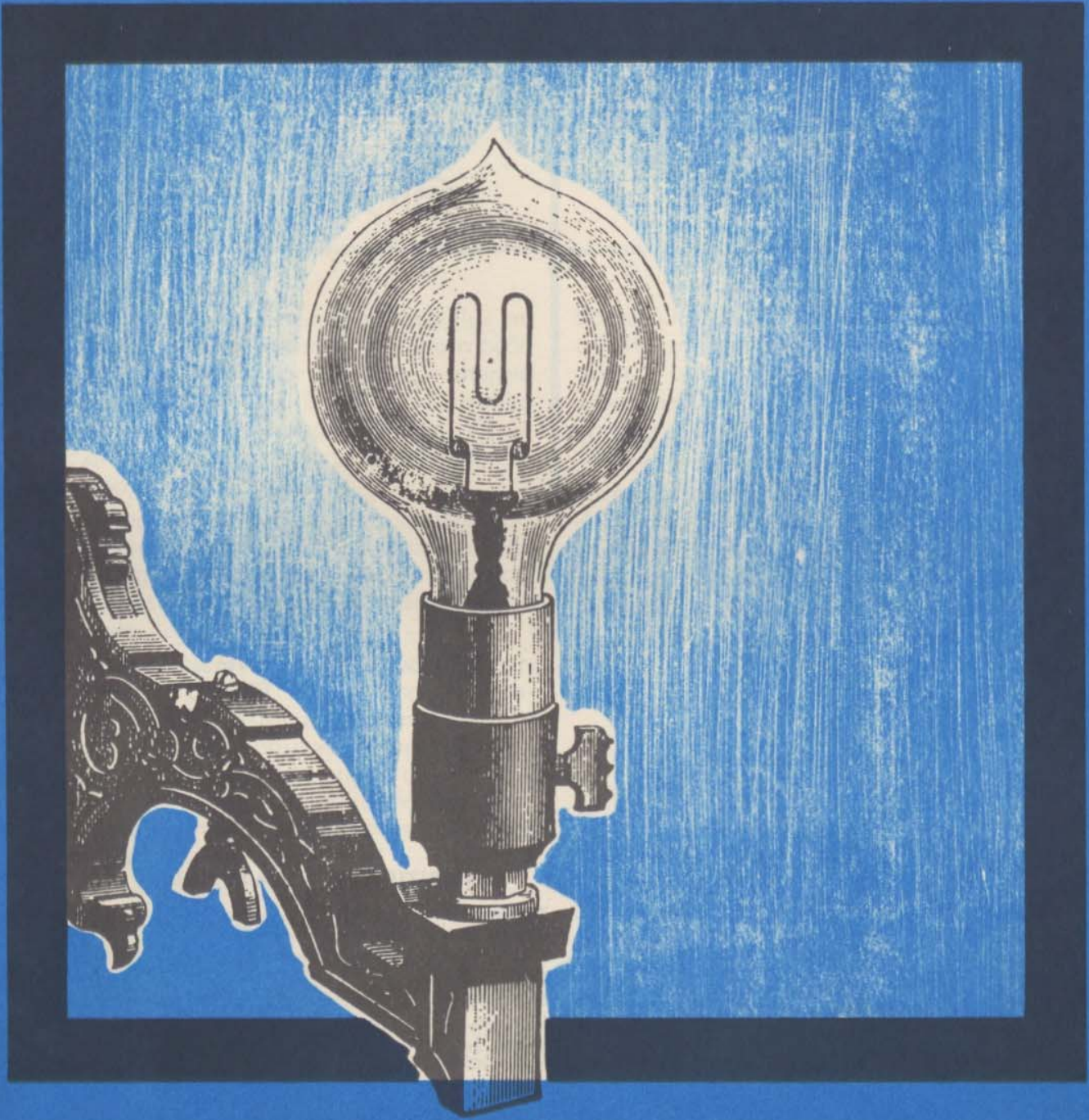


PROJETO  
DE ENSINO  
DE FÍSICA  
IFUSP — Instituto de Física da Universidade de São Paulo  
MEC/FENAME/PREMEN

eletricidade **8**

# Efeito Joule





MEC/FENAME/PREMEN

PEF — PROJETO DE ENSINO DE FÍSICA, constituído de quatro conjuntos destinados ao Ensino de 2.º Grau, foi planejado e elaborado pela equipe técnica do Instituto de Física da Universidade de São Paulo (IFUSP), mediante convênios com a FENAME e o PREMEN.

