planck foi laureado com o prêmio Nobel de 1918.

## Construindo um espectroscópio

### Análise de espectros de absorção e associação com o modelo atômico

Como será que os astrofísicos sabem a composição da atmosfera de um planeta distante sem nunca ter colhido amostras?



O modelo atômico de Bohr permite resolver problemas como esse aplicando a análise das bandas de absorção de energia eletromagnética.

Cada elemento químico possui um espectro de absorção específico em relação à luz. Isso oferece uma característica particular que permite identificá-lo, pois as bandas de energia mostradas nos espectros de elementos distintos são diferentes.

Nessa atividade, sugerimos a construção de um espectroscópio rudimentar, que possibilitará a análise qualitativa do fenômeno.

#### Material

- um CD gravável
- uma caixa de creme dental
- fita adesiva transparente
- fita isolante
- tesoura (capaz de cortar o CD)

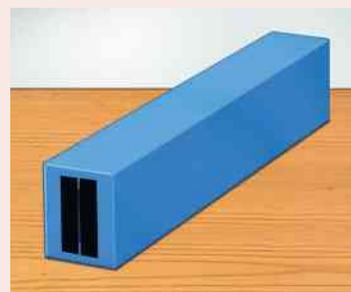


Fernando Favoretto/Criar Imagem

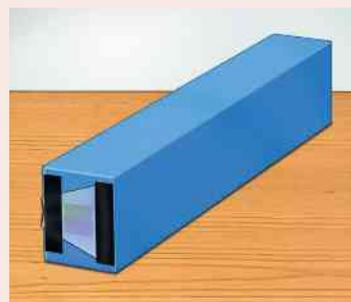
#### Procedimento

- I. Cubram a superfície de um CD gravável (o lado onde está impressa a marca do fabricante) com fita adesiva.
- II. Cortem-no em oito pedaços iguais, como se fosse uma pizza.
- III. De posse dos pedaços, simplesmente descolem a fita adesiva, e vocês verão que a tinta sairá e sobrá uma parte transparente dos pedaços do CD. Evitem tocar essa superfície transparente com os dedos.
- IV. Façam um orifício retangular em uma das pontas da caixa de creme dental. O espaço deve servir para caber a parte do CD cortada.
- V. Coloquem o pedaço do CD no orifício e fixem com fita isolante, como na figura.
- VI. Na outra ponta da caixa, façam um fino corte de 1 mm e cubram o resto com fita isolante para vedar a passagem de luz.

Pronto! Vocês já possuem um espectroscópio rudimentar que pode ser utilizado para observar algumas fontes de luz. Para usá-lo corretamente, apontem com o corte fino para o objeto que desejam olhar e observem-no com o lado do CD.



Ilustrações: Studio Caparroz



#### Discussão

1. Aponte para a lâmpada fluorescente da sala de aula e veja o desenho que se forma.
  - a) Por que a imagem obtida é colorida?
  - b) O desenho da imagem é contínuo? Há falhas?
  - c) Existem cores mais fortes do que outras?
  - d) Descreva sucintamente, com base no que aprendeu até agora, as causas desse comportamento.
2. Agora aponte para o céu azul em um dia claro. Por que o desenho da imagem é diferente do desenho obtido no caso da lâmpada fluorescente?

Ver Orientações Didáticas.

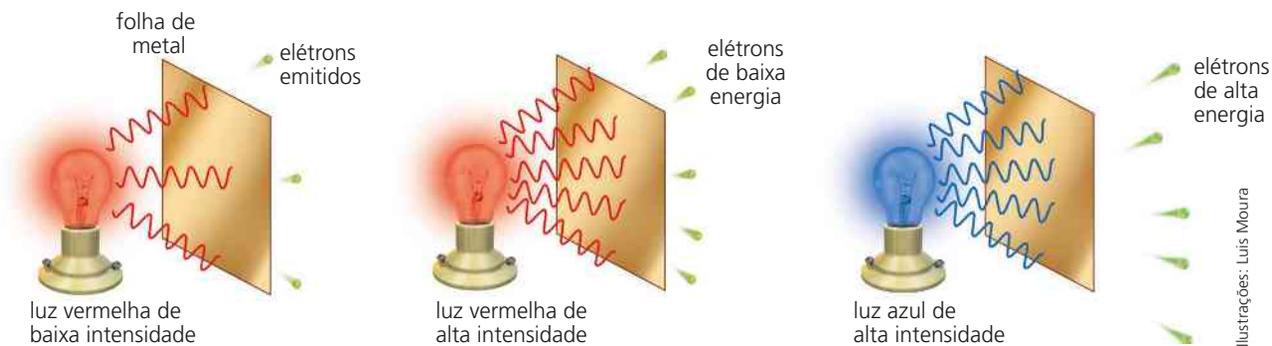
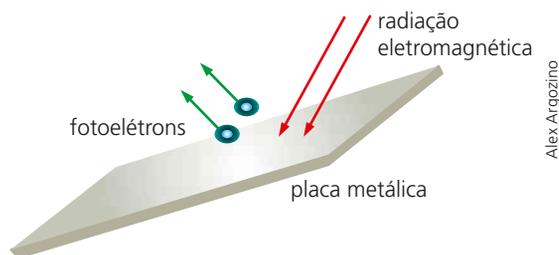
## O efeito fotoelétrico

O físico russo Alexander Staletov (1839-1896) e o físico alemão Heinrich Hertz (1857-1894), na metade do século XIX, observaram que radiações eletromagnéticas de um tipo específico, ao incidirem sobre a superfície de uma placa metálica, faziam com que elétrons pertencentes a ela escapassem, após absorverem certa quantidade de energia. Esse fenômeno é denominado **efeito fotoelétrico**.

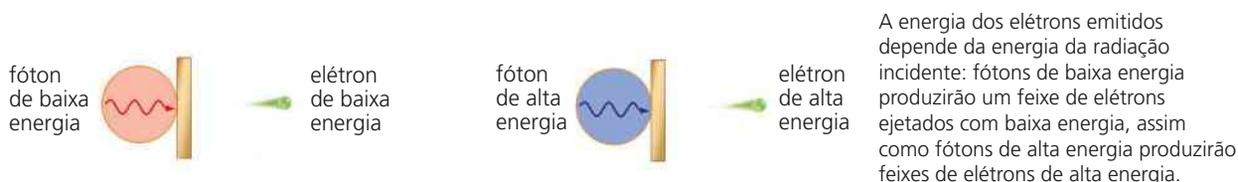
Einstein, em 1905, utilizou-se da noção de quantização da energia proposta por Planck anos antes e, ao postular que qualquer forma de energia poderia ser quantizada, esclareceu os fenômenos do efeito fotoelétrico. O trabalho rendeu a ele o prêmio Nobel de Física de 1921.

Se o efeito fotoelétrico ocorre de fato, por que motivo não percebemos a movimentação de cargas simplesmente iluminando uma placa metálica, já que a luz é uma radiação eletromagnética?

A questão é que nem toda radiação provoca o efeito fotoelétrico, mas apenas as mais energéticas. Veja o esquema a seguir:



Quando iluminada por uma luz de baixa energia, como é o caso da vermelha, os elétrons emitidos pela placa também apresentam baixa energia, mesmo que a fonte tenha grande intensidade.



Einstein denominou os elementos de onda cuja energia é compartimentada em **quanta de luz**, de **fótons**.

Cada fóton carrega um *quantum* de luz e a energia  $E$  de cada fóton — ou um *quantum* de energia de radiações eletromagnéticas — é proporcional à sua frequência  $f$  ( $E = h \cdot f$ , em que  $h$  é a constante de Planck).

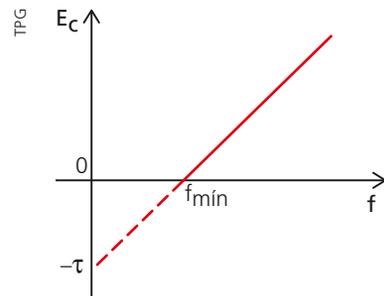
Cada um dos fótons cede sua energia a um único elétron, e cada elétron que escapa do metal deve absorver um mínimo de quantidade de energia denominada função trabalho ( $\tau$ ), cujo valor é característico de cada metal. Como não existem frações de um fóton, um elétron absorve um fóton ou nada absorve.

Se  $E \geq \tau$ , o elétron escapa do metal. A diferença  $E - \tau$  corresponde à energia cinética  $E_c$  adquirida pelo elétron, pois  $\tau$  é a quantidade mínima de energia necessária para ele escapar.

Desse modo, a equação fotoelétrica de Einstein,  $E_c = h \cdot f - \tau$ , nada mais é que uma expressão do princípio de conservação da energia para o efeito fotoelétrico.

O valor mínimo da frequência ( $f_{\text{mín}}$ ) da radiação eletromagnética a partir do qual os elétrons podem escapar é dado pela razão  $f_{\text{mín}} = \frac{\tau}{h}$ . Por qual motivo? Para  $f = f_{\text{mín}}$ , teremos  $E_c = 0$ , e daí  $h \cdot f_{\text{mín}} = \tau$  ou  $f_{\text{mín}} = \frac{\tau}{h}$ .

Logo, o diagrama  $E_c \times f$  tem o seguinte aspecto:



Qual é o significado do coeficiente angular da reta? Esse valor depende do metal utilizado? Robert Millikan não acreditou nos resultados apresentados e passou mais de dez anos tentando refutá-los, sem sucesso. Ironicamente, seu trabalho sobre cargas elétricas elementares e efeito fotoelétrico (que lhe valeu o prêmio Nobel de 1923) dependeu desse valor.

De que maneira esse diagrama é afetado pelo tipo de material? A frequência mínima da radiação eletromagnética é também conhecida como frequência de corte e varia de metal para metal.

Exemplos:

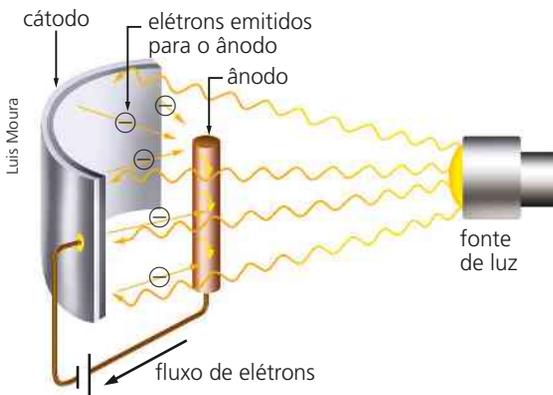
- potássio:  $4,2 \cdot 10^{14}$  Hz;
- sódio:  $5,5 \cdot 10^{14}$  Hz;
- prata:  $1,14 \cdot 10^{15}$  Hz.

Para medir a energia que um elétron tem, é comum o uso da unidade eV, chamada elétron-volt, cuja equivalência com o joule é:  $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ .

Quando um elétron atravessa uma região no vácuo sob uma diferença de potencial de 1 volt, ele está relacionado a um trabalho de 1 elétron-volt.

O coeficiente angular é exatamente a constante de Planck e independe do material utilizado.

## A célula fotoelétrica



A célula fotoelétrica é um dispositivo onde o efeito fotoelétrico é provocado. Veja no esquema ao lado que ela é constituída de:

- um cátodo, cuja superfície côncava é revestida por uma camada fina de óxido de metal alcalino ou prata;
- um ânodo;
- uma ampola de vidro, em cujo interior coloca-se, a vácuo, o cátodo e o ânodo.

O cátodo é ligado ao polo negativo da bateria e o ânodo, ao polo positivo.

A luz que incide no cátodo libera elétrons que são atraídos pelo ânodo, estabelecendo uma corrente elétrica no circuito.

As aplicações do efeito fotoelétrico no nosso cotidiano são encontradas em:

- dispositivos para abertura e fechamento de portas automáticas;
- sistemas de segurança e alarmes;
- interruptores automáticos para a iluminação de vias públicas;
- fotômetros de máquinas fotográficas, que controlam o tempo de exposição de filmes etc.

Na fotografia vemos um modelo comum de sensor de presença, usado para acender a luz de corredores com pouca circulação (*hall* de entrada de apartamento, por exemplo). Funciona com uma fotocélula que é sensível à radiação infravermelha emitida pelo corpo da pessoa.



## PARA SABER MAIS

### Site

#### Departamento de Física da UFPB

Disponível em: <[www.fisica.ufpb.br/~romero/objetosaprendizagem/Rived/20EfeitoFotoeletrico/Site/Animacao.htm](http://www.fisica.ufpb.br/~romero/objetosaprendizagem/Rived/20EfeitoFotoeletrico/Site/Animacao.htm)>.  
Acesso em: 11 fev. 2016.

O departamento mantém em seu *site* objetos de aprendizagem interativos e de fácil utilização. Esses objetos simulam o efeito fotoelétrico e permitem testar com diferentes ajustes, como frequência da luz, intensidade da luz, entre outros.

## Exercícios resolvidos

**ER1.** O comprimento de onda da luz verde é igual a  $5000 \text{ \AA}$  ( $5 \cdot 10^{-7} \text{ m}$ ). Dada a constante de Planck  $h = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ , calcule:

- a frequência da radiação;
- a energia do fóton (*quantum* de luz verde).

### Resolução:

- Usando a equação fundamental das ondas:  
 $c = \lambda \cdot f \Rightarrow 3 \cdot 10^8 = 5 \cdot 10^{-7} \cdot f \therefore f = 6 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$
- Utilizando a equação de Planck:  
 $E = h \cdot f = 6,625 \cdot 10^{-34} \cdot 6 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$   
 $\therefore E = 3,975 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

**ER2.** A função trabalho ( $\tau$ ) para um dado material é igual  $4,2 \text{ eV}$ . Sendo dados:  
 $h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ;  $c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ ;  $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ , calcule:

- a frequência, em Hz, da luz capaz de produzir efeito fotoelétrico com a emissão de fotoelétrons com  $2,0 \text{ eV}$  de energia cinética;
- o comprimento de onda dessa luz, em metros.

### Resolução:

- Sendo  $\tau = 4,2 \text{ eV}$ , podemos aplicar a equação fotoelétrica de Einstein:  
 $E_c = h \cdot f - \tau \Rightarrow 2,0 = h \cdot f - 4,2 \Rightarrow$   
 $\Rightarrow h \cdot f = 6,2 \text{ eV} = 6,2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 9,92 \cdot 10^{-19} \text{ J}$   
Assim, substituindo o valor da constante  $h$ , obtemos:  
 $6,6 \cdot 10^{-34} \cdot f = 9,92 \cdot 10^{-19} \therefore f \cong 1,5 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$
- O comprimento de onda é dado pela relação:  
 $c = \lambda \cdot f$   
 $3,0 \cdot 10^8 = \lambda \cdot 1,5 \cdot 10^{15} \therefore \lambda = 2,0 \cdot 10^{-7} \text{ m}$

## A dualidade da luz e da matéria

Onda ou partícula?

No século XVII, os físicos já haviam produzido duas interpretações sobre a luz.

No experimento realizado por Isaac Newton com a refração do feixe de luz branca, havia uma aceitação tácita da ideia de que a luz tem um caráter material, corpuscular, ainda que ele nunca tenha apoiado abertamente essa posição.

Usando o conceito de frentes de onda, Christian Huygens (1629-1695) mostrou que a luz poderia ser entendida como uma onda.

Assim, o problema a ser suplantado era saber qual das interpretações estava correta — ainda que a influência de Newton tenha pesado muito a favor da teoria corpuscular.

Àquela época não se poderia imaginar que, em certo sentido, ambas as interpretações estavam corretas, uma vez que matéria e energia eram consideradas entidades de naturezas distintas, quase antagônicas.

No século XIX, Maxwell ampliou os conhecimentos sobre o assunto, chegando à teoria eletromagnética, corroborando o caráter ondulatório da luz. De fato, é o caráter ondulatório que permite a explicação de fenômenos como a interferência e a difração da luz, estudadas na Óptica. Mas o efeito fotoelétrico não é compatível com a natureza ondulatória. Somente a teoria corpuscular da luz, considerando-a composta de fótons, pôde esclarecer o fenômeno.



George Paget Thomson (1892-1975) foi um físico britânico. Recebeu o prêmio Nobel de Física em 1937 com Clinton J. Davisson por demonstrar que o elétron comporta-se como uma onda na difração em cristais. George Paget Thomson era filho de Joseph John Thomson (1856-1940), que recebeu o prêmio Nobel de Física em 1906 por descobrir que o elétron comporta-se como uma partícula.



Louis-Victor-Pierre-Raymond, conhecido como Louis de Broglie (1892-1987), foi um físico teórico francês. Uma das principais aplicações do caráter dual da matéria está no desenvolvimento dos microscópios eletrônicos.

Portanto, a luz possui caráter dual; ou seja, ela se comporta como onda ou como partícula, de acordo com o fenômeno analisado. Dessa maneira, os dois modelos complementam-se perfeitamente.

Baseando-se na dualidade onda-partícula para a luz, o físico francês Louis de Broglie apresentou, em 1924, a hipótese de que as partículas também poderiam exibir propriedades ondulatórias.

Três anos depois, ela foi confirmada experimentalmente pelo fenômeno da difração de elétrons, nos experimentos realizados por Clinton Joseph Davisson e George Paget Thomson, entre outros.

De Broglie, então, definiu o comprimento de onda  $\lambda$  associado à partícula, que ficou conhecido como comprimento de onda de De Broglie:

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$$

em que  $h$  é a constante de Planck,  $m$  é a massa da partícula e  $v$  é sua velocidade.

Isso equivale a dizer o seguinte: nos experimentos em que a partícula (um elétron, por exemplo) se comporta como onda eletromagnética,  $\lambda$  será seu comprimento de onda.

Nessa expressão,  $\lambda$  é uma grandeza associada ao caráter ondulatório e o produto  $m \cdot v$  (quantidade de movimento), ao caráter corpuscular.

## Exercício resolvido

**ER3.** O que acontece com o comprimento de onda de De Broglie se a energia cinética de um elétron não relativístico for dobrada?

### Resolução:

O comprimento de onda original é:  $\lambda = \frac{h}{m \cdot v_0}$ ;

se a energia cinética final for o dobro da inicial, temos:

$$E_{c \text{ final}} = 2 \cdot E_{c \text{ inicial}} \Rightarrow \frac{m \cdot v^2}{2} = 2 \cdot \frac{m \cdot v_0^2}{2} \Rightarrow v = v_0 \cdot \sqrt{2}$$

Então, o novo comprimento de onda será:

$$\lambda' = \frac{h}{m \cdot v} = \frac{h}{m \cdot v_0 \cdot \sqrt{2}} = \frac{\lambda}{\sqrt{2}} \Rightarrow \lambda' = \frac{\lambda \sqrt{2}}{2}$$

## O Princípio da complementaridade

Faça incidir um feixe de luz sobre um espelho: ele será refletido — isto é, o feixe voltará ao meio de incidência, sem sofrer alteração. Você já sabe que esse comportamento comprova o caráter ondulatório da luz.

Se apenas essa experiência pudesse ser feita com o feixe de luz, nada nos diria que ela também pode comportar-se como uma partícula, uma vez que seu caráter corpuscular se extingue nesse fenômeno.

Analogamente, o efeito fotoelétrico converte a energia da onda eletromagnética em energia elétrica: a matéria e a luz comportam-se como partículas que interagem e trocam energia. Assim, nada nesse experimento nos dá qualquer indício quanto ao caráter ondulatório da luz.

De fato, qualquer experimento que se realize com a luz ou com a matéria pode evidenciar um e apenas um dos caracteres, que não são contraditórios, mas sim complementares: corpuscular ou ondulatório.

Portanto, a radiação eletromagnética e a matéria apresentam comportamento dual e excludente: ora como onda, ora como partícula.

O **Princípio da complementaridade**, enunciado em 1923 pelo físico dinamarquês Niels Bohr, estabelece que em cada fenômeno físico observado, somente um dos comportamentos se manifesta de cada vez.

Dois fatos importantes que devemos ressaltar:

- Em todo fenômeno relativo a radiações eletromagnéticas que não implique transformação de energia, será observado o caráter ondulatório da radiação.  
Exemplo: a reflexão não transforma a luz em outra forma de energia logo, trata-se de um fenômeno que envolve o caráter ondulatório.
- Em todo fenômeno relacionado com radiações eletromagnéticas cuja energia sofra transformação, a radiação se comportará como partícula.  
Exemplo: o efeito fotoelétrico é a conversão de energia eletromagnética em elétrica; logo, envolve o caráter corpuscular da radiação.

Sob a óptica da conversão de energia, o princípio da complementaridade ganha sentido: não existe nenhum fenômeno conhecido por nós que permita observar simultaneamente os comportamentos ondulatório e corpuscular de uma radiação: observa-se ou o caráter ondulatório ou o caráter corpuscular da radiação.

## O modelo atômico de Bohr

As publicações inovadoras de Planck e Einstein causaram surpresa e grande discussão na comunidade científica, cujo foco principal na época estava dirigido para a determinação do comportamento do átomo: o que fazia com que um sistema no qual partículas negativas circundavam um corpo massivo positivo fosse estável?

De acordo com o eletromagnetismo clássico, cargas aceleradas (como é o caso dos elétrons que realizam órbitas circulares) deveriam emitir radiação eletromagnética e, como consequência, teriam que perder energia.

Por que motivo então o elétron não era capturado pelo núcleo? E por que os espectros de emissão e absorção dos átomos eram descontínuos?

Em 1913, Bohr aproveitou a recente proposição de quantização da energia e postulou que o raio da trajetória do elétron em torno do núcleo atômico não poderia apresentar um valor qualquer.

Em outras palavras, só seriam “permitidas” órbitas determinadas onde não houvesse emissão de radiação. Bohr denominou essas órbitas possíveis como estados estacionários ou quânticos. Enquanto um elétron descreve uma dessas órbitas, ele não emite e não absorve energia.

De acordo com a proposição de Bohr, cada estado estacionário corresponderia a um nível de energia. O nível de menor energia é chamado de estado fundamental, e os demais, de estados excitados.

À medida que aumenta a distância da órbita dos elétrons em relação ao núcleo, os níveis de energia tornam-se maiores. Bohr atribuiu a esses estados um número  $n$  natural, chamado número quântico.

Para o átomo de hidrogênio:

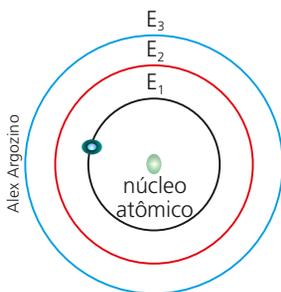
- se  $n = 1$ : estado fundamental;
- se  $n = 2, 3, 4, \dots$ : estados excitados.



Edgard Fahs Smith Collection

Niels Bohr (1885-1962) foi um físico dinamarquês. Trabalhando sob a orientação de Ernest Rutherford e apoiando-se no postulado de quantização da energia de Max Planck, Bohr aperfeiçoou o modelo atômico nuclear de seu mestre e propôs um comportamento em que as trajetórias estavam relacionadas a estados permitidos de energia. Esse trabalho rendeu-lhe o prêmio Nobel de Física de 1922.

Bohr também estendeu o conhecimento sobre a fissão nuclear, porém, percebendo que ele poderia apressar a construção de bombas atômicas, tentou demover os líderes dos aliados na 2ª Guerra Mundial de buscar esse objetivo, sem obter, contudo, sucesso.



Alex Argozzino  
Uma representação bidimensional do átomo, segundo Niels Bohr.

$E_n$  = energia correspondente a cada número quântico  $n$ .

$$E_3 > E_2 > E_1$$

Para o caso específico do átomo de hidrogênio, os possíveis níveis de energia são dados por:

$$E_n = -\frac{13,6}{n^2} \text{ eV}$$

Observe a fórmula: uma vez que os valores de  $n$  são sempre números naturais, as energias em cada estado só podem assumir, de fato, determinados valores.

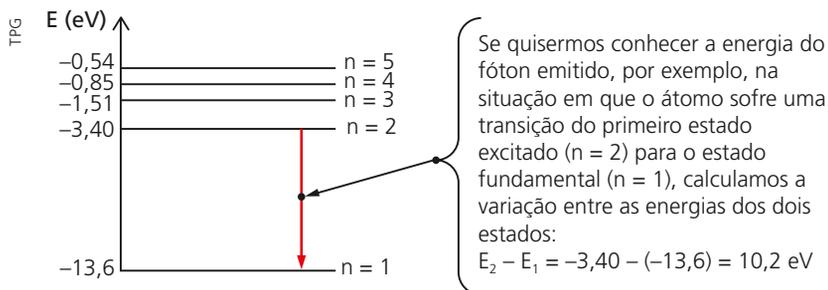
Desse modo, a radiação em jogo, emitida ou absorvida pelo elétron, correspondia à diferença entre os níveis de energia de cada estado.

Bohr não deu explicação para esse fenômeno, mas com o modelo, a existência de um espectro descontínuo dos átomos ficava plenamente esclarecida.

Um elétron só absorve ou emite energia ao passar de um estado para outro (não necessariamente “vizinho”). O valor dessa energia é a diferença entre os níveis energéticos e vale um *quantum* de radiação ( $h \cdot f$ ):

$$|E_{n_{\text{inicial}}} - E_{n_{\text{final}}}| = h \cdot f$$

Um diagrama com os níveis de energia de um átomo — por exemplo, o de hidrogênio — é montado da seguinte forma:



Um dos fatos mais desconcertantes do conhecimento que se produziu nessa época foi o fato de não haver análogos mecânicos satisfatórios associados às equações ou às suas soluções.

Os valores de  $E_n$  não representam propriamente trajetórias — na verdade, sequer sabemos se esse conceito é aplicável aos elétrons —, mas sim a energia associada a esses estados.

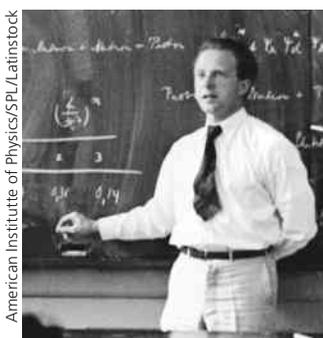
As grandezas clássicas usuais, utilizadas para a descrição de movimentos (posições, velocidades) foram substituídas por matrizes, que funcionaram para lidar com os problemas da estrutura da matéria, mas cujo significado continua sendo uma incógnita.

## O Princípio da incerteza de Heisenberg

Em 1925, Erwin Schrödinger estudou o trabalho sobre a dualidade partícula-onda para a matéria, de Louis de Broglie, e procurou uma função que descrevesse essa onda.

Essa função está relacionada com a evolução no tempo das probabilidades de a partícula assumir qualquer estado quântico. Em outras palavras, a função de onda não mede a posição de uma partícula, mas sim a sua probabilidade de assumir um certo estado energético em um dado instante.

Werner Heisenberg concluiu que é impossível conhecer simultaneamente, com precisão arbitrária (isto é, tão grande quanto desejemos), a posição e a quantidade de movimento de uma partícula ou, então, a energia da partícula e o intervalo de tempo de sua medição.



American Institute of Physics/SPL/Latinstock  
Werner Karl Heisenberg (1901-1976) foi um físico alemão. Aluno de Arnold Sommerfeld, Heisenberg trabalhou com Niels Bohr em Copenhague. Além de estabelecer o princípio da incerteza, Heisenberg contribuiu para o avanço da Física Nuclear, trabalhando com Otto Hahn no esforço de guerra alemão para produzir a bomba atômica.

Isso equivale a dizer o seguinte: quando se tem uma grande precisão na determinação do valor da quantidade de movimento ou da energia, é baixa a precisão obtida no cálculo do valor da posição ou do tempo, e vice-versa.

Essa proposição foi mais uma evidência de que a Física Clássica e seu caráter determinista não se aplicam nos domínios dos elementos estruturantes da matéria. Sendo  $h$  a constante de Planck e:

- sendo  $\Delta s$  = incerteza na posição e  $\Delta Q$  = incerteza na quantidade de movimento, vale  $\Delta s \cdot \Delta Q \geq h$ ;
- sendo  $\Delta E$  = incerteza na energia e  $\Delta t$  = incerteza no intervalo de tempo, vale  $\Delta E \cdot \Delta t \geq h$ .

Outra observação muito importante é que o conceito de medida sofreu uma alteração drástica na Física Quântica. Não se pode medir uma grandeza associada a uma partícula sem interferir com ela. De fato, existem valores determinados para a posição e velocidade, mas o fato de não podermos obtê-las isoladamente com precisão tão grande quanto queiramos é uma decorrência do fato de que elas não são independentes uma da outra.



Heisenberg/CartoonStock

FAÇA NO CADERNO NÃO ESCREVA NO LIVRO

**OUTRAS PALAVRAS**

**O gato de Schrödinger**

Leia agora um texto do professor Luiz Ferraz Netto sobre um paradoxo que ilustra como podem ser peculiares os resultados de observações, à luz da Teoria Quântica.

Quando falamos sobre o “gato de Schrödinger” estamos nos referindo a um paradoxo que aparece a partir de um célebre experimento imaginário proposto por Erwin Schrödinger em 1937, para ilustrar as diferenças entre interação e medida no campo da Mecânica Quântica.

O experimento mental consiste em imaginar um gato aprisionado dentro de uma caixa que contém

um curioso e perigoso dispositivo. Esse dispositivo se constitui de uma ampola de frágil vidro (que contém um veneno muito volátil) e um martelo suspenso sobre essa ampola de forma que, ao cair, essa se rompe, liberando o gás venenoso com o qual o gato morrerá. O martelo está conectado a um mecanismo detector de partículas alfa, que funciona assim: se nesse sensor chegar uma partícula alfa que seja, ele é ativado, o martelo é liberado, a ampola se parte, o gás escapa e o gato morre; pelo contrário, se nenhuma partícula chegar, nada ocorrerá e o gato continuará vivo.



Ilustrações: Alberto De Stefano

De acordo com a interpretação de Copenhague, o gato está vivo e também está morto, existindo uma superposição de estados.

Quando todo o dispositivo estiver preparado, iniciamos o experimento. Ao lado do detector colocamos um átomo radioativo que apresente a seguinte característica: ele tem 50% de probabilidade de emitir uma partícula alfa a cada hora. Evidentemente, ao cabo de uma hora só terá ocorrido um dos dois casos possíveis: o átomo emitiu uma partícula alfa ou não a emitiu (a probabilidade que ocorra um ou outro evento é a mesma). Como resultado da interação, no interior da caixa o gato estará vivo ou estará morto. Porém, isso não poderemos saber — a menos que se abra a caixa para comprovar as hipóteses.

Se tentarmos descrever o que ocorreu no interior da caixa, servindo-nos das leis da Mecânica Quântica, chegaremos a uma conclusão muito estranha. O gato viria descrito por uma função de onda extremamente complexa resultado da superposição de dois estados, combinando 50% de “gato vivo” e 50% de “gato morto”. Ou seja, aplicando-se o formalismo quântico, o gato estaria por sua vez “vivo” e “morto”; correspondente a dois estados indistinguíveis!

A única forma de averiguar o que “realmente” aconteceu com o gato será realizar uma medida: abrir a caixa e olhar dentro. Em alguns casos encontraremos o gato vivo e em outros o gato morto.

## Por que isso?

Ao realizar a medida, o observador interage com o sistema e o altera, rompendo a superposição dos dois estados, com o que o sistema decanta em um dos dois estados possíveis.

O senso comum nos predispõe que o gato não pode estar vivo e morto. Mas a Mecânica Quântica afirma que, se ninguém olhar o interior da caixa, o gato se encontrará numa superposição dos dois estados possíveis: vivo e morto.

## Organizando as ideias do texto

Considere que a experiência com o gato de Schrödinger representa uma transição entre dois estados. Vamos chamar (1) ao estado inicial e (2) ao estado final.

1. Descreva o estado do gato em (1).
2. Você abre a caixa em (2). O estado do gato está determinado. O que acontece com o outro estado?
3. Por que o experimento mental de “o gato de Schrödinger” é um paradoxo?  
Professor, veja [Orientações Didáticas](#).

Essa superposição de estados é uma consequência da natureza ondulatória da matéria, e sua aplicação à descrição mecânico-quântica dos sistemas físicos é que permite explicar o comportamento das partículas elementares e dos átomos. A aplicação disso aos sistemas macroscópicos como o gato ou, inclusive, se assim o preferir, a qualquer professor de Física Quântica, nos levaria ao paradoxo proposto por Schrödinger. [...]

## Comentário

Quando se recorre à imagem do “gato de Schrödinger” já sabemos que estamos nos referindo a um dos aspectos mais singulares e misteriosos da Mecânica Quântica, a saber, que tais fenômenos quânticos necessitam, para ocorrer, da consciência de um observador. [...]

Não é que o resultado seja positivo ou negativo (todavia, desconhecido), não, é mais estranho ainda: o novo estado da partícula em questão (e suas possíveis consequências) não existe de nenhuma maneira até que seja verificado pela observação. Ainda não entenderam? Certo, junte-me a essa lista.

Richard Feynman, prêmio Nobel de Física, já dizia: “quem não ficar pasmado com a Física Quântica é porque não a compreendeu”. Pasmem!

Como ninguém entendeu nada, vale salientar que esse experimento mental tem outra versão: no exterior da caixa há uma partícula cuja função de onda entra em colapso; se o resultado do colapso resultar uma partícula com *spin* positivo o sensor acusa e o gato morre, se resultar com *spin* negativo o sensor nada acusa e o gato vive. Até que se observe o interior da caixa, o gato estará vivo e morto.

*Feira de Ciências*. Disponível em: <[www.feiradeciencias.com.br/sala23/23\\_MA14.asp](http://www.feiradeciencias.com.br/sala23/23_MA14.asp)>. Acesso em: 30 mar. 2016.

## Filme

### Copenhagen

A sólida amizade entre Bohr e Heisenberg foi abalada quando a Segunda Guerra colocou os dois cientistas em lados opostos.

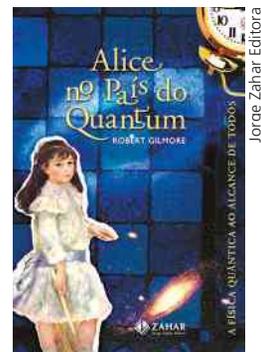
Em um dia no inverno de 1941, Heisenberg procurou Bohr em Copenhagen, e o que discutiram permanece inconcluso. Com respeito a esse evento, o dramaturgo Michael Frayn escreveu uma peça de teatro, que foi posteriormente transformada no filme intitulado *Copenhagen*.

## Livro

### Alice no País do Quantum

Robert Gilmore. Editora Jorge Zahar

O professor Robert Gilmore, da Universidade de Bristol (Inglaterra), apresenta ao leitor os conceitos básicos da Mecânica Quântica e da Física das Partículas com linguagem direta, simples, que vai se aprofundando gradualmente, aproveitando o clima de ficção do original de Lewis Carroll (*Alice no País das Maravilhas*).



## Exercícios propostos



**EP1.** A luz verde do mercúrio tem frequência de  $5,45 \cdot 10^{14}$  Hz. A constante de Planck é dada por  $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$  J  $\cdot$  s e a velocidade da luz é  $c = 3,0 \cdot 10^8$  m/s. Assim, determine:

- a) o comprimento de onda dessa luz, em metros;
- b) a energia, em eV, de um fóton dessa radiação, sendo  $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}$  J.

a)  $5,5 \cdot 10^{-7}$  m; b)  $\approx 2,25$  eV

**EP2.** Por que o valor mínimo da frequência de luz a partir do qual os fotoelétrons podem escapar de sua órbita é dado por  $f_{\min} = \frac{\tau}{h}$ ? Baseie-se na equação fotoelétrica de Einstein para responder.  $E_c = h \cdot f - \tau$ , em que:

$E_c$ : energia cinética;

$h$ : constante de Planck;

$f$ : frequência;

$\tau$ : função trabalho.

Porque a frequência mínima corresponde à situação em que a energia cinética é nula.

**EP3.** A função trabalho ( $\tau$ ) para o tungstênio vale aproximadamente 4,0 eV. São dados:  $h \approx 4,0 \cdot 10^{-15}$  eV  $\cdot$  s;  $c = 3,0 \cdot 10^8$  m/s.

O maior valor do comprimento de onda para que ocorra o efeito fotoelétrico nesse metal é, em metros:

- a)  $1,2 \cdot 10^{-8}$
- b)  $4,0 \cdot 10^{-7}$
- c)  $3,0 \cdot 10^{-7}$  X
- d)  $3,0 \cdot 10^{-6}$
- e)  $3,0 \cdot 10^{-5}$

**EP4.** (Enem-MEC) A dualidade onda-partícula para a luz permite afirmar que:

- a) a luz é a soma de uma partícula e uma onda;
- b) a interpretação ondulatória se aplica a alguns fenômenos, enquanto a interpretação corpuscular a outros; X
- c) a interpretação ondulatória é incompatível com a interpretação corpuscular;
- d) a luz é composta de partículas superpostas em ondas;
- e) a luz é uma partícula que se propaga ao longo de uma onda.

**EP5.** Quais são as proposições corretas dentre as apresentadas a seguir?

- I) O fóton da luz violeta é mais energético que o fóton da luz vermelha por apresentar maior frequência de propagação.
- II) O efeito fotoelétrico é explicado pelo comportamento corpuscular da luz.
- III) Fenômenos como a interferência e a difração da luz são compatíveis com o caráter ondulatório da luz.
- IV) O comportamento ondulatório da luz é tomado como base para compreendermos o efeito fotoelétrico.

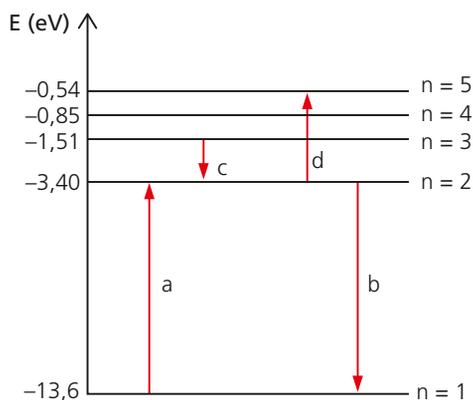
I, II e III são corretas.

**EP6.** Quadruplicando-se a energia cinética de um elétron não relativístico, por quanto fica dividido o comprimento de onda original de sua função de onda?

Por 2.

**Dados para as questões EP7, EP8 e EP9.**

O diagrama representa os níveis de energia do átomo de hidrogênio. As setas indicam as transições entre os estados mostrados.



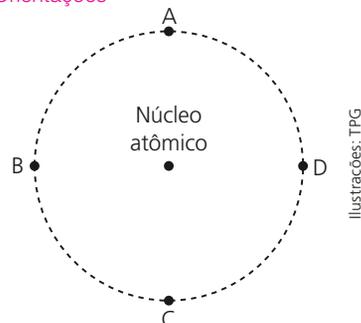
**EP7.** Qual é a energia do fóton emitido quando o átomo sofre a transição do 2º estado excitado para o estado fundamental? **12,09 eV**

**EP8.** Qual das transições representadas tem a emissão de um fóton com o menor comprimento de onda? **b**

**EP9.** Qual é o comprimento de onda do fóton emitido na transição do 2º estado excitado para o estado fundamental? Dado:  $h = 4,13 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$ .  **$1,02 \cdot 10^{-7} \text{ m}$**

**EP10.** Tomando como referência o modelo atômico de Bohr, os elétrons se movimentam em torno do núcleo. Então, é possível dizer que um dado elétron pode estar com a velocidade exata de  $1,00 \cdot 10^7 \text{ m/s}$ , quando estiver passando exatamente pela posição A da figura?

Resposta nas Orientações Didáticas.



Ilustrações: TPG

**EP11.** A Mecânica Quântica substituiu a ideia de "trajetórias semelhantes às órbitas planetárias" (para os elétrons deslocando-se em torno do núcleo atômico) pela expressão:

- a) trajetória elíptica;
- b) estado quântico;
- c) função trabalho;
- d) nuvem eletrônica; **X**
- e) dualidade eletrônica.

**EP12.** (Udesc) A emissão de elétrons de uma superfície, devido à incidência de luz sobre essa superfície, é chamada de **efeito fotoelétrico**. Em um experimento, um físico faz incidir uma radiação luminosa de frequência  $f$  e intensidade  $I$  sobre uma superfície de sódio, fazendo com que  $N$  elétrons sejam emitidos desta superfície. Em relação aos valores iniciais  $f$  e  $I$ , assinale a alternativa que apresenta como devem variar a frequência e a intensidade da luz incidente para duplicar o número de elétrons emitidos:

- a) duplicar a frequência e manter a intensidade.
- b) manter a frequência e duplicar a intensidade. **X**
- c) reduzir a frequência pela metade e manter a intensidade.
- d) manter a frequência e quadruplicar a intensidade.
- e) a emissão de elétrons independe da frequência e da intensidade da luz incidente.

# Física Nuclear

Projeto Manhattan é o nome mais conhecido para os esforços de obter as primeiras armas nucleares durante a Segunda Guerra Mundial. Formado por cientistas de todo o mundo e da cooperação entre EUA, Reino Unido e Canadá, esse projeto foi o responsável por criar as bombas nucleares lançadas no Japão e que mataram cerca de 140 mil pessoas diretamente e milhares indiretamente, vítimas da radiação.

No entanto, diversas descobertas nas ciências médicas foram feitas graças às tecnologias criadas durante os estudos para se produzir a bomba atômica. Essas novas tecnologias ajudam na identificação e na cura de doenças graves em milhões de pessoas no mundo.

A partir desses dois fatos podemos ver que uma pesquisa científica pode levar a aplicações benéficas ou não para a sociedade. Dessa forma, podemos julgar uma pesquisa científica como “boa” ou “ruim”?

A ciência não está livre de julgamento, mas, muitas vezes, o conhecimento científico sofre intervenções de outras esferas (política, religiosa, econômica, por exemplo) quando ainda nem existe um destino para o resultado de determinada pesquisa. Os juízos de valores impõem barreiras para o avanço da ciência e isso deve ser evitado pois, como vimos ao longo de todo o curso, a partir da ciência podemos testemunhar uma melhora na qualidade de vida das pessoas. Portanto, o julgamento deve existir não quando falamos do conhecimento científico, e sim quando falamos das aplicações dadas a ele e das consequências que essas aplicações trazem para o mundo.

A radioatividade é um grande exemplo para esse fato: o conhecimento científico dessa propriedade por si só não fere, não agride, não traz benefícios nem malefícios, logo não há por que imaginar que seu estudo deva ser criticado ou proibido; sua aplicação, no entanto, traz consequências que podem mudar a vida de todo o planeta, e isso, sim, deve ser pensado, questionado e debatido.

Ainda hoje, o estudo da radioatividade gera grandes polêmicas, principalmente pelos eventos dos últimos anos envolvendo acidentes com usinas nucleares. Para ajudá-lo na tarefa de debater o uso da radioatividade, veremos neste capítulo o que ela é, quais os processos radioativos mais importantes, com que tipo de partículas e com qual ordem de grandeza das energias estamos lidando neste campo. É importante sempre termos em mente que o conhecimento é a principal ferramenta para formularmos opiniões abalizadas, afastarmos preconceitos e exercermos a cidadania.

## O átomo, até a década de 1950

Na Antiguidade, os átomos eram considerados indivisíveis. A ideia de que podia haver partes do átomo é recente na história da ciência: como você já sabe, apenas no início do século XX identificaram-se o núcleo e a eletrosfera. Nessa época, os físicos já sabiam da existência dos prótons e dos elétrons, e também sabiam que a luz,



Thinkstock/Getty Images

Desde 1945, quando os Estados Unidos conduziram o primeiro teste de detonação de um artefato nuclear, já se contabilizaram mais de 2 000 explosões envolvendo reações nucleares, entre testes e detonações com fins bélicos, levadas a cabo por países americanos, europeus e asiáticos. Fotografia tirada no Pacífico Sul em outubro de 1952.

## Núcleo pesado, eletrosfera leve

- A massa de repouso de um elétron é de aproximadamente  $9,11 \cdot 10^{-31}$  kg, ou seja, mais de mil e oitocentas vezes menor que a massa de repouso de um próton, que vale aproximadamente  $1,67 \cdot 10^{-27}$  kg, ou aproximadamente 1,0073 u.
- A massa de um nêutron, por sua vez, é aproximadamente 0,14% maior que a do próton, ou seja, aproximadamente 1,0087 u.

Note, portanto, que praticamente toda a massa do átomo concentra-se no seu núcleo. Esses valores foram dados em quilogramas ou u, mas no domínio das partículas subatômicas o mais adequado é pensar na massa no contexto da relação massa energia,  $E = mc^2$ . No caso do elétron, por exemplo, a sua massa em  $\text{MeV}/c^2$  é 0,511.

Pergunte aos estudantes se esses dados são suficientes para se calcular a massa atômica do elemento químico carbono (a resposta é sim, e o valor da massa com esses dados é 12,011037 u).

como outras formas de energia, não era emitida de forma contínua, mas em forma de pacotes de energia denominados *quanta*, ou fótons.

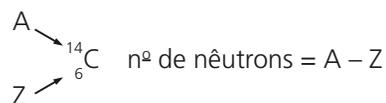
Antes de John Dalton, em 1808, não havia qualquer relação da ideia de átomo com os conceitos da Química: já havia uma sistematização de materiais e propriedades sem necessidade de recorrer a modelos atomistas. Depois de Dalton e da proposição das leis ponderais e volumétricas, foi possível relacionar as características e propriedades das substâncias com os diversos tipos de átomos que as compunham. Essas propriedades foram sistematizadas na Tabela Periódica, uma das maiores realizações da Química. A organização da Tabela se baseou inicialmente na massa relativa dos átomos, evoluindo depois para os números atômicos. Vamos falar um pouco sobre esses valores.

Cada elemento químico se caracteriza por um número determinado de prótons, que é denominado número atômico; a soma dos números de prótons e nêutrons, que são as partículas do núcleo (núcleons), é o número de massa. A unidade de massa atômica (u) é definida como  $\frac{1}{12}$  da massa do átomo de carbono-12 e vale, aproximadamente,  $1,6605 \cdot 10^{-27}$  kg. Esse é o padrão para se medir massas de átomos e moléculas.

Para caracterizar um átomo são necessários seu número atômico (Z), que especifica o número de prótons e representa univocamente o elemento químico, e o número de massa (A), que especifica o número de partículas do núcleo, ou núcleons (prótons e nêutrons). Esses dois números e o símbolo químico do elemento compõem a sua representação padrão:



Há átomos de mesmo elemento químico e de números de massa distintos, e tais átomos são chamados de isótopos. Por exemplo,  ${}^{14}\text{C}$  é a denominação de um isótopo do carbono de número de massa 14:



O  ${}^{14}_6\text{C}$  tem 6 prótons ( $Z = 6$ ) e  $14 - 6 = 8$  (8 nêutrons), dois a mais que a maioria dos átomos de carbono da natureza, que têm 6 nêutrons. A massa atômica do elemento é calculada pela média ponderada das massas dos isótopos de mesmo número atômico. Assim, o carbono tem sete isótopos, sendo que os três mais estáveis são o  ${}^{12}\text{C}$ ,  ${}^{13}\text{C}$  e  ${}^{14}\text{C}$ . Veja na tabela.

Características dos isótopos mais comuns do carbono			
Isótopo	Massa atômica (u)	Abundância relativa (%)	Atividade radioativa
${}^{12}\text{C}$	12,000000	98,9	estável
${}^{13}\text{C}$	13,003355	1,1	estável
${}^{14}\text{C}$	14,003242	menos que 0,01	radioativo

Fonte: Instituto de Física da UFRJ. Disponível em: <[www.if.ufrj.br/~dore/FisRad/MA.pdf](http://www.if.ufrj.br/~dore/FisRad/MA.pdf)>. Acesso em: 10 fev. 2016.

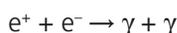
## Outras partículas

Até 1932, prótons, elétrons e nêutrons eram as partículas denominadas *elementares* do átomo. Mas essa situação se alteraria, rápida e drasticamente.

Já em 1930, o físico alemão Wolfgang Pauli havia postulado a existência de uma partícula leve e sem carga, responsável pela conservação de energia em um proces-

so nuclear chamado decaimento beta (que veremos a seguir). Anos mais tarde, essa partícula foi identificada como o neutrino do elétron.

Em 1932, no mesmo ano em que o nêutron foi identificado como uma partícula por James Chadwick (ganhador do prêmio Nobel em 1935 pela descoberta), outro cientista, Carl Anderson, conseguiu detectar uma partícula prevista teoricamente por Paul Dirac, que tinha a mesma massa do elétron, porém com carga positiva. Essa partícula recebeu o nome de pósitron ( $e^+$ ) ou antipartícula do elétron. Pósitrons são estáveis quando isolados; porém, na presença de elétrons, aniquilam-se mutuamente gerando dois fótons:



Sucessivamente, muitas outras partículas e antipartículas foram sendo descobertas e nomeadas, e já se conhecia o papel que cada uma desempenhava no eletromagnetismo ou nos princípios de conservação. Algumas eram de fato elementares, como o elétron e o neutrino; para outras, ainda teríamos de esperar mais alguns anos para identificar seus componentes. Até 1950, as partículas conhecidas eram as do quadro ao lado.

Assim como no caso do pósitron, as antipartículas se aniquilam quando encontram suas simétricas e produzem energia em forma de fótons.

E as descobertas não pararam por aí. De 1950 até os dias de hoje, já são mais de 300 partículas elementares, arranjadas em um programa que pretende explicar a formação de matéria no Universo e a mediação de forças, denominado Modelo Padrão.

Nome	Símbolo	Carga elétrica	Natureza
elétron	$e^-$	-1	elementar
fóton*	$\gamma$	0	elementar
próton	$P^+$	+1	não elementar
neutrino	$\nu_e$	0	elementar
pósitron	$e^+$	+1	elementar
nêutron	$n$	0	não elementar
múon <sup>+</sup>	$\mu^+$	+1	elementar
múon <sup>-</sup>	$\mu^-$	-1	elementar
píon <sup>+</sup>	$\pi^+$	+1	não elementar
píon <sup>-</sup>	$\pi^-$	-1	não elementar
píon <sup>0</sup>	$\pi^0$	0	não elementar

\* O fóton não é uma partícula, no sentido que atribuímos às demais, uma vez que não apresenta carga ou massa.

## Detectores de partículas: a câmara de bolhas

De que modo partículas tão pequenas são detectadas? Em primeiro lugar, devemos recordar que partículas de carga elétrica interagem com campos elétricos e também com campos magnéticos. Particularmente, uma partícula de massa  $m$  carregada com carga elétrica de valor  $q$ , ao entrar com velocidade  $\vec{v}$  em uma região em que há um campo magnético caracterizado pelo vetor indução magnética  $\vec{B}$ , fazendo  $90^\circ$  com este, é forçada a realizar movimento circular de raio  $R = \frac{m \cdot v}{q \cdot B}$ , com sentido dado pela regra da mão esquerda (veja o capítulo 14). Logo, se pudermos observar o comportamento dessas partículas em um campo magnético, podemos inferir algumas de suas características.

A câmara de bolhas tem em seu interior um vapor supersaturado (por exemplo, hidrogênio), rodeado por ímãs potentes que criam os campos magnéticos que vão confinar as partículas. Quando fazemos passar por esse vapor um feixe de partículas muito rápidas, estas criam um rastro de vapor ionizado, que traça a sua trajetória. É desse modo que comparamos massas e cargas de partículas energéticas após serem defletidas pelo campo magnético ou mesmo colidirem com outras partículas.

As câmaras de bolhas foram o método mais eficaz de detecção de partículas até os anos 1970. Hoje, as câmaras de bolhas foram substituídas por sistemas complexos de detectores como os do LHC (sigla em inglês para Grande Colisor de Hádrons), o acelerador gigante de partículas.

## A radioatividade e os processos nucleares

Em 1896, o físico francês Henri Becquerel percebeu que minérios contendo o elemento químico urânio, descoberto no final do século XVIII, emitiam um tipo de radiação, escurecendo chapas fotográficas não veladas. Percebendo que o fenômeno se devia exclusivamente ao urânio, o próximo passo dos pesquisadores para avançar na investigação era purificar o minério.

Durante o processo de purificação do urânio, o casal Pierre e Marie Curie identificou outros elementos, que apresentavam as mesmas propriedades mas com muito maior intensidade. Esse fenômeno foi chamado de radioatividade, e os dois novos elementos químicos foram chamados de polônio — uma homenagem à Polônia, terra natal de Marie — e rádio.

Em que consistia essa propriedade? Ernest Rutherford mostrou, em 1919, que as radiações provinham dos núcleos dos átomos, e não guardavam qualquer relação com a eletrosfera. Mas, sendo o núcleo a região que guarda a identidade dos átomos, a emissão dessas partículas deveria implicar alterações nos elementos químicos.

**Radioatividade:** propriedade dos núcleos atômicos instáveis de emitirem espontaneamente partículas e radiações eletromagnéticas, transformando-se em outros núcleos mais estáveis. Essas reações espontâneas são conhecidas como desintegrações radioativas, decaimentos ou transmutações.

## A FÍSICA NA HISTÓRIA

### Marie Curie

A cientista polonesa Marie Sklodowska Curie (1867-1934) se destacou nos estudos das radiações.

Sua tese de doutorado — *Pesquisas de substâncias radioativas* — valeu-lhe o prêmio Nobel de Física de 1903 com o marido, o físico francês Pierre Curie, e com Henri Becquerel. Em 1911, o trabalho intitulado *Tratado de radioatividade*, em que descreve as descobertas do polônio e do rádio, levou-a a receber mais um prêmio Nobel, desta vez em Química.

Os longos anos de exposição a materiais radioativos, em suas pesquisas, causaram-lhe leucemia, tendo falecido com 66 anos de idade. Sua filha Irene Joliot-Curie e seu genro Frédéric Joliot continuaram a trabalhar na mesma área, sendo agraciados com o prêmio Nobel de Química em 1935 pela descoberta da radioatividade artificial.

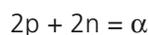


Library of Congress

Marie Curie (1867-1934) tinha um raro talento para a atividade experimental. Foi a primeira mulher a receber um prêmio Nobel, aliás, dois. Outra pessoa a receber duas vezes o prêmio foi Linus Pauling.

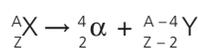
### Emissões alfa ( $\alpha$ )

Em 1911, Rutherford usou uma amostra do recém-descoberto polônio para bombardear a folha fina de ouro; após um determinado tempo, parte da amostra de polônio se transformava em chumbo. Em parceria com Frederick Soddy, Rutherford desvendou a natureza dessas radiações, que na verdade eram partículas do núcleo compostas de 2 prótons e 2 nêutrons. O núcleo do hélio  ${}^4_2\text{He}$  é chamado de partícula  $\alpha$ , pois também é formado por 2 prótons e 2 nêutrons.



A velocidade com que partículas  $\alpha$  são emitidas está entre  $3 \cdot 10^3$  km/s e  $3 \cdot 10^4$  km/s. Tem grande poder de ionização, mas o seu poder de penetração na matéria é pequeno: no ar, por exemplo, é de apenas 8 cm.

Em uma emissão de partículas  $\alpha$ , um átomo tem seu número atômico reduzido em 2 unidades:



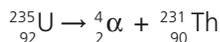
Expressão geral do decaimento alfa

Andrew Brookes, National Physical Laboratory/SPL/Latinstock



Calibração de um equipamento de radioterapia, para determinação da dosimetria (taxa de radiações) em uma exposição.

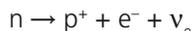
Esta é a forma geral de uma equação nuclear. Perceba que esta notação revela que as cargas e as massas são preservadas. Veja o exemplo do decaimento alfa para o urânio-235:



Um isótopo que sofre um decaimento alfa transforma-se em outro elemento de número atômico diminuído de 2 e número de massa diminuído de 4. Dos dois lados da equação, vemos 92 cargas positivas e 235 núcleons.

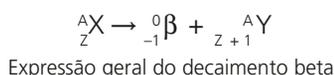
## Emissões beta ( $\beta$ )

As emissões  $\beta$  são elétrons oriundos de nêutrons de núcleos instáveis:

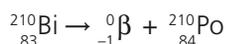


O nêutron desintegra-se em próton, elétron e o neutrino do elétron previsto por Pauli. A presença do próton e do elétron explica a neutralidade elétrica do nêutron.

Observe que o desaparecimento do nêutron dá lugar a um próton, o que não altera o número de massa do isótopo mas varia o seu número atômico de uma unidade:



Como exemplo, veja o decaimento beta do bismuto:



Um isótopo que sofre um decaimento beta transforma-se em outro elemento químico cujo número atômico é aumentado em 1 unidade e não tem variação no número de massa. De que maneira podemos entender a conservação de cargas nessa equação?

Os elétrons das emissões beta são lançados em elevadas velocidades, entre  $7 \cdot 10^4$  km/s e  $3 \cdot 10^5$  km/s, aproximadamente. O poder de penetração das emissões beta é cerca de cem vezes o das emissões  $\alpha$ .

## Emissões gama ( $\gamma$ )

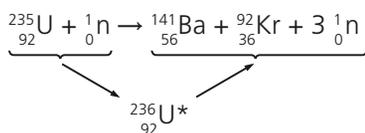
As emissões  $\gamma$  são radiações eletromagnéticas. Sua penetração é maior do que nas emissões  $\alpha$  e  $\beta$ , representando perigo para seres vivos atingidos.

Os comprimentos de onda das emissões  $\gamma$  estão em torno de  $10^{-13}$  m a  $10^{-12}$  m, e a energia dos *quanta* tem valor dado por  $E = \frac{h \cdot c}{\lambda}$  (em que  $h$  é a constante de Planck e  $c$  é a velocidade da luz no vácuo), da ordem de  $10^{-11}$  J, um milhão de vezes mais energéticos que os *quanta* da luz visível.

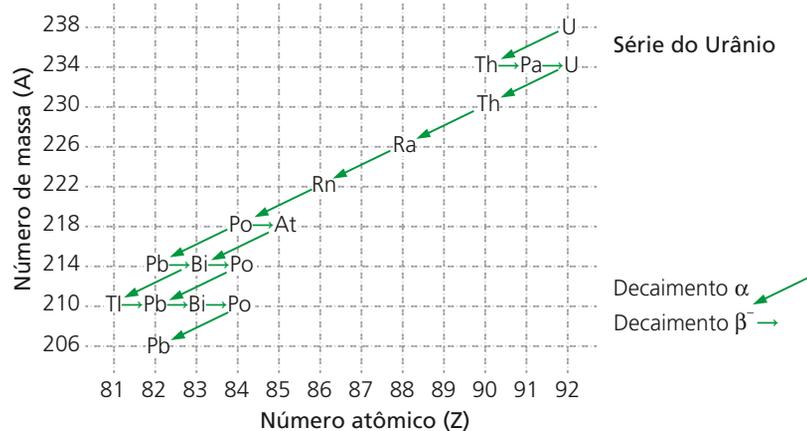
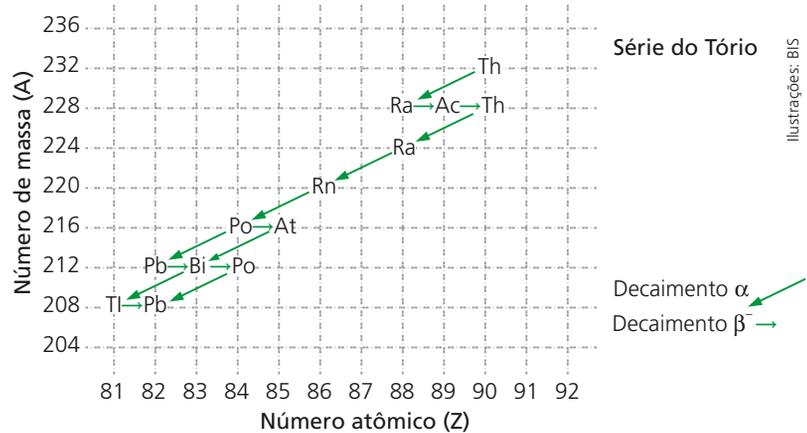
O átomo que emite essas radiações mantém tanto o seu número atômico como o número de massa.

## A fissão nuclear

A fissão nuclear é o fenômeno no qual um núcleo atômico “pesado” é “quebrado” em duas partes, quando atingido por um nêutron. Um exemplo clássico de fissão nuclear é o do urânio 235. Quando ele é atingido por um nêutron, transforma-se em urânio 236, que é instável (símbolo:  $U^*$ ), e oscila até partir em dois núcleos: bário 141 e criptônio 92. No processo, são emitidos 3 nêutrons.



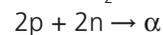
Após a primeira fissão, os nêutrons liberados podem atingir outros núcleos de urânio 235. Isso provoca outras fissões sucessivamente, cada vez em maior número, provocando a famosa **reação em cadeia**.



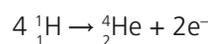
As bombas atômicas são bombas de fissão. A enorme quantidade de energia liberada nas explosões deve-se à transformação de energia potencial dos núcleons em energia cinética dos fragmentos e em fótons. A energia cinética é devida à forte repulsão entre os núcleos de bário e criptônio, que partem com altas velocidades após a quebra do  $^{235}_{92}\text{U}^*$ .

## A fusão nuclear

Observe a formação do núcleo do hélio  $^4_2\text{He}$ :



Essa equação representa um processo nuclear, pois duas ou mais partículas se unem para formar uma partícula maior. É o que ocorre no interior das estrelas, na maior parte de suas vidas, por exemplo, onde quatro átomos de hidrogênio se fundem para formar um átomo de hélio.



Nas fusões nucleares, verifica-se que a massa do produto ( $m_p$ ) é menor que a soma das massas ( $m_r$ ) das partículas que reagem. Nas reações termonucleares em que  $H$  se transforma em  $He$ , há uma "perda" de 0,7% de massa no produto em relação ao estado inicial, e é exatamente a diferença ( $\Delta m = m_p - m_r$ ) que representa energia liberada ( $\Delta E$ ) no processo:  $\Delta E = |\Delta m| \cdot c^2$ .

Com essa liberação de energia, armazena-se na partícula formada uma energia potencial negativa ( $E_p$ ) de módulo igual a  $\Delta E$ :

$$E_p = -\Delta E$$

Seu valor é o somatório das energias potenciais:

- elétrica: dos prótons em repulsão mútua e
- nuclear: dos núcleons em atração.

O valor de  $\Delta E$  (ou módulo de  $E_p$ ) é conhecido como energia de ligação do núcleo. Esta é a energia mínima que um núcleo deve receber para que seja decomposto em seus componentes. Por exemplo, no caso de partículas  $\alpha$ , a energia de ligação vale  $4,38 \cdot 10^{-12}$  J.

## Perguntas sobre o núcleo e duas descobertas

O que faria com que partículas de carga positiva, como os prótons, dividam um espaço tão pequeno como o núcleo atômico e constituam um sistema estável? A resposta a essa pergunta levou à descoberta de outra partícula subatômica, o méson pi ou píon, na qual esteve diretamente envolvido o físico brasileiro Cesar Lattes, e à proposição da existência de uma força atrativa muito forte que agiria entre os núcleons, em distâncias de até  $10^{-15}$  m, que é a ordem de grandeza do tamanho do núcleo. A força forte foi proposta por Hideki Yukawa.



Hideki Yukawa (1907-1981) foi um físico japonês. Agraciado com o prêmio Nobel em 1949 pela previsão de uma partícula mediadora de forças entre prótons e nêutrons no núcleo e da força forte, análoga ao fóton que é a partícula mediadora da força eletromagnética. A força forte é uma das quatro forças fundamentais da natureza.



Cesare Mansueto Giulio Lattes (1924-2005), mais conhecido como Cesar Lattes, foi um físico brasileiro. Fez parte do primeiro grupo de brasileiros que trabalharam com físicos europeus como Cecil Powel, ganhador do prêmio Nobel de 1950 pela descoberta do méson pi. Essa descoberta aconteceu doze anos depois da proposição de Yukawa, e Cesar Lattes teve participação crucial nesse episódio. Cofundador da Unicamp em 1966 e professor na UFRJ, foi o precursor da Física de partículas de alta energia no Brasil.

## As partículas do Modelo Padrão

O Modelo Padrão, apesar do nome, é uma teoria que visa explicar a natureza da matéria e de suas interações. Teve grande progresso a partir de 1960, quando as pesquisas no ramo da física das partículas avançaram rapidamente e outras partículas elementares vieram à luz.

- neutrinos ( $\nu$ ): não possuem carga e praticamente não têm massa (o nome significa pequeno nêutron);
- antineutrinos ( $\bar{\nu}$ ): antipartículas dos neutrinos;
- *quarks* e *antiquarks*: têm cargas elétricas menores que a carga elementar;
- partículas intermediadoras de forças: glúons intermedeiam a força forte, bósons intermedeiam a força fraca, fótons intermedeiam a força eletromagnética.

Até hoje já foram detectadas mais de 300 partículas elementares em aceleradores, colisores e raios cósmicos, que estão identificadas e articuladas no Modelo Padrão. Essa teoria tem explicado com admirável precisão praticamente todos os processos microscópicos de interação conhecidos, desde a formação do Universo

(as interações gravitacionais ainda estão em estudo, pois as partículas intermediadoras, chamadas grávitons, ainda não foram detectadas).

Segundo o Modelo Padrão, toda a matéria é composta de três tipos de partículas elementares: os léptons, os *quarks* e as partículas intermediadoras. Utilizam-se atualmente os seguintes termos para classificar as partículas compostas ou não por *quarks*:

- léptons: não formados por *quarks*; exemplos: elétron, pósitron, múon.
- hádrons: formados por *quarks*:
  - mésons: 1 *quark* + 1 *antiquark*; ex.: píon, káon
  - bárions: 3 *quarks* (ou 3 *antiquarks*); ex.: próton (*up*+*up*+*down*), nêutron (*down*+*down*+*up*)

Tipos de *quarks* e *antiquarks*, com suas respectivas cargas e sabores:

<i>quark up</i> : $\frac{+2 \cdot e}{3}$	<i>antiquark up</i> : $\frac{-2 \cdot e}{3}$
<i>quark down</i> : $\frac{-e}{3}$	<i>antiquark down</i> : $\frac{+e}{3}$
<i>quark strange</i> : $\frac{-e}{3}$	<i>antiquark strange</i> : $\frac{+e}{3}$
<i>quark charmed</i> : $\frac{+2 \cdot e}{3}$	<i>antiquark charmed</i> : $\frac{-2 \cdot e}{3}$
<i>quark botton</i> : $\frac{-e}{3}$	<i>antiquark botton</i> : $\frac{+e}{3}$
<i>quark top</i> : $\frac{+2 \cdot e}{3}$	<i>antiquark top</i> : $\frac{-2 \cdot e}{3}$

O termo "sabor" pode parecer estranho, e de fato é. A questão é que os físicos, ao longo da investigação dessas partículas, verificavam características que não tinham similar no mundo macroscópico, e deram a elas tais nomes por falta de termos melhores. Há sabor, cor, charme e estranheza.

Vista aérea do local onde se situa o LHC, o maior acelerador de partículas do mundo, pertencente ao CERN (Conselho Europeu de Pesquisa Nuclear). O LHC é um túnel circular construído a 100 m de profundidade, entre a França e a Suíça, com 27 km de comprimento. O objetivo desse acelerador, que foi colocado em funcionamento em setembro de 2008, era investigar a formação de partículas na colisão de prótons a altíssimas velocidades. O LHC confirmou, em 2012, a existência do bóson de Higgs, que é a partícula elementar responsável por conferir massa a toda matéria do Universo.



1987-2016 CERN

## Força nuclear

No núcleo de um átomo manifestam-se quatro tipos de interação:

- interação gravitacional: responsável pela força gravitacional, devido às massas;
- interação elétrica: responsável pelas forças elétrica e magnética, devido às cargas;
- interação forte: responsável pela força atrativa entre *quarks*, *antiquarks* e glúons, mantendo os núcleos dos átomos estáveis;
- interação fraca: manifesta-se entre partículas elementares exceto glúons e fótons e é a responsável pelas alterações, por exemplo, nos *quarks* de *down* para *up*.

As interações forte e fraca só se manifestam quando a distância entre as partículas é menor do que  $10^{-15}$  m.

Nessas condições, podem-se comparar as quatro forças da natureza, agindo sobre dois prótons colocados a essa distância. Adotando-se uma escala em que a força gravitacional tenha o valor igual a uma unidade ( $1 = 10^0$ ):

- a força fraca terá ordem de grandeza  $10^{24}$ ,
- a força elétrica,  $10^{35}$ ,
- a força forte,  $10^{37}$ , nas mesmas unidades.

# Meia-vida

A **meia-vida** ou período de semidesintegração é o tempo decorrido para a desintegração da **metade** dos átomos radioativos.

Trata-se de um valor estatístico: sabemos que a cada instante, cada átomo de uma amostra radioativa tem 50% de chance de sofrer um dado decaimento, mas não sabemos na verdade quais serão os átomos que terão sofrido a desintegração. O máximo que sabemos é que, após esse tempo, metade dos átomos da amostra terão se transformado por decaimento.

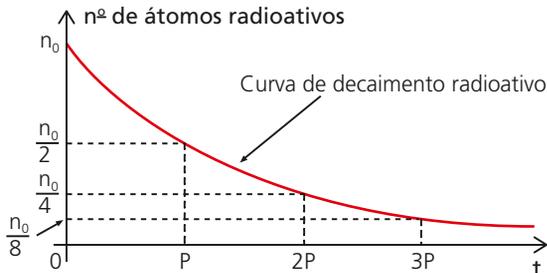
Observe que a cada intervalo de tempo múltiplo da meia-vida  $P$ , as quantidades de material radioativo restante (massa, nº de isótopos ou atividade em emissões por segundo) formarão uma progressão geométrica decrescente de razão  $\frac{1}{2}$ . Assim, sendo

- $n_0 = n^\circ$  inicial de átomos radioativos e
- $n = n^\circ$  final de átomos ainda não desintegrados, vale a relação:

$$n = \frac{n_0}{2^x}$$

em que  $x$  é a quantidade de meias-vidas decorridas. Logo, o tempo total decorrido é de  $\Delta t = x \cdot P$ .

A seguir, um exemplo de diagrama do decaimento radioativo:



BIS

A curva de decaimento radioativo é exponencial e obedece à função:

$$n = n_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}, \text{ em que } e = 2,718\dots$$

Por meio desse diagrama, verificamos a atividade de uma amostra para os mais diversos fins, como medicina nuclear e radioterapia, aplicações na agricultura como traçadores ou marcadores de insetos e outras pragas, aplicações na indústria como combustíveis ou radiografias. Sabemos quanto tempo uma amostra irá durar ou por quanto tempo podemos utilizá-la para o fim especificado.

Esta análise também permite uma reflexão interessante. Após um certo número de meias-vidas, a atividade do isótopo não será suficiente para a aplicação requerida, mas também não será zero: temos, então, o que se chama rejeito ou lixo nuclear. O que fazer, então, com esse material? Essa é uma das questões mais polêmicas quando se trata da utilização e da produção de energia por radioisótopos.



Um material considerado lixo ou rejeito radioativo deve ser muito bem guardado e destinado, para evitar acidentes como o que ocorreu com os rejeitos do césio-137 em Goiânia, em 1987.

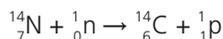
Luciana Whitaker/Olhar Imagem



## De onde vem o carbono-14?

Nossa atmosfera é continuamente bombardeada por raios cósmicos — partículas extremamente rápidas que são formadas na atividade estelar e que cruzam o espaço em todas as direções. Essas partículas são, em geral, prótons ou elétrons oriundos do espaço interestelar ou intergaláctico. Ao colidirem com as partículas da região superior de nossa atmosfera, criam “chuveiros” de partículas secundárias, que provocam várias outras reações e criam partículas que chegam até a superfície.

Uma dessas reações é a formação do carbono-14, que ocorre quando um nêutron rápido — uma das partículas secundárias criadas pelos raios cósmicos — colide com um átomo de nitrogênio-14:



O carbono-14 entra normalmente no ciclo do carbono e então decai a nitrogênio-14 por radiação beta.

Lembrando que os organismos vivos continuam a agregar carbono por toda a vida — por fotossíntese ou alimentação heterótrofa —, seu teor de carbono-14 será o mesmo enquanto viverem. Após a morte, essa porcentagem começa a cair com a meia-vida do isótopo, que é de aproximadamente 5 700 anos. Isso significa que, se um organismo morreu há 5 700 anos, ele terá a metade do conteúdo de carbono-14 de um ser vivo. Libby aproveitou essa regularidade para criar o método de datação: a quantidade atual  $Q$  de carbono-14 pode ser descrita como  $Q = Q_0 \cdot 2^{-\frac{t}{5700}}$ , em que  $Q_0$  é a quantidade de carbono-14 inicial e  $t$  é o tempo decorrido entre o instante da morte e o atual.

Willard F. Libby foi laureado com o prêmio Nobel de Química pelo desenvolvimento do método da datação por carbono-14.

Observe que o método da datação por carbono-14 funciona muito bem desde que se garanta que a taxa de decaimento (ou seja, a meia-vida do isótopo) seja constante, e isso nem sempre ocorre. O tempo de meia-vida e a abundância relativa do carbono-14 na Terra permitiriam estimar a idade de um objeto contendo esse isótopo com até 50 mil anos, mas pesquisas recentes mostram que alterações no campo magnético terrestre ou variações na atividade solar podem alterar significativamente a quantidade de raios cósmicos incidentes na atmosfera e, por conseguinte, a quantidade de carbono-14 ao longo do tempo. Uma solução para esse método é, conhecendo a maneira como variaram essas quantidades no tempo, criar-se uma curva de calibração para as idades de fósseis determinadas pelo decaimento exponencial. Considerando essas incertezas, a determinação da idade de um fóssil por esse processo tem uma incerteza de 15%. Há, ainda, o problema do risco de contaminação de carbono-14 de outras fontes, uma vez que esse elemento é bastante abundante.

Para rochas, é mais adequado empregar radioisótopos com meias-vidas maiores, como o urânio-238 que se converte em chumbo-206 com meia-vida de 4,5 bilhões de anos ou o samário-147 que se converte em neodímio-143 com meia-vida de 106 bilhões de anos. A datação com urânio é mais conveniente uma vez que esse metal é mais abundante que o samário. Há, também, outras técnicas que não levam em conta a atividade radioativa da amostra, como a termoluminescência e a análise dos espectros de massa.

## Exercícios resolvidos

**ER1.** No ano de 1987, ocorreu um acidente envolvendo a radioatividade em Goiânia (GO). Uma cápsula contendo cézio-137 foi violada, contaminando algumas pessoas e o ambiente em que ocorreu o incidente. A meia-vida desse elemento é de 30,2 anos, ou seja, a quantidade de átomos radioativos existentes

numa amostra reduz-se à metade nesse intervalo de tempo. Então, qual é o percentual da quantidade de cézio-137, presente atualmente naquela amostra, em comparação com a quantidade inicial de 1987?

- a) 0%
- b) entre 0% e 25%
- c) 25%
- d) entre 25% e 50%
- e) 50%

### Resolução:

O ano em que haverá a metade (50%) da quantidade inicial será 2017. No ano de 2047, passará a ter 25% da quantidade inicial. Logo, até esse ano, a quantidade estará entre 25% e 50%.

**ER2.** Na determinação da idade de um fóssil, recorreu-se à datação com carbono-14. Sendo sua meia-vida igual a 5 700 anos, qual é a idade de um esqueleto de animal que tem uma fração de carbono-14 igual a um oitavo da normal?

### Resolução:

Se a fração no momento da datação era de  $\frac{1}{8}$ , então temos:  $n = \frac{n_0}{8}$ .

$$\text{Logo: } n = \frac{n_0}{2^x} \Rightarrow \frac{n_0}{8} = \frac{n_0}{2^x} \Rightarrow 8 = 2^x \Rightarrow x = 3$$

Concluimos que se passaram 3 períodos de 5 700 anos:  $3 \cdot 5\,700 \text{ anos} = 17\,100 \text{ anos}$

## OUTRAS PALAVRAS

FAÇA NO CADERNO NÃO ESCREVA NO LIVRO

## Usinas nucleares brasileiras

O programa nuclear brasileiro começou na década de 1950 e culminou com a criação da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto, no Rio de Janeiro. O complexo consta de três usinas, Angra 1, 2 e 3, das quais as duas primeiras já estão em funcionamento.