**Coordenação**

Ernst Wolfgang Hamburger  
Giorgio Moscati

**Mecânica**

Antonia Rodrigues  
Antonio Geraldo Violin  
Diomar da Rocha Santos Bittencourt  
Hideya Nakano  
Luiz Muryllo Mantovani  
Paulo Alves de Lima  
Plínio Ugo Meneghini dos Santos

**Elettricidade**

Eliseu Gabriel de Pieri  
José de Pinho Alves Filho  
Judite Fernandes de Almeida

**Eletromagnetismo**

Jesuina Lopes de Almeida Pacca  
João Evangelista Steiner

**Programação Visual**

Carlos Egidio Alonso  
Ettore Michele di San Fili Bottini

**Fotografias e Reproduções**

José Augusto Machado Calil  
Washington Mazzola Racy

**Secretaria e Datilografia**

Carlos Eduardo Franco de Siqueira  
Janete Vieira Garcia Novo

**Linguagem**

Claudio Renato Weber Abramo  
Maria Nair Moreira Rebello

**Construção de Protótipos**

José Ferreira  
Voanerges do Espírito Santo Brites

**Conjunto Experimental**

Plínio Ugo Meneghini dos Santos

Colaboram o pessoal da Secretaria, Oficina Gráfica, Administração, Oficina Mecânica e Oficina Eletrônica do IFUSP.

IFUSP: Caixa Postal 20 516, São Paulo — SP.

# CAPA

A lâmpada de Maxim, uma das numerosas lâmpadas de incandescência que, juntamente

com as de Edison, obtiveram grande sucesso comercial.

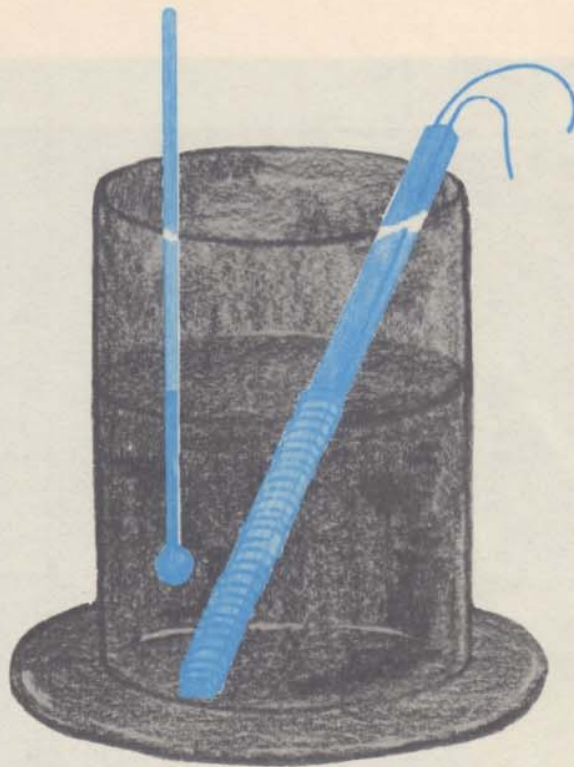
## SUMÁRIO

### CAPITULO 8 — Efeito Joule

1. Transformações de energia .....	8—3
2. Dissipação de energia dos elétrons num metal .....	8—3
3. Cálculo da energia térmica produzida .....	8—9
4. Potência elétrica .....	8—10
5. Efeito Joule .....	8—12
6. Exercícios de aplicação .....	8—20
<b>Leitura Suplementar</b>	
Supercondutividade .....	8—26



Muitas vezes uma descoberta importante é feita com aparelhamento muito simples. O que importa é a habilidade do experimentador em formular experiências significativas, levando em conta somente os efeitos importantes. A figura é copiada do artigo que Joule publicou na revista científica **Philosophical Magazine**, em 1841, e mostra o aparelho que levou a concluir, nas palavras de Joule, que: "quando uma corrente de eletricidade voltaica é propagada por um condutor metálico, o calor produzido em dado tempo é proporcional ao produto da resistência do condutor pelo quadrado da intensidade elétrica".



## Efeito Joule

Enquanto uma corrente elétrica flui em um circuito, está havendo transformação de energia. Assim, por exemplo, a energia química de uma pilha ligada a um circuito transforma-se em energia elétrica, térmica, além de outras formas de energia: luminosa, magnética, etc.

A produção de energia térmica pela corrente elétrica, que é uma transformação de energia elétrica em energia térmica, chama-se **efeito Joule** e é o assunto deste capítulo.

James Prescott Joule viveu na Inglaterra, de 1818 a 1889. Nessa época realizavam-se grandes esforços para aumentar o rendimento das máquinas a vapor utilizadas nas indústrias e ferrovias. Joule iniciou seus trabalhos com a finalidade de desenvolver máquinas mais eficientes para a fábrica de cerveja de seu pai.

Até então não se havia chegado a conclusões claras sobre o calor. Alguns acreditavam na teoria do calórico, segundo a qual o calor seria uma substância chamada **calórico**, que podia realizar trabalho, quando passava de um corpo em temperatura alta para um corpo em temperatura

baixa. Outros, porém, e entre eles Joule, defendiam a idéia, hoje aceita, de que o calor é uma forma de energia e quando passa de um corpo a outro não obriga à passagem de matéria.

Muitas experiências foram realizadas e Joule conseguiu demonstrar que a quantidade de calor produzida a partir de energia mecânica é sempre igual ao trabalho realizado. Um dos aparelhos utilizados por Joule em suas experiências está ilustrado na página 1 do capítulo 1,1 de **Mecânica 2**, do PEF. Outro, você pode ver acima.

Por causa dessas experiências, o nome de Joule é lembrado na unidade de energia ( $1\text{J} = 1\text{N} \times 1\text{m}$ ) e no efeito de aquecimento dos fios pela corrente elétrica: efeito Joule.

Os conceitos de trabalho, energia potencial e princípio de conservação de energia são importantes neste capítulo. Há uma discussão detalhada desses conceitos no volume **Mecânica 2**, do PEF, capítulos 10 e 11; consulte-os se tiver dúvidas. A energia potencial elétrica, por sua vez, está discutida no capítulo 3 deste volume.

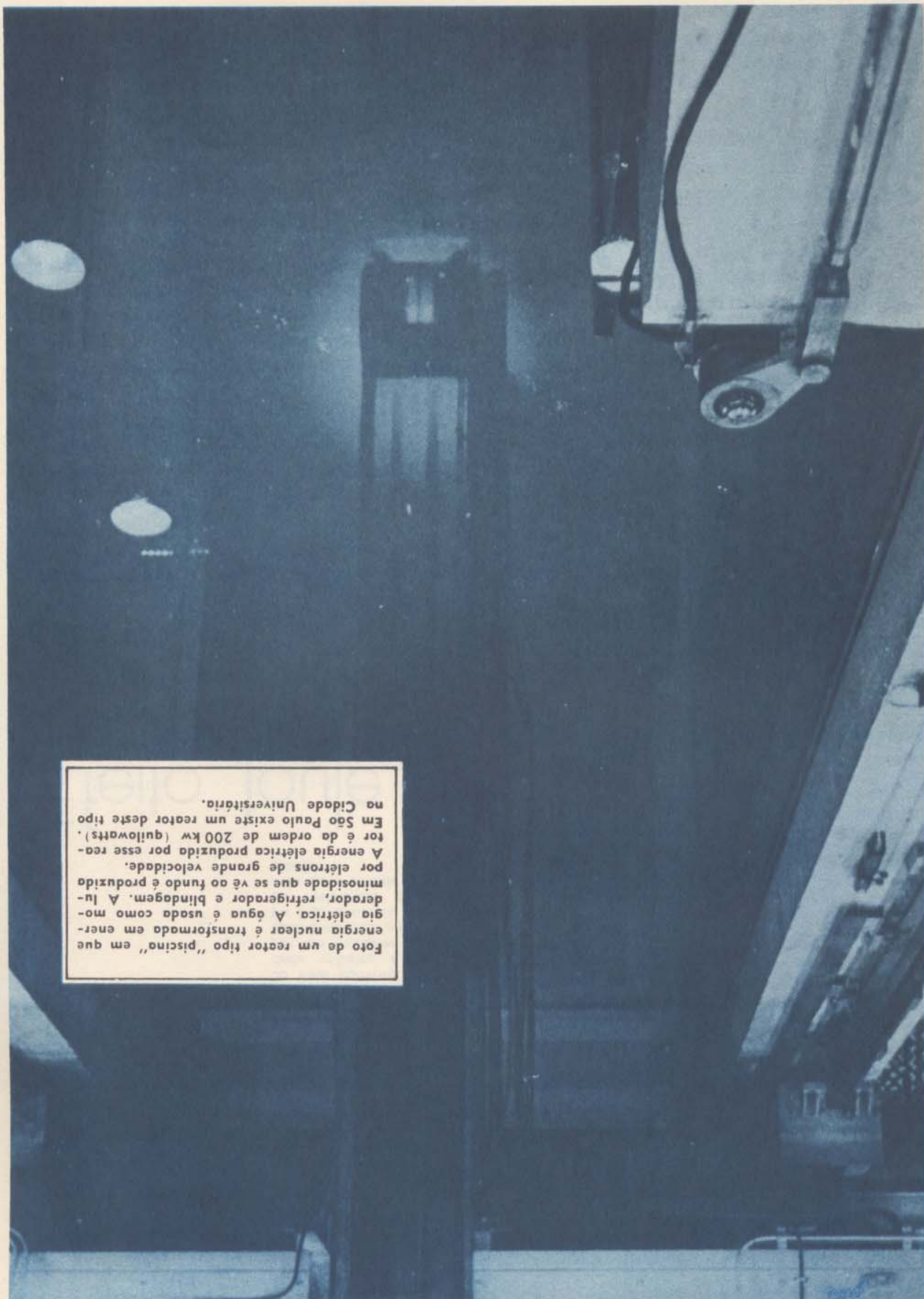


Foto de um reator tipo "piscina" em que energia nuclear é transformada em energia elétrica. A água é usada como moderador, refrigerador e blindagem. A luminosidade que se vê ao fundo é produzida por elétrons de grande velocidade. A energia elétrica produzida por esse reator é da ordem de 200 kw (quilowatts). Em São Paulo existe um reator deste tipo na Cidade Universitária.