Acostume-se a visitar sempre que possível os *sites* dos órgãos governamentais. Eles trazem informações riquíssimas para público especializado, investidores, estudantes e o público em geral. Leia a seguir um documento do CNEN, de 2012, que fornece algumas informações sobre a utilização da energia nuclear.

### Segurança nuclear

A construção de uma usina nuclear envolve vários aspectos de segurança, desde a fase de projeto até a construção civil, montagem dos equipamentos e operação.

Um reator nuclear do tipo Angra 1 e Angra 2 é conhecido como PWR (*Pressurized Water Reactor* = reator a água pressurizada), porque opera com água sob alta pressão.

O urânio, enriquecido a cerca de 3,2% em urânio-235, é colocado, em forma de pastilhas de 1 cm de diâmetro, dentro de tubos (“varetas”) de 4 m de comprimento, feitos de uma liga especial de zircônio, denominada “zircalloy”.

### Varetas de combustível

As varetas, contendo o urânio, conhecidas como varetas de combustível, são montadas em feixes, numa estrutura denominada elemento combustível.

O urânio-235, por analogia, é chamado de combustível nuclear, porque pode substituir o óleo ou o carvão, para gerar calor. As varetas são fechadas, com o objetivo de não deixar escapar o material nelas contido (o urânio e os elementos resultantes da fissão) e podem suportar altas temperaturas.

A vareta de combustível é a primeira barreira que serve para impedir a saída de material radioativo para o meio ambiente.



US Department of Energy/SPL/Latinstock

### Vaso de pressão

Os elementos combustíveis são colocados dentro de um grande vaso de aço, com “paredes”, no caso de Angra 1, de cerca de 33 cm e, no caso de Angra 2, de 23,5 cm.

Esse enorme recipiente, denominado vaso de pressão do reator, é montado sobre uma estrutura de concreto, com cerca de 5 m de espessura na base.

O vaso de pressão do reator é a segunda barreira que serve para impedir a saída de material radioativo para o meio ambiente.



SPL/Latinstock

## A contenção

O vaso de pressão do reator e o gerador de vapor são instalados em uma grande “carcaça” de aço, com 3,8 cm de espessura em Angra 1.

Esse envoltório, construído para manter contidos os gases ou vapores possíveis de serem liberados durante a operação do reator, é denominado contenção.

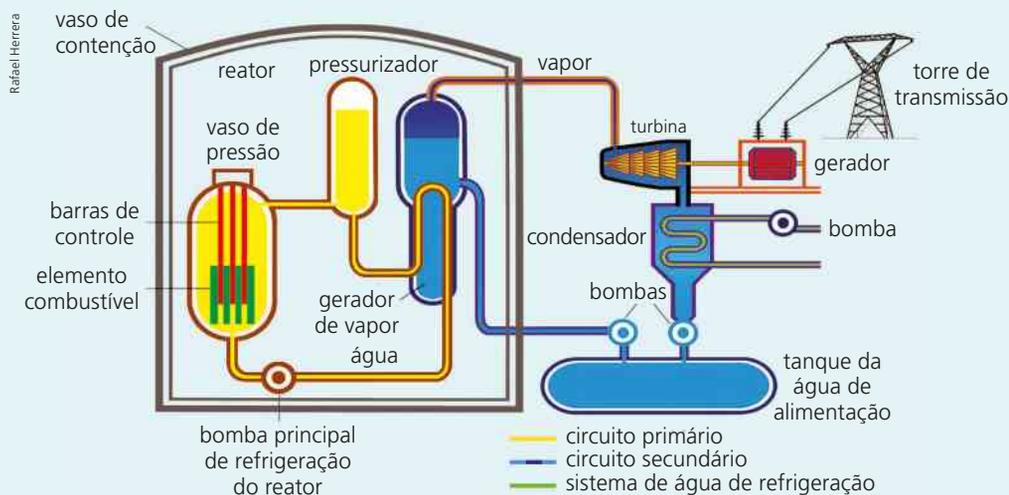
No caso de Angra 1, a contenção tem a forma de um tubo (cilindro). Em Angra 2 é esférica.

## Edifício do reator

Um último envoltório, de concreto, revestindo a contenção, é o próprio edifício do reator. Tem cerca de 1 m de espessura em Angra 1.



O edifício do reator, construído em concreto e envolvendo a contenção de aço, é a quarta barreira que serve para impedir a saída de material radioativo para o meio ambiente e, além disso, protege contra impactos externos (queda de aviões e explosões). Vemos na fotografia os edifícios dos reatores de Angra II à esquerda e Angra I à direita. Fotografia de 2014.



## Circuito primário

O vaso de pressão contém a água de refrigeração do núcleo do reator (os elementos combustíveis). Essa água fica circulando quente pelo gerador de vapor, em circuito fechado, isto é, não sai desse sistema, chamado de circuito primário. Angra 1 tem dois geradores de vapor; Angra 2 tem quatro.

A água que circula no circuito primário é usada para aquecer uma outra corrente de água, que passa pelo gerador de vapor.

## Circuito secundário

A outra corrente de água, que passa pelo gerador de vapor para ser aquecida e transformada em vapor, passa também pela turbina, em forma de vapor, acionando-a. É, a seguir, condensada e bombeada de volta para o gerador de vapor, constituindo um outro sistema de refrigeração, independente do primeiro.

O sistema de geração de vapor é chamado de circuito secundário.

## Independência entre os sistemas de refrigeração

A independência entre o circuito primário e o circuito secundário tem o objetivo de evitar que, danificando-se uma ou mais varetas, o material radioativo (urânio e produtos de fissão) passe para o circuito secundário. É interessante mencionar que a própria água do circuito primário é radioativa.

## Filosofia de segurança

O perigo potencial na operação dos reatores nucleares é representado pela alta radioatividade dos produtos da fissão do urânio e sua liberação para o meio ambiente.

A filosofia de segurança dos reatores nucleares é dirigida no sentido de que as usinas nucleares sejam projetadas, construídas e operadas com os mais elevados padrões de qualidade e que tenham condições de alta confiabilidade.

## Sistemas ativos de segurança

As barreiras físicas citadas constituem um sistema passivo de segurança, isto é, atuam, independentemente de qualquer ação.

Para a operação do reator, sistemas ativos de segurança são projetados para atuar, inclusive de forma redundante: na falha de algum deles, outro sistema, no mínimo, atuará, comandando, se for o caso, a parada do reator.

## Segurança no projeto de uma usina nuclear

Na fase de projeto, são imaginados diversos acidentes que poderiam ocorrer em um reator nuclear, assim como a forma de contorná-los, por ação humana ou, em última instância, por intervenção automática dos sistemas de segurança, projetados com essa finalidade. São, ainda, avaliadas as consequências em relação aos equipamentos, à estrutura interna do reator e, principalmente, em relação ao meio ambiente.

Fenômenos da natureza, como tempestades, vendavais e terremotos, e outros fatores de risco, como queda de avião e sabotagem, são também levados em consideração no dimensionamento e no cálculo das estruturas.

## Segurança na operação de reatores nucleares

A complexidade e as particularidades de uma usina nuclear exigem uma preparação adequada do pessoal que irá operá-la.

Existe em Mambucaba, município de Angra dos Reis, um centro de treinamento para operadores de centrais nucleares, que é uma “reprodução” das salas de controle de reatores do tipo de Angra 1 e 2, capaz de simular todas as operações dessas usinas, inclusive a atuação dos sistemas de segurança. Para se ter uma ideia do padrão dos serviços prestados por esse centro, conhecido como simulador, deve-se ressaltar que nele foram e ainda são treinados operadores para reatores da Espanha, Argentina e da própria República Federal da Alemanha, responsável pelo projeto e montagem do centro. Os instrutores são todos brasileiros que, periodicamente, fazem estágios em reatores alemães, para atualização de conhecimentos e introdução de novas experiências nos cursos ministrados.

## Reator nuclear e a bomba atômica

A bomba (“atômica”) é feita para ser possível explodir, ou seja, a reação em cadeia deve ser rápida e a quantidade de urânio, muito concentrado em urânio-235 (quer dizer, urânio enriquecido acima de 90%), deve ser suficiente para a ocorrência rápida da reação. Além disso, toda a massa de urânio deve ficar junta, caso contrário não ocorrerá a reação em cadeia de forma explosiva.

Um reator nuclear, para gerar energia elétrica, é construído de forma a ser impossível explodir como uma bomba atômica. Primeiro, porque a concentração de urânio-235 é muito baixa (cerca de 3,2%), não permitindo que a reação em cadeia se processe com rapidez suficiente para se transformar em explosão. Segundo, porque dentro do reator nuclear existem materiais absorvedores de nêutrons, que controlam e até acabam com a reação em cadeia, como, por exemplo, na “parada” do reator.

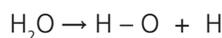
*Comissão Nacional de Energia Nuclear. Disponível em: <[www.cnen.gov.br/images/cnen/documentos/educativo/apostila-educativa-aplicacoes.pdf](http://www.cnen.gov.br/images/cnen/documentos/educativo/apostila-educativa-aplicacoes.pdf)>. Acesso em: 10 fev. 2016.*

## Organizando as ideias do texto

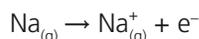
1. A construção de uma usina nuclear envolve questões de ordem geográfica, política, ambiental e estratégica. Faça uma pesquisa e tente determinar quais dessas questões levaram à construção da usina e à escolha de Angra dos Reis como local para sua instalação.
2. Escolha outro tipo de usina geradora de energia elétrica e faça uma pesquisa sobre seu funcionamento, seu impacto ambiental, sua participação na geração de energia no Brasil e no mundo, além de seus aspectos positivos e negativos. **Professor, veja Orientações Didáticas.**

## Radiações ionizantes

A Físico-Química analisa o conteúdo energético das reações químicas. Um conceito de grande importância no cálculo da entalpia de substâncias e reações é a energia de ligação, que revela a quantidade de energia necessária para fornecer, quebrar ou desfazer um mol de determinada ligação; a energia da ligação H–O é de 464 kJ/mol, o que significa que são necessários 464 kJ de energia para cada mol de ligações que desejamos quebrar:



Na molécula de água há dois mols de ligações H–O para cada mol de água, e são necessários 928 kJ para decompor um mol de água em seus elementos constituintes e criar radicais livres.



Para remover o primeiro elétron da camada de valência de um mol de átomos de sódio e criar um cátion, são necessários 496 kJ; para remover o segundo elétron, é preciso uma energia dez vezes maior.

A estabilidade dos átomos também se explica pela energia de ligação dos elétrons da camada de valência. Assim, átomos e moléculas garantem estabilidade à custa da energia envolvida nas ligações.

Por outro lado, substâncias expostas a radiações podem ter ligações quebradas, gerando íons ou radicais livres; para que isso ocorra, essa radiação deve ter energia igual ou maior às energias de ligação entre átomos ou elétrons, e essas são chamadas radiações ionizantes.

Ondas eletromagnéticas energéticas, como a faixa do ultravioleta, os raios X e os gama ou as partículas alfa, beta ou ainda nêutrons rápidos, são consideradas radiações ionizantes, ou seja, que possuem energia suficiente para romper ligações ou arrancar elétrons da periferia dos átomos. A interação dessas radiações com a matéria depende da carga elétrica: se houver carga elétrica, haverá transferência de energia e forças elétricas; mas, se não houver carga, então a interação só se faz com transferência de energia por colisões.

Observe que este não é um processo novo: a radiação é um fenômeno natural, que ocorre desde a formação da Terra. Não podemos nos esquecer de que a vida se originou em um ambiente em que a radiação era bastante intensa, e que sistemas vivos mais evoluídos foram se formando à medida que diminuía a radiação ambiente. Dessa forma, a vida tal qual a conhecemos se desenvolve em ambientes onde há radiações de pequena intensidade, como a radiação de fundo que nos envolve e tem inúmeras fontes.

## A irradiação de alimentos

Romper ligações implica alterar quimicamente um material. Por isso, dependendo de onde se dá a absorção de energia, a irradiação pode levar a alterações de alguns processos.

A interação da radiação com a matéria pode ter várias utilidades, por exemplo, na irradiação de alimentos. Essa prática pode impedir a multiplicação de microrganismos em alguns alimentos, como carnes e vegetais, por um tempo determinado e em doses muito bem controladas; os efeitos desejados são impedir a multiplicação de microrganismos que causam a deterioração do alimento, tais como bactérias e fungos, por alterações em sua estrutura celular, e retardar a maturação de frutas, o brotamento de raízes ou a deterioração de cereais por alterações no processo fisiológico dos tecidos da planta.



Gary Smith/SP/Latinstock

Carne de peixe irradiada.



Rafael Herrera

Qualquer alimento irradiado deve ter, por lei, etiquetagem indicativa.

A irradiação acontece sob condições rígidas e controladas, pois nenhum resíduo radioativo pode restar nos alimentos. Além disso, é proibido provocar quaisquer alterações nos alimentos — seja no aspecto externo, seja no nutricional. A irradiação não deixa nenhum vestígio indicando que o alimento foi processado.

Quando a radiação dissipa 1 J de energia em 1 kg de material, dizemos que esse material recebeu uma dose de 1 gray (Gy). Segundo documentos da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), a dose média de radiação natural absorvida pela população mundial é de  $2,6 \times 10^{-3}$  Gy/ano, isto é, 2,6 mGy por ano. As fontes utilizadas para irradiação de alimentos são, normalmente, o cobalto-60 ou césio-137, em doses de no máximo 10 kGy, valor muito menor que outros processos usados normalmente, como o aquecimento e o uso do forno de micro-ondas.

Você deve refletir sobre alguns aspectos muito importantes da questão da irradiação de alimentos:

- A irradiação não transforma alimento deteriorado em alimento de alta qualidade.
- Esse método não é adequado para certos tipos de alimentos, assim como o congelamento ou a liofilização também podem não ser adequados a alguns alimentos.
- É uma técnica que pode resolver problemas específicos importantes e complementar outras tecnologias, e representa uma grande promessa no controle de doenças originárias de alimentos e na desinfestação, em que os insetos consomem uma grande porcentagem da safra colhida. Segundo a FAO (Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação), cerca de 25% de toda produção mundial de alimentos se perde pela ação de microrganismos, insetos e roedores.
- Problemas envolvendo irradiação, com doses excessivas ou vazamentos, devem ser controlados para que esta seja aplicada com segurança.

Doses aceitáveis para alguns alimentos		
Tipo de alimento	Dose (kGy)	Efeito
carne, frango, peixe, marisco, alguns vegetais, alimentos preparados	20 a 70	Esterilização. Os produtos tratados podem ser armazenados em temperatura ambiente.
especiarias e outros temperos	8 a 30	Reduz o número de microrganismos e destrói insetos. Substitui produtos químicos.
carne, frango, peixe	1 a 10	Retarda a deterioração. Mata alguns tipos de bactérias patogênicas (salmonela).
morango e outras frutas	1 a 4	Aumenta o tempo de prateleira, retarda o aparecimento de mofo.
grãos, frutas e vegetais	0,1 a 1	Mata insetos ou evita sua reprodução. Pode substituir, parcialmente, os fumigantes.
banana, abacate, manga, mamão e outras frutas não cítricas	0,25 a 0,35	Retarda a maturação.
carne de porco	0,08 a 0,15	Inativa a trinchinela.
batata, cebola, alho	0,05 a 0,15	Inibe o brotamento.

Fonte: Faculdade de Ciências Médicas. Disponível em: <<http://bioquimica.ufcspa.edu.br/pg2/pgs/tecnologia/radiacao.pdf>>. Acesso em: 11 fev. 2016.

## Efeitos de irradiação aguda em adultos

Forma	Dose absorvida	Sintomatologia
Infracínica	inferior a 1 Gy	Ausência de sintomatologia na maioria dos indivíduos.
Reações gerais leves	1-2 Gy	Astenia, náuseas, vômitos (3 a 6 h após a exposição).
Hematopoiética leve	2-4 Gy	Função medular atingida: linfopenia, leucopenia, trombopenia, anemia; recuperação em 6 meses.
Hematopoiética grave	4-6 Gy	Função medular gravemente atingida.
DL <sub>50</sub> (dose letal, 50%)	4-4,5 Gy	Morte de 50% dos indivíduos irradiados.
Gastrointestinal	6-7 Gy	Diarreia, vômitos, hemorragias, morte em 5 ou 6 dias.
Pulmonar	8-9 Gy	Insuficiência respiratória aguda, coma e morte entre 14 e 36 h.
Cerebral	superior a 10 Gy	Morte em poucas horas por colapso.

Fonte: Comissão Nacional de Energia Nuclear. Disponível em: <[www.cnen.gov.br/ensino/imagens/cnen/documentos/educativo/radiacoes-ionizantes.pdf](http://www.cnen.gov.br/ensino/imagens/cnen/documentos/educativo/radiacoes-ionizantes.pdf)>. Acesso em: 11 fev. 2013.



Thinkstock/Getty Images

Modelo de contador Geiger, em que o número de radiações captadas pelo tubo na mão direita do experimentador é contabilizado por pequenos estalos e disponível para leitura, em médias sobre intervalos de tempo determinados.

## O contador Geiger

O instrumento utilizado para detectar os níveis de radiação num ambiente é denominado **contador Geiger**.

Ele é constituído de um dispositivo de contagem e de um tubo cilíndrico, no interior do qual há um par de eletrodos (de cargas de sinais opostos) e um gás a baixa pressão.

Quando uma radiação atravessa o gás no tubo, ele pode ser ionizado (passa de gás isolante a plasma condutor — veja página 199), e um pulso de corrente elétrica flui de um eletrodo para outro, devido à ddp existente.

A existência da radiação pode ser sinalizada por sons, luzes e/ou deflexão de um ponteiro.

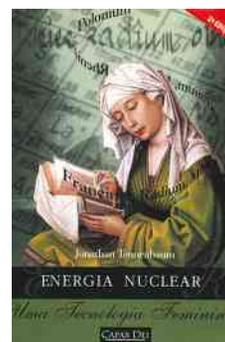
## PARA SABER MAIS

### Livro

#### Energia nuclear: uma tecnologia feminina

Jonathan Tennenbaum. Capax Dei.

Nenhum outro ramo da Ciência teve uma contribuição tão marcante das mulheres quanto a energia nuclear nos primórdios de seu desenvolvimento, no início do século XX. Além de Marie Curie, você conhecerá detalhes da vida e do trabalho de Lise Meitner e Ida Noddack, que, além de sua relevância científica, propiciaram, em paralelo, a emancipação feminina e a consideração da mulher como indivíduo dotado dos mesmos direitos de cidadania que os homens.



Capax Dei Editora Ltda.

## É possível estudar o impossível?

Leia um trecho do livro escrito por Michio Kaku, cientista e professor de Física Teórica na City University e no City College, de Nova York, e organizador de séries e documentários científicos para a BBC e para o History Channel. Ele nos diz que o estudo do que parece ser impossível pode desvendar panoramas inteiramente novos e levar à ampliação das fronteiras da Física e dos conhecimentos científicos.

### Estudando o impossível

Ironicamente, o estudo sério do impossível escancarou domínios ricos e totalmente inesperados da ciência. Por exemplo, durante séculos a frustrante e vã busca de uma “máquina de moto-contínuo” levou os cientistas a concluir que tal máquina era impossível, forçando-os a postular a conservação da energia e as três leis da termodinâmica. Assim, a busca em vão da construção de máquinas de movimento perpétuo ajudou a abrir o campo totalmente novo da termodinâmica, que em parte lançou os alicerces da máquina a vapor, da era das máquinas e da moderna sociedade industrial.

No final do século XIX, os cientistas concluíram que era “impossível” que a Terra tivesse bilhões de anos. Lorde Kelvin declarou categoricamente que a Terra em estado de fusão resfriaria em 20 a 40 milhões de anos, contradizendo os geólogos e biólogos darwinistas, que afirmavam que a Terra teria bilhões de anos. Provou-se finalmente que o impossível era possível com a descoberta da força nuclear por Madame Curie e outros, mostrando como o centro da Terra, aquecido por decaimento radioativo, poderia se manter em fusão por bilhões de anos.

Nós ignoramos o impossível por nossa conta e risco. Nas décadas de 1920 e 1930, Robert Goddard, fundador da moderna balística de foguetes, foi tema de intensas críticas por parte daqueles que pensavam que os foguetes jamais poderiam viajar pelo espaço cósmico. Eles sarcasticamente chamaram a sua busca de Loucura de Goddard. Em 1921, os editores do *New York Times* criticaram com veemência a obra do Dr. Goddard: “O professor Goddard não conhece a relação entre ação e reação e a necessidade de haver algo melhor do que um vácuo contra o qual reagir. Parece que lhe falta o conhecimento básico ministrado diariamente nas escolas secundárias.”

Os foguetes eram impossíveis, diziam os editores arrogantes, porque não havia ar contra o qual fazer pressão no espaço cósmico. Infelizmente, um chefe de Estado compreendeu as implicações dos foguetes “impossíveis” de Goddard — Adolf Hitler. Durante a Segunda Guerra Mundial, a barragem de foguetes V-2 incrivelmente avançados fez cho-ver morte e destruição sobre Londres, colocando-a quase de joelhos.

O estudo do impossível talvez também tenha mudado o curso da história mundial. Na década de 1930 quase todo mundo acreditava, até Einstein, que uma bomba atômica era “impossível”. Os físicos sabiam que havia uma tremenda quantidade de energia represada dentro do núcleo do átomo, segundo a equação de Einstein,  $E = mc^2$ , mas a energia liberada por um único núcleo era insignificante demais para ser considerada. Mas o físico atômico Leo Szilard lembrou-se de ter lido o romance de H. G. Wells, de 1914, *The World Set Free*, no qual Wells previa a criação da bomba atômica. No livro, ele afirmava que o segredo da bomba atômica seria desvendado por um físico em 1933. Por acaso Szilard tropeçou nesse livro em 1932. Espiçado pelo romance, em 1933, exatamente como previra Wells duas décadas antes, ele teve a ideia de ampliar a potência de um único átomo por meio de uma reação em cadeia, de modo que a energia proveniente da fissão de um único núcleo de urânio fosse ampliada em muitos trilhões de vezes. Szilard então colocou em prática uma série de experimentos fundamentais e negociações secretas entre Einstein e o presidente Franklin Roosevelt que levariam ao Projeto Manhattan, que construiu a bomba atômica.

De novo vemos que o estudo do impossível desvendou panoramas totalmente novos, ampliando as fronteiras da Física e da Química, obrigando os cientistas a redefinirem o que entendiam como “impossível”. Como disse Sir William Osler certa vez, “As filosofias de uma era tornam-se os absurdos da seguinte, e as tolices de ontem tornam-se a sabedoria de amanhã”.

[...]

Kaku, Michio. *Física do impossível*. Rio de Janeiro: Rocco, 2010. p. 13-14.

### Organizando as ideias do texto

1. De que modo algo “impossível” pode vir a se tornar possível?
2. Faça uma pesquisa de algo que hoje em dia é considerado impossível. Em sua opinião, esse fato é realmente impossível? Se não, elabore uma pequena tese de como o “impossível” pode se tornar “possível”. Use a imaginação e consulte obras artísticas.

Professor, veja *Orientações Didáticas*.

**EP1.** Um determinado radioisótopo emite radiação  $\beta^-$  e reduz sua radioatividade a um quarto da inicial. O tempo decorrido nessa redução é de 16 dias. Determine a meia-vida desse radioisótopo. **8 dias**

**EP2.** O que é o decaimento radioativo?

Resposta nas Orientações Didáticas.

**EP3.** Certo elemento radioativo tem um isótopo cuja meia-vida é de cerca de 24 dias. Qual é a porcentagem da amostra inicial desse isótopo que restará após 4 meses? **3,125%**

**EP4.** Quais são as afirmativas corretas dentre as apresentadas a seguir?

- I. No interior do Sol, ocorrem reações de fusão nuclear (dois átomos de hidrogênio formam um átomo de hélio).
- II. Quando ocorre uma fusão nuclear, o processo absorve enorme quantidade de energia.
- III. No fenômeno da fissão nuclear, os núcleos que são divididos liberam enorme quantidade de energia.
- IV. A energia liberada nas fissões nucleares é oriunda da energia potencial elétrica dos núcleons transformando-se em energia cinética dos fragmentos e em fótons. **III**

**EP5.** Para a determinação da idade de fósseis, utilizam-se as propriedades do carbono-14, que é radioativo. A meia-vida desse elemento é igual a 5700 anos. Um esqueleto fóssil, com uma taxa de carbono-14 igual a um quarto da normal, pertenceu a um animal que morreu há aproximadamente quantos anos?

**11 400 anos**

**EP6.** Analise as seguintes afirmativas e dê o somatório dos números referentes às proposições corretas.

- 01. Numa reação em cadeia, na fissão do urânio-235, podemos considerar que o nêutron seja o "produto" de uma reação e que ele vá servir de "reagente" para outras reações posteriores.
- 02. Na fissão do urânio-235, são liberados  $2 \cdot 10^{13}$  J, por mol, de energia. Essa quantidade é cerca de 200 milhões de vezes maior que a liberada na combustão de 1 mol de etanol, que é um álcool combustível. Logo, na reação de combustão do

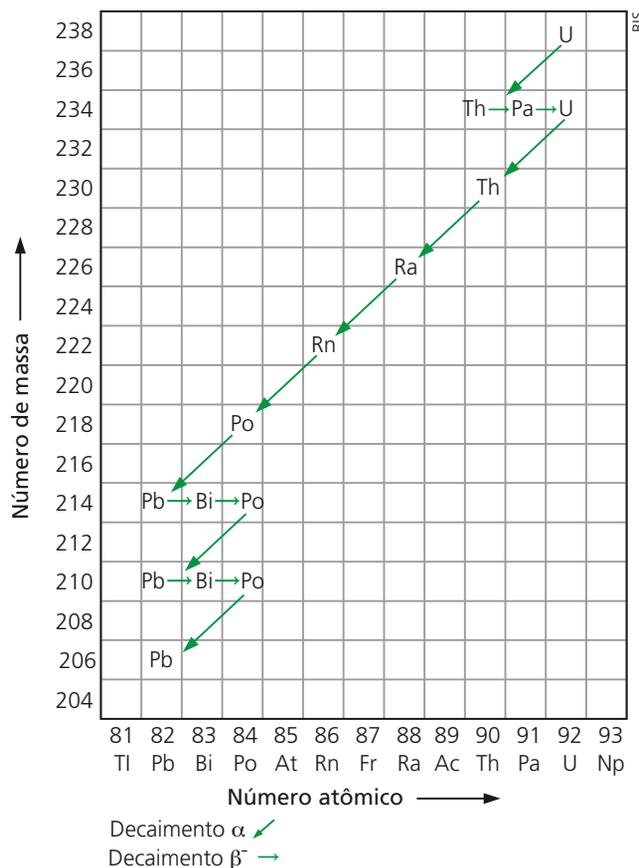
etanol, são liberados na ordem de  $10^5$  J, por mol, de energia.

**04.** A radiação alfa ( $\alpha$ ) é constituída por 2 prótons e 2 nêutrons, sendo igual ao núcleo de hélio. Então, essa radiação deve sofrer um desvio de sua trajetória ao atravessar um campo elétrico.

**08.** A emissão beta ( $\beta$ ) é originária dos núcleos de átomos radioativos. Quando um núcleo emite uma partícula beta, o seu número atômico aumenta em uma unidade. Isso porque um nêutron se desintegra fornecendo um próton e um elétron. Esse elétron é emitido em altíssima velocidade, constituindo a emissão beta. Portanto, a trajetória de uma radiação  $\beta$  não sofre qualquer desvio ao atravessar um campo elétrico.

$$01 + 02 + 04 = 07$$

**EP7.** Alguns núcleos, como o urânio-238, não podem ganhar estabilidade por uma única emissão. Assim ocorre uma série de emissões sucessivas. Observe a série radioativa do urânio-238:



Escreva no caderno as equações nucleares que representam as seguintes transmutações:



Consulte uma tabela periódica para obter os números atômicos das espécies citadas.

**EP8.** Qual é a reação que reconverte carbono-14 em nitrogênio-14? É o decaimento beta:  $^{14}_6\text{C} \rightarrow ^{14}_7\text{N} + ^0_{-1}\text{e}$

**EP9.** (UEL-PR) A irradiação para conserva dos produtos agrícolas, tais como batata, cebola e maçã, consiste em submeter esses alimentos a doses minuciosamente controladas de radiação ionizante.

Sobre a radiação ionizante, considere as afirmativas.

- I. A energia da radiação incidente sobre um alimento pode atravessá-lo, retirando elétrons do átomo e das moléculas que o constituem.
- II. As micro-ondas e os raios infravermelho e ultravioleta são exemplos de radiação ionizante.
- III. As fontes radioativas utilizadas na conservação de alimentos são de mesma natureza das utilizadas na radioterapia.
- IV. Por impregnar os alimentos, o uso de radiação ionizante causa sérios danos à saúde do consumidor.

Indique a alternativa correta.

- a) Somente as afirmativas I e II são corretas.
- b) Somente as afirmativas I e III são corretas. **X**
- c) Somente as afirmativas III e IV são corretas.
- d) Somente as afirmativas I, II e IV são corretas.
- e) Somente as afirmativas II, III e IV são corretas.

**EP10.** De acordo com a incerteza atribuída às determinações de idades pelo método do carbono-14, entre quais idades estaria um organismo ao qual se atribuiu a idade de 500 anos? **Entre 425 e 575 anos.**

**(UEL-PR) Leia os textos X e XI e observe a charge para responder às questões EP11 e EP12.**

Texto X

Em 1938, O. Hahn e F. Strassmann, ao detectarem bário numa amostra de urânio-238 bombardeada com nêutrons, descobriram a fissão nuclear induzida por nêutrons. A colisão de um nêutron com um núcleo de um isótopo, como o  $^{235}\text{U}$ , com sua consequente absorção, inicia

uma violenta vibração, e o núcleo é impelido a se dividir, fissionar. Com a fissão, cada núcleo de  $^{235}\text{U}$  produz dois ou mais nêutrons, propiciando uma reação em cadeia.

(Adaptado de: OHANIAN, H. C. *Modern physics*. 2. ed. Nova York: Prentice Hall inc. 1995. p. 386.)

Texto XI

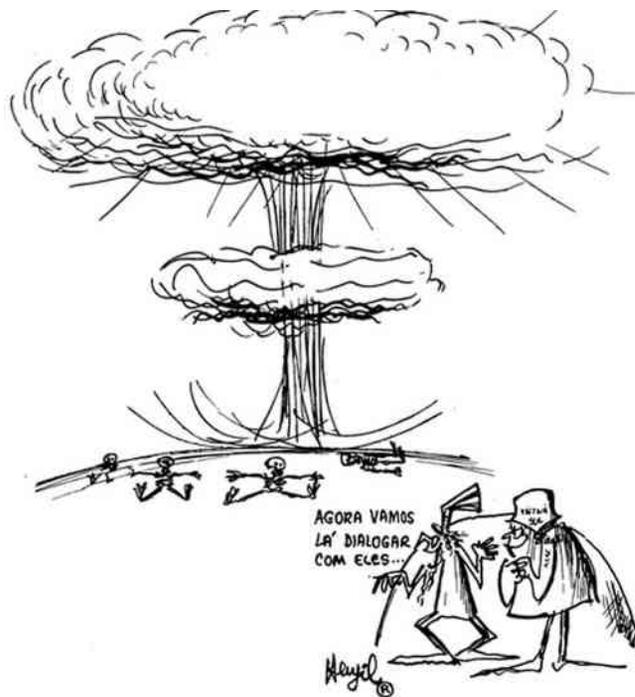
A reação em cadeia explosiva do  $^{235}\text{U}$  deu um banho de radiação mortífera no centro da cidade: cerca de dez quilômetros quadrados de Hiroshima ficaram torrados. Noventa por cento dos prédios da cidade foram destruídos.

Os médicos que ainda estavam vivos não tinham ideia do tipo de arma que havia sido empregada. Mesmo quando se anunciou que uma bomba atômica fora lançada, eles não tinham noção do mal que ela pode fazer ao corpo humano nem dos seus sintomas posteriores. Era uma revolução na ciência e na guerra.

(Adaptado de: СМИТН, P. D. *Os homens do fim do mundo*. São Paulo: Companhia das Letras, 2008. p. 359-360.)

## GUERRA NUCLEAR NO VIETNÃ

**Washington (FP) — O Comando Aéreo Estratégico dos EUA ameaçou arrasar o Vietnã do Norte usando inclusive artefatos atômicos, caso Hanói recuse a paz.**



Ivan Cosenza de Souza (henfil@globo.com)

HENFIL. *Hiroshima meu humor*. 4. ed. São Paulo: Geração, 2002. p. 19.

**EP11.** (UEL-PR) Considere as afirmativas a seguir:

- I. Um dos principais fatores que provocou a transformação na arquitetura do poder no mundo, pós-1945, foi a invenção e utilização da bomba atômica.
- II. A descoberta da fusão do isótopo  $^{235}\text{U}$  tornou obsoleto e inútil o emprego das Forças Armadas convencionais nas guerras posteriores a 1945.
- III. A energia liberada a partir da fusão nuclear foi empregada como fonte de abastecimento das novas indústrias surgidas no pós-II Guerra.
- IV. A fissão do isótopo de  $^{235}\text{U}$ , a partir de uma reação em cadeia liberando uma energia sem precedentes na história, é uma narrativa, em termos da Física, do evento ocorrido em Hiroshima em agosto de 1945.

Indique a alternativa correta.

- a) Somente as afirmativas I e II são corretas.
- b) Somente as afirmativas I e IV são corretas. **X**
- c) Somente as afirmativas III e IV são corretas.
- d) Somente as afirmativas I, II e III são corretas.
- e) Somente as afirmativas II, III e IV são corretas.

**EP12.** (UEL-PR) Segundo as unidades convencionais usadas na Física Nuclear, a energia liberada na bomba lançada sobre a cidade de Hiroshima foi de 15 kton.

Sabendo que 1 kton corresponde a  $10^{12}$  calorias e considerando que toda a energia liberada pela bomba seja usada para aquecer a água do Lago Igapó I de Londrina, cujo volume é, aproximadamente,  $5 \times 10^8$  litros, e que a temperatura inicial é de  $25^\circ\text{C}$ , a temperatura final da água do lago será de

Dado: calor específico da água:  $1 \text{ cal/g} \cdot ^\circ\text{C}$ .

- a)  $30^\circ\text{C}$ .
- b)  $45^\circ\text{C}$ .
- c)  $55^\circ\text{C}$ . **X**
- d)  $65^\circ\text{C}$ .
- e)  $95^\circ\text{C}$ .

**EP13.** Após a apresentação dos conceitos básicos da Física Moderna na Unidade 4, você já tem condições de, por conta própria, buscar informações e expandir seus conhecimentos sobre a física realizada nos últimos 120 anos.

Como desafio inicial, realize uma pesquisa a respeito dos *buracos negros* — o que são, como se formam e o que provocam no espaço-tempo ao seu redor.

Para enriquecer o resultado, procure incorporar representações de outras áreas do conhecimento — arte, literatura, cinema etc. **Resposta pessoal.**  
**Ver Orientações Didáticas.**



Alberto De Stefano

Visão artística de um buraco negro. A ilustração não retrata de forma científica o que é o buraco negro, cuja formação é consequência do colapso gravitacional de uma estrela muito massiva.

## PARA SABER MAIS

### Site

### Atividade nuclear no Brasil

Disponível em: <[www.eletronuclear.gov.br/](http://www.eletronuclear.gov.br/)>. Acesso em: 11 fev. 2016.

Agora que você completou seus estudos sobre a Física Nuclear, é importante saber quem a vem aplicando no Brasil, e como isso vem sendo realizado.

Para isso, você pode acessar o *site* da Eletronuclear, uma empresa de capital misto (privado e estatal), responsável pela operação e construção das usinas nucleares brasileiras.

# Respostas dos exercícios propostos

## Capítulo 1

### EP1.

- I) O corpo, inicialmente neutro, perdeu elétrons e ficou eletrizado positivamente.
- II) O corpo, inicialmente eletrizado negativamente, perdeu elétrons e ficou eletricamente neutro.
- III) O corpo, inicialmente neutro, permaneceu na mesma condição.
- IV) O corpo, inicialmente eletrizado positivamente, ganhou elétrons, mas continuou eletrizado positivamente.
- V) O corpo, inicialmente neutro, ganhou elétrons e ficou eletrizado negativamente.
- VI) O corpo, inicialmente eletrizado negativamente, perdeu elétrons, mas continuou eletrizado negativamente.

**EP2.** a) Deve-se retirar desse corpo certa quantidade de elétrons; b) 80 C

**EP3.** a)  $N$  e  $P$  negativos; b)  $N$  e  $P$  positivos.

**EP4.** a)  $-4$  C; b)  $Q'_c = -0,8$  C; c) Ganhou  $5 \cdot 10^{18}$  elétrons.

**EP5.** a) O material  $X$  sucede o algodão na série triboelétrica, pois ficou eletrizado negativamente, ao receber elétrons do tecido. b) A carga final do tecido é de  $+3 \mu\text{C}$ . c) Atração, porque ambos possuem sinais opostos, a placa eletrizada positivamente e a bolinha, negativamente.

**EP6.**  $A = 2Q$ ,  $B = 3Q$ ,  $C = 3,5Q$  e  $D = 3,5Q$

**EP7.** a)  $Q_B = +Q$ . b) Para não descarregar a esfera  $B$ . Com qualquer toque nela com os dedos, a esfera ficaria descarregada, pois o nosso corpo funcionaria como um fio terra. c) Ocorrerá uma atração mútua, devido à indução eletrostática. d) No toque, a esfera  $B$  recebe elétrons de  $A$ ; como ambas ficam positivamente eletrizadas, ocorre uma repulsão entre elas.

$$\text{e) } Q'_A = \frac{+Q}{2} \text{ e } Q'_B = \frac{+Q}{2}$$

**EP8.** a) O corpo  $A$  está neutro e o corpo  $B$  está eletrizado. b) O corpo  $A$  está neutro. Já o corpo  $B$  está eletrizado, mas não podemos identificar o seu sinal só porque as folhas se abriam. c) Após o contato do corpo  $A$ , as folhas continuariam fechadas; e com o contato do corpo  $B$ , as folhas permaneceriam abertas, mesmo depois de afastar o objeto, pois o eletroscópio ficaria carregado (eletrizado). d) Sim. Para tanto, devemos aproximar da esfera do eletroscópio um corpo já eletrizado de sinal conhecido, por exemplo, positivamente. Devido à indução eletrostática, se as folhas se abrirem ainda mais, significará que o eletroscópio está eletrizado com sinal positivo; se as folhas se fecharem, ele estará eletrizado negativamente.

**EP9.** 08

### EP10.

- Ao abrir a porta de um carro.  
Ao abrir um portão de ferro.  
Ao abrir a porta de uma geladeira.  
Ao apertar a mão de uma pessoa.  
Ao tocar a lataria metálica de um carro.  
Ao tirar uma blusa de tecido sintético (ou lã).

## Capítulo 2

**EP1.** a) Carga  $A$ :  $N$ ; carga  $B$ :  $OSO$ ; carga  $C$ :  $ESE$ .  
b) Carga  $A$ :  $N$ ; carga  $B$ :  $OSO$ ; carga  $C$ :  $ESE$ . c) Carga  $A$ :  $S$ ; carga  $B$ :  $NNO$ ; carga  $C$ :  $NNE$ . d) Carga  $A$ :  $O$ ; carga  $B$ :  $ENE$ ; carga  $C$ :  $SSO$ .

**EP2.** a) Os sinais das cargas devem ser opostos para que haja atração mútua. b)  $Q_1 = 2 \cdot 10^{-5}$  C e  $Q_2 = -2 \cdot 10^{-5}$  C ou  $Q_1 = -2 \cdot 10^{-5}$  C e  $Q_2 = 2 \cdot 10^{-5}$  C.

$$\text{EP3. } \frac{F}{9}$$

$$\text{EP4. a) } F = k_0 \cdot \frac{5 \cdot Q^2}{d^2}; \text{ b) } +2Q; \text{ c) } F' = \frac{F}{5}$$

**EP5.** a) 1,0 N; b) 0,9 N; c)  $\cong 1,8$  N

**EP6.** Aproximadamente 26,7 cm.

**EP7.** d

**EP8.**  $h = 0,6$  m

**EP9.** a) A carga  $q$  deve ser negativa; b)  $\frac{Q}{q} = -4$

**EP10.** e

## Capítulo 3

**EP1.** a)  $F = 0,8$  N, direção horizontal e sentido da esquerda para a direita. b) 800 m/s<sup>2</sup>

**EP2.**  $q = 5 \cdot 10^{-4}$  C

**EP3.**  $2 \cdot 10^6$  N/C

**EP4.** A carga é positiva e o seu valor é  $Q = +36 \mu\text{C}$ .

**EP5.**  $E_A = 2 \cdot 10^5$  N/C, direção horizontal e sentido da direita para a esquerda.

**EP6.** a) Atração:  $F = 0,324$  N; b)  $E = 7,2 \cdot 10^5$  N/C

**EP7.** a)  $Q = 4 \cdot 10^{-6}$  C; b)  $E_2 = 4 \cdot 10^5$  N/C;

c)  $E \cong 7,8 \cdot 10^5$  N/C

**EP8.**  $8 \cdot 10^{14}$  m/s<sup>2</sup>

**EP9.** a) Cada partícula cria um campo elétrico de mesma intensidade, mas de sentidos opostos. b) Sim, está em equilíbrio instável, pois qualquer deslocamento fará

com que a força resultante tenda a afastar a carga negativa da sua posição inicial. c) O equilíbrio passa a ser estável, pois a força resultante que irá surgir sempre tenderá a empurrar a carga de volta ao ponto central do segmento de reta.

**EP10.** 08

## Capítulo 4

**EP1.** a) Irá para o potencial do ponto  $D$ ; b) nula; c) igual

**EP2.** a) A partícula deve ser posicionada num local onde haja um potencial elétrico adequado para isso. b)  $-5 \cdot 10^{-6} \text{ C}$

**EP3.** a)  $Q = +8 \cdot 10^{-6} \text{ C}$ ; b)  $V_B = +2,4 \cdot 10^4 \text{ V}$ ; c)  $U_{AB} = +4,8 \cdot 10^4 \text{ V}$

**EP4.** a)  $+9 \cdot 10^3 \text{ V}$ ; b)  $d = 0,6 \text{ m}$ ; c)  $x = 0,72 \text{ m}$  e  $y = 0,48 \text{ m}$

**EP5.** a)  $Q_A = +6 \cdot 10^{-6} \text{ C}$  e  $Q_B = +3 \cdot 10^{-6} \text{ C}$ ; b)  $V_x = +5,4 \cdot 10^5 \text{ V}$

**EP6.** a) Negativo, pois na expressão  $V = k_0 \frac{Q}{q}$ , o sinal do potencial é determinado apenas pelo sinal de  $Q$  e, como no diagrama a curva se encontra na parte negativa no eixo dos potenciais, podemos afirmar que a carga é negativa. b) É a superfície representada pela letra  $B$ , porque essa superfície está mais afastada da carga negativa  $Q$  do que a superfície  $A$ , pois potencial e distância são inversamente proporcionais.

## Capítulo 5

**EP1.** a) zero; b)  $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ J}$ ; c)  $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ J}$ ; d)  $-2,5 \cdot 10^{-4} \text{ J}$

**EP2.** a)  $V_A = 1,5 \cdot 10^5 \text{ V}$  e  $V_B = 9,0 \cdot 10^4 \text{ V}$ ; b)  $U_{AB} = 6,0 \cdot 10^4 \text{ V}$ ; c)  $E_{pe_B} = 3,0 \cdot 10^{-1} \text{ J}$  e  $E_{pe_A} = 1,8 \cdot 10^{-1} \text{ J}$ ; d) De  $A$  para  $B$ , pois uma carga de prova, independentemente do seu sinal, move-se espontaneamente no sentido da diminuição da energia potencial elétrica.

**EP3.**  $\tau_{YX} = -3 \cdot 10^{-1} \text{ J}$

**EP4.** a)  $V_C = 1,8 \cdot 10^2 \text{ V}$ ; b)  $V_D = 0$ ; c)  $\tau_{CD} = 1,8 \cdot 10^{-7} \text{ J}$

**EP5.** a)  $\tau_{XY} = 1,2 \cdot 10^{-7} \text{ J}$ ; b)  $U_{XY} = 24 \text{ V}$

**EP6.** a)  $\tau_{AB} = 4,5 \cdot 10^{-7} \text{ J}$ ; b)  $V_B = 3,0 \text{ m/s}$ ; c)  $d = 2,0 \text{ m}$

**EP7.** a)  $E = 400 \text{ V/m}$ ; b)  $V_C = -20 \text{ V}$ ; c)  $\tau_{AC} = 3 \cdot 10^{-4} \text{ J}$ .

**EP8.**  $V, F, F, V$  e  $V$

**EP9.** a) Diretamente proporcional, pois  $\tau = q \cdot E \cdot d$ . Se  $E$  aumentar,  $\tau$  também vai aumentar na mesma proporção.

O trabalho depende da interação proporcional que a partícula tem com o campo elétrico.

b) Nenhuma diferença, pois a ddp entre  $A$  e  $B$  é a mesma entre  $A$  e  $C$ . Assim, a partícula sofre a mesma variação de energia potencial elétrica, tanto num como noutra trajetória.

## Capítulo 6

**EP1.** a)  $Q = 8 \cdot 10^{-6} \text{ C}$ ; b)  $R \cong 2,5 \cdot 10^{-1} \text{ m}$ ; c)  $E = 1,8 \cdot 10^4 \text{ V/m}$  e  $V = 3,6 \cdot 10^4 \text{ V}$

**EP2.**  $E_A = 0$ ;  $E_B = 1,0 \cdot 10^5 \text{ V/m}$  e  $E_C = 7,2 \cdot 10^4 \text{ V/m}$

**EP3.** a)  $Q = 4 \cdot 10^{-5} \text{ C}$ ; b)  $V_{sup} = 1,8 \cdot 10^6 \text{ V}$ ; c)  $E_{sup} = 4,5 \cdot 10^6 \text{ V/m}$

**EP4.** 1. O pente fica eletricamente carregado e atrai a bolinha de isopor por indução. 2. Não. A indução é feita sobre a gaiola que isola todo o seu interior (Princípio da gaiola de Faraday). 3. Sim, pois as cargas tendem a se posicionar na parte externa da gaiola, atraindo a bolinha de isopor.

## Capítulo 7

**EP1.** a)  $C = 4 \cdot 10^{-11} \text{ F}$ ; b)  $Q = 8 \cdot 10^{-8} \text{ C}$

**EP2.**  $C_{Terra} \cong 7,1 \cdot 10^{-4} \text{ F}$

**EP3.** a)  $C_A = 1,5 \cdot 10^{-9} \text{ F}$  e  $C_B = 1,0 \cdot 10^{-9} \text{ F}$ ; b)  $V = 3,2 \cdot 10^3 \text{ V}$ ; c)  $Q'_A = 4,8 \cdot 10^{-6} \text{ C}$  e  $Q'_B = 3,2 \cdot 10^{-6} \text{ C}$

**EP4.** a)  $V_{1(\text{antes})} = 270 \text{ V}$  e  $V_{1(\text{depois})} = 108 \text{ V}$ ; b)  $V_{2(\text{antes})} = 0$  e  $V_{2(\text{depois})} = 108 \text{ V}$ ; c)  $Q'_1 = 2,4 \cdot 10^{-9} \text{ C}$  e  $Q'_2 = 3,6 \cdot 10^{-9} \text{ C}$

**EP5.**  $E_{pe} = 2,7 \cdot 10^{-2} \text{ J}$

**EP6.**  $Q = 4 \cdot 10^{-9} \text{ C}$  e  $U = 100 \text{ V}$

**EP7.** a)  $E = 3 \cdot 10^3 \text{ V/m}$ ; b)  $C = 3,3 \cdot 10^{-12} \text{ F} = 3,3 \text{ pF}$ ; c)  $C' = 9,9 \cdot 10^{-12} \text{ F} = 9,9 \text{ pF}$

**EP8.**  $14,4 \text{ V}$

**EP9.** a)  $E = 1,25 \cdot 10^5 \text{ V/m}$ ; b)  $Q = 3,52 \text{ nC}$ ; c)  $C = 17,6 \text{ pF}$ ; d) 4

**EP10.** a)  $2,5 \mu\text{F}$ ; b)  $6 \mu\text{F}$ ; c)  $1,28 \mu\text{F}$

**EP11.** a)  $C_e = 6 \mu\text{C}$ ; b)  $E_{pe} = 4,32 \cdot 10^{-4} \text{ J}$

**EP12.** a)  $2 \mu\text{F}$ ; b)  $9 \mu\text{F}$ ; c)  $4 \mu\text{F}$

**EP13.** a)  $C_e = 8 \mu\text{F}$ ; b)  $U = 6 \text{ V}$ ; c)  $Q_1 = 36 \mu\text{C}$  e  $Q_2 = 12 \mu\text{C}$

**EP14.** a)  $Q_e = 2 \mu\text{F}$ ; b)  $Q = 18 \mu\text{C}$ , para cada um; c)  $U_1 = 1,5 \text{ V}$ ;  $U_2 = 3 \text{ V}$  e  $U_3 = 4,5 \text{ V}$ ; d)  $E_{pe} = 8,1 \cdot 10^{-5} \text{ J}$

**EP15.** correta: 04

## Capítulo 8

**EP1.** a) 1 440 C; b)  $9,0 \cdot 10^{21}$  elétrons

**EP2.** Da direita para a esquerda e  $i = 160 \mu\text{A}$ .

**EP3.** a) 1,44 C; b)  $1,8 \cdot 10^{19}$  elétrons

**EP4.** a) Principais finalidades: instalar corretamente o chuveiro na voltagem e verificar o consumo através da potência;  $i = 18 \text{ A}$ . b) 1,32 kWh

**EP5.** e                      **EP6.** a

**EP7.** a)  $\cong 0,18 \text{ A}$ ; b) 50 dias; c) R\$ 7,68

**EP8.** e                      **EP9.** c

## Capítulo 9

**EP1.** A expressão da Primeira Lei de Ohm é  $U = R \cdot i$ , onde  $U$  é a ddp nos terminais do resistor,  $R$  é o valor da resistência elétrica e  $i$  é a intensidade de corrente que percorre o resistor. As grandezas  $R$  e  $i$  são inversamente proporcionais; portanto, para uma mesma ddp  $U$ , se houver um aumento da resistência elétrica, diminuirá a intensidade de corrente ou vice-versa. Quando  $R$  é constante,  $U$  e  $i$  são diretamente proporcionais; ou seja, se aumentar (diminuir) um, o outro também aumenta (diminui). Da mesma forma, para  $i$  constante,  $U$  e  $R$  são diretamente proporcionais.

**EP2.** 550  $\Omega$               **EP3.** a) 12,5  $\Omega$ ; b) 0,2 A

**EP4.** Se não fossem assim, tanto o filamento como as resistências ocupariam um espaço muito maior (imagine-os esticados). Portanto, a forma em espiral é a mais adequada para diminuir espaço sem que haja contato ao longo de todo o comprimento do fio.

**EP5.** O eletrotécnico recebeu a encomenda certa, pois, consultando a tabela, o valor da resistência elétrica recebida é de  $6400 \pm 640 \Omega$ , portanto, dentro daquilo que ele precisava (6000  $\Omega$ ).

**EP6.** Reostato é um resistor que possui uma resistência variável, de zero até um valor máximo. Ele serve para aumentar ou diminuir a intensidade de corrente elétrica que atravessa um circuito. De acordo com a 1ª Lei de Ohm, se a resistência é nula, a intensidade de corrente é máxima e, se a resistência é máxima, a intensidade de corrente é mínima.

**EP7.** Como a expressão da 2ª Lei de Ohm é  $R = \rho \cdot \frac{\ell}{A}$ , vemos que o comprimento do fio  $\ell$  e a área da seção reta  $A$  são diretamente proporcionais. Assim, para não haver uma variação na resistência  $R$  do condutor, a cada aumento no comprimento do fio deve correspon-

der um acréscimo proporcional da área da sua seção transversal, e vice-versa.

**EP8.** a) 3,2  $\Omega$ ; b) 1 mm<sup>2</sup>              **EP9.** 16 m

**EP10.** 22 A                      **EP11.** 6 A

**EP12.** a) 40,3  $\Omega$ ; b) 5,5 A; c) 300 W

**EP13.** a) 25,5 min; b) 23,9 min; c) 22  $\Omega$  e 10 A

**EP14.** a) 30  $\Omega$ ; b) 2 A; c) 16 V, 4 V e 40 V

**EP15.** a) 3 A; b) 45  $\Omega$ ; c) 15  $\Omega$  e 30  $\Omega$

**EP16.** c

**EP17.** a) 5  $\Omega$ ; b) 6 A, 2A e 4 A; c) 12 A

**EP18.** a) Antes de a filha da dona Maria ligar o secador de cabelo, a intensidade total de corrente elétrica solicitada na residência era de aproximadamente 30,3 A; portanto, dentro do limite de tolerância do fusível, que é de  $30 \text{ A} + 3 \text{ A} = 33 \text{ A}$ . Ao ligar o secador, foram solicitados mais 8,5 A de corrente, perfazendo 38,8 A e ocasionando, portanto, a queima do fusível. b) R\$ 20,46.

**EP19.** a) 10,5  $\Omega$ ; b) 16  $\Omega$ ; c) 14  $\Omega$ ; d)  $\frac{34R}{55}$  (em ohm)

**EP20.** a) 20  $\Omega$ ; b) 5 A; c) 4 A e 1 A, respectivamente.

**EP21.** a) 3 A; b) 54 V; c) 0,6 A; d) 7,2 W

**EP22.** a) 38  $\Omega$ ; b) 10  $\Omega$ ; c) 5  $\Omega$ ; d) 12  $\Omega$

**EP23.** a) 8  $\Omega$ ; b) 2 A

**EP24.** a) 40  $\Omega$ ; b) 35  $\Omega$               **EP25.** b

## Capítulo 10

**EP1.** 1 A                      **EP2.**  $A_1$  indica 4 A e  $A_2$  indica 0,48 A

**EP3.** 49980  $\Omega$

**EP4.** 32 V                      **EP5.**  $R = 25 \Omega$               **EP6.**  $X = 1,6 \text{ k}\Omega$

**EP7.** a) 12 V; b)  $i_1 = 9,99 \text{ A}$ ; c) 1,2  $\Omega$

**EP8.** a) 90  $\Omega$ ; b) 48  $\Omega$ ; c) 240 V; d) 360 W

**EP9.** e                      **EP10.**  $U_{AB} = 8 \text{ V}$

## Capítulo 11

**EP1.** a) 4 A; b) 15  $\Omega$ ; c) 75%

**EP2.** 1) b; 2) e 3) d

**EP3.**  $V_A = -10 \text{ V}$  e  $V_B = 16 \text{ V}$

**EP4.** a)  $E = 9,0 \text{ V}$ ; b)  $i = 2,0 \text{ A}$ ; c)  $r = 1 \Omega$ ; d) 77,8%; e) 8,0 W

**EP5.** a) Representa a corrente de curto-circuito da bateria. A corrente  $i_{cc} = 8 \text{ A}$  só ocorre quando uma resistência nula é conectada nos terminais da bateria, sendo portanto a máxima corrente que pode percorrê-la. b)  $r = 1,5 \Omega$ ; c)  $U = 12 - 1,5 \cdot i$  (unidades SI); d)  $i = 1,2 \text{ A}$

**EP6.** a) 6 A; b) 2 A ou 4 A

**EP7.** a) 32 W; b) 8 A; c) 3 A ou 5 A

**EP8.**  $E = 48 \text{ V}$  e  $r = 4 \Omega$

**EP9.** a) 16  $\Omega$ ; b) 16 V e 5 A

**EP10.** Na associação em série, o polo positivo de um gerador deve ser ligado ao polo negativo do outro e assim sucessivamente. Na associação em paralelo, os polos de mesmo sinal são ligados entre si: polo positivo com positivo e polo negativo com negativo. Usualmente, utiliza-se mais a associação em série.

**EP11.** a) A vantagem da associação em série é possibilitar o aumento da fem. b)  $E_{eq} = 3,0 \text{ V}$  e  $r_{eq} = 1,2 \Omega$

**EP12.**  $E_{eq} = 1,5 \text{ V}$  e  $r_{eq} = 0,4 \Omega$

**EP13.**  $E_{eq} = 6 \text{ V}$  e  $r_{eq} = 1,6 \Omega$

**EP14.** a) 120 V; b) 66,7%

**EP15.** a) 36 V; b) 3  $\Omega$ ; c) 50%

**EP16.** a) Desligar imediatamente o aparelho. b) Se o liquidificador não for desligado, toda a energia elétrica será convertida em calor, acarretando um superaquecimento do motor a ponto de queimá-lo, inutilizando o aparelho.

**EP17.** corretas: 02 e 16

## Capítulo 12

**EP1.** a) 44 V; b) -44 V      **EP2.**  $V_B = -7 \text{ V}$

**EP3.** a)  $i = 0,4 \text{ A}$ , ( $E_1$ ,  $r_1$ ) é o motor e ( $E_2$ ,  $r_2$ ) é a pilha; b) 4 V; c) 10,8 V; d) 6,8 V

**EP4.** a)  $i_1 = 0,2 \text{ A}$  e  $i_2 = 1,4 \text{ A}$ ; b)  $R = 5 \Omega$ ; c) 12,8 W; d)  $U_{AB} = 8 \text{ V}$

**EP5.** e      **EP6.** a)  $E_2 = 9 \text{ V}$ ; b)  $U_{AB} = 11,4 \text{ V}$

**EP7.** a)  $12 \cdot 10^{-6} \text{ C}$ ; b)  $36 \cdot 10^{-6} \text{ J}$

**EP8.** a)  $U_{AB} = 8,4 \text{ V}$ ; b)  $Q = 25,2 \mu\text{C}$

**EP9.** b

## Capítulo 13

**EP1.** c      **EP2.** d

**EP3.** d      **EP4.** e      **EP5.** e

**EP6.** Da esquerda para a direita.      **EP7.** c

**EP8.** e      **EP9.** b      **EP10.**  $5 \cdot 10^{-7} \text{ T}$

**EP11.**  $2 \cdot 10^{-7} \text{ T}$       **EP12.** d

**EP13.**  $4\pi \cdot 10^{-6} \text{ T}$       **EP14.** b

**EP15.** Módulo nulo, pois os campos criados pelas correntes têm sentidos opostos e mesmo módulo:  $4 \cdot 10^{-7} \text{ T}$ .

**EP16.** c      **EP17.** Polo sul.

**EP18.** c      **EP19.**  $8\pi \cdot 10^{-5} \text{ T}$

**EP20.**  $i = 0,75 \text{ A}$       **EP21.** c      **EP22.** b

## Capítulo 14

**EP1.** a) Não, pois se a partícula eletrizada estiver em repouso não há criação de campo magnético em torno dela que possa interagir com o campo magnético externo. b) Nada mudaria, pois a interação continuaria não existindo.

**EP2.** c      **EP3.** d      **EP4.**  $4 \cdot 10^{-7} \text{ N}$

**EP5.**  $5 \cdot 10^3 \text{ m/s}$       **EP6.** e

**EP7.** a) Trabalho nulo; b)  $m = \frac{B \cdot |q| \cdot R}{v}$

**EP8.**  $B = 250 \text{ T}$       **EP9.** d      **EP10.** a

**EP11.** Este fenômeno eletromagnético se deve ao fato de que a corrente é o movimento de cargas elétricas. Se o condutor estiver imerso num campo magnético, as cargas em movimento sofrerão a ação da força magnética que, conseqüentemente, atuará sobre o condutor onde elas estão.

**EP12.** b      **EP13.** 0,008 N      **EP14.** 1,25 m

**EP15.** a) 1 A; b) anti-horário

**EP16.** V

**EP17.** Todas as forças resultantes são nulas.

**EP18.**  $m = 0,45 \text{ g}$

## Capítulo 15

**EP1.** O peso do corpo fará com que o condutor móvel fique em equilíbrio dinâmico. A força magnética (para a esquerda) é equilibrada pela tração no fio (para a direita). Essa tração tem o mesmo módulo do peso do corpo suspenso.

**EP2.** 0,16 V      **EP3.**  $\cong 0,33 \text{ A}$       **EP4.**  $\cong 13,2 \text{ g}$

**EP5.** Todas estão corretas.      **EP6.** a

**EP7.** No intervalo de 0 a 1 s.      **EP8.** F, V, F e F

**EP9.** a) Sentido anti-horário. b) Sentido da direita para a esquerda.

## Capítulo 16

**EP1.** Sim, mas o tempo em que isso ocorre é tão pequeno que esse evento fica imperceptível. No caso do ser humano, só seria possível observar a lâmpada piscando se a frequência fosse abaixo de 10 Hz.

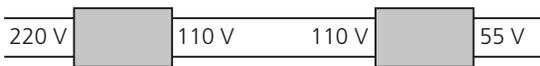
**EP2.** Na corrente alternada, os elétrons invertem o seu sentido de movimento ordenado várias vezes por segundo; na corrente contínua, o movimento é ordenado e sempre no mesmo sentido.

**EP3.** Os transformadores são dispositivos que operam com correntes alternadas, transmitindo energia elétrica de um circuito para outro circuito, alterando o valor da tensão.

**EP4.** Razão = 4

**EP5.** Não. Os transformadores precisam de variações de fluxo magnético em suas bobinas para funcionar, e a corrente contínua não produz esse fenômeno.

**EP6.** Ligação em série.



**EP7.** Corretos: 01, 04 e 16

## Capítulo 17

**EP1.** Aquilo a que damos o nome “rio” é um conjunto de circunstâncias locais e temporais, caracterizadas por variáveis que determinam a posição e o instante. No contexto do espaço-tempo, tomar um banho em um rio é o mesmo que acerrar-se de um conjunto específico de variáveis que define o “rio” naquele instante.

Ao voltarmos ao mesmo local em outro instante, esse conjunto terá se alterado, porque pelo menos uma das variáveis — o tempo — terá sido alterada.

**EP2.** e                      **EP3.** 10 anos                      **EP4.** a

**EP5.** I, IV e V                      **EP6.**  $v = 1,8 \cdot 10^8$  m/s

**EP7.** a                      **EP8.**  $m \cong 10,48$  mg

**EP9.**  $v \cong 1,342 \cdot 10^6$  m/s

**EP10.**  $m \cong 0,00126$  mg                      **EP11.** e

**EP12.** Resposta pessoal.

## Capítulo 18

**EP1.** a)  $5,5 \cdot 10^{-7}$  m; b)  $\cong 2,25$  eV

**EP2.** Porque a frequência mínima corresponde à situação em que a energia cinética é nula.

**EP3.** c                      **EP4.** b

**EP5.** I, II e III são corretas.

**EP6.** Por 2.                      **EP7.** 12,09 eV                      **EP8.** b

**EP9.**  $1,02 \cdot 10^{-7}$  m

**EP10.** Não, pois isso violaria o princípio da incerteza de Heisenberg, segundo o qual não podemos conhecer a posição e a velocidade (e consequentemente a quantidade de movimento) do elétron, simultaneamente.

**EP11.** d                      **EP12.** b

## Capítulo 19

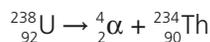
**EP1.** 8 dias

**EP2.** O decaimento radioativo é o fenômeno em que ocorre a redução da quantidade de átomos radioativos de uma amostra, devido à sua desintegração.

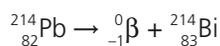
**EP3.** 3,125%                      **EP4.** III

**EP5.** 11 400 anos                      **EP6.**  $01 + 02 + 04 = 07$

**EP7.** a) De acordo com a série de emissões, o urânio-238 ( $n^\circ$  atômico 92) decai para tório-234 ( $n^\circ$  atômico 90); há redução de 4 unidades na massa atômica e 2 unidades no número atômico, o que corresponde à emissão de radiação alfa:



b) Nesse caso, o chumbo-214 ( $n^\circ$  atômico 82) para bismuto-214 ( $n^\circ$  atômico 83); há aumento de 1 unidade do número atômico, sem variação na massa atômica. Isso corresponde à emissão de radiação beta:



**EP8.** É o decaimento beta:  ${}_{6}^{14}\text{C} \rightarrow {}_{7}^{14}\text{N} + {}_{-1}^0\text{e}$

**EP9.** b

**EP10.** Entre 425 e 575 anos.

**EP11.** b                      **EP12.** c

**EP13.** Resposta pessoal.



# Referências bibliográficas

- ALONSO, M. S.; FINN, E. J. *Física*. São Paulo: Edgard Blucher, 2014. v. 1 e 2. \_\_\_\_\_; \_\_\_\_\_. *Física: um curso universitário*. São Paulo: Edgard Blucher, 2014. \_\_\_\_\_; \_\_\_\_\_. *Fundamentos cuánticos y estadísticos*. México: Addison Wesley Longman, 1999.
- BEER, F. P.; JOHNSTON JR., E. Russel. *Mecânica vetorial para engenheiros*. São Paulo: McGraw-Hill/Makron Books, 1991.
- BENSON, H. *University Physics*. Nova York: John Wiley & Sons, 1995.
- BLACKWOOD, O. H.; HERRON, W. B.; KELLY, W. C. *Física na escola secundária*. Rio de Janeiro: Ministério da Educação e Cultura, 1962.
- BRAZ JR., D. *Física moderna: tópicos para o Ensino Médio*. Campinas: Companhia da Escola, 2002.
- BUKHOVTSEV, B. B.; KRIVTCHENKOV, V. D.; MIAKISHEV, G. Y.; SARAIEVA, I. M. *Problemas seleccionados de Física elementar*. Moscou: Mir, 1977.
- CANIATO, R. *O céu*. Campinas: Fundação Tropical de Pesquisas e Tecnologia, 1978.
- CAPRA, F. *O tao da Física*. São Paulo: Cultrix, 2000.
- CASTELLAN, G. W. *Fundamentos de Físico-química*. Rio de Janeiro: LTC, 1995.
- CHAVES, A. *Física básica*. Rio de Janeiro: LTC/LAB, 2007.
- COHEN, I. B. *O nascimento de uma nova Física*. São Paulo: Edart, 1967.
- CUTNELL, J. D.; JOHNSON, K. W. *Física*. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006. v. 1, 2 e 3. \_\_\_\_\_; \_\_\_\_\_. *Physics*. Nova York: John Wiley & Sons, 1997.
- DERRY, T. K. *Historia de la tecnología*. Ciudad de México: Siglo XXI, 1999.
- DIAMOND, J. *Armas, germes e aço: os destinos das sociedades humanas*. Rio de Janeiro: Record, 2001.
- EHRlich, R. *Virar o mundo do avesso*. Lisboa: Gradiva, 1997.
- EINSTEIN, A. *Como vejo o mundo*. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 2015.
- EISBERG, R.; RESNICK, R. *Física quântica*. Rio de Janeiro: Elsevier, 1979.
- ERCILIA, S. B.; GARCIA, E. B.; MUÑOS, C. G. *Física general*. 32. ed. Madrid: Editorial Tébar, s. d.
- FEYNMAN, R. P. *O significado de tudo*. Lisboa: Gradiva, 2001. \_\_\_\_\_; \_\_\_\_\_. *QED: a estranha teoria da luz e da matéria*. Lisboa: Gradiva, 2002.
- FISHBANE, P. M.; GASIOROWICZ, S.; THORTON, S. T. *Physics for scientists and engineers*. Nova Jersey: Prentice Hall, 1996.
- FLEMING, P. J. *Physics*. Massachusetts: Addison Wesley, 1978.
- FOLMER-JOHNSON, T. N. O. *Física para vestibular*. São Paulo: Nobel, 1965.
- GAMOW, G. *Gravidade*. São Paulo: Edart, 1973. \_\_\_\_\_; \_\_\_\_\_. *O incrível mundo da Física Moderna*. São Paulo: Ibrasa, 2004.
- GARCIA, E. A. C. *Biofísica*. São Paulo: Sarvier, 2002.
- GIANCOLI, D. C. *Física, principios con aplicaciones*. México: Prentice Hall Hispanoamericana, 2007.
- GROUEFF, S.; CARTEIR, J. P. *O enigma do cosmo*. Rio de Janeiro: Primor, 1978.
- GUAYDIER, P. *História da Física*. São Paulo: Martins Fontes, 1983.
- GUIMBAL, R. *Le problème de la Physique*. Paris: Bordas, 1972.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R. *Física*. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico, 1984. \_\_\_\_\_; \_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_; WALKER, J. *Fundamentos da Física*. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- HAYT, W. H. *Eletromagnetismo*. Rio de Janeiro: LTC, 1978.
- HECHT, E. *Óptica*. Lisboa: Fund. Calouste Gulbekian, 1991.
- HESSEB, B. *Las raíces socioeconómicas de la Mecánica de Newton*. Cuba: Academia, 1985.
- KITTEL, C. et al. *Mecânica: Berkeley physics course*. Espanha: Reverte, 1996. v. 1.
- KOESTLER, A. *Os sonâmbulos*. São Paulo: Ibrasa, 1971.
- KÖSEL, S. *Problemas de Física*. Moscou: Mir, 1986.
- KUHN, T. S. *A estrutura das revoluções científicas*. São Paulo: Perspectiva, 1975.
- LANDAU, L.; KITAIGORODKI, A. *Física para todos*. Moscou: Mir, 1967. \_\_\_\_\_; \_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_; RUMER, Y. *Aprenda a Teoria da Relatividade brincando*. São Paulo: Hemus, 1970.
- LUCIE, P. *Física básica*. Rio de Janeiro: Campus, 1979.
- MATVEEV, A. N. *Electricidad y magnetismo*. Moscou: Mir, 1988.
- MORSE, P. M. *Thermal Physics*. Nova York: Perseus, 1969.
- NUSSBAUM, A. *Comportamento eletrônico e magnético dos materiais*. São Paulo: Edgard Blucher, 1971.
- NUSSENZVEIG, H. M. *Curso de Física básica*. São Paulo: Edgard Blucher, 2013.
- OKUNO, E.; CALDAS, L. L.; CHOW, C. *Física para ciências biológicas e biomédicas*. São Paulo: Harbra, 1982.
- OREAR, J. *Física*. Rio de Janeiro: LTC, 1991.
- OSADA, J. *Evolução das ideias da Física*. São Paulo: Edgard Blucher/USP, 1972.
- PAIS, A. *A ciência e a vida de Albert Einstein*. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1995.
- PERELMAN, Y. *Física recreativa*. Moscou: Mir, 1987.
- PURCELL, E. M. *Curso de Física de Berkeley: eletricidade e magnetismo*. São Paulo: Edgard Blucher, 1981. v. 2.
- REEVES, H. *Um pouco mais de azul: a evolução cósmica*. São Paulo: Martins Editora, 1998.
- RESNICK, R.; HALLIDAY, D. *Física*. Rio de Janeiro: LTC, 1974.
- RONAN, C. A. *História ilustrada da Ciência da Universidade de Cambridge*. São Paulo: Jorge Zahar, 1991.
- ROZEMBERG, I. M. *O Sistema Internacional de Unidades — SI*. São Paulo: Instituto Mauá de Tecnologia, 2006. \_\_\_\_\_; GEVERTZ, M. *Problemas de Física*. São Paulo: Nobel, 1967.
- RUSSEL, B. *ABC da Relatividade*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1974.
- SALMERON, R. A. *Introdução à eletricidade e ao magnetismo*. São Paulo: Ed. do Autor, 1971.
- SAVELYEV, I. V. *Physics: a general course*. Moscou: Mir, 1980. v. 1 e 2.
- SEARS, F. W. *Física*. São Paulo: Ao Livro Técnico, 1970. \_\_\_\_\_; ZEMANSKY, M. W. *Física*. São Paulo: Ao Livro Técnico, 1970.
- SENGBERG, G. *Eletricidade*. São Paulo: Nobel, 1965.
- SERWAY, R. A. *Física 4*. Rio de Janeiro: LTC, 1996. \_\_\_\_\_; FAUGHN, J. S. *Física*. México: Pearson Educación, 2001. \_\_\_\_\_; JEWETT JR., J. W. *Principios de Física*. São Paulo: Pioneira/Thomson Learning, 2004.
- THE PROJECT PHYSICS COURSE. Nova York/Toronto: Holt, Rinehart and Winston, 1970.
- THE VISUAL DICTIONARY OF PHYSICS. Toronto: Stoddart, 1995.
- TRIPLER, P. A. *Física*. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1978. v. 1 e 2.
- VANCLEAVE, J. P. *Teaching the fun of Physics*. Nova Jersey: Prentice Hall, 1985.
- WALKER, J. *O grande circo da Física*. Lisboa: Gradiva, 2001.
- WESTFALL, R. S. *A vida de Isaac Newton*. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1993.
- WHITE, H. E. *Física moderna*. Barcelona: Montaner y Simón, 1979. v. 1 e 2.
- WILSON, J. *Física*. Nova Jersey: Prentice Hall, 1996.
- WOLF, J. S. *Physics*. Nova York: Barron's Educational Series, 1996.
- WYLEN, G. J. V.; SONNTAG, R. E. *Fundamentos da Termodinâmica clássica*. São Paulo: Edgard Blucher, 1976.
- YOUNG, H. D. *University Physics*. Massachusetts: Addison Wesley, 1992.
- ZEMANSKY, M. W.; SEARS, F. W. *Eletromagnetismo*. São Paulo: Pearson Brasil, 2003.

# Orientações Didáticas

# Apresentação

O livro didático é um recurso de grande relevância para o processo educacional porque, por meio de textos, exercícios e atividades, proporciona aos estudantes o contato direto com os conteúdos disciplinares apropriados ao seu ano de estudo. Entretanto, ele não resume o curso oferecido pelo professor, sendo um recurso que deve ser integrado a outros disponíveis, tanto de forma parcial como integral, ou como complemento.

Nessa perspectiva, a presente coleção e este Manual têm por objetivo auxiliar a prática pedagógica do professor, porém com a consciência de que o livro não resume o fazer docente nem o discente. Esta coleção é composta de três volumes estruturados em unidades e capítulos que abordam uma seleção abrangente e relevante do conteúdo da Física. Os capítulos são formados por textos que desenvolvem os conceitos, as leis e as teorias físicas e por atividades que objetivam desenvolver os conceitos, além de apresentarem textos da mídia impressa ou da internet que veiculam aspectos da Física e elementos da história da Ciência e do cotidiano, dando significado a esse conhecimento.

Nas Orientações Didáticas são desenvolvidos aspectos do processo de ensino-aprendizagem e abordadas possibilidades de fazê-lo de maneira articulada com a coleção. Na parte comum aos três volumes são contemplados elementos sobre o pensar e, na parte específica de cada volume, sobre o fazer.

Na parte comum aos três volumes – A Física e a prática docente no Ensino Médio – estão os conceitos pedagógicos, os objetivos formativos e as indicações de estudos/materiais que suplementam a formação docente.

Na parte específica de cada volume estão as articulações conceituais necessárias ao desenvolvimento de ações interdisciplinares, de contextualização, bem como as que fornecem uma visão mais integrada da Física com outras ciências. Ainda na parte específica, as Orientações Didáticas apresentam planos de aula e aprofundamentos conceituais em suas unidades. Cada capítulo traz sugestões de atividades para iniciar o desenvolvimento do aprendizado do conteúdo do livro e encaminhamentos de atividades práticas e de leitura do texto. Há também atividades complementares presentes apenas nas Orientações Didáticas, mas que se referem, por exemplo, aos elementos de história da Ciência ou do cotidiano que estão no livro. Nessas atividades complementares constam propostas que utilizam abordagens e materiais diversos, como as aproximações investigativas, colaborativas e interdisciplinares, e também vídeos e simulações.

Portanto, a coleção foi concebida com a finalidade de oferecer uma base de conceitos, exercícios e atividades relacionados à Física, além de sua história e sua relação com a sociedade, enquanto as Orientações Didáticas propõem possíveis abordagens e atividades articuladas à coleção, de modo que se desenvolva uma prática pedagógica coerente com o estudante que se pretende formar.