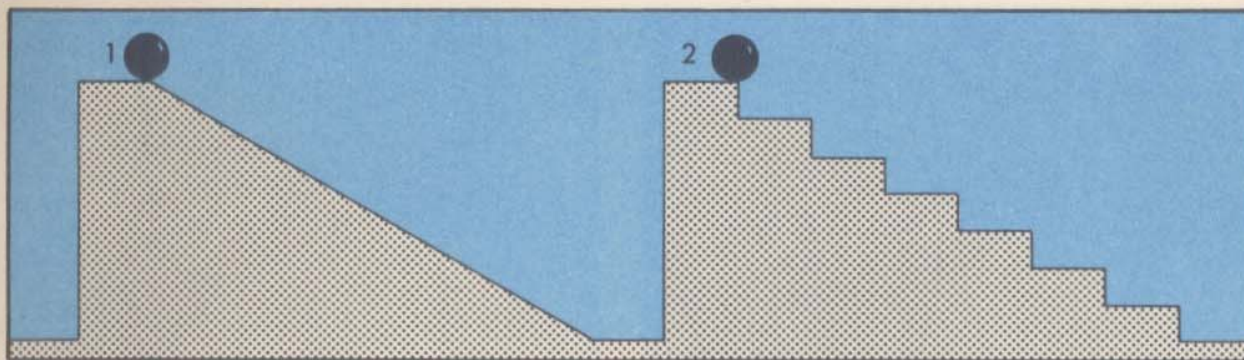


figura 1

## 1. Transformações de energia

Com um simples toque de botão obtemos energia luminosa. Parece elementar, não? No entanto, essa energia, obtida de modo aparentemente simples, passou por uma série de transformações. A energia potencial de uma certa quantidade de água, numa elevação, foi transformada em energia cinética ao descer da elevação. Essa energia cinética da água foi transferida para rodas (turbinas), ligadas a dispositivos (dínamos)\* que, ao girarem, provocaram o aparecimento de uma corrente elétrica. Levada por fios condutores, essa corrente elétrica chegou ao local em que estamos e, ao passar pela lâmpada, foi transformada em energia térmica (se a lâmpada for do tipo incandescente) e, finalmente em energia luminosa.

A energia luminosa emitida pela lâmpada é, então, resultante de transformações sucessivas da energia potencial da água na elevação. Essa energia, por sua vez, é devida à energia solar, responsável pela evaporação da água e formação da chuva.

Neste caso, o importante para obter a energia na forma elétrica é conseguir fazer girar a turbina presa ao dínamo. A energia que, no nosso exemplo, proveio da energia potencial da água na elevação poderia ser obtida da energia química contida em combustíveis como carvão, madeira, gaso-

lina, etc., que também é, na origem, proveniente do Sol. Neste caso, a energia é liberada na queima dos combustíveis, em motores que fazem girar o dínamo. Poder-se-ia também aproveitar a energia nuclear, armazenada nos núcleos atômicos. A energia nuclear já está sendo utilizada em pequena escala e até o fim do século espera-se que seja ela a responsável pela produção de grande parte da energia elétrica a ser consumida.

## 2. Dissipação de energia dos elétrons num metal

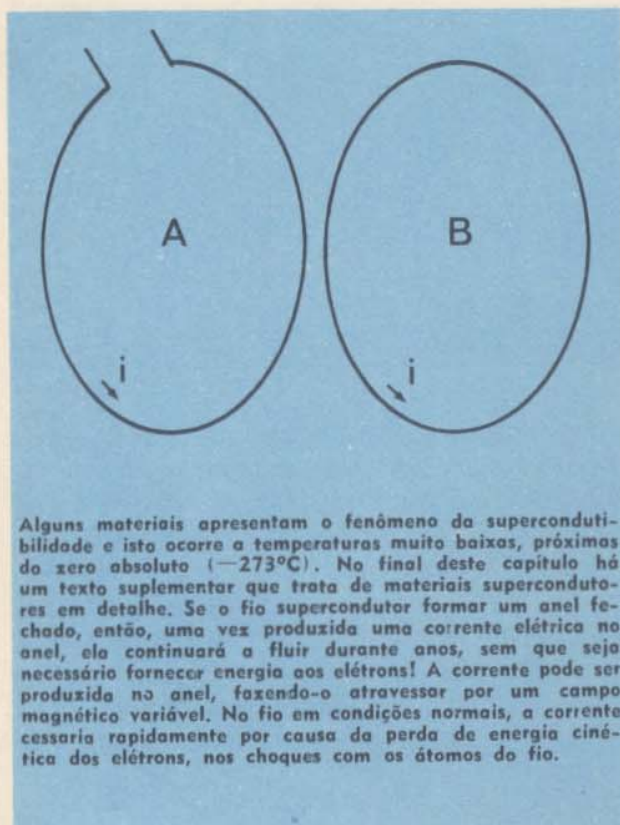
Quando se aplica uma diferença de potencial entre as extremidades de um fio, ligando-as, por exemplo, a uma pilha, aparece dentro dele um campo elétrico. Nesse campo, os elétrons ficam sujeitos a forças que tendem a deslocá-los no sentido do pólo positivo.

Vamos comparar o movimento dos elétrons livres no interior de um condutor, sob ação do campo elétrico, com o movimento de bolinhas de aço no campo gravitacional.

Duas bolinhas foram levantadas até uma altura  $h$ , acima do chão. A figura 1 mostra os caminhos que cada uma das bolinhas deve percorrer na descida. A primeira desce uma rampa lisa, a segunda desce uma escada; nos choques com os degraus a bolinha 2 perde uma parte considerável de sua energia, que se transforma em energia térmica.

\* Este assunto pode ser encontrado nos textos do curso de Eletromagnetismo, do Projeto de Ensino de Física — PEF.





Alguns materiais apresentam o fenômeno da supercondutibilidade e isto ocorre a temperaturas muito baixas, próximos do zero absoluto ( $-273^{\circ}\text{C}$ ). No final deste capítulo há um texto suplementar que trata de materiais supercondutores em detalhe. Se o fio supercondutor formar um anel fechado, então, uma vez produzida uma corrente elétrica no anel, ela continuará a fluir durante anos, sem que seja necessário fornecer energia aos elétrons! A corrente pode ser produzida no anel, fazendo-o atravessar por um campo magnético variável. No fio em condições normais, a corrente cessa rapidamente por causa da perda de energia cinética dos elétrons, nos choques com os átomos do fio.

**Q1** — Na situação da figura 1, ou seja, antes das bolinhas começarem a descer, a energia potencial das bolinhas é a mesma?

**Q2** — Ao chegar ao chão, qual das bolinhas tem maior energia cinética?

No início, ambas tinham a mesma energia potencial gravitacional, mas a bolinha 1 chegou com maior velocidade ao chão, ou seja, com mais energia cinética que a bolinha 2.

**Q3** — O que ocorreu com a energia que a bolinha 2 perdeu?

Vimos anteriormente que, aplicando uma tensão a um fio metálico, aparecem forças que tenderão a empurrar os elétrons livres através do fio.

Consideremos agora dois fios metálicos A e B. O fio B encontra-se em um estado tal, que se comporta como um **supercondutor**, ou seja, não oferece nenhuma oposição ao movimento dos elétrons que constituem a corrente elétrica. O fio A encontra-se em condições normais.

**Q4** — Em qual dos fios o movimento dos elétrons é semelhante à bolinha 1 e qual corresponde à bolinha 2 (figura 1)? Por quê?

**Q5** — Qual a resistência elétrica do fio supercondutor?

**Q6** — A resistência do fio em condições normais é nula?

No fio condutor comum, os elétrons livres perdem energia ao chocar-se com os átomos do fio. Para onde vai essa energia perdida?

A colisão dos elétrons aumenta a vibração dos átomos dentro da rede cristalina. Os átomos do metal têm sempre um movimento vibratório em torno de suas posições de equilíbrio. Em temperaturas baixas, esses movimentos têm pequena amplitude. A temperaturas altas a amplitude aumenta e a energia cinética média de vibração dos átomos também aumenta. Esse é o motivo pelo qual a resistência elétrica de um metal aumenta a temperaturas altas,