# Sumário

## A Física e a prática docente no Ensino Médio 292

<b>Objetivos formativos.....</b>	<b>292</b>
Estatuto da Criança e do Adolescente (ECA).....	293
Lei de Diretrizes e Bases da Educação (LDB).....	293
Plano Nacional de Educação (PNE).....	294
Diretrizes Curriculares Nacionais para o Ensino Médio.....	294
Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN) – Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias.....	295
Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN+) – Física.....	296
Orientações Curriculares Nacionais (OCN).....	303
Programa Ensino Médio Inovador.....	303
Sistema Nacional de Avaliação da Educação Básica (Saeb): O Exame Nacional do Ensino Médio (Enem).....	304
Programa Internacional de Avaliação de Estudantes (Pisa).....	307
Síntese.....	308
<b>Conceitos refletidos na obra.....</b>	<b>309</b>
A escola.....	309
O estudante.....	309
O professor.....	310
A sala de aula.....	310
Projeto Político-Pedagógico da escola (PPP).....	311
Planejamento das aulas.....	311
Abordagens.....	311
A avaliação.....	314
O conteúdo da Física.....	316
<b>Materiais indicados para suplementar a formação.....</b>	<b>317</b>
Periódicos.....	317
Encontros.....	318
<i>Sites</i> .....	318
Livros.....	319
Produções cinematográficas.....	320
<b>Referências bibliográficas.....</b>	<b>322</b>
<b>Orientações específicas para este volume</b>	<b>324</b>
<b>Unidade 1.....</b>	<b>325</b>
<b>Unidade 2.....</b>	<b>349</b>
<b>Unidade 3.....</b>	<b>377</b>
<b>Unidade 4.....</b>	<b>389</b>

Discorreremos sobre os **objetivos formativos**. Os elementos abordados foram: a legislação pertinente à idade, as diretrizes federais, o papel das avaliações oficiais e as singularidades referentes aos estudantes e à comunidade na qual a escola se insere, sem menosprezar a dimensão conceitual do ensino da própria ciência Física.

- Ao apresentar os **conceitos refletidos na obra**, trazemos os constituintes fundamentais da unidade formadora (a escola), entre os quais está a própria sala de aula e aquilo que em seu interior ocorre. Cada constituinte foi desenvolvido tendo como base características da realidade escolar pública brasileira, na qual os livros da coleção também se apoiam.
- Os **materiais indicados para suplementar a formação** consistem em sugestões de leituras, encontros e materiais que abordam os conteúdos da Física e seu ensino. Entre os materiais selecionados, buscou-se priorizar aqueles com livre acesso pela internet e os que aceitam experiências didáticas realizadas pelos professores.
- Ainda servem como indicação para aprofundamento as referências bibliográficas, que basearam a composição integral do Manual, constituindo o último elemento da parte comum aos três volumes.

A parte específica de cada volume foi elaborada com a mesma estrutura, pois ela auxilia a leitura e a orientação pelo Manual. A parte específica aborda cada unidade do respectivo volume e cada capítulo das unidades. Ao término são apresentadas propostas de planejamento anual.

No início de cada unidade foram destacados os conceitos fundamentais desenvolvidos no texto e as articulações que relacionam os conceitos da Física entre si com as demais disciplinas curriculares e, por fim, com elementos de contextualização que permitem situá-los na realidade vivencial.

Ao tratar dos capítulos, buscamos: a) abordar formas específicas de introdução das temáticas em proposta de atividade introdutória; b) trazer exercícios resolvidos, encaminhamentos e soluções para as atividades de leitura; c) discriminar modos de montagem, proposição e condução; d) apresentar sugestões de atividades relacionadas aos textos do capítulo.

## Objetivos formativos

No exercício da prática pedagógica, o professor pode deparar com perguntas do tipo: “Com que finalidade estou formando o estudante?”, “Quais são os objetivos que devo buscar nessa formação?”. Explicitar os objetivos formativos educacionais é o primeiro passo dessa busca.

O período escolar é o momento preparatório da vida das pessoas para o mundo do trabalho e o exercício das relações sociais e da cidadania. A escola deixou de ser o espaço cujo único objetivo era perpetuar o patrimônio cultural da sociedade, onde o conteúdo era aprendido pelo seu valor em si.

Com a democratização do acesso à escola, os objetivos do ensino evoluíram e os produtos da ciência passaram a concorrer com um ensino sobre a ciência e com uma dimensão formativa na qual ela representa um meio pelo qual os estudantes podem desenvolver as competências e habilidades necessárias para a vida social contemporânea.

Assim, o currículo de Física no Ensino Médio objetiva o ensino dos resultados obtidos por essa Ciência e suas características, e o uso de sua linguagem, seus conceitos e teorias, seu desenvolvimento matemático e experimental, para que os educandos desenvolvam capacidades.

Ensinamos aos jovens os resultados da ciência Física, e por meio dela os estudantes desenvolvem capacidades. Mas quais resultados são ensinados? Qual imagem da Física é explicitada ou está implícita nas aulas? Quais são as competências e habilidades que os estudantes devem desenvolver?

Além das considerações pessoais de cada professor, existem textos e documentos que nos indicam respostas, mesmo com diferentes aproximações da sala de aula. Por isso, destacamos trechos das legislações referentes à educação, que tratam, de maneira geral, dos estudantes que devemos formar:

- Estatuto da Criança e do Adolescente;
- Lei de Diretrizes e Bases da Educação;
- Plano Nacional de Educação;
- Diretrizes Curriculares Nacionais para o Ensino Médio.

A seguir, apresentamos publicações do Ministério da Educação referentes aos objetivos formativos do Ensino Médio e das Ciências da Natureza, buscando focalizar a Física.

As publicações consistem em quatro orientações curriculares e dois sistemas avaliativos.

Além dos objetivos, as publicações que tratam de orientações curriculares exemplificam meios de contemplar as finalidades, explicando metodologias e sugerindo conhecimentos associados a cada proposta:

- Parâmetros Curriculares Nacionais;
- Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais;
- Orientações Curriculares Nacionais;
- Programa Ensino Médio Inovador.

Inserimos também os documentos dos sistemas de avaliação porque neles estão explicitados os objetivos formativos que serviram de orientação às questões que foram formuladas. A avaliação nacional que insere o conteúdo da Física é o Enem, enquanto a internacional é elaborada pelo Pisa.

Por outro lado, os documentos oficiais não encerram todos os objetivos formativos possíveis, pois existem singularidades em cada região do país, em cada Estado, cidade e comunidade, que demandam da escola ações com o intuito de atingir objetivos específicos. Eles são elaborados no ambiente de cada escola, em cada área do conhecimento ou disciplina. Assim, discorreremos também sobre outros instrumentos importantes na construção dos objetivos formativos: o Projeto Político-Pedagógico da escola e o Planejamento das Aulas. Em sequência à apresentação desses elementos, tecemos considerações que visam sintetizar os objetivos formativos e auxiliar o professor a responder à pergunta inicialmente proposta: “Com que finalidade estou formando o estudante?”.

## Estatuto da Criança e do Adolescente (ECA)

Do Direito à Educação, à Cultura, ao Esporte e ao Lazer  
[...]

Art. 54 É dever do Estado assegurar à criança e ao adolescente:

- I - ensino fundamental, obrigatório e gratuito, inclusive para os que a ele não tiveram acesso na idade própria;
- II - progressiva extensão da obrigatoriedade e gratuidade ao ensino médio;  
[...]
- V - acesso aos níveis mais elevados do ensino, da pesquisa e da criação artística, segundo a capacidade de cada um;

VI - oferta de ensino noturno regular, adequado às condições do adolescente trabalhador;

[...]

Art. 58 No processo educacional respeitar-se-ão os valores culturais, artísticos e históricos próprios do contexto social da criança e do adolescente, garantindo-se a estes a liberdade da criação e o acesso às fontes de cultura.

Disponível em: <[www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/L8069.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L8069.htm)>. Acesso em: 16 fev. 2016.

## Lei de Diretrizes e Bases da Educação (LDB)

Art. 1º A educação abrange os processos formativos que se desenvolvem na vida familiar, na convivência humana, no trabalho, nas instituições de ensino e pesquisa, nos movimentos sociais e organizações da sociedade civil e nas manifestações culturais.

Art. 2º A educação, dever da família e do Estado, inspirada nos princípios de liberdade e nos ideais de solidariedade humana, tem por finalidade o pleno desenvolvimento do educando, seu preparo para o exercício da cidadania e sua qualificação para o trabalho.

Art. 3º O ensino será ministrado com base nos seguintes princípios:

- I - igualdade de condições para o acesso e permanência na escola;
- II - liberdade de aprender, ensinar, pesquisar e divulgar a cultura, o pensamento, a arte e o saber;
- III - pluralismo de ideias e de concepções pedagógicas;
- IV - respeito à liberdade e apreço à tolerância;  
[...]
- VIII - gestão democrática do ensino público, na forma desta Lei e da legislação dos sistemas de ensino;
- IX - garantia de padrão de qualidade;
- X - valorização da experiência extraescolar;
- XI - vinculação entre a educação escolar, o trabalho e as práticas sociais.

[...]

Art. 13 Os docentes incumbir-se-ão de:

[...]

- III - zelar pela aprendizagem dos alunos;
- IV - estabelecer estratégias de recuperação para os alunos de menor rendimento;  
[...]
- VI - colaborar com as atividades de articulação da escola com as famílias e a comunidade.

Art. 21 A educação escolar compõe-se de:

- I - educação básica, formada pela educação infantil, ensino fundamental e ensino médio;
- II - educação superior.

Art. 22 A educação básica tem por finalidades desenvolver o educando, assegurar-lhe a formação comum indispensável para o exercício da cidadania e fornecer-lhe meios para progredir no trabalho e em estudos posteriores.  
[...]

Art. 26 Os currículos da educação infantil, do ensino fundamental e do ensino médio devem ter base nacional comum, a ser complementada, em cada sistema de ensino e em cada estabelecimento escolar, por uma parte diversificada, exigida pelas características regionais e locais da sociedade, da cultura, da economia e dos educandos.

§ 1º Os currículos a que se refere o *caput* devem abranger, obrigatoriamente, o estudo da língua portuguesa e da matemática, o conhecimento do mundo físico e natural e da realidade social e política, especialmente do Brasil.

[...]

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.

Art. 36 O currículo do ensino médio observará o disposto na Seção I deste Capítulo e as seguintes diretrizes:

- I - destacará a educação tecnológica básica, a compreensão do significado da ciência, das letras e das artes; o processo histórico de transformação da sociedade e da cultura; a língua portuguesa como instrumento de comunicação, acesso ao conhecimento e exercício da cidadania;
- II - adotará metodologias de ensino e de avaliação que estimulem a iniciativa dos estudantes;

[...]

§ 1º Os conteúdos, as metodologias e as formas de avaliação serão organizados de tal forma que ao final do ensino médio o educando demonstre:

- I - domínio dos princípios científicos e tecnológicos que presidem a produção moderna;

[...]

Disponível em: <[www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/L9394.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9394.htm)>. Acesso em: 16 fev. 2016.

## Plano Nacional de Educação (PNE)

O Plano Nacional de Educação (PNE), sancionado pelo governo federal, é um planejamento nacional realizado para todos os níveis de ensino. Entre os objetivos estabelecidos encontramos, em síntese:

- a elevação global do nível de escolaridade da população;
- a melhoria da qualidade do ensino em todos os níveis;
- a redução das desigualdades sociais e regionais no tocante ao acesso e à permanência, com sucesso, na educação pública;
- a democratização da gestão do ensino público nos estabelecimentos oficiais, obedecendo aos princípios de participação dos profissionais da educação na elaboração do projeto pedagógico da escola e à participação das comunidades escolar e local em conselhos escolares ou equivalentes.

No que se refere a objetivos formativos para o Ensino Médio:

- Preparando jovens e adultos para os desafios da modernidade, o ensino médio deverá permitir a aquisição de competências relacionadas ao pleno exercício da cidadania e da inserção produtiva: autoaprendizagem; percepção da dinâmica social e capacidade para nela intervir; compreensão dos processos produtivos; capacidade de observar, interpretar e tomar decisões; domínio de aptidões básicas de linguagens, comunicação, abstração; habilidades para incorporar valores éticos de solidariedade, cooperação e respeito às individualidades.

Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/leis\\_2001/110172.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/leis_2001/110172.htm)>. Acesso em: 16 fev. 2016.

## Diretrizes Curriculares Nacionais para o Ensino Médio

Art. 4º As unidades escolares que ministram esta etapa da Educação Básica devem estruturar seus projetos político-pedagógicos considerando as finalidades previstas na Lei [...]

- 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 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.

Art. 5º O Ensino Médio, em todas as suas formas de oferta e organização, baseia-se em:

- I - formação integral do estudante;
- II - trabalho e pesquisa como princípios educativos e pedagógicos, respectivamente;
- III - educação em direitos humanos como princípio nacional norteador;
- IV - sustentabilidade ambiental como meta universal;

- V - indissociabilidade entre educação e prática social, considerando-se a historicidade dos conhecimentos e dos sujeitos do processo educativo, bem como entre teoria e prática no processo de ensino-aprendizagem;
- VI - integração de conhecimentos gerais e, quando for o caso, técnico-profissionais realizada na perspectiva da interdisciplinaridade e da contextualização;
- VII - reconhecimento e aceitação da diversidade e da realidade concreta dos sujeitos do processo educativo, das formas de produção, dos processos de trabalho e das culturas a eles subjacentes;
- VIII - integração entre educação e as dimensões do trabalho, da ciência, da tecnologia e da cultura como base da proposta e do desenvolvimento curricular.

§ 1º O trabalho é conceituado na sua perspectiva ontológica de transformação da natureza, como realização inerente ao ser humano e como mediação no processo de produção da sua existência.

§ 2º A ciência é conceituada como o conjunto de conhecimentos sistematizados, produzidos socialmente ao longo da história, na busca da compreensão e transformação da natureza e da sociedade.

§ 3º A tecnologia é conceituada como a transformação da ciência em força produtiva ou mediação do conhecimento científico e a produção, marcada, desde sua origem, pelas relações sociais que a levaram a ser produzida.

§ 4º A cultura é conceituada como o processo de produção de expressões materiais, símbolos, representações e significados que correspondem a valores éticos, políticos e estéticos que orientam as normas de conduta de uma sociedade.

Art. 6º O currículo é conceituado como a proposta de ação educativa constituída pela seleção de conhecimentos construídos pela sociedade, expressando-se por práticas escolares que se desdobram em torno de conhecimentos relevantes e pertinentes, permeadas pelas relações sociais, articulando vivências e saberes dos estudantes e contribuindo para o desenvolvimento de suas identidades e condições cognitivas e socioafetivas. [...]

Art. 12º O currículo do Ensino Médio deve:

- I - garantir ações que promovam:
  - a) a educação tecnológica básica, a compreensão do significado da ciência, das letras e das artes;
  - b) o processo histórico de transformação da sociedade e da cultura;
  - c) a língua portuguesa como instrumento de comunicação, acesso ao conhecimento e exercício da cidadania;
- II - adotar metodologias de ensino e de avaliação de aprendizagem que estimulem a iniciativa dos estudantes;
- III - organizar os conteúdos, as metodologias e as formas de avaliação de tal forma que ao final do Ensino Médio o estudante demonstre:

- a) domínio dos princípios científicos e tecnológicos que presidem a produção moderna;
- [...]

Disponível em: <portal.mec.gov.br/index.php?option=com\_docman&view=download&alias=9864-rceb002-12&Itemid=30192>. Acesso em: 16 fev. 2016.

## Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN) – Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias

Tendo como referenciais a LDB/96 e a Resolução nº 3 de 1998 (Diretrizes Curriculares Nacionais), os Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN) propõem o estabelecimento de uma nova visão sobre o ensino. Sem pretensão normativa, diferentemente das legislações já citadas, os parâmetros configuram-se como balizadores, a fim de nortear uma base nacional comum.

Nos parâmetros encontramos a base didática nacional comum dividida em três grandes áreas, na tentativa de fazer com que as disciplinas que as compõem se comuniquem, bem como se relacionem com as disciplinas das outras duas áreas, buscando conferir um caráter interdisciplinar resultante. Essas grandes áreas são: Linguagens, Códigos e suas Tecnologias, Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias e, por fim, Ciências Humanas e suas Tecnologias.

A prerrogativa permanente presente no documento é a de que o ensino seja contextualizado, com significação própria e não propedêutica: legível na medida em que se aprende e não se prorrogam os significados para o nível de ensino seguinte com a justificativa de que é necessário apenas atender aos requisitos dos próximos anos. Deseja-se formar um estudante responsável pelo seu papel na sociedade e atuante nela, não só para o desenvolvimento de sua futura profissão, mas também para seu desenvolvimento constante como cidadão.

A área a que se destina a disciplina Física é a de Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias. Nela, encontram-se as habilidades, competências e valores esperados que o estudante desenvolva com o estudo da disciplina. Deseja-se, no que se refere à Física, que o estudante saiba entender, comunicar e expressar os conteúdos importantes, investigar esta ciência e compreender os resultados conseguidos, assim como compreender a Física como construção humana e fundamental no contexto social.

A seguir, apresentamos trechos dos PCN para a disciplina Física nos quais essas proposições são evidenciadas:

[...] Espera-se que o ensino de Física, na escola média, contribua para a formação de uma cultura científica efetiva, que permita ao indivíduo a interpretação dos fatos, fenômenos e processos naturais, situando e dimensionando a interação do ser humano com a natureza como parte da própria natureza em transformação. Para tanto, é essencial que o conhecimento físico seja explicitado como um processo histórico, objeto de contínua transformação e associado às outras formas de expressão e produção humanas. É necessário também que essa cultura em Física inclua a compreensão do conjunto de equipamentos e procedimentos, técnicos ou tecnológicos, do cotidiano doméstico, social e profissional.

Ao propiciar esses conhecimentos, o aprendizado da Física promove a articulação de toda uma visão de mundo, de uma compreensão dinâmica do universo, mais ampla do que nosso entorno material imediato, capaz portanto de transcender nossos limites temporais e espaciais. Assim, ao lado de um caráter mais prático, a Física revela também uma dimensão filosófica, com uma beleza e importância que não devem ser subestimadas no processo educativo. Para que esses objetivos se transformem em linhas orientadoras para a organização do ensino de Física no Ensino Médio, é indispensável traduzi-los em termos de competências e habilidades, superando a prática tradicional.

[...] Isso significa promover um conhecimento contextualizado e integrado à vida de cada jovem. Apresentar uma Física que explique a queda dos corpos, o movimento da Lua ou das estrelas no céu, o arco-íris e também os raios laser, as imagens da televisão e as formas de comunicação. Uma Física que explique os gastos da “conta de luz” ou o consumo diário de combustível e também as questões referentes ao uso das diferentes fontes de energia em escala social, incluída a energia nuclear, com seus riscos e benefícios. Uma Física que discuta a origem do universo e sua evolução. Que trate do refrigerador ou dos motores a combustão, das células fotoelétricas, das radiações presentes no dia a dia, mas também dos princípios gerais que permitem generalizar todas essas compreensões. Uma Física cujo significado o aluno possa perceber no momento em que aprende, e não em um momento posterior ao aprendizado.

[...]

Disponível em: <<http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/ciencian.pdf>>. Acesso em: 16 fev. 2016.

## Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN+) – Física

A fim de complementar o que foi exposto nos PCN, o PCN+ também aponta para a necessidade de

um ensino interdisciplinar e contextualizado, transformando-o numa ferramenta para a compreensão do mundo através do ensino de formas de pensar e agir sobre contextos significativos. Isso torna necessário o entendimento, pelo estudante, do sentido do aprendizado não como um pré-requisito para o ano ou nível de ensino que vem a seguir.

O PCN+ sugere um currículo de Física pautado por elementos estruturantes, que são constituídos pelos conteúdos disciplinares. Entretanto, os conteúdos da Física não são suficientes para desenvolver integralmente os elementos estruturantes, sendo necessárias para tal a interdisciplinaridade, que trará os conteúdos relevantes das outras disciplinas, e a contextualização, que fornecerá uma situação na qual o conhecimento será desenvolvido.

Assim, os PCN+ reiteram a ideia de que as competências e habilidades, defendidas pelos PCN, não devem entrar em conflito com os conhecimentos específicos disciplinares, mas que se deve focalizar a necessária contextualização dos conhecimentos disciplinares. Ou seja, o problema proposto, contextual, necessita da ferramenta (conhecimento disciplinar) para poder ser resolvido. Desse modo, é possível conseguir uma formação disciplinar sólida, concomitantemente associada ao conhecimento da realidade – um saber contextualizado e necessário à compreensão do mundo.

Esse documento detalha as *competências e habilidades* apresentadas pelos PCN, tanto na área de conhecimento como para a disciplina. O detalhamento inclui sugestões de como desenvolver essas competências e habilidades.

Os parâmetros e orientações indicam, como metas do ensino do conhecimento físico, três grandes competências: *Representação e Comunicação, Investigação e Compreensão e Contextualização Sociocultural*.

Em *Representação e Comunicação* inserem-se o entendimento de códigos, símbolos, formas de instalação e utilização de manuais. São abordados os conhecimentos matemáticos necessários e o uso correto da linguagem física.

Nos objetivos de *Investigação e Compreensão* entram a articulação do conhecimento físico com o de outras áreas da ciência e a compreensão do funcionamento de equipamentos tecnológicos, domésticos, de uso social ou profissional. Também se inserem o entendimento e uso de procedimentos científicos, como a formulação de hipóteses, a observação, a previsão, a identificação de padrões, a relação entre grandezas, a medição, a avaliação e a síntese, assim como a compreensão e a utilização de modelos, leis e teorias físicas.

A *Contextualização Sociocultural* trata da característica da ciência como construção humana, cujo desenvolvimento está atrelado aos contextos cultural, social, político e econômico. Outros objetivos que

adentram o grupo: a relação entre a Física e outras formas de expressar o mundo e a elaboração de juízos de valor quanto ao uso da ciência e da tecnologia, bem como a avaliação das consequências desse uso.

<b>Representação e Comunicação</b>	
<b>Na área</b>	<b>Em Física</b>
<b>Símbolos, códigos e nomenclaturas de ciência e tecnologia</b>	
Reconhecer e utilizar adequadamente, na forma oral e escrita, símbolos, códigos e nomenclaturas da linguagem científica.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reconhecer e saber utilizar corretamente símbolos, códigos e nomenclaturas de grandezas da Física, por exemplo, nas informações em embalagens de produtos, reconhecer símbolos de massa ou volume; nas previsões climáticas, identificar temperaturas, pressão, índices pluviométricos; no volume de alto-falantes, reconhecer a intensidade sonora (dB); em estradas ou aparelhos, velocidades (m/s, km/h, rpm); em aparelhos elétricos, códigos como W, V ou A; em tabelas de alimentos, valores calóricos.</li> <li>• Conhecer as unidades e as relações entre as unidades de uma mesma grandeza física para fazer traduções entre elas e utilizá-las adequadamente. Por exemplo, identificar que uma caixa-d'água de 2 m<sup>3</sup> é uma caixa de 2 000 litros, ou que uma tonelada é uma unidade mais apropriada para expressar o carregamento de um navio do que um milhão de gramas.</li> </ul>
<b>Articulação dos símbolos e códigos de ciência e tecnologia</b>	
Ler, articular e interpretar símbolos e códigos em diferentes linguagens e representações: sentenças, equações, esquemas, diagramas, tabelas, gráficos e representações geométricas.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ler e interpretar corretamente tabelas, gráficos, esquemas e diagramas apresentados em textos. Por exemplo, interpretar um gráfico de crescimento, ou da variação de temperaturas ambientes.</li> <li>• Compreender o esquema de uma montagem elétrica; ler um medidor de água ou de energia elétrica; interpretar um mapa meteorológico ou uma fotografia de radiação infravermelha, a partir da leitura de suas legendas.</li> <li>• Construir sentenças ou esquemas para a resolução de problemas; construir tabelas e transformá-las em gráfico, para, por exemplo, descrever o consumo de energia elétrica de uma residência, o gasto de combustível de um automóvel, em função do tempo, ou a posição relativa do Sol ao longo do dia ou do ano.</li> <li>• Compreender que tabelas, gráficos e expressões matemáticas podem ser diferentes formas de representação de uma mesma relação, com potencialidades e limitações próprias, para ser capaz de escolher e fazer uso da linguagem mais apropriada em cada situação, além de poder traduzir entre si os significados dessas várias linguagens. Por exemplo, compreender que o consumo mensal de energia elétrica de uma residência, ao longo do ano, pode ser apresentado em uma tabela que organiza os dados; ou em um gráfico que permite analisar melhor as tendências do consumo.</li> </ul>
<b>Análise e interpretação de textos e outras comunicações de ciência e tecnologia</b>	
Consultar, analisar e interpretar textos e comunicações de ciência e tecnologia veiculados por diferentes meios.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ler e interpretar informações apresentadas em diferentes linguagens e representações (técnicas), como, por exemplo, um manual de instalação de equipamento, características de aparelhos eletrodomésticos ou esquemas de montagem de móveis.</li> <li>• Acompanhar o noticiário relativo à ciência em jornais, revistas e notícias veiculadas pela mídia, identificando a questão em discussão e interpretando, com objetividade, seus significados e implicações para participar do que se passa à sua volta. Por exemplo, no noticiário sobre telefonia celular, identificar que essa questão envolve conhecimentos sobre radiações, suas faixas de frequência, processos de transmissão, além de incertezas quanto a seus possíveis efeitos sobre o ambiente e a saúde.</li> </ul>

## Representação e Comunicação

Na área	Em Física
<b>Elaboração de comunicações</b>	
Elaborar comunicações orais ou escritas para relatar, analisar e sistematizar eventos, fenômenos, experimentos, questões, entrevistas, visitas, correspondências.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Descrever relatos de fenômenos ou acontecimentos que envolvam conhecimentos físicos, tais como relatos de viagens, visitas ou entrevistas, apresentando com clareza e objetividade suas considerações e fazendo uso apropriado da linguagem da Física. Por exemplo, elaborar o relatório da visita a uma usina termelétrica, destacando sua capacidade de geração de energia, o processo de produção e seus impactos locais, tanto sociais como ambientais.</li> <li>• Elaborar relatórios analíticos, apresentando e discutindo dados e resultados, seja de experimentos ou de avaliações críticas de situações, fazendo uso, sempre que necessário, da linguagem física apropriada. Por exemplo, elaborar um relatório de pesquisa sobre vantagens e desvantagens do uso de gás como combustível automotivo, dimensionando a eficiência dos processos e custos de operação envolvidos.</li> <li>• Expressar-se de forma correta e clara em correspondência para os meios de comunicação ou via internet, apresentando pontos de vista, solicitando informações ou esclarecimentos técnico-científicos. Por exemplo, escrever uma carta solicitando informações técnicas sobre aparelhos eletrônicos ou enviar um <i>e-mail</i> solicitando informações a um especialista em energia solar, explicitando claramente suas dúvidas.</li> </ul>
<b>Discussão e argumentação de temas de interesse de ciência e tecnologia</b>	
Analisar, argumentar e posicionar-se criticamente em relação a temas de ciência e tecnologia.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Compreender e emitir juízos próprios sobre notícias com temas relativos a ciência e tecnologia, veiculadas pelas diferentes mídias, de forma analítica e crítica, posicionando-se com argumentação clara. Por exemplo, enviar um <i>e-mail</i> contra-argumentando uma notícia sobre as vantagens da expansão da geração termelétrica brasileira.</li> <li>• Argumentar claramente sobre seus pontos de vista, apresentando razões e justificativas claras e consistentes, como, por exemplo, ao escrever uma carta solicitando ressarcimento dos gastos efetuados nos consertos de eletrodomésticos que se danificaram em consequência da interrupção do fornecimento de energia elétrica, apresentando justificativas consistentes.</li> </ul>

## Investigação e Compreensão

Na área	Em Física
<b>Estratégias para enfrentamento de situações-problema</b>	
Identificar em dada situação-problema as informações ou variáveis relevantes e possíveis estratégias para resolvê-la.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Frente a uma situação ou problema concreto, reconhecer a natureza dos fenômenos envolvidos, situando-os dentro do conjunto de fenômenos da Física, e identificar as grandezas relevantes, em cada caso. Assim, diante de um fenômeno envolvendo calor, identificar fontes, processos envolvidos e seus efeitos, reconhecendo variações de temperatura como indicadores relevantes.</li> </ul>

## Investigação e Compreensão

Na área

Em Física

### Interações, relações e funções; invariantes e transformações

Identificar fenômenos naturais ou grandezas em dado domínio do conhecimento científico, estabelecer relações; identificar regularidades, invariantes e transformações.

- Reconhecer a relação entre diferentes grandezas, ou relações de causa-efeito, para ser capaz de estabelecer previsões. Assim, conhecer a relação entre potência, voltagem e corrente, para estimar a segurança do uso de equipamentos elétricos, ou a relação entre força e aceleração, para prever a distância percorrida por um carro após ter freado.
- Identificar regularidades, associando fenômenos que ocorrem em situações semelhantes para utilizar as leis que expressam essas regularidades na análise e previsões de situações do dia a dia. Assim, por exemplo, compreender que variações de correntes elétricas estão associadas ao surgimento de campos magnéticos pode possibilitar, eventualmente, identificar possíveis causas de distorção das imagens de tevê ou causas de mau funcionamento de um motor.
- Reconhecer a existência de invariantes que impõem condições sobre o que pode e o que não pode acontecer em processos naturais, para fazer uso dessas invariantes na análise de situações cotidianas. Assim, a conservação da quantidade de movimento pode ser utilizada para prever possíveis resultados do choque entre dois carros, a trajetória de uma bola após ter batido na parede, o movimento dos planetas e suas velocidades ao redor do Sol ou equilíbrio de motos e bicicletas.
- Identificar transformações de energia e a conservação que dá sentido a essas transformações, quantificando-as quando necessário. Identificar também formas de dissipação de energia e as limitações quanto aos tipos de transformações possíveis impostas pela existência, na natureza, de processos irreversíveis. Por exemplo, avaliar o trabalho necessário para erguer um objeto ou empurrar um caixote, a potência de que o motor de um carro precisa para subir uma ladeira ou a quantidade de calorías para exercício de atividades esportivas.
- Reconhecer a conservação de determinadas grandezas, como massa, carga elétrica, corrente etc., utilizando essa noção de conservação na análise de situações dadas. Assim, por exemplo, reconhecer a relação entre a vazão de entrada e de saída de um sistema hidráulico, ou da corrente elétrica que entra e sai de um resistor.

### Medidas, quantificações, grandezas e escalas

Selecionar e utilizar instrumentos de medição e de cálculo, representar dados e utilizar escalas, fazer estimativas, elaborar hipóteses e interpretar resultados.

- Fazer uso de formas e instrumentos de medida apropriados para estabelecer comparações quantitativas. Por exemplo, escolher a forma adequada para medir a quantidade de água presente em um copo ou a quantidade de alimento em uma embalagem. Ou escolher a melhor forma para medir o comprimento de uma sala ou a distância percorrida em um trajeto longo.
- Fazer estimativas de ordens de grandeza para poder fazer previsões. Por exemplo, estimar o volume de água de um tanque ou uma piscina e o tempo necessário para esvaziá-los.
- Compreender a necessidade de fazer uso de escalas apropriadas para ser capaz de construir gráficos ou representações, como, por exemplo, a planta de uma casa ou o mapa de uma cidade.

Investigação e Compreensão	
Na área	Em Física
<b>Modelos explicativos e representativos</b>	
Reconhecer, utilizar, interpretar e propor modelos explicativos para fenômenos ou sistemas naturais ou tecnológicos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conhecer modelos físicos microscópicos para adquirir uma compreensão mais profunda dos fenômenos e utilizá-los na análise de situações-problema. Por exemplo, utilizar modelos microscópicos do calor para explicar as propriedades térmicas dos materiais ou, ainda, modelos da constituição da matéria para explicar a absorção de luz e as cores dos objetos.</li> <li>• Interpretar e fazer uso de modelos explicativos, reconhecendo suas condições de aplicação. Por exemplo, utilizar modelo de olho humano para compreender os defeitos visuais e suas lentes corretoras, ou o modelo de funcionamento de um gerador.</li> <li>• Elaborar modelos simplificados de determinadas situações, a partir dos quais seja possível levantar hipóteses e fazer previsões. Por exemplo, levantar hipóteses sobre as possíveis causas de interrupção do fornecimento da energia elétrica ou prever o tipo de lentes e a montagem necessária para projetar uma imagem numa tela.</li> </ul>
<b>Relações entre conhecimentos disciplinares, interdisciplinares e interáreas</b>	
Articular, integrar e sistematizar fenômenos e teorias dentro de uma ciência, entre as várias ciências e áreas de conhecimento.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Construir uma visão sistematizada dos diversos tipos de interação e das diferentes naturezas de fenômenos da Física para poder fazer uso desse conhecimento de forma integrada e articulada. Por exemplo, reconhecer que as forças elástica, viscosa, peso, atrito, elétrica, magnética etc. têm origem em uma das quatro interações fundamentais: gravitacional, eletromagnética, nuclear forte e nuclear fraca.</li> <li>• Identificar e compreender os diversos níveis de explicação física, microscópicos ou macroscópicos, utilizando-os apropriadamente na compreensão de fenômenos. Por exemplo, compreender que o funcionamento de um termômetro clínico pode ser explicado, em termos macroscópicos, pela dilatação térmica do mercúrio, enquanto apenas o modelo microscópico da matéria permite compreender o fenômeno da evaporação de um líquido.</li> <li>• Adquirir uma compreensão cósmica do Universo, das teorias relativas ao seu surgimento e sua evolução, assim como do surgimento da vida, de forma a poder situar a Terra, a vida e o ser humano em suas dimensões espaciais e temporais no Universo.</li> <li>• Na utilização de um conceito ou unidade de grandeza, reconhecer ao mesmo tempo sua generalidade e o seu significado específico em cada ciência. Por exemplo, energia, caloria ou equilíbrio são conceitos com significados diferentes, embora correspondentes, em Física, Química ou Biologia.</li> <li>• Reconhecer, na análise de um mesmo fenômeno, as características de cada ciência, de maneira a adquirir uma visão mais articulada dos fenômenos. Por exemplo, no ciclo da água, compreender que a Física releva os aspectos das transformações de estado e processos de circulação, enquanto a Química trata das diferentes reações e do papel das soluções, enquanto a Biologia analisa a influência nas cadeias alimentares e o uso do solo.</li> </ul>

Contextualização Sociocultural	
Na área	Em Física
<b>Ciência e tecnologia na história</b>	
Compreender o conhecimento científico e o tecnológico como resultados de uma construção humana, inseridos em um processo histórico e social.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Compreender a construção do conhecimento físico como um processo histórico, em estreita relação com as condições sociais, políticas e econômicas de uma determinada época. Compreender, por exemplo, a transformação da visão de mundo geocêntrica para a heliocêntrica, relacionando-as às transformações sociais que lhes são contemporâneas, identificando as resistências, dificuldades e repercussões que acompanharam essa mudança.</li> <li>• Compreender o desenvolvimento histórico dos modelos físicos para dimensionar corretamente os modelos atuais, sem dogmatismo ou certezas definitivas.</li> <li>• Compreender o desenvolvimento histórico da tecnologia, nos mais diversos campos, e suas consequências para o cotidiano e as relações sociais de cada época, identificando como seus avanços foram modificando as condições de vida e criando novas necessidades. Esses conhecimentos são essenciais para dimensionar corretamente o desenvolvimento tecnológico atual, através tanto de suas vantagens como de seus condicionantes. Reconhecer, por exemplo, o desenvolvimento de formas de transporte, a partir da descoberta da roda e da tração animal, ao desenvolvimento de motores, ao domínio da aerodinâmica e à conquista do espaço, identificando a evolução que vem permitindo ao ser humano deslocar-se de um ponto ao outro do globo terrestre em intervalos de tempo cada vez mais curtos e identificando também os problemas decorrentes dessa evolução.</li> <li>• Perceber o papel desempenhado pelo conhecimento físico no desenvolvimento da tecnologia e a complexa relação entre ciência e tecnologia ao longo da história. Muitas vezes, a tecnologia foi precedida pelo desenvolvimento da Física, como no caso da fabricação de <i>lasers</i>, ou, em outras, foi a tecnologia que antecedeu o conhecimento científico, como no caso das máquinas térmicas.</li> </ul>
<b>Ciência e tecnologia na cultura contemporânea</b>	
Compreender a ciência e a tecnologia como partes integrantes da cultura humana contemporânea.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Compreender a Física como parte integrante da cultura contemporânea, identificando sua presença em diferentes âmbitos e setores, como, por exemplo, nas manifestações artísticas ou literárias, em peças de teatro, letras de músicas etc., estando atento à contribuição da ciência para a cultura humana.</li> <li>• Promover a interação com meios culturais e de difusão científica, por meio de visitas a museus científicos ou tecnológicos, planetários, exposições etc., para incluir a devida dimensão da Física e da ciência na apropriação dos espaços de expressão contemporâneos.</li> <li>• Compreender formas pelas quais a Física e a tecnologia influenciam nossa interpretação do mundo atual, condicionando formas de pensar e interagir. Por exemplo, como a relatividade ou as ideias quânticas povoam o imaginário e a cultura contemporânea, conduzindo à extrapolação de seus conceitos para diversas áreas, como para a Economia ou a Biologia.</li> </ul>

## Contextualização Sociocultural

Na área	Em Física
<b>Ciência e tecnologia na atualidade</b>	
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.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Acompanhar o desenvolvimento tecnológico contemporâneo, por exemplo, estabelecendo contato com os avanços das novas tecnologias na medicina, por meio de tomografias ou diferentes formas de diagnóstico; na agricultura, nas novas formas de conservação de alimentos com o uso das radiações; ou, ainda, na área de comunicações, com os microcomputadores, CDs, DVDs, telefonia celular, tevê a cabo.</li> </ul>
<b>Ciência e tecnologia, ética e cidadania</b>	
Reconhecer e avaliar o caráter ético do conhecimento científico e tecnológico e utilizar esse conhecimento no exercício da cidadania.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Compreender a responsabilidade social que decorre da aquisição de conhecimento, sentindo-se mobilizado para diferentes ações, seja na defesa da qualidade de vida, da qualidade das infraestruturas coletivas, ou na defesa de seus direitos como consumidor.</li> <li>• Promover situações que contribuam para a melhoria das condições de vida na cidade onde vive ou para a preservação responsável do ambiente, conhecendo as estruturas de abastecimento de água e eletricidade de sua comunidade e os problemas delas decorrentes, sabendo posicionar-se, argumentar e emitir juízos de valor.</li> <li>• Reconhecer que, se de um lado a tecnologia melhora a qualidade de vida do homem, do outro ela pode trazer efeitos que precisam ser ponderados quanto a um posicionamento responsável. Por exemplo, o uso de radiações ionizantes apresenta tanto benefícios quanto riscos para a vida humana.</li> <li>• Reconhecer, em situações concretas, a relação entre Física e ética, seja na definição de procedimentos para a melhoria das condições de vida, seja em questões como o desarmamento nuclear ou em mobilizações pela paz mundial.</li> <li>• Reconhecer que a utilização dos produtos da ciência e da tecnologia nem sempre é democrática, tomando consciência das desigualdades e da necessidade de soluções de baixo custo, como, por exemplo, para ampliar o acesso à eletricidade.</li> </ul>

Disponível em: <<http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/CienciasNatureza.pdf>>. Acesso em: 16 fev. 2016.

Os temas estruturadores não são os tópicos clássicos do conteúdo disciplinar convencional. Embora carreguem os conceitos da Física, vão além do conteúdo enciclopédico. A ideia é superar o conhecimento anteriormente *compartimentalizado* e inseri-lo numa nova esfera, pautada na contextualização e na interdisciplinaridade. Esses temas estruturadores são:

- Movimentos: variações e conservações;
- Calor, ambiente e usos de energia;
- Som, imagem e informação;
- Equipamentos elétricos e telecomunicações;
- Matéria e radiação;
- Universo, Terra e vida.

É possível enxergar todo o conteúdo clássico da Física (costumeiramente abordado em sala de aula) nos temas estruturadores. Porém, o mote é selecionar o que dessas áreas da Física, que são representadas pelos temas, é importante ensinar, tendo em vista quais competências e habilidades desejamos que os estudantes desenvolvam. Ao longo dos PCN+ há várias propostas de como trabalhar dentro de cada tema estruturador.

Além dos temas, os PCN+ também nos apresentam uma organização do trabalho escolar, dividindo os seis temas estruturadores ao longo dos três anos letivos do Ensino Médio em três opções de sequências:

Sequência 1			
	1º ano	2º ano	3º ano
1º semestre	1. Movimentos: variações e conservações	3. Som, imagem e informação	5. Matéria e radiação
2º semestre	2. Calor, ambiente e usos de energia	4. Equipamentos elétricos e telecomunicações	6. Universo, Terra e vida

Sequência 2			
	1º ano	2º ano	3º ano
1º semestre	2. Calor, ambiente e usos de energia	4. Equipamentos elétricos e telecomunicações	5. Matéria e radiação
2º semestre	1. Movimentos: variações e conservações	3. Som, imagem e informação	6. Universo, Terra e vida

Sequência 3			
	1º ano	2º ano	3º ano
1º semestre	6. Universo, Terra e vida	3. Som, imagem e informação	4. Equipamentos elétricos e telecomunicações
2º semestre	1. Movimentos: variações e conservações	2. Calor, ambiente e usos de energia	5. Matéria e radiação

Vale salientar que essas opções são apenas sugestões e que devem ser tomados os devidos cuidados quanto à escolha da extensão e da profundidade de cada conteúdo, considerando-se o ano que o estudante está cursando, o projeto político da escola, entre outros elementos.

### Orientações Curriculares Nacionais (OCN)

As Orientações Curriculares Nacionais são diretrizes específicas formuladas para o professor do Ensino Médio e apresentam concepções sobre temas, abordagens e metodologias que foram abordados nos PCN e PCN+. As temáticas versam sobre o *desenvolvimento de competências, o projeto de ensino e o papel da escola, o tempo didático e o tempo de aprendizagem, a contextualização e a interdisciplinaridade*. O documento também traz estratégias traçadas para a ação didática, como o enfoque CTS (Ciência, Tecnologia e Sociedade) e a História e Filosofia da Ciência.

Este documento pode ser lido ou mesmo copiado da página da Secretaria da Educação Básica: <[http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/book\\_volume\\_02\\_internet.pdf](http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/book_volume_02_internet.pdf)>. Acesso em: 16 fev. 2016.

### Programa Ensino Médio Inovador

Esta publicação é um documento decorrente da avaliação do ensino a partir das publicações apresentadas anteriormente. Ele indica metodologias para focalizar os aspectos que precisam ser melhorados. O documento indica formas de fazer e o que fazer, considerando-se os mesmos objetivos. Entre os apontamentos, temos a importância da problematização, da contextualização, do desenvolvimento da sistematização de conhecimentos e valorização da leitura, do uso de experimentos, de novas tecnologias, de atividades sociais e de inserções no mundo do trabalho e destaca a relevância da avaliação para a aprendizagem, seu diagnóstico, acompanhamento e recuperação.

O Programa Ensino Médio Inovador, elaborado pelo governo federal em parceria com governos estaduais, apresenta um panorama da situação educacional brasileira (dando ênfase ao Ensino Médio), elucida os pontos a serem melhorados, apresenta o plano de ação indicado para buscar a melhoria e, no âmbito geral, informa como o próprio programa deve ser gerido. Ao longo do seu texto, ele apresenta alguns pressupostos e dimensões adequadas para constituir um currículo inovador:

- Contemplar atividades integradoras de iniciação científica e no campo artístico-cultural;
- Incorporar a metodologia da problematização como instrumento de incentivo à pesquisa, à curiosidade pelo inusitado e ao desenvolvimento do espírito inventivo, nas práticas didáticas;
- Promover a aprendizagem criativa como processo pedagógico de sistematização dos conhecimentos elaborados, em oposição à mera memorização da matéria;
- Promover a valorização da leitura em todos os campos do saber, desenvolvendo a capacidade de letramento dos alunos;
- Fomentar o comportamento ético como ponto de partida para o reconhecimento dos deveres e direitos da cidadania, praticando um humanismo contemporâneo, pelo reconhecimento, respeito e acolhimento da identidade do outro e pela incorporação da solidariedade;
- Articular teoria e prática, vinculando o trabalho intelectual com atividades práticas experimentais;
- Utilizar novas mídias e tecnologias educacionais, como processo de dinamização dos ambientes de aprendizagem;
- Estimular a capacidade de aprender do aluno, desenvolvendo o autodidatismo e a autonomia dos estudantes;
- Promover atividades sociais que estimulem o convívio social e interativo do mundo dos jovens;
- Promover a integração com o mundo do trabalho por meio de estágios direcionados para os estudantes do ensino médio;
- Organizar os tempos e os espaços com ações efetivas de interdisciplinaridade e contextualização dos conhecimentos;
- Garantir o acompanhamento da vida escolar dos estudantes, desde a elaboração do diagnóstico preliminar e durante o acompanhamento do desempenho e integração com a família;
- Ofertar atividades complementares e de reforço da aprendizagem como meio para elevar as bases e permitir que o aluno seja bem-sucedido em seus estudos;
- Ofertar atividades de estudo com utilização de novas tecnologias de comunicação;
- Avaliar a aprendizagem como processo formativo e permanente de reconhecimento de saberes, competências, habilidades e atitudes.

- Reconhecer as diferentes facetas da exclusão na sociedade brasileira, para assegurar a ampliação do acesso aos sujeitos historicamente excluídos do Ensino Médio;
- Garantir a inclusão das temáticas que valorizem os direitos humanos e contribuam para o enfrentamento do preconceito, da discriminação e da violência no interior das escolas;
- Desenvolver a compreensão da realidade brasileira, de sua organização social e produtiva na relação de complementaridade entre espaços urbanos e rurais;
- Valorizar o estudo e as atividades socioambientais e projetos de extensão;
- Desenvolver conhecimentos e habilidades associados a aspectos comportamentais (relacionamento, comunicação, iniciativa, cooperação, compromisso), relativos às atividades de gestão e de iniciativas empreendedoras;
- Valorizar práticas desportivas e de expressão corporal, referidas à saúde, à sociabilidade e à cooperação; e
- Estimular a participação social dos jovens, como agentes de transformação de suas escolas e de suas comunidades.

Disponível em: <[http://portal.mec.gov.br/dmdocuments/documento\\_orientador.pdf](http://portal.mec.gov.br/dmdocuments/documento_orientador.pdf)>. Acesso em: 16 fev. 2016.

## **Sistema Nacional de Avaliação da Educação Básica (Saeb): O Exame Nacional do Ensino Médio (Enem)**

O Sistema Nacional de Avaliação da Educação Básica (Saeb) é composto de: Prova e Provinha Brasil, Exame Nacional para Certificação de Competências de Jovens e Adultos (Encceja) e Exame Nacional do Ensino Médio (Enem), única avaliação do sistema que abarca os conhecimentos da Física.

O Enem é um exame que possibilita ao estudante concluinte do Ensino Médio uma avaliação do seu aprendizado em relação às competências e habilidades presentes na sua matriz de referência, que é baseada nos PCN e PCN+. No Enem, as finalidades gerais são descritas por três eixos cognitivos e, em relação à Física, os objetivos são descritos por oito competências. Além das finalidades, o Enem define os próprios conteúdos disciplinares. As competências destacadas abrangem a área de Ciências da Natureza e, excluindo-se as que tratam especificamente do conhecimento químico e biológico (competências 4, 7 e 8), as demais trazem o ensino da ciência como uma forma de cultura e seu papel nela; a identificação e aplicação da tecnologia a diversos contextos, a relação de questões ambientais a processos e ações de cunho científico-tecnológico, o uso de métodos e procedimentos científicos e como usar seus modelos, leis e teorias na avaliação de situações. Assim, com exceção do

foco especial dado ao aspecto ambiental, o Enem traz finalidades contempladas nos documentos anteriores.

A seguir, temos as matrizes de referência que norteiam sua elaboração e os conteúdos disciplinares de Física considerados.

### Matriz de referência para o Enem 2009

EIXOS COGNITIVOS (comuns a todas as áreas de conhecimento)

- I. Dominar linguagens (DL): dominar a norma culta 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, 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.

[...]

### Matriz de referência 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-tecnológicas.

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, associando 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, em especial 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.

[...]

## **Objetos de conhecimento associados às matrizes de referência**

[...]

### **3. Ciências da Natureza e suas Tecnologias**

#### **3.1 Física**

- Conhecimentos básicos e fundamentais – Noções de ordem de grandeza. Notação Científica. Sistema Internacional de Unidades. Metodologia de investigação: a procura de regularidades e de sinais na interpretação física do mundo. Observações e mensurações: representação de grandezas físicas como grandezas mensuráveis. Ferramentas básicas: gráficos e vetores. Conceituação de grandezas vetoriais e escalares. Operações básicas com vetores.
- O movimento, o equilíbrio e a descoberta de leis físicas – Grandezas fundamentais da mecânica: tempo, espaço, velocidade e aceleração. Relação histórica entre força e movimento. Descrições do movimento e sua interpretação: quantificação do movimento e sua descrição matemática e gráfica. Casos especiais de movimentos e suas regularidades observáveis. Conceito de inércia. Noção de sistemas de referência inerciais e não inerciais. Noção dinâmica de massa e quantidade de movimento (momento linear). Força e variação da quantidade de movimento. Leis de Newton. Centro de massa e a ideia de ponto material. Conceito de forças externas e internas. Lei da conservação da quantidade de movimento (momento linear) e teorema do impulso. Momento de uma força (torque). Condições de equilíbrio estático de ponto material e de corpos rígidos. Força de atrito, força peso, força normal de contato e tração. Diagramas de forças. Identificação das forças que atuam nos movimentos circulares. Noção de força centrípeta e sua quantificação. A hidrostática: aspectos históricos e variáveis relevantes. Empuxo. Princípios de Pascal, Arquimedes e Stevin: condições de flutuação, relação entre diferença de nível e pressão hidrostática.
- Energia, trabalho e potência – Conceituação de trabalho, energia e potência. Conceito de energia potencial e

de energia cinética. Conservação de energia mecânica e dissipação de energia. Trabalho da força gravitacional e energia potencial gravitacional. Forças conservativas e dissipativas.

- A Mecânica e o funcionamento do Universo – Força peso. Aceleração gravitacional. Lei da Gravitação Universal. Leis de Kepler. Movimentos de corpos celestes. Influência na Terra: marés e variações climáticas. Concepções históricas sobre a origem do Universo e sua evolução.
- Fenômenos elétricos e magnéticos – Carga elétrica e corrente elétrica. Lei de Coulomb. Campo elétrico e potencial elétrico. Linhas de campo. Superfícies equipotenciais. Poder das pontas. Blindagem. Capacitores. Efeito Joule. Lei de Ohm. Resistência elétrica e resistividade. Relações entre grandezas elétricas: tensão, corrente, potência e energia. Circuitos elétricos simples. Correntes contínua e alternada. Medidores elétricos. Representação gráfica de circuitos. Símbolos convencionais. Potência e consumo de energia em dispositivos elétricos. Campo magnético. Ímãs permanentes. Linhas de campo magnético. Campo magnético terrestre.
- Oscilações, ondas, óptica e radiação – Feixes e frentes de ondas. Reflexão e refração. Óptica geométrica: lentes e espelhos. Formação de imagens. Instrumentos ópticos simples. Fenômenos ondulatórios. Pulsos e ondas. Período, frequência, ciclo. Propagação: relação entre velocidade, frequência e comprimento de onda. Ondas em diferentes meios de propagação.
- O calor e os fenômenos térmicos – Conceitos de calor e de temperatura. Escalas termométricas. Transferência de calor e equilíbrio térmico. Capacidade calorífica e calor específico. Condução do calor. Dilatação térmica. Mudanças de estado físico e calor latente de transformação. Comportamento de Gases ideais. Máquinas térmicas. Ciclo de Carnot. Leis da Termodinâmica. Aplicações e fenômenos térmicos de uso cotidiano. Compreensão de fenômenos climáticos relacionados ao ciclo da água.

Disponível em: <[http://portal.mec.gov.br/index.php?Itemid=310&id=13318&option=com\\_content&view=article](http://portal.mec.gov.br/index.php?Itemid=310&id=13318&option=com_content&view=article)>. Acesso em: 16 fev. 2016.

## Programa Internacional de Avaliação de Estudantes (Pisa)

O Pisa é uma avaliação internacional de habilidades e conhecimentos de jovens de 15 anos cujos resultados são considerados pelo Saeb. Essa avaliação visa aferir até que ponto os estudantes próximos do término da educação obrigatória adquiriram conhecimentos e habilidades essenciais para a participação efetiva na sociedade.

O Pisa busca avaliar os conhecimentos, as habilidades e as competências dos estudantes, a capacidade de aprender de forma autônoma e o que se denomina

como proficiência em ciências e letramento científico. A proficiência consiste no conhecimento dos conteúdos, de suas estruturas, dos processos e contextos de aplicação dos conhecimentos e habilidades adquiridos, enquanto o letramento trata de uso de procedimentos científicos para concluir e decidir em relação a situações propostas. Trata-se de objetivos que estão contemplados nos instrumentos nacionais.

Os objetivos do programa são:

- *Avaliar conhecimentos e habilidades que são necessários em situações da vida real.* O Pisa enfatiza a eficácia externa do processo de escolarização e se propõe a examinar o desempenho alcançado pelos estudantes nos três domínios avaliados (Leitura, Matemática e Ciências);
- *Relacionar diretamente o desempenho dos estudantes a temas de políticas públicas.* O Pisa foi concebido para apresentar os resultados alcançados em um número considerável de países, de maneira a lançar luz sobre questões de interesse dos governos, por exemplo, o preparo escolar das crianças para a vida em sociedade; e
- *Permitir o monitoramento regular dos padrões de desempenho.* O Pisa está comprometido com a avaliação das áreas de Leitura, Matemática e Ciências. Visa avaliar, a cada três anos, se os jovens estão sendo preparados para enfrentar os desafios do mundo contemporâneo, procurando fornecer indicadores internacionais em condições de serem utilizados por responsáveis pela administração de sistemas educacionais, na orientação de políticas públicas.

O que é avaliado:

- *Conhecimentos, habilidades e competências adquiridos pelos estudantes.* O Pisa avalia conhecimentos e habilidades que capacitam os estudantes para uma participação efetiva na sociedade. Sua avaliação vai além do domínio do conjunto específico de conhecimentos incluído nas principais disciplinas escolares. Seu propósito é aferir a habilidade dos estudantes para utilizar ativamente o conhecimento adquirido em situações que serão relevantes em sua vida futura.
- *A proficiência em Leitura, Matemática e Ciências.* A proficiência é avaliada separadamente. Nas três áreas, o termo “letramento” descreve um amplo espectro de capacidades. As áreas avaliadas são definidas nos seguintes termos: o conteúdo ou a estrutura de conhecimento que os estudantes precisam adquirir; os processos que devem ser utilizados; e os contextos nos quais o conhecimento e as habilidades são aplicados. No Pisa, não há uma simples classificação em estudantes

“letrados” e “não letrados”. Para cada área avaliada, existe uma escala contínua, em que os níveis de desempenho dos estudantes e suas distribuições estão representados pelo número de pontos alcançados.

- *O letramento em Leitura.* É a compreensão, o uso e a reflexão sobre textos escritos para alcançar objetivos pessoais, desenvolver o conhecimento e o potencial individuais e participar plenamente na vida em sociedade.
- *O letramento em Matemática.* É a capacidade individual de identificar e compreender o papel da Matemática no mundo, de fazer julgamentos bem fundamentados e de se envolver com a Matemática de maneira a atender às suas necessidades atuais e futuras como um cidadão construtivo, consciente e reflexivo.
- *O letramento em Ciências.* É a capacidade de usar o conhecimento científico para identificar questões e tirar conclusões baseadas em evidências, de modo a compreender e a ajudar a tomada de decisões sobre o mundo natural e as mudanças ocasionadas pelas atividades humanas.
- *Aprendizagem autorregulada.* O Pisa considera que a escola não é capaz de ensinar aos estudantes tudo o que precisam saber na vida adulta e que eles devem continuar a aprender além da escola. Para serem bons aprendizes ao longo da vida, os estudantes devem ser capazes de organizar e controlar o próprio aprendizado, de aprender sozinhos ou em grupo, e de superar as dificuldades no processo de aprendizagem. Isso requer que tenham consciência das próprias opiniões, estratégias de aprendizagem e métodos. Para avaliar esses aspectos, o questionário do Pisa 2000 estimula os estudantes a falar um pouco sobre sua forma particular de aprender.

Mais informações sobre o Programa Internacional de Avaliação de Estudantes podem ser encontradas em: <[www.oei.es/quipu/brasil/pisa2000.pdf](http://www.oei.es/quipu/brasil/pisa2000.pdf)>. Acesso em: 30 maio. 2016.

## Síntese

Buscamos aqui sintetizar o que nos dizem a legislação e as publicações sobre os objetivos formativos. A legislação, constituída pelos quatro primeiros documentos, aponta características do ensino, do currículo e dos objetivos formativos.

Em relação às características do ensino, temos a obrigatoriedade dupla do Estado e da família, sua gratuidade, a igualdade de condições de acesso e permanência, a

garantia de acesso a níveis superiores pela capacidade e a liberdade para o aprender e o ensinar através do pluralismo de ideias pedagógicas que respeitem e considerem o contexto cultural do educando e suas experiências.

O currículo, simplificado, apresenta os meios pensados para se atingir os objetivos formativos, estando nele inseridas as disciplinas escolares. É caracterizado por ter uma base nacional comum e uma parte diversificada que deve atender aos aspectos regionais. É destacado que o conteúdo não pode ser um fim em si mesmo, tentando mais desenvolver competências do que transmitir informações.

O currículo deve contemplar metodologias diversificadas, como a reconstrução dos conceitos pelos estudantes, o uso do raciocínio, da afetividade, da experimentação, da resolução de problemas e da articulação entre a escola, o mundo do trabalho e as práticas sociais. E, além disso, apresentar como princípios estruturantes a identidade, a diversidade, a autonomia, a interdisciplinaridade e o contexto.

Os objetivos formativos podem ajudar a construir um ensino orientado por valores como a liberdade, a solidariedade, a cidadania e o trabalho. Tratando especificamente do Ensino Médio, somam-se às finalidades anteriores o prosseguimento nos estudos, a formação ética (como a solidariedade, o respeito às individualidades e a cooperação), a autonomia intelectual (aprender a aprender) e o desenvolvimento do pensamento crítico (observar, perceber, interpretar, decidir e intervir, em relação à sociedade, aos processos produtivos etc.).

Os objetivos formativos, quanto às Ciências da Natureza e à Física, abarcam a compreensão da ciência como uma construção humana que realiza processos de acumulação, continuidade e ruptura, de seus significados socialmente construídos e reconhecidos como verdadeiros, e da forma como seu desenvolvimento recebe interferências da e interfere na sociedade e na produção tecnológica.

Finalmente, analisando as premissas dos documentos oficiais e dos sistemas avaliativos, podemos dizer que os objetivos formativos buscados pelo Brasil estão em consonância com o que se espera da educação no mundo. A legislação e as publicações versam sobre os objetivos, metodologias e conteúdos em relação à base comum nacional, cabendo a cada região ou comunidade escolar a identificação e a escolha das necessidades a serem abarcadas pela base específica curricular.

O ensino da Física tem por finalidade a fruição dos seus resultados – como linguagem, ferramentas, processos, conceitos, leis e teorias – e o conhecimento dessa ciência como uma construção humana, que

recebe influências externas e influencia o meio. Um ensino que permita ao estudante continuar estudando, de forma autônoma ou em outro nível de ensino, que auxilie o estudante a desenvolver a solidariedade, a tolerância e o espírito cooperativo, que instigue seu ser crítico e a formulação de juízos de valor.

## Conceitos refletidos na obra

Os textos e as atividades presentes nos livros do professor e do estudante, assim como as atividades complementares de cada capítulo e as sugestões de uso da coleção deste Manual, foram elaborados com base em concepções sobre elementos da realidade escolar e da sala de aula.

Numa perspectiva cultural, a *escola* é um espaço em constante reformulação que possui especificidades da comunidade na qual está inserida. O *estudante*, integrante das duas realidades, conflita entre os objetivos de aprendizado que possui e os recebidos pela escola, o que é minimizado ao se tomar o aprendizado como um caminho para o desenvolvimento daquilo que é significativo ao estudante, estritamente associado à cultura na qual ele se insere.

O *professor* tem como papel mediar a relação do estudante com o conhecimento; uma mediação parcial, impregnada de valores e concepções docentes, mas que busca auxiliar o estudante no desenvolvimento de seu aprendizado, tendo a *sala de aula* como um espaço catalisador desse processo de aprendizagem. Nesse processo, influem as *abordagens* conferidas às aulas, a *avaliação* realizada e o *conteúdo da Física* lecionado.

## A escola

A concepção clássica de cultura é aquela tomada como um grupo de obras culturais que constituem um patrimônio que deve ser transmitido às novas gerações. Nesse sentido, a cultura é o resultado do pensamento e da genialidade de poucas pessoas. Como o contato com o patrimônio cultural era restrito às classes privilegiadas, a escola surge como um espaço que prepara essas poucas pessoas para o domínio dos produtos culturais.

Tal ideia vigorou até o início do século XX, quando as influências democráticas passaram a atuar no sentido de facilitar o acesso de toda a população à cultura.

A democratização cultural trouxe uma escola para todos, mas no seu interior ainda persistia o objetivo de transmitir produtos culturais de uma classe em especial – democratizou-se o acesso à cultura, mas não a possibilidade de sua produção e transmissão.

Contra essa ideia adveio a noção de democracia cultural, com a qual ocorreu uma alteração no conceito de cultura. Atualmente, a ideia associada é que a cultura pode ser elaborada e usufruída por todos que dela fazem parte, refletindo seus valores, suas práticas e seus gostos em suas manifestações simbólicas e materiais.

Assim, a escola não está à margem da sociedade, pelo contrário, atende a suas demandas formativas e busca levar aos estudantes um patrimônio de conhecimento com uma nova perspectiva: de que o conhecimento é fruto da humanidade inteira e não de mentes geniais inalcançáveis – o que também vai ao encontro da ênfase no desenvolvimento de capacidades pelo educando.

## O estudante

No Brasil, há aproximadamente 25 anos ocorreu um grande crescimento no número de vagas oferecidas para o Ensino Médio público. Podemos destacar três distinções entre as escolas do presente e do passado, com base no que elas são ou no que delas esperam hoje seus estudantes.

Anteriormente, o estágio final da educação básica era cursado por poucas pessoas, uma elite sobrevivente de exames admissionais às escolas. Os exames eram realizados ao término do que atualmente são o quinto e nono ano. Com a obrigatoriedade do Estado e dos pais de prover a educação básica a seus filhos, a matrícula no Ensino Médio exige apenas a conclusão no nível anterior. O público que chega é novo e podemos perceber esse aspecto pelo contato com seus pais ou responsáveis.

A segunda distinção envolve uma mudança no papel da escola, ou melhor, uma apropriação feita por ela. A função informativa da escola é atualmente diminuta, mas ela constitui um dos poucos espaços públicos nos quais nossos jovens podem socializar-se.

O avanço tecnológico e seus reflexos na oferta de empregos e no tipo de trabalho que atualmente deve ser desempenhado – envolvendo a criatividade e aspectos para os quais as máquinas não podem ser programadas – requisitam ao nosso jovem cada vez mais formação – enquanto, no passado, era mais fácil empregar-se com pouca formação escolar. Em outras palavras, se anteriormente o estudante frequentava a escola para apropriar-se de parte do conhecimento acumulado pela humanidade, atualmente a informação está facilmente disponível nos meios de comunicação. A transmissão de informações não é mais o papel da escola, e sim a articulação delas.

Nosso estudante pode ver a execução de experimentos pela televisão e até entender as explicações

associadas, mas dificilmente alcança um domínio que possibilite pensá-los, montá-los e executá-los. Ele pode afirmar que está ocorrendo o aquecimento global, mas não saber como medir a temperatura do planeta nem conhecer a modelagem realizada durante o período no qual não havia medidas sistemáticas de temperatura da Terra.

Os estudantes devem adquirir uma formação que objetive, além dos resultados da ciência, o seu funcionamento, a sua estrutura e que ela seja usada como meio para que desenvolvam capacidades cognitivas e motoras e construam valores e significados para orientá-los e auxiliá-los no exercício da vida cidadã. Assim, os textos, os exercícios, os experimentos apresentados na coleção e os textos e as atividades complementares presentes nas Orientações Didáticas, ao serem devidamente abordados pelo professor, contribuem para uma formação coerente com as demandas dos novos estudantes que chegam ao Ensino Médio.

## O professor

Ao professor cabe a autonomia de tomar decisões, de fazer escolhas em face das várias demandas escolares. Essa autonomia pode ficar evidente durante a seleção de conteúdos a serem ensinados, materiais utilizados e abordagens das quais o professor fará uso, tendo como finalidade auxiliar o estudante no desenvolvimento de determinados objetivos formativos.

Trata-se de um mediador entre o conhecimento e o aprendizado do estudante, mas um mediador parcial. O professor estabelece relações que agregam, por vezes implicitamente, um conjunto de valores que possui, seja na relação com seus estudantes, seja na relação com o conhecimento específico disciplinar ou pedagógico.

Assim, as seleções obedecem a critérios diversos, como os objetivos de formação pretendidos, os valores morais agregados ou mesmo o domínio ou a concepção do professor em relação a determinados aspectos do conteúdo ou de abordagens.

A questão da parcialidade na mediação e na escolha do que é ensinado, e como, merece atenção especial ao tratarmos de um ensino sobre a Física, pois é necessário o professor esclarecer e analisar a própria concepção de como a ciência funciona e se desenvolve. Dessa forma, é possível ensinar aos estudantes, principalmente com a ajuda da História da Ciência, que seu desenvolvimento não é simples, linear, cumulativo, nem sequer indutivista ou dedutivista – visões incompletas que podem, inclusive, ser inculcadas nos estudantes por determinadas abordagens experimentais, como aquelas que usam o

experimento para corroborar a teoria ou para, com base nele, elaborá-la.

É importante que o professor explicitate até onde aquilo que realiza é resultado de escolhas pessoais ou coletivas e o porquê delas, mapeando seu terreno de autonomia. Desde a escolha de técnicas para ensinar melhor e/ou com maior eficácia até ações coletivas que façam uso do ensino para a melhoria da comunidade escolar, a autonomia se desenvolve em diversos níveis. A explicitação das escolhas é necessária para a renovação ou confirmação da prática atualmente estabelecida.

Os autores acreditam na importância das escolhas efetuadas pelos docentes e, por isso, sugerem caminhos para a prática. O conteúdo de Física disponibilizado nos textos, os exercícios, os textos extras, experimentos e atividades complementares, cada qual com objetivos formativos e abordagens sugeridos, constituem um grande número de blocos, de diferentes tamanhos e cores, que o professor seleciona, rearranja e agrupa conforme suas escolhas.

## A sala de aula

A sala de aula foi destacada por ser o espaço no qual o processo de ensino-aprendizado ocorre. A existência da escola e do contato entre estudantes e professores significa admitir que os jovens precisam de alguém para auxiliá-los a avançar no entendimento do mundo.

Dessa forma, o aprendizado envolve quem aprende, quem ensina e a relação estabelecida entre eles, um processo essencialmente cultural, posto que é nas relações que se recria a cultura.

Se a docência objetiva o desenvolvimento dos estudantes, deve oferecer estratégias e métodos para auxiliá-los nessa evolução. Assim, a docência atua sobre um possível aprendizado do estudante, em potencial – e não naquilo que o estudante aprendeu anteriormente, seu aprendizado real. Para o estudante que possui conhecimentos consolidados a respeito de determinado assunto, pouco valem intervenções didáticas.

Tanto o aprendizado real como o potencial dos estudantes dependem muito da comunidade na qual a escola está inserida, além dos aspectos individuais. É necessário o professor entender o desenvolvimento real dos estudantes, de modo que perceba níveis potenciais e, com questões significativas, auxilie-os na busca de respostas, da mesma forma que os próprios estudantes podem se ajudar, mesmo não estando necessariamente no mesmo nível real de aprendizado.

## Projeto Político-Pedagógico da escola (PPP)

O Projeto Político-Pedagógico da escola faz-se presente mesmo quando não é explicitado o resultado da discussão da comunidade escolar, formada por direção, professores, funcionários, estudantes e pais.

O PPP representa o papel da escola diante das necessidades formativas dos estudantes e releva a forma como ela deve receber as influências da comunidade que a cerca e, ao mesmo tempo, interferir nela.

O PPP deve apresentar os objetivos formativos condizentes com os estudantes de modo geral e os objetivos específicos que redundam na melhoria ou manutenção da situação da comunidade à qual a escola pertence. A articulação com a comunidade escolar é a melhor forma de educar seus estudantes para a solidariedade, a autonomia e a responsabilidade social, valores éticos necessários na sociedade atual.

Este documento traz a visão que a escola possui da educação, de si própria, bem como da comunidade escolar; ele discute a parte disciplinar diversificada e, com isso, a seleção dos conteúdos, abordagens, atividades para as aulas e a elaboração de projetos, que são pensados de modo que seja possível desenvolver ações para alcançar os objetivos pretendidos.

## Planejamento das aulas

A elaboração do plano de aulas é uma etapa posterior ao PPP e consiste no documento último, mais importante e singular. Nele se encerram de forma articulada os conteúdos, as abordagens do professor, os materiais disponíveis a serem utilizados nas aulas, que foram selecionados tendo em vista o desenvolvimento de determinados objetivos formativos que estão estritamente relacionados à realidade escolar, da comunidade e de seus estudantes. É ele que orienta o professor na sua prática cotidiana, constituindo-se o documento teórico mais próximo da sala de aula.

## Abordagens

As abordagens são formas de desenvolver as aulas, uma espécie de mensagem que auxilia no entendimento dos conteúdos ou que atua diretamente nas competências e habilidades a serem adquiridas pelos estudantes.

A escolha das abordagens é função do professor, entretanto esta coleção didática apresenta abordagens em seus textos, questões, exercícios, experimentos e atividades, as quais pretendemos aqui explicitar.

O professor deve analisar qual abordagem quer imprimir a determinado conteúdo, assim como olhar

aquela que está contemplada no material didático. Essa atitude permite-lhe manipular as abordagens de acordo com os objetivos formativos que pretende buscar.

O texto dos livros desta coleção aborda os conceitos físicos e sua formulação matemática, utilizando questionamentos que requerem do estudante sua capacidade de imaginar os fenômenos. Por se tratar de um texto que apresenta os fundamentos da ciência Física atualizada, todos os questionamentos inseridos nas leituras dos estudantes são posteriormente desenvolvidos com base nesses fundamentos.

Nessa perspectiva, o texto apresenta os conceitos corretos de forma linearizada, característica do processo de didatização de conteúdos, posto que apresentar todos os processos de desenvolvimento de todos os conceitos físicos necessita de uma carga horária maior que a oferecida para a disciplina.

O texto privilegia o entendimento do conhecimento científico produzido pela Física, considerando que a linearização facilita o entendimento, pelo estudante, dos fenômenos, dos conceitos e das teorias associados, delegando a outros espaços do material a discussão sobre o desenvolvimento da ciência Física, suas aplicações práticas e seu caráter experimental.

As atividades experimentais apresentadas no corpo da obra devem ser conduzidas pelo professor numa abordagem problematizadora, de modo a não recair em demonstrações cujo fim é comprovar o conceito abordado nas aulas.

A **problematização** parte do cuidado do professor de fazer perguntas que despertem no estudante a curiosidade. Ela pode ter como meio não apenas experimentos, mas situações teóricas ou até mesmo a resolução de determinados exercícios.

É um processo no qual, inicialmente, ocorre a escolha de questões que permitam a introdução de novos conhecimentos, que devem ter o potencial de gerar no estudante a necessidade de apropriação do conhecimento científico. Ao mesmo tempo, ao discutir as explicações lançadas pelos estudantes, suas limitações e inconsistências, o professor apreende os conhecimentos prévios destes. Tal processo também tem por objetivo oferecer um distanciamento crítico ao estudante, a apreensão dos conceitos científicos e a percepção da ciência como cultura, posto que é o resultado das capacidades humanas.

Trazer o **cotidiano** consiste em aplicar a ciência Física na compreensão de fenômenos e problemas do dia a dia, assim como usar essa compreensão para transformar o meio e controlar os fenômenos. Essa dimensão aborda uma interface entre a ciência e a técnica no sentido de perceber sua utilidade prática.

Além da problematização, a **História e Filosofia da Ciência** também pode ser utilizada para realizar a contextualização de determinado conteúdo. Contextualizar é situar no espaço e no tempo, é oferecer uma totalidade. Assim, a História da Ciência pode oferecer um contexto sobre o pensamento de determinado conceito porque insere características da época e local e tudo que seja pertinente para que o estudante entenda como o pensamento pode ocorrer.

Contudo, a ênfase atual é contextualizar mediante situações com as quais os estudantes se identificam, utilizando o contexto sociocultural no qual estão inseridos, seja ele comunitário, regional, nacional ou mundial. A **contextualização** permite ao estudante vislumbrar uma experiência concreta com o conceito para que seja capaz de transferir o aprendizado a outros contextos.

A interdisciplinaridade desenvolve-se através de elementos comuns presentes nas disciplinas. Por exemplo, numa integração das Ciências da Natureza, alguns pontos comuns são seu desenvolvimento histórico, as produções tecnológicas e as implicações morais e econômicas que seu desenvolvimento traz.

Já a abordagem **Ciência, Tecnologia e Sociedade** tem por fim mostrar a diferença entre problemas científicos e de ordem prática, mostrando que a ciência é limitada na resolução das questões práticas pela inserção de aspectos sociais, políticos e econômicos. Essa abordagem vai ao encontro do desenvolvimento do pensamento crítico dos estudantes em relação à autoridade do especialista, discutindo a ideia de confiança alienada na ciência, assim como a valorização da ética.

Com a finalidade de auxiliar o professor nas variadas abordagens possíveis dos objetivos formativos, também são propostas atividades complementares nestas Orientações Didáticas, oferecendo uma gama de abordagens.

Uma característica importante da problematização é que, para acontecerem discussões, não pode haver trabalho solitário: seja em grande grupo, estudantes e professor, seja em pequenos grupos de estudantes, a problematização sempre precisa do diálogo.

É possível fazer uso da problematização também nos conceitos trazidos pelo texto ou mesmo nos exercícios resolvidos e propostos pela coleção, constituídos por questões explicativas, e nos problemas que envolvem o entendimento da dependência entre as grandezas e da proporcionalidade entre elas, e que utilizam essa dependência, em formulação final, para que os estudantes encontrem resultados.

## Estabelecendo uma grade de objetivos formativos

Quando os estudantes estão realizando as atividades, várias são as habilidades e competências que desenvolvem concomitantemente, e o trabalho do professor é planejar essas atividades de acordo com as competências que quer que seus estudantes desenvolvam.

As atividades propostas, os materiais utilizados e as abordagens conferidas necessitam, para seu entendimento, do desenvolvimento de determinados atributos, em outras palavras, dos objetivos formativos.

Para montar uma grade de seis objetivos formativos, usaremos como base as três grandes competências objetivadas para a área de Ciências da Natureza: *Representação e Comunicação*, *Investigação e Compreensão* e *Contextualização Sociocultural*.

Competência	Objetivo formativo ligado à competência
<i>Representação e Comunicação</i>	1) Entender e fazer uso dos conhecimentos matemáticos e da linguagem da Física, seus códigos e símbolos.
<i>Investigação e Compreensão</i>	2) Compreender o funcionamento de equipamentos tecnológicos, domésticos, de uso social ou profissional. 3) Entender e fazer uso de procedimentos científicos, como hipótese, observação, previsão, identificação de padrões, relação de grandezas, medição, avaliação e conclusão. 4) Compreender e fazer uso de modelos, leis e teorias.
<i>Contextualização Sociocultural</i>	5) Entender a ciência como construção humana, cujo desenvolvimento está atrelado aos contextos cultural, social, político e econômico. 6) Elaborar juízos de valor sobre os usos da ciência e da tecnologia, bem como avaliar as consequências desses usos.

Analisando a ação dos estudantes, atribuímos objetivos formativos às abordagens, aos materiais e às atividades, separadamente, de modo a auxiliar o professor na análise das próprias atividades que desenvolve, posto que, por exemplo, o uso de textos na sala de aula pode receber abordagens diferenciadas de acordo com seu conteúdo.