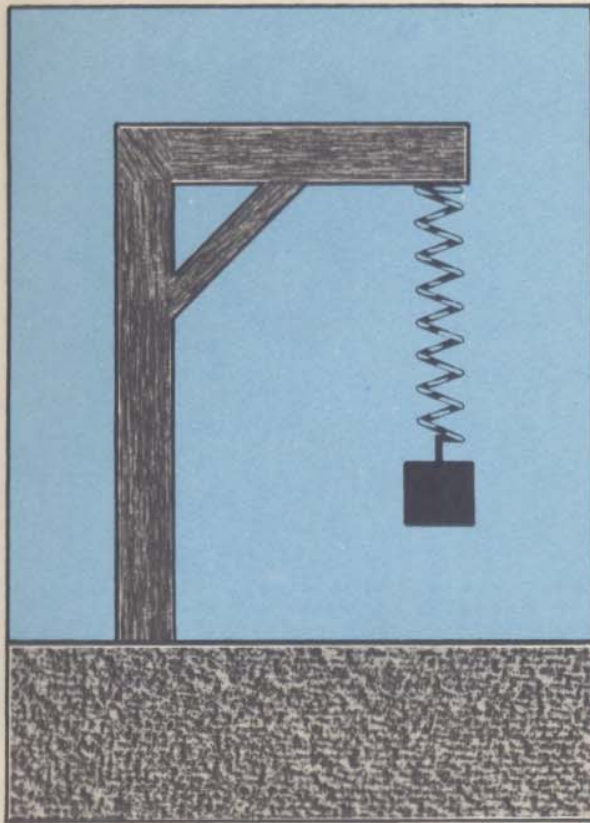


figura 2

pois, havendo maior vibração dos átomos, cresce a probabilidade de colisão dos elétrons da corrente com os átomos do metal.

Agora vamos discutir a relação inversa: será que as colisões dos elétrons com os átomos afetam a temperatura?

**Q7** — Como você responderia à pergunta acima?

Quando um elétron colide com um átomo do metal, desloca-o ligeiramente de sua posição de equilíbrio. Mas os átomos vizinhos exercem, sobre aquele átomo, forças que o fazem voltar à posição de equilíbrio: O átomo passa, então, a oscilar em torno de sua posição de equilíbrio. A situação é semelhante à de um peso pendurado de uma mola, como na figura 2.

**Q8** — Se você der um puxão vertical no peso (figura 2) e depois soltá-lo, como será o movimento subsequente do peso?

## RESPOSTAS

**R<sub>1</sub>** -

**R<sub>2</sub>** -

**R<sub>3</sub>** -

**R<sub>4</sub>** -

**R<sub>5</sub>** -

**R<sub>6</sub>** -

**R<sub>7</sub>** -

**R<sub>8</sub>** -



R1 — Sim.

R2 — A bolinha 1.

R3 — Foi transformada em energia térmica nos choques com a escada (há uma pequena elevação da temperatura da bola e da escada).

R4 — O fio A corresponde à bolinha 2, porque a bolinha 2 perde energia cinética nas colisões com os degraus, assim como os elétrons perdem energia cinética nas colisões com os átomos do fio. O fio B, em que os elétrons não sofrem colisões, corresponde à bolinha 1.

R5 — Zero.

R6 — Não.

R7 — Veja texto após a questão.

R8 — O peso oscilará verticalmente em torno de sua posição de equilíbrio, com amplitude que depende do puxão inicial.

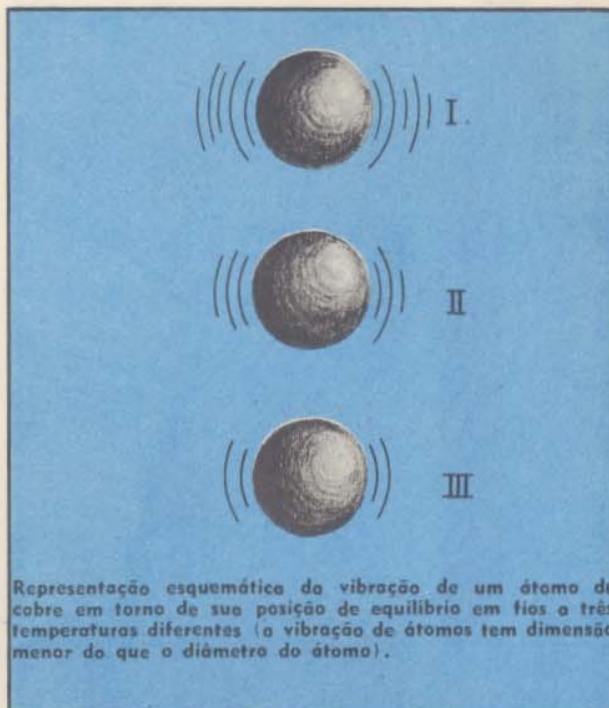


figura 3

**Q9** — A figura 3 representa um átomo de cobre em três fios deste metal (I, II e III), mantidos a temperaturas diferentes. Qual dos fios está à temperatura mais alta? E à temperatura mais baixa?

**Q10** — Em um fio percorrido por uma corrente elétrica, os elétrons perdem energia por colisão com os átomos. Onde e como aparece essa energia perdida?

A energia perdida pelos elétrons, quando colidem com os átomos de um fio, aparece como energia de vibração desordenada dos átomos em torno de sua posição de equilíbrio, isto é, como energia térmica, e dá lugar a uma elevação de temperatura do metal.

**Q11** — Quando uma corrente elétrica percorre um fio, há sempre aquecimento do fio?

**Q12** — Quando uma corrente elétrica percorre um fio supercondutor, há aquecimento do fio?

Você fará, agora, uma verificação dos efeitos da agitação térmica.