Cruzando as sugestões de abordagens já descritas com os objetivos formativos propostos, montamos uma grade de objetivos formativos atribuídos a cada abordagem. As justificativas das atribuições são dadas em seguida.

Abordagens	Objetivos formativos
Ciência, Tecnologia e Sociedade	2, 5, 6
Contextualização	2, 5
Cotidiano	2, 4
História e Filosofia da Ciência	3, 5, 6
Problematização	3, 5

Materiais	Objetivos formativos
Textos	2, 3, 5, 6
Vídeos	2, 3, 5, 6
Objetos	2, 3, 4, 5
Imagens	2, 3, 4, 5
Arranjos experimentais	1, 3, 4, 5
Simulação	1, 3, 4, 5

Atividades	Objetivos formativos
Confeção de gráficos e tabelas	1, 3
Análise de gráficos e tabelas	1, 3
Interpretação de situações-problema	4, 1
Cálculo usando relações algébricas	4, 1
Explicação de fenômenos e outros aspectos	1, 4, 5

A abordagem **Ciência, Tecnologia e Sociedade – CTS** utiliza o entendimento da Física presente nos objetos tecnológicos (objetivo 2) para discutir de que maneira o desenvolvimento da tecnologia depende das demandas sociais, políticas ou econômicas (objetivo 5) e a análise dessa dependência contribui na elaboração de juízos sobre os usos da ciência e da tecnologia (objetivo 6).

A abordagem **Contextualização** traz em geral situações contemporâneas tematizando o funcionamento de aparelhos tecnológicos que interferem nesses contextos. Faz-se necessário, então, compreender esse funcionamento, e, com isso, percebem-se as relações e influências dos aparelhos nos contextos (objetivos 2 e 5, respectivamente).

O **Cotidiano** preocupa-se mais com o entendimento dos aparelhos tecnológicos (objetivo 2) mediante o uso de modelos, leis e teorias físicas (objetivo 4).

A **História e Filosofia da Ciência** aborda episódios de desenvolvimento científico que revelam os procedimentos científicos (objetivo 3) e impasses que contribuem para o entendimento da ciência como construção humana. Também se tematiza como a utilidade do conhecimento que está sendo desenvolvido interfere na sua divulgação, auxiliando na formação de juízo sobre os usos da ciência e sobre ela própria (objetivos 5 e 6, respectivamente).

A **Problematização** permite o alcance dos mesmos objetivos da **História e Filosofia da Ciência** com exceção do objetivo 6 – porque em geral apresenta questões que levam os estudantes a adotar procedimentos científicos e, assim, conceber a ciência como construção humana.

Os materiais são suscetíveis a diversas abordagens, por exemplo, **Textos e Vídeos** podem ser úteis em **Problematização, Contextualização, História e Filosofia da Ciência** e em **Ciência, Tecnologia e Sociedade**.

Os **Objetos** e as **Imagens**, quando levados à aula, permitem abordagens problematizadoras; **Cotidiano** e **Contextualização** são abordagens aconselhadas.

**Arranjos experimentais** e **Simulações** permitem como principal abordagem a **Problematização**. A diferença no uso desses materiais e dos anteriores são seus objetivos formativos e suas potenciais abordagens. Os objetivos formativos no uso dos **Textos, Objetos, Imagens e Vídeos** encerram os objetivos de suas possíveis abordagens, enquanto através do **Arranjo experimental** e da **Simulação** é possível contemplar um objetivo formativo além dos atribuídos à **Problematização**, que é o representado pelo número 1, visto que atividades com esses materiais necessitam de um domínio da Matemática e da linguagem da Física, exigindo tabelas, gráficos e cálculos.

Em relação aos exercícios, aqueles que envolvem o **Cálculo usando relações algébricas** e a **Interpretação de situações-problema** desenvolvem o entendimento e o uso correto da Matemática e da lin-

guagem da Física assim como com os modelos, leis e teorias (objetivos 1 e 4, respectivamente).

Já a **Observação de gráficos e tabelas** em enunciados ou mesmo a **Confecção de gráficos e tabelas** nas resoluções envolvem o domínio matemático e o uso de procedimentos científicos, observando, identificando padrões, avaliando e concluindo (objetivos 1 e 3).

Por fim, exercícios que envolvem a capacidade de explicação revelam a ciência como construção humana, capaz de ser compreendida e reinventada (objetivo 5), assim como demandam entendimento e uso dos modelos, leis e teorias físicas e sua linguagem (objetivos 1 e 4).

## A avaliação

Por mais que tentemos tornar a avaliação objetiva, ela é parcialmente subjetiva. O avaliar não se resume à medição de quanto o estudante aprendeu ou da profundidade do que aprendeu, ele abarca a percepção do aprendizado do estudante com base em critérios previamente elaborados que levaram em consideração aspectos como valores e outros objetivos formativos. Assim, a subjetividade da avaliação consiste na interpretação que é feita usando-se os critérios.

A avaliação possui as características de ser contínua, sistemática, funcional, integral e orientadora. Ou seja, ela deve ocorrer durante todo o processo e ser planejada previamente. É funcional porque se trata de um meio para compreender a busca pelos objetivos formativos, que lhe são externos e devem por isso ser todos contemplados. Concomitantemente, a avaliação oferece um retorno ao estudante quanto a seu aprendizado, e ao professor, do trabalho que está realizando.

Existem tipos diferentes de avaliações, que são atreladas a finalidades e, por sua vez, possibilitam o uso de diferentes instrumentos. Elas são a diagnóstica, a formativa e a somativa. Como indica seu nome, a avaliação diagnóstica tem por fim identificar conhecimentos e dificuldades do estudante para que, a partir desse entendimento, o professor encaminhe ações durante o processo de aprendizado. Dessa forma, a avaliação diagnóstica ocorre no início de um processo educativo e deve orientar a prática pedagógica, assim como as avaliações formativa e somativa.

É na avaliação formativa, ocorrida ao longo do processo de aprendizado, que se apresentam integralmente as características anteriormente citadas, porque avaliar durante o processo oferece mais tempo para o uso de variados instrumentos, buscando-se a integralidade e, concomitantemente, o processo pode ser repensado com base nos resultados prévios obtidos.

O olhar sobre os resultados é o realizado pela avaliação somativa. Nela os estudantes são nivelados conforme a comparação de seus resultados com os critérios, que foram elaborados a partir dos objetivos formativos. Essa forma de avaliação resume-se ao estágio final daquilo que foi aprendido pelos estudantes.

Esses três tipos de avaliações são complementares: se a avaliação somativa é importante por mostrar onde o estudante chegou, a diagnóstica nos traz de onde ele partiu, e a formativa nos mostra seu caminho para chegar onde está. Os estudantes terminam um ciclo de aprendizagem em diferentes níveis, assim como não partiram do mesmo ponto, cabendo ao professor perceber quanto aprenderam de fato.

Existem vários instrumentos para realizar a avaliação, podendo inclusive cada um deles ser usado em mais de um tipo e tendo, todos, aspectos positivos e negativos. Os instrumentos devem possuir características como validade, fidedignidade, objetividade e usabilidade.

A validade é a adequação do instrumento a seu objetivo, como os objetivos formativos que pretende avaliar. Ela é relativa e representa também a coerência com as ênfases dadas pelo professor no desenvolvimento do conteúdo com o qual os estudantes trabalharam.

A fidedignidade ou precisão expressa a coerência interna do instrumento e se reflete na confiança que se pode ter nele. Condições que afetam a precisão de um instrumento são relativas ao avaliado e ao próprio instrumento. Enquanto condições do avaliado, podemos ter o cansaço ou uma doença e, em relação ao próprio instrumento, a quantidade dos itens ou problemas na escrita, como ambiguidade e imprecisão.

Por sua vez, a objetividade consiste na redução do julgamento do avaliador com perguntas e respostas claras e critérios de correção previamente elaborados. Já a usabilidade trata da praticidade do instrumento para ser aplicado e corrigido.

Exemplos de instrumentos avaliativos são provas dissertativas e objetivas, registro de casos, fichas cumulativas e inventário.

As provas dissertativas e objetivas são compensatórias. Naquelas, o estudante pode se expressar melhor e são de mais fácil elaboração, apesar de a temática abordada ser reduzida e o tempo/complexidade na correção ser maior que na prova objetiva. Nesta, há maior gama de conteúdos, mas sua elaboração é mais trabalhosa.

O registro de casos é competência do professor, que observa e anota a data e o que se passou com determinado estudante, que pode ser uma pergunta ou um comentário interessante por ele realizado. Já nas fi-

chas cumulativas podem constar, para cada estudante, as atividades realizadas em aula, em casa, a frequência nas aulas, se leva os materiais, a atenção à aula, a participação e pontualidade em entregas de trabalhos. Como esse instrumento é processual, pode-se ao final criar escalas para os aspectos avaliados, por exemplo, na frequência às aulas criar escalas como “pouca”, “razoável”, “muita” e, com base na ficha, localizar o estudante em um nível.

O inventário é uma forma de autoavaliação e consiste na organização, sistematização, análise e apresentação, por parte do estudante, de tudo o que realizou na etapa educativa.

No caso do ensino da Física e no uso desse material, por exemplo, uma avaliação diagnóstica inicial pode buscar apresentar o que o estudante adquiriu enquanto domínio matemático das operações básicas ou da solução de equações de primeiro grau, o que sabe dos conceitos físicos de anos anteriores ou mesmo o raciocínio lógico ao resolver problemas. Durante o processo de ensino-aprendizado pode-se registrar em fichas a participação nas aulas, a resolução dos exercícios pedidos (que podem ser feitos em casa, na classe, individualmente ou em grupo), a resposta às questões dos textos extras e o desempenho nas atividades complementares. A avaliação somativa deve abarcar o aprendizado em função dos objetivos estipulados, sendo coerente com o processo ocorrido e, ao final, representar a análise e o equacionamento das avaliações.

### Possíveis formas de avaliação

É interessante que o professor padronize a forma de avaliação, facilitando ao estudante o entendimento sobre onde ele necessita chegar ou o que precisa realizar para isso. A seguir são propostas formas de realizar as avaliações diagnóstica, formativa e somativa em relação às atividades e exercícios propostos no livro.

A avaliação diagnóstica tem por objetivo verificar se os estudantes possuem os pré-requisitos que o professor reconhece como necessários ao aprendizado do conteúdo do ano. Requisitos podem ser competências matemáticas, de escrita ou mesmo sobre o domínio de conteúdos de anos anteriores da própria disciplina ou de outras relevantes, como Química.

De acordo com o tempo disponível para a aplicação da avaliação e a quantidade de requisitos a serem avaliados por meio dela, usam-se mais questões objetivas ou dissertativas, considerando que ela deve ser aplicada no início do processo para que, com seus resultados, seja possível ao professor replanejar alguns aspectos das aulas ou diferir as abordagens.

As atividades introdutórias propostas para cada capítulo podem ser avaliadas pela participação dos estudantes, posto que não são obrigados a dominar um conteúdo que ainda será ensinado. Podem ser critérios a realização da tarefa, a contribuição com a dinâmica da atividade e a integração com os colegas, caso seja uma atividade em grupo.

Critérios como esses podem permear as outras atividades realizadas na sala, como experimentos e resposta a exercícios e/ou leituras. Assim, são avaliados a participação e o empenho dos estudantes, além dos resultados que alcançam, ou seja, a nota das correções. A avaliação da participação ou empenho pode ocorrer sempre que se pede ao estudante que realize algo; aconselhamos que o professor tenha uma ficha cumulativa de cada estudante e estipule índices para os critérios, como na tabela a seguir:

	Para atividades em grupo	Para atividades individuais
<b>Crítérios/índices</b>	Atividade/ contribuição com a integração	Atividade/ contribuição com a dinâmica
<b>Não realizou/ prejudicou</b>	0	0
<b>Realizou/ indiferente</b>	5	5
<b>Realizou/ contribuiu</b>	10	10

A ficha cumulativa do empenho nas atividades pode ser como:

Nome ou número do estudante		1	2	3	...
<b>Atividade</b>	Introdutória Cap. 3				
<b>Data</b>	15/4	10	5	5	...
<b>Grupo/individual</b>	Individual				
<b>Atividade</b>	Prática Cap. 4				
<b>Data</b>	24/4	5	10	5	...
<b>Grupo/individual</b>	Grupo				

A correção dos exercícios também pode ser avaliada por meio de uma ficha de acompanhamento cujos

critérios são a quantidade realizada em relação à pedida e a quantidade acertada pela quantidade pedida na ficha. Pode-se colocar a nota que o estudante adquiriu ou atribuir um índice aos percentuais, conforme exemplo a seguir:

Crítérios/índices	Realizados/ Total	Acertados/ Total
Menor ou igual a 20%	2	2
Entre 20% e 40%	4	4
Entre (ou igual a) 40% e 60%	6	6
Entre 60% e 80%	8	8
Maior ou igual a 80%	10	10

Veja um exemplo dessa ficha:

Nome ou número do estudante			1	2	...
<b>Exercícios</b>	Cap. 3	Realizado/ Acertado	10	6	...
<b>Data</b>	10/4	A	2	10	...
<b>Exercícios</b>	Cap. 4	R	8	6	...
<b>Data</b>	22/4	A	9	9	...
<b>Exercícios</b>	...	...	...	...	...
<b>Data</b>	...	...	...	...	...

Em relação à avaliação somativa, como provas, é necessário lembrar que testes permitem avaliar mais conteúdo do que questões dissertativas, consumindo o mesmo tempo, ou seja, se o desejo é avaliar muitos conteúdos, é melhor optar pelo teste; em contrapartida, se eles são reduzidos, valem as questões dissertativas. As avaliações podem ser elaboradas com questões exclusivas de um tipo ou compostas, da mesma forma que podem ocorrer ao final dos bimestres ou no fechamento de unidades.

De acordo com seus objetivos, a prova pode permitir a pesquisa aos registros pessoais do estudante, como um incentivo à organização, observação e ao próprio ato de pesquisa e releitura. Ou pode exigir o domínio dos conceitos sem a pesquisa.

De todas as formas e contextos de aplicação, propõe-se que a prova deve ser coerente com a avaliação diagnóstica e com a avaliação realizada durante as aulas (formativa). Por exemplo, se a diagnóstica foi feita individualmente e se verificaram dificuldades em determinado assunto, sugere-se que a avaliação somativa busque ter o mesmo contexto de aplicação e verificar se houve progresso nas dificuldades.

Os padrões de exercícios e as abordagens das atividades podem ser contemplados na prova, lembrando que se deve ter cautela ao inserir questões que transfiram problemas para contextos e abordagens diferentes dos tratados nas aulas, posto que a prova deve versar sobre o processo de aprendizado ocorrido.

As notas de trabalhos, participações, correções e provas devem receber pesos coerentes com os objetivos formativos ao comporem a média final, ou seja, não pode ser atribuído um valor maior para uma prova final individual se o objetivo formativo é um estudante cidadão, que pensa e age na coletividade, que aprende com as diferenças, que sabe se organizar, argumentar e que se compromete com o processo de aprendizado, sendo corresponsável por ele.

## O conteúdo da Física

Os conteúdos apresentados na obra são resultado de uma seleção realizada com base no conhecimento físico disponível. Buscou-se contemplar na seleção os conteúdos e as sequências tradicionalmente abordados nos livros didáticos como uma característica facilitadora da prática pedagógica, posto que uma parte dos professores aprendeu Física em sequências semelhantes.

Por outro lado, na parte específica deste Manual, na introdução de cada unidade as ideias físicas fundamentais são destacadas e relacionadas conceitualmente, para oferecer ao professor possibilidades conceituais de alterar a sequência tradicionalmente apresentada.

Outro critério na seleção e abordagem da Física baseia-se nos conhecimentos matemáticos referentes ao Ensino Médio, não cabendo, por exemplo, expressar as leis físicas utilizando equações diferenciais e integrais.

Entre os conteúdos selecionados estão os princípios fundamentais da Física, como as conservações. Todos são apresentados em suas elaborações finais dadas pela ciência, sendo a linearização do conteúdo um efeito do processo de didatização. Entretanto, é possível visualizar a estrutura do conhecimento científico mediante conceitos, fatos, leis e teorias presentes na coleção. A noção de como a ciência Física se desen-

volve é apresentada em abordagens da História e da Filosofia da Ciência, presentes em textos do livro e em atividades complementares propostas no Manual.

Por mais que se pense na proximidade entre as disciplinas científicas e as escolares, elas não são de forma alguma idênticas. A disciplina científica, ao passar a escolar, busca atender às demandas de uma formação para a cidadania, sendo uma de suas dimensões a recusa de aceitar sem julgamento a autoridade da ciência e/ou o argumento do especialista.

Assim, são diferentes os saberes ensinados na disciplina de Física escolar em relação a uma formação científica, porque diferentes são os objetivos formativos. Além dos objetivos oficiais, circunstâncias específicas atuam fazendo com que o professor selecione – a partir do que é disponibilizado pelo material – conteúdos, abordagens e tipos de exercícios e atividades coerentes com sua realidade. Realidade que é dependente da comunidade na qual a escola se insere, de características da própria escola, ou mesmo do tempo de carga horária da disciplina e das dificuldades apresentadas pelos estudantes.

## Materiais indicados para complementar a formação

Consistem em sugestões de leituras e indicações de materiais que abordam os conteúdos da Física e trazem elementos para seu ensino. O objetivo é auxiliá-lo no estabelecimento de relações entre a teoria e a prática pedagógica para uma melhoria do ensino-aprendizado dos estudantes.

### Periódicos

#### Divulgação científica

- CIÊNCIA E CULTURA – Revista publicada pela SBPC (Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência), tem seu conteúdo *on-line*. Seus artigos são de divulgação científica e buscam traçar um paralelo com as questões culturais contemporâneas. Disponível em: <[http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci\\_serial&lng=pt&pid=0009-6725&nrm=iso](http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci_serial&lng=pt&pid=0009-6725&nrm=iso)>. Acesso em: 17 fev. 2016.
- PUBLICAÇÃO DE DIVULGAÇÃO CIENTÍFICA DO CBPF (CENTRO BRASILEIRO DE PESQUISAS FÍSICAS) – Revista publicada pelo CBPF, divulga os avanços atuais da Física e pode ser visualizada integralmente *on-line*: <<http://portal.cbpf.br/sobre-o-cbpf>>. Acesso em: 17 fev. 2016.
- PUBLICAÇÕES DO INSTITUTO CIÊNCIA HOJE – Responsável pelas revistas impressas *Ciência Hoje* e *Ciência Hoje das Crian-*

ças, possui também conteúdos inéditos *on-line* e os que constam nas versões impressas. No *site* também há uma página especial para professores, com propostas de atividades. Disponível em: <[www.cienciahoje.uol.com.br/](http://www.cienciahoje.uol.com.br/)>. Acesso em: 17 fev. 2016.

- SCIENTIFIC AMERICAN BRASIL – Revista publicada pela Duetto Editorial, conta com artigos de divulgação científica que versam sobre tecnologia, saúde, mente, energia, evolução, espaço e ciência básica. Possui reportagens disponíveis *on-line*: <[www2.uol.com.br/sciam/](http://www2.uol.com.br/sciam/)>. Acesso em: 17 fev. 2016.

#### Sobre ciência e seu ensino

- CADERNO BRASILEIRO DE ENSINO DE FÍSICA – Publicada pela UFSC, a revista possui versão impressa e também pode ser visualizada virtualmente. Apresenta trabalhos de pesquisa em ensino de Física e formação de professores. Disponível em: <[www.periodicos.ufsc.br/index.php/fisica](http://www.periodicos.ufsc.br/index.php/fisica)>. Acesso em: 18 fev. 2016.
- CIÊNCIA & EDUCAÇÃO – Revista publicada pelo Programa de Pós-graduação em Educação para a Ciência, da Faculdade de Ciências da Unesp de Bauru, tem por objetivo divulgar as pesquisas realizadas na área do ensino de Ciências. Disponível em: <[www.fc.unesp.br/#!/ciedu](http://www.fc.unesp.br/#!/ciedu)>. Acesso em: 18 fev. 2016.
- REVISTA ENSAIO: PESQUISA EM EDUCAÇÃO E CIÊNCIAS – Revista publicada pela UFMG, traz trabalhos sobre o ensino de Ciências e possui conteúdo disponível em: <[www.portal.fae.ufmg.br/seer/index.php/ensaio](http://www.portal.fae.ufmg.br/seer/index.php/ensaio)>. Acesso em: 18 fev. 2016.
- INVESTIGAÇÕES EM ENSINO DE CIÊNCIAS – Revista publicada pelo Instituto de Física da UFRGS, apresenta em seus artigos pesquisas sobre o ensino das Ciências. Disponível apenas em formato digital: <[www.if.ufrgs.br/ienci/](http://www.if.ufrgs.br/ienci/)>. Acesso em: 5 abr. 2016.
- REVISTA DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE HISTÓRIA DA CIÊNCIA – Revista publicada pelo Grupo de História e Teoria da Ciência da Unicamp, a revista, que disponibiliza seus números digitalmente, tem em seus artigos estudos específicos sobre a história da Ciência. Disponível em: <[www.sbh.org.br/revistahistoria/public](http://www.sbh.org.br/revistahistoria/public)>. Acesso em: 18 fev. 2016.
- REVISTA BRASILEIRA DE ENSINO DE FÍSICA – Revista publicada pela Sociedade Brasileira de Física, cujas edições podem ser acessadas *on-line* e abordam artigos que desenvolvem temas da Física, sua história, epistemologia, assim como o ensino. Disponível em: <[www.sbfisica.org.br/rbef/](http://www.sbfisica.org.br/rbef/)>. Acesso em: 18 fev. 2016.

- REVISTA BRASILEIRA DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS – Revista publicada pela Associação Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências (Abrapec), que objetiva disseminar os resultados de pesquisas em ensino de Ciências, disponibilizando seu conteúdo em: <<http://revistas.if.usp.br/rbpec>>. Acesso em: 18 fev. 2016.

## Encontros

- ENCONTRO DE PESQUISA EM ENSINO DE FÍSICA (Epef) – Realizado pela Sociedade Brasileira de Física, ele ocorre a cada dois anos em diferentes locais do país e objetiva oferecer um espaço para divulgação e discussão dos resultados de pesquisas em ensino de Física. Disponível em: <[www.sbfisica.org.br/~epef/xv/](http://www.sbfisica.org.br/~epef/xv/)>. Acesso em: 18 fev. 2016.
- ENCONTRO DE FÍSICOS DO NORTE E NORDESTE (EFNNE) – Encontro que ocorre a cada dois anos, é um espaço de troca e aprendizado sobre pesquisas contemporâneas nas diversas áreas da Física, como o ensino de Física e sua história. Disponível em: <[www.sbfisica.org.br/~efnne/xxxiii/](http://www.sbfisica.org.br/~efnne/xxxiii/)>. Acesso em: 18 fev. 2016.
- ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIAS (Enpec) – Realizado pela Associação Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências (Abrapec), ocorre a cada dois anos em diferentes locais do país, objetivando a socialização dos resultados das pesquisas realizadas em Ensino de Ciências. Disponível em: <[www.xenpec.com.br/pt/](http://www.xenpec.com.br/pt/)>. Acesso em: 18 fev. 2016.
- REUNIÃO ANUAL DA SBPC (Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência) – Encontro realizado pela SBPC, objetiva debater as políticas públicas de Ciência, Tecnologia e Inovação (C,T&I), assim como difundir a ciência produzida no país. Disponível em: <[www.sbpnet.org.br/site/eventos/reunioes-anuais.php](http://www.sbpnet.org.br/site/eventos/reunioes-anuais.php)>. Acesso em: 5 abr. 2016.
- SIMPÓSIO NACIONAL DE ENSINO DE FÍSICA (SNEF) – Realizado pela Sociedade Brasileira de Física, ocorre a cada dois anos em diferentes locais do país e objetiva a troca de conhecimentos e experiências entre alunos, professores do ensino básico e pesquisadores da área. Disponível em: <[www.sbfisica.org.br/~snef/xxi/](http://www.sbfisica.org.br/~snef/xxi/)>. Acesso em: 18 fev. 2016.

## Sites

- BANCO INTERNACIONAL DE OBJETOS EDUCACIONAIS – O *site*, do Ministério da Educação, abarca atividades das várias áreas do conhecimento e em todos os níveis de ensino. Em Física, o banco conta com simulações, áudios, vídeos, *softwares*, imagens e hipertextos. Os objetos podem ser

salvos no computador e apresentam sugestões de utilização ou já estão inseridos em atividades propostas. Disponível em: <<http://objetoseducacionais2.mec.gov.br/>>. Acesso em: 18 fev. 2016.

- CIÊNCIA À MÃO: PORTAL DE ENSINO DE CIÊNCIAS – Oferece vários recursos para o ensino, divididos em atividades, textos, *softwares*, artigos e filmes. Nas atividades propostas, por exemplo, são explicadas desde a confecção de material até situações-problema e formas de utilização. Disponível em: <[www.cienciamao.usp.br/](http://www.cienciamao.usp.br/)>. Acesso em: 5 abr. 2016.
- JOGOS DE FÍSICA – O *site* apresenta vários *games* que podem ser jogados *on-line* e que envolvem conteúdos da Física como equilíbrio, lançamentos e jogos de raciocínio (em língua inglesa). Disponível em: <[www.physicsgames.net/](http://www.physicsgames.net/)>. Acesso em: 18 fev. 2016.
- LABORATÓRIO DIDÁTICO VIRTUAL – Um *site* coordenado pela Feusp que contém simulações de Física e Química abrangendo conteúdos clássicos e modernos, que podem ser salvos no computador. Disponível em: <[www.labvirt.fe.usp.br/indice.asp](http://www.labvirt.fe.usp.br/indice.asp)>. Acesso em: 18 fev. 2016.
- LABORATÓRIO MULTIMÍDIA – O *site*, do Departamento de Física da Ufal, traz simulações das áreas de Física clássica e em cada uma são trazidas sugestões de utilização. Disponível em: <[www.phy.ntnu.edu.tw/oldjava/portuguese/](http://www.phy.ntnu.edu.tw/oldjava/portuguese/)>. Acesso em: 18 fev. 2016.
- PHET INTERACTIVE SIMULATIONS – Portal da Universidade do Colorado que contém atividades e simulações de Física, Química, Biologia, Matemática e ciências da terra. As simulações de Física, por exemplo, abordam os campos da Física Clássica e Moderna e podem ser salvas no computador. Disponível em: <<http://phet.colorado.edu/index.php>>, em língua inglesa. Acesso em: 18 fev. 2016.
- PION – Trata-se de um portal da Sociedade Brasileira de Física sobre ensino e divulgação que contém vários recursos didáticos, alguns enviados por professores de educação básica. Apresenta também artigos sobre a Física e seu ensino, além de divulgar acontecimentos da área. Disponível em: <[www.sbfisica.org.br/v1/novo/pion/](http://www.sbfisica.org.br/v1/novo/pion/)>. Acesso em: 18 fev. 2016.
- REDE INTERNACIONAL VIRTUAL DE EDUCAÇÃO (Rived) – É um programa da Secretaria de Educação a Distância (Seed) que incentiva a produção e divulgação de objetos de aprendizagem, que são atividades que abarcam todas as áreas de conhecimento, em formato multimídia e interativo, como animações e simulações.

Disponível em: <<http://rived.mec.gov.br/>>. Acesso em: 18 fev. 2016.

- SIMULAÇÕES DE FÍSICA BÁSICA – O *site* da UnB apresenta simulações nas áreas de Mecânica, Gravitação, Óptica, Termodinâmica e Fluidos que podem ser salvas no computador. Disponível em: <<http://trad.fis.unb.br/simulacao/index.html>>. Acesso em: 18 fev. 2016.

## Livros

### Sobre Ciência, sua História e Filosofia

- A ESTRUTURA DAS REVOLUÇÕES CIENTÍFICAS. Thomas Kuhn. Editora Perspectiva.

O autor utiliza a história da Física para buscar compreendê-la, introduzindo a importância da comunidade científica e os conceitos de paradigma, ciência normal e revolução científica.

- A FACE OCULTA DA NATUREZA. Anton Zeilinger. Editora Globo.

Aborda a dualidade onda-partícula em toda a sua história, desde os pensamentos de Newton e Huygens até os desenvolvimentos modernos elaborados pela Escola de Copenhague, as discussões entre Bohr e Einstein e as noções advindas da discussão sobre o Paradoxo EPR, como a computação quântica.

- A FORMAÇÃO DO ESPÍRITO CIENTÍFICO. Gastón Bachelard. Editora Contraponto.

Esta obra traz elementos da História da Física e da Química para discutir as dificuldades enfrentadas no desenvolvimento científico e suas superações. Associando essas dificuldades a obstáculos de entendimento dos seres humanos individuais, o autor aborda o que seria o espírito científico e como ele pode ser desenvolvido pelos jovens.

- A MATÉRIA: UMA AVENTURA DO ESPÍRITO. Luís Carlos de Menezes. Editora Livraria da Física.

O livro realiza um apanhado da Física, apresentando toda a Física Clássica, a Moderna e a Contemporânea em seus conceitos e suas histórias.

- A TEORIA DA RELATIVIDADE ESPECIAL E GERAL. Albert Einstein. Editora Contraponto.

Aborda a Teoria da Relatividade a partir do desenvolvimento conceitual do próprio Einstein. Como a obra possui data específica, não mostra a versão última dos conceitos, mas sua formulação nesse período.

- CAOS: A CRIAÇÃO DE UMA NOVA CIÊNCIA. James Gleick. Editora Campus Elsevier.

A história do desenvolvimento das ideias do Caos é esmiuçada nesse livro, assim como de suas aplicações nos sistemas de equilíbrio dinâmico, como as ciências atmosféricas.

- CIÊNCIA: CONCEITOS-CHAVE EM FILOSOFIA. Steven French. Editora Artmed.

O livro desenvolve vários conceitos associados à Filosofia da Ciência e traz passagens da sua história para facilitar o entendimento. Os conceitos desenvolvidos são, por exemplo, a descoberta, a heurística, a observação e o realismo.

- COMUNICAÇÃO: DO GRITO AO SATÉLITE. Antonio F. Costella. Editora Artmed.

Escrito por um jornalista, aborda a história da comunicação, em especial da sua transmissão, iniciando por tipografia, correios, passando aos telégrafos mecânicos até a situação atual da comunicação por satélite. Explica e expõe em detalhes o funcionamento de aparelhos como telefones, sendo possível ver a aplicação de conceitos de Mecânica e Eletromagnetismo.

- CONCEITOS DE FÍSICA QUÂNTICA. Osvaldo Pessoa Jr. Editora Livraria da Física.

A obra introduz a Física Quântica e a desenvolve de forma mais intuitiva do que os materiais didáticos convencionais, focando as questões filosóficas associadas e as interpretações que se podem associar aos fenômenos dessa Física.

- CONTRA O MÉTODO. Paul Feyerabend. Editora Francisco Alves.

O autor propõe o princípio de que tudo vale na investigação científica, abordando exemplos da História da Física para mostrar a inexistência do denominado método científico.

- CONVITE À FÍSICA. Yoav Ben Dov. Jorge Zahar Editor.

Traz uma reconstrução histórica da Física, dos seus primórdios à contemporaneidade, numa abordagem internalista, focada no desenvolvimento dos conceitos físicos.

- FÍSICA ATÔMICA E CONHECIMENTO HUMANO. Niels Bohr. Editora Contraponto.

O livro traz textos elaborados por Bohr, desenvolvendo relações entre o conceito da complementaridade e a unificação do conhecimento, aplicando-o nas ciências da vida e nas ciências humanas, além da sua origem na Física Moderna.

- GIGANTES DA FÍSICA: UMA HISTÓRIA DA FÍSICA MODERNA ATRAVÉS DE OITO BIOGRAFIAS. Richard Brennan. Editora JZE.

Narra a vida dos físicos modernos e as influências externas sofridas no desenvolvimento dos seus trabalhos, como o período da Segunda Guerra Mundial, o nazismo e o desenvolvimento da bomba nuclear.

- O FIM DAS CERTEZAS: TEMPO, CAOS E AS LEIS DA NATUREZA. Ilya Prigogine. Editora Unesp.

A obra discute a evolução da Física e dos conceitos

de tempo, espaço e termodinâmica, assim como o determinismo e a causalidade para o entendimento dos fenômenos complexos, como a origem e a evolução da vida.

### Divulgação/Ficção Científica

- **A CIÊNCIA RI.** Sidney Harris. Editora Unesp.  
O livro é um apanhado de charges que satirizam a pesquisa em ciências naturais e humanas, muito útil para questionar seus métodos e resultados.
- **ALICE NO PAÍS DO QUANTUM.** Robert Gilmore. Editora JZE.  
Este livro é recheado de situações fantásticas que fazem analogia entre a história de *Alice no país das maravilhas* e conceitos da Física Moderna, como o Princípio de Incerteza, a noção de férmions e bósons, a distribuição eletrônica em níveis e as partículas e interações nucleares.
- **O FIM DA ETERNIDADE.** Isaac Asimov. Editora Aleph.  
Conta a história da Eternidade, uma espécie de corporação desligada do espaço-tempo que realiza alterações na realidade através da ação de seus agentes e, assim, manipula o futuro da humanidade. Paralelamente, um dos seus agentes apaixona-se por uma mulher da realidade, pondo em risco a própria eternidade. Desenvolve a noção de causa, efeito e probabilidade, além de discutir os usos do desenvolvimento científico.
- **OS JOGOS DA NATUREZA.** Mário Novello. Editora Campus.  
Relata a história de uma filha curiosa e de seu pai, que explica a ela, de forma lúdica, temas da Física Contemporânea como as partículas elementares e questões sobre o Universo.
- **OS MISTÉRIOS NÃO EXPLICADOS DA NATUREZA.** John Malone. Editora Cultrix.  
O livro elabora respostas a questões científicas atuais, como a origem do universo, da vida ou mesmo o que é a luz, o elo perdido e outros assuntos.
- **UM OLHAR PARA O FUTURO.** João dos Anjos e Cássio Leite Oliveira (orgs.). Vieira & Lent Casa Editorial.  
Aborda sucintamente temáticas atuais como a nanotecnologia, a computação quântica, complexidade e supercordas.
- **VIAGEM AO CENTRO DA TERRA.** Júlio Verne. Editora Martin Claret.  
O doutor Lidenbrok e seu sobrinho acham um documento de Saksussem, sábio islandês do século XVI que fala sobre o centro da Terra, e saem numa jornada para seu interior. O filme aborda conhecimentos em Geologia, vegetação, espécies animais e o desenvolvimento de conceitos físicos envolvendo cinemática, som, luz, pressão, temperatura e Eletromagnetismo.

## Produções cinematográficas

### Filmes e séries

- **ARMAGEDDON** (EUA, 1998). Direção: Michael Bay.  
A Nasa descobre que a Terra está ameaçada pelo deslocamento de um grande cometa, que em 18 dias se chocará com ela, exterminando todas as formas de vida do planeta. Assim, uma tripulação é enviada para perfurá-lo e, por meio de uma bomba nuclear, implodir-lo. As características dos pequenos objetos do Sistema Solar, o que são, o que os diferencia e como a Ciência calcula os movimentos podem ser discussões suscitadas em aula pelo filme. Classificação etária: não recomendado para menores de 12 anos. Duração: aproximadamente 155 minutos.
- **CSI: CRIME SCENE INVESTIGATION** (EUA, desde 2000). Criação: Anthony E. Zuiker.  
Série na qual agentes da polícia científica solucionam crimes utilizando na análise de cenas procedimentos científicos e tecnologias como balística, espectrometria e luminescência. Classificação etária: não recomendado para menores de 16 anos. Duração de cada episódio: aproximadamente 42 minutos.
- **DÉJÀ VU** (EUA, 2006). Direção: Tony Scott.  
O agente Carlin investiga a explosão de uma balsa em Nova Orleans. Ao longo desse processo, ele faz uso de uma fenda no espaço-tempo voltando 6 minutos, e assim tudo pode mudar. No trecho em que o agente conversa com os cientistas responsáveis pela abertura da fenda, discute-se sobre efeitos previstos pela Teoria da Relatividade Geral. Classificação etária: não recomendado para menores de 14 anos. Duração: aproximadamente 115 minutos.
- **EU, ROBÔ** (EUA, 2004). Direção: Alex Proyas.  
Baseado na obra homônima de Isaac Asimov, o filme conta a história de um robô especial que recebeu de seu criador uma consciência semelhante à humana, desenvolvendo sentimentos e uma percepção das condições de vida dos robôs. Ele e um amigo policial descobrem um plano para a tomada de poder pelos robôs. É um filme útil para a discussão dos usos do desenvolvimento científico e para a análise da sociedade. Classificação etária: não recomendado para menores de 10 anos. Duração: aproximadamente 110 minutos.
- **EFEITO BORBOLETA** (EUA, 2004). Direção: Eric Bress, J. Mackye Gruber.  
Um jovem sofre de uma doença que afeta sua memória e dá a ele a possibilidade de voltar no tempo, o que ele utiliza para alterar o estado atual da sua vida e da de seus amigos. Insere noções

de caos pelos efeitos complexos que as alterações no passado provocam. Classificação etária: não recomendado para menores de 14 anos. Duração: aproximadamente 113 minutos.

- **MATRIX** (EUA, 1999). Direção: Andy e Larry Wachowski.

A humanidade vive numa realidade virtual controlada pelas máquinas, que fazem uso dos seres humanos como baterias, cabendo a alguns libertos salvar a humanidade. Abordam-se no início transformações de energia e o uso do desenvolvimento científico. Classificação etária: não recomendado para menores de 12 anos. Duração: aproximadamente 135 minutos.

- **O DIA DEPOIS DE AMANHÃ** (EUA, 2004). Direção: Roland Emmerich.

As mudanças ambientais causam a entrada do planeta numa nova era glacial, havendo um resfriamento abrupto na Terra. O filme pode suscitar discussões sobre questões ambientais, como o aquecimento global e as possibilidades de futuro do planeta. Classificação etária: livre. Duração: aproximadamente 124 minutos.

- **PONTO DE MUTAÇÃO** (EUA, 1990). Direção: Bernt Capra.

Baseado no livro homônimo de Fritjof Capra, no filme um político estadunidense vai à França visitar seu amigo poeta e, num passeio a um castelo medieval, eles encontram-se com uma física e desenvolvem uma conversa que se inicia com os conceitos de História e Filosofia da Física e migra para uma abordagem sistêmica, ecológica, do planeta Terra. Classificação etária: livre. Duração: aproximadamente 125 minutos.

- **SUNSHINE: ALERTA SOLAR** (Inglaterra, 2007). Direção: Danny Boyle.

Uma nave tripulada leva uma bomba nuclear ao Sol, cuja energia está para se esgotar, mas falha. Sete anos depois, outra nave é enviada, e no caminho ocorrem problemas misteriosos com os tripulantes. A arquitetura da nave, que deve suportar uma grande intensidade de radiação, a captação de energia e a produção de oxigênio que nela ocorrem são alguns aspectos científicos interessantes que podem ser explorados por meio do filme. Classificação etária: não recomendado para menores de 14 anos. Duração: aproximadamente 107 minutos.

- **TWISTER** (EUA, 1996). Direção: Jan De Bont.

Uma tempestade aproxima-se de Oklahoma. Assim, dois grupos rivais de cientistas que pesquisam a dinâmica dos tornados arriscam-se na colocação de sensores no interior do tornado que se aproxima para prever sua chegada. O entendimento sobre a formação das tempestades e os procedimentos para a colocação dos sen-

sores são aspectos interessantes do filme. Classificação etária: livre. Duração: aproximadamente 93 minutos.

- **VIAGEM AO CENTRO DA TERRA** (EUA, 2008). Direção: Eric Brevig.

Um cientista estudioso da veracidade das obras de Júlio Verne desaparece misteriosamente, o que faz seu filho e seu irmão, Trevor, desenvolverem uma jornada ao centro da Terra pelo mesmo caminho descrito no livro, com o fim de salvá-lo. O filme aborda conhecimentos em Geologia, vegetação, espécies animais e o desenvolvimento de conceitos físicos envolvendo Cinemática, som, luz, pressão, temperatura e Eletromagnetismo. Classificação etária: não recomendado para menores de 12 anos. Duração: aproximadamente 90 minutos.

### Documentários

- **A HISTÓRIA DOS ÔNIBUS ESPACIAIS** (EUA, 2009). Produção: Flashstar Home Video.

Como informa o nome, este documentário, que possui cinco partes, expõe o desenvolvimento e a evolução dos ônibus espaciais tripulados, narrando suas falhas e superações. Duração: aproximadamente 88 minutos.

- **AERONAVES DO FUTURO** (EUA, 2008). Produção: Discovery Channel.

O documentário expõe a evolução das aeronaves até a contemporaneidade e mostra projetos futuros, além de indicar a influência dessas máquinas na nossa vida. Duração: aproximadamente 55 minutos.

- **COSMOS** (EUA, 1980). Produção: KCET, Carl Sagan Productions, BBC e Polytel International.

Ao longo dos 13 episódios que constituem a série de Carl Sagan, são abordados temas como a origem da vida, do Universo, partes da história da Ciência, além de se desenvolverem conceitos da Astronomia como os que envolvem as estrelas, galáxias entre outros. Duração: aproximadamente 60 minutos.

- **A ENGENHARIA DO IMPOSSÍVEL** (EUA, 2002). Produção: Discovery Channel.

Explora projetos de construção que fazem uso de desenvolvimentos modernos da tecnologia da engenharia e de técnicas que ainda estão para ser desenvolvidas. Duração: aproximadamente 96 minutos.

- **ESPAÇONAVE TERRA** (França, 1997). Produção: Fantôme Animation, France 3, Télémages, ITI, Cofimage 7, La Cinquième, CNC, Cartoon.

A série é feita em animação computacional e acompanha o movimento do nosso planeta por 52 se-

manas e, em cada uma delas, desenvolvem-se conceitos específicos relacionados à mecânica celeste, como marés, eclipses, calendários, planetologia, estações do ano, fusos horários etc. Duração: aproximadamente 10 minutos.

- MÁQUINA DO FIM DO MUNDO (Reino Unido, 2008). Produção: BBC.

Um documentário especial elaborado sobre o Cern (sigla em inglês para Organização Europeia para a Pesquisa Nuclear) e o LHC (sigla em inglês para Grande Colisor de Hádrons), no qual se expõem o que são e as pesquisas lá realizadas associadas às partículas fundamentais e ao modelo do *big bang*. Duração: aproximadamente 92 minutos.

- O MELHOR DE MARAVILHAS MODERNAS (EUA, 2005). Produção: Canal de História.

Com cinco discos, traz uma seleção de episódios da série homônima na qual é explicado o desenvolvimento e o funcionamento de tecnologias atuais. Duração: aproximadamente 50 minutos.

- O UNIVERSO (EUA, 2007). Produção: Canal de História.

A série, com quatro episódios, mostra, através de animações computacionais, imagens próximas de planetas, estrelas, galáxias e os demais componentes do Universo. Duração: aproximadamente 165 minutos.

- OS ALPES: A ESCALADA DA SUA VIDA (EUA, 2008). Produção: Flashstar Home Video.

Mostra a escalada que Eiger realizou nos Alpes suíços, com suas dificuldades e seus riscos. Duração: aproximadamente 135 minutos.

## Referências bibliográficas

BRASIL. Leis, decretos etc. *Estatuto da Criança e do Adolescente*, n. 8.069/1990.

\_\_\_\_\_. Leis, decretos etc. *Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional*, n. 9.394/96.

\_\_\_\_\_. Leis, decretos etc. *Plano Nacional de Educação*, 2014-2024, n. 13.005/2014.

\_\_\_\_\_. Ministério da Educação. Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira. *Matriz de referência para o Enem 2009*. Brasília, 2009.

\_\_\_\_\_. Ministério da Educação. Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira. *Pisa 2000: Relatório Nacional*. Brasília, 2001.

\_\_\_\_\_. Ministério da Educação. Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira. *Plano de Desenvolvimento da Educação*. Saeb: Ensino Mé-

dio: matrizes de referência, tópicos e descritores. Brasília, 2008.

\_\_\_\_\_. Ministério da Educação. Secretaria de Educação Básica. *Ensino Médio Inovador*. Brasília, 2009.

\_\_\_\_\_. Ministério da Educação. Secretaria de Educação Básica. *Orientações Curriculares para o Ensino Médio: volume 2 — Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias*. Brasília, 2006.

\_\_\_\_\_. Ministério da Educação. Secretaria de Educação Básica. *Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais*. Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias. Brasília, 2002.

\_\_\_\_\_. Ministério da Educação. Secretaria de Educação Média e Tecnológica. *Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio: Parte III – Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias*. Brasília, 2000.

\_\_\_\_\_. Ministério da Educação e Desporto. Conselho Nacional de Educação. Câmara de Educação Básica. *Resolução n. 3 de 26/6/1998*.

CHERVEL, A. História das disciplinas escolares: reflexões sobre um campo de pesquisa. *Teoria & Educação*, Porto Alegre, v. 2, p. 177-229, 1990.

CONTRERAS, J. *A autonomia de professores*. São Paulo: Cortez, 2012.

DELIZOICOV, D. Problemas e problematizações. In: PIETRECOLA, M. (org.). *Ensino de Física: conteúdo, metodologia e epistemologia numa concepção integradora*. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2001.

ECHEVERRÍA, M. del P. P.; POZO, J. I. Aprender a resolver problemas e resolver problemas para aprender. In: Pozo, J. I. (org.). *A solução de problemas: aprender a resolver, resolver para aprender*. Porto Alegre: Artmed, 1998.

FORQUIN, J. C. Saberes escolares, imperativos didáticos e dinâmicas sociais. *Teoria & Educação*, Porto Alegre, n. 5, p. 28-49, 1992.

GAUTHIER, C. (org.); MARTINEAU, S.; DESBIENS, J.-F.; MALO, A.; SIMARD, D. *Por uma teoria da pedagogia: pesquisas contemporâneas sobre o saber docente*. Ijuí: Editora Unijuí, 2013.

HAYDT, R. C. *Avaliação do processo de ensino-aprendizagem*. São Paulo: Ática, 1995.

KNELLER, G. F. Dos dados às teorias. In: \_\_\_\_\_. *Ciência como atividade humana*. São Paulo: Jorge Zahar/Edusp, 1978.

LEMKE, J. L. Investigar para el futuro de la educación científica: nuevas formas de aprender, nuevas formas

- de viver. *Revista Enseñanza de las Ciencias*, v. 24, n. 1, p. 5-12, 2006.
- MARTINS, I. Explicações, representações visuais e retórica na sala de aula de ciências. In: MORTIMER, E. F.; SMOLKA, A. L. B. (org.). *Linguagem, cultura e cognição*. Belo Horizonte: Autêntica, 2001.
- MEDEIROS, Z.; VENTURA, P. C. dos S. O conceito Cultura Tecnológica e um estudo no meio educacional. *Revista Ensaio Pesquisa em Educação e Ciências*, Belo Horizonte, v. 9, n. 2, p. 237-251, 2007.
- MENEZES, L. C. de. *A matéria: uma aventura do espírito: fundamentos e fronteiras do conhecimento físico*. São Paulo: Livraria da Física, 2005.
- \_\_\_\_\_. O novo público e a nova natureza do Ensino Médio. *Estudos Avançados*, São Paulo, v. 15, n. 42, p. 201-208, 2001.
- \_\_\_\_\_. Projeto pedagógico: rever o quê, mudar por quê. *Revista de Educação e Informática*, São Paulo, v. 14, p. 29-34, 2000.
- MOREIRA, M. A. *Ensino e aprendizagem: enfoques teóricos*. São Paulo: Moraes, 1985.
- \_\_\_\_\_; AXT, R. A questão das ênfases curriculares e a formação do professor de ciências. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, v. 3, n. 2, p. 66-78, 1986.
- OLIVEIRA, M. K. de. Desenvolvimento e aprendizado. In: \_\_\_\_\_. *Vygotsky: aprendizado e desenvolvimento: um processo histórico*. São Paulo: Scipione, 1997.
- PEREIRA, J. E. D. A pesquisa dos educadores como estratégia para a construção de modelos críticos de formação docente. In: PEREIRA, J. E. D.; KENNETH, M. (org.). *A pesquisa na formação e no trabalho docente*. Belo Horizonte: Autêntica, 2002.
- PERRENOUD, P. *Avaliação: da excelência à regulação das aprendizagens: entre duas lógicas*. Porto Alegre: Artes Médicas Sul, 1999.
- PUIG, J. M.; TRILLA, J. Animação sociocultural. In: \_\_\_\_\_. *Pedagogia do ócio*. Porto Alegre: Artmed, 2004.
- SALVIANI, N. A conversão do saber científico em saber escolar. In: \_\_\_\_\_. *Saber escolar: currículo e didática*. Campinas: Autores Associados, 1994.
- SANTOS, M. E. V. M. dos. *Desafios pedagógicos para o século XXI*. Lisboa: Livros Horizonte, 1999.
- VASCONCELOS, C. dos S. *Planejamento: Projeto de Ensino-Aprendizagem e Projeto Político-Pedagógico: elementos metodológicos para elaboração e realização*. São Paulo: Libertad Editora, 2004.

# Orientações específicas para este volume

Estas orientações trazem:

**Unidades** — Para cada unidade que compõe o volume são abordados *Conceitos fundamentais*, as *Articulações conceituais* e os *Capítulos*.

Em *Conceitos fundamentais* são trazidas as definições de fenômenos, leis e/ou princípios destacados da unidade, o que não significa que os demais não mereçam ênfase. A finalidade do destaque é auxiliar o professor a se questionar sobre quais são os conceitos mais gerais, norteadores e relevantes para o ensino da Física, de modo que ele foque o entendimento desses pelos estudantes.

As *Articulações conceituais* objetivam aprofundar os conceitos físicos abordados na unidade, de forma a mostrar suas inter-relações; no mesmo sentido, procurou-se articular os conceitos físicos do capítulo com outros pertencentes a outras áreas da Física, assim como com outras disciplinas científicas e/ou áreas do conhecimento humano.

**Capítulos** — Cada capítulo pode possuir uma sugestão (ou mais) de *Atividade introdutória*, o desenvolvimento da *Outras palavras*, o desenvolvimento da seção *Atividade Prática* e a *Atividade sugerida* e traz a *Resolução dos exercícios propostos*.

A proposta da *Atividade introdutória* objetiva auxiliar o primeiro contato do estudante com o conteúdo do capítulo, de modo que ele participe, contribua e se interesse pelo assunto. Essas atividades possuem abordagens diferenciadas e algumas necessitam de materiais como fotocópias, vídeos e simulações. Tanto a abordagem como o tipo de material necessário foram destacados em cada ati-

vidade. Como abordagens, referimo-nos àquelas presentes na parte comum das Orientações Didáticas do Manual, ressaltando que as abordagens *CTS* (Ciência, Tecnologia e Sociedade) e *Contextualização* são as que apresentam atividades mais propícias à interdisciplinaridade.

Em *Resolução dos exercícios propostos* são disponibilizadas as resoluções de todos os exercícios propostos presentes no volume.

O desenvolvimento da seção *Outras palavras* consiste nas resoluções das questões que são propostas em *Organizando as ideias do texto* e, quando necessário, num encaminhamento da leitura, com o fim de auxiliar o professor a realizá-la.

De forma análoga, o desenvolvimento da seção *Atividade prática* traz comentários ou resoluções das questões apresentadas na *Discussão* e tem como encaminhamento modos de confeccionar o arranjo necessário e sugestões de dinâmicas que podem ser estabelecidas na aula.

A *Atividade sugerida* consiste numa proposta extra, ou seja, não está presente no livro do estudante, do mesmo modo que a *Atividade introdutória*. Essa atividade também destaca a abordagem e o material de que se faz uso com o objetivo de oferecer alternativas ao professor ou suplementar as aulas.

**Propostas de plano anual** — Consiste na sugestão de sequências de atividades para o ano considerando duas cargas horárias semanais, de 2 horas e 4 horas. Trata-se apenas de uma sugestão, posto que aspectos da realidade escolar são relevantes na elaboração do plano, levando os professores a priorizar determinada sequência e/ou conteúdos.

## Conceitos fundamentais

**Carga elétrica** — propriedade inerente a certas partículas que possibilita uma interação mútua de natureza elétrica. Seus valores são convencionados como positivos ou negativos.

**Condutores elétricos** — corpos, substâncias ou sistemas em que há cargas elétricas que possuem grande liberdade de movimento.

**Força elétrica** — força entre duas partículas carregadas eletricamente, cuja intensidade é diretamente proporcional ao produto entre as quantidades das cargas e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre elas.

**Campo elétrico** — região na qual uma carga elétrica de prova fica submetida à ação de uma força elétrica de atração ou repulsão.

**Potencial elétrico** — grandeza que expressa a quantidade de energia potencial elétrica, por unidade de carga, que uma partícula eletrizada adquire em determinado ponto do campo elétrico.

## Articulações conceituais

A Eletrostática, como o próprio nome sugere, envolve conceitos associados a cargas elétricas em equilíbrio. Obviamente, o conceito de carga é fundamental para qualquer entendimento posterior.

Se a carga elétrica é uma propriedade intrínseca da matéria, o fato de a maioria dos corpos apresentarem-se eletricamente neutros parece ser um contrassenso. Para entender isso, é necessário recorrermos ao modelo atômico, no qual encontramos a mesma quantidade de cargas positivas e negativas.

Assim, a neutralidade da maior parte da matéria cotidiana vem do fato de existir a mesma quantidade de cargas positivas e negativas. Os sinais que atribuímos aos dois tipos de cargas são apenas convencionais. O fato de a soma algébrica ser igual a zero em muitos casos não significa que as cargas se aniquilam.

A neutralidade elétrica da matéria consiste numa situação de equilíbrio, posto que a aproximação de um objeto eletrizado não cria novas cargas em um corpo neutro, apenas interfere nesse equilíbrio, separando-as. Tanto a noção de equilíbrio quanto o comportamento que as cargas adquirem na presença de outras são explicados pelas forças elétricas.

As forças são grandezas por meio das quais as interações ocorrem. No caso das forças coulombianas ou elétricas, elas representam ações a distância, revelando atração mútua entre cargas de sinais diferentes e repulsão mútua entre as de mesmo sinal. Essa força é determinada por:

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

Em que:

F = intensidade da força eletrostática (em N).

k = constante eletrostática ( $9,0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$ ).

$Q_1$  e  $Q_2$  = quantidades de carga elétrica (em C).

d = distância (em m).

Originado por, no mínimo, uma carga, o campo elétrico estende-se por um espaço infinito e representa uma potencial interação com outra carga qualquer. Sua intensidade (E) é dada por:

$$E = k_0 \cdot \frac{|Q|}{d^2}$$

E o potencial elétrico (V), por:

$$V = k_0 \cdot \frac{Q}{d}$$

As unidades dessas grandezas no SI são, respectivamente, N/C (newton por coulomb) e V (volt).

Usando a Mecânica como analogia, o movimento de uma partícula eletrizada em relação a outra significa que a força (no caso, a eletrostática) realizou trabalho (em N · m). A intensidade desse trabalho equivale ao produto da intensidade da força média executada pelo deslocamento executado ou, ainda, o produto da quantidade de carga pela diferença de potencial:

$$\tau = \frac{k \cdot Q \cdot q}{d} = \frac{k \cdot Q \cdot q \cdot d}{d^2} = F \cdot d = q \cdot \Delta V$$



## Atividade introdutória

### Formas de eletrização

O fenômeno da eletrização desperta muita curiosidade, porque revela uma propriedade interessante da matéria: a carga elétrica. Sendo assim, esta atividade introdutória tem como objetivo mostrar uma das maneiras de eletrizar corpos: a eletrização por atrito. Além disso, apresenta como resultado as duas possíveis interações entre as cargas: a repulsão e a atração.

Uma forma de conduzir a atividade consiste em atritar um balão de festa cheio nos cabelos, de modo que eletrizem o balão em toda sua lateral. Após esse procedimento, mantenha o balão suspenso por um fio de náilon e reproduza o experimento com outro balão. Por fim, segure os dois balões com a mesma mão e mostre a repulsão entre eles. Depois, discuta as seguintes questões:

1. O que aconteceu entre os balões e os cabelos após o atrito de uns contra os outros?

*Resposta possível: Os balões atraíram os cabelos.*

2. O que aconteceu quando os dois balões foram aproximados?

*Resposta possível: Os balões se repeliram.*

3. Busque explicar o comportamento de um balão em relação aos cabelos e em relação ao outro balão que também foi atritado.

*Resposta possível: O balão atraiu os cabelos porque estavam carregados com cargas opostas, e os balões se repeliram porque estavam carregados com cargas iguais.*

Discuta as hipóteses e prossiga falando sobre a existência de duas espécies de cargas na matéria: uma convencional positiva e outra negativa. Explique que a eletrização por atrito é uma forma de transferir as cargas de um corpo para outro e que as cargas de sinais diferentes se atraem, enquanto as de sinais iguais se repelem.

## Resolução dos exercícios propostos (p. 28)

### EP1.

- I) O corpo, inicialmente neutro, perdeu elétrons e ficou eletrizado positivamente.

- II) O corpo, a princípio eletrizado negativamente, perdeu elétrons e ficou eletricamente neutro.
- III) O corpo, a princípio neutro, permaneceu na mesma condição.
- IV) O corpo, a princípio eletrizado positivamente, ganhou elétrons, mas continuou eletrizado positivamente.
- V) O corpo, a princípio neutro, ganhou elétrons e ficou eletrizado negativamente.
- VI) O corpo, a princípio eletrizado negativamente, perdeu elétrons, mas continuou eletrizado negativamente.

### EP2. São dados:

$$n = 5 \cdot 10^{20} \text{ elétrons}; |e| = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C.}$$

- a) Deve-se retirar desse corpo certa quantidade de elétrons.
- b) A quantidade de carga é dada por:  

$$Q = n \cdot |e| = 5 \cdot 10^{20} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} = 80 \text{ C}$$

### EP3.

- a) Se  $M$  for um corpo carregado positivamente, então:  $N$  tem sinal negativo, pois  $M$  e  $N$  se atraem;  $P$  também é negativo, pois  $N$  e  $P$  se repelem.
- b) Se  $M$  for carregado negativamente, então:  $N$  tem sinal positivo, pois  $M$  e  $N$  se atraem;  $P$  também é positivo, pois  $N$  e  $P$  se repelem. Nesse item  $b$ , era esperado que todos os sinais se invertessem em relação ao item  $a$ .

### EP4. São dados:

$$Q_A = 4 \text{ C}; Q_B = -8 \text{ C}; Q'_C = 0; Q'_A = 2 \text{ C};$$

$$Q'_B = -5,2 \text{ C.}$$

A carga elementar do elétron é negativa:

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

- a) A quantidade total de cargas do sistema em estudo é:  

$$Q_A + Q_B + Q_C = 4 \text{ C} + (-8 \text{ C}) + 0 = -4 \text{ C.}$$
- b) Como o sistema é eletricamente isolado, temos a mesma carga total após as transferências de elétrons. Então:  

$$Q'_A + Q'_B + Q'_C = 2 \text{ C} + (-5,2 \text{ C}) + Q'_C = -4 \text{ C}$$

$$\therefore Q'_C = -0,8 \text{ C.}$$

- c) O corpo  $C$  ganhou elétrons, pois era neutro e passou a ter a carga de  $-0,8\text{ C}$ .  
Essa quantidade de cargas corresponde ao seguinte número de elétrons:  
 $Q = n \cdot e$   
 $-0,8 = n \cdot (-1,6 \cdot 10^{-19}) \Rightarrow n = 5 \cdot 10^{18}$  elétrons  
 $\therefore$  O corpo  $C$  ganhou  $5 \cdot 10^{18}$  elétrons.

**EP5.** São dados:

$$Q_X = Q_{\text{algodão}} = 0; Q'_{\text{algodão}} = +8 \mu\text{C (após atrito com X)};$$

$$Q_{\text{bolinha}} = 0.$$

- a) O material  $X$  sucede o algodão na série triboelétrica, pois ficou eletrizado negativamente ao receber elétrons do tecido.
- b) Nessa transferência, temos:  
 $Q_{\text{algodão}} + Q_{\text{bolinha}} = Q'_{\text{algodão}} + Q'_{\text{bolinha}}$   
 $0 + 8 = Q'_{\text{algodão}} + 5$   
 $\therefore Q'_{\text{algodão}} = +3 \mu\text{C}$
- c) Haverá atração, porque eles possuem sinais opostos: a placa eletrizada positivamente e a bolinha, negativamente.

**EP6.** São dados:

$$Q_A = 3Q; Q_B = Q; Q_C = 0; Q_D = 8Q.$$

Inicialmente, as esferas eletrizadas são postas em contato:  $A$ ,  $B$  e  $D$ . Nesse processo, cada esfera fica com um terço da carga total inicial ( $3Q + Q + 8Q = 12Q$ ) entre elas, ou seja:  $12Q : 3 = 4Q$ .

Em seguida, temos os seguintes contatos:

- $A$  com  $C$ : a carga total entre elas é  $4Q + 0 = 4Q$ ; cada esfera ( $A$  e  $C$ ) fica com  $2Q$  de carga;
- $B$  com  $C$ : a carga total entre elas é  $4Q + 2Q = 6Q$ ; então cada uma ( $B$  e  $C$ ) fica com  $3Q$  de carga;
- e finalmente  $D$  com  $C$ : a carga total entre elas é  $4Q + 3Q = 7Q$ ; logo, cada esfera ( $D$  e  $C$ ) finaliza com  $3,5Q$  de carga elétrica.

Portanto, as cargas finais por esfera são:

- $A$ :  $2Q$ ;
- $B$ :  $3Q$ ;
- $C$ :  $3,5Q$ ;
- $D$ :  $3,5Q$ .

**EP7.**

- a) Se a escova recebeu elétrons (e ficou com a carga  $-Q$ ), a esfera  $B$  ficou eletrizada positivamente com a carga  $Q_B = +Q$ , pois ambas estavam neutras no início.

- b) Para não descarregar a esfera  $B$ . Com qualquer toque nela com os dedos, a esfera ficaria descarregada, pois nosso corpo funcionaria como um fio terra.
- c) Ocorre uma atração mútua, devido à indução eletrostática.
- d) No toque, a esfera  $B$  receberá elétrons de  $A$ ; como ambas ficam positivamente eletrizadas, ocorre uma repulsão entre elas.
- e) A quantidade de carga inicial de  $B$  fica dividida igualmente entre elas:  
 $Q'_A = \frac{+Q}{2}$  e  $Q'_B = \frac{+Q}{2}$

**EP8.**

- a) O corpo  $A$  está neutro e o corpo  $B$ , eletrizado.
- b) O corpo  $A$  está neutro; já o corpo  $B$  está eletrizado, mas não podemos identificar seu sinal mesmo que as folhas estejam abertas.
- c) Após o contato do corpo  $A$ , as folhas continuariam fechadas; com o contato do corpo  $B$ , as folhas permaneceriam abertas, mesmo depois de afastar o objeto, pois o eletroscópio ficaria carregado (eletrizado).
- d) Sim. Para tanto, devemos aproximar da esfera do eletroscópio um corpo já eletrizado de sinal conhecido, por exemplo, positivamente. Devido à indução eletrostática, se as folhas se abrirem ainda mais, significará que o eletroscópio está eletrizado com sinal positivo; se as folhas se fecharem, ele estará eletrizado negativamente.

**EP9.**

01. Incorreto. A barra ficará neutra.
02. Incorreto. Se a barra for conectada ao solo por um fio condutor, não alterará as características da placa de vidro.
04. Incorreto. Ela pode ser neutra.
08. Correto.
16. Incorreto. A distribuição uniforme da carga ocorreria se a barra metálica fosse uma esfera.

**EP10.**

- Ao abrir a porta de um carro.
- Ao abrir um portão de ferro.
- Ao abrir a porta de uma geladeira.
- Ao apertar a mão de uma pessoa.
- Ao tocar a lataria metálica de um carro.
- Ao tirar uma blusa de tecido sintético (ou lã).

## Outras palavras (p. 24)

### O *versorium* de Gilbert

1. Chegou à conclusão de que a eletrização por atrito não ocorria apenas com o âmbar.
2. O ímã não necessita de atrito para que sua propriedade magnética se manifeste. Além disso, o atrito não aumenta nem diminui seu poder de atração. Já os corpos eletrizados atraem para si materiais que são “indiferentes” aos ímãs.

## Atividade prática (p. 26)

### Construindo um eletróforo

Esta atividade trabalha conceitos de Eletrostática. Poderá ser feita na sala de aula ou no laboratório, em grupos de 3 a 5 estudantes, desde que esses ambientes possam ser fechados de forma que não entre luz.

Quanto ao material a ser utilizado, você poderá usar um forro de PVC cortado em seção circular. Esse forro é encontrado em lojas de material de construção. Como opção para substituir o disco de alumínio, uma tampa grande de lata de tinta poderá ser utilizada. O cabo isolante pode ser de qualquer material isolante. Por exemplo, você poderá furar a tampa da lata de tinta, colocar no furo um parafuso compatível e acoplar uma bucha de plástico ao parafuso, para que sirva como um cabo.

Distribua o material para os grupos. É interessante que o cabo já esteja fixado no disco de alumínio. Oriente que realizem os passos descritos no procedi-

mento. Para visualizar as centelhas, é importante que o ambiente esteja escuro, pois assim elas serão mais facilmente visualizadas. Fique tranquilo, você não corre risco de levar choque pela centelha.

Após realizar o procedimento, peça aos estudantes que respondam às questões da atividade.

1. A energia que produz a faísca vem do próprio corpo ou da lâmpada.
2. a) A placa de PVC fica eletrizada negativamente.  
b) Antes de ser tocado pelo dedo, o disco de alumínio está com carga neutra.  
c) Após ser tocado pelo dedo, o disco de alumínio adquire carga positiva.  
d) O pedaço de lã ou de seda fica eletrizado positivamente.
3. Como tanto a seda (ou a lã) quanto a placa de alumínio estarão com cargas de mesmo sinal, nada acontecerá.
4. É possível fazer com que o disco de alumínio adquira a mesma carga da placa de PVC realizando o mesmo processo de eletrização, mas encostando o disco na lã ou na seda.
5. O secador ajuda a manter o ar seco, melhorando as condições para o experimento.

## Algo a mais

Sugestão de leitura para o professor: As origens históricas do eletroscópio, *Rev. Bras. Ensino Fis.*, v. 24, n. 3, São Paulo, set. 2002. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1806-1172002000300013&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-1172002000300013&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt)>. Acesso em: 18 fev. 2016.

## Capítulo 2 Força elétrica

### Atividade introdutória

#### A máquina fotocopadora

A atividade consiste na leitura e interpretação de um artigo publicado na revista *Superinteressante*, que está disponível em: <<http://super.abril.com.br/comportamento/a-fotocopiadora>>; acesso em: 18 fev. 2016. Esse artigo narra o desenvolvimento da ideia e construção da máquina fotocopadora, que faz uso dos princípios da Eletrostática em seu funcionamento.

Sugerimos, após a leitura, as seguintes questões:

1. Qual foi a necessidade que levou Chester a desenvolver a máquina fotocopadora?  
*Resposta possível: Encontrar uma maneira de tirar cópias de documentos de modo mais simples do que era feito até então.*
2. Explique o processo da eletrofotografia.  
*Resposta possível: Eletriza-se, por atrito, uma placa de zinco revestida por enxofre e nela encosta-se uma placa de vidro, na qual algo foi escrito.*

A placa se descarrega ao ser atingida pelos raios de luz, com exceção da sombra do que estava escrito na placa. Sobre a região eletrizada, joga-se um pó químico, que se adere, e depois a região é comprimida contra uma folha de papel com parafina, fixada pelo aquecimento.

3. Há algum motivo em denominarmos as fotocópias de xerox? Em caso afirmativo, explique.

Resposta possível: Sim. A palavra xerox é uma abreviação da palavra xerografia, que deriva do grego: xerox = seco, grafia = escrita, denotando o modo de produção da cópia: os dizeres que se quer reproduzir são tingidos por um pó químico e fixados no papel pela ação do calor.

4. Qual o processo atual para se obter fotocópias?

Resposta possível: O processo básico ainda é o mesmo, mas os recursos avançaram. Por exemplo, nas máquinas produzidas no Japão, o tonalizador é líquido, obtido de um derivado de petróleo.

5. É possível imaginar ou explicar outros processos de produção ou captação de imagens que se utilizam dessa interação entre a luz e os elétrons?

Resposta possível: Sim, a captação da luz pelo olho, que envia sinais elétricos ao cérebro, e também a luz que atinge o filme fotográfico, produzindo uma reação química.

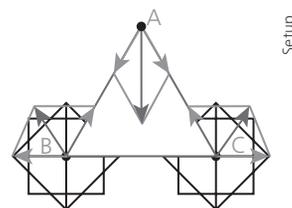
- b) Com as três cargas negativas:

carga A: N;  
carga B: OSO;  
carga C: ESE.

Aqui, observamos que o resultado é idêntico ao item anterior, pois todas as cargas têm o mesmo sinal e se repelem entre si.

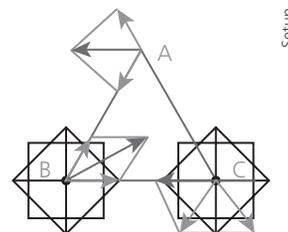
- c) Com A positiva, B e C negativas:

carga A: S;  
carga B: NNO;  
carga C: NNE.



- d) com A positiva, B negativa e C positiva:

carga A: O;  
carga B: ENE;  
carga C: SSO.

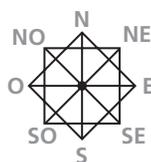
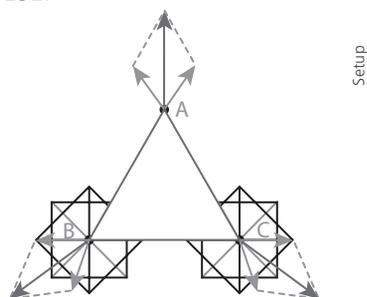


## Resolução dos exercícios propostos (p. 38)

### EP1.

- a) Com as três cargas positivas:

carga A: N;  
carga B: OSO;  
carga C: ESE.



### EP2.

- a) Os sinais da carga devem ser opostos para que haja atração mútua.  
b) São dados:  $|Q_1| = |Q_2| = Q$ ;  $d = 30 \text{ cm} = 0,3 \text{ m}$ ;  
 $F = 40 \text{ N}$ ;  $k = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$ .

Pela lei de Coulomb, temos:

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

$$40 = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{Q \cdot Q}{0,3^2}$$

$$\therefore Q = 2 \cdot 10^{-5} \text{ C}$$

Como as cargas têm atração entre si, uma delas é positiva e a outra é negativa. Logo, as possíveis cargas são:

$$Q_1 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ C} \text{ e } Q_2 = -2 \cdot 10^{-5} \text{ C}; \text{ ou}$$

$$Q_1 = -2 \cdot 10^{-5} \text{ C} \text{ e } Q_2 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ C}.$$

**EP3.** Com base na lei de Coulomb, vamos ver o que acontece com a força ao trocarmos  $d$  por  $3d$ .

Inicialmente, temos:

$$F = k \cdot Q \cdot \frac{Q}{d^2}$$

Após o aumento da distância, obtemos:

$$F' = k \cdot \frac{Q \cdot Q}{(3d)^2}$$

$$F' = k \cdot \frac{Q \cdot Q}{9d^2} = \frac{F}{9}$$

Portanto, a força diminui 9 vezes, ou seja, passa a ter um nono da intensidade inicial.

**EP4.** São dados:

Antes do contato:  $Q_1 = -Q$ ;  $Q_2 = 5Q$ ;  $d$ : distância inicial;  $F$ : força inicial;

Após contato: distância final  $2d$ .

a) A força  $F$ , antes do contato, tem a intensidade dada por:

$$F = k_0 \cdot \frac{|Q_1| \cdot |Q_2|}{d^2}$$

$$F = k_0 \cdot \frac{Q \cdot 5Q}{d^2} = k_0 \cdot \frac{5 \cdot Q^2}{d^2}$$

b) Após o contato, a quantidade total inicial de cargas é conservada e dividida igualmente para a partícula:  $(-Q + 5Q) : 2 = 4Q : 2 = +2Q$

c) A força  $F'$  final é:

$$F' = k_0 \cdot \frac{2Q \cdot 2Q}{(2d)^2} = k_0 \cdot \frac{4Q^2}{4d^2} = k_0 \cdot \frac{Q^2}{d^2}$$

Comparando  $F = k_0 \cdot \frac{5Q^2}{d^2}$  com  $F' = k_0 \cdot \frac{Q^2}{d^2}$ , concluímos que:  $F' = \frac{F}{5}$ .

**EP5.**

a) São dados:

$$Q_1 = 5 \mu\text{C} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ C};$$

$$Q_2 = -2 \mu\text{C} = -2 \cdot 10^{-6} \text{ C}; d = 0,3 \text{ m};$$

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

Pela lei de Coulomb, temos:

$$F_{12} = k \cdot \frac{|Q_1| \cdot |Q_2|}{d^2}$$

$$F_{12} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{5 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^{-6}}{0,3^2}$$

$$\therefore F_{12} = 1 \text{ N}$$

b) Pelo teorema de Pitágoras determinamos o comprimento da hipotenusa do triângulo retângulo:

$$h^2 = 0,3^2 + 0,4^2$$

$$\therefore h = 0,5 \text{ m}$$

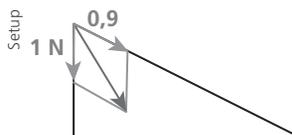
Sendo  $Q_3 = -5 \mu\text{C} = -5 \cdot 10^{-6} \text{ C}$ , obtemos a seguinte força entre  $Q_1$  e  $Q_3$ :

$$F_{13} = k \cdot \frac{|Q_1| \cdot |Q_3|}{d^2}$$

$$F_{13} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{5 \cdot 10^{-6} \cdot 5 \cdot 10^{-6}}{0,5^2}$$

$$\therefore F_{13} = 0,9 \text{ N}$$

c) A resultante na carga  $Q_1$  (que é atraída tanto por uma carga como pela outra) é dada pelo esquema:



Seu módulo é dado pela lei dos cossenos.

Sendo o ângulo  $\theta$  formado pelas componentes, o cosseno desse ângulo é:

$$\cos \theta = \frac{0,4}{0,5} = \frac{4}{5} = 0,8.$$

$$\begin{aligned} \text{Então: } F_r^2 &= 1^2 + 0,9^2 + 2 \cdot 1 \cdot 0,9 \cdot 0,8 \Rightarrow \\ \Rightarrow F_r^2 &= 1 + 0,81 + 1,44 = 3,25 \Rightarrow \end{aligned}$$

$$\therefore F_r \cong 1,8 \text{ N}$$

**EP6.** Pela figura:  $d_{13} = 40 \text{ cm} = 0,4 \text{ m}$ ;  $d_{12} = x$ .

No equilíbrio, temos:

$$F_{12} = F_{23}$$

$$k \cdot \frac{|Q_1| \cdot |Q_2|}{x^2} = k \cdot \frac{|Q_2| \cdot |Q_3|}{(0,4 - x)^2}$$

$$\frac{|Q_1|}{x^2} = \frac{|Q_3|}{(0,4 - x)^2}$$

$$\frac{8 \cdot 10^{-6}}{x^2} = \frac{2 \cdot 10^{-6}}{(0,4 - x)^2}$$

$$\frac{4}{x^2} = \frac{1}{0,16 - 0,8x + x^2}$$

$$4x^2 - 3,2x + 0,64 = x^2$$

$$3x^2 - 3,2x + 0,64 = 0$$

Resolvendo a equação, obtemos:

$x' = 0,267...$  ou  $x'' = 0,8$  (este valor não convém, pois é maior que 0,4)

Portanto, o valor da distância  $x$  é de aproximadamente 0,267 m ou 26,7 cm.

**EP7.** Temos:

$$\begin{aligned} F &= \frac{k \cdot Q \cdot Q}{d^2} \Rightarrow 3 \cdot 10^{-6} = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot Q \cdot Q}{(3 \cdot 10^{-2})^2} \Rightarrow \\ \Rightarrow Q^2 &= 3 \cdot 10^{-19} \text{ C}^2 \end{aligned}$$

$$F_{AB} = \frac{k \cdot Q^2}{d^2} = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 3 \cdot 10^{-19}}{(1 \cdot 10^{-2})^2} \Rightarrow F_{AB} = 27 \cdot 10^{-6} \text{ N}$$

$$\therefore F_{\text{resultante}} = 27 \cdot 10^{-6} - 3 \cdot 10^{-6} \Rightarrow F_{\text{resultante}} = 24 \cdot 10^{-6} \text{ N}$$

Alternativa correta:  $d$

**EP8.** São dados:

$$Q = 10 \mu\text{C} = 10^{-5} \text{ C}; m_q = 0,2 \text{ g} =$$

$$= 2 \cdot 10^{-4} \text{ kg}; q = 8 \text{ nC} = 8 \cdot 10^{-9} \text{ C}.$$

Neste caso, há um equilíbrio entre a força elétrica e o peso da esfera:

$$F = P$$

$$k \cdot \frac{Q \cdot q}{h^2} = m \cdot g$$

$$9 \cdot 10^9 \cdot \frac{10^{-5} \cdot 8 \cdot 10^{-9}}{h^2} = 2 \cdot 10^{-4} \cdot 10 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow h = \pm 0,6 \text{ (o valor negativo não convém)}$$

$$\therefore h = 0,6 \text{ m}$$

### EP9.

a) A carga  $q$  deve ser negativa, pois as cargas  $Q$  são positivas e se repelem entre si. Então,  $q$  negativo proporciona o equilíbrio.

b) Considerando, por exemplo, a esfera  $A$  (que está em equilíbrio), temos:

$$F_{BA} = F_{CA}$$

$$k \cdot \frac{|Q_B| \cdot |Q_A|}{x^2} = k \cdot \frac{|Q_C| \cdot |Q_A|}{(2x)^2}$$

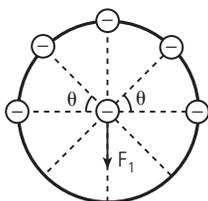
$$\frac{|Q_B|}{x^2} = \frac{|Q_C|}{4x^2} \Rightarrow \frac{|q|}{x^2} = \frac{Q}{4x^2} \Rightarrow \frac{Q}{|q|} = \frac{4x^2}{x^2} = 4$$

Mas, como  $q$  é negativo, temos a razão  $\frac{Q}{q}$  negativa.

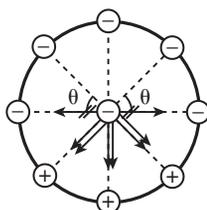
$$\text{Logo: } \frac{Q}{q} = -4$$

**EP10.** Todas as cargas dispostas sobre o anel têm mesma intensidade (em módulo). Na situação I, a carga de prova no centro do anel e as cargas dispostas no anel são repelidas, pois são negativas. A direção e o sentido dessas forças estão representados na figura ao lado.

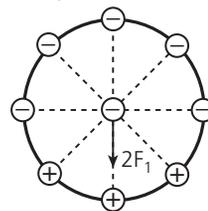
As forças na horizontal se anulam (pois têm mesma intensidade e sentidos opostos), e a resultante das outras três forças pode ser esquematizada da seguinte forma:



Se outras três cargas de mesmo módulo e positivas forem acrescentadas sobre o anel, elas irão atrair a carga de prova no centro do anel. Essas forças de atração são representadas na figura ao lado:



Como todas as forças têm o mesmo módulo, a força resultante final será representada da seguinte forma:



Alternativa correta: e

## Atividade prática (p. 34)

### Estimando a carga eletrizada pela força elétrica

Esta é uma experiência em que os estudantes estimarão a quantidade de elétrons em um canudo atritado. Pode ser realizada em grupos e necessitará de cuidados técnicos para sua boa execução.

Usaremos as seguintes aproximações: a constante eletrostática será a do vácuo, a carga considerada será a carga média e desprezaremos o efeito do empuxo do ar no canudo.

A distância  $d$  entre os canudos pode ser medida com mais precisão se essa medição for indireta: afixar um papel milimetrado, ou outra escala qualquer, na parede atrás dos fios, onde está apoiado o conjunto.

Isso tem a vantagem de evitar a manipulação dos canudos eletrizados, o que provocaria movimentação das cargas neles.

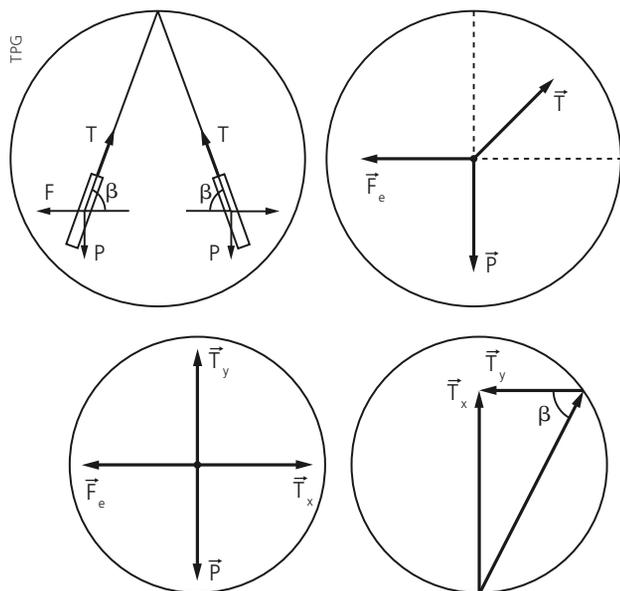
Veja os comentários para os itens do tópico *Discussão*:

1. Resposta pessoal.  
Espera-se que os estudantes verifiquem que os canudos se afastam.
2. Os canudos ganharam elétrons do papel-toalha.
3. Resposta pessoal.

Professor, como os estudantes já viram eletrização, espera-se que respondam que, ao atritar os dois canudos, damos-lhes elétrons, e como ambos ficam com a mesma carga, se repelem. É importante você associar essa repulsão à força elétrica, objeto de estudo do capítulo.

4. Força peso, força elétrica e tração.
5. Sim, em equilíbrio estático, pois não há movimento.
6. Espera-se que os estudantes façam um esquema de equilíbrio de forças com a força elétrica, a tração no fio e a força peso. Se não houver balança, estime a massa do canudo pela quantidade e pelo peso informados na embalagem (ela varia entre 4 g e 10 g). A distância deve ser medida no ponto médio dos canudos. Um desenvolvimento possível é mos-

trado a seguir; nele consideramos a distância como 10 cm e a massa como 10 g:



$$\vec{P} + \vec{F}_e + \vec{T} = 0$$

Equilíbrio no eixo  $y$ :  $P = T_y$

Conhecido  $T_y$ , pelo ângulo  $\beta$  é possível obter  $T_x$ :

$$\text{tg } \beta = \frac{T_x}{T_y}$$

Finalmente, temos também o equilíbrio no eixo  $x$ :

$$F_e = T_x$$

$$\frac{K \cdot Q^2}{d^2} = T_x \Rightarrow Q = d \cdot \sqrt{\frac{T_x}{K}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow Q = 10^{-1} \cdot \sqrt{\frac{3,2 \cdot 10^{-1}}{9 \cdot 10^9}} \Rightarrow Q \cong 0,6 \cdot 10^{-6} \text{ C}$$

7. Usando a relação  $Q = n \cdot e$ , obtemos  
 $n \cong 3,75 \cdot 10^{12}$  elétrons.

## Outras palavras (p. 37)

### Lei de Coulomb e Lei da Gravitação Universal

1. As forças são a gravitacional e a elétrica. As outras forças elementares existentes são a nuclear forte e a nuclear fraca.
2. A força eletrostática está relacionada com a quantidade de elétrons, enquanto a gravitacional está relacionada com a massa. Dessa forma, na força gravitacional é necessário massa em grande quantidade para que existam grandes forças. Já na força eletrostática, o valor da massa é desprezível e o que importa é a quantidade de cargas elétricas.

3. Isaac Newton e Charles Coulomb.
4. A relação é entre a máquina ser grande e o fato de ela ser sensível. Essa ideia vem do fato de imaginarmos que máquinas sensíveis são extremas (muito grandes ou muito pequenas). Nesse caso, foi feita grande. Um exemplo de máquina grande e sensível é o LHC.

## Atividade sugerida

### O motor eletrostático

A atividade consiste na construção e observação do funcionamento de um motor eletrostático, na utilização da tela de um televisor de tubo para a captação dessa forma de energia. Para a construção, serão necessários os seguintes materiais: papel-alumínio, uma TV de tubo, fita adesiva, fio, caneta hidrográfica, tampa de embalagem de papelão, duas latinhas de alumínio, clipe de papel e copo plástico.

Para a captação da energia eletrostática, recorta-se papel-alumínio nas dimensões para cobrir a tela de um televisor, de modo que sobrem uns 2 cm de margem e as bordas devem ser arredondadas. O papel-alumínio é preso com fita adesiva ao televisor e um fio é preso a um clipe de papel que, por sua vez, deve ser preso ao papel-alumínio com a fita.

O motor consiste em colar duas latas de refrigerante e uma caneta hidrográfica (com a ponta para cima) sobre uma base isolante, por exemplo, uma tampa de embalagem de pizza. Cada latinha deve ter sua pintura desgastada, expondo o alumínio em dois pontos: em um deles é preso um clipe de papel aberto e, no outro, o fio.

Sobre a caneta hidrográfica será colocado o rotor, que consiste em um copo plástico revestido de papel-alumínio na sua superfície externa, com exceção de dois feixes opostos verticais. Como o copo irá rotacionar, aconselha-se colar em seu interior, no eixo de rotação, algo como uma tampa de caneta hidrográfica cortada.



Cristina Xavier

Montado o arranjo, os cliques das latinhas devem ficar próximos do copo plástico, mas sem encostar, e, em relação aos fios, um deve ser conectado ao televisor para receber a energia e o outro aterrado, como numa torneira ou metal.

Ligando e desligando o televisor, o motor gira. Discuta o fenômeno com os estudantes, orientando-se pelas seguintes questões:

1. Por que foi necessário cobrir a televisão com papel-alumínio?

*Resposta possível: Porque o papel-alumínio é feito de um condutor de elétrons, assim pode transmiti-los ao fio.*

2. Que caminho os elétrons percorrem a partir da televisão?

*Resposta possível: Partem da televisão pelo fio, atingem a primeira latinha, seguem pelo clipe de papel até o copo plástico, migram para a outra lata e são aterrados.*

3. Por que os elétrons podem mover o copinho plástico?

*Resposta possível: Porque, quando os elétrons saem pelo clipe e vão para o copo, ocorre uma força de repulsão entre aquele pedaço de papel-alumínio e a lata, que o faz girar. O pedaço de metal, ao se aproximar do clipe da outra lata, descarrega-se por meio dela.*

## Capítulo 3 Campo elétrico

Professor, antes de iniciar a resolução do ER4, pergunte aos estudantes onde eles imaginam que esteja esse ponto. Sugira, por exemplo: está no ponto médio do segmento AB? Mais para a direita, mais para a esquerda? Em geral, há um consenso de que o ponto procurado deve estar mais próximo da carga de menor intensidade; explique que, por esse motivo, é conveniente atribuir a incógnita  $x$  para a distância do ponto procurado até o ponto onde esteja a partícula com a menor carga.

Depois de finalizar a resolução, pergunte aos estudantes se a solução está de acordo com as hipóteses levantadas. Pode ter havido a expectativa de que o ponto procurado estivesse ao dobro da distância de  $B$  em relação à distância de  $A$ ; isto não ocorre porque a relação entre as cargas é diferente da relação entre as distâncias. Depois, pergunte se este ponto, considerando as três dimensões do espaço, é único (no caso, é). Para incentivar a discussão, faça um desenho representando as cargas e o ponto  $P$  em um sistema de três eixos coordenados  $x, y, z$ . Pergunte, por exemplo: existe algum ponto  $Q$  do plano  $xy$  tal que o campo resultante, devido às duas cargas, seja nulo? Supondo que exista um ponto  $Q$  nestas condições, como seriam os vetores do campo elétrico devidos às cargas  $A$  e  $B$ ? Poderíamos repetir a resolução do problema usando a igualdade  $E_A = E_B$ ?

### Atividade introdutória

#### O conceito e a realidade do campo

Os campos possuem características próprias e, de certa forma, sua realidade é contestada recorrendo-se ao argumento de que se trata apenas de uma ferramenta matemática. A atividade utiliza trechos de um capítulo sobre a ontologia do Eletromagnetismo de Osvaldo Pessoa Jr. para discutir critérios de realidade e as características do campo elétrico, com o objetivo de auxiliar no entendimento do seu conceito. É possível também apresentar o texto como complementação ao texto do "Outras palavras". O campo é intangível, mas tem uma existência real.

A atividade consiste na leitura dos trechos que se seguem e uma posterior discussão com a turma, para a qual propomos algumas questões orientadoras.

- 1) Critérios para estabelecer o que é Real

[...]

O que é real? O protótipo de um objeto inanimado real é uma pedra. Ela é dura, colorida, tem até gosto, continua igual mesmo que eu a jogue, tem uma forma tridimensional que é consistente com todas as imagens formadas de diferentes perspectivas, é facilmente concebida e representada pela minha mente, posso lhe dar um nome, se alguém a atirar em mim eu sentirei dor, e se eu jogá-la contra uma vidraça terei o poder de causar a quebra desta.

Podemos extrair desta caracterização quatro critérios para decidir se um objeto é real ou não. Tais critérios não são necessariamente exaustivos, e podem não ser independentes, mas servirão como um ponto de partida para discutir se determinado objeto, como um arco-íris, uma sombra, um *quark*, uma partícula virtual, o espaço-tempo curvo ou a onda de probabilidade quântica, é real. Quando consideramos um objeto real, ele costuma ser:

- 1) *Observável*. Se observamos algo, temos boa confiança de que ele existe. Há porém ilusões, como lampejos de luz quando batemos a cabeça, algumas pessoas têm alucinações, e há objetos visíveis que interpretamos como sendo distintos do que são, como as aparições de discos voadores nos céus. O sentido do tato parece ter mais importância na determinação de que algo é real. Vemos um arco-íris mas não conseguimos pegá-lo: será que ele é real? Quando todo mundo observa o mesmo objeto, há mais razões para considerarmos que o objeto é real, mas mesmo observações privadas, como o lampejo ilusório ou uma dor no calcanhar, são indícios de um evento real em nosso corpo.
- 2) *Invariante*. Ao tratar de entidades inobserváveis, o critério de invariância adquire muita importância. Aquilo que permanece constante ante transformações de coordenadas ou de perspectivas costuma ser considerado real. [...]
- 3) *Concebível*. Outro critério importante para aceitarmos que um conceito corresponda a algo real é que ele possa ser representado de maneira não problemática em uma teoria. [...] Na física, podemos aceitar que a energia cinética de uma bala atirada seja real porque o correspondente termo teórico (“energia cinética”) está presente em leis científicas bem confirmadas e aceitas. [...]
- 4) *Causalmente potente*. Se um objeto apresenta “poderes causais”, isso aumenta nossa crença em sua realidade. Se uma bruxa consegue lançar um encantamento e incendiar uma árvore, passamos a levar seriamente que seu encantamento é real. Em discussões sobre a realidade do mental (como sendo distinto do corporal ou cerebral), às vezes utiliza-se o argumento de que seriam os estados mentais (e não prioritariamente os correspondentes estados cerebrais) que causaram nossas ações, de forma que tais estados seriam reais (e não meros “epifenômenos” do cerebral). Na psicanálise, pode-se defender a realidade do inconsciente a partir de seus efeitos em nosso comportamento. Em filosofia da biologia, discute-se qual é o “nível de seleção” que tem realidade (o gene, o indivíduo ou o grupo) a partir de seu poder causal.

[...]

## 2) Ação por Contato e Localidade Espaço-Temporal

Quando falamos em um “campo” na física, como o campo elétrico ou o campo gravitacional, pensamos em uma função matemática geralmente definida em todos os pontos do espaço e do tempo, como a função vetorial que define campo elétrico:  $E(r, t)$ . Atribuímos realidade para esse campo porque se no instante  $t$  colocarmos uma carga  $q$  de massa  $m$  no ponto  $r$ , concebemos que este campo *causa* uma aceleração  $a$ , cujo valor medido será tal que  $F = ma = q E(r, t)$ . Com a postulação desta entidade real, distribuída pelo espaço mesmo em regiões evacuadas (ou seja, sem matéria, salvo pela presença do vácuo quântico), obtemos uma descrição segundo a qual o movimento da carga é causado por uma entidade, o campo, presente *localmente* em torno do ponto  $r$ , no instante  $t$ .

É verdade que o campo em torno do ponto é gerado por cargas presentes em outras regiões, mas a “causa próxima” do movimento da carga seria o campo local, e não as entidades localizadas à distância. Qualquer alteração nas cargas que originam o campo é propagada a uma velocidade finita através do campo, de vizinho em vizinho, no que é chamado de ação por contato (ou por contiguidade).

Tomemos o exemplo da gravidade. Depois do trabalho de Newton, o consenso entre os cientistas era que a gravidade age à distância, instantaneamente. Por exemplo, imagine que o nosso Sol sumisse subitamente (ou que um poderoso demônio o jogasse para longe com uma aceleração imensa). No séc. XVIII, a previsão seria de que a Terra sentiria instantaneamente a ausência do Sol. Este é um exemplo de violação de localidade espacial: a causa não seria espacialmente contígua ao efeito, mas estaria localizada à distância.

No séc. XX, porém, a teoria da relatividade geral concluiu que a velocidade de propagação de efeitos no campo gravitacional é igual à velocidade da luz no vácuo. No exemplo do sumiço do Sol, demoraria 8 minutos (mais  $19 \pm 8$  s) para que a Terra sentisse o baque. Este caso satisfaz a localidade espaço-temporal: a causa primeira (a alteração no Sol) provoca um efeito em uma região contígua, tanto no espaço quanto no tempo, e este efeito torna-se a causa local de outro efeito contíguo, e assim por diante, até a cadeia causal gerar um efeito na Terra. Este é o relato fornecido por uma teoria de campo, no caso o campo gravitacional relativístico.

A ação à distância gravitacional que consideramos anteriormente, na visão da física clássica, ocorreria de maneira instantânea. Isso corresponde a uma violação da localidade espacial, mas não da “localidade temporal”, pois a causa (o sumiço do Sol) ocorreria imediatamente antes do efeito (o baque na Terra). Seria possível considerar uma ação à distância que ocorresse não de maneira instantânea, mas de maneira retardada: o sumiço do Sol causaria o baque na Terra, 8 minutos depois, mas sem que a causa se propagasse por contato. Em termos observacionais, esta situação seria indistinguível da ação por contato mediada por um campo real, mas a diferença é que neste caso não haveria um campo mediador, e teríamos uma ação à distância retardada. [...]

### 3. Definição e Interpretações de Campo

[...] De maneira simplificada, podemos dizer que um campo (em sentido estrito) reúne três características:

- Seria definido em todos (ou quase todos) os pontos do espaço e do tempo de uma determinada região, mesmo na ausência de matéria, correspondendo assim a uma entidade real “espalhada”, e podendo ser associada a uma energia potencial.
- Em geral, tem um caráter meio abstrato ou fantasmagórico, pois não é diretamente observável (sua existência é inferida dos efeitos que causa), podendo ser caracterizado como uma “potencialidade” no sentido aristotélico [...].
- Os efeitos se propagam a uma velocidade finita, numa ação por contato. Isso é também expresso pela noção de localidade espaço-temporal.

A Ontologia do Eletromagnetismo. Disponível em: <www.fflch.usp.br/df/opessoa/FiFi-14-Cap19.pdf> Acesso em: 27 maio 2016.

Após a leitura:

- Dê exemplo de algo que seja real e justifique sua realidade a partir dos parâmetros descritos no texto.  
*Resposta possível: A maçã é real porque é diretamente observável pela visão, pode ser tomada como invariante nos movimentos (se não for partida, esmagada ou não apresentar velocidades relativísticas), é concebível no interior de uma teoria (sua constituição e movimentos) e, devido a sua massa, é causalmente potente.*
- Explique pela leitura o que é o campo elétrico.  
*Resposta possível: É algo que produz uma aceleração numa partícula eletrizada, cuja intensidade é diretamente proporcional ao valor da carga e inversamente proporcional à massa da partícula. Não é diretamente observável, representando uma potencialidade, e se espalha por todo o espaço-tempo.*
- Através do conceito de ação local, explique de que forma o movimento de uma partícula eletrizada é causado pelo campo elétrico e não pela presença de outra partícula carregada.  
*Resposta possível: Se um “demônio” retirasse a partícula carregada que originou determinado campo elétrico, a outra partícula eletrizada, sob ação do campo, não sentiria instantaneamente o ocorrido, porque é através do campo que é percebida a ação da outra carga.*
- Relacione os critérios de realidade com as características do campo elétrico e justifique.  
*Resposta possível: A causalidade do campo é o que permite observá-lo; ele pode ser considerado um invariante e, com conceitos de atração e repulsão entre cargas elétricas e a força eletrostática, é conceitualmente concebível.*

## Resolução dos exercícios propostos (p. 48)

### EP1.

a) São dados:

$$q = 2 \mu\text{C} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ C};$$

$$E = 4 \cdot 10^5 \text{ N/C}.$$

O esquema vetorial é este:



Quando a carga é positiva, a força elétrica surge na mesma direção e com o mesmo sentido do vetor campo elétrico. E a intensidade dessa força é dada por:

$$F = q \cdot E = 2 \cdot 10^{-6} \text{ C} \cdot 4 \cdot 10^5 \text{ N/C} = 8 \cdot 10^{-1} \text{ N}$$

Portanto, a força elétrica tem as seguintes características:

$F = 0,8 \text{ N}$ , direção horizontal e sentido da esquerda para a direita.

b)  $F = m \cdot a \Rightarrow 0,8 = 0,001 \cdot a \Rightarrow a = 800 \text{ m/s}^2$

### EP2. São dados:

$$m = 10 \text{ g} = 0,01 \text{ kg}; E = 200 \text{ N/C}.$$

No equilíbrio, a força elétrica e o peso têm o mesmo módulo:

$$F = P$$

$$q \cdot E = m \cdot g$$

$$q \cdot 200 = 0,01 \cdot 10$$

$$\therefore q = 5 \cdot 10^{-4} \text{ C}$$

EP3. Pelo gráfico, quando a distância é  $d$ , o campo elétrico tem a intensidade de  $E = 8 \cdot 10^6 \text{ N/C}$ .

$$E = k \cdot \frac{|Q|}{d^2} = 8 \cdot 10^6$$

Então, para a nova distância  $2d$ , obtemos:

$$E' = k \cdot \frac{|Q|}{(2d)^2} = k \cdot \frac{|Q|}{4d^2} = \frac{E}{4}$$

$$\therefore E' = 2 \cdot 10^6 \text{ N/C}$$

Este resultado também pode ser obtido considerando que o módulo do campo elétrico é inversamente proporcional ao quadrado do valor da distância. Como a distância é dobrada, a intensidade do campo diminui para um quarto da inicial.

### EP4. Na figura:

$$d = 60 \text{ cm} = 0,6 \text{ m}.$$

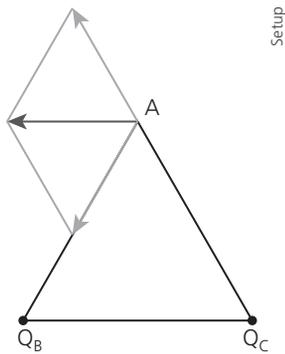
A carga é positiva, pois está conforme a convenção que mostra o vetor campo elétrico se afastando da carga.

O valor da carga é dado por:

$$E = k \cdot \frac{|Q|}{d^2} \Rightarrow 9 \cdot 10^5 = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{|Q|}{0,6^2}$$

$$\therefore Q = 3,6 \cdot 10^{-5} \text{ C} = +36 \mu\text{C}$$

**EP5.** Temos o seguinte esquema:



Pelo esquema vetorial, a resultante e as componentes têm a mesma intensidade, pois o triângulo é equilátero (as distâncias são iguais a 30 cm = 0,3 m) e os módulos das cargas são iguais ( $2 \mu\text{C} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ C}$ ). Então, basta calcularmos uma das intensidades do campo elétrico:

$$E = k \cdot \frac{|Q|}{d^2} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{2 \cdot 10^{-6}}{0,3^2} \Rightarrow E = 2 \cdot 10^5 \text{ N/C}$$

Assim, o vetor resultante do campo elétrico em A tem as seguintes características:

$E_A = 2 \cdot 10^5 \text{ N/C}$ , com direção horizontal e sentido da direita para a esquerda.

**EP6.** São dados:  $|Q_1| = |Q_2| = 3,6 \mu\text{C} = 3,6 \cdot 10^{-6} \text{ C}$ ;  $d = 60 \text{ cm} = 0,6 \text{ m}$ .

a) Pela lei de Coulomb, obtemos:

$$F = k_0 \cdot \frac{|Q_1| \cdot |Q_2|}{d^2} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{3,6 \cdot 10^{-6} \cdot 3,6 \cdot 10^{-6}}{0,6^2}$$

$$\therefore F = 0,324 \text{ N}$$

Essa força é de atração, pois as cargas têm sinais opostos.

b) No ponto médio, ambas as cargas contribuem com campos elétricos parciais de mesma direção (do segmento que une as esferas), mesmo sentido e mesma intensidade (pois têm cargas de módulos iguais e o ponto é médio, em que  $d = 0,3 \text{ m}$ ).

Calculando um desses componentes, obtemos:

$$E = k \cdot \frac{|Q|}{d^2} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{3,6 \cdot 10^{-6}}{0,3^2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow E = 3,6 \cdot 10^5 \text{ N/C}$$

Logo, a resultante é o dobro desse valor:

$$\therefore E_{\text{resultante}} = 7,2 \cdot 10^5 \text{ N/C}.$$

**EP7.** São dados:

$$d_1 = 20 \text{ cm} = 0,2 \text{ m}; d_2 = 30 \text{ cm} = 0,3 \text{ m};$$

$$E_1 = 9 \cdot 10^5 \text{ N/C}.$$

a) Calculando o valor da carga Q:

$$E_1 = k_0 \cdot \frac{|Q|}{d_1^2}$$

$$9 \cdot 10^5 = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{|Q|}{0,2^2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow Q = 4 \cdot 10^{-6} \text{ C} = 4 \mu\text{C}$$

b) O campo  $E_2$  gerado pela carga negativa vale:

$$E_2 = k_0 \cdot \frac{|Q|}{d_2^2} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{4 \cdot 10^{-6}}{0,3^2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow E_2 = 4 \cdot 10^5 \text{ N/C}$$

c) Aplicando a lei dos cossenos, com  $\theta = 120^\circ$  e  $\cos 120^\circ = -0,5$ , obtemos:

$$E^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2 \cdot E_1 \cdot E_2 \cdot \cos \theta \Rightarrow$$

$$\Rightarrow E^2 = (9 \cdot 10^5)^2 + (4 \cdot 10^5)^2 +$$

$$+ 2 \cdot (9 \cdot 10^5) \cdot (4 \cdot 10^5) \cdot (-0,5) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow E^2 = 81 \cdot 10^{10} + 16 \cdot 10^{10} - 36 \cdot 10^{10} = 61 \cdot 10^{10}$$

$$\therefore E \cong 7,8 \cdot 10^5 \text{ N/C}$$

**EP8.** São dados:

$$v_0 = 0; E = 4,5 \cdot 10^3 \text{ N/C}.$$

A força elétrica que atua no elétron vale:

$$F = q \cdot E = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 4,5 \cdot 10^3$$

$$F = 7,2 \cdot 10^{-16} \text{ N}$$

Então, pelo Princípio Fundamental da Dinâmica (2ª lei de Newton), obtemos:

$$F = m \cdot a$$

$$7,2 \cdot 10^{-16} = 9,0 \cdot 10^{-31} \cdot a$$

$$\therefore a = 8 \cdot 10^{14} \text{ m/s}^2$$

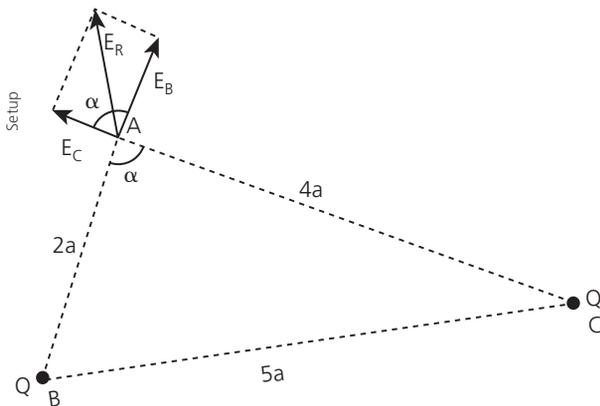
**EP9.**

a) Cada partícula cria um campo elétrico de mesma intensidade, mas de sentidos opostos.

b) Sim, está em equilíbrio instável, pois qualquer deslocamento fará com que a força resultante tenda a afastar a carga negativa de sua posição inicial.

c) O equilíbrio passa a ser estável, pois a força resultante que irá surgir sempre tenderá a empurrar a carga de volta ao ponto central do segmento de reta.

**EP10.** Vamos chamar de B a posição da carga distante  $2a$  de A e de C a posição da carga distante  $4a$  de A. Então,  $E_B$  corresponderá ao campo gerado pela carga Q a uma distância  $2a$  e  $E_C$ , ao campo gerado pela carga Q a uma distância  $4a$ . Assim, o esquema vetorial pode ser representado da seguinte forma:



No triângulo ABC, se  $\hat{BAC} = \alpha$ , então podemos determinar o  $\cos \alpha$  utilizando o teorema dos cossenos:

$$\overline{BC} = \overline{BA}^2 + \overline{CA}^2 - 2 \cdot \overline{BA} \cdot \overline{CA} \cdot \cos \alpha$$

$$(5a)^2 = (2a)^2 + (4a)^2 - 2 \cdot 2a \cdot 4a \cdot \cos \alpha$$

$$25a^2 = 4a^2 + 16a^2 - 16a^2 \cos \alpha$$

$$\cos \alpha = -\frac{5}{16}$$

Como  $E = k_0 \cdot \frac{|Q|}{d^2}$ , então temos que:

$$E_B = k_0 \cdot \frac{|Q|}{d_B^2} = k_0 \cdot \frac{Q}{4a^2}$$

$$E_C = k_0 \cdot \frac{|Q|}{d_C^2} = k_0 \cdot \frac{Q}{16a^2}$$

Se  $E = K_0 \cdot \frac{|Q|}{16a^2}$ , então  $E_C = E$  e  $E_B = 4E$ . Portanto, o campo resultante gerado pelas cargas B e C em A será:

$$E_R^2 = E_B^2 + E_C^2 + 2 \cdot E_B \cdot E_C \cdot \cos \alpha$$

$$E_R^2 = (4E)^2 + (E)^2 + 2 \cdot 4E \cdot E \cdot \left(-\frac{5}{16}\right)$$

$$\therefore E_R = E\sqrt{\frac{29}{2}}$$

Assim:

01) Incorreta.

02) Incorreta.

04) Incorreta.

08) Correta.

16) Incorreta, pois  $F = |q| \cdot E$

$$F_A = q \cdot E_A$$

$$\therefore F_A = q \cdot E\sqrt{\frac{29}{2}}$$

## Atividade prática (p. 46)

### Mapeando o campo elétrico

Esta atividade utilizará a eletrização para gerar objetos carregados com cargas diferentes e verificar o campo elétrico estabelecido entre os objetos. É preciso ter sempre em mente os modelos representativos dos campos elétricos de afastamento e aproximação. Sugere-se trabalhar em grupo.

A linha precisa ser suposta inextensível. Mesmo assim, deve-se ter o cuidado de evitar que a linha se enrole sobre si mesma para que o movimento oscilatório dessa torção não prejudique a observação desejada do fenômeno.

Na aproximação do canudo com o alumínio, o esperado é que o alumínio se mova, mas de forma aleatória diante do campo elétrico.

Quando o canudo encosta no alumínio, alguns dos elétrons carregados do canudo migram para o alumínio, e na ponta do alumínio a densidade de carga será maior, de forma a indicar um "vetor" de campo.

Ao aproximar o papel do alumínio, sem encostar nele, o papel está com carga positiva, e o vetor campo elétrico de afastamento forma uma linha de campo com o vetor campo elétrico de aproximação do alumínio.

Finalmente, quando o canudo se aproxima do papel-alumínio, sem encostar nele, está carregado com elétrons, seu campo é de aproximação, assim como o do alumínio, e por isso não se encontrarão.

Após realizar o procedimento, peça aos estudantes que discutam sobre as questões. Veja os comentários para os itens do tópico *Discussão*:

1. Canudo ganha elétrons (carga negativa) e papel perde elétrons (carga positiva).
2. A carga do alumínio é neutra, pois não há contato, mas as cargas se polarizam conforme o canudo se aproxima. A aproximação é aleatória, pois a distribuição da carga dependerá do lado que o canudo se aproxima.
3. Negativa. Eletrização por contato.
4. O papel está com carga positiva, o vetor campo elétrico de afastamento forma uma linha de campo com o vetor campo elétrico de aproximação do alumínio. O canudo está carregado com elétrons, seu campo é de aproximação, assim como o do alumínio, e por isso não se encontrarão.
5. Professor, a ideia aqui é levantar hipóteses para que os estudantes discutam a distribuição de carga. Por exemplo, de que na ponta do alumínio não

poderia haver carga, pois um elétron iria repelir o outro. O que faz o alumínio virar um ponteiro é a relação carga-massa no alumínio. Como a distribuição de massa não é uniforme, o lado mais suscetível ao campo é a ponta, pois tem menor massa e carga igual.

## Outras palavras (p. 47)

### O campo elétrico como uma função vetorial de ponto

Uma possível resposta: qualquer partícula carregada colocada sobre a reta  $\overline{AB}$ , à direita de A e a 0,41 m desta, estará em equilíbrio, porque o campo elétrico neste ponto é nulo. Note que esta resposta independe do sinal ou da intensidade da carga de prova. Há outras situações em que uma carga negativa sofreria forças de modo a voltar para esta posição – qualquer ponto sobre um plano perpendicular à reta  $\overline{AB}$  e a 0,41 m de A.

# Capítulo 4 Potencial elétrico

## Atividade introdutória

### Paralelos entre Eletrostática e Mecânica

Esta atividade pode ser usada nos capítulos 4 e 5 e consiste em sistematizar conceitos da Eletrostática em analogia aos da Mecânica. Contribui para que a Mecânica seja lembrada pelos estudantes, já que foi estudada anteriormente, auxiliando-os a organizar dois quadros conceituais num mesmo panorama.

Sugerimos que os estudantes completem a tabela a seguir, identificando as grandezas, seus símbolos e as relações matemáticas da Eletrostática e da Mecânica, partindo da analogia. Se necessário, oriente os estudantes a consultarem o livro. No modelo que se segue, as respostas estão diferenciadas dos dados, que devem ser oferecidos aos estudantes, pelos sombreados. Nessa tabela,  $\vec{r}$  é um vetor unitário, que indica direção do campo.

1. Compare os conceitos da Eletrostática com os da Mecânica e complete esta tabela:

Grandeza	Eletrostática			Mecânica		
	Símbolo	Relação matemática	Unidade de medida	Símbolo	Relação matemática	Unidade de medida
Força	$\vec{F}_{el}$	$q \cdot \vec{E}$	N	$\vec{P}$	$m \cdot \vec{g}$	N
Campo (na direção $\vec{r}$ )	$\vec{E}$	$\frac{k_0 \cdot Q}{d^2} \vec{r}$	N/C	$\vec{g}$	$\frac{G \cdot M}{d^2} \vec{r}$	N/kg
Energia potencial	$E_p$	$\frac{k_0 \cdot Q \cdot q}{d}$	J	$E_p$	$\frac{G \cdot M \cdot m}{d}$	J
Trabalho da força	$\tau$	$q \cdot E \cdot d$	J	$\tau$	$m \cdot g \cdot d$	J

2. Quais são as diferenças nas grandezas fundamentais estudadas na Eletrostática e na Mecânica? Com relação aos campos elétrico e gravitacional, cite a diferença quanto ao tipo de interação.

*Resposta possível: A diferença reside no fato de que a Eletrostática tem o enfoque nas cargas elétricas, enquanto a Mecânica tem a massa como uma das grandezas fundamentais. Nas interações elétricas temos atração e repulsão, mas a interação gravitacional é apenas atrativa.*

## Resolução dos exercícios propostos (p. 58)

### EP1.

- a) Como a carga negativa é atraída, seu movimento espontâneo será no sentido de se aproximar da carga positiva. Portanto, irá para o potencial do ponto  $D$ .
- b) Os pontos  $A$  e  $F$  estão na mesma linha equipotencial, portanto a ddp é nula.
- c) É igual. Os pontos  $B$  e  $C$  estão na mesma linha equipotencial.

### EP2.

- a) A partícula deve ser posicionada num local onde haja um potencial elétrico adequado para isso.
- b) São dados:  $E_p = 3 \cdot 10^{-5} \text{ J}$ ;  $V = -6 \text{ V}$ .

Calculamos a quantidade de carga  $q$  através da relação:  $V = \frac{E_p}{q}$ . Então:

$$-6 = \frac{3 \cdot 10^{-5}}{q} \Rightarrow q = -5 \cdot 10^{-6} \text{ C} = -5 \mu\text{C}$$

### EP3.

- a) No ponto  $A$ , temos  $V_A = 7,2 \cdot 10^4 \text{ V}$  e  $d_A = 1 \text{ m}$ .  
O potencial elétrico é dado por:  $V_A = k_0 \cdot \frac{Q}{d_A}$ . Logo:  
 $7,2 \cdot 10^4 = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{Q}{1}$   
 $\therefore Q = +8 \cdot 10^{-6} \text{ C}$
- b) No ponto  $B$ , a distância correspondente é  $d_B = 3 \text{ m}$ .  
Então:  
 $V_B = k_0 \cdot \frac{Q}{d_B} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{8 \cdot 10^{-6}}{3}$   
 $\therefore V_B = +2,4 \cdot 10^4 \text{ V}$
- c) A ddp entre os pontos  $A$  e  $B$  é:  
 $U_{AB} = V_A - V_B = 7,2 \cdot 10^4 \text{ V} - 2,4 \cdot 10^4 \text{ V} = +4,8 \cdot 10^4 \text{ V}$

**EP4.** Inicialmente, lembramos que o potencial elétrico é uma grandeza escalar.

- a) No terceiro vértice, o potencial resultante é a soma algébrica (escalar) de  $V_1$  com  $V_2$ , sendo:

$$V_1 = k_0 \cdot \frac{Q_1}{d_1} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{3 \cdot 10^{-6}}{1}$$

$$V_1 = 27 \cdot 10^3 \text{ V}; \text{ e}$$

$$V_2 = k_0 \cdot \frac{Q_2}{d_2} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{-2 \cdot 10^{-6}}{1}$$

$$V_2 = -18 \cdot 10^3 \text{ V}$$

Portanto:

$$V_{\text{res}} = V_1 + V_2 = 27 \cdot 10^3 \text{ V} + (-18 \cdot 10^3 \text{ V}) = +9 \cdot 10^3 \text{ V}$$

- b) O ponto em questão fica a  $d'_1 = d$  e  $d'_2 = (1 - d)$ , em metros.

Então, temos:

$$V'_{\text{res}} = V'_1 + V'_2 = 0$$

$$k_0 \cdot \frac{Q_1}{d'_1} + k_0 \cdot \frac{Q_2}{d'_2} = 0$$

$$9 \cdot 10^9 \cdot \frac{3 \cdot 10^{-6}}{d} + 9 \cdot 10^9 \cdot \left( \frac{-2 \cdot 10^{-6}}{1 - d} \right) = 0$$

$$9 \cdot 10^9 \cdot \frac{3 \cdot 10^{-6}}{d} = 9 \cdot 10^9 \cdot \left( \frac{+2 \cdot 10^{-6}}{1 - d} \right)$$

$$\frac{3}{d} = \frac{2}{1 - d}$$

$$2d = 3 - 3d$$

$$\therefore d = 0,6 \text{ m}$$

- c) Conforme o enunciado, sendo  $x + y = 1,2$  ou  $x = 1,2 - y$ , com as medidas em metros, o potencial será nulo se:

$$k_0 \cdot \frac{Q_1}{x} + k_0 \cdot \frac{Q_2}{y} = 0$$

$$9 \cdot 10^9 \cdot \frac{3 \cdot 10^{-6}}{x} + 9 \cdot 10^9 \cdot \left( \frac{-2 \cdot 10^{-6}}{y} \right) = 0$$

$$9 \cdot 10^9 \cdot \frac{3 \cdot 10^{-6}}{x} = 9 \cdot 10^9 \cdot \left( \frac{+2 \cdot 10^{-6}}{y} \right)$$

$$\frac{3}{x} = \frac{2}{1,2 - y}$$

$$\frac{3}{1,2 - y} = \frac{2}{y}$$

$$3y = 2,4 - 2y$$

$$5y = 2,4 \Rightarrow y = 0,48 \text{ m}$$

$$\therefore x = 1,2 \text{ m} - 0,48 \text{ m} = 0,72 \text{ m}$$

**EP5.** São dados:

$$Q_A = 2Q_B; d = 30 \text{ cm} = 0,3 \text{ m};$$

$$F_{AB} = 1,8 \text{ N}.$$

a) Pela lei de Coulomb, obtemos:

$$F_{AB} = k_0 \cdot \frac{|Q_A| \cdot |Q_B|}{d^2}$$

$$1,8 = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{2Q_B \cdot Q_B}{0,3^2}$$

$$\therefore Q_B = +3 \cdot 10^{-6} \text{ C}; \text{ e } Q_A = +6 \cdot 10^{-6} \text{ C}$$

b) O ponto médio  $X$  dista  $d_x = 0,15 \text{ m}$  de cada carga. Logo:

$$V_x = V_A + V_B = k_0 \cdot \frac{Q_A}{d_x} + k_0 \cdot \frac{Q_B}{d_x}$$

$$V_x = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{6 \cdot 10^{-6}}{0,15} + 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{3 \cdot 10^{-6}}{0,15}$$

$$\therefore V_x = +5,4 \cdot 10^5 \text{ V}$$

#### EP6.

- a) O sinal da carga é negativo. O sinal do potencial elétrico é determinado apenas pelo sinal da carga  $Q$ . No diagrama, a curva se encontra na parte negativa do eixo dos potenciais.
- b) É a superfície representada pela letra  $B$ . O valor do potencial é maior de acordo com o gráfico. Fisicamente, a superfície  $B$  está mais afastada da carga negativa  $Q$  do que a superfície  $A$ . Para cargas negativas, quanto maior for a distância,

maior o potencial (que é negativo). No infinito, será nulo.

## Outras palavras (p. 54)

### Gerador de Van de Graaff

1. Os elétrons no interior da cúpula se repelem mutuamente, dirigindo-se para a superfície exterior da cúpula condutora.
2. A carga estática sempre fica por fora da superfície externa de qualquer condutor. Isso mantém o interior descarregado e capaz de receber mais elétrons trazidos pela esteira.
3. Até que o potencial negativo da cúpula fique maior que o da fonte na parte inferior do aparelho, que é da ordem de milhões de volts.
4. O choque (fisiológico) é a resposta do nosso corpo à movimentação de cargas elétricas. As cargas dependem de um meio para se movimentar e tendem a se repelir. Se existir uma diferença de potencial entre dois pontos distintos, haverá uma movimentação de cargas elétricas, do menor para o maior potencial, para cargas negativas, e do maior para o menor potencial, para cargas positivas.

## Capítulo 5

## Trabalho da força elétrica

### Atividade introdutória

Utilizando a atividade introdutória do capítulo 4, sugerimos que seja debatido com os estudantes o que é e como se dá o trabalho da força gravitacional. É importante incentivar os estudantes a anotarem o que acharem mais importante.

Utilizando a mesma ideia de fazer analogias, peça aos estudantes que, utilizando aquilo que anotaram sobre o trabalho da força gravitacional, façam um paralelo entre ela e o trabalho da força elétrica.

### Resolução dos exercícios propostos (p. 67)

#### EP1.

a) Nesse trajeto de  $A$  para  $B$ , o trabalho realizado é nulo. Não há diferença de potencial elétrico entre esses pontos, pois estão na mesma equipotencial.

b) De acordo com a figura, temos:  $V_A = 100 \text{ V}$ ;  $V_C = 50 \text{ V}$ .

Então, o trabalho realizado no deslocamento de  $Q = 5 \mu\text{C} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ C}$ , de  $A$  para  $C$ , é dado por:

$$\tau_{AC} = Q \cdot (V_A - V_C)$$

$$\tau_{AC} = 5 \cdot 10^{-6} \cdot (100 - 50)$$

$$\therefore \tau_{AC} = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ J}$$

c) De  $A$  a  $D$  realiza-se o mesmo trabalho realizado de  $A$  a  $C$ , pois  $C$  e  $D$  são pontos de mesmo potencial elétrico:  $V_C = V_D = 50 \text{ V}$ .

$$\therefore \tau_{AD} = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ J}$$

d) O potencial em  $B$  é  $V_B = 100 \text{ V}$ . Logo:

$$\tau_{CB} = Q \cdot (V_C - V_B)$$

$$\tau_{CB} = 5 \cdot 10^{-6} \cdot (50 - 100)$$

$$\therefore \tau_{CB} = -2,5 \cdot 10^{-4} \text{ J}$$

**EP2.** É dada a carga  $Q = 10 \mu\text{C} = 1 \cdot 10^{-5} \text{ C}$ .

a) Sendo  $d_A = 0,6 \text{ m}$  e  $d_B = 1 \text{ m}$ , os potenciais solicitados são:

$$V_A = k \cdot \frac{Q}{d_A} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{1 \cdot 10^{-5}}{0,6} \Rightarrow V_A = 1,5 \cdot 10^5 \text{ V}$$

$$V_B = k \cdot \frac{Q}{d_B} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{1 \cdot 10^{-5}}{1} \Rightarrow V_B = 9,0 \cdot 10^4 \text{ V}$$

b) A ddp entre  $A$  e  $B$  é:

$$U_{AB} = V_A - V_B = 1,5 \cdot 10^5 \text{ V} - 9 \cdot 10^4 \text{ V} = 6,0 \cdot 10^4 \text{ V}$$

c) Dada a carga de prova  $q = 2 \mu\text{C} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ C}$ , as energias potenciais elétricas em  $A$  e  $B$  são:

$$E_{pA} = q \cdot V_A = 2 \cdot 10^{-6} \cdot 1,5 \cdot 10^5$$

$$\therefore E_{pA} = 3,0 \cdot 10^{-1} \text{ J ou } 0,3 \text{ J}$$

$$E_{pB} = q \cdot V_B = 2 \cdot 10^{-6} \cdot 9 \cdot 10^4$$

$$\therefore E_{pB} = 1,8 \cdot 10^{-1} \text{ J ou } 0,18 \text{ J}$$

d) De  $A$  para  $B$ , pois uma carga de prova, independentemente do seu sinal, move-se espontaneamente no sentido da diminuição da energia potencial elétrica.

Podemos também considerar que as cargas  $Q$  e  $q$  são positivas e se repelem entre si, de modo que a carga de prova ( $q$ ) se afaste de  $Q$ .

**EP3.** As distâncias, de acordo com a figura, são:

$$d_X = 20 \text{ cm} = 0,2 \text{ m}; d_Y = 30 \text{ cm} = 0,3 \text{ m}.$$

Os potenciais elétricos, devido à carga  $Q = 8 \mu\text{C} = 8 \cdot 10^{-6} \text{ C}$ , nos pontos  $X$  e  $Y$ , são:

$$V_X = k \cdot \frac{Q}{d_X} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{8 \cdot 10^{-6}}{0,2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_X = 3,6 \cdot 10^5 \text{ V}$$

$$V_Y = k \cdot \frac{Q}{d_Y} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{8 \cdot 10^{-6}}{0,3} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_Y = 2,4 \cdot 10^5 \text{ V}$$

Então, o trabalho elétrico realizado de  $Y$  para  $X$  é:

$$\tau_{YX} = q \cdot (V_Y - V_X)$$

$$\tau_{YX} = 2,5 \cdot 10^{-6} \cdot (2,4 \cdot 10^5 - 3,6 \cdot 10^5)$$

$$\therefore \tau_{YX} = -3 \cdot 10^{-1} \text{ J} = -0,3 \text{ J}$$

**EP4.** São dados:  $Q_A = -6 \text{ nC} = -6 \cdot 10^{-9} \text{ C}$ ;

$$Q_B = +8 \text{ nC} = 8 \cdot 10^{-9} \text{ C}; d_{AB} = 20 \text{ cm} = 0,2 \text{ m}.$$

a) O ponto médio  $C$  fica a  $d = 10 \text{ cm} = 0,1 \text{ m}$  de  $A$  e de  $B$ .

O potencial elétrico em  $C$  vale:

• devido à carga  $A$ :

$$V_{CA} = k \cdot \frac{Q_A}{d} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{-6 \cdot 10^{-9}}{0,1} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_{CA} = -540 \text{ V}$$

• devido à carga  $B$ :

$$V_{CB} = k \cdot \frac{Q_B}{d} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{8 \cdot 10^{-9}}{0,1} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_{CB} = 720 \text{ V}$$

• na soma (resultante) desses potenciais:

$$V_{C \text{ resultante}} = -540 \text{ V} + 720 \text{ V}$$

$$\therefore V_{C \text{ resultante}} = 180 \text{ V} = 1,8 \cdot 10^2 \text{ V}$$

b) O ponto  $D$  fica a  $d_{DA} = 12 \text{ cm} = 0,12 \text{ m}$  de  $A$  e a  $d_{DB} = 16 \text{ cm} = 0,16 \text{ m}$  de  $B$ .

O potencial elétrico em  $D$  vale:

• devido à carga  $A$ :

$$V_{DA} = k \cdot \frac{Q_A}{d_{DA}} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{-6 \cdot 10^{-9}}{0,12} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_{DA} = -450 \text{ V}$$

• devido à carga  $B$ :

$$V_{DB} = k \cdot \frac{Q_B}{d_{DB}} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{8 \cdot 10^{-9}}{0,16} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_{DB} = 450 \text{ V}$$

• na soma (resultante) desses potenciais:

$$V_{D \text{ resultante}} = -450 \text{ V} + 450 \text{ V}$$

$$\therefore V_{D \text{ resultante}} = 0 \text{ V}$$

c) Sendo  $q = 1 \text{ nC} = 1 \cdot 10^{-9} \text{ C}$ , o trabalho elétrico de  $C$  para  $D$  é:

$$\tau_{CD} = q \cdot (V_C - V_D)$$

$$\tau_{CD} = 1 \cdot 10^{-9} \cdot (180 - 0)$$

$$\therefore \tau_{CD} = 1,8 \cdot 10^{-7} \text{ J}$$

**EP5.** São dados:  $q = 5 \text{ nC} = 5 \cdot 10^{-9} \text{ C}$ ;  $E = 40 \text{ N/C}$ ;  $d = 60 \text{ cm} = 0,6 \text{ m}$ .

a) O trabalho é dado por:

$$\tau_{XY} = q \cdot E \cdot d$$

$$\tau_{XY} = 5 \cdot 10^{-9} \cdot 40 \cdot 0,6$$

$$\therefore \tau_{XY} = 1,2 \cdot 10^{-7} \text{ J}$$

b) A ddp entre  $X$  e  $Y$  é:

$$U_{XY} = E \cdot d$$

$$U_{XY} = 40 \cdot 0,6$$

$$\therefore U_{XY} = 24 \text{ V}$$

**EP6.** São dados:  $q = 4,5 \text{ nC} = 4,5 \cdot 10^{-9} \text{ C}$ ;  $m = 0,1 \text{ mg} = 1 \cdot 10^{-7} \text{ kg}$ ;  $v_0 = 0$ ;  $E = 50 \text{ N/C}$ ;

$$V_A = 400 \text{ V}; V_B = 300 \text{ V}.$$

a) Calculando o trabalho de  $A$  a  $B$ :

$$\tau_{AB} = q \cdot (V_A - V_B)$$

$$\tau_{AB} = 4,5 \cdot 10^{-9} \cdot (400 - 300)$$

$$\therefore \tau_{AB} = 4,5 \cdot 10^{-7} \text{ J}$$

- b) Aplicamos o teorema da energia cinética (TEC), sendo a energia cinética inicial nula (pois parte do repouso, no ponto A), e obtemos:

$$\tau = E_{CB} - E_{CA} = \frac{m \cdot v_B^2}{2} - 0$$

$$4,5 \cdot 10^{-7} = \frac{1 \cdot 10^{-7} \cdot v_B^2}{2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow v_B = 3,0 \text{ m/s}$$

- c) A distância  $d_{AB}$  é dada por:

$$\tau = q \cdot E \cdot d_{AB}$$

$$4,5 \cdot 10^{-7} = 4,5 \cdot 10^{-9} \cdot 50 \cdot d_{AB} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow d_{AB} = 2,0 \text{ m}$$

**EP7.** São dados:  $q = 5 \mu\text{C} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ C}$ ;  $V_A = 40 \text{ V}$ ;  $V_B = 20 \text{ V}$ ;  $d_{AB} = 5 \text{ cm} = 0,05 \text{ m}$ ;  $d_{BC} = 10 \text{ cm} = 0,1 \text{ m}$ .

- a) Calculando a intensidade do campo elétrico:

$$E = \frac{U}{d} = \frac{V_A - V_B}{d_{AB}} = \frac{40 - 20}{0,05} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow E = 400 \text{ V/m}$$

- b) O campo elétrico é uniforme, e assim podemos aplicar uma regra de três simples.

Como a cada 5 cm o potencial diminui em 20 V, então, para 10 cm, temos a diminuição de 40 V.

Logo, de  $V_B = 20 \text{ V}$  para  $V_C$  temos:

$$\therefore V_C = 20 \text{ V} - 40 \text{ V} = -20 \text{ V}$$

- c) Determinamos o trabalho de A para C por:

$$\tau_{AC} = q \cdot (V_A - V_C)$$

$$\tau_{AC} = 5 \cdot 10^{-6} \cdot [40 - (-20)]$$

$$\therefore \tau_{AC} = 3 \cdot 10^{-4} \text{ J}$$

Podemos também efetuar esse cálculo por:

$$\tau_{AC} = q \cdot E \cdot d_{AC}$$

$$\tau_{AC} = 5 \cdot 10^{-6} \cdot 400 \cdot 0,15$$

$$\therefore \tau_{AC} = 3 \cdot 10^{-4} \text{ J}$$

### EP8.

- 00) Verdadeira.

$$F = k_0 \cdot \frac{|Q_1| \cdot |Q_2|}{d^2}$$

$$F = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{50 \cdot 10^{-6} \cdot 8 \cdot 10^{-6}}{(0,2)^2}$$

$$\therefore F = 90 \text{ N}$$

- 11) Falsa.

$$E_1 = \frac{k_0 \cdot |Q_1|}{d^2}$$

$$E_1 = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{50 \cdot 10^{-6}}{(0,1)^2} = 4,5 \cdot 10^7$$

$$\text{Então, } E_1 = 4,5 \cdot 10^7 \text{ N/C.}$$

$$E_2 = \frac{k_0 \cdot |Q_2|}{d^2}$$

$$E_2 = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{8 \cdot 10^{-6}}{(0,1)^2} = 0,72 \cdot 10^7$$

$$\text{Então, } E_2 = 0,72 \cdot 10^7 \text{ N/C.}$$

$$\therefore E_{\text{res}} = 4,5 \cdot 10^7 + 0,72 \cdot 10^7 \Rightarrow E_{\text{res}} = 5,22 \cdot 10^7 \text{ N/C}$$

- 22) Falsa. O campo resultante não é nulo, pois  $E_1 \neq E_2$ .

$$E_1 = \frac{k_0 \cdot |Q_1|}{d^2} \Rightarrow E_1 = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{50 \cdot 10^{-6}}{(0,3)^2}$$

$$\therefore E_1 = 5 \cdot 10^6 \text{ N/C}$$

$$E_2 = \frac{k_0 \cdot |Q_2|}{d^2} \Rightarrow E_2 = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{8 \cdot 10^{-6}}{(0,1)^2}$$

$$\therefore E_2 = 7,2 \cdot 10^6 \text{ N/C}$$

- 33) Verdadeira.

$$V_1 = \frac{k_0 \cdot |Q_1|}{d}$$

$$V_1 = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{50 \cdot 10^{-6}}{(0,25)} \Rightarrow V_1 = 1,8 \cdot 10^6 \text{ V}$$

$$V_2 = \frac{k_0 \cdot |Q_2|}{d}$$

$$V_2 = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{8 \cdot 10^{-6}}{(0,15)} \Rightarrow V_2 = 0,48 \cdot 10^6 \text{ V}$$

$$\therefore V_p = V_1 - V_2 = 1,32 \cdot 10^6 \text{ V}$$

- 44) Verdadeira.

$$V_1 = \frac{k_0 \cdot |Q_1|}{d}$$

$$V_1 = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{50 \cdot 10^{-6}}{(0,1)} \Rightarrow V_1 = 4,5 \cdot 10^6 \text{ V}$$

$$V_2 = \frac{k_0 \cdot |Q_2|}{d}$$

$$V_2 = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{8 \cdot 10^{-6}}{(0,1)} \Rightarrow V_2 = 0,72 \cdot 10^6 \text{ V}$$

$$V_p = V_1 - V_2 = 3,78 \cdot 10^6 \text{ V}$$

$$\tau = q \cdot E \Rightarrow \tau = 1 \cdot 10^{-6} \cdot 3,78 \cdot 10^6$$

$$\therefore \tau = 3,78 \text{ J}$$

### EP9.

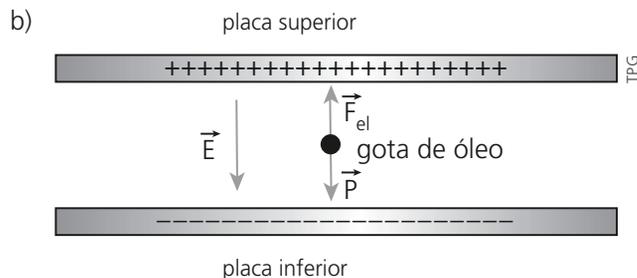
- a) Diretamente proporcional, pois  $\tau = q \cdot E \cdot d$ . Se E aumentar,  $\tau$  também vai aumentar na mesma proporção. O trabalho depende da interação proporcional que a partícula tem com o campo elétrico.

- b) Nenhuma diferença, pois a ddp entre A e B é a mesma entre A e C. Assim, a partícula sofre a mesma variação de energia potencial elétrica tanto num como noutro trajeto.

## Outras palavras (p. 65)

### O experimento de Millikan

1. Aproximadamente  $9 \cdot 10^{-31}$  kg.
2. O movimento browniano é o movimento aleatório de partículas macroscópicas num fluido como consequência dos choques entre as moléculas do fluido e as partículas.
3.
  - a)  $Q = n \cdot e$ , ou seja:  
 $4,8 \cdot 10^{-19} = n \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \Rightarrow n = 3$  elétrons



c)  $E \cdot d = U$ , ou seja:  $5 \cdot 10^5 \cdot 0,016 = U \Rightarrow$   
 $U = 8 \cdot 10^3$  V

## Capítulo 6 Condutores em equilíbrio eletrostático

### Atividade introdutória

#### Gaiola de Faraday

A atividade consiste na análise de um arranjo experimental que simula a gaiola de Faraday. O objetivo é mostrar e discutir que o campo elétrico no interior de um condutor é nulo.

Com uma tela de arame retangular, construa a superfície lateral de um cilindro e, usando fios desfiados de meias de náilon, prenda bolinhas de isopor nas partes interna e externa da tela de arame.

Atenção para o isolamento eletrostático do arranjo! Pode ser feito com um canudo grosso de refresco, sobre uma base de gesso, de modo a ter sustentação. Mas várias são as possibilidades de sustentar o cilindro. Caso seja realizada a atividade em grupos de estudantes, o canudo de refresco preso ao cilindro pode ser segurado por um estudante.

Para carregar o arranjo, pode ser usado o eletróforo, cuja construção é proposta como atividade prática do capítulo 1 do livro.

São propostas as seguintes perguntas após o trabalho de construção e investigação:

Segure o cilindro pelo canudo de modo que os pêndulos não fiquem inclinados e sem contato com qualquer objeto. Carregue o eletróforo e o encoste com cuidado na tela que forma o cilindro. O que aconteceu com os pêndulos? Por quê?

*Resposta possível: Os externos se inclinaram para fora e, com os de dentro, nada aconteceu. Quando o cilindro é eletrizado, carrega também as esferas de isopor de fora que, por ficarem com carga de mesmo sinal, repelem o cilindro. Em relação aos de dentro, parece que não foram carregados, talvez porque as cargas se distribuíram na parte externa do cilindro e nenhuma foi para o lado de dentro.*

Outras atividades podem complementar o estudo, como o fato de que carregar mais o cilindro faz as esferas de náilon ficarem mais afastadas da tela.

### Resolução dos exercícios propostos (p.77)

**EP1.** São dados:  $A = 0,8$  m<sup>2</sup>;  $\sigma = 10$   $\mu$ C/m<sup>2</sup>.

- a) Pela definição de densidade superficial, obtemos:

$$\sigma = \frac{Q}{A}$$

$$10 \mu\text{C/m}^2 = \frac{Q}{0,8 \text{ m}^2}$$

$$\therefore Q = 8 \mu\text{C} \text{ ou } 8 \cdot 10^{-6} \text{ C}$$

- b) Calculando o raio da esfera:

$$A = 4 \cdot \pi \cdot R^2$$

$$0,8 = 4 \cdot 3,14 \cdot R^2$$

$$\therefore R \cong 2,5 \cdot 10^{-1} \text{ m}$$

c) As intensidades solicitadas, à distância  $d = 2 \text{ m}$ , são:

$$\text{Campo elétrico: } E = k_0 \cdot \frac{|Q|}{d^2} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{8 \cdot 10^{-6}}{2^2}$$

$$\therefore E = 1,8 \cdot 10^4 \text{ V/m}$$

Potencial elétrico:

$$V = k_0 \cdot \frac{Q}{d} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{8 \cdot 10^{-6}}{2}$$

$$\therefore V = 3,6 \cdot 10^4 \text{ V}$$

**EP2.** São dados:

$$R = 30 \text{ cm} = 0,3 \text{ m}; n = 1,25 \cdot 10^{13} \text{ elétrons};$$

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}; d_A = 20 \text{ cm} = 0,2 \text{ m}; d_B = 30 \text{ cm} = 0,3 \text{ m}; d_C = 50 \text{ cm} = 0,5 \text{ m}.$$

A esfera está eletrizada negativamente (pois recebe elétrons) com a quantidade de:

$$Q = 1,25 \cdot 10^{13} \cdot (-1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}) = -2 \cdot 10^{-6} \text{ C}$$

O ponto  $A$ , a 20 cm do centro, é um ponto no interior da esfera condutora, onde o campo é nulo:  $E_A = 0$ .

O ponto  $B$  pertence à superfície esférica:

$$E_B = \frac{1}{2} \cdot k_0 \cdot \frac{|Q|}{R^2} = \frac{1}{2} \cdot 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{2 \cdot 10^{-6}}{0,3^2}$$

$$\therefore E_B = 1,0 \cdot 10^5 \text{ V/m}$$

O ponto  $C$  é externo à esfera:

$$E_C = k_0 \cdot \frac{|Q|}{d^2} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{2 \cdot 10^{-6}}{0,5^2}$$

$$\therefore E_C = 7,2 \cdot 10^4 \text{ V/m}$$

**EP3.** São dados:  $R = 20 \text{ cm} = 0,2 \text{ m}$ ;  $d_p = 80 \text{ cm} = 0,8 \text{ m}$ ;  $V_p = 4,5 \cdot 10^5 \text{ V}$ .

a) Podemos determinar  $Q$  a partir do potencial elétrico:

$$V = k_0 \cdot \frac{Q}{d}$$

$$4,5 \cdot 10^5 = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{Q}{0,8} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow Q = 4 \cdot 10^{-5} \text{ C}$$

b) O potencial elétrico na superfície (que é igual ao potencial interno) é:

$$V_{\text{superfície}} = k_0 \cdot \frac{Q}{R} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{4 \cdot 10^{-5}}{0,2}$$

$$\therefore V_{\text{superfície}} = 1,8 \cdot 10^6 \text{ V}$$

c) O campo elétrico na superfície da esfera é:

$$E_{\text{superfície}} = \frac{1}{2} \cdot k_0 \cdot \frac{|Q|}{R^2} = \frac{1}{2} \cdot 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{4 \cdot 10^{-5}}{0,2^2}$$

$$\therefore E_{\text{superfície}} = 4,5 \cdot 10^6 \text{ V/m}$$

**EP4.**

1. O pente fica eletricamente carregado por atrito e atrai a bolinha de isopor por indução.

2. Não. A indução é feita sobre a gaiola, isolando todo o seu interior (Princípio da gaiola de Faraday).
3. Sim, pois as cargas tendem a se posicionar na parte externa da gaiola, atraindo a bolinha de isopor.

## Outras palavras (p. 74)

### De autodidata a cientista

1. Dos vértices da gaiola.
2. Um eletroscópio.
3. Sim. Mesmo que caia um raio sobre o automóvel, ele se comportará como uma gaiola de Faraday — uma superfície metálica isolada —, ou seja, as cargas ficarão na parte externa e você estará em segurança no seu interior.
4. A Antiguidade deu muitas contribuições à Mecânica e à Óptica, mas o único registro de alguma observação em Eletricidade é o de Tales de Mileto. Os antigos já falavam sobre raios luminosos, reflexão e refração, espelhos e lentes; conheciam a alavanca, o plano inclinado e estática, com Arquimedes e outros. No século XVIII haviam sido descobertas todas as leis da Mecânica. Porém, as descobertas importantes da Eletricidade só ocorreram a partir do século XVIII.

## Atividade sugerida

### Pulga elétrica

A atividade objetiva discutir o poder das pontas mediante um arranjo simples, proposto pelo projeto RIPE e disponível *on-line*. Com a eletrização de um cano ou canudo, uma esfera de isopor — a pulga — fica presa. Aproximando uma agulha ou um alfinete da pulga, o que aparenta ser uma tentativa de matá-la, na verdade provoca a neutralização da região do isolante e a pulga salta para outra região, sendo atraída por regiões com mais cargas.

Para cada dupla ou grupo de estudantes, é entregue um arranjo constituído por: um canudo de refresco grosso ou um cano de PVC, papel higiênico para atritá-lo, uma agulha ou alfinete, um palito de madeira, um isolante sem ponta (borrachas escolares, por exemplo), um condutor sem ponta (brincos de metal ou suas taraxas) e uma pequena esfera de isopor, de diâmetro aproximadamente igual a 1 mm.

Pode-se, de início, deixá-los experimentar com os objetos sem ponta e, depois, grupo a grupo, entregar o objeto pontiagudo, observando a sua utilização. Pode-se orientar os estudantes para que fiquem de pé lado a

lado com seus canos e pulgas eletrizados e, um a um, façam a aproximação do objeto pontiagudo.

É proposta a seguinte questão:

Eletrize o cano ou canudo atritando-o com o papel higiênico, de modo que a pulga (esfera de isopor) fique presa. Tente “matá-la” aproximando vagarosamente a borracha, a tarraxa do brinco, o palito de madeira e a agulha, um objeto por vez. O que aconteceu, em cada caso, com a pulga? Justifique.

*Resposta possível: Com exceção da agulha, foi possível “matá-la” com todos os outros objetos. Nesse caso, durante a aproximação, a pulga saltou para uma posição mais eletrizada. A ponta da agulha, que é um condutor, contribuiu para descarregar as cargas da pulga, como um para-raios. Depois que a pulga for neutralizada, ela se deslocará para uma região do canudo com mais cargas.*

## Capítulo 7 Capacitor

### Atividade introdutória

Basicamente, capacitores são dispositivos que armazenam carga em um ponto do circuito. Sua construção é relativamente simples: um par de placas condutoras, chamadas armaduras, separadas por um dielétrico e carregadas com cargas de sinal contrário, nos mais diversos tamanhos e formatos. A função dos capacitores é fornecer energia a uma parte do circuito, ou servir como bloqueadores de corrente contínua. O capacitor se descarrega quando os terminais das placas são conectados ou quando o campo criado pela quantidade de carga acumulada ultrapassa a rigidez dielétrica do material. Nesse sentido, um raio pode ser entendido como a descarga de um capacitor, porque a rigidez dielétrica do ar foi ultrapassada.

Uma demonstração muito interessante (e, sem dúvida, perigosa) é a reprodução da garrafa de Leyden. Não é difícil construí-la com materiais de fácil aquisição e baixo custo. A página <<http://www.coe.ufrj.br/~acmq/leydenpt.html>> (acesso em: 22 fev. 2016) traz detalhes construtivos para a demonstração.

Outra demonstração muito interessante para quando os estudantes já conhecerem as associações de capacitores é a do tempo de carga e descarga, usando um LED (diodo emissor de luz) em um circuito simples. O instrumental está no artigo da revista *Scientia Plena*, editada pela Associação Sergipana de Ciência, disponível em: <[http://www.scientiaplena.org.br/sp/article/view/564/216v1n1p38\\_41.pdf](http://www.scientiaplena.org.br/sp/article/view/564/216v1n1p38_41.pdf)>. Acesso em: 22 fev. 2016.

Professor: o conceito de ddp aparece pela primeira vez, nesta obra, no capítulo 5 (Trabalho da força elétrica) e aparece neste capítulo como uma grandeza associada a um conjunto de dispositivos elétricos (circuito). Pode-se apresentar essa grandeza recordando a definição de potencial e de diferença de potencial e, em seguida, aplicar o princípio da conservação da energia em circuito.

### Resolução dos exercícios propostos (p. 92)

**EP1.** São dados:  $R = 36 \text{ cm} = 0,36 \text{ m}$ ;  $V = 2000 \text{ V}$ .

a) A capacitância é calculada por:

$$C = \frac{R}{k_0} = \frac{0,36}{9 \cdot 10^9}$$
$$\therefore C = 4 \cdot 10^{-11} \text{ F}$$

b) A quantidade de carga no condutor é dada por:

$$Q = C \cdot V = 4 \cdot 10^{-11} \cdot 2000$$
$$\therefore Q = 8 \cdot 10^{-8} \text{ C}$$

**EP2.** Dado:  $R = 6378 \text{ km} = 6,378 \cdot 10^6 \text{ m}$ .

A capacitância solicitada é de:

$$C = \frac{R}{k_0} = \frac{6,378 \cdot 10^6}{9 \cdot 10^9}$$
$$\therefore C \cong 7,1 \cdot 10^{-4} \text{ F}$$

**EP3.**

$Q_A = 3 \mu\text{C} = 3 \cdot 10^{-6} \text{ C}$ ;  $Q_B = 5 \mu\text{C} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ C}$ ;  
 $V_A = 2 \text{ kV} = 2000 \text{ V}$ ;  $V_B = 5 \text{ kV} = 5000 \text{ V}$ .

São dados:

a) As capacidades são dadas por  $C = \frac{Q}{V}$ :

$$\text{do condutor A: } C_A = \frac{3 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 10^3}$$
$$\therefore C_A = 1,5 \cdot 10^{-9} \text{ F}$$

$$\text{do condutor B: } C_B = \frac{5 \cdot 10^{-6}}{5 \cdot 10^3}$$
$$\therefore C_B = 1,0 \cdot 10^{-9} \text{ F}$$

b) O potencial de equilíbrio será de:

$$V_{\text{eq}} = \frac{Q_A + Q_B}{C_A + C_B} = \frac{3 \cdot 10^{-6} + 5 \cdot 10^{-6}}{1,5 \cdot 10^{-9} + 1 \cdot 10^{-9}}$$
$$\therefore V_{\text{eq}} = 3,2 \cdot 10^3 \text{ V}$$

c) As novas quantidades de carga em cada condutor são:

$$\text{em A: } Q'_A = C_A \cdot V_{\text{eq}} = 1,5 \cdot 10^{-9} \cdot 3,2 \cdot 10^3$$

$$\therefore Q'_A = 4,8 \cdot 10^{-6} \text{ C}$$

$$\text{em B: } Q'_B = C_B \cdot V_{\text{eq}} = 1 \cdot 10^{-9} \cdot 3,2 \cdot 10^3$$

$$\therefore Q'_B = 3,2 \cdot 10^{-6} \text{ C}$$

**EP4.** São dados:

$$R_1 = 20 \text{ cm} = 0,2 \text{ m}; Q_1 = 6 \text{ nC} = 6 \cdot 10^{-9} \text{ C};$$

$$R_2 = 30 \text{ cm} = 0,3 \text{ m}; Q_2 = 0.$$

As capacidades são dadas por  $C = \frac{R}{k_0}$ :

$$\text{Da esfera 1: } C_1 = \frac{0,2}{9 \cdot 10^9} \Rightarrow C_1 = \frac{2}{9 \cdot 10^{10}} \text{ F}$$

$$\text{Da esfera 2: } C_2 = \frac{0,3}{9 \cdot 10^9} \Rightarrow C_2 = \frac{3}{9 \cdot 10^{10}} \text{ F}$$

a) O potencial do condutor 1, em cada caso:

Antes do contato:

$$V_1 = k_0 \cdot \frac{Q_1}{R_1} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{6 \cdot 10^{-9}}{0,2}$$

$$\therefore V_1 = 270 \text{ V}$$

Depois do contato, o potencial de equilíbrio é:

$$V_{\text{eq}} = \frac{Q_1 + Q_2}{C_1 + C_2} = \frac{6 \cdot 10^{-9} + 0}{\frac{2}{9 \cdot 10^{10}} + \frac{3}{9 \cdot 10^{10}}}$$

$$\therefore V_{\text{eq}} = V'_1 = 108 \text{ V}$$

b) O potencial do condutor 2:

Antes do contato é nulo, pois a quantidade de carga é nula:  $V_2 = 0$ ; e depois o equilíbrio ocorre com  $V_{\text{eq}} = V'_2 = 108 \text{ V}$ .

c) As novas quantidades de carga em cada esfera são:

$$\text{Em 1: } Q'_1 = C_1 \cdot V_{\text{eq}} = \frac{2}{9 \cdot 10^{10}} \cdot 108$$

$$\therefore Q'_1 = 2,4 \cdot 10^{-9} \text{ C}$$

$$\text{Em 2: } Q'_2 = C_2 \cdot V_{\text{eq}} = \frac{3}{9 \cdot 10^{10}} \cdot 108$$

$$\therefore Q'_2 = 3,6 \cdot 10^{-9} \text{ C}$$

**EP5.** São dados:  $C = 6 \text{ nF} = 6 \cdot 10^{-9} \text{ F}$ ;  $Q = 18 \mu\text{C} = 18 \cdot 10^{-6} \text{ C}$ .

A energia potencial é dada por:

$$E_{\text{pe}} = \frac{Q^2}{2C} = \frac{(18 \cdot 10^{-6})^2}{2 \cdot 6 \cdot 10^{-9}} = 2,7 \cdot 10^{-2} \text{ J}$$

**EP6.** São dados:  $E_{\text{pe}} = 2 \cdot 10^{-7} \text{ J}$ ;  $C = 4 \cdot 10^{-11} \text{ F}$ .

Inicialmente, calculamos a quantidade de carga por

$$E_{\text{pe}} = \frac{Q^2}{2C}$$

$$2 \cdot 10^{-7} = \frac{Q^2}{2 \cdot 4 \cdot 10^{-11}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow Q = 4 \cdot 10^{-9} \text{ C}$$

E a ddp entre as armaduras é:

$$Q = C \cdot U$$

$$4 \cdot 10^{-9} = 4 \cdot 10^{-11} \cdot U \Rightarrow$$

$$\Rightarrow U = 1 \cdot 10^2 \text{ V} = 100 \text{ V}$$

**EP7.** São dados:  $A = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ ;  $d = 4 \text{ mm} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ ;  $U = 12 \text{ V}$ .

a) A intensidade do campo elétrico no interior das placas é:

$$U = E \cdot d$$

$$12 = E \cdot 4 \cdot 10^{-3} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow E = 3 \cdot 10^3 \text{ V/m}$$

b) A capacidade elétrica é dada por:

$$C = \epsilon \cdot \frac{A}{d} = 8,8 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{1,5 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 10^{-3}}$$

$$\therefore C = 3,3 \cdot 10^{-12} \text{ F} = 3,3 \text{ pF}$$

c) Como a capacidade é diretamente proporcional à permissividade, se essa permissividade aumentar 3 vezes, a capacidade também triplicará. Portanto, a nova capacidade será de:  $C' = 9,9 \text{ pF}$ .