Providencie uma vela ou uma chama de gás e aqueça a ponta de um fio de cobre, sem esmalte, por uns 5 segundos (figura 4). Observe o efeito no fio.

**Q13** — O fio ficou rubro?

Ligue o fio de Ni-Cr n.º 36, em série, a quatro pilhas de 1,5 V cada uma (figura 5). Vá aproximando, nesse fio, um dos terminais do fio de ligação até a distância de uns 3 ou 4 cm da outra extremidade e observe o efeito no Ni-Cr (tome cuidado para não se queimar). Desligue logo a seguir, para não descarregar as pilhas.

**Q14** — Descreva o que você observou.

**Q15** — Você pode concluir, das duas experiências, que no interior do fio ocorreram fenômenos semelhantes?

Quando você forneceu calor ao fio, com a vela, a amplitude de vibração dos átomos aumentou, ou seja, aumentou a agitação térmica e, com isso, a temperatura do fio.



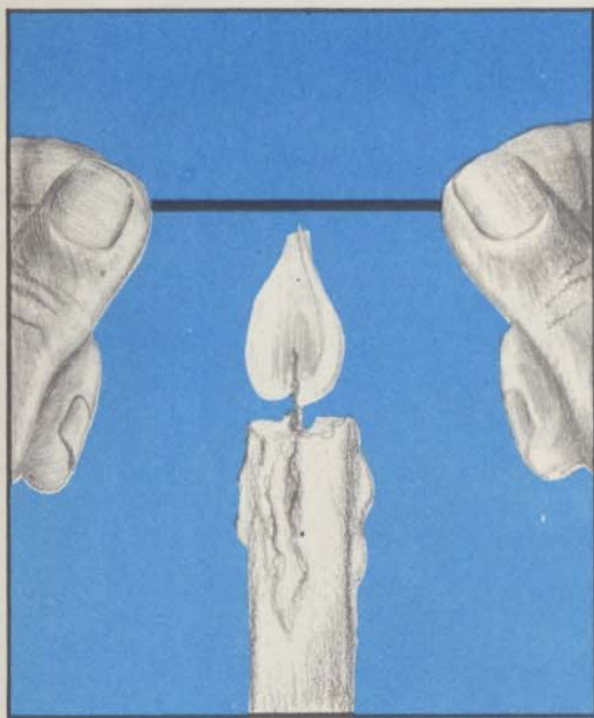


figura 4

No segundo caso, quando você ligou as pilhas ao fio, a corrente que passou provocou maior amplitude de vibração dos átomos. Isso por causa dos choques dos elétrons, que constituem a corrente com os átomos do fio. Aumentando a agitação térmica, a temperatura tornou-se maior.

**Q16** — Complete a frase: Um maior número de choques dos elétrons livres com os átomos do fio implica \_\_\_\_\_ perda de energia por \_\_\_\_\_ parte dos elétrons.

**Q17** — Suponha que dois fios são percorridos pela mesma corrente de 1A, por exemplo. O primeiro tem resistência de  $1\Omega$ , e o segundo, de  $2\Omega$ . Em qual dos fios haverá maior liberação de energia térmica? Por quê?

**Q18** — Considere, agora, dois outros fios de mesma resistência ( $1,5\Omega$ ). O primeiro é percorrido por uma corrente de 1A, e o segundo, por uma corrente de 3A. Em qual deles haverá maior liberação de energia térmica? Por quê?