**EP8.** São dados:

$$U = 9 \text{ V}; C = 8 \text{ nF} = 8 \cdot 10^{-9} \text{ F};$$

$$C' = 5 \text{ nF} = 5 \cdot 10^{-9} \text{ F}.$$

A quantidade de carga na placa positiva é:

$$Q = C \cdot U = 8 \cdot 10^{-9} \cdot 9$$

$$Q = 7,2 \cdot 10^{-8} \text{ C}$$

Então, a nova ddp, com a capacitância alterada e a carga mantida, é:

$$Q = C' \cdot U'$$

$$7,2 \cdot 10^{-8} = 5 \cdot 10^{-9} \cdot U' \Rightarrow$$

$$\Rightarrow U' = 14,4 \text{ V}$$

**EP9.** São dados:  $U = 200 \text{ V}$ ;  $E_{\text{pe}} = 352 \text{ nJ} = 3,52 \cdot 10^{-7} \text{ J}$ ;  $A = 8 \text{ cm}^2 = 8 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ ;  $d = 1,6 \text{ mm} = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ .

a) A intensidade do campo elétrico no interior das placas é:

$$U = E \cdot d$$

$$200 = E \cdot 1,6 \cdot 10^{-3} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow E = 1,25 \cdot 10^5 \text{ V/m}$$

b) A carga é dada por:

$$E_{\text{pe}} = \frac{Q \cdot U}{2}$$

$$3,52 \cdot 10^{-7} = \frac{Q \cdot 200}{2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow Q = 3,52 \cdot 10^{-9} \text{ C} = 3,52 \text{ nC}$$

- c) A capacitância do condensador é:

$$Q = C \cdot U$$

$$3,52 \cdot 10^{-9} = C \cdot 200 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow C = 1,76 \cdot 10^{-11} \text{ F} = 17,6 \text{ pF}$$

- d) A permissividade do dielétrico é:

$$C = \epsilon \cdot \frac{A}{d}$$

$$1,76 \cdot 10^{-11} = \epsilon \cdot \frac{8 \cdot 10^{-4}}{1,6 \cdot 10^{-3}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \epsilon = 3,52 \cdot 10^{-11} \text{ F/m}$$

Logo, a permissividade do dielétrico é maior que a do vácuo. A razão  $k$  (constante dielétrica) vale:

$$\therefore k = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \frac{3,52 \cdot 10^{-11}}{8,8 \cdot 10^{-12}} = 4$$

#### EP10.

- a) Temos os capacitores de capacidades  $10 \mu\text{F}$ ,  $5 \mu\text{F}$  e  $10 \mu\text{F}$  em série. Então, a capacidade equivalente será de:

$$\frac{1}{C_{\text{eq}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} = \frac{1}{10} + \frac{1}{5} + \frac{1}{10} = \frac{4}{10}$$

$$\therefore C_{\text{eq}} = 2,5 \mu\text{F}$$

- b) Os capacitores de capacidades  $1 \mu\text{F}$ ,  $2 \mu\text{F}$  e  $3 \mu\text{F}$  estão em paralelo. Logo, a equivalente será a soma delas:

$$C_{\text{eq}} = C_1 + C_2 + C_3 = 1 \mu + 2 \mu + 3 \mu$$

$$\therefore C_{\text{eq}} = 6 \mu\text{F}$$

- c) Os dois capacitores que estão em paralelo (de  $3,2 \mu\text{F}$  cada) têm uma capacidade equivalente parcial de  $6,4 \mu\text{F}$ , pois é a soma das capacidades. Assim, ficamos com três capacitores em série de capacidades:  $6,4 \mu\text{F}$ ,  $2 \mu\text{F}$  e  $8 \mu\text{F}$ . Calculando a equivalente delas, obtemos:

$$\frac{1}{C_{\text{eq}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} = \frac{1}{6,4} + \frac{1}{2} + \frac{1}{8} =$$

$$= \frac{1,25 + 4 + 1}{8} \Rightarrow C_{\text{eq}} = 1,28 \mu\text{F}$$

#### EP11.

- a) Se temos quatro capacitores em paralelo, de capacidades  $C = 24 \mu\text{C}$  cada, então a capacidade equivalente será de um quarto desse valor:

$$\frac{1}{C_{\text{eq}}} = \frac{1}{C} + \frac{1}{C} + \frac{1}{C} + \frac{1}{C} = \frac{4}{C} = \frac{4}{24}$$

$$\therefore C_{\text{eq}} = 6 \mu\text{C}$$

- b) Com  $U = 12 \text{ V}$ , a energia potencial dessa associação é de:

$$E_{\text{pe}} = \frac{C \cdot U^2}{2} = \frac{6 \cdot 10^{-6} \cdot 12^2}{2}$$

$$\therefore E_{\text{pe}} = 4,32 \cdot 10^{-4} \text{ J}$$

#### EP12. Dado: $C_{\text{eq}} = 18 \mu\text{F}$ .

Nesse caso, cada capacitor tem  $C = 6 \mu\text{F}$  de capacidade (ou capacitância), pois a soma das três tem de resultar  $18 \mu\text{F}$ .

- a) Associando os três em série, temos a capacitância equivalente de:

$$\frac{1}{C_{\text{eq}}} = \frac{1}{C} + \frac{1}{C} + \frac{1}{C} = \frac{3}{C} = \frac{3}{6}$$

$$\therefore C_{\text{eq}} = 2 \mu\text{F}$$

- b) Com dois em série, eles têm a capacitância equivalente parcial de:

$$\frac{1}{C_{\text{eq}}} = \frac{1}{C} + \frac{1}{C} = \frac{2}{C} = \frac{2}{6}$$

$$C_{\text{eq parcial}} = 3 \mu\text{F}$$

Colocando-se em paralelo com o terceiro capacitor, a equivalente total será de:

$$C_{\text{eq}} = C_{\text{eq parcial}} + C = 3 \mu + 6 \mu$$

$$\therefore C_{\text{eq}} = 9 \mu\text{F}$$

- c) Com dois em paralelo, eles têm a capacitância equivalente parcial de:

$$C_{\text{eq parcial}} = 6 \mu\text{F} + 6 \mu\text{F} = 12 \mu\text{F}$$

Depois, colocando em série com o terceiro, obtemos:

$$\frac{1}{C_{\text{eq}}} = \frac{1}{12} + \frac{1}{6} = \frac{3}{12}$$

$$\therefore C_{\text{eq}} = 4 \mu\text{F}$$

#### EP13. Os capacitores (com $C_1 = 6 \mu\text{F}$ e $C_2 = 2 \mu\text{F}$ ) estão em paralelo.

A associação recebe:  $Q = 48 \mu\text{C}$ .

- a) A capacitância equivalente é de:

$$C_{\text{eq}} = C_1 + C_2 = 6 \mu + 2 \mu$$

$$\therefore C_{\text{eq}} = 8 \mu\text{F}$$

- b) A ddp do gerador é:

$$Q = C \cdot U$$

$$48 = 8 \cdot U \Rightarrow$$

$$\Rightarrow U = 6 \text{ V}$$

- c) A quantidade de carga em cada capacitor é:

$$\text{Em 1: } Q_1 = C_1 \cdot U = 6 \mu\text{F} \cdot 6 \text{ V} = 36 \mu\text{C}$$

$$\text{Em 2: } Q_2 = C_2 \cdot U = 2 \mu\text{F} \cdot 6 \text{ V} = 12 \mu\text{C}$$

### EP14.

a) Como os capacitores estão em série, temos:

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{12} + \frac{1}{6} + \frac{1}{4} = \frac{6}{12} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow C_{eq} = 2 \mu F$$

b) A carga em cada capacitor é dada por:

$$Q = C_{eq} \cdot U = 2 \mu \cdot 9 \Rightarrow Q = 18 \mu C$$

c) Calculando a ddp em cada capacitor:

$$\text{em 1: } Q = C_1 \cdot U_1 \text{ ou } 18 \mu C = 12 \mu F \cdot U_1 \Rightarrow U_1 = 1,5 V$$

$$\text{em 2: } Q = C_2 \cdot U_2 \text{ ou } 18 \mu C = 6 \mu F \cdot U_2 \Rightarrow U_2 = 3 V$$

$$\text{em 3: } Q = C_3 \cdot U_3 \text{ ou } 18 \mu C = 4 \mu F \cdot U_3 \Rightarrow U_3 = 4,5 V$$

d) A energia potencial da associação é de:

$$E_{pe} = \frac{C \cdot U^2}{2} = \frac{2 \cdot 10^{-6} \cdot 9^2}{2} \Rightarrow E_{pe} = 8,1 \cdot 10^{-5} J$$

### EP15.

01) Incorreta. A menor capacitância é obtida quando se associa o maior número possível de capacitores em série. Para que isso ocorra, as chaves  $K_1$  e  $K_2$  devem ficar abertas.

02) Incorreta.

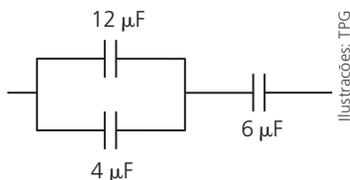
04) Correta.

08) Incorreta. Fechando a chave  $K_2$  e mantendo a chave  $K_1$  aberta, o capacitor equivalente entre A e B será:



$$C_{eq} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} = \frac{4 \cdot 6}{4 + 6} \Rightarrow C_{eq} = 2,4 \mu F$$

16) Incorreta. A maior capacitância será obtida fechando-se as chaves  $K_1$  e  $K_2$ .



Ilustrações: TPG



$$C_{eq} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} = \frac{16 \cdot 6}{16 + 6} \Rightarrow C_{eq} = 4,3 \mu F$$

## Atividade sugerida

Leia atentamente os quadrinhos.



GONIK, Larry; HUFFMAN, Art. *Introdução ilustrada à Física*. Trad. Luís Carlos de Menezes. São Paulo: Harbra, 1994. p. 125.

1. Qual a vantagem em utilizar o processo de fabricação descrito nos quadrinhos?
2. A capacidade de acumular cargas por um capacitor já não é mais questionada, por isso não é necessário ligar os dois terminais de um capacitor carregado com as mãos e "levar" um choque para comprovar tal fato. Mas o que poderia ser feito para verificar o descarregamento das cargas sem "levar" um choque?

Respostas

1. Como a capacidade elétrica do capacitor é diretamente proporcional à área de suas armaduras e é inversamente proporcional à distância entre elas, com esse método construtivo é possível obtermos grandes áreas de armaduras (enroladas) afastadas a décimos de milímetro.
2. Pode-se encostar um dos terminais de uma lâmpada fluorescente. Se o capacitor estiver suficientemente carregado, a lâmpada acenderá.

## Conceitos fundamentais

**Corrente elétrica** — movimento ordenado de cargas elétricas através de um condutor (que pode ser sólido, líquido ou gasoso).

**Resistência elétrica** — medida do grau de dificuldade que um condutor oferece à passagem de corrente elétrica; seu valor depende das características do material que o constitui. Um resistor é o dispositivo com a finalidade específica de oferecer resistência em um circuito elétrico.

**Efeito Joule** — aquecimento do condutor provocado pela resistência que ele oferece à passagem de corrente elétrica.

**Potência elétrica** — grandeza que expressa a taxa de utilização de energia elétrica, por unidade de tempo, em um dispositivo elétrico. A potência total é dada pela soma da potência útil com a potência dissipada.

## Articulações conceituais

A Eletrodinâmica, que é uma parte da Eletricidade, tem aplicação extremamente relacionada à vida cotidiana. Há vários conhecimentos adquiridos no dia a dia acerca de materiais condutores e isolantes elétricos e de aparelhos eletroeletrônicos; por exemplo, devem-se seguir as recomendações dos fabricantes e, principalmente, obedecer à tensão (voltagem) especificada em cada aparelho elétrico, não o submetendo a tensões maiores ou menores, sob o risco de prejudicar seu funcionamento e danificá-lo.

Pode-se dizer que a diferença de potencial ou tensão elétrica, quando aplicada em um circuito fechado que possui uma resistência total (equivalente), origina uma determinada corrente elétrica.

A corrente elétrica em condutores metálicos consiste em um movimento ordenado dos elétrons livres presentes no condutor. Existem dois tipos de corrente elétrica, de acordo com a forma como é produzida: pilhas e baterias fornecem corrente elétrica de forma contínua, através de reações químicas que ocorrem internamente; já as usinas hidrelétricas fornecem, através de geradores, correntes elétricas

alternadas, que consistem em um movimento de vaivém dos elétrons ao longo do condutor, com frequência de 50 a 60 Hz.

A intensidade da corrente elétrica depende da resistência elétrica oferecida pelo circuito, ou seja, materiais que apresentam maior resistência ao movimento dos elétrons em seu interior permitem a passagem de menor intensidade de corrente; esta também depende da forma do resistor, pois o valor da resistência é maior quanto menor é a área da seção reta e quanto maior é o comprimento do resistor. As relações entre a resistência, a tensão e a intensidade de corrente, bem como as características físicas do resistor, são tratadas pelas duas leis de Ohm, escritas a seguir:

$$1^{\text{a}} \text{ Lei: } R = \frac{U}{i} \qquad 2^{\text{a}} \text{ Lei: } R = \rho \cdot \frac{\ell}{A}$$

A Primeira Lei de Ohm relaciona a resistência ( $R$ , em  $\Omega$ ) à diferença de potencial fornecida por uma fonte ( $U$ , em V) e à intensidade de corrente movida em seu interior ( $i$ , em A). Já a Segunda Lei relaciona a resistência à resistividade do material ( $\rho$ ), ao comprimento do resistor ( $\ell$ ) e à área da seção reta ( $A$ ).

Por esse motivo se compreende o porquê dos tamanhos diferentes dos resistores nas posições “verão” ou “inverno” de um chuveiro elétrico ou da relação entre as potências de lâmpadas incandescentes com os comprimentos e os diâmetros de seus filamentos.

De forma análoga, resistores associados em série apresentam uma resistência equivalente maior que em paralelo, pois, para a corrente, dois resistores em série representam um longo resistor (um caminho mais longo a ser percorrido), enquanto a associação em paralelo oferece uma possibilidade (ou facilidade) de optar entre dois caminhos mais curtos, ou seja, de menor resistência.

Maior resistência resulta em menor corrente e, em razão do efeito Joule, menor aquecimento. A potência dissipada ( $P$ ) no resistor é diretamente proporcional à tensão ( $U$ ), e é diretamente proporcional ao quadrado da intensidade ( $i^2$ ) da corrente que o atravessa. E a potência está diretamente relacionada ao consumo de energia elétrica ( $E$ ), conforme as seguintes relações:

$$P = U \cdot i = R \cdot i^2 \qquad E = P \cdot \Delta t$$

A potência dissipada em um resistor ( $P$ , em W) depende da diferença de tensão ( $U$ , em V) e da intensidade de corrente ( $i$ , em A), enquanto o consumo de energia elétrica ( $E$ , em kWh) está relacionado à potência ( $P$ , em kW) e ao tempo de uso ( $\Delta t$ , em h).

É possível relacionar a Eletrodinâmica à Física dos Fluidos, pois podem ser usadas analogias entre elas para entender os conceitos de corrente elétrica, de diferença de potencial e de resistência.

## Capítulo 8 Corrente elétrica

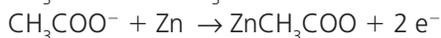
### Atividade introdutória Montando uma pilha

Trata-se da construção de uma pilha elétrica que auxilia no entendimento da origem química da energia elétrica disponibilizada por esse dispositivo, desvendando o porquê de sua corrente ser contínua, a forma como ocorre seu esgotamento e o motivo pelo qual se denomina “pilha”.

Para realizar a atividade, devem ser disponibilizadas duas placas de cobre e duas de zinco a cada grupo ou estudante, além de dois pedaços de fios finos (nº 20), pedaços de papel higiênico, um LED e vinagre.

A montagem consiste em intercalar as placas e os pedaços de papel higiênico embebidos em vinagre na seguinte sequência: cobre – papel – zinco – cobre – papel – zinco. Os pedaços de fio (cabinhos) são presos ao LED e as outras extremidades são conectadas às placas pelas extremidades. Ao se pressionar com o dedo a pilha elétrica, acende-se o LED. Seguem sugestões de questões a serem exploradas posteriormente.

Analise as reações químicas e leia o texto a seguir:



Com o desenvolvimento da reação, ocorrerá a formação de cobre metálico, que se depositará na superfície do eletrodo de cobre; já o eletrodo de zinco será corroído, pois os íons irão para a solução de sulfato de zinco.

1. De onde vem a energia elétrica da pilha?

*Resposta possível: Da reação entre o vinagre e o zinco.*

2. Qual é o caminho dos elétrons?

*Resposta possível: Do zinco para o cobre.*

3. Por que o papel higiênico precisa estar embebido no vinagre?

*Resposta possível: Porque é necessária a presença do vinagre (um meio ácido) para ocorrer a reação.*

4. Por que a corrente elétrica da pilha acaba depois de certo tempo?

*Resposta possível: Porque o zinco vai sendo consumido pela reação.*

5. Por que a pilha recebeu esse nome?

*Resposta possível: Porque se trata de um conjunto de placas de cobre, zinco e papel empilhadas, embebidas em vinagre.*

### Resolução dos exercícios propostos (p. 106)

**EP1.** São dados:  $i = 4,8 \text{ A}$ ;  $\Delta t = 5 \text{ min} = 300 \text{ s}$ .

a) A quantidade de carga elétrica é dada por:

$$i = \frac{q}{\Delta t} \Rightarrow 4,8 = \frac{q}{300} \Rightarrow q = 1440 \text{ C}$$

b) O número de elétrons é calculado a partir de:

$$q = n \cdot e. \text{ Então:}$$

$$1440 = n \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow n = 9,0 \cdot 10^{21} \text{ elétrons}$$

**EP2.** São dados:  $n = 6 \cdot 10^{16}$ ;  $\Delta t = 1 \text{ min} = 60 \text{ s}$ .

Se os elétrons se movem da esquerda para a direita, a corrente elétrica (por convenção) terá seu sentido da direita para a esquerda.

A intensidade dessa corrente é:

$$i = \frac{q}{\Delta t} = \frac{n \cdot e}{\Delta t} = \frac{6 \cdot 10^{16} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{60}$$

$$i = 1,6 \cdot 10^{-4} \text{ A} = 160 \mu\text{A}$$

**EP3.** O gráfico mostra uma corrente de intensidade constante:  $i = 200 \mu\text{A} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ A}$ .

a) Sendo  $\Delta t = (3 - 1) \text{ h} = 2 \text{ h} = 7200 \text{ s}$ , a quantidade de carga solicitada é de:

$$i = \frac{q}{\Delta t} \Rightarrow 2 \cdot 10^{-4} = \frac{q}{7200} \Rightarrow q = 1,44 \text{ C}$$

- b) Se  $\Delta t = 4 \text{ h} = 14400 \text{ s}$ , então a quantidade de carga será o dobro da anterior, ou seja, 2,88 C. Assim, o número de elétrons cruzando a seção reta do condutor será de:

$$q = n \cdot e$$

$$2,88 = n \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow n = 1,8 \cdot 10^{19} \text{ elétrons}$$

**EP4.** São dados:  $U = 220 \text{ V}$ ;  $P = 3960 \text{ W}$ .

- a) Principais finalidades: instalar corretamente o chuveiro na voltagem e verificar o consumo através da potência; a intensidade de corrente no chuveiro é de:

$$P = U \cdot i \Rightarrow 3960 = 220 \cdot i \Rightarrow$$

$$\Rightarrow i = 18 \text{ A}$$

- b) Com  $\Delta t = 20 \text{ min} = \frac{1}{3} \text{ h}$ , temos a seguinte energia elétrica ( $\tau$ ) consumida:

$$\tau = P \cdot \Delta t = 3960 \text{ W} \cdot \frac{1}{3} \text{ h} = 1320 \text{ Wh} = 1,32 \text{ kWh}$$

**EP5.** A energia elétrica ( $\tau$ ) consumida é determinada por  $\tau = P \cdot \Delta t$ .

De acordo com os dados da tabela, os consumos diários de energia por aparelho são:

ar-condicionado:  $1,5 \text{ kW} \cdot 8 \text{ h} = 12 \text{ kWh}$

chuveiro:  $3,3 \text{ kW} \cdot \frac{1}{3} \text{ h} = 1,1 \text{ kWh}$

freezer:  $0,2 \text{ kW} \cdot 10 \text{ h} = 2 \text{ kWh}$

geladeira:  $0,35 \text{ kW} \cdot 10 \text{ h} = 3,5 \text{ kWh}$

lâmpadas:  $0,1 \text{ kW} \cdot 6 \text{ h} = 0,6 \text{ kWh}$

O total diário é de:  $19,2 \text{ kWh}$ . Então, em um mês, o consumo totaliza:  $19,2 \text{ kWh} \cdot 30 = 576 \text{ kWh}$ .

Logo, o custo é de:  $576 \cdot \text{R\$ } 0,40 = \text{R\$ } 230,40$ .

Alternativa correta: e

**EP6.** O maior consumo foi de  $390 \text{ kWh}$  e o menor, de  $200 \text{ kWh}$ . A diferença entre esses valores é a máxima que pode ocorrer:  $(390 - 200) \text{ kWh} = 190 \text{ kWh}$ . Então, a maior diferença em reais (das contas mensais) será de:

$$190 \cdot \text{R\$ } 0,40 = \text{R\$ } 76,00$$

Alternativa correta: a

**EP7.**

- a) As especificações da lâmpada fluorescente compacta são:  $U = 110 \text{ V}$ ;  $P = 20 \text{ W}$ .

Logo, em uso normal, a corrente que a atravessa terá a intensidade de:

$$P = U \cdot i \Rightarrow 20 = 110 \cdot i \Rightarrow$$

$$\Rightarrow i \cong 0,18 \text{ A}$$

- b) A amortização no valor de  $\text{R\$ } 12,80$  seria a diferença entre os consumos ( $\tau = P \cdot \Delta t$ ) das duas lâmpadas num certo tempo:

da fluorescente: sendo  $\tau_{\text{flu}} = 0,020 \cdot \Delta t$ , em kWh, o consumo é de  $0,020 \cdot \Delta t \cdot 0,40$ , em reais;

da incandescente:  $\tau_{\text{inc}} = 0,100 \cdot \Delta t$ , em kWh, o consumo é de  $0,100 \cdot \Delta t \cdot 0,40$ , em reais.

Então, temos a seguinte diferença, em reais:

$$0,100 \cdot \Delta t \cdot 0,40 - 0,020 \cdot \Delta t \cdot 0,40 = 12,80$$

$$0,040 \cdot \Delta t - 0,008 \cdot \Delta t = 12,80$$

$$0,032 \cdot \Delta t = 12,80 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \Delta t = 400 \text{ h}$$

Se a lâmpada ficar acesa durante 8 h ao dia, então são totalizadas 400 h em 50 dias, pois  $400 : 8 = 50$ .

- c) Se em 50 dias há uma economia de  $\text{R\$ } 12,80$ , então em 30 dias teremos a seguinte economia:

$$\frac{\text{R\$ } 12,80}{50 \text{ dias}} = \frac{x}{30 \text{ dias}} \Rightarrow x = \text{R\$ } 7,68$$

**EP8.** Todas as variáveis consideradas são importantes, pois são diretamente proporcionais ao consumo de energia elétrica.

Alternativa correta: e

**EP9.** O chuveiro consome 25% da energia.

Portanto, são 25% de  $300 \text{ kWh} = \frac{25}{100} \cdot 300 \text{ kWh} = 75 \text{ kWh}$  por mês.

Cada uma das 4 pessoas consome, em média, um quarto dessa energia:  $\frac{1}{4} \cdot 75 \text{ kWh} = 18,75 \text{ kWh}$ .

Em um dia, uma pessoa consome no chuveiro:

$$(18,75 : 30) \text{ kWh} = 0,625 \text{ kWh}$$

Finalmente, o tempo de duração média do banho (no chuveiro de  $P = 5000 \text{ W} = 5 \text{ kW}$ ) é de:

$$\tau = P \cdot \Delta t$$

$$0,625 = 5 \cdot \Delta t \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \Delta t = 0,125 \text{ h} = 7,5 \text{ min}$$

Alternativa correta: c

## Outras palavras (p. 98)

### Eletricidade — breve história:

#### Da Antiguidade ao fim do século XIX

- Ocorreu principalmente entre os séculos XVII e XVIII. Os estudos da eletricidade estiveram "atra-

sados” em relação à Mecânica e à Termodinâmica. Um exemplo é ver que, no século XVIII, quando Benjamin Franklin fez a relação entre o raio e a eletricidade, boa parte da Mecânica e da Termodinâmica já havia sido teorizada e comprovada.

2. O experimento foi montado com um papagaio (ou pipa, em outras partes do país) e uma chave de metal foi amarrada ao fio ao alcance de Benjamin Franklin. Na realidade, o papagaio de Benjamin Franklin nunca foi atingido por um raio. A tempestade fez com que a chave de metal ficasse carregada com eletricidade estática. Quando Benjamin Franklin, que estava em pé sobre a terra, aproximou o dedo da chave, ele passou a fazer o papel de fio terra; assim, houve uma faísca que descarregou os elétrons da chave para o corpo de Benjamin Franklin, indo em direção à terra.

## Atividade prática (p. 105)

### Testando circuitos

Esta atividade trabalha com a análise de circuitos elétricos. Poderá ser realizada no laboratório ou na própria sala de aula.

Você pode iniciar a atividade descrevendo a importância dos circuitos elétricos e discutindo onde podemos encontrá-los. Nesta atividade construiremos alguns exemplos de circuitos elétricos que estão à nossa volta.

Depois de fornecer o material aos grupos, solicite que iniciem as montagens com base nas figuras da atividade. Instrua-os como deverão fazer as ligações de cada componente, por exemplo: para ligar uma lâmpada ao circuito devemos fixar, com fita adesiva (ou fita isolante), um fio na lateral da base de alumínio e outro exatamente no centro da parte inferior da lâmpada.

Após a finalização de todas as montagens e a compreensão do caminho que as cargas realizam, conclua com os estudantes que um circuito só recebe corrente quando os dois polos da pilha estão ligados aos extremos do circuito. Mais precisamente, a lâmpada só acende se houver um caminho fechado entre os polos da pilha passando por dentro da lâmpada.

De todas as alternativas, os circuitos que irão acender são os de letras *a*, *b*, *c* e *f*, em que há um caminho físico entre o polo positivo e o polo negativo da pilha passando pelo interior da lâmpada.

## Capítulo 9

## Resistores elétricos

### Atividade introdutória

#### Analisando resistores

Esta atividade consiste em discutir resistência elétrica com base na análise de resistores de chuveiros e lâmpadas incandescentes com diferentes potências. O objetivo é perceber a relação existente entre potência elétrica, intensidade de corrente e resistência elétrica (Primeira Lei de Ohm), e de que maneira a seção reta e o comprimento do fio resistor interferem no valor da resistência elétrica (Segunda Lei de Ohm).

Cada grupo de estudantes deve receber o seguinte material: duas lâmpadas com valores visíveis de potência e mesma voltagem, um pedaço de fio de cobre e uma pilha.

Faça com que os grupos manipulem o material, unindo os terminais das lâmpadas aos terminais da pilha

e acendendo-as; eles devem também unir o fio à pilha, em duas situações: uma vez pelas extremidades, e outra vez por uma extremidade e um ponto no meio do fio.

Eles deverão notar que lâmpadas diferentes produzem brilho diferente, e que o fio se aquece de modo diferente dependendo de como está ligado à pilha (quando ligado pelas extremidades, ele esquenta menos).

Observe que os estudantes já conhecem o princípio dos circuitos e o que é corrente, então a explicação dos resultados desses experimentos deverá basear-se em fatos conhecidos até esse ponto. Evite as fórmulas a esta altura: lembre-se de que eles ainda não conhecem as leis de Ohm.

1. Das duas lâmpadas, qual possui o maior brilho? Por quê?

*Resposta possível: A lâmpada de maior potência, porque consome mais energia.*

2. Em qual das duas há a passagem de maior corrente elétrica? Por quê?

*Resposta possível: Na que tem maior potência, porque consome mais energia.*

3. Em qual das duas há mais resistência à passagem da corrente elétrica? Por quê?

*Resposta possível: Na que tem menor potência, porque há oposição à passagem da corrente.*

4. No resistor do chuveiro, podem-se ver um fio enrolado e três pontos de contato elétrico, sendo dois nas extremidades e um intermediário. Ligando-se os dois pontos extremos, há um grau de aquecimento, e ligando-se um extremo ao intermediário, outro grau. Em qual caso o chuveiro esquenta mais? Por quê?

*Resposta possível: Ligando um extremo e o intermediário, porque há menos resistência.*

5. Em qual das duas ligações há a passagem de maior corrente elétrica? Por quê?

*Resposta possível: Ligando um extremo ao intermediário, porque há maior dissipação de energia.*

6. Em qual das duas ligações há mais resistência à passagem da corrente elétrica? Por quê?

*Resposta possível: Ligando os dois extremos, porque as cargas precisam percorrer um caminho maior.*

## Resolução dos exercícios propostos (p. 128)

**EP1.** A expressão da Primeira Lei de Ohm é  $U = R \cdot i$ , em que  $U$  é a ddp nos terminais do resistor,  $R$  é o valor da resistência elétrica e  $i$  a intensidade de corrente que percorre o resistor.

As grandezas  $R$  e  $i$  são inversamente proporcionais, portanto, para uma mesma ddp  $U$ , se houver um aumento da resistência elétrica, diminuirá a intensidade de corrente ou vice-versa.

Quando  $R$  é constante,  $U$  e  $i$  são diretamente proporcionais, ou seja, se aumentar (diminuir) um, o outro também aumenta (diminui). Da mesma forma, para  $i$  constante,  $U$  e  $R$  são diretamente proporcionais.

**EP2.** São dados:

$$U = 110 \text{ V}; i = 200 \text{ mA} = 0,2 \text{ A.}$$

A resistência do dispositivo é dada por:

$$U = R \cdot i \Rightarrow 110 = R \cdot 0,2 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow R = 550 \Omega$$

**EP3.** De acordo com o gráfico, quando  $U = 50 \text{ V}$ , temos  $i = 4 \text{ A}$ .

- a) A resistência desse resistor é:

$$U = R \cdot i \Rightarrow 50 = R \cdot 4 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow R = 12,5 \Omega$$

- b) A intensidade de corrente sob  $U = 2,5 \text{ V}$  passa a ser de:

$$U = R \cdot i \Rightarrow 2,5 = 12,5 \cdot i \Rightarrow$$

$$\Rightarrow i = 0,2 \text{ A}$$

**EP4.** A forma espiralada é uma questão de economia de espaço. Se não fosse assim, tanto o filamento como as resistências ocupariam um espaço muito maior (imaginem os esticados). Portanto, a forma em espiral é a mais adequada para diminuir espaço sem que haja contato ao longo de todo o comprimento do fio.

**EP5.** O eletrotécnico recebeu a encomenda certa, pois, consultando a tabela, o valor da resistência elétrica recebida é de:

$$64 \cdot 10^2 = 6400, \text{ em ohms, com tolerância de } \pm 10\%.$$

Ou seja:  $6400 \Omega \pm 640 \Omega$ , portanto, dentro daquilo que ele precisava ( $6000 \Omega$ ).

**EP6.** Reostato é um resistor que possui uma resistência variável, de zero até um valor máximo. Ele serve para aumentar ou diminuir a intensidade de corrente elétrica que atravessa um circuito. De acordo com a Primeira Lei de Ohm, se a resistência é nula, a intensidade de corrente é máxima, e se a resistência é máxima, a intensidade de corrente é mínima.

**EP7.** Como a expressão da Segunda Lei de Ohm é  $R = \rho \cdot \frac{\ell}{A}$ , vemos que o comprimento do fio  $\ell$  e a área da seção reta  $A$  são diretamente proporcionais. Assim, para não haver uma variação na resistência  $R$  do condutor, a cada aumento no comprimento do fio deve corresponder um acréscimo proporcional da área da sua seção transversal, e vice-versa.

**EP8.** São dados:  $\ell = 400 \text{ m}$ ;  $A = 2 \text{ mm}^2 = 2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$ ;  $\theta = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\rho = 1,6 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ .

- a) Com essas características, a resistência do fio vale:

$$R = \rho \cdot \frac{\ell}{A} = 1,6 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{400}{2 \cdot 10^{-6}}$$

$$\therefore R = 3,2 \Omega$$

- b) Como o comprimento e a área da seção (bitola) são diretamente proporcionais entre si, se o comprimento diminuir para a metade (de 400 m para 200 m), então a bitola também deve diminuir à metade do valor anterior: de  $2 \text{ mm}^2$  para  $1 \text{ mm}^2$ .

**EP9.** São dados:

$R = 100 \Omega$  com o comprimento  $\ell$ ; e  $R' = 75 \Omega$  com  $\ell' = \ell - 4$ , em metros.

A resistividade e a área da seção são constantes.

Portanto, de  $R = \rho \cdot \frac{\ell}{A}$ , isolando a parte constante, obtemos a seguinte igualdade:  $\frac{\rho}{A} = \frac{R}{\ell}$ .

Aplicando essa igualdade nas duas situações, temos:

$$\text{inicial: } \frac{\rho}{A} = \frac{100}{\ell}$$

$$\text{final: } \frac{\rho}{A} = \frac{75}{\ell - 4}$$

Portanto:

$$\frac{100}{\ell} = \frac{75}{\ell - 4} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \ell = 16 \text{ m}$$

**EP10.** São dados:

$U = 220 \text{ V}$ ;  $\ell = 2 \text{ km} = 2000 \text{ m}$ ;  $A = 3,4 \text{ mm}^2$ ;  
 $\rho = 1,7 \cdot 10^{-2} \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ .

Nesse caso, devemos estar atentos à unidade da resistividade, que não está no SI.

Inicialmente, determinamos a resistência do fio:

$$R = \rho \cdot \frac{\ell}{A} = 1,7 \cdot 10^{-2} \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m} \cdot \frac{2000 \text{ m}}{3,4 \text{ mm}^2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow R = 10 \Omega$$

Então, sob  $220 \text{ V}$  de ddp, a corrente que passa pelo fio tem a intensidade de:

$$U = R \cdot i \Rightarrow 220 = 10 \cdot i \Rightarrow$$

$$\Rightarrow i = 22 \text{ A}$$

**EP11.** São dados:  $i_0 = 9,0 \text{ A}$ ;  $\theta_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

$$\alpha = 5 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$
;  $\theta_f = 120 \text{ }^\circ\text{C}$ .

A ddp nos terminais é constante.

A resistência do resistor será alterada para:

$$R = R_0 \cdot [1 + \alpha \cdot (\theta_f - \theta_0)].$$

Substituindo  $R$  por  $\frac{U}{i}$ , obtemos:

$$\frac{U}{i} = \frac{U}{i_0} \cdot [1 + 5 \cdot 10^{-3} \cdot (120 - 20)]$$

$$i_0 = i \cdot [1 + 0,5]$$

$$9,0 = i \cdot 1,5 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow i = 6 \text{ A}$$

**EP12.** São dados:

$$P = 1200 \text{ W}; U = 220 \text{ V}.$$

a) A resistência é dada por:

$$P = \frac{U^2}{R} \Rightarrow 1200 = \frac{220^2}{R} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow R \cong 40,3 \Omega$$

b) A intensidade da corrente é:

$$U = R \cdot i \Rightarrow 220 \cong 40,3 \cdot i \Rightarrow$$

$$\Rightarrow i \cong 5,5 \text{ A}$$

c) Se a ddp for de apenas  $110 \text{ V}$ , a potência passa a ser de:

$$P = \frac{U^2}{R} \cong \frac{110^2}{40,3}$$

$$\therefore P \cong 300 \text{ W}$$

**EP13.** São dados:

$m = 10 \text{ kg} = 10000 \text{ g}$  (de água, pois sua densidade é de  $1,0 \text{ kg/L}$ );  $\theta_0 = 17 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $U = 220 \text{ V}$ ;  $P = 2200 \text{ W}$ .

a) A ebulição em São Paulo ocorre a  $\theta = 97 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Inicialmente, calculamos a energia necessária para o aquecimento, pela equação fundamental da calorimetria:

$$Q = m \cdot c \cdot (\theta - \theta_0) = 10000 \cdot 1 \cdot (97 - 17)$$

$$Q = 800000 \text{ cal} = 3360000 \text{ J}$$

Considerando que não haja perda de calor, a potência dissipada pelo aquecedor é integralmente usada no aquecimento:

$$P = \frac{Q}{\Delta t} \Rightarrow 2200 = \frac{3360000}{\Delta t} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \Delta t \cong 1527,3 \text{ s} \cong 25,5 \text{ min}$$

b) Na cidade do México, a fervura ocorre a  $\theta = 92 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Então:

$$Q = m \cdot c \cdot (\theta - \theta_0) = 10000 \cdot 1 \cdot (92 - 17)$$

$$Q = 750000 \text{ cal} = 3150000 \text{ J}$$

E o tempo de aquecimento é de:

$$P = \frac{Q}{\Delta t} \Rightarrow 2200 = \frac{3150000}{\Delta t} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \Delta t \cong 1431,8 \text{ s} \cong 23,9 \text{ min}$$

c) A resistência é dada por:

$$P = \frac{U^2}{R} \Rightarrow 2200 = \frac{220^2}{R} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow R = 22 \Omega$$

E a intensidade da corrente é:

$$U = R \cdot i \Rightarrow 220 = 22 \cdot i \Rightarrow$$

$$\Rightarrow i = 10 \text{ A}$$

**EP14.** São dados:  $R_1 = 8 \Omega$ ;  $R_2 = 2 \Omega$ ;  $R_3 = 20 \Omega$ ;  
 $U = 60 \text{ V}$ .

a) A resistência equivalente é dada pela soma das resistências em série:

$$R_{\text{eq}} = R_1 + R_2 + R_3 = 8 \Omega + 2 \Omega + 20 \Omega = 30 \Omega$$

b) A intensidade da corrente na associação é de:

$$U = R_{eq} \cdot i \Rightarrow 60 = 30 \cdot i \Rightarrow \\ \Rightarrow i = 2 \text{ A}$$

c) As ddp's em cada resistor são:

$$\text{em } R_1: U_1 = R_1 \cdot i = 8 \cdot 2$$

$$\therefore U_1 = 16 \text{ V}$$

$$\text{em } R_2: U_2 = R_2 \cdot i = 2 \cdot 2$$

$$\therefore U_2 = 4 \text{ V}$$

$$\text{em } R_3: U_3 = R_3 \cdot i = 20 \cdot 2$$

$$\therefore U_3 = 40 \text{ V}$$

**EP15.** São dados:

$$P = 405 \text{ W}; U = 135 \text{ V}$$

A figura mostra que duas resistências ( $R$  e  $2R$ ) são associadas em série.

a) A intensidade de corrente é calculada por:

$$P = U \cdot i \Rightarrow 405 = 135 \cdot i \Rightarrow$$

$$\Rightarrow i = 3 \text{ A}$$

b) A resistência equivalente vale:

$$P = R_{eq} \cdot i^2 \Rightarrow 405 = R_{eq} \cdot 3^2 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow R_{eq} = 45 \Omega$$

c) A resistência equivalente de  $45 \Omega$  é dada pela soma de  $R$  com  $2R$ . Logo:

$$R + 2R = 45$$

$$\therefore R = 15 \Omega \text{ e } 2R = 30 \Omega$$

**EP16.** São dados:

$$R_1 = 3 \Omega; R_2 = 5 \Omega; U_2 = 7,5 \text{ V}$$

Podemos determinar a corrente na associação por:

$$U_2 = R_2 \cdot i \Rightarrow 7,5 = 5 \cdot i \Rightarrow$$

$$\Rightarrow i = 1,5 \text{ A}$$

A resistência equivalente é:  $R_{eq} = 3 \Omega + 5 \Omega = 8 \Omega$ .

Logo, a ddp  $U$  é dada por:

$$U = R_{eq} \cdot i = 8 \cdot 1,5 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow i = 12 \text{ A}$$

Alternativa correta: c

**EP17.** Três resistores estão associados em paralelo.

Vamos considerar os seguintes dados:  $R_1 = 10 \Omega$ ;

$$R_2 = 30 \Omega; R_3 = 15 \Omega; U = 60 \text{ V}.$$

a) A resistência equivalente é calculada por:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{10} + \frac{1}{30} + \frac{1}{15} = \\ = \frac{3 + 1 + 2}{30} = \frac{6}{30} = \frac{1}{5}$$

$$\therefore R_{eq} = 5 \Omega$$

b) Calculando as correntes em cada resistor, obtemos:

$$\text{em } R_1: U = R_1 \cdot i_1 \Rightarrow 60 = 10 \cdot i_1 \Rightarrow i_1 = 6 \text{ A}$$

$$\text{em } R_2: U = R_2 \cdot i_2 \Rightarrow 60 = 30 \cdot i_2 \Rightarrow i_2 = 2 \text{ A}$$

$$\text{em } R_3: U = R_3 \cdot i_3 \Rightarrow 60 = 15 \cdot i_3 \Rightarrow i_3 = 4 \text{ A}$$

c) A intensidade total da corrente é dada pela soma das correntes parciais (em cada resistor):

$$6 \text{ A} + 2 \text{ A} + 4 \text{ A} = 12 \text{ A}$$

**EP18.** O fusível que suporta 30 A, com tolerância de 10% (isto é: 10% de 30 A = 3 A). Isso quer dizer que o máximo que esse fusível pode suportar está entre 27 A e 33 A.

a) O secador de cabelo funciona a  $U = 110 \text{ V}$  e

$$P = 935 \text{ W}. \text{ Logo, a corrente exigida é de:}$$

$$P = U \cdot i \Rightarrow 935 = 110 \cdot i \Rightarrow$$

$$\Rightarrow i = 8,5 \text{ A}$$

Antes de a filha de dona Maria ligar o secador de cabelo, a intensidade total de corrente elétrica solicitada na residência era de aproximadamente 30,3 A, porque a soma das potências dos aparelhos em funcionamento era de 3328 W (pois  $1100 + 1375 + 165 + 6 \cdot 100 + 88 = 3328$ ) e  $P = U \cdot i \Rightarrow 3328 = 110 \cdot i \Rightarrow i \cong 30,3 \text{ A}$ .

Assim, podemos concluir que, quando o secador foi ligado, a corrente total passou a ser de 38,8 A, o que ultrapassou o máximo que o fusível pode suportar. Portanto, o fusível queimou.

b) Os três aparelhos de maior potência são: ferro (1100 W), chuveiro (1375 W) e secador (935 W).

A soma dessas potências resulta:

$$3410 \text{ W} = 3,41 \text{ kW}$$

Se os aparelhos são utilizados 30 min (= 0,5 h) por dia, durante 30 dias, então temos o total de energia consumida, que é dado por:

$$3,41 \text{ kW} \cdot 0,5 \text{ h} \cdot 30 = 51,15 \text{ kWh}$$

E o custo desse consumo seria de:

$$51,15 \cdot \text{R\$ } 0,40 = \text{R\$ } 20,46$$

**EP19.**

a) No ramo de cima, temos:  $20 \Omega + 10 \Omega = 30 \Omega$ . Considerando essa equivalente e a resistência do ramo central, ambas em paralelo, temos:

$$\frac{30 \cdot 30}{30 + 30} \Omega = \frac{900}{60} \Omega = 15 \Omega. \text{ Finalmente, o ramo}$$

de baixo tem a equivalente de  $15 \Omega + 20 \Omega = 35 \Omega$ . Considerando essa equivalente ( $35 \Omega$ ) com a anterior ( $15 \Omega$ ) em paralelo, obtemos a equivalente total:

$$\frac{35 \cdot 15}{35 + 15} \Omega = \frac{525}{50} \Omega = 10,5 \Omega$$

- b) No ramo de cima, temos:  $5 \Omega + 15 \Omega = 20 \Omega$ . Considerando essa equivalente e a resistência de  $30 \Omega$  em paralelo, obtemos uma equivalente parcial de:  $\frac{20 \cdot 30}{20 + 30} \Omega = \frac{600}{50} \Omega = 12 \Omega$ . E essa equivalente fica em série com a resistência de  $8 \Omega$ , o que resulta um total de  $12 \Omega + 8 \Omega = 20 \Omega$ . E, por fim, entre os pontos  $A$  e  $B$ , temos essa última equivalente calculada, que fica em paralelo com a resistência de  $80 \Omega$ , dando a resultante equivalente total de:

$$\frac{20 \cdot 80}{20 + 80} \Omega = \frac{1600}{100} \Omega = 16 \Omega$$

- c) As duas resistências à direita, de  $20 \Omega$  cada, estão em série e dão um total de  $40 \Omega$ . Esta fica em paralelo com a de  $10 \Omega$ , o que resulta:

$$\frac{40 \cdot 10}{40 + 10} \Omega = \frac{400}{50} \Omega = 8 \Omega. \text{ E esta fica em série}$$

com a de  $2 \Omega$ , dando  $10 \Omega$ . Essa nova equivalente parcial, por sua vez, fica em paralelo com a resistência de  $10 \Omega$ , gerando outra equivalente:

$$\frac{10 \cdot 10}{10 + 10} \Omega = \frac{100}{20} \Omega = 5 \Omega. \text{ Agora, temos essa}$$

equivalente em série com duas outras (a de  $7 \Omega$  e a de  $8 \Omega$ ), totalizando  $20 \Omega$ . Esta fica em paralelo com a de  $5 \Omega$ , o que resulta:  $\frac{20 \cdot 5}{20 + 5} \Omega = \frac{100}{25} \Omega = 4 \Omega$ .

Finalmente, essa última resistência equivalente fica em série com duas outras, de  $1 \Omega$  e de  $9 \Omega$ , dando a resultante equivalente total de  $14 \Omega$ .

- d) Começamos pelas duas resistências em série à esquerda, dando  $2R$ , que fica em paralelo com a  $R$  (na diagonal), resultando a equivalente:

$$\frac{2R \cdot R}{2R + R} = \frac{2R^2}{3R} = \frac{2R}{3}. \text{ Esta fica em série com}$$

$R$  (lado inferior do quadrado à esquerda), somando  $R + \frac{2R}{3} = \frac{5R}{3}$ . Esta equivalente parcial fica em paralelo com  $R$  (lado vertical do meio):

$$\frac{\frac{5R}{3} \cdot R}{\frac{5R}{3} + R} = \frac{\frac{5}{3} \cdot R^2}{\frac{8R}{3}} = \frac{5R}{8}. \text{ Ela deve ser adicionada a } R$$

(lado inferior do quadrado à direita), que está em série:  $R + \frac{5R}{8} = \frac{13R}{8}$ . Esta fica em paralelo com  $R$  (na

diagonal à direita):  $\frac{\frac{13R}{8} \cdot R}{\frac{13R}{8} + R} = \frac{\frac{13}{8} \cdot R^2}{\frac{21R}{8}} = \frac{13R}{21}$ . Esse

valor deve ser acrescido a  $R$  (lado superior do quadrado à direita), pois estão em série:  $R + \frac{13R}{21} = \frac{34R}{21}$ .

Por fim, entre os pontos  $A$  e  $B$ , temos a última equivalente calculada em paralelo com outro  $R$ :

$$\frac{\frac{34R}{21} \cdot R}{\frac{34R}{21} + R} = \frac{\frac{34}{21} \cdot R^2}{\frac{55R}{21}} = \frac{34R}{55}. \text{ Esse valor representa}$$

a equivalente total.

**EP20.** Dado:  $U = 100 \text{ V}$ .

- a) Os resistores de  $10 \Omega$  e de  $40 \Omega$  estão em paralelo e sua equivalente vale:

$$\frac{10 \cdot 40}{10 + 40} \Omega = \frac{400}{50} \Omega = 8 \Omega$$

Essa equivalente parcial fica em série com a de  $12 \Omega$ , o que dá a resistência equivalente total de  $8 \Omega + 12 \Omega = 20 \Omega$ .

- b) A corrente na associação é de:

$$U = R_{\text{eq}} \cdot i$$

$$100 = 20 \cdot i \Rightarrow$$

$$\Rightarrow i = 5 \text{ A}$$

- c) No resistor de  $12 \Omega$ , há uma queda de tensão (ddp) de:

$$U_{12} = R_{12} \cdot i = 12 \cdot 5$$

$$U_{12} = 60 \text{ V}$$

Então, para os demais resistores (em paralelo), resta a ddp de  $100 \text{ V} - 60 \text{ V} = 40 \text{ V}$ .

Logo, em cada resistor, temos a corrente valendo:

$$\text{no de } 10 \Omega: U = R_{10} \cdot i_{10} \Rightarrow 40 = 10 \cdot i_{10} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow i_{10} = 4 \text{ A}$$

$$\text{no de } 40 \Omega: U = R_{40} \cdot i_{40} \Rightarrow 40 = 40 \cdot i_{40} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow i_{40} = 1 \text{ A}$$

Verificamos que a soma das correntes calculadas totaliza  $5 \text{ A}$ , que é a corrente da associação.

**EP21.** Dado:  $U_{AB} = 60 \text{ V}$ .

- a) As três resistências em paralelo têm a equivalente valendo:

$$\frac{1}{R_{\text{eq}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{5} + \frac{1}{10} + \frac{1}{5} =$$

$$= \frac{2 + 1 + 2}{10} = \frac{5}{10} = \frac{1}{2}$$

$$\therefore R_{\text{eq}} = 2 \Omega$$

Essa equivalente de  $2 \Omega$  está em série com a de  $18 \Omega$ , totalizando  $20 \Omega$  de resistência equivalente entre  $A$  e  $B$ .

Logo, a corrente na associação tem a intensidade de:

$$U = R_{\text{eq}} \cdot i$$

$$60 = 20 \cdot i \Rightarrow$$

$$\Rightarrow i = 3 \text{ A}$$

- b) A tensão no resistor de  $18 \Omega$  é de:

$$U_{18} = R_{18} \cdot i = 18 \cdot 3$$

$$\therefore U_{18} = 54 \text{ V}$$

- c) A tensão nos resistores que estão em paralelo vale:  
 $60 \text{ V} - 54 \text{ V} = 6 \text{ V}$   
 Assim, a corrente que passa pelo resistor de  $10 \Omega$  tem a intensidade de:

$$U_{10} = R_{10} \cdot i_{10}$$

$$6 = 10 \cdot i_{10} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow i_{10} = 0,6 \text{ A}$$

- d) A potência em cada resistor de  $5 \Omega$  é igual a:

$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{6^2}{5}$$

$$\therefore P = 7,2 \text{ W}$$

### EP22.

- a) O resistor de  $10 \Omega$  está em curto-circuito. Então, as resistências de  $20 \Omega$  e de  $30 \Omega$  ficam em série e totalizam  $50 \Omega$ . Esta fica em paralelo com a de  $50 \Omega$  (na posição vertical), dando a equivalente:

$$\frac{50 \cdot 50}{50 + 50} \Omega = \frac{2500}{100} \Omega = 25 \Omega. \text{ E esta fica em série com a de } 5 \Omega \text{ e com a de } 8 \Omega.$$

Portanto, a resistência equivalente entre  $A$  e  $B$  vale:

$$25 \Omega + 5 \Omega + 8 \Omega = 38 \Omega$$

- b) Os resistores de  $10 \Omega$  e de  $15 \Omega$  estão em curto-circuito. Então, as resistências de  $20 \Omega$  e de  $5 \Omega$  (na vertical) estão em paralelo:  $\frac{20 \cdot 5}{20 + 5} \Omega = \frac{100}{25} \Omega = 4 \Omega$ . E esta fica em série com as resistências de  $1 \Omega$  e de  $5 \Omega$  (lado inferior). Logo, entre  $A$  e  $B$ , temos a equivalente de:  $4 \Omega + 1 \Omega + 5 \Omega = 10 \Omega$ .

- c) Os resistores de  $80 \Omega$  e de  $20 \Omega$  estão em curto-circuito. Assim, há somente as duas resistências de  $10 \Omega$  em paralelo:

$$\frac{10 \cdot 10}{10 + 10} \Omega = \frac{100}{20} \Omega = 5 \Omega$$

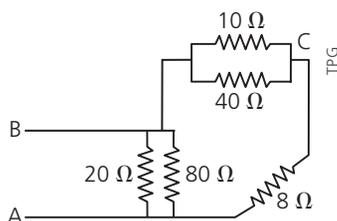
- d) Esse tipo de associação equivale aos três resistores ligados em paralelo:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{36} + \frac{1}{36} + \frac{1}{36} = \frac{3}{36} = \frac{1}{12}$$

$$\therefore R_{eq} = 12 \Omega$$

### EP23. Dado: $U = 80 \text{ V}$ .

- a) Redesenhando o circuito, temos:



A equivalente da associação será de:

$$\text{entre } B \text{ e } C: \frac{10 \cdot 40}{10 + 40} \Omega = \frac{400}{50} \Omega = 8 \Omega$$

entre  $B$  e  $A$ , passando por  $C$ :  $8 \Omega + 8 \Omega = 16 \Omega$

$$\text{entre } A \text{ e } B: \frac{1}{20} + \frac{1}{80} + \frac{1}{16} = \frac{4 + 1 + 5}{80} = \frac{10}{80}$$

Então,  $R_{eq} = 8 \Omega$ .

- b) A seguir, aplicamos  $U = R \cdot i$ , de acordo com cada trecho considerado.

$$\text{A corrente total no circuito é de: } 80 = 8 \cdot i_{total} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow i_{total} = 10 \text{ A}$$

$$\text{A corrente no resistor de } 20 \Omega \text{ é: } 80 = 20 \cdot i_{20} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow i_{20} = 4 \text{ A}$$

A corrente que passa pelo ponto  $C$  vale:

$$80 = 16 \cdot i_c \Rightarrow i_c = 5 \text{ A}$$

Essa corrente passa pelo resistor de  $8 \Omega$ .

Então, reescrevendo:  $i_8 = 5 \text{ A}$ . E a ddp  $U_8$  vale:

$$U_8 = 8 \cdot 5$$

$$U_8 = 40 \text{ V}$$

Isso significa que no resistor de  $10 \Omega$  a ddp é de  $U_{10} = 80 \text{ V} - 40 \text{ V} = 40 \text{ V}$ .

Então, o resistor de  $10 \Omega$  é percorrido por:

$$40 = 10 \cdot i_{10} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow i_{10} = 4 \text{ A}$$

Considerando o nó superior esquerdo do quadrado (que eletricamente é o ponto  $B$ ), temos:

$$i_{total} = i_{20} + i_{10} + i_{curto}$$

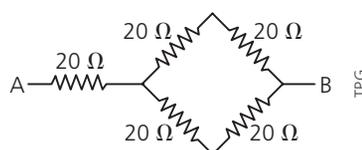
$$10 = 4 + 4 + i_{curto} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow i_{curto} = 2 \text{ A}$$

Essa é a corrente que passa pelo fio de resistência nula.

### EP24. Cada pedaço tem um quinto de $100 \Omega$ , ou seja, $R = 20 \Omega$ .

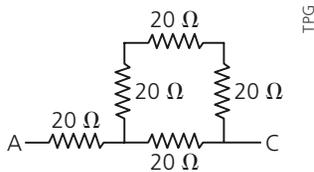
- a) Entre  $A$  e  $B$ , temos o esquema:



Tanto as duas resistências de cima como as duas de baixo estão em série, resultando  $40 \Omega$  cada uma. Essas duas equivalentes parciais de  $40 \Omega$  estão em paralelo:  $\frac{40 \cdot 40}{40 + 40} \Omega = \frac{1600}{80} \Omega = 20 \Omega$ . E estas ficam em série com a de  $20 \Omega$  (à esquerda). Logo, entre A e B temos a equivalente total de:

$$20 \Omega + 20 \Omega = 40 \Omega$$

b) Entre A e C, temos:



Há três resistores em série, em cima:  $20 \Omega + 20 \Omega + 20 \Omega = 60 \Omega$ . Essa equivalente parcial fica em paralelo com a de  $20 \Omega$  (lado inferior do quadrado):  $\frac{60 \cdot 20}{60 + 20} \Omega = \frac{1200}{80} \Omega = 15 \Omega$ . E esta fica em série com outra de  $20 \Omega$  (a mais próxima de A):

$$15 \Omega + 20 \Omega = 35 \Omega$$

**EP25.** Considerando que a diferença de potencial entre os terminais da bateria é igual a  $U$  e que as lâmpadas têm resistência  $R$ , temos os seguintes valores de corrente nos três casos:

Caso 1:  $i = \frac{U}{R}$     Caso 2:  $i = \frac{2U}{R}$     Caso 3:  $i = \frac{U}{2R}$

O brilho das lâmpadas está relacionado com as potências emitidas e, como a potência pode ser determinada por  $P = R \cdot i^2$ , quanto maior a corrente que passa pela lâmpada, maior seu brilho.

A corrente que passará pela lâmpada Q será  $\frac{U}{R}$ , pela lâmpada R,  $\frac{U}{R}$ , pois a corrente é dividida entre os dois resistores; e pela lâmpada S,  $\frac{U}{2R}$ . Portanto,  $P_Q = P_R$  e  $P_R > P_S$ .

Alternativa correta: b

## Atividade prática (p. 128)

### Verificando associações de resistores

Esta atividade tem como objetivo a análise do comportamento da corrente elétrica em um circuito com resistores.

O suporte para pilhas poderá ser encontrado em lojas de componentes eletrônicos, assim como os resistores, a lâmpada incandescente, os fios de cobre e o medidor de corrente (amperímetro) ou multímetro (multiteste), selecionando-o para medição de corrente.

Alerte os estudantes de que, para fazer as medições de corrente no circuito, deve-se abri-lo, conectando a ele o amperímetro em série. A corrente elétrica nunca deve ser medida em paralelo ao circuito, pois isso poderá danificar o instrumento.

Após realizar os procedimentos, peça aos estudantes que discutam as questões da atividade. Veja os comentários para os itens do tópico *Discussão*:

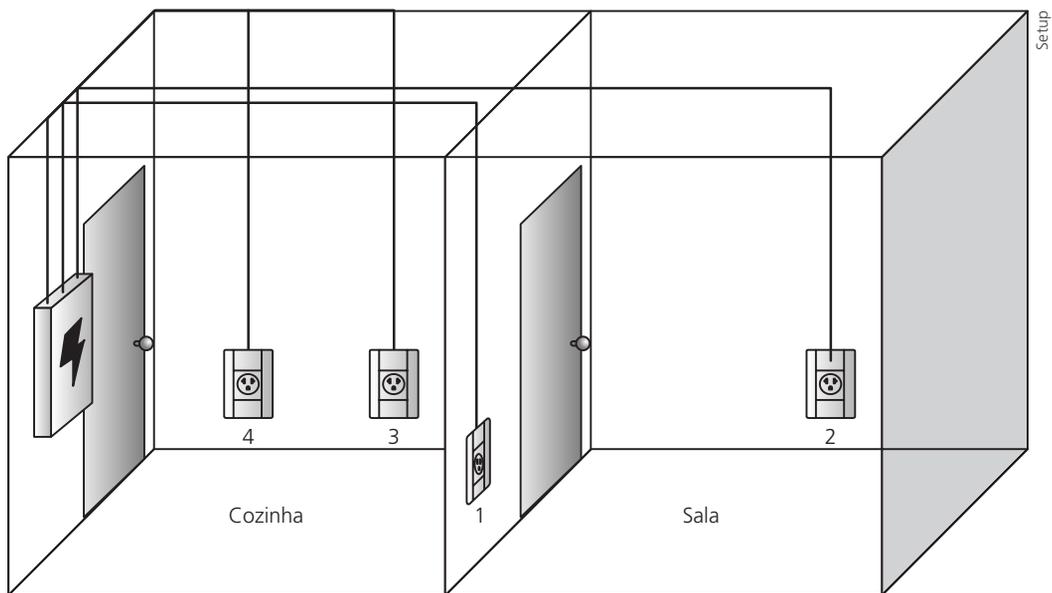
1. A corrente que eles encontrarão em  $\textcircled{A}$  deverá estar próxima de 55 mA. Na série  $\textcircled{B}$ , a corrente encontrada deverá ser aproximadamente a metade da encontrada no circuito  $\textcircled{A}$ , pois a resistência ficou próxima do dobro do valor. Para o circuito  $\textcircled{C}$ , existem três correntes possíveis de serem medidas: a corrente medida entre a saída das pilhas e o nó (ponto comum) que liga os dois resistores e as correntes que percorrem cada resistor. Na primeira teremos uma corrente próxima de 100 mA, e para cada resistor a corrente deverá ser próxima de 50 mA. Isso se dá porque, em uma associação em paralelo de resistores de mesmo valor, a resistência equivalente do circuito cai para a metade do valor de uma das resistências, aumentando assim o valor da corrente total no circuito. Porém, note que o valor de corrente em cada resistor permanece próximo ao do circuito  $\textcircled{A}$ .
2. Repare que não é possível ligar a lâmpada a uma tensão de 6 V, pois ela queimaria rapidamente pelo fato de suportar apenas 2,2 V. A resistência da lâmpada poderá ser estipulada com base na variação de corrente que terá o circuito  $\textcircled{A}$ . Isso poderá ser feito da seguinte maneira: com o valor medido da corrente no circuito, sabe-se o valor de tensão que está aplicada no resistor de 100 ohms. Assim, o valor da tensão na lâmpada será o valor da tensão da fonte menos o valor da tensão no resistor. Finalmente, aplicando a Lei de Ohm com o valor de tensão na lâmpada e a corrente do circuito, teremos o valor de resistência da lâmpada. Caso os estudantes estejam utilizando o multímetro, esse valor de resistência da lâmpada poderá ser comprovado medindo-se diretamente com o próprio instrumento, utilizando a escala de resistência.

## Atividade sugerida

### Protegendo a fiação

A finalidade desta atividade é mostrar aos estudantes que fios condutores de eletricidade também funcionam como resistores, conscientizando-os dos riscos que instalações elétricas podem causar devido ao uso indevido de dispositivos como plugues em “T” ou benjamins. Mostrar também a importância dos disjuntores para a proteção de aparelhos elétricos.

Entregue para cada estudante o modelo a seguir.



Na figura, temos a cozinha e a sala de uma residência. O objetivo é ligar aparelhos elétricos nas tomadas sem causar danos à fiação.

Parte A: Na primeira tabela, estão os dados dos fios que saem da “caixa de força” e chegam a cada tomada. Na segunda, estão os valores de potência que cada fio pode suportar. Assim, localize na primeira tabela a corrente máxima suportada em cada tomada e calcule a potência (todas as tomadas são de 110 V).

RELAÇÃO ENTRE ESPESSURA DO FIO E CORRENTE						
Corrente (A)	17,5	24	32	41	57	76
Bitola (mm <sup>2</sup> )	1,5	2,5	4,0	6,0	10,0	16,0

DIÂMETRO E POTÊNCIA DOS FIOS DE CADA TOMADA				
	Tomada 1	Tomada 2	Tomada 3	Tomada 4
Bitola (mm <sup>2</sup> )	1,5	1,5	2,5	4
Potência (W)	1925	1925	2640	3520

Parte B: Escolha, utilizando as tabelas a seguir, que aparelhos elétricos serão ligados em cada tomada. Para aqueles que forem escolhidos, coloque o número da tomada na terceira coluna. A tabela está com valores exemplificados (nos números das tomadas).

Equipamentos — sala	Potência (W)	Tomada
Computador	180	1
TV 40"	150	1
Ventilador pequeno	65	2
Aquecedor	1 550	2
Conversor	15	1
Rádio	45	2
DVD	50	1
Home theater	40	1

Equipamentos — cozinha	Potência (W)	Tomada
Batedeira	120	4
Liquidificador	300	4
Micro-ondas	1 200	4
Geladeira	300	4
Lava-louças	1 500	3
Multiprocessador	420	3
Ferro de passar	1 000	3
Espremedor de frutas	65	3

Parte C: Considerando o preenchimento da tabela, responda à questão a seguir.

Que potência total será verificada em cada tomada? Some os valores das potências dos aparelhos em cada tomada.

Tomada	1	2	3	4
Potência (W)				

Questões para discussão:

1. A fiação para cada tomada suportará a corrente requisitada? Por quê?

*Resposta considerando o exemplo da tabela: Não todas. A tomada 3 não suportará porque as potências de funcionamento dos aparelhos nela ligados irão exigir uma intensidade de corrente elétrica maior que a suportada pelo fio.*

2. É bem provável que você tenha ligado mais de um aparelho em cada tomada. O que usamos para ligar mais de um aparelho na tomada? O uso desse objeto pode ser um risco para a instalação elétrica? Por quê?

*Resposta possível: Em geral, é usado um benjamim ou um plugue "T". Ambos podem causar riscos à instalação, pois, ligando-se muitos aparelhos em um mesmo benjamim ou plugue "T", a fiação fica sobrecarregada, o que pode aquecê-la demasiadamente e causar um curto-circuito.*

3. Qual deve ser o valor do disjuntor que representa a chave geral da casa? Você colocaria mais disjuntores? Justifique suas respostas.

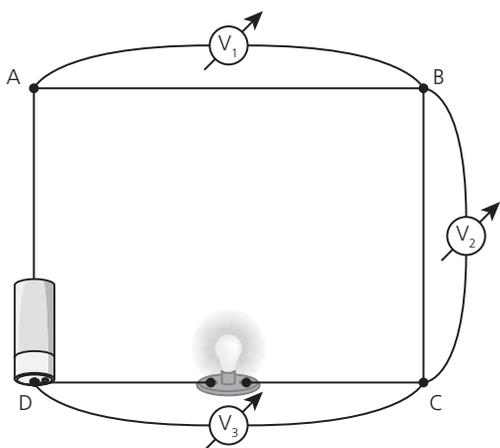
*Resposta considerando o exemplo da tabela: Somando as correntes máximas suportadas pelos fios das quatro tomadas, temos 91 A. Assim, como garantia, o disjuntor deveria ter um valor pouco menor que esse. Seria melhor instalar um disjuntor para cada tomada ou cômodo porque, no caso de algum problema elétrico, somente ele se desarmaria, ao passo que, se tivéssemos apenas um disjuntor, a casa toda ficaria sem energia elétrica, além de dificultar a localização do problema.*

## Atividade introdutória

Para esta atividade, sugerimos que o professor leve uma ou mais caixas de lâmpadas e peça aos estudantes que identifiquem os principais dados que se deve observar ao comprar um equipamento que será ligado na eletricidade.

Entre as respostas possíveis, os estudantes devem destacar a potência e a tensão. Dessa forma, diga aos estudantes que os estudos começarão pela tensão, também conhecida como diferença de potencial (ddp), e enfatize bem o termo “diferença”.

Desenhe um circuito com um gerador, uma lâmpada e três voltmíetros ligados ao circuito, como abaixo:



Um dos voltmíetros deve estar ligado aos pontos A e B, outro aos pontos B e C e o último aos pontos C e D. Após a construção determine uma tensão para o gerador e responda às perguntas.

1. Quais valores de tensão serão lidos nos três voltmíetros?

*Resposta esperada:*  $V_1 = 0\text{ V}$ ,  $V_2 = 0\text{ V}$  e  $V_3 = \text{voltagem do gerador}$ .

2. Por quê?

*Resposta esperada:* Nos pontos A, B e C passam o mesmo potencial elétrico, diferentemente do ponto D.

3. Qual a relação entre esses valores e o termo “diferença de potencial”?

*Resposta esperada:* Só existe tensão entre dois pontos pelos quais passem elétrons com diferentes potenciais elétricos, daí o nome ddp, diferença de potencial.

## Resolução dos exercícios propostos (p. 143)

**EP1.** Dados:  $R_g = 297\ \Omega$ ;  $i_g = 10\text{ mA} = 0,01\text{ A}$ ;  
 $R_s = 3\ \Omega$ .

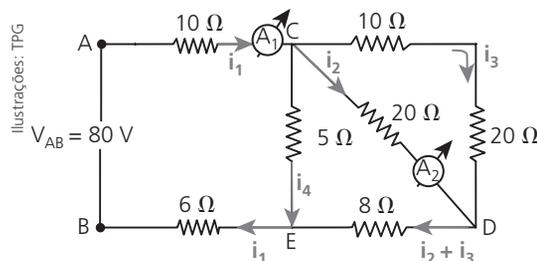
O dispositivo é um amperímetro e o valor máximo da corrente elétrica que ele pode medir é expresso por:

$$i = \left(1 + \frac{R_g}{R_s}\right) \cdot i_g$$

$$i = \left(1 + \frac{297}{3}\right) \cdot 0,01 \Rightarrow i = (100) \cdot 0,01$$

$$\therefore i = 1\text{ A}$$

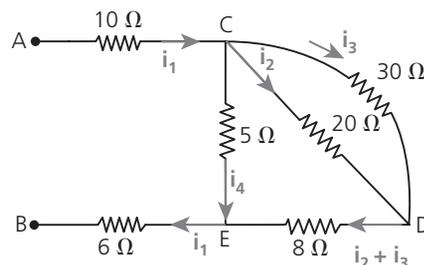
**EP2.** Pela figura, o amperímetro  $A_1$  é percorrido pela corrente  $i_1$  e  $A_2$  por  $i_2$ . A ddp entre os pontos A e B vale:  $U_{AB} = 80\text{ V}$ .



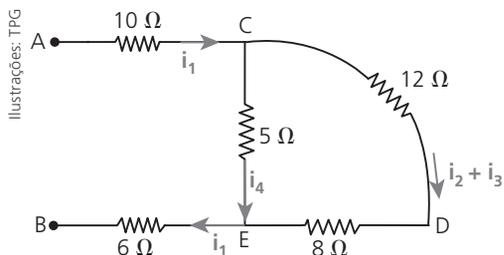
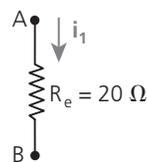
No ponto C, temos:

$$i_1 = i_2 + i_3 + i_4$$

Vamos resolver, por parte, os circuitos simples, associados em série ou em paralelo, até obtermos o resistor equivalente entre os terminais A e B da associação. Inicialmente, entre os pontos C e D, os dois resistores estão associados em série, resultando uma resistência equivalente de  $10\ \Omega + 20\ \Omega = 30\ \Omega$ .



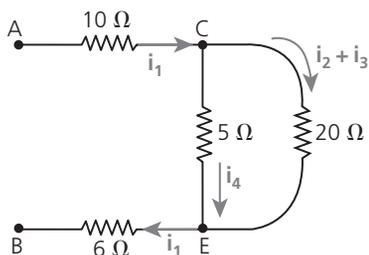
Ainda entre os pontos  $C$  e  $D$ , os resistores de  $20\ \Omega$  e  $30\ \Omega$  estão associados em paralelo, resultando uma equivalente de:  $\frac{20 \cdot 30}{20 + 30}\ \Omega = 12\ \Omega$ .



De acordo com a Primeira Lei de Ohm:

$$U_{CD} = 12 \cdot (i_2 + i_3) \quad (I)$$

Entre os pontos  $C$  e  $E$ , as resistências de  $12\ \Omega$  e  $8\ \Omega$  estão em série, resultando uma equivalente de  $20\ \Omega$ .



Na figura, conforme a Primeira Lei de Ohm, temos:

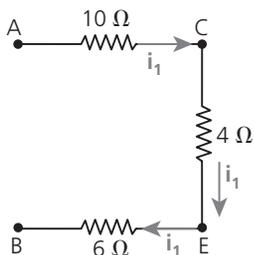
$$U_{CE} = 5 \cdot i_4 \quad (II)$$

e

$$U_{CE} = 20 \cdot (i_2 + i_3) \quad (III)$$

Resolvendo a associação em paralelo dos resistores entre os pontos  $C$  e  $E$ , temos:

$$\frac{5 \cdot 20}{5 + 20}\ \Omega = 4\ \Omega$$



Nesta figura, de acordo com a Primeira Lei de Ohm, podemos escrever:

$$U_{CE} = 4 \cdot i_1 \quad (IV)$$

E, finalmente, entre os terminais  $A$  e  $B$ , os três resistores estão associados em série, resultando em uma resistência equivalente final de  $R_e = 10 + 4 + 6 = 20\ \Omega$ .

Pela Primeira Lei de Ohm, temos:

$$U_{AB} = R_e \cdot i_1$$

$$80 = 20 \cdot i_1 \Rightarrow$$

$\Rightarrow i_1 = 4\ \text{A}$ , que é a indicação do amperímetro  $A_1$ .

Substituindo  $i_1 = 4\ \text{A}$  na igualdade (IV), obtemos:

$$U_{CE} = 4 \cdot i_1 = 4 \cdot 4 = 16\ \text{V}$$

$$\text{Da igualdade (II): } U_{CE} = 5 \cdot i_4$$

$$16 = 5 \cdot i_4 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow i_4 = 3,2\ \text{A}$$

$$\text{Da igualdade (III): } U_{CE} = 20 \cdot (i_2 + i_3)$$

$$16 = 20 \cdot (i_2 + i_3) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow (i_2 + i_3) = 0,8\ \text{A}$$

$$\text{Da igualdade (I): } U_{CD} = 12 \cdot (i_2 + i_3) = 12 \cdot 0,8 \Rightarrow U_{CD} = 9,6\ \text{V.}$$

A primeira figura nos mostra que o resistor de  $20\ \Omega$  é percorrido pela corrente de intensidade  $i_2$ . Portanto, aplicando a Primeira Lei de Ohm nesse resistor:

$$U_{CD} = 20 \cdot i_2$$

$$9,6 = 20 \cdot i_2$$

$i_2 = 0,48\ \text{A}$ , que é a indicação do amperímetro  $A_2$ .

**EP3.** Dados:  $R_g = 20\ \Omega$ ;  $i_g = 2\ \text{mA} = 2 \cdot 10^{-3}\ \text{A}$ ;

$$U = 100\ \text{V.}$$

A resistência associada em série com o galvanômetro é chamada multiplicadora ( $R_m$ ) e o conjunto é denominado voltímetro, cuja expressão é:  $U = \left(1 + \frac{R_m}{R_g}\right) \cdot U_g$ .

Pela Primeira Lei de Ohm:

$$U_g = R_g \cdot i_g = 20 \cdot 2 \cdot 10^{-3} = 4 \cdot 10^{-2}\ \text{V}$$

$$\text{Portanto, } 100 = \left(1 + \frac{R_m}{20}\right) \cdot 4 \cdot 10^{-2}$$

$$\frac{10^2}{4 \cdot 10^{-2}} = 1 + \frac{R_m}{20}$$

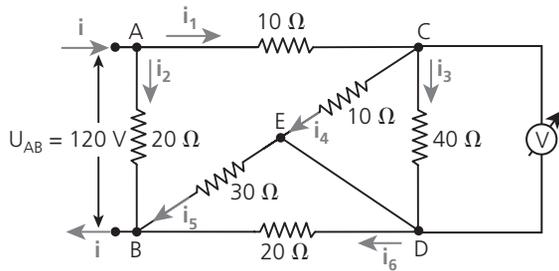
$$0,25 \cdot 10^4 - 1 = \frac{R_m}{20}$$

$$2500 - 1 = \frac{R_m}{20}$$

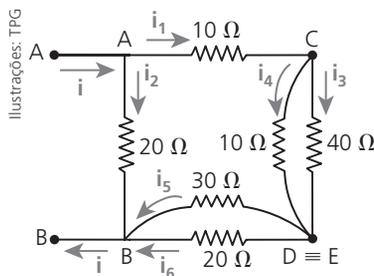
$$2499 = \frac{R_m}{20} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow R_m = 49980\ \Omega$$

**EP4.** O voltímetro vai indicar a ddp entre os pontos C e D,  $U_{CD}$ . Inicialmente, vamos resolver a associação dada eliminando os circuitos mais simples, conforme segue.



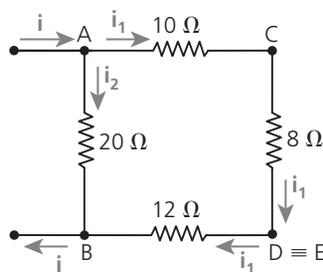
Os pontos D e E estão em curto-circuito, ou seja, estão sob o mesmo potencial elétrico. Portanto, a figura a seguir é coincidente.



Resolvendo as associações de resistores em paralelo, respectivamente, entre:

os pontos C e D  $\equiv$  E:  $\frac{10 \cdot 40}{10 + 40} \Omega = 8 \Omega$  e os pontos

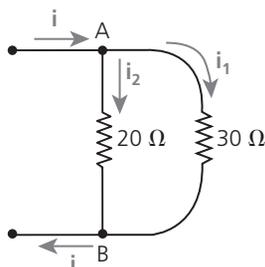
D  $\equiv$  E e B:  $\frac{30 \cdot 20}{30 + 20} \Omega = 12 \Omega$ , temos a seguinte figura:



Por essa figura e de acordo com a Primeira Lei de Ohm:  $U_{CD} = 8 \cdot i_1$  (I)

Os três resistores associados em série resultam:

$$10 + 8 + 12 = 30 \Omega$$



Conforme a Primeira Lei de Ohm, temos:

$$U_{AB} = 30 \cdot i_1$$

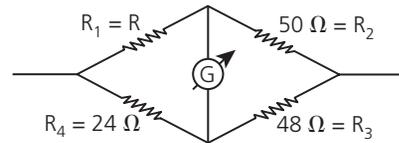
$$120 = 30 \cdot i_1 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow i_1 = 4 \text{ A (II)}$$

Substituindo (II) em (I), obtemos a indicação do voltímetro V:  $U_{CD} = 8 \cdot 4$

$$U_{CD} = 32 \text{ V}$$

**EP5.** Se o galvanômetro não é atravessado por corrente elétrica, a ponte de Wheatstone está em equilíbrio.



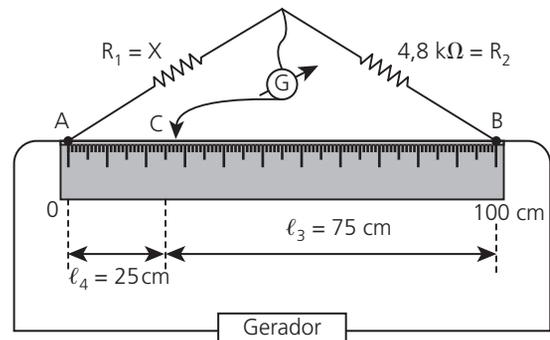
Portanto, os produtos das resistências opostas do losango são iguais, ou seja:

$$R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_4$$

$$R \cdot 48 = 50 \cdot 24$$

$$\therefore R = 25 \Omega$$

**EP6.** A ponte de fio estará em equilíbrio quando o cursor C estiver na posição indicada na figura.



Com a ponte de fio em equilíbrio, temos:

$$R_1 = R_2 \cdot \frac{\ell_4}{\ell_3}$$

$$X = 4,8 \cdot \frac{25}{75} \Rightarrow X = 1,6 \text{ k}\Omega$$

**EP7.** Dados:

$$U_{AB} = 12 \text{ V}; i = 10 \text{ A}; R_{\text{amp}} = 0,1 \Omega;$$

$$R_{\text{volt}} = 1200 \Omega.$$

a) O voltímetro está associado em paralelo com a resistência R, portanto marca exatamente a ddp entre os terminais A e B, ou seja,  $U_{AB} = 12 \text{ V}$ .

b) De acordo com a Primeira Lei de Ohm:

$$U_{AB} = R_{\text{volt}} \cdot i_2 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 12 = 1200 \cdot i_2 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow i_2 = 0,01 \text{ A}$$

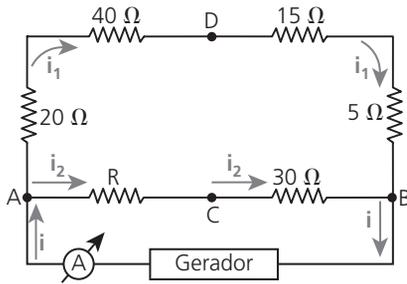
Como  $i = i_1 + i_2$

$10 = i_1 + 0,01 \Rightarrow i_1 = 9,99 \text{ A}$

- c) Também pela primeira Lei de Ohm:  $U_{AB} = R \cdot i_1$   
 $12 = R \cdot 9,99 \Rightarrow R \cong 1,2 \Omega$

**EP8.**

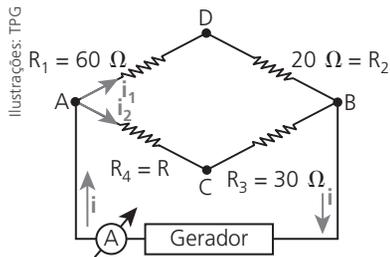
- a) Como o galvanômetro não é atravessado por corrente elétrica, podemos retirá-lo do circuito. De acordo com o enunciado, a intensidade de corrente que atravessa o amperímetro ideal A é  $i = 5 \text{ A}$ .



O esquema, nessas condições, corresponde ao da ponte de Wheatstone camuflada, portanto, podemos redesenhá-la já com as resistências equivalentes, em série, existentes entre os pontos A e D:

$R_1 = 20 \Omega + 40 \Omega = 60 \Omega$  e os pontos D e E:

$R_2 = 15 \Omega + 5 \Omega = 20 \Omega$

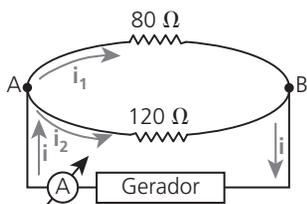


Da expressão da ponte em equilíbrio, temos:

$R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_4$

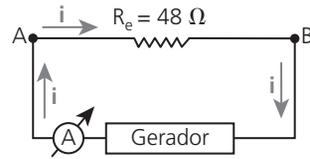
$60 \cdot 30 = 20 \cdot R \Rightarrow R = 90 \Omega$

- b) Entre os pontos A e B temos associados em série  $R_1$  e  $R_2$ , com resistência equivalente  $60 \Omega + 20 \Omega = 80 \Omega$ , e também  $R_3$  e  $R_4 = R$ , cujo resistor equivalente vale:  $30 \Omega + 90 \Omega = 120 \Omega$ .



Finalmente, os dois resistores estão associados em paralelo.

Portanto:  $R_e = \frac{80 \cdot 120}{80 + 120} \Rightarrow R_e = 48 \Omega$



- c) A ddp fornecida pelo gerador é:  
 $U_{AB} = R_e \cdot i = 48 \cdot 5 \Rightarrow U_{AB} = 240 \text{ V}$   
 d) A potência dissipada pelo resistor R é:  $P = R \cdot i_2^2$ ,  
 em que  $i_2 = \frac{U_{AB}}{120} = \frac{240}{120} = 2 \text{ A}$   
 Assim,  $P = 90 \cdot (2)^2 \Rightarrow P = 360 \text{ W}$

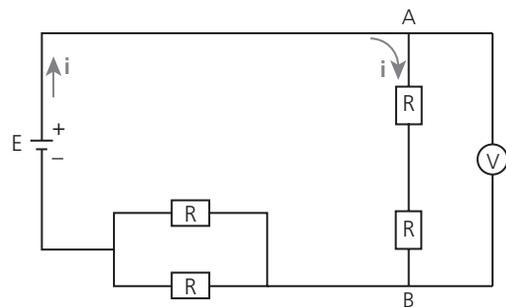
**EP9.** Devemos procurar a situação em que o amperímetro tenha uma leitura de 2 A. A resistência equivalente do circuito é de:  $\frac{5R}{2}$ . Portanto, a corrente do circuito é de:

$U = R_{eq} \cdot i \Rightarrow U = \frac{5R}{2} \cdot i \Rightarrow 10 = \frac{5 \cdot 2}{2} \cdot i \Rightarrow i = 2 \text{ A}$

Portanto, a situação procurada será aquela em que o amperímetro está em série com os resistores.

Alternativa correta: e

**EP10.** Na condição proposta, teríamos a seguinte figura:



Do exercício anterior, sabemos que  $i = 2 \text{ A}$ . Portanto, de acordo com a Primeira Lei de Ohm:

$U_{AB} = (R + R) \cdot i = (2 + 2) \cdot 2 \Rightarrow U_{AB} = 8 \text{ V}$

**Outras palavras (p. 141)**

**Multímetro**

Esta atividade deve ser realizada na sala de aula. Vamos fazer uso de alguns dos aparelhos de medição elétrica vistos neste capítulo.

Forme grupos de 4 a 5 estudantes. Peça aos estudantes que montem os circuitos, mas não os conectem à fonte. Peça que verifiquem se as ligações estão cor-

retas. Antes de tomar as medidas solicitadas, questione qual escala deve ser utilizada em cada aparelho, e sua respectiva imprecisão.

Veja a resolução das questões desta seção.

1. Leitura no multímetro: 110  
Fundo de escala: 10 V  
Portanto, a leitura é  $110 \cdot 10 = 1\,100\text{ V}$   
Incerteza: 0,1 V
2. Leitura no multímetro: 4,4  
Fundo de escala: 250 V  
Portanto, a leitura é  $4,4 \cdot 250 = 1\,100\text{ V}$   
Incerteza: 2,5 V

## Atividade prática (p. 142)

### Utilizando aparelhos de medição elétrica

Esta atividade dedica-se à manipulação de instrumentos de medição elétrica e poderá ser realizada no laboratório ou na própria sala de aula.

Para montagem dos circuitos, poderá ser utilizada a placa montada na atividade prática do capítulo 9.

Solicite aos estudantes que iniciem as atividades descritas no procedimento, orientando-os para a melhor maneira de medir com cada instrumento. Para medir com o voltímetro, é necessário que o circuito já esteja ligado e a medição deve ser feita associando-o

em paralelo entre os pontos pelos quais se deseja saber a tensão. Para medir com o amperímetro, é necessário que o circuito também já esteja ligado, inserindo-o em série no trecho do circuito onde se deseja saber a intensidade de corrente. Para medir com o ohmímetro, deve-se retirar o resistor do circuito e medi-lo separadamente.

É possível conhecer o valor teórico da resistência do resistor mediante a análise dos anéis coloridos pintados em seu corpo. No item 3, solicite aos estudantes que comparem o valor medido com a tabela de cores fornecida no livro.

Caso você não tenha nenhum dos instrumentos de medição solicitados para a atividade, use um multímetro, no qual deverá selecionar a função desejada.

Veja os comentários para os itens do tópico *Discussão*:

1. a) A tensão real será dada pela leitura do voltímetro, mas deve ser um valor próximo de 1,5 V.  
b) Resposta pessoal.  
c) A soma da tensão nos voltímetros  $V_1$  e  $V_2$  deve ser igual à tensão da bateria.
2. a) Sim, medindo-se com o resistor, mede-se a tensão nele. Sem ele, a medida é a ddp da bateria.  
b) Resposta pessoal, depende do resistor utilizado.
3. O valor no ohmímetro é o valor real; o nominal é o esperado, mas com uma incerteza; e o obtido pela equação é o ideal.

## Capítulo 11

## Geradores e receptores elétricos

### Atividade introdutória

#### Discutindo os encargos elétricos

Esta atividade tem como objetivo levar ao conhecimento dos estudantes aquilo que se paga na “conta de luz” (conta de energia elétrica), tomando como base o boleto de cobrança, no qual já estão inclusos os encargos (impostos), para diversas faixas de consumo.

Atualmente as concessionárias disponibilizam informações sobre os valores cobrados na própria conta de energia da região. Dados atualizados sobre concessionárias, encargos e situação energética do país

podem ser obtidos acessando o *site* da Agência Nacional de Energia Elétrica — ANEEL: <[www.aneel.gov.br/](http://www.aneel.gov.br/)>. Acesso em: 24 fev. 2016. Nele são encontrados os valores das tarifas do kWh e dos impostos de cada concessionária do país.

Para as questões que orientarão discussões sobre o tema, inserimos outras informações apenas no sentido de ajudar na atividade.

1. Com base na conta de energia elétrica de uma concessionária brasileira a seguir, identifique no quadro os valores ou informações correspondentes ao que se pede:

**Leituras**  
 Anterior: 19/10/2018  
 Atual: 18/11/2018  
 Próxima: 17/12/2018  
 Data: 19/10/2018  
 Leitura (kWh): 2088  
 Leitura (Qh/kVarh): 2189

**Histórico/Gráfico de Consumo**

Mês/Ano	Nº Dias	Ocorrência	kWh/Mês	kWh/Dia	Mês/Ano	Nº Dias	Ocorrência	kWh/Mês	kWh/Dia
11/2018	30	LIDO	1015	33,66	05/2018	32	LIDO	1100	34,37
10/2018	32	LIDO	920	28,75	04/2018	30	LIDO	1130	37,66
09/2018	30	LIDO	1120	37,33	03/2018	29	LIDO	1130	38,96
08/2018	32	LIDO	1900	59,37	02/2018	29	LIDO	870	30,00
07/2018	29	LIDO	1320	45,52	01/2018	33	LIDO	940	28,48
06/2018	30	LIDO	1370	45,66	12/2017	29	LIDO	1020	35,17

Fator de Multiplicação 10  
 Maior consumo 12 meses (kWh): 1900  
 Média dos últimos 3 meses (kWh): 1016,67  
 Consumo Médio Diário (kWh): 33,66  
 Período de Consumo: de 19/10/2018 a 18/11/2018  
 Data da Apresentação: 25/11/2018

**Tributos (incluídos) no Total a Pagar:**

	Base de Cálculo(R\$)	Alíquota(%)	Valor(R\$)
ICMS	417,12	12/25	97,32
PIS/PASEP			3,42
COFINS			15,68

**Reservado ao fisco:**  
 0453.6204.D9F5.E354.D3FA.16A4.018F.71A6

**PAGAMENTO EM ATRASO:**  
 Multa 2% + Correção Monetária pelo INPC (pro rata die) + Juros de mora 1% ao mês (pro rata die) a serem cobrados em fatura posterior.

**Classe de Consumo**  
 RESIDENCIAL-TRIFASICO

**ITENS FATURADOS**

**Consumo de Energia Elétrica**

Faixa de consumo	Quantidade na faixa	Tarifa (R\$/kWh)	Valor (R\$)
CONSUMO	150	0,356866	53,53
CONSUMO	860	0,422779	363,59
<b>Total - Preço (1)</b>			<b>417,12</b>

**Outras Cobranças**

COSIP	20,57
<b>Total - Outros (2)</b>	<b>20,57</b>

**Total a pagar (R\$)** **437,69**

**Composição Valor Faturado R\$ (Art.31, resolução 166/2005-ANEEL)**

DISTRIBUICAO	87,84	TRANSMISSAO	27,40
ENC. SETORIAIS	29,11	TRIBUTOS	116,42
ENERGIA	156,35	Soma Demonstrativo	417,12
<b>Valor Total a Pagar (R\$)</b>		<b>437,69</b>	

Vencimento 07/12/2018

83660000004-3 37690162000-9 00101002009-5 37960216964-9

Classe de consumo (residencial, comercial, industrial)	
Tipo de faturamento (monofásico, bifásico, trifásico)	
Data da apresentação da conta	
Data de vencimento da conta	
Consumo de energia (kWh)	
Composição valor faturado (R\$)	
Base de cálculo do ICMS (%)	
Valor da conta (R\$)	

- Qual é a unidade de medida do consumo de energia elétrica e que grandezas ela envolve?  
*Resposta possível: O consumo de energia elétrica é medido em kWh, envolvendo as grandezas: potência, medida em kW (quilowatt), e tempo, medido em h (hora).*
- Com base nos valores de tensão medidos, discuta por que chamamos as tensões de 110 V

ou 220 V. Devemos lembrar sempre que tensão, tecnicamente, corresponde à diferença de potencial elétrico (U).  
*Resposta possível: 110 V e 220 V não correspondem exatamente aos valores das tensões das tomadas, muito menos aos valores nominais disponibilizados na conta, nem são valores máximo e mínimo. Assim, 110 V e 220 V são meramente denomina-*

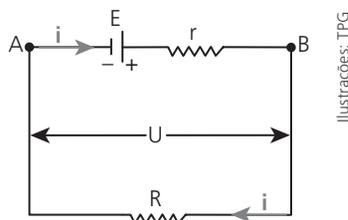
ções popularmente dadas para identificar tomadas caseiras e que servem apenas para plugar corretamente aparelhos elétricos na tensão correta.

4. Qual é a composição de gastos da conta? Como são calculados seus valores?

Resposta possível: Os gastos são compostos de fornecimento (energia + distribuição + transmissão) e impostos. O valor do fornecimento é o gasto de energia em kWh multiplicado pela tarifa da concessionária, e os impostos são PIS/Pasep, Cofins, ICMS e Cosip; na conta, é esclarecido o cálculo do ICMS, que se compõe das seguintes parcelas: 12% sobre o consumo dos primeiros 150 kWh, 25% sobre os demais 860 kWh. Observe que o consumo também é uma soma de várias parcelas, entre serviços e impostos.

## Resolução dos exercícios propostos (p. 161)

EP1. Dados:  $E = 80 \text{ V}$ ;  $r = 5 \Omega$ ;  $U = 60 \text{ V}$ .



- a) De acordo com a equação do gerador:  $U = E - r \cdot i$   
 $60 = 80 - 5 \cdot i$   
 $5 \cdot i = 20 \Rightarrow$   
 $\Rightarrow i = 4 \text{ A}$
- b) Aplicando a Primeira Lei de Ohm entre os terminais A e B, temos:  
 $U = R \cdot i$   
 $60 = R \cdot 4 \Rightarrow$   
 $\Rightarrow R = 15 \Omega$
- c) O rendimento do gerador é expresso por:  
 $\eta = \frac{U}{E} = \frac{60}{80} = 0,75$  ou, percentualmente:  
 $\eta_{\%} = 75\%$

EP2.

1. Alternativa correta: b  
 A queda-d'água faz girar a turbina do gerador, transformando energia cinética em elétrica.
2. Alternativa correta: e  
 Dados:  $\eta = 0,9$ ;  $P = 512 \cdot 10^6 \text{ W}$  (potência útil instalada);  $h = 120 \text{ m}$  (altura da queda-d'água).

A potência total ( $P_t$ ) gerada é cerca de:

$$\eta = \frac{P}{P_t}$$

$$0,9 = \frac{512 \cdot 10^6}{P_t} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow P_t = 569 \cdot 10^6 \text{ W}$$

Da definição de potência (quantidade de energia por intervalo de tempo), temos  $P_t = \frac{E_p}{\Delta t}$ , em que

$E_p = m \cdot g \cdot h$  é a quantidade de energia potencial da água antes da queda.

Como a densidade volumétrica é expressa por:

$$d = \frac{m}{V}, \text{ obtemos } m = d \cdot V, \text{ e podemos escrever}$$

o cálculo da energia potencial da seguinte forma:

$$E_p = d \cdot V \cdot g \cdot h. \text{ Assim, a definição de potência fica:}$$

$$P_t = \frac{d \cdot V \cdot g \cdot h}{\Delta t}. \text{ Ao quociente } \frac{V}{\Delta t} = \phi \text{ denomina-$$

mos de vazão, que queremos determinar.

$$P_t = d \cdot \phi \cdot g \cdot h \Rightarrow \phi = \frac{P_t}{d \cdot g \cdot h}$$

Sabe-se que a densidade da água vale  $d = 1 \text{ g/cm}^3 = 10^3 \text{ kg/m}^3$ ;  $g = 10 \text{ m/s}^2$  e  $h = 120 \text{ m}$ .

$$\text{Portanto, } \phi = \frac{569 \cdot 10^6}{10^3 \cdot 10 \cdot 120} = \frac{569 \cdot 10^6}{120 \cdot 10^4} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \phi \cong 4,75 \cdot 10^2 \text{ m}^3/\text{s} = 4,75 \cdot 10^2 \cdot 10^3 \text{ L/s} =$$

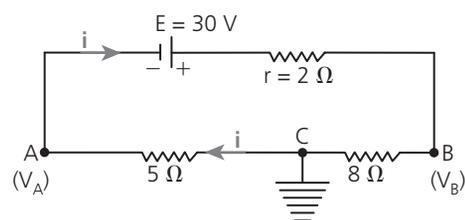
$$= 4,75 \cdot 10^5 \text{ L/s, ou seja, a vazão é cerca de}$$

475 000 L/s. A alternativa que mais se aproxima desse valor é 500 000 litros por segundo.

3. Alternativa correta: d

Durante o processo de obtenção de eletricidade, entre as transformações apresentadas, primeiro ocorre a transformação II, em que a água cai de uma altura  $h$  para movimentar a turbina, e em seguida ocorre a transformação I, na qual a turbina gira fornecendo energia cinética para o gerador, que a converte em energia elétrica.

EP3. No circuito apresentado, sabe-se que o ponto C está ligado à terra, portanto seu potencial elétrico é nulo ( $V_C = 0$ ).



Vamos determinar a intensidade de corrente elétrica que percorre o circuito, valendo-nos da Lei de Ohm-Pouillet:

$$E = (R_e + r) \cdot i$$

$$30 = (8 + 5 + 2) \cdot i \Rightarrow$$

$$\Rightarrow i = 2 \text{ A}$$

Da Primeira Lei de Ohm (no sentido de percurso da corrente), temos:

$$U_{CA} = 5 \cdot i = 5 \cdot 2 = 10 \text{ V, sendo } U_{CA} = V_C - V_A$$

$$10 = 0 - V_A$$

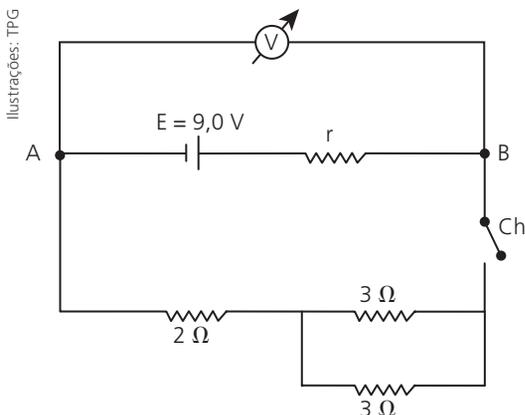
$$V_A = -10 \text{ V}$$

$$U_{BC} = 8 \cdot i = 8 \cdot 2 = 16 \text{ V, sendo } U_{BC} = V_B - V_C \Rightarrow$$

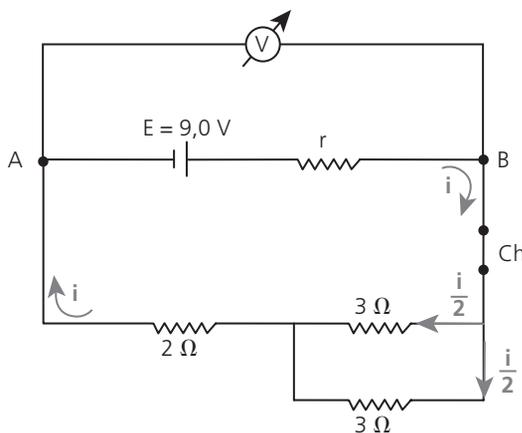
$$\Rightarrow 16 = V_B - 0 \Rightarrow V_B = 16 \text{ V}$$

**EP4.** Dados: com a chave aberta, o voltímetro marca  $U_{AB} = 9,0 \text{ V}$ ; com a chave fechada,  $U_{AB} = 7,0 \text{ V}$ .

a) Com a chave Ch aberta, o circuito não é percorrido por corrente elétrica. Portanto:  $U_{AB} = E = 9,0 \text{ V}$ .

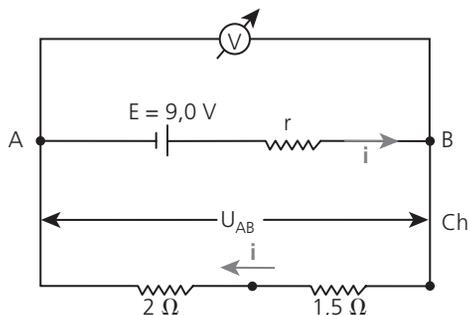


b) Com a chave Ch fechada, o circuito é percorrido pela corrente elétrica de intensidade  $i$ , como mostra a figura. Nessas condições, o voltímetro indica  $U_{AB} = 7,0 \text{ V}$ .



Os dois resistores de  $3 \Omega$  estão associados em paralelo; sua resistência equivalente é:

$\frac{3\Omega}{2} = 1,5 \Omega$ . Essa resistência está associada em série com a de  $2 \Omega$ , resultando  $R_e = 2 \Omega + 1,5 \Omega = 3,5 \Omega$ , o valor da resistência equivalente entre os pontos A e B.



Da Primeira Lei de Ohm,  $U_{AB} = R_e \cdot i$ , obtemos

$$i = \frac{U_{AB}}{R_e} = \frac{7,0}{3,5}$$

$$\therefore i = 2,0 \text{ A}$$

c) Pela equação do gerador, podemos obter o valor da sua resistência interna:

$$U_{AB} = E - r \cdot i$$

$$7,0 = 9,0 - r \cdot 2,0$$

$$r \cdot 2,0 = 2,0$$

$$\therefore r = 1 \Omega$$

d) Da expressão do rendimento do gerador:

$$\eta = \frac{U_{AB}}{E} = \frac{7,0}{9,0} \cong 0,778 \text{ ou, percentualmente:}$$

$$\eta_{\%} = 77,8\%$$

e) O resistor de  $2 \Omega$  dissipa uma potência elétrica de:

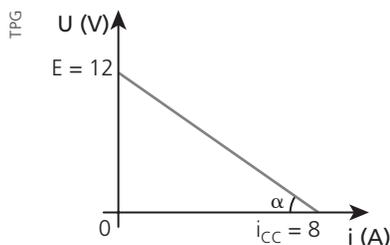
$$P = 2 \cdot i^2 = 2 \cdot (2,0)^2$$

$$\therefore P = 8,0 \text{ W}$$

**EP5.** No caso, a bateria de automóvel corresponde a um gerador.

a) Representa a corrente de curto-circuito da bateria. A corrente  $i_{cc} = 8 \text{ A}$  só ocorre quando uma resistência nula é conectada nos terminais da bateria, sendo portanto a máxima corrente que pode percorrê-la.

b) No diagrama  $U \times i$ , o coeficiente angular da reta representa numericamente (em módulo) o valor da resistência interna  $r$  do gerador.



Ou seja,  $\operatorname{tg} \alpha \stackrel{N}{=} r \Rightarrow r = \frac{12}{8} \Rightarrow r = 1,5 \Omega$ .

- c) Genericamente, a equação do gerador é:  $U = E - r \cdot i$ ; numericamente, basta substituir os valores da fem e da resistência interna, resultando:  $U = 12 - 1,5 \cdot i$ .
- d) Conectando-se um resistor de resistência  $R = 8,5 \Omega$  à bateria, a intensidade de corrente elétrica que percorre o circuito é, de acordo com a Lei de Ohm-Pouillet:
- $$E = (R + r) \cdot i$$
- $$12 = (8,5 + 1,5) \cdot i \Rightarrow$$
- $$\Rightarrow i = 1,2 \text{ A}$$

#### EP6.

- a) Comparando a equação dada com a equação geral,  $U = E - r \cdot i$ , concluímos que:  $E = 30 \text{ V}$  e  $r = 5 \Omega$ . Quando ligamos um resistor de resistência desprezível aos terminais do gerador, esse resistor é percorrido pela corrente de curto-circuito. Nessas condições, os terminais estão sob o mesmo potencial elétrico, ou seja, a ddp é nula ( $U = 0$ ). Assim, de acordo com a equação dada:
- $$U = 30 - 5 \cdot i$$
- $$0 = 30 - 5 \cdot i_{cc}$$
- $$5 \cdot i_{cc} = 30$$
- $$\therefore i_{cc} = 6 \text{ A}$$
- b) A expressão da potência elétrica que o gerador lança ao circuito é:  $P = E \cdot i - r \cdot i^2$ . Quando uma lâmpada de  $40 \text{ W}$  é ligada em seus terminais (o gerador precisa dessa potência para acendê-la), a intensidade de corrente que nele circula é:
- $$40 = 30 \cdot i - 5 \cdot i^2$$
- $$5 \cdot i^2 - 30 \cdot i + 40 = 0 \quad (:5)$$
- $$i^2 - 6 \cdot i + 8 = 0$$
- Resolvendo a equação do segundo grau, obtemos:
- $$i_1 = 2 \text{ A} \text{ ou } i_2 = 4 \text{ A}.$$

#### EP7.

- a) Genericamente, a expressão da potência lançada por um gerador é:  $P = E \cdot i - r \cdot i^2$ . Por comparação com a expressão numérica dada, obtemos:  $E = 16 \text{ V}$  e  $r = 2 \Omega$ .

A máxima potência lançada por um gerador é:

$$P_{\text{máx}} = \frac{E^2}{4r}. \text{ Portanto,}$$

$$P_{\text{máx}} = \frac{(16)^2}{4 \cdot 2}$$

$$\therefore P_{\text{máx}} = 32 \text{ W}$$

- b) A intensidade da corrente de curto-circuito é:

$$i_{cc} = \frac{E}{r} \Rightarrow i_{cc} = \frac{16}{2}$$

$$\therefore i_{cc} = 8 \text{ A}$$

- c) Quando substituimos  $P = 30 \text{ W}$  na expressão dada, temos  $30 = 16 \cdot i - 2 \cdot i^2$  ( $:2$ )
- $$i^2 - 8 \cdot i + 15 = 0.$$
- Resolvendo a equação, obtemos:  $i_1 = 3 \text{ A}$  ou  $i_2 = 5 \text{ A}$ .

**EP8.** Quando um gerador fornece a máxima potência, a intensidade de corrente que nele circula vale a metade da corrente de curto-circuito, ou seja,  $i = \frac{i_{cc}}{2}$ .

Dados:  $i = 6 \text{ A}$  e  $P_{\text{máx}} = 144 \text{ W}$ .

$$i = \frac{i_{cc}}{2} = 6 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow i_{cc} = 12 \text{ A}$$

Como  $i_{cc} = \frac{E}{r}$  e  $P_{\text{máx}} = \frac{E^2}{4r}$ , temos, respectivamente:

$$12 = \frac{E}{r} \Rightarrow E = 12r \quad (\text{I})$$

$$144 = \frac{E^2}{4r} \Rightarrow 144 = \frac{E \cdot E}{4 \cdot r} \quad (\text{II})$$

Substituindo (I) em (II), obtemos:

$$144 = \frac{E}{4} \cdot 12 \Rightarrow E = 48 \text{ V}$$

e da relação (I):  $12 = \frac{48}{r} \Rightarrow r = 4 \Omega$

**EP9.** Dados da figura:  $E = 32 \text{ V}$ ,  $r = 3,2 \Omega$  e o gerador está lançando a máxima potência.

- a) Uma premissa na qual o gerador lança a máxima potência ao circuito é quando a resistência (equivalente) associada ao gerador é igual à sua resistência interna, ou seja,  $R_e = r$ . Entre os terminais  $M$  e  $N$ , os resistores de  $4 \Omega$  e  $R$  estão associados em paralelo, portanto:

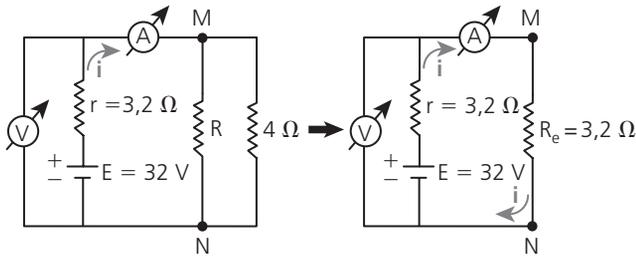
$$R_e = \frac{R \cdot 4}{R + 4} = 3,2$$

$$4R = 3,2R + 12,8$$

$$0,8R = 12,8$$

$$\therefore R = 16 \Omega$$

b)



O voltímetro indica a ddp  $U$  entre os terminais  $M$  e  $N$  e o amperímetro, a intensidade de corrente  $i$ , conforme o circuito.

Pela Lei de Ohm-Pouillet, temos:  $E = (R_e + r) \cdot i$

$$32 = (3,2 + 3,2) \cdot i = 6,4 \cdot i \Rightarrow$$

$$\Rightarrow i = 5 \text{ A}$$

Da equação do gerador:

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

$$U = 32 - 3,2 \cdot 5 = 32 - 16 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow U = 16 \text{ V}$$

**EP10.** Na associação em série, o polo positivo de um gerador deve ser ligado ao polo negativo do outro e assim sucessivamente. Na associação em paralelo, os polos de mesmo sinal são ligados entre si: polo positivo com positivo e polo negativo com negativo. Usualmente, utiliza-se mais a associação em série.

**EP11.** Dados de cada pilha:  $E = 1,5 \text{ V}$  e  $r = 0,6 \Omega$ ;  $n = 2$  pilhas em série.

a) A vantagem da associação em série é possibilitar o aumento da fem.

b) Numa associação em série, temos:

$$E_{\text{eq}} = n \cdot E$$

$$E_{\text{eq}} = 2 \cdot 1,5$$

$$\therefore E_{\text{eq}} = 3,0 \text{ V};$$

$$r_{\text{eq}} = n \cdot r$$

$$r_{\text{eq}} = 2 \cdot 0,6$$

$$\therefore r_{\text{eq}} = 1,2 \Omega$$

**EP12.** Dados:  $n = 3$  pilhas em paralelo;  $E = 1,5 \text{ V}$  e  $r = 1,2 \Omega$ .

Na associação em paralelo, a fem equivalente se mantém igual à fem de cada uma das pilhas, mas a resistência interna equivalente fica dividida pelo número de pilhas associadas, ou seja:

$$E_{\text{eq}} = E \Rightarrow E_{\text{eq}} = 1,5 \text{ V};$$

$$r_{\text{eq}} = \frac{r}{n}$$

$$r_{\text{eq}} = \frac{1,2}{3}$$

$$\therefore r_{\text{eq}} = 0,4 \Omega$$

**EP13.** Dados da associação:  $p = 3$  (ramos em paralelo);  $s = 4$  pilhas em série (para cada ramo); e cada pilha possui:  $E = 1,5 \text{ V}$  e  $r = 1,2 \Omega$ .

Numa associação mista, a fem equivalente é expressa por  $E_{\text{eq}} = s \cdot E$ , e a resistência interna equivalente, por

$$r_{\text{eq}} = \frac{s}{p} \cdot r. \text{ Portanto:}$$

$$E_{\text{eq}} = s \cdot E$$

$$E_{\text{eq}} = 4 \cdot 1,5$$

$$\therefore E_{\text{eq}} = 6 \text{ V};$$

$$r_{\text{eq}} = \frac{s}{p} \cdot r$$

$$r_{\text{eq}} = \frac{4}{3} \cdot 1,2$$

$$\therefore r_{\text{eq}} = 1,6 \Omega$$

**EP14.** Dados do motor (receptor):  $E' = 80 \text{ V}$ ;  $r' = 5 \Omega$  e  $i = 8 \text{ A}$ .

a) De acordo com a equação do receptor:

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

temos para a ddp em seus terminais:

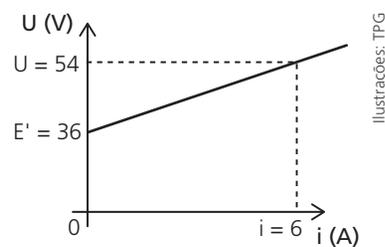
$$U = 80 + 5 \cdot 8$$

$$\therefore U = 120 \text{ V}$$

b) O rendimento do motor é:  $\eta' = \frac{E'}{U} = \frac{80}{120} \cong 0,667$  ou, percentualmente:

$$\therefore \eta'_{\%} = 66,7\%$$

**EP15.** Colocando-se, no diagrama dado, os elementos correspondentes à curva característica de um receptor elétrico, temos:



a) Pelo diagrama, a fem vale:  $E' = 36 \text{ V}$

b) Com os dados da curva característica, podemos usar a equação do receptor:

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

$$54 = 36 + r' \cdot 6$$

$$6 \cdot r' = 18$$

$$\therefore r' = 3 \Omega$$

c) Quando a intensidade de corrente vale  $i = 12 \text{ A}$ , a ddp nos terminais do receptor será:

$$U_1 = E' + r' \cdot i = 36 + 3 \cdot 12 \Rightarrow U_1 = 72 \text{ V}$$

Portanto, pela expressão do rendimento do receptor, temos:  $\eta' = \frac{E'}{U_1} = \frac{36}{72} = 0,5$  ou, percentualmente,  $\eta'_{\%} = 50\%$ .

### EP16.

- Desligar imediatamente o aparelho.
- Se o liquidificador não for desligado, toda a energia elétrica será convertida em calor, acarretando um superaquecimento do motor a ponto de queimá-lo, inutilizando o aparelho.

### EP17.

- Incorreta. Se  $R_x = 0$ , o resistor de  $1 \Omega$  e o gerador estarão em curto-circuito. Portanto, a corrente  $i_x$  será a corrente de curto-circuito do gerador.

$$i_x = i_{cc} = \frac{E}{r} = \frac{12}{2} = 6 \text{ A}$$

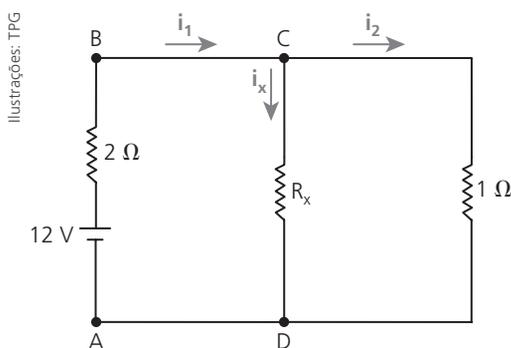
- Correta. Como o resistor  $R_x$  está em paralelo com o resistor de  $1 \Omega$ , temos que:

$$U = U'$$

$$R_x \cdot i_x = 1 \cdot i_2 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow i_2 = R_x \cdot i_x$$

- Incorreta. Nomeando algumas partes do circuito, temos que:



Assim:

$$U_{AB} = U_{CD}$$

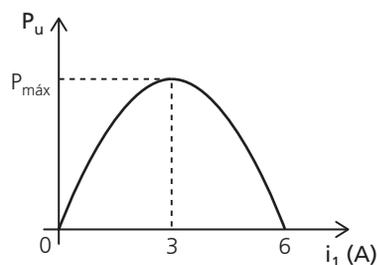
$$E - r \cdot i_1 = R_x \cdot i_x$$

$$12 - 2i_1 = (R_x i_x)$$

$$R_x i_x - 12 + 2i_1 = 0$$

- Incorreta. O valor de  $i_x$  será máximo quando  $R_x = 0$ . Esta é a situação em que  $i_x = i_{cc} = 6 \text{ A}$ .

- Correta. Da equação  $P_u = E - ri^2$  e com os dados do exercício, podemos representar o gráfico de potência do gerador:



Para esse gerador, temos:  $P_u = 12 - 2i^2$ . A partir do gráfico, podemos observar que, para o gerador operar com potência máxima, a corrente  $i_1$  deve ser igual a 3 A. Entretanto, a menor corrente  $i_1$  desse circuito ocorrerá quando  $R_x$  tiver valor máximo ( $R_x = 10 \Omega$ ) e será igual a:

$$R_{\text{eq}} = \frac{10 \cdot 1}{10 + 1} \Omega \cong 0,9 \Omega. \text{ Portanto, } i_1 \text{ será igual a:}$$

$$i_1 = \frac{12}{0,9 + 2} \Rightarrow i_1 \cong 4,14 \text{ A}$$

## Atividade sugerida

### A produção e a transmissão da eletricidade

Na internet pode ser encontrada uma série francesa dublada em português denominada *Viagem na eletricidade*. Existem vários episódios curtos, de aproximadamente 5 minutos, que discutem variados aspectos da eletricidade. Entre eles destacamos o episódio "Eletricidade em movimento", que mostra de que forma a energia é gerada e transmitida aos consumidores, revelando a importância das interligações entre as usinas.

A série, de Jacques Rouxel, criador de histórias em quadrinhos e desenhos animados, pode ser encontrada na internet.

Exponha o episódio e discuta com a turma sobre as questões a seguir, discussão que proporcionará uma síntese e as respostas adequadas ao que se indaga.

Apresente o episódio e as questões para a classe:

- Explique a comparação realizada entre os produtos macarrão e eletricidade.

*Resposta possível: O macarrão pode ser estocado e, posteriormente, consumido. Já a eletricidade precisa ser produzida no instante em que é consumida, porque ela não pode ser armazenada.*

da por muito tempo. Em contrapartida, a eletricidade pode ser transportada muito rapidamente, diferentemente do macarrão.

2. De que forma as centrais elétricas podem reduzir ou aumentar a produção de eletricidade? Qual tipo de usina possui maior facilidade nessas retificações? Justifique.

Resposta possível: As centrais aumentam ou reduzem a produção pela rotação de suas turbinas. As usinas hidrelétricas conseguem alterar a produção mais facilmente porque a rotação vem diretamente da energia das águas represadas, assim é só alterar a vazão.

3. Qual a vantagem das usinas interligadas?  
Resposta possível: Evitam picos de consumo, com o fornecimento de energia de mais usinas para determinada região.

4. De que forma a interligação e a comunicação sobre as demandas de consumo entre várias usinas são possíveis?

Resposta possível: São realizados cálculos para estimar uma base de gasto de energia em determinado horário, usando-se as usinas mais baratas para produzir essa base. Depois, as pequenas elevações são supridas por usinas que aumentam e reduzem sua potência com facilidade, no caso as hidrelétricas.

## Capítulo 12 Leis de Kirchhoff

### Resolução dos exercícios propostos (p. 173)

EP1. Dado:  $i = 3 \text{ A}$ .

- a) A ddp entre os pontos A e B é calculada usando-se a Lei de Ohm generalizada:

$$U_{AB} = i \cdot \sum_{\text{resistores}} + \sum_{\text{fcems}} - \sum_{\text{fems}}$$

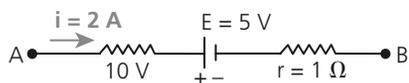
$$U_{AB} = 3 \cdot (10 + 2 + 5 + 1) + 10 - 20 = 3 \cdot (18) - 10$$

$$\therefore U_{AB} = 44 \text{ V}$$

- b) Como  $U_{AB} = V_A - V_B$ , se multiplicarmos a igualdade por  $(-1)$ , obtemos  $-U_{AB} = V_B - V_A = U_{BA}$ , ou seja, a ddp entre os pontos B e A é igual à ddp entre os pontos A e B com sinal trocado.

$$\therefore U_{BA} = -44 \text{ V}$$

EP2. Dados:  $i = 2 \text{ A}$  e  $V_A = 20 \text{ V}$ .



Pela Lei de Ohm generalizada podemos escrever:

$$U_{AB} = i \cdot \sum_{\text{resistores}} + \sum_{\text{fcems}} - \sum_{\text{fems}}$$

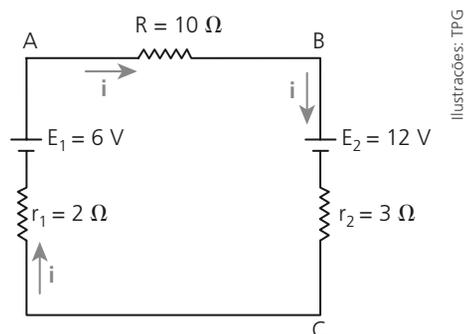
$$V_A - V_B = 2 \cdot (10 + 1) + 5 - 0$$

$$20 - V_B = 22 + 5 = 27 \Rightarrow V_B = -7 \text{ V}$$

EP3.

- a) No circuito dado, a lâmpada é o resistor de resistência  $R = 10 \Omega$ .

De acordo com a Segunda Lei de Kirchhoff, a soma algébrica das ddp's de todos os ramos da malha é nula.



Ilustrações: TPG

Portanto, percorrendo a malha ABCA no sentido horário, a partir do ponto A, como a somatória das ddp's é nula ( $\sum U = 0$ ), temos:

$$R \cdot i - E_2 + r_2 \cdot i + r_1 \cdot i + E_1 = 0$$

$$10 \cdot i - 12 + 3 \cdot i + 2 \cdot i + 6 = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 15 \cdot i = 6 \Rightarrow i = 0,4 \text{ A}; (E_1, r_1) \text{ é o motor, e } (E_2, r_2) \text{ é a pilha.}$$

- b) Como a intensidade de corrente elétrica encontrada resultou um número positivo, significa que o sentido de percurso (arbitrário) adotado está correto. Se o resultado fosse negativo, o sentido real seria o contrário.

Assim,  $(E_1, r_1)$  é o motor e  $(E_2, r_2)$  é a pilha.

A ddp nos terminais da lâmpada é calculada pela Primeira Lei de Ohm:

$$U_{AB} = R \cdot i = 10 \cdot 0,4 \Rightarrow U_{AB} = 4 \text{ V}$$

- c) A ddp nos terminais da pilha é determinada pela equação do gerador:

$$U_{BC} = E_2 - r_2 \cdot i = 12 - 3 \cdot 0,4 = 12 - 1,2$$

$$\therefore U_{BC} = 10,8 \text{ V}$$

- d) A ddp nos terminais do motor é calculada pela equação do receptor:

$$U_{CA} = E_1 - r_1 \cdot i = 6 + 2 \cdot 0,4 = 6 + 0,8$$

$$\therefore U_{CA} = 6,8 \text{ V}$$

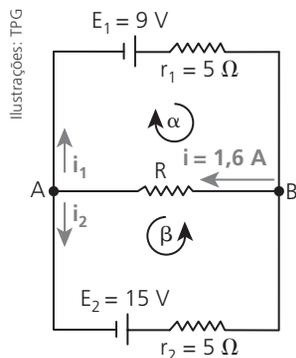
**EP4.** No circuito dado:  $i = 1,6 \text{ A}$ .

- a) Na figura, temos  $n = 2$  nós, sendo que vamos escrever a Primeira Lei de Kirchhoff em  $(n - 1)$  nós, ou seja, apenas no nó A:

$$i = i_1 + i_2$$

$$i_1 + i_2 = 1,6 \text{ A}$$

$$i_1 = 1,6 - i_2 \quad (\text{I})$$



Aplicando a Segunda Lei de Kirchhoff ( $\Sigma U = 0$ ), respectivamente, nas malhas  $\alpha$  e  $\beta$ , nos sentidos de percurso adotados, temos:

$$\text{Na malha } \alpha: -9 + r_1 \cdot i_1 + R \cdot i = 0$$

$$-9 + 5 \cdot i_1 + R \cdot 1,6 = 0$$

$$1,6 \cdot R = 9 - 5 \cdot i_1 \quad (\text{II})$$

Na malha  $\beta$ :

$$-15 + r_2 \cdot i_2 + R \cdot i = 0$$

$$-15 + 5 \cdot i_2 + R \cdot 1,6 = 0$$

$$1,6 \cdot R = 15 - 5 \cdot i_2 \quad (\text{III})$$

Igualando os segundos membros das expressões (II) e (III), obtemos:

$$9 - 5 \cdot i_1 = 15 - 5 \cdot i_2$$

$$5 \cdot i_2 - 5 \cdot i_1 = 6$$

Substituindo  $i_1$  pela igualdade (I):

$$5 \cdot i_2 - 5 \cdot (1,6 - i_2) = 6$$

$$5 \cdot i_2 - 8 + 5 \cdot i_2 = 6$$

$$10 \cdot i_2 = 14$$

$$\therefore i_2 = 1,4 \text{ A}$$

$$\text{De (I), temos: } i_1 = 1,6 - i_2 = 1,6 - 1,4$$

$$\therefore i_1 = 0,2 \text{ A}$$

- b) Da relação (II):  $1,6 \cdot R = 9 - 5 \cdot i_1$

$$1,6 \cdot R = 9 - 5 \cdot 0,2 = 9 - 1 = 8$$

$$\therefore R = 5 \Omega$$

- c) A potência elétrica dissipada em  $R$  vale:

$$P = R \cdot i^2 = 5 \cdot (1,6)^2 \Rightarrow P = 12,8 \text{ W}$$

- d) A ddp entre os pontos  $A$  e  $B$  pode ser calculada usando-se a equação de um dos geradores. Optamos pelo primeiro:

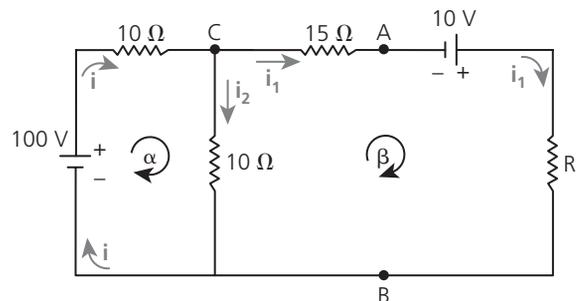
$$U_{AB} = E_1 - r_1 \cdot i_1 = 9 - 5 \cdot 0,2 \Rightarrow U_{AB} = 8 \text{ V}$$

**EP5.** Na figura dada, sabe-se que  $U_{AB} = 0$ . Da equação do gerador, podemos escrever:

$$U_{AB} = E - R \cdot i_1$$

$$0 = 10 - R \cdot i_1$$

$$R \cdot i_1 = 10 \quad (\text{I})$$



Aplicando a Primeira Lei de Kirchhoff no nó  $C$ , temos:  $i = i_1 + i_2$  (II).

A Segunda Lei de Kirchhoff aplicada, respectivamente, nas malhas  $\alpha$  e  $\beta$ , partindo do ponto  $C$ , nos sentidos de percurso adotados, resulta:

Na malha  $\alpha$ :

$$10 \cdot i_2 - 100 + 10 \cdot i = 0$$

$$10 \cdot i + 10 \cdot i_2 = 100$$

$$i + i_2 = 10 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow i = 10 - i_2 \quad (\text{III})$$

Na malha  $\beta$ :

$$15 \cdot i_1 - 10 + R \cdot i_1 - 10 \cdot i_2 = 0$$

$$15 \cdot i_1 + R \cdot i_1 - 10 \cdot i_2 = 10 \quad (\text{IV})$$

Substituindo a igualdade (I) em (IV), temos:

$$15 \cdot i_1 + \cancel{10} - 10 \cdot i_2 = \cancel{10}$$

$$15 \cdot i_1 - 10 \cdot i_2 = 0$$

$$3 \cdot i_1 = 2 \cdot i_2 \quad (\text{V})$$

Em seguida, igualamos os segundos membros das relações (II) e (III):

$$i_1 + i_2 = 10 - i_2$$

$$i_1 - 10 = -2 \cdot i_2$$

$$-i_1 + 10 = 2 \cdot i_2 \quad (\text{VI})$$

Os segundos membros de (V) e (VI) também são iguais. Portanto:  $3 \cdot i_1 = -i_1 + 10$ , ou

$$4 \cdot i_1 = 10$$

$i_1 = 2,5$  A. Substituindo esse valor em (I), temos:

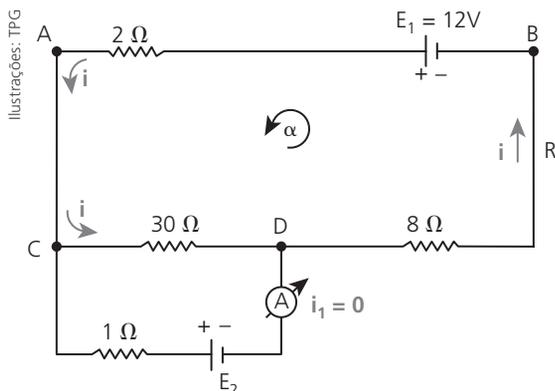
$$R \cdot i_1 = 10$$

$$R \cdot 2,5 = 10$$

$$\therefore R = 4 \Omega$$

Alternativa correta: e

**EP6.** Se o amperímetro não é percorrido por corrente elétrica ( $i_a = 0$ ), podemos determinar a intensidade de corrente  $i$  que circula no restante do circuito. Para tanto, usamos a Segunda Lei de Kirchhoff na malha  $\alpha$ , no sentido de percurso adotado.



Assim, sendo  $\Sigma U = 0$ , temos, a partir do ponto A:

$$30 \cdot i + 8 \cdot i - 12 + 2 \cdot i = 0$$

$$40 \cdot i = 12$$

$$i = 0,3 \text{ A}$$

a) Como o gerador de fem  $E_2$  não é percorrido por corrente elétrica, a ddp em seus terminais é igual a sua fem, ou seja:  $U_{CD} = E_2$ .

$$\text{Pela Primeira Lei de Ohm, } U_{CD} = 30 \cdot i = 30 \cdot 0,3 = 9 \text{ V. Portanto, } E_2 = 9 \text{ V.}$$

b) A ddp entre os pontos A e B é determinada usando-se a equação do gerador:

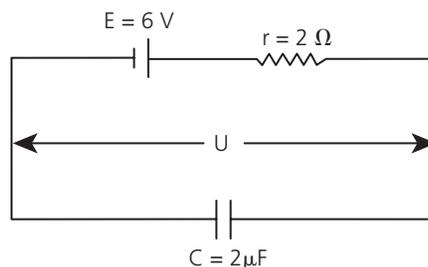
$$U_{AB} = E_1 - r \cdot i = 12 - 2 \cdot 0,3 = 12 - 0,6$$

$$\therefore U_{AB} = 11,4 \text{ V}$$

**EP7.** Dados do gerador:  $E = 6 \text{ V}$  e  $r = 2 \Omega$ ;

$C = 2 \mu\text{F} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ F}$  é a carga do capacitor.

A figura mostra o circuito com o gerador e o capacitor já carregados. Portanto, não há circulação de corrente elétrica.



a) Como não circula corrente elétrica, a ddp  $U$  nos terminais do gerador é igual à sua força eletromotriz, ou seja,  $U = E = 6 \text{ V}$ .

A carga do capacitor é:  $Q = C \cdot U$

$$Q = 2 \cdot 10^{-6} \cdot 6$$

$$\therefore Q = 12 \cdot 10^{-6} \text{ C}$$

b) A expressão da energia potencial elétrica armazenada pelo capacitor é:

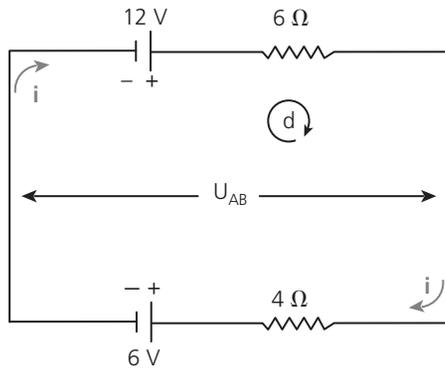
$$E_{pe} = \frac{Q \cdot U}{2}$$

$$E_{pe} = \frac{12 \cdot 10^{-6} \cdot 6}{2}$$

$$\therefore E_{pe} = 36 \cdot 10^{-6} \text{ J}$$

**EP8.** Dada a carga do capacitor:  $Q = 3 \mu\text{F}$ .

Considerando que o capacitor já esteja carregado, o ramo AB que o contém não é percorrido por corrente elétrica. Portanto, podemos refazer a figura da seguinte forma:



Com a Segunda Lei de Kirchoff aplicada na malha  $\alpha$ , no sentido de percurso adotado, vamos encontrar a intensidade de corrente que percorre o circuito nessas condições:

$$-12 + 6 \cdot i + 4 \cdot i + 6 = 0$$

$$10 \cdot i = 6 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow i = 0,6 \text{ A}$$

a) Podemos obter a ddp entre os pontos  $A$  e  $B$  com a equação do gerador ou do receptor. Pelo sentido da corrente, o gerador é o que está na parte de cima da figura; sua equação é:

$$U_{AB} = E - r \cdot i = 12 - 6 \cdot 0,6 = 12 - 3,6$$

$$\therefore U_{AB} = 8,4 \text{ V}$$

b) A carga do capacitor é determinada por:  $Q = C \cdot U$

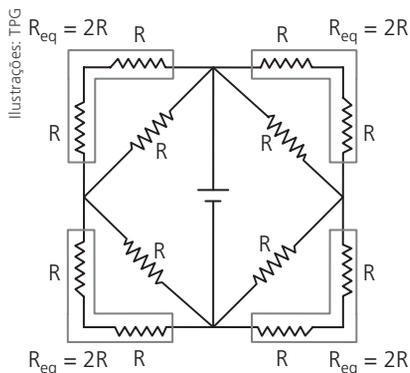
$$Q = 3 \mu\text{F} \cdot 8,4 \text{ V}$$

$$\therefore Q = 25,2 \mu\text{C}$$

**EP9.** Vamos determinar a resistência equivalente do circuito.

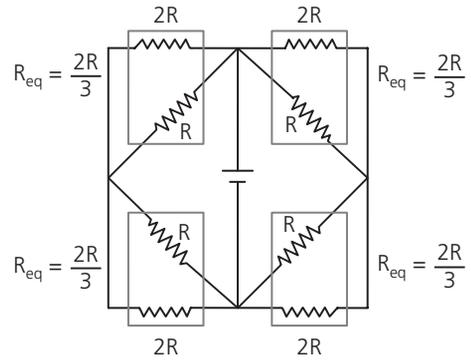
A resistência equivalente dos resistores em série indicados na figura a seguir é igual a:

$$R_{eq} = R + R = 2R$$



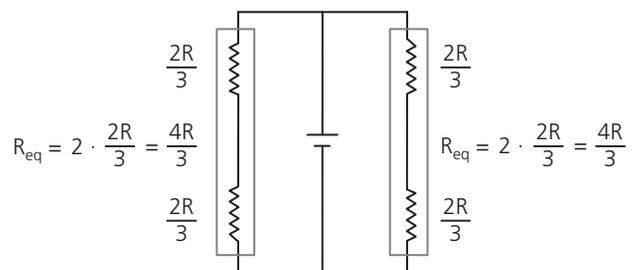
A resistência equivalente dos resistores em paralelo ( $R$  e  $2R$ ) indicados na figura a seguir é igual a:

$$R_{eq} = \frac{2R \cdot R}{2R} + R = \frac{2R^2}{3R} = \frac{2R}{3}$$



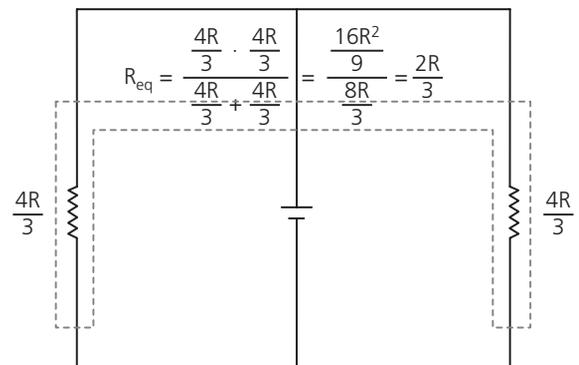
A resistência equivalente dos resistores em série indicados na figura a seguir é igual a:

$$R_{eq} = \frac{2R}{3} + \frac{2R}{3} = \frac{4R}{3}$$



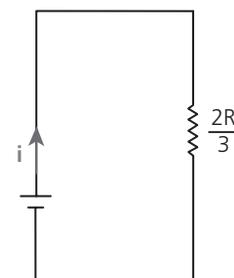
A resistência equivalente dos resistores em paralelo indicados na figura a seguir é igual a:

$$R_{eq} = \frac{2R}{3}$$



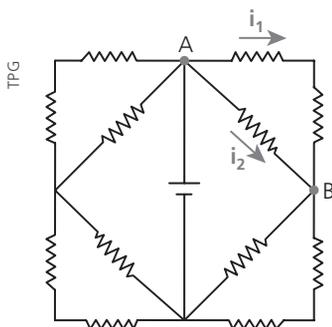
Portanto, a resistência equivalente do circuito é igual a

$$\frac{2R}{3}$$



Então, a corrente que passa pelo gerador será igual a:

$$U = R_{eq} \cdot i \Rightarrow 6 = \frac{2R}{3} \cdot i \Rightarrow i = 9 \text{ A}$$



Da figura, temos que:

$$U_{AB} = 2R \cdot i_1 = R \cdot i_2 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow i_2 = 2 \cdot i_1 \quad (I)$$

No nó A, a corrente  $i$  se divide em duas partes iguais.

$$\text{Portanto, } i_1 + i_2 = \frac{9}{2} \quad (II)$$

Das equações (I) e (II) temos que  $i_1 = 1,5 \text{ A}$  e  $i_2 = 3,0 \text{ A}$ .

Alternativa correta: *b*

## Atividade prática (p. 172)

### Testando as Leis de Kirchhoff

A atividade trabalha com as Leis de Kirchhoff por meio da montagem de circuitos elétricos. Estes poderão ser feitos na sala de aula ou no laboratório, em grupos de 3 a 4 estudantes.

Para a montagem dos circuitos, poderá ser utilizada a placa montada na atividade prática do capítulo 9. Você poderá utilizar uma bateria de 9 V e uma pilha comum de 1,5 V para as duas fontes de tensão. Pode também fazer uma associação em série de 6 pilhas de 1,5 V cada uma para conseguir uma fonte de 9 V.

Monte o circuito com os estudantes. Após a montagem, certifique-se de que todos os grupos estão com os circuitos montados corretamente.

As questões 1, 2 e 3 deverão ser respondidas utilizando as Leis de Kirchhoff, com os valores retirados dos componentes que estão no circuito montado.

O item a da questão 3 deverá ser respondido com base na medição das correntes indicadas no circuito. Caso a corrente medida esteja muito discrepante do valor teórico, certifique-se de que os componentes estejam conectados corretamente e em bom estado. Para garantir isso, oriente os estudantes a medir o valor das resistências com um ohmímetro (ou multímetro). Outro fator que pode interferir nos valores das correntes é a bitola do fio que eles irão usar. Certifique-se de que o valor da resistência do fio não seja alto.

As respostas das questões 1 e 2 não dependerão de como o circuito foi montado. Veja os comentários para os itens do tópico *Discussão*:

1.  $i_1 = i_2 + i_3$
2.  $U_1 = R_1 + i_1$ ;  $U_2 = R_2 + i_2 - R_1 + i_3$
3. A resposta dependerá de como o circuito foi montado.
  - a) O valor  $i_1$  pode ser medido no circuito. O valor medido se aproxima do calculado, mas existe uma pequena diferença, pois no cálculo consideram-se componentes ideais.
  - b) O amperímetro deveria ser mudado de lugar para um local onde somente  $i_2$  ou  $i_3$  percorressem.
4. Resposta pessoal. É importante ver que, assim como na questão 3, existirá uma pequena diferença, pelo mesmo motivo já discutido também na questão 3, item a.
5. Resposta pessoal.

## Conceitos fundamentais

Magnetismo — conjunto de fenômenos associados às forças produzidas em circuitos em que há uma corrente elétrica, ou seja, a parte do Eletromagnetismo que investiga as propriedades associadas aos campos magnéticos, incluindo sua interação com a matéria.

Lei de Lenz — lei que afirma que, num circuito fechado atravessado por um fluxo magnético, a força eletromotriz induzida tem uma polaridade tal que o sentido da corrente por ela produzida induz um fluxo

magnético em oposição à variação do fluxo magnético do circuito.

Indução eletromagnética — processo pelo qual uma força eletromotriz é produzida em um circuito quando o fluxo magnético que o atravessa varia.

Lei de Biot-Savart — lei que afirma que a magnitude de um campo magnético, num dado ponto, obtido pela passagem da corrente elétrica  $i$  em um fio condutor, é inversamente proporcional à distância  $R$  do ponto ao fio e proporcional à corrente.

## Capítulo 13 Campo magnético

### Atividade introdutória

#### Início do magnetismo

A atividade consiste na leitura e interpretação de um texto traduzido por Osvaldo Pessoa Jr. sobre o início do entendimento dos fenômenos magnéticos. O texto é de Lucrécio e traz uma perspectiva interessante sobre o magnetismo.

Sugerem-se, para a atividade, a leitura do texto pelos estudantes e uma discussão posterior sobre as questões orientadoras a seguir.

Vou agora começar a explicar outro assunto, a dizer por que leis naturais podem atrair ao ferro a pedra a que chamam os gregos magnete, nome que lhe designa a origem, porquanto se diz que provém da Magnésia. Os homens admiram esta pedra; com efeito, muitas vezes se vê formar uma cadeia com vários anéis que dela pendem. É possível verem-se cinco e mais ainda, suspensos uns dos outros, balançar-se nas ligeiras auras, uns aos outros passando a força e as ligações da pedra, de modo que essa força se exerça sem interrupções. [...]

É por isso que, depois de bem confirmados e bem estabelecidos estes princípios, nos é fácil explicar a razão daquilo que falta, e ficará inteiramente clara a causa por que o ferro é atraído. É necessário, primeiro, que saiam desta pedra numerosos elementos ou uma corrente [eflúvio] que por seus golpes dissipe o ar que se encontra colocado entre a pedra e o ferro. Logo que o espaço se encontra vazio, logo que se despeja o lugar que está no meio, imediatamente os elementos do ferro, caindo, se lançam juntos no vácuo, de maneira que o próprio anel os segue e vai com toda a sua substância. Não há nenhum corpo cujos primeiros elementos estejam tão ligados e tão entrelaçados entre si como o ferro, cuja estrutura é tão forte e que dá um tão glacial arrepio. Acontece também que algumas vezes foge desta pedra a substância do ferro, habituada como está a alternadamente se retirar e seguir. Eu mesmo vi saltarem pedaços de ferro da Samotrácia e enfurecer-se limalha de ferro dentro de taças de bronze, sempre que se lhe punha por debaixo esta pedra magnete: a tal ponto pareciam impacientes por fugirem da pedra. A interposição do bronze provoca tal discórdia porque as emanações do bronze, como é

evidente, entram primeiro nos canais abertos do ferro, e só depois vem [o eflúvio] da pedra, que já encontra tudo cheio de ferro e não tem já por onde passar como dan-tes o fazia. Tem, portanto, que bater e atacar com suas ondas a contextura do ferro e é por isso que atira para longe e que agita através do bronze aquilo mesmo que, sem ele, tantas vezes atrai.

Extraído de: Tito Lucrécio Caro. *Da natureza*. Trad. de Augustinho da Silva. 3. ed. São Paulo: Abril Cultural, 1985. (Coleção Pensadores.)

1. Explique o que Lucrécio quis dizer na segunda frase do primeiro parágrafo de seu texto. Desenhe se for necessário.

*Resposta possível: Lucrécio quis dizer que se pode prender várias pedras àquela magnética, unindo umas às outras, ou seja, sem necessariamente encostar todas na pedra magnética.*

2. “Passando a força”: qual a natureza atribuída à força e o que se quis dizer com isso?

*Resposta possível: A força da pedra para Lucrécio parece uma espécie de substância que impregna as outras pedras, como uma cola.*

3. Qual a interação entre o eflúvio e o ar para que ocorra a atração?

*Resposta possível: O eflúvio deixa a pedra e, por se tratar de uma substância, golpeia o ar retirando-o e provocando um vácuo que faz com que as demais pedras se aproximem.*

## Resolução dos exercícios propostos (p. 191)

**EP1.** O percurso das linhas de força magnética é convencional: o seu sentido é do polo N para o polo S. Alternativa correta: c

**EP2.** Cada parte originada da quebra de um ímã deve possuir os dois polos: N e S, de modo que a orientação inicial seja mantida. Alternativa correta: d

**EP3.** A atração magnética ocorre entre polos de nomes diferentes: N com S. Portanto, o polo N do ponteiro da bússola é atraído pelo polo S magnético da Terra. Alternativa correta: d

**EP4.** De acordo com o enunciado, os polos de um determinado nome são: 1, 3 e 6.

Por exemplo, se 1 for N, temos:

1, 3 e 6 são N;

2, 4 e 5 são S.

Se 1 for S, ficará tudo trocado.

A única combinação possível é a última citada.

Alternativa correta: e

**EP5.** Entre as opções, a que apresenta a cogitação mais provável é a última. Alternativa correta: e

**EP6.** Aplicando a regra da mão direita, a agulha somente irá ocupar a posição ilustrada se a corrente estiver fluindo da esquerda para a direita. Desse modo, no início, o polo N da agulha será repellido e o S atraído, girando a agulha no sentido horário.

**EP7.** Essa intensidade é dada por:  $B = \frac{\mu \cdot i}{2\pi \cdot d}$ , em que B e d são inversamente proporcionais.

Logo, a intensidade B somente permanecerá constante se os pontos considerados estiverem à mesma distância d. E uma das situações possíveis está descrita na alternativa c.

**EP8.** No circuito, o sentido da corrente elétrica é horário. Alternativa correta: e

**EP9.** Pela regra da mão direita, o campo magnético em torno do condutor tem sentido anti-horário. Portanto, o vetor indução magnética em P está mais bem representado na alternativa b.

**EP10.** São dados:  $i = 0,5 \text{ A}$ ;  $d = 20 \text{ cm} = 0,2 \text{ m}$ .

Então, a referida intensidade será de:

$$B = \frac{\mu \cdot i}{2\pi \cdot d} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,5}{2\pi \cdot 0,2} \Rightarrow B = 5 \cdot 10^{-7} \text{ T}$$

**EP11.** São dados:  $i_1 = 6 \text{ A}$ ;  $i_2 = 8 \text{ A}$ ; ambas as correntes no mesmo sentido;  $d_{12} = 4 \text{ m}$ .

O ponto em questão está exatamente a meia distância entre os fios. Logo,  $d = 2 \text{ m}$ .

Determinamos as intensidades dos campos criados pelos fios e calculamos a diferença entre elas, pois os campos estão em oposição no ponto considerado:

$$B_1 = \frac{\mu \cdot i_1}{2\pi \cdot d} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 6}{2\pi \cdot 2} \Rightarrow B_1 = 6 \cdot 10^{-7} \text{ T}$$

$$B_2 = \frac{\mu \cdot i_2}{2\pi \cdot d} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 8}{2\pi \cdot 2} \Rightarrow B_2 = 8 \cdot 10^{-7} \text{ T}$$

$$B_{\text{res}} = B_2 - B_1 = 2 \cdot 10^{-7} \text{ T}$$

**EP12.** O sentido da corrente elétrica no circuito é horário, e na espira também. Então, o campo criado no centro dessa espira tem o vetor mostrado na alternativa d.

**EP13.** São dados:  $R = 50 \text{ cm} = 0,5 \text{ m}$ ;  $i = 10 \text{ A}$ .

A intensidade do campo magnético no centro da espira é dada por:

$$B = \frac{\mu \cdot i}{2R} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 10}{2 \cdot 0,5} \Rightarrow B = 4\pi \cdot 10^{-6} \text{ T}$$

**EP14.** Na face visível da espira, deve haver o polo N para que o polo S da bússola seja atraído. Para isso, a corrente nessa espira deve estar no sentido anti-horário. Alternativa correta: *b*

**EP15.** São dados:  $R_1 = 0,10\pi \text{ m}$ ;  $R_2 = 0,15\pi \text{ m}$ ;  $i_1 = 0,2 \text{ A}$ ;  $i_2 = 0,3 \text{ A}$ ; essas correntes estão em sentidos opostos, considerando os percursos nas espiras.

A resultante no centro será dada pela diferença entre as intensidades dos campos criados pelas espiras:

$$B_1 = \frac{\mu \cdot i_1}{2R_1} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,2}{2 \cdot 0,10\pi} \Rightarrow B_1 = 4 \cdot 10^{-7} \text{ T}$$

$$B_2 = \frac{\mu \cdot i_2}{2R_2} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,3}{2 \cdot 0,15\pi} \Rightarrow B_2 = 4 \cdot 10^{-7} \text{ T}$$

O módulo da resultante será nulo, pois os campos criados pelas correntes têm sentidos opostos e mesmo módulo.

**EP16.** Em um solenoide, o campo magnético em seu interior tem intensidade constante.

Alternativa correta: *c*

**EP17.** Vista da direita para a esquerda, a corrente está no sentido horário. Nesse caso, o polo na extremidade direita, por convenção, será S.

Logo, a resposta correta é *polo sul*.

**EP18.** A expressão que permite analisar as grandezas envolvidas é  $B = \frac{\mu \cdot n \cdot i}{L}$ , onde  $\frac{n}{L}$  é a densidade linear de espiras. A única alternativa incorreta é a que diz que  $B$  e  $\frac{n}{L}$  são inversamente proporcionais, quando na verdade essas duas grandezas são diretamente proporcionais. Alternativa correta: *c*

**EP19.** São dados:  $L = 10 \text{ cm} = 0,1 \text{ m}$ ;  $n = 200$  espiras;  $i = 0,1 \text{ A}$ .

A intensidade do campo no interior do solenoide é dada por:

$$B = \frac{\mu \cdot n \cdot i}{L} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 200 \cdot 0,1}{0,1} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow B = 8\pi \cdot 10^{-5} \text{ T}$$

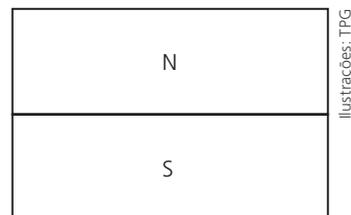
**EP20.** São dados:  $\frac{n}{L} = 10$  espiras por centímetro = 1 000 espiras por metro;  $B = 3\pi \cdot 10^{-4} \text{ T}$ .

A intensidade da corrente pelo solenoide será de:

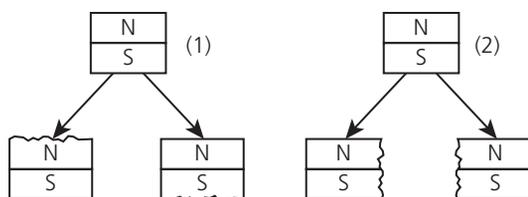
$$B = \frac{\mu \cdot n \cdot i}{L} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 3\pi \cdot 10^{-4} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1000 \cdot i}{1} \Rightarrow i = 0,75 \text{ A}$$

**EP21.** Como a figura não indica o sentido das linhas de campo, podemos considerar que os polos do ímã são iguais aos da figura:



Após o corte de cada ímã, cada pedaço obtido terá as seguintes polaridades:

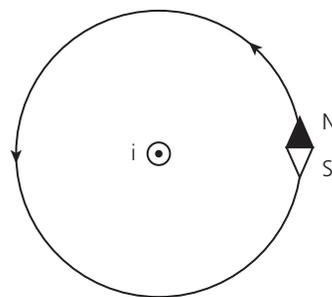


Assim, se os pedaços de cada ímã forem aproximados, teremos estas situações:

- os pedaços do ímã 1 sofrerão atração, pois as faces dos cortes têm polos contrários;
- os pedaços do ímã 2 sofrerão repulsão, pois as faces dos cortes têm polos iguais.

Alternativa correta: *c*

**EP22.** A posição de equilíbrio estável é a mostrada na alternativa *b*.



Mesmo que a agulha seja levemente deslocada, ela tende a voltar a essa posição.

## Atividade prática (p. 188)

### Produzindo um eletroímã caseiro

Esta atividade trabalha com a produção de campos magnéticos utilizando um eletroímã. Poderá ser realizada no laboratório ou na própria sala de aula.

Escolha o fio para a realização da atividade de acordo com o tamanho do prego que você conseguir. Certifique-se de que conseguirá enrolar 4 m de fio no parafuso. Para obedecer aos mesmos parâmetros, consiga um parafuso para enrolar a outra bobina de 1 m com a mesma bitola do utilizado para a bobina de 4 m, porém apenas menor. Caso não consiga, utilize o mesmo que foi destinado para a bobina de 4 m, assim você terá raio igual para as bobinas.

Discuta com os estudantes algumas questões, como: qual a importância de o fio ser esmaltado? Por que devemos lixar as pontas dos fios para fazer a conexão à fonte? O que acontece se alguma parte do fio enrolado não estiver esmaltada?

Após realizado o procedimento, peça aos estudantes que respondam às questões colocadas em discussão. Note que, para o item 3, a existência de um núcleo ferroso dentro da bobina aumenta a intensidade do campo magnético gerado. Esse arti-

fício é utilizado também na construção de transformadores de tensão.

Veja os comentários para os itens do tópico *Discussão*:

1. Sim, quanto maior o número de voltas, mais potente será o eletroímã.
2. Com o prego, aumenta a intensidade da atração.
3. A presença do prego afeta o valor de  $\mu$ , que é definido como a permeabilidade magnética.
4. Resposta pessoal.

## Outras palavras (p. 190)

### Magnetotactismo

1. São bactérias anaeróbicas, pois sobrevivem em regiões com muitos nutrientes e baixa concentração de oxigênio.
2. a) As bactérias do tipo “norte” sobrevivem no norte magnético, ou seja, no sul geográfico. Já as bactérias do tipo “sul” sobrevivem no sul magnético, ou seja, no norte geográfico.  
b) Resposta pessoal.  
c) As duas espécies de bactérias; podem existir os dois tipos.
3. Resposta pessoal
4. Resposta pessoal.

## Capítulo 14 Força magnética

### Atividade introdutória

#### A interação entre eletricidade e magnetismo

A atividade objetiva, por meio da observação do comportamento de uma bússola, discutir os conceitos de campo magnético terrestre de um ímã e de campo magnético gerado quando um fio é percorrido por uma corrente elétrica.

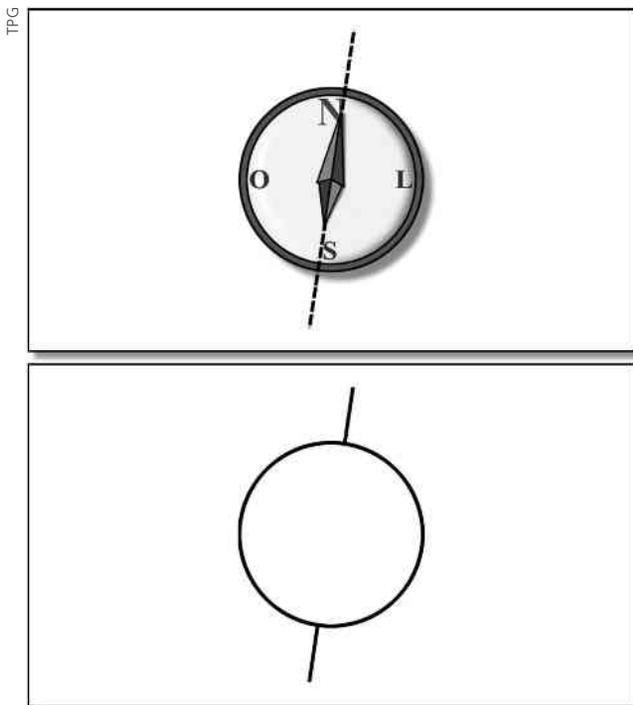
Nela, os estudantes anotarão as orientações da agulha da bússola em uma folha, sem nenhum objeto metálico ou magnetizado próximo. Posteriormente,

as medições serão refeitas com um ímã ao centro da folha e, por último, com um fio passando pelo centro da folha.

Para cada grupo devem ser entregues uma bússola, um pequeno ímã circular (como os de geladeira), uma pilha e um pedaço de fio fino encapado, de aproximadamente 50 cm ou mais.

As anotações podem ser feitas pelo grupo ou individualmente, e as marcações da orientação da bússola, em quatro regiões distintas distribuídas em volta do centro da folha, serão realizadas numa folha de caderno (ou, de preferência, em uma folha um pouco mais espessa, como cartolina).

As marcações consistem em circular a bússola com o lápis ou a caneta e, externamente à bússola, riscar a orientação do ponteiro.



Para efetuar essas marcações, devem-se manter distantes todos os objetos metálicos, magnetizados ou quaisquer materiais que alterem o direcionamento do ponteiro da bússola, como algumas canetas, zíperes, presilhas, espirais de caderno, estojos etc. Entre uma marcação e outra, deve-se estar atento para que os estudantes não girem a folha, pois, ao mudar sua orientação, ocorrerão alterações indesejáveis na orientação do ponteiro da bússola. A folha deve ser colada com uma fita adesiva na superfície onde estiver colocada.

Em relação às medidas que serão realizadas com o fio, por se tratar de um curto-circuito, ocorrem um aquecimento acentuado da fiação e um desgaste rápido da pilha. Para evitar queimaduras nos estudantes e um consumo desnecessário de pilhas, uma alternativa é não disponibilizar as pilhas aos estudantes e circular de grupo em grupo realizando os contatos quando necessário.

Seguem o roteiro e as questões, que sugerimos sejam discutidas com a sala e, posteriormente, redigidas pelos estudantes:

#### Parte A

Marque um ponto no centro da folha.

Posicione a bússola em 4 posições ao redor do ponto central, mas distantes dele.

A cada posicionamento da bússola, contorne-a com um lápis ou caneta (azul, por exemplo) no caderno e marque, fazendo traços no papel, a direção na qual se posiciona a agulha.

Não mova a folha entre um posicionamento e outro. De preferência, deixe-a colada na mesa com uma fita adesiva.

Escreva um número em cada bússola desenhada no caderno.

#### Parte B

Posicione o ímã sobre o ponto marcado e faça um contorno da sua base a lápis ou a caneta.

Posicione a bússola nos mesmos 4 lugares e marque com uma caneta de cor diferente (por exemplo, vermelha) as novas posições do ponteiro.

#### Parte C

Agora a folha deve ser descolada da superfície onde estava.

Com a ponta de um lápis, fure o centro da folha (mantendo-a horizontalmente) e passe o fio perpendicularmente através dela.

Posicione a bússola nos mesmos 4 lugares e, em cada lugar, ligue o contato elétrico, fechando o circuito. Marque com uma caneta de outra cor (por exemplo, preta) as novas posições do ponteiro e desligue o contato.

#### Questões

1. Compare as direções das agulhas obtidas na parte A. Elas apontam na mesma direção ou em direções diferentes? Por que elas apontam nessas direções?

*Resposta possível: Todas ficaram em direções muito parecidas, porque se alinham ao campo magnético da Terra.*

2. Faça a comparação das direções para a parte B.

*Resposta possível: Os ponteiros apontaram para o ímã colocado no centro, por causa do seu campo magnético.*

3. Faça a comparação das direções para a parte C.

*Resposta possível: Os ponteiros não apontaram na mesma direção, nem para o fio. Observando a orientação de todos os ponteiros, parece que eles "dão a volta" no fio. Ou seja, as direções dos ponteiros são tangentes às circunferências imaginárias em torno do fio.*

## Resolução dos exercícios propostos (p. 209)

### EP1.

- a) Não, pois se a partícula eletrizada estiver em repouso não há criação de campo magnético em torno dela que possa interagir com o campo magnético externo.
- b) Nada mudaria, pois a interação continuaria não existindo.

**EP2.** Nesse caso, a força magnética faz a função de força centrípeta e o movimento é curvilíneo. E sabemos que as forças perpendiculares ao vetor velocidade não realizam trabalho.

Alternativa correta: c

**EP3.** A partícula representada é eletrizada negativamente.

Analisando as cinco situações, pela aplicação da regra da mão esquerda, concluímos que a única situação possível está na alternativa d.

**EP4.** São dados:  $q = +1 \mu\text{C} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ C}$ ;

$v = 100\sqrt{2} \text{ m/s}$ ;  $B = 4 \cdot 10^{-3} \text{ T}$ ;

$\theta = 45^\circ$ .

Nessas condições, sendo  $\sin 45^\circ = \frac{\sqrt{2}}{2}$ , obtemos o seguinte valor de força magnética:

$$F_m = |q| \cdot v \cdot B \cdot \sin \theta$$

$$F_m = 1 \cdot 10^{-6} \cdot 100\sqrt{2} \cdot 4 \cdot 10^{-3} \cdot \sin 45^\circ$$

$$\therefore F_m = 4 \cdot 10^{-7} \text{ N}$$

**EP5.** Pela figura:  $\theta = 90^\circ$ .

Sendo  $\sin 90^\circ = 1$  e sabendo que o movimento será retilíneo e uniforme quando as forças magnética e elétrica se equilibrarem (portanto, se elas tiverem módulos iguais), podemos calcular a velocidade da partícula do seguinte modo:

$$F_m = F_{el}$$

$$|q| \cdot v \cdot B \cdot \sin \theta = |q| \cdot E$$

$$v \cdot B \cdot \sin \theta = E$$

$$v \cdot 8 \cdot 10^{-2} \cdot 1 = 4 \cdot 10^2$$

$$\therefore v = 5000 \text{ m/s} = 5 \cdot 10^3 \text{ m/s}$$

**EP6.** De acordo com a regra da mão esquerda, as partículas de cargas positivas devem ser desviadas para o lado direito. Portanto, a resposta correta (que mostra a associação não adequada) é a alternativa e.

### EP7.

- a) Como a força magnética tem a função de força centrípeta, ela não realiza trabalho. Portanto, o trabalho é nulo.
- b) Vamos igualar as expressões da força centrípeta e da força magnética:

$$\frac{m \cdot v^2}{R} = |q| \cdot v \cdot B \cdot \sin \theta$$

Como, pela figura,  $\theta = 90^\circ$ , temos  $\sin 90^\circ = 1$ . Então:

$$m = \frac{B \cdot R \cdot |q|}{v}$$

**EP8.** São dados:

$$m = 1 \cdot 10^{-11} \text{ g} = 1 \cdot 10^{-14} \text{ kg};$$

$$q = 0,01 \mu\text{C} = 0,01 \cdot 10^{-6} \text{ C} = 1 \cdot 10^{-8} \text{ C};$$

$$v = 5 \cdot 10^6 \text{ m/s};$$

$$R = 2 \text{ cm} = 0,02 \text{ m}$$

Da igualdade entre as expressões da força centrípeta e da força magnética, obtemos:

$$\frac{m \cdot v^2}{R} = |q| \cdot v \cdot B \cdot \sin \theta$$

Como  $\theta = 90^\circ$ , então  $\sin \theta = 1$ .

$$B = \frac{m \cdot v}{R \cdot |q|}$$

$$\text{Logo: } B = \frac{1 \cdot 10^{-14} \cdot 5 \cdot 10^6}{0,02 \cdot 10^{-8}} = 250, \text{ ou seja:}$$

$$B = 250 \text{ T}$$

**EP9.** Neste caso, a velocidade passa a ser de:

$$4 \cdot 5 \cdot 10^6 \text{ m/s} = 20 \cdot 10^6 \text{ m/s}$$

$$\text{Como } B = \frac{m \cdot v}{R \cdot |q|}, \text{ então } R = \frac{m \cdot v}{B \cdot |q|}.$$

$$R = \frac{1 \cdot 10^{-14} \cdot 20 \cdot 10^6}{250 \cdot 1 \cdot 10^{-8}} = 0,08$$

$$\therefore R = 0,08 \text{ m} = 8 \text{ cm}$$

Aqui, poderíamos também ter visto que as grandezas  $R$  e  $v$  são diretamente proporcionais. Então, se  $v$  for quadruplicado,  $R$  também será multiplicado por 4. Logo:  $4 \cdot 2 \text{ cm} = 8 \text{ cm}$ .

Alternativa correta: d

**EP10.** Como a carga do pósitron é positiva, temos os seguintes efeitos:

- a força elétrica atua de modo a desviar o pósitron para a direita;

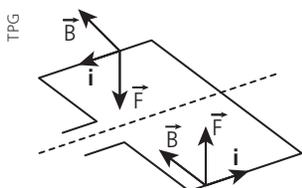
- a força magnética age de forma a desviá-lo para cima.

Portanto, a resultante dessas duas forças faz com que o feixe atinja o quadrante nº 1.

Alternativa correta: a

**EP11.** Este fenômeno eletromagnético se deve ao fato de que a corrente é o movimento de cargas elétricas. Se o condutor estiver imerso num campo magnético, as cargas em movimento sofrerão a ação da força magnética que, conseqüentemente, atuará sobre o condutor onde elas estão.

**EP12.** Pela regra da mão esquerda, as forças magnéticas atuam como estão ilustradas a seguir:



Essas forças giram a espira retangular, como está indicado na alternativa b.

**EP13.** São dados:

$$i = 4 \text{ A}; B = 2 \text{ T}; \theta = 90^\circ; L = 1 \text{ mm} = 0,001 \text{ m}.$$

Sendo  $\sin 90^\circ = 1$ , a força magnética tem o seguinte módulo:

$$F_m = B \cdot i \cdot L \cdot \sin \theta = 2 \cdot 4 \cdot 0,001 \cdot 1$$

$$F_m = 0,008 \text{ N}$$

**EP14.** São dados:  $F = 20 \text{ N}; i = 8 \text{ A}; \theta = 90^\circ; B = 2 \text{ T}$ . E temos:  $\sin 90^\circ = 1$ .

O cálculo do comprimento é feito por:

$$F_m = B \cdot i \cdot L \cdot \sin \theta$$

$$20 = 2 \cdot 8 \cdot L \cdot 1 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow L = 1,25 \text{ m}$$

**EP15.** São dados:

$$m = 10 \text{ g} = 0,01 \text{ kg}; L = 5 \text{ cm} = 0,05 \text{ m}; B = 2 \text{ T}.$$

E, ainda:  $\theta = 90^\circ$ ; logo:  $\sin 90^\circ = 1$ .

a) Para anular a tensão nos fios, a força magnética deve equilibrar o peso:

$$F_m = P$$

$$B \cdot i \cdot L \cdot \sin \theta = m \cdot g$$

$$2 \cdot i \cdot 0,05 \cdot 1 = 0,01 \cdot 10$$

$$0,1 \cdot i = 0,1$$

$$\therefore i = 1 \text{ A}$$

b) A força magnética deve atuar para cima. Assim, a corrente no lado superior deve estar para a esquerda, e a espira deve ter o sentido anti-horário.

**EP16.** Analisando cada afirmação, temos:

- Correta. Os condutores se atraem quando as correntes estão no mesmo sentido.
- Correta. A força é diretamente proporcional às correntes.
- Correta. Pelo mesmo motivo do item anterior.
- Correta. A força é inversamente proporcional à distância.
- Incorreta. A troca do sentido da corrente tem como efeito a inversão do sentido da força magnética.

A afirmação incorreta é a V.

**EP17.** Adotemos como unidade de comprimento:

$$L = 1 \text{ m}.$$

Pela igualdade dada entre as intensidades de correntes, obtemos:  $2i_2 = 1 \Rightarrow i_2 = 0,5 \text{ A}$ .

Inicialmente, vamos calcular as forças atuantes sobre o fio à esquerda (fio 1):

$$F_{21} = \frac{\mu \cdot i_1 \cdot i_2 \cdot L}{2\pi \cdot d} = \frac{\mu \cdot 1 \cdot 0,5 \cdot 1}{2\pi \cdot 1} = \frac{0,25\mu}{\pi} \text{ (de repulsão: o fio 1 é empurrado para a esquerda);}$$

$$F_{31} = \frac{\mu \cdot i_1 \cdot i_3 \cdot L}{2\pi \cdot 2d} = \frac{\mu \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1}{2\pi \cdot 2} = \frac{0,25\mu}{\pi} \text{ (de atração: o fio 1 é puxado para a direita).}$$

A força resultante sobre o condutor à esquerda é nula.

Agora, calculemos as forças atuantes sobre o fio central (fio 2):

$$F_{12} = \frac{\mu \cdot i_1 \cdot i_2 \cdot L}{2\pi \cdot d} = \frac{\mu \cdot 1 \cdot 0,5 \cdot 1}{2\pi \cdot 1} = \frac{0,25\mu}{\pi} \text{ (de repulsão: o fio 2 é empurrado para a direita);}$$

$$F_{32} = \frac{\mu \cdot i_2 \cdot i_3 \cdot L}{2\pi \cdot d} = \frac{\mu \cdot 0,5 \cdot 1 \cdot 1}{2\pi \cdot 1} = \frac{0,25\mu}{\pi} \text{ (de repulsão: o fio 2 é empurrado para a esquerda).}$$

A força resultante sobre o condutor central é nula.

Finalmente, vamos calcular as forças atuantes sobre o fio à direita (fio 3):

$$F_{13} = \frac{\mu \cdot i_1 \cdot i_3 \cdot L}{2\pi \cdot 2d} = \frac{\mu \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1}{2\pi \cdot 2} = \frac{0,25\mu}{\pi} \text{ (de atração: o fio 3 é puxado para a esquerda);}$$

$$F_{23} = \frac{\mu \cdot i_2 \cdot i_3 \cdot L}{2\pi \cdot d} = \frac{\mu \cdot 0,5 \cdot 1 \cdot 1}{2\pi \cdot 1} = \frac{0,25\mu}{\pi} \text{ (de repulsão: o fio 3 é empurrado para a direita);}$$

a força resultante sobre o condutor à direita é nula.

Portanto, todas as forças resultantes são nulas.

**EP18.** Na situação apresentada, o equilíbrio ocorre quando:

$$P = F_{\text{mag}}$$

$$m \cdot g = B \cdot i \cdot L \cdot \text{sen } \theta$$

Na situação descrita,  $B = 0,1 \text{ T}$ ;  $i = 0,45 \text{ A}$ ;

$L = 10 \text{ cm} = 0,1 \text{ m}$ ; e a força magnética está orientada verticalmente para baixo, portanto  $\theta = 90^\circ$ . Então, substituindo esses valores temos:

$$m \cdot 10 = 0,1 \cdot 0,45 \cdot 0,1 \cdot 1$$

$$m = 0,45 \cdot 10^{-3} \text{ kg ou } 0,45 \text{ g}$$

## Atividade prática (p. 206)

### Construindo um motor elétrico simples

Esta atividade tem como objetivo a demonstração da força magnética. Poderá ser feita em duplas, na sala de aula.

Quanto ao material utilizado, atente para que o parafuso não seja muito grande, pois quanto menor ele for, mais rápido irá girar. O ímã de neodímio é indicado pelo fato de possuir um forte campo magnético e um formato cilíndrico que favorece o acoplamento à base do parafuso. Porém, caso haja um ímã com as mesmas características mas de outro material, também poderá ser utilizado.

Veja os comentários para os itens do tópico *Discussão*:

1. Variando a tensão da pilha ou o diâmetro do parafuso.
2. O funcionamento será o mesmo, pois a corrente elétrica percorrerá o mesmo caminho de antes.

### Atividade sugerida

#### Ampère

A atividade consiste na leitura e interpretação de um trabalho original de Ampère, de 1826, denominado "Teoria dos fenômenos eletrodinâmicos deduzidos unicamente da experiência", que está disponível em: <<http://www.fflch.usp.br/df/opessoa/HCTex-Ampere.pdf>> (acesso em: 25 fev. 2016). Um outro trecho do mesmo trabalho pode ser lido em: <<http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/070402.pdf>>,

no qual Ampère expõe argumentos que colocam por terra a alegação de que sua descoberta era uma decorrência direta da descoberta de Oersted (acesso em: 25 fev. 2016).

Nesse texto, Ampère discorre sobre duas hipóteses conflitantes da origem do magnetismo e argumenta a favor de sua ideia de que, no interior dos ímãs, existem pequenas correntes elétricas circulares, utilizando o fato de que solenoides ou bobinas, percorridos por uma corrente elétrica, passam a interagir devido ao campo magnético. Argumenta também que, com a adoção de sua ideia, pode-se unificar as interações elétricas, magnéticas e a existente entre eletricidade e magnetismo.

Sugere-se, para a atividade, a leitura do texto pelos estudantes. Seguem algumas questões orientadoras para uma discussão posterior.

1. Qual é a relação entre a força magnética e a distância citada por Ampère? Há semelhanças com outras forças da Física? Quais?

*Resposta possível: A relação existente revela que a intensidade da força magnética diminui de acordo com o aumento da distância ao quadrado. A relação em que a força é proporcional ao inverso do quadrado da distância tem origem na Lei da Gravitação Universal de Newton, na qual Coulomb se inspirou para elaborar a lei da força elétrica.*

2. Explique, usando elementos da questão anterior, a atração entre polos opostos de dois ímãs.

*Resposta possível: Trata-se de uma comparação das distâncias entre os polos. Os opostos estão mais próximos do que os iguais, e assim a força de atração possui maior intensidade do que a de repulsão e o comportamento resultante é atrativo.*

3. Explique no que consiste a hipótese dos fluidos e a das pequenas correntes elétricas.

*Resposta possível: A hipótese dos fluidos considera que os polos dos ímãs são constituídos cada qual por um tipo de fluido, denominados boreal e austral, que são os responsáveis pelos comportamentos. Já a hipótese das pequenas correntes considera que, na verdade, os ímãs são constituídos por pequenas correntes elétricas circulares e paralelas.*

4. Explique o problema apontado por Ampère na hipótese dos fluidos e seus argumentos a favor das correntes elétricas.

*Resposta possível: O argumento da simplicidade e da unificação é proposto por Ampère, ou seja, sua ideia utiliza o fato de que espiras percorridas pela corrente adquirem comportamento magnético para defender que o magnetismo e a interação entre ele e a eletricidade podem ser entendidos pela corrente elétrica e seus efeitos.*

5. Escreva a relação matemática da força magnética e explique de que forma ela abarca as considerações de Ampère.

*Resposta possível:  $F = q \cdot v \cdot B \cdot \sin \theta$ . A força magnética abarca as considerações de Ampère porque relaciona a interação entre a eletricidade e o magnetismo, mostrando a interação entre uma carga móvel com velocidade percorrendo certa região e o campo magnético.*

## Capítulo 15 Indução eletromagnética

### Atividade introdutória Visualizando a indução

Trata-se de uma atividade de arranjo simples que possibilita verificar a indução eletromagnética.

Para cada grupo de estudantes devem ser entregues um ímã permanente e uma espira com algumas voltas (ou um solenoide) conectada a um multímetro. Com a aproximação e o afastamento do ímã em relação à espira, é possível detectar no multímetro uma intensidade de corrente elétrica e seu sinal (conventionando o sentido). Dessa forma, sugerimos algumas questões:

1. Aproxime e afaste o ímã da espira, mantendo as posições dos polos. O que acontece?

*Resposta possível: São registrados valores de corrente elétrica no multímetro.*

2. Realize a aproximação e o afastamento com velocidades maiores. O que acontece com os valores obtidos no multímetro?

*Resposta possível: Os valores das correntes alcançam picos maiores.*

3. Há diferenças entre os valores obtidos na aproximação e no afastamento? Em caso afirmativo, quais?

*Resposta possível: O sinal dos valores se altera.*

4. Troque as posições dos polos do ímã e repita o procedimento de aproximação e afastamento. Há alterações em relação à situação anterior?

*Resposta possível: Sim. Os sinais mudam. Se antes a aproximação era positiva, agora é negativa, e vice-versa.*

5. O que produz a corrente elétrica no interior do fio? Justifique.

*Resposta possível: Há variação do fluxo do campo magnético no tempo. Quanto mais rápido afastamos ou aproximamos, maior é a variação do fluxo e, assim, a corrente induzida é mais intensa. Quanto ao sinal da corrente, ele se relaciona com a orientação das linhas do campo magnético.*

### Resolução dos exercícios propostos (p. 220)

**EP1.** O peso do corpo fará com que o condutor móvel fique em equilíbrio dinâmico. A força magnética (para a esquerda) é equilibrada pela tração no fio (para a direita). Essa tração tem o mesmo módulo do peso do corpo suspenso.

**EP2.** São dados:

$$v = 0,4 \text{ m/s}; L = 20 \text{ cm} = 0,2 \text{ m};$$

$$B = 2 \text{ T}$$

A força eletromotriz em questão vale:

$$\varepsilon = B \cdot L \cdot v = 2 \cdot 0,2 \cdot 0,4 = 0,16$$

$$\therefore \varepsilon = 0,16 \text{ V}$$

**EP3.** Do condutor móvel, são dados:

$$A = 0,05 \text{ cm}^2; \rho = 1,2 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}; L = 20 \text{ cm}.$$

A resistência elétrica desse condutor é de:

$$R = \rho \cdot \frac{L}{A} = 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{20}{0,05}, \text{ ou seja: } R = 0,48 \, \Omega.$$

Portanto, a intensidade de corrente que passa pelo condutor é:

$$i = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{0,16}{0,48} = \frac{1}{3}, \text{ ou seja: } i \cong 0,33 \text{ A}$$

**EP4.** A força magnética sobre o condutor é de:

$$F_m = B \cdot i \cdot L \cong 2 \cdot 0,33 \cdot 0,2 = 0,132, \text{ ou seja:}$$

$$F_m \cong 0,132 \text{ N}$$

Essa força é equilibrada pela tração no fio, que tem o mesmo módulo do peso.

Assim, temos:

$$P = F_m \Rightarrow m \cdot g = F_m \Rightarrow m \cdot 10 \cong 0,132$$

$$\therefore m \cong 0,0132 \text{ kg} = 13,2 \text{ g}$$

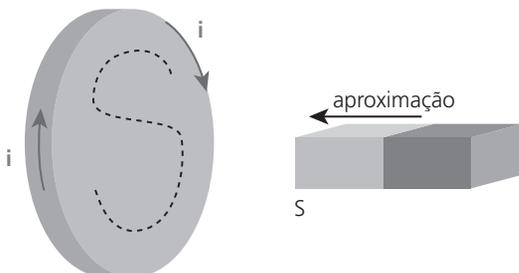
**EP5.** O fluxo magnético é dado por:

$$\Phi = B \cdot A \cdot \cos \theta$$

Logo, ele pode ser alterado por quaisquer variações nas grandezas  $B$ ,  $A$  e/ou  $\theta$ .

Todas as afirmativas estão corretas.

**EP6.** Nessa aproximação, temos a seguinte indução:



Para que surja o polo sul na face visível da espira, a corrente deve estar no sentido horário.

Alternativa correta: a

**EP7.** A indução não ocorre enquanto não houver variação do fluxo magnético.

O gráfico mostra que, no primeiro trecho, o fluxo permanece constante.

Logo, não há indução no intervalo de 0 a 1 s.

**EP8.**

- Falso. As linhas de campo “partem” do polo norte e “chegam” ao polo sul.
- Verdadeiro.
- Falso. A espira deve estar paralela às linhas de campo.
- Falso. Como o comutador é uma peça contínua, o sentido da corrente muda com a rotação da espira.

**EP9.**

- O sentido é anti-horário (regra da mão esquerda).
- O sentido é da direita para a esquerda, pois a corrente vai da escova 2 para a escova 1.

## Atividade prática (p. 217)

### Fabricando um sinalizador com a Lei de Lenz

Esta atividade tem o objetivo de mostrar para os estudantes, utilizando um dispositivo de fácil elaboração em classe, a indução eletromagnética e sua relação com os fenômenos que nos cercam.

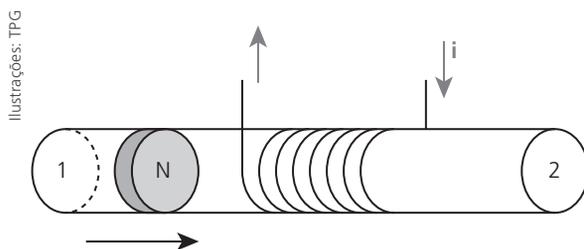
Sugira sua realização em grupos pequenos. Oriente a divisão de tarefas durante a montagem e depois insista para que todos os integrantes do grupo manipulem o sinalizador já construído.

A discussão que se segue à leitura das respostas dos grupos é fundamental. Aproveite para contextualizar o período histórico no qual ocorreram as descobertas de Faraday – reforce a profunda modificação decorrente da incorporação do uso da eletricidade no cotidiano das sociedades pós-industriais.

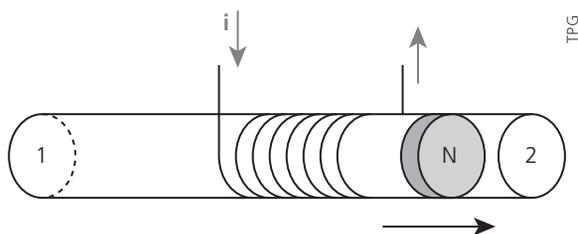
Finalmente, mencione dispositivos presentes no dia a dia do estudante que utilizam diretamente o mesmo princípio: geradores de corrente alternada, alto-falantes, transformadores de tensão nos carregadores de baterias etc.

Veja os comentários para os itens do tópico *Discussão*:

- Resposta pessoal.  
Espera-se que as respostas mencionem uma tensão (ou uma corrente) induzida nos terminais do LED, gerada pela variação do fluxo magnético na bobina, decorrente do movimento dos ímãs em seu interior.
- Depende da posição do ímã em relação à bobina (se há aproximação ou afastamento entre eles).  
Na aproximação entre o ímã e a bobina, com o polo norte na face mostrada na figura, a corrente adquire sentido da direita para a esquerda.



No afastamento, o sentido da corrente induzida se inverte:



3. Professor, não há um aparelho para medir intensidade luminosa, por isso peça aos estudantes que converse com os colegas sobre isso.

Espera-se que digam que, quanto mais rápida é a passagem dos ímãs pela bobina, mais intensa é a luz produzida. Porém, é possível que a maioria dos estudantes também comente sobre a variação de intensidade no decorrer do movimento.

4. Este item demanda a criatividade dos estudantes. A ideia é que eles percebam que, se oscilarem muito rápido a montagem, a luz se acenderá. Algum estudante pode ter a ideia de girar, ou construir outra montagem para fazer isso – mas o importante é *manter a oscilação*. Esta discussão é o mote para o gerador de corrente alternada.

## Outras palavras (p. 219)

### Duas aplicações da indução eletromagnética

1. Quando a espira está na vertical, a força é nula.
2. Não. A corrente altera seu sentido a cada meia volta da espira.
3. Caso houvesse um contato simples, a espira não giraria, passando a oscilar.

## Capítulo 16 Corrente alternada

### Atividade introdutória

#### A origem da corrente alternada

Trata-se de uma simulação denominada “Faraday’s Electromagnetic Lab”, que pode ser encontrada no site PhET, da Universidade do Colorado, e ser salva no computador. Através de cinco janelas, além de visualizar o campo magnético produzido por um ímã em barra, pode-se aproximá-lo e afastá-lo de uma espira conectada a uma lâmpada ou a um voltímetro, visualizar o campo magnético criado pela passagem de corrente num solenoide, visualizar o princípio de funcionamento de transformadores ou, no caso da última janela, perceber como o movimento de uma turbina produz eletricidade.

Disponível em: <[http://phet.colorado.edu/simulations/sims.php?sim=faradays\\_electromagnetic\\_lab](http://phet.colorado.edu/simulations/sims.php?sim=faradays_electromagnetic_lab)>. Acesso em: 25 fev. 2016.

Pode-se permitir que os estudantes manipulem a simulação nos computadores da escola. No caso de a escola possuir um computador acoplado a um projetor, o professor pode manipular a simulação, conduzindo a atividade.

1. Imagine as partes da simulação como uma usina hidrelétrica e responda o que, na usina, faz o papel de torneira e de roda-d’água.

*Resposta possível: A torneira representa a abertura da represa que dá a vazão da água disponibilizada para as turbinas, as quais na simulação são representadas pela roda-d’água.*

2. Altere os parâmetros da simulação, escreva quais deles interferem ou não na produção da energia elétrica e descreva de que forma interferem.

*Resposta possível:*

— a rotação da turbina interfere na frequência da corrente produzida e na amplitude de sua oscilação;

— o strength, que representa a potência ou rendimento da turbina, interfere na amplitude da oscilação da corrente;

— a quantidade de voltas na espira interfere na intensidade/amplitude da corrente produzida, assim como a área de cada volta.

3. Descreva e explique, pelo princípio de indução de Faraday, a transformação de energia cinética da rotação da turbina em energia elétrica alternada.

Resposta possível: De acordo com o princípio, a turbina possui um grande ímã no seu interior; quando é rotacionada pela força das águas, o campo magnético produzido pelo ímã varia no interior das espiras fixas, que são colocadas próximo à turbina. Essa variação produz um campo elétrico no interior da espira, o que origina a corrente elétrica.

## Resolução dos exercícios propostos (p. 229)

**EP1.** Sim, mas o tempo em que isso ocorre é tão pequeno que esse evento fica imperceptível. No caso do ser humano, só seria possível observar a lâmpada piscando se a frequência fosse abaixo de 10 Hz.

**EP2.** Na corrente alternada, os elétrons invertem o seu sentido de movimento ordenado várias vezes por segundo; na corrente contínua, o movimento é ordenado e sempre no mesmo sentido.

**EP3.** Os transformadores são dispositivos que operam com correntes alternadas, transmitindo energia elétrica de um circuito para outro, alterando o valor da tensão.

**EP4.** A transformação da ddp ( $U$ ) é calculada, em caso ideal, por regra de três. Sendo  $N_p$  o número de espiras na bobina primária e  $N_s$  o número de espiras na bobina secundária, temos:

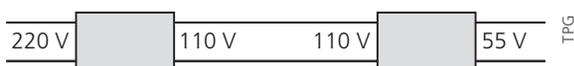
$$\frac{U_p}{U_s} = \frac{N_p}{N_s}$$

$$\frac{440}{110} = \frac{N_p}{N_s} = 4$$

Portanto, a razão é 4.

**EP5.** Não. Os transformadores precisam de variações de fluxo magnético em suas bobinas para funcionar, e a corrente contínua não produz esse fenômeno.

**EP6.** Sim, com uma ligação em série. A entrada do 1º transformador é ligada à entrada do 2º transformador.



### EP7.

- 01) Correto. Como a tensão de saída é o dobro da de entrada, então o número de espiras também deve ser o dobro, ou seja, 600 espiras.
- 02) Incorreto. Usando a expressão  $P = U \cdot I$ , obtemos a corrente de 6 A.
- 04) Correto. Campo magnético variável induz potencial elétrico.
- 08) Incorreto. O transformador não funciona com corrente contínua.
- 16) Correto. É a Lei de Lenz.

## Algo a mais

Professor, no boxe *Cuidados com a alta tensão*, da página 228, expõe-se o que é definido como alta tensão (em geral, tensões acima de 1000 V).

No entanto, no capítulo 4, vimos que o gerador de Van de Graaff trabalha com tensões muito mais elevadas e que as pessoas, apesar disso, podem pôr as mãos no equipamento. Talvez algum estudante possa levantar essa questão, dado que parece uma incoerência se tomar tanto cuidado com 1000 V e não com milhares, ou até milhões.

É importante então que, para prevenir acidentes, seja explicado aos estudantes que o efeito causado pelo choque elétrico é determinado pela corrente elétrica (tanto pelo tipo – alternada e contínua – quanto por sua amperagem).

Dessa forma, lugares que apresentam placas de alerta sobre a alta tensão são perigosos por terem uma corrente elétrica fatal, que não é necessariamente alta. Esse fato também explica por que levar um choque numa tomada pode ser fatal e num gerador de Van de Graaff, não.

No entanto, como os termos mais populares quando se pensa em eletricidade são a tensão e o volt, eles é que são usados nas placas de aviso.

## Conceitos fundamentais

Energia de repouso — energia que se associa à massa de repouso de uma partícula livre; sua intensidade é obtida com o produto da medida da massa de repouso pelo quadrado do valor da velocidade da luz no vácuo. Transformação de Lorentz — na Teoria da Relatividade Especial, essa transformação expressa relações entre distâncias e tempos em referenciais inerciais; ela depende da razão entre as velocidades relativas dos referenciais e de um parâmetro que se relaciona com a velocidade da luz no vácuo.

Átomo — a menor quantidade que pode ser obtida de matéria e que possui as propriedades químicas de certo elemento e não se subdivide nas transformações químicas. É um sistema estável, eletricamente neutro, que pode ser entendido como tendo um núcleo denso, positivamente carregado, e uma nuvem de elétrons.

Dualidade onda-partícula — princípio segundo o qual a luz apresenta aspectos ondulatórios ou corpusculares de acordo com o fenômeno em que ela está envolvida.

Interação forte — interação de alcance extremamente curto entre partículas elementares subatômicas denominadas hádrons, responsável pela estabilidade do núcleo atômico.

Interação fraca — interação entre partículas elementares subatômicas denominadas léptons.

## Articulações conceituais

O desenvolvimento da Relatividade Especial, que modificou a Mecânica newtoniana, está também estreitamente relacionado ao Eletromagnetismo. Com ele, advém a busca pelo éter — substância na qual se moveriam as ondas eletromagnéticas, da mesma forma como as ondas mecânicas necessitam de um meio material para se propagar.

O experimento de Michelson-Morley foi uma forma de detectar um movimento da Terra em relação a

esse referencial absoluto — o éter. Entretanto, como não foram encontrados indícios de sua existência, uma forma de salvá-lo foi conceber que o espaço tridimensional e o tempo se alteravam, sofrendo contrações e dilatações, respectivamente. Posteriormente esses fenômenos foram relacionados pelas transformações de Lorentz.

Einstein não precisou da ideia do éter para desenvolver sua Teoria da Relatividade Especial, que prevê as mesmas alterações no espaço e no tempo afirmadas anteriormente; mas, certamente, baseou-se nos estudos de Lorentz e Poincaré.

O desenvolvimento da teoria de Einstein parte da incoerência entre as transformadas galileanas para referenciais inerciais e a velocidade absoluta da luz, que é a mesma para qualquer referencial. Ou seja, aproximar-se de uma fonte de luz não faz com que ela se mova com velocidade maior, como  $v + c$ , mas interfere no tempo e no espaço da pessoa que se move, de modo que eles sejam dilatados e contraídos, respectivamente. Esse efeito só se torna perceptível à medida que há maior proximidade com o valor da velocidade da luz em um movimento. Segue a relação entre o fator gama ( $\gamma$ ), a velocidade da luz  $c$  e a velocidade do objeto  $v$ .

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

O fator permite, entre outros aspectos, o cálculo da dilatação do tempo e da contração do espaço.

Uma outra questão foi o estudo da equivalência entre os referenciais inerciais. Na Mecânica newtoniana, os fenômenos recebem a mesma descrição em referenciais inerciais. Entretanto, no Eletromagnetismo parecia que essa equivalência não ocorria; por exemplo, quando as cargas elétricas estão com uma velocidade em relação a você (em repouso num referencial inercial), não ocorre o mesmo fenômeno de quando você se move com essa mesma velocidade (em módulo) em

relação a elas, posto que no primeiro movimento temos a produção de campo magnético, e no segundo, não.

Outras discussões relacionam-se ao desenvolvimento das teorias da Relatividade Especial e da Relatividade Geral, esta prevendo a equivalência entre referenciais não inerciais. Exemplos são a equivalência entre massa de repouso e energia e o conceito de simultaneidade.

A Física Quântica possui um desenvolvimento paralelo e um pouco posterior à relatividade. Seu berço está na Termodinâmica e no Eletromagnetismo, nas questões de como podem os corpos aquecidos emitir radiações e de como o valor da temperatura pode interferir nesse espectro de emissão.

A busca pela compreensão do fenômeno da radiação de corpo negro, juntamente com o desenvolvimento de estudos menos referenciados na história reconstruída da Física, como os realizados nas áreas de espectroscopia e raios X, abriu caminho para a investigação da constituição da matéria. A história da natureza da matéria difere da relatividade pelo tempo de desenvolvimento e pelo número de cientistas que se envolveram. Para exemplificar, temos a abordagem pela Termodinâmica estatística dos osciladores de Planck, a separação entre o núcleo e a eletrosfera por Rutherford, as órbitas e estados estacionários de De Broglie e o entendimento dessas ondas como probabilidade de detecção pontual, realizada pela Escola de Copenhague.

Quanto à luz, Einstein retorna à discussão da sua natureza ondulatória ou corpuscular. Efeitos como o fotoelétrico e o Compton mostram comportamentos da luz como composta por partículas, comportamento esse tão contraditório e irreconciliável com os fenômenos de interferência e difração. Isso demanda de Bohr

sua dualidade, ou seja, um comportamento da luz ora como partícula, ora como onda, de acordo com o arranjo experimentado.

A Física Nuclear se desenvolve em decorrência da Quântica, do estudo da natureza do núcleo atômico e dos estudos de radioatividade natural, iniciados por Becquerel, pelo casal Curie e pelo próprio Rutherford.

Os estudos das partículas  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  emitidas pelos núcleos instáveis auxiliaram no entendimento das interações nucleares fracas e fortes existentes entre prótons e nêutrons, e entre prótons e prótons de modo a compensar as repulsões coulombianas e manter o núcleo estável.

O estudo dos constituintes dos átomos e das suas interações leva ao modelo padrão de partículas, com seus férmions e bósons divididos em léptons, hádrons, quarks e partículas mensageiras, as novas responsáveis pelas interações no lugar das forças.

Trata-se de um conteúdo da Física que, além de novas considerações, apresenta um amálgama de toda a Física anterior.

Quanto às áreas de conhecimento, há uma relação próxima entre a Química e a Física Quântica e Nuclear, como na natureza da matéria, seus constituintes e os decaimentos radioativos.

Em relação às outras áreas do conhecimento, a Física Moderna influenciou — e foi influenciada por — contextos sociais, políticos e culturais. Além do avanço tecnológico e da terceira Revolução Industrial, estudada pela Geografia, há influência na Segunda Guerra Mundial e na posterior Guerra Fria, que são objetos de estudo da História.

## Capítulo 17 Teorias da Relatividade

### Atividade introdutória

#### A história do desenvolvimento de uma ideia

A figura de Einstein e a Teoria da Relatividade possuem um certo mistério. As pessoas em geral já ouvi-

ram falar do famoso Einstein ou viram a foto daquele cientista que uma vez posou mostrando a língua. E, de certa forma, todo o estereótipo cinematográfico de cientista maluco advém da figura de Einstein.

Assim, esta atividade introdutória consiste na exposição de um episódio de uma série de documentários,

intitulado *A saga do Prêmio Nobel — Da relatividade ao Big Bang*, que já foi transmitido pela TV Escola e pode ser facilmente encomendado ou também localizado na internet.

Com aproximadamente meia hora de duração, o episódio relata a vida de Albert Einstein, o contexto histórico no qual viveu e todo o desenvolvimento das teorias da Relatividade Especial e Geral, assim como o entendimento da origem do Universo.

A atividade consiste em propor aos estudantes que destaquem aspectos relevantes para posterior discussão.

Os aspectos relevantes a serem destacados pelos estudantes podem ser relacionados a dois temas: o primeiro são as questões científicas e as soluções abordadas no filme e o segundo, aspectos que mostrem de que forma o contexto da época influenciou Einstein e as suas teorias.

Em relação ao primeiro tema, destacamos as abordagens da Teoria da Relatividade de Galileu, o experimento de Michelson/Morley, a Teoria da Relatividade Especial de Einstein, sua ampliação ao tratar do problema da gravitação, a detecção da curvatura na trajetória da luz no eclipse solar, as observações de Hubble, a nucleossíntese de Gamow e as detecções da radiação cósmica de fundo de Penzias e Wilson.

## Resolução dos exercícios propostos (p. 245)

**EP1.** O essencial, aqui, está no fato de que as águas que em tempos anteriores passaram pelo lugar não mais estão nesse lugar e, portanto, o rio não é mais o mesmo. Além disso, também não somos os mesmos. Somos, pois, pessoas que evoluem com o tempo: o que éramos ontem, hoje não somos mais, nem seremos amanhã os mesmos de hoje.

A propósito, o que é o **contínuo espaço-tempo**?

Em nosso Universo, para falar de **tempo** precisamos também, necessariamente, falar de **espaço**. Essas duas grandezas constituem o que denominamos **contínuo espaço-tempo** de quatro dimensões: três dimensões espaciais (direita-esquerda; frente-atrás; acima-abaixo) e uma dimensão temporal.

De acordo com a Teoria da Relatividade, todos os eventos (seja um balão subindo na atmosfera, seja a colisão de um cometa com outro corpo celeste, seja

a aparição de uma estrela supernova etc.) devem ser caracterizados por sua posição no contínuo espaço-tempo quadridimensional. Assim, uma posição no espaço-tempo é dada por quatro números: três espaciais e um temporal (dando o instante do evento).

**EP2.** Sendo  $\Delta t$  o tempo decorrido na Terra e  $\Delta t'$  o tempo medido pelo astronauta, obtemos:

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{12}{\sqrt{1 - \frac{(0,8c)^2}{c^2}}} = \frac{12}{\sqrt{0,36}} = 20$$

Portanto, o observador na Terra terá envelhecido 20 anos.

Alternativa correta: e

**EP3.** São dados:  $v = 60\%$  de  $c = 0,6c$ ;  $\Delta t' = 8$  anos. Então, temos:

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{8}{\sqrt{1 - \frac{(0,6c)^2}{c^2}}} = \frac{8}{\sqrt{0,64}} = 10$$

Portanto, o tempo decorrido para a gêmea na Terra será de 10 anos.

**EP4.** A velocidade da luz é independente das velocidades da pessoa e do espelho. A situação suposta seria impossível.

Alternativa correta: a

**EP5.** Analisando as afirmativas, temos:

I. Correta, pois a velocidade da luz independe do sistema de referência inercial utilizado.

II. Incorreta, pois vale para referenciais inerciais.

III. Incorreta, pois o cozinheiro e os pratos preparados estão juntos, em movimento, na mesma nave.

IV. Correta, pois existe o limite da velocidade da luz.

V. Correta, porque o tempo passa mais lentamente no satélite em relação ao tempo na Terra.

As afirmativas corretas são: I, IV e V.

**EP6.** São dados:  $L' = 100$  m;  $L = 80$  m.

Segundo a contração do espaço, temos o seguinte:

$$L = L' \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$$80 = 100 \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{(3 \cdot 10^8)^2}} \Rightarrow v = 1,8 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Essa é a velocidade da cosmonave em relação a S.

**EP7.** São dados:  $v = 2,994 \cdot 10^8$  m/s;  $L' = 9000$  m.

De acordo com a contração do espaço, temos:

$$L = L' \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$$L = 9000 \cdot \sqrt{1 - \frac{(2,994 \cdot 10^8)^2}{(3 \cdot 10^8)^2}}$$

$$\therefore L \cong 568,9 \text{ m}$$

Alternativa correta: a

**EP8.** São dados:  $m_0 = 10,00$  mg;  $v = 0,3c$ .

Para o cálculo da massa relativística  $m$ , temos:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{10,00}{\sqrt{1 - \frac{0,09c^2}{c^2}}} = \frac{10,00}{\sqrt{0,91}}$$

$$\therefore m \cong 10,48 \text{ mg}$$

**EP9.** Se a massa  $m_0$  aumentar em 0,001%, teremos  $m = 100,001\%$  de  $m_0$ , ou seja:  $m = 1,00001m_0$ .

Logo:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$1,00001 m_0 = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{(3 \cdot 10^8)^2}}}$$

$$\therefore v \cong 1,342 \cdot 10^6 \text{ m/s}$$

**EP10.** São dados:

$m = 1000$  kg =  $1000000$  g, pois  $V = 1$  m<sup>3</sup> (a densidade da água é  $1$  g/cm<sup>3</sup> =  $1000$  kg/m<sup>3</sup>);

$\Delta t_c = \Delta T = 27$  °C, pois  $300$  K –  $273$  K =  $27$  K.

Então, a quantidade de calor envolvida nesse aquecimento é:

$$Q = m \cdot c_{\text{água}} \cdot \Delta t_c = 1000000 \cdot 1 \cdot 27$$

$$Q = 27000000 \text{ cal} = 113400000 \text{ J}$$

Agora, aplicamos a expressão  $E = \Delta m \cdot c^2$ :

$$113400000 = \Delta m \cdot (3 \cdot 10^8)^2$$

$$\Delta m = 1,26 \cdot 10^{-9} \text{ kg} = 1,26 \cdot 10^{-3} \text{ mg}$$

Isso é o mesmo que  $0,00126$  mg.

**EP11.**

$$V = v_0 + a \cdot t$$

$$3 \cdot 10^8 = 0 + 10 \cdot t$$

$$t = 3 \cdot 10^7 \text{ s}$$

Vamos calcular a quantidade em segundos de:

$$1 \text{ dia} = 24 \cdot 60 \cdot 60 \text{ s} = 86400 \text{ s}$$

$$1 \text{ semana} = 7 \cdot 86400 \text{ s} = 604800 \text{ s}$$

$$1 \text{ mês} = 30 \cdot 86400 \text{ s} = 2592000 \text{ s}$$

$$1 \text{ semestre} = 6 \cdot 2592000 \text{ s} = 15552000 \text{ s}$$

$$1 \text{ ano} = 12 \cdot 2592000 \text{ s} = 31104000 \text{ s} \cong 3 \cdot 10^7 \text{ s}$$

Alternativa correta: e

**EP12.** Resposta pessoal.

## Atividade prática (p. 233)

### Explorando referenciais com auxílio de uma câmera

Esta atividade tem o intuito de introduzir de forma ilustrativa as descrições espaciais dos diferentes sistemas de coordenadas de acordo com o referencial adotado. Para realizá-la, são necessárias câmeras que gravem vídeos e orientações espaciais desenhadas.

Ao término, é esperado que os estudantes compreendam que cada movimento pode ser descrito por vários referenciais, e que há sempre a necessidade da adoção de um sistema de referências. É um primeiro passo para depois trabalhar as grandezas espaço e tempo nos postulados.

Veja as orientações para os itens do tópico *Discussão*:

1. Resposta pessoal. Espera-se que, se as gravações foram feitas com rigor, seja impossível estabelecer parâmetros para diferenciar quem está em movimento, nos dois casos.
2. Resposta pessoal. Alguns estudantes costumam utilizar argumentos externos, como vibrações, sombras etc., para justificar uma ou outra escolha. A conclusão desta primeira parte, após o confronto das diversas respostas e da mediação do professor, deve caminhar para a adoção prévia de um sistema de referência/coordenadas.

Na prática, isso equivale a escolher onde fica o “zero” dos espaços em cada referencial. Alguns grupos podem colocar o 0 na caixa de fósforos e aumentar os valores de  $x$  conforme se aproximam da câmera; outros colocam o 0 onde a câmera está

inicialmente. O efeito será o mesmo, o que muda é a descrição do movimento.

3. Resposta pessoal. Os valores do espaço inicial e do espaço final dependem da escolha pessoal da origem do sistema de referências.
4. Resposta pessoal. Nesse caso, todas as medidas tendem a se aproximar de um mesmo valor médio.
5. Resposta pessoal. Para grupos que adotam o mesmo referencial, as velocidades medidas serão aproximadamente iguais.

Entretanto, o comparativo entre grupos que adotaram referenciais diferentes mostrará a descrição diferente. Para uns, a velocidade calculada será positiva e para outros, negativa. A descrição do movimento de acordo com os referenciais adotados está diretamente ligada ao primeiro postulado, e introduz o segundo na medida em que a luz foge a esta regra.

## Outras palavras (p. 240)

### Paradoxos e o paradoxo dos gêmeos

1. Não, isso significa que a noção de tempo será diferente para uma pessoa na espaçonave e uma pessoa na Terra, por exemplo.
2. a) Para Paulo se passariam 5,38 anos.  
b) Para Diana se passariam 3,23 anos.  
c) Para Diana, Paulo teria 21 anos, enquanto, para Paulo, Diana teria 23 anos.

## Atividade sugerida

### Um artigo de Einstein

A atividade consiste na leitura de um trecho do artigo "A dinâmica relativística antes de Einstein", que Roberto Martins publicou na *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 27, n. 1, 2005, disponível *on-line*. O artigo discute o desenvolvimento da Física que resultou no Princípio da Relatividade Especial e, no trecho selecionado, a relevância de Einstein nesse desenvolvimento.

Assim, o objetivo da atividade é exatamente discutir o fato de que a ciência é uma construção que depende de muitas pessoas, ao contrário do pensamento geral de que é feita por gênios solitários. Disponível em: <<http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/martins.pdf>>. Acesso em: 25 fev. 2016.

Ofereça aos estudantes a leitura do tópico 11 do artigo, que vai da página 21 à 23, excluindo-se as notas de rodapé.

Após a leitura sugere-se uma discussão, para a qual propomos algumas questões orientadoras:

1. Segundo o texto, qual foi o papel de Einstein em relação à Teoria da Relatividade Especial?

*Resposta possível: Seu papel, em relação à teoria, foi o de "popularizá-la", por meio de uma escrita matemática mais simples.*

2. O que Einstein trouxe de novo à teoria?

*Resposta possível: Além da simplicidade, destacada na questão anterior, ele trouxe a relação massa-energia e a inexistência do éter.*

3. Qual é a diferença entre a teoria enunciada por Einstein e a enunciada por Lorentz e Poincaré?

*Resposta possível: A diferença é que, para Einstein, não era necessário o éter, enquanto para Lorentz e Poincaré ele era necessário.*

4. Cite o nome de quatro cientistas e suas contribuições para a teoria.

*Resposta possível:*

Cientista	Contribuição
Max von Laue	Tensor momento-energia
Minkowski	Formalismo quadridimensional espaço-temporal
Planck	Termodinâmica relativística
Lorentz	Transformações espaço-tempo



## Atividade introdutória

### A história da Física Quântica

Esta atividade introdutória consiste na exposição de um episódio de uma série de documentários, intitulado *A saga do Prêmio Nobel – A teoria quântica*, que já foi transmitido pela TV Escola e pode ser encomendado ou localizado na internet.

Com aproximadamente meia hora de duração, o episódio revela o desenvolvimento da teoria, a partir da sua história, mostrando as influências da Segunda Guerra Mundial e os embates filosóficos entre Einstein e Bohr.

A proposta desta atividade é fornecer aos estudantes alguns aspectos para serem discutidos e sintetizados após a visualização do filme.

Os aspectos relevantes a serem destacados pelos estudantes podem ser relacionados à natureza da luz e da matéria, à relação entre a quântica e o nazismo ou às discussões epistemológicas entre Einstein e Bohr.

### Resolução dos exercícios propostos (p. 260)

**EP1.** São dados:  $f = 5,45 \cdot 10^{14}$  Hz;  $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$  J · s;  $c = 3,0 \cdot 10^8$  m/s.

a) Pela equação fundamental de onda, obtemos:

$$c = \lambda \cdot f$$

$$3,0 \cdot 10^8 = \lambda \cdot 5,45 \cdot 10^{14} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \lambda \cong 5,5 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

b) A energia é dada por:

$$E = h \cdot f = 6,6 \cdot 10^{-34} \cdot 5,45 \cdot 10^{14}$$

$$\therefore E = 3,597 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$\text{ou } E \cong 2,25 \text{ eV}$$

**EP2.** O referido valor mínimo da frequência é dado por  $f_{\min} = \frac{\tau}{h}$ , porque a frequência mínima corresponde à situação em que a energia cinética é nula.

$$E_c = h \cdot f - \tau \Rightarrow$$

$$\Rightarrow 0 = h \cdot f_{\min} - \tau \Rightarrow$$

$$\Rightarrow f_{\min} = \frac{\tau}{h}$$

**EP3.** O maior valor de  $\lambda$  ocorre quando a frequência é mínima:

$$f_{\min} = \frac{\tau}{h} = \frac{4,0}{4,0 \cdot 10^{-15}} \Rightarrow f_{\min} = 1,0 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$$

Então, o comprimento de onda correspondente é:

$$c = \lambda \cdot f$$

$$3,0 \cdot 10^8 = \lambda \cdot 1,0 \cdot 10^{15}$$

$$\therefore \lambda = 3,0 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

Alternativa correta: c

**EP4.** O comportamento ondulatório ou o comportamento corpuscular da luz depende do fenômeno estudado.

Alternativa correta: b

**EP5.**

I) Correta, pois  $E = h \cdot f$ , ou seja, a energia é proporcional à frequência.

II) Correta.

III) Correta.

IV) Incorreta, pois é o efeito fotoelétrico que é explicado pelo comportamento corpuscular da luz.

As proposições corretas são: I, II e III.

**EP6.** Se a energia cinética final for o quádruplo da inicial, temos:

$$E_{c \text{ final}} = 4 \cdot E_{c \text{ inicial}}$$

$$\frac{m \cdot v^2}{2} = 4 \cdot m \cdot \frac{v_0^2}{2}$$

$$v = 2v_0$$

$$\text{O comprimento de onda original é: } \lambda = \frac{h}{m \cdot v_0}$$

Então, o novo comprimento de onda será:

$$\lambda' = \frac{h}{m \cdot v}$$

$$\lambda' = \frac{h}{m \cdot 2v_0} = \frac{\lambda}{2}$$

O comprimento de onda original fica dividido por 2.

**EP7.** Calculamos a variação entre as energias dos dois estados, sendo o 2º estado excitado o de  $n = 3$ , e o fundamental,  $n = 1$ :

$$E_3 - E_1 = -1,51 - (-13,6) = 12,09 \text{ eV}$$

**EP8.** As emissões ocorrem nas transições *b* e *c*. Mas o menor comprimento de onda é observado quando a frequência é maior, ou seja, quando a energia do fóton emitido é maior. Isso ocorre de  $n = 2$  para  $n = 1$ .

A resposta correta é a transição *b*.

**EP9.** Sabemos que  $E = 12,09 \text{ eV}$ . Então, podemos calcular a frequência:

$$E = h \cdot f$$

$$12,09 = 4,13 \cdot 10^{-15} \cdot f$$

$$f \cong 2,93 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$$

Assim, o comprimento de onda é:

$$c = \lambda \cdot f$$

$$3,0 \cdot 10^8 \cong \lambda \cdot 2,93 \cdot 10^{15}$$

$$\therefore \lambda \cong 1,02 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

**EP10.** Não, pois isso violaria o princípio da incerteza de Heisenberg, segundo o qual não podemos conhecer a posição e a velocidade (e, consequentemente, a quantidade de movimento) do elétron, simultaneamente.

**EP11.** Alternativa correta: *d*

**EP12.** A frequência deve ser mantida, e a intensidade, dobrada, ou seja, alternativa *b*.

## Atividade prática (p. 251)

### Construindo um espectroscópio

Professor, nesta atividade vamos construir um espectroscópio e com ele analisar qualitativamente alguns espectros de emissão.

Ao incidir luz policromática numa rede de difração, observaremos que, quanto maior o comprimento de onda da componente, maior será o ângulo de desvio, isto é, cada cor de luz aparecerá em um ponto diferente do anteparo, dependendo de seu comprimento de onda  $\lambda$ . Ao conjunto de componentes da luz chamamos **espectro**.

Lâmpadas incandescentes produzem espectros contínuos, ou seja, os comprimentos de onda emitidos por um sólido incandescente são tão próximos que não percebemos separação entre eles. Já as lâmpadas que têm gases em seu interior emitem um espectro discreto característico do gás, isto é, alguns comprimentos de onda bem distintos.

O modelo atômico de Bohr, com seus postulados de níveis discretos de energia permitidos aos elétrons, é útil para compreendermos a absorção de uma faixa do espectro de luz, pelo fato de essa frequência coincidir com a do fóton emitido por conta da transição entre níveis de energia possíveis para os elétrons naquele elemento químico.

O aparelho mostrará uma lacuna nesta faixa de energia, porque coincide com a energia usada na emissão. No caso da observação do céu, há gases na atmosfera que demandam outras linhas de absorção.

Veja os comentários para os itens do tópico *Discussão*:

- a) A luz, ao passar pelo recorte e pela camada acrílica do CD, sofre difração e se divide num espectro de cores.  
b) Espera-se observar falhas (separações) escuras entre as cores.  
c) Dependendo do material na lâmpada, pode haver diferença de intensidade perceptível entre as cores do espectro. Para o mercúrio, por exemplo, a faixa correspondente ao amarelo é bem menos intensa que as do azul, vermelho e verde.  
d) As lâmpadas fluorescentes estão disponíveis em todos os tamanhos e formas, mas elas funcionam com o mesmo princípio básico: uma corrente elétrica estimula os átomos de argônio e vapor de mercúrio que preenchem a região interna da lâmpada; isso faz com que eles liberem fótons na faixa de frequência do ultravioleta. Estes fótons, por sua vez, estimulam o fósforo em pó no interior do vidro, que emite fótons de luz na frequência da luz visível.

A corrente elétrica que provoca a ionização do gás existe quando há diferença de potencial entre os terminais da lâmpada.

As falhas no espectro apresentam comprimentos de onda iguais aos da radiação absorvida pelo átomo do gás durante a excitação.

- Em dias de céu claro, as linhas espectrais são causadas pela absorção da luz pelos elementos existentes nas camadas mais externas do Sol. Algumas das faixas observadas são também causadas pela absorção da luz pelo oxigênio existente na atmosfera terrestre.

As linhas nem sempre são passíveis de observação com um dispositivo "caseiro". De todo modo, é

oportuno discutir com os estudantes sobre a existência de poluentes no ar, e se é possível distingui-los usando essa técnica, ou até fazer um diagnóstico da presença de algum gás específico no ar.

Você pode testar com quantos gases for possível, como o escapamento de um carro, hélio etc. Cada elemento terá sua banda de emissão e de absorção específicas.

## Outras palavras (p. 258)

### O gato de Schrödinger

1. De acordo com o paradoxo, em (1) o gato está vivo e morto.
2. O outro estado é descartado da possibilidade, pois sua observação eliminou a chance da superposição dos dois estados possíveis.
3. O experimento mental é um paradoxo, pois o evento de estar “vivo” e “morto” não pode ser aplicado a um mesmo ser concomitantemente, ou seja, um ser só pode estar vivo ou morto.

## Atividade sugerida

### Modelos atômicos

Trata-se de uma simulação disponível para salvar no computador pelo *site* PhET, da Universidade do Colorado, e denomina-se *Models of the Hydrogen Atom*. Consiste em um boxe contendo gás hidrogênio sobre o qual são lançados fótons da luz visível e/ou ultravioleta. Podem-se ver os fótons antes e depois da interação com o material, que fica escondido. Há ainda uma opção que mostra como alguns modelos atômicos predizem os resultados experimentais, que são os tradicionais bola de bilhar, pudim de passas, de Rutherford (Sistema Solar), de Bohr, de De Broglie e de Schrödinger. Disponível em: <[http://phet.colorado.edu/simulations/sims.php?sim=models\\_of\\_the\\_hydrogen\\_atom](http://phet.colorado.edu/simulations/sims.php?sim=models_of_the_hydrogen_atom)>. Acesso em: 25 fev. 2016.

No caso de a escola possuir computadores, pode-se permitir que os estudantes respondam às questões individualmente ou em grupos, manipulando a simulação. No caso de a escola possuir um computador acoplado a um projetor, o professor pode comandar a simulação, encaminhando a atividade.

No modo experimento, habilita-se a janela *show spectrometer*, que mostrará todos os fótons emitidos pelo átomo, e o canhão de fótons é ligado para a luz branca. Explique o que se passa no experimento, depois migre para as janelas dos modelos atômicos e os exponha um a um. A seguir, alguns exercícios sobre os modelos atômicos:

1. Descreva diferenças e semelhanças entre os modelos atômicos.

*Resposta possível: Todos possuem distribuição esférica e são divididos em núcleo e eletrosfera a partir do modelo de Rutherford. A diferença entre os três últimos consiste na natureza do elétron, que, no modelo de Bohr, é uma bolinha, no de De Broglie, uma onda estacionária, e no de Schrödinger, uma distribuição de probabilidade.*

2. Para o experimento e para cada modelo atômico, altere a emissão para *fast* e, após um determinado tempo, fotografe o resultado do espectrômetro. Anote a quantidade de fótons emitidos e suas frequências.

*Resposta possível: Os valores dependerão do tempo, mas, quando deixados por um tempo suficiente, os fótons emitidos pelo experimento e pelos modelos de Bohr, De Broglie e Schrödinger possuem duas faixas de frequência no ultravioleta, uma no violeta, uma no azul-escuro, uma no claro, uma no vermelho e três no infravermelho.*

3. Qual é o modelo atômico que prevê melhor o resultado experimental? Justifique.

*Resposta possível: Os modelos de Bohr, De Broglie e Schrödinger, porque os fótons emitidos possuem as mesmas frequências do experimento.*



## Atividade introdutória

### Contaminação radioativa

A atividade consiste na leitura e discussão de um texto sobre contaminação radioativa publicado na revista *Física na Escola*, v. 8, n. 2, 2007, sob o título "O que é irradiação? E contaminação radioativa?". O texto discute os tipos de radiações, seus efeitos biológicos e mitos sobre a radioatividade. Disponível em: <<http://www.sbfisica.org.br/fne/Vol8/Num2/v08n02a11.pdf>>. Acesso em: 25 fev. 2016.

Sugerimos, após a leitura, a discussão das seguintes questões:

1. Qual a relação entre a intensidade da radiação e a distância?

*Resposta possível: A intensidade diminui com o quadrado da distância.*

2. Quais os tipos de radiação e os danos que podem provocar nos humanos? Justifique.

*Resposta possível: radiação  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$ . A primeira não atravessa a pele, mas é perigosa se a ingerirmos. A segunda entra alguns milímetros na pele, podendo causar câncer e problemas nos olhos. E a terceira é a mais perigosa, porque é altamente penetrante.*

3. Como a radiação pode causar o câncer?

*Resposta possível: A radiação destrói as moléculas das células, de forma que elas se regeneram com falhas.*

4. Qual é a diferença entre a contaminação radioativa e a por microrganismos?

*Resposta possível: A diferença é que a radioativa, ao passar para outras pessoas, vai diminuindo, porque está associada ao composto radioativo; já a contaminação por microrganismos vai aumentando, pois eles são seres vivos e procriam.*

5. De que forma a radiação está presente no nosso cotidiano?

*Resposta possível: Existe a radiação que vem do espaço e aquela presente na natureza: nos nossos alimentos, na água e nos elementos que usamos para fazer nossos objetos.*

6. Analise se há riscos nos casos a seguir e justifique sua resposta:

- a) Aproximar-se de uma pessoa que teve câncer e fez radioterapia.

*Resposta possível: Não, porque a pessoa não está com nenhum composto radioativo no corpo.*

- b) Aproximar-se de uma pessoa que tomou contraste para fazer radiografia.

*Resposta possível: Não, porque a pessoa eliminou o composto radioativo do corpo.*

- c) Comer banana, que contém elemento radioativo em sua composição.

*Resposta possível: Não, porque a quantidade de material radioativo não é muito grande e é eliminada pelo corpo.*

- d) Fazer cirurgia com objetos esterilizados por radiação.

*Resposta possível: Não, porque a pessoa não está com nenhum composto radioativo em contato com o corpo.*

- e) Fazer radioterapia.

*Resposta possível: Sim, porque a pessoa terá muita radiação em contato com o corpo, mas o efeito não se prolonga após o contato.*

- f) Abrir uma cápsula contendo material radioativo.

*Resposta possível: Sim, porque a pessoa terá compostos radioativos em contato com o corpo.*

## Resolução dos exercícios propostos (p. 280)

**EP1.** Se a fração medida era de  $\frac{1}{4}$ , então temos:

$$n = \frac{n_0}{4}$$

Logo:

$$n = \frac{n_0}{2^x} \text{ ou}$$

$$\frac{n_0}{4} = \frac{n_0}{2^x}$$

$$4 = 2^x$$

$$\therefore x = 2$$

Concluimos que se passaram 2 períodos em 16 dias. Portanto, o período de meia-vida é:  
16 dias : 2 = 8 dias.

**EP2.** Decaimento radioativo é o fenômeno em que ocorre a redução da quantidade de átomos radioativos de uma amostra, devido à sua desintegração.

**EP3.** Quatro meses são  $4 \cdot 30$  dias = 120 dias. Sendo a meia-vida de 24 dias, temos:  $120 : 24 = 5$ , ou seja, 5 períodos em 120 dias.

Então:

$$n = \frac{n_0}{2^x} = \frac{n_0}{2^5} = \frac{n_0}{32} = 0,03125n_0$$

Portanto, restará 3,125% da amostra inicial.

**EP4.**

- I. Incorreta.
- II. Incorreta, porque libera energia.
- III. Correta.
- IV. Incorreta.

Alternativa correta: III.

**EP5.** Se a taxa de carbono é de  $\frac{1}{4}$  da normal, temos:

$$n = \frac{n_0}{4}$$

Assim:

$$n = \frac{n_0}{2^x} \quad \text{ou} \quad \frac{n_0}{4} = \frac{n_0}{2^x}$$

$$4 = 2^x$$

$$x = 2$$

Portanto, são 2 períodos de 5 700 anos. Ou seja:  
 $2 \cdot 5\,700$  anos = 11 400 anos.

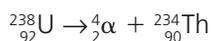
**EP6.**

01. Correta, pois há reação em cadeia.
02. Correta, pois:  $2 \cdot 10^{13}$  J : (200 milhões) =  $= 2 \cdot 10^{13}$  J :  $(2 \cdot 10^8)$  =  $1 \cdot 10^5$  J.
04. Correta, pois os prótons são carregados positivamente.
08. Incorreta, porque o elétron é carregado negativamente e interage ao atravessar um campo elétrico.

O somatório das corretas é: 01 + 02 + 04 = 07.

**EP7.**

- a) De acordo com a série de emissões do urânio-238 ( $n^\circ$  atômico 92) que decai para tório-234 ( $n^\circ$  atômico 90), há redução de 4 unidades na massa atômica e de 2 unidades no número atômico, o que corresponde à emissão de radiação alfa:



- b) Nesse caso, do chumbo-214 ( $n^\circ$  atômico 82) para bismuto-214 ( $n^\circ$  atômico 83), há aumento de 1 unidade no número atômico, sem variação na massa atômica. Isso corresponde à emissão de radiação beta:



**EP8.** É o decaimento beta:  ${}_{6}^{14}\text{C} \rightarrow {}_{7}^{14}\text{N} + {}_{-1}^0\text{e}$

**EP9.** Alternativa correta: b

**EP10.** Como o índice de incerteza é igual a 15%, então a idade estará entre 425 e 575 anos ( $15\% \cdot 500 = 75$ ).

**EP11.** Somente as afirmativas I e IV são corretas.

Alternativa correta: b

**EP12.** Para elevar a temperatura do lago em  $1^\circ\text{C}$  seriam necessárias:

$$5 \cdot 10^8 \text{ litros} \cdot 1\,000 \text{ cal/litro} = 5 \cdot 10^8 \cdot 10^3 \text{ calorias} = 5 \cdot 10^{11} \text{ calorias.}$$

Portanto, o aumento de temperatura seria de:

$$\frac{15 \cdot 10^{12} \text{ cal}}{5 \cdot 10^{11} \text{ cal}} = 30^\circ\text{C}$$

A temperatura final do lago seria  $55^\circ\text{C}$ .

Alternativa correta: c

**EP13.** O estudante pode citar a grande densidade do buraco negro, ou seja, uma massa muito grande em um volume muito pequeno. Além disso, poderá encontrar a informação de que explosões estelares geram buracos negros, dependendo da massa da estrela.

E, usando o próprio livro ou outras fontes, encontrar a informação de que a densidade do buraco negro é tão grande que, ao dobrar o espaço-tempo, absorve tudo ao seu redor, inclusive a luz.

## Outras palavras (p. 273)

### Usinas nucleares brasileiras

Professor, essa mesma discussão pode ser trabalhada em outros casos mais recentes, como a construção da usina de Belo Monte (rio Xingu, Pará) e a transposição do rio São Francisco.

Para exemplificar os problemas ambientais que podem decorrer da intervenção humana, sugerimos que trabalhe o caso do mar de Aral (Ásia Central), que em 40 anos praticamente sumiu devido a um desvio mal planejado.

Note que a apresentação desse caso é somente para mostrar aos estudantes que um projeto mal elaborado pode trazer sérios riscos ao meio ambiente. Incentive os estudantes a lerem mais sobre o assunto para formarem suas próprias opiniões sobre os riscos e benefícios desse tipo de intervenção.

Veja os comentários para os itens do tópico *Discussão*:

- Entre as justificativas possíveis para a construção, podemos citar a Guerra Fria, quando, para exercer sua influência no mundo, as duas superpotências (Estados Unidos e União Soviética) forneciam tecnologias aos países em desenvolvimento; e a necessidade de o Brasil adquirir, estudar e compreender

a tecnologia nuclear para não ser dependente de outros países.

Já para a localidade de Angra dos Reis, pode-se citar a proximidade com os três grandes centros consumidores (equidistante de Belo Horizonte, Rio de Janeiro e São Paulo), a proximidade com o mar e até mesmo aspectos políticos da época.

- Resposta pessoal.

## Outras palavras (p. 279)

### É possível estudar o impossível?

- Algo impossível pode tornar-se possível com pesquisas e trabalhos, muitas vezes conjuntos, para se tentar entender o tal fato "impossível". Mesmo que as tentativas se mostrem em vão, grandes descobertas durante esse processo podem ser feitas.
- A viagem no tempo, por exemplo. É possível usar filmes para montar a tese.

## Propostas de plano anual

O plano de aula a seguir apresenta sugestões semanais de algumas seções selecionadas do livro do estudante e das Orientações Didáticas. Há também uma sugestão de cronograma para avaliação.

Semestre	Bimestre	Semana	Capítulos	Atividades/2 h semanais	Atividades/4 h semanais
1 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	1		Avaliação diagnóstica.	Avaliação diagnóstica.
		2	1 - Eletrização	<i>Atividade prática e Exercícios.</i>	<i>Atividade introdutória, Exercícios, Atividade prática e Outras palavras.</i>
		3	2 - Força elétrica	<i>Atividade introdutória.</i>	<i>Atividade introdutória e Exercícios.</i>
		4		<i>Exercícios e Outras palavras.</i>	<i>Outras palavras, Atividade prática e Atividade sugerida.</i>
		5	3 - Campo elétrico	<i>Exercícios e Outras palavras.</i>	<i>Atividade introdutória, Exercícios, Atividade prática e Outras palavras.</i>
		6	4 - Potencial elétrico	<i>Exercícios e Outras palavras.</i>	<i>Atividade introdutória, Exercícios. Atividade prática e Outras palavras.</i>
		7	5 - Trabalho da força elétrica	<i>Exercícios e Outras palavras.</i>	<i>Atividade introdutória, Exercícios e Outras palavras.</i>
		8		Avaliação somativa.	Avaliação somativa.

1ª	2ª	1	6 - Condutores em equilíbrio eletrostático	<i>Atividade introdutória e Exercícios.</i>	<i>Atividade introdutória, Exercícios e Outras palavras.</i>
		2	7 - Capacitor	<i>Atividade introdutória e Exercícios.</i>	<i>Atividade introdutória e Exercícios.</i>
		3		<i>Exercícios e Atividade sugerida.</i>	<i>Exercícios e Atividade sugerida.</i>
		4	8 - Corrente elétrica	<i>Exercícios e Atividade prática.</i>	<i>Atividade introdutória, Exercícios, Outras palavras e Atividade prática.</i>
		5	9 - Resistores elétricos	<i>Atividade introdutória e Exercícios.</i>	<i>Atividade introdutória e Exercícios.</i>
		6		<i>Exercícios e Atividade prática.</i>	<i>Exercícios, Atividade prática e Atividade sugerida.</i>
		7	10 - Aparelhos de medição elétrica	<i>Exercícios e Outras palavras.</i>	<i>Atividade introdutória, Exercícios, Outras palavras e Atividade prática.</i>
		8		<i>Avaliação somativa.</i>	<i>Avaliação somativa.</i>
2ª	3ª	1	11 - Geradores e receptores elétricos	<i>Atividade introdutória e Exercícios.</i>	<i>Atividade introdutória e Exercícios.</i>
		2		<i>Exercícios.</i>	<i>Exercícios e Atividade sugerida.</i>
		3	12 - Leis de Kirchhoff	<i>Atividade prática e Exercícios.</i>	<i>Atividade prática e Exercícios.</i>
		4	13 - Campo magnético	<i>Exercícios e Outras palavras.</i>	<i>Atividade introdutória, Exercícios, Outras palavras e Atividade prática.</i>
		5	14 - Força magnética	<i>Atividade introdutória e Exercícios.</i>	<i>Atividade introdutória e Exercícios.</i>
		6		<i>Exercícios.</i>	<i>Exercícios e Atividade prática.</i>
		7	15 - Indução eletromagnética	<i>Exercícios e Outras palavras.</i>	<i>Atividade introdutória, Exercícios e Atividade prática.</i>
		8		<i>Avaliação somativa.</i>	<i>Avaliação somativa.</i>
2ª	3ª	1	16 - Corrente alternada	<i>Atividade introdutória e Exercícios.</i>	<i>Atividade introdutória, Exercícios e Algo a mais.</i>
		2	17 - Teorias da Relatividade	<i>Atividade introdutória e Exercícios.</i>	<i>Atividade introdutória e Exercícios.</i>
		3		<i>Exercícios e Atividade prática.</i>	<i>Exercícios, Outras palavras e Atividade prática.</i>
4ª	4ª	4	18 - Teoria Quântica	<i>Atividade introdutória e Exercícios.</i>	<i>Atividade introdutória e Exercícios.</i>
		5		<i>Exercícios e Outras palavras.</i>	<i>Exercícios e Atividade prática.</i>
		6	19 – Física Nuclear	<i>Atividade introdutória e Exercícios.</i>	<i>Atividade introdutória e Exercícios.</i>
		7		<i>Exercícios e Outras palavras.</i>	<i>Exercícios, Outras palavras e Atividade sugerida.</i>
		8		<i>Avaliação somativa.</i>	<i>Avaliação somativa.</i>