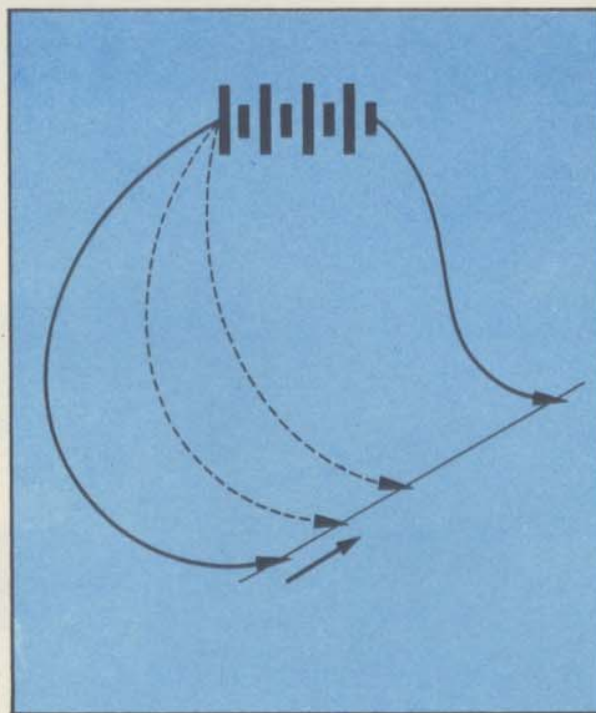


figura 5

## RESPOSTAS

**R<sub>9</sub>** -

**R<sub>10</sub>** -

**R<sub>11</sub>** -

**R<sub>12</sub>** -

**R<sub>13</sub>** -

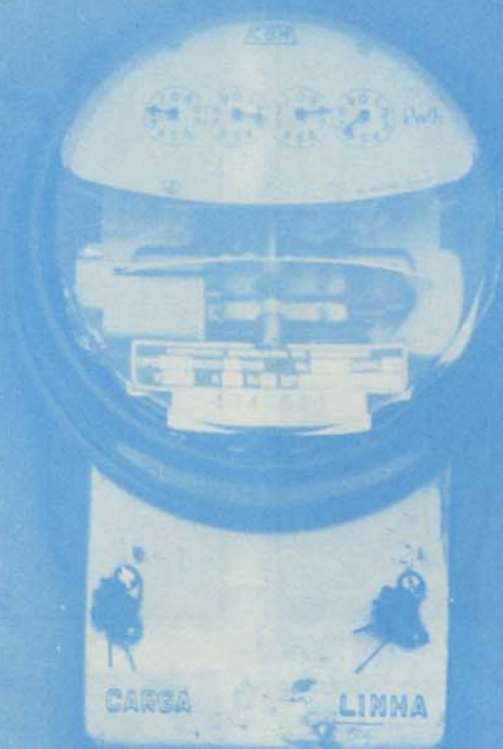
**R<sub>14</sub>** -

**R<sub>15</sub>** -

**R<sub>17</sub>** -

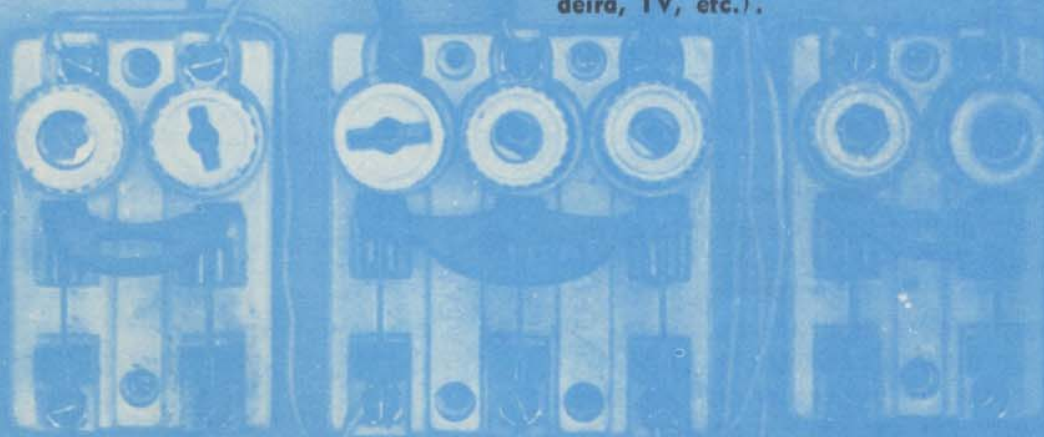
**R<sub>18</sub>** -





As residências geralmente recebem energia elétrica da rede urbana. Entretanto, antes de essa energia ser distribuída pela casa, ela deve passar pelo sistema de segurança (comumente chamado caixa de luz), composto por fusíveis, e o relógio de consumo, que mede a energia gasta pela instalação.

Na foto temos uma caixa de luz de uma residência comum. Note-se a chave central com três fusíveis e as chaves laterais, a da esquerda para aparelhos que funcionam com 222 V (chuveiro, etc.) e a da direita para 110 V (lâmpadas, geladeira, TV, etc.).





### 3. Cálculo da energia térmica produzida

Quando uma carga é deslocada de um a outro ponto, numa região onde existe um campo elétrico, uma força elétrica realiza um trabalho.

Esse trabalho corresponde a uma variação da energia potencial da carga no campo e é igual à energia térmica liberada, quando se trata de uma corrente em um condutor.

Vamos chamar o trabalho de  $\tau$ ; como vimos no capítulo 3:

$$\tau = \Delta E_p = q \cdot V, \quad (1)$$

ou seja,  $\tau$  é igual à variação da energia potencial  $\Delta E_p$ , e igual, também, ao produto da carga  $q$  deslocada pela diferença de potencial  $V$ .

Considere, agora, um condutor linear (fio metálico) de resistência  $R$ , submetido à diferença de potencial constante  $V$ . Pelo condutor irá fluir uma corrente elétrica de intensidade  $i$  também constante. Se durante um tempo  $t$  passa uma quantidade de carga  $q$ , temos

$$i = \frac{q}{t} \rightarrow q = i \cdot t \quad (2)$$

**Q19** — Qual é a expressão do trabalho  $\tau$  em função da corrente  $i$  e da diferença de potencial  $V$ ? Utilize as equações (1) e (2).

Esse trabalho representa a energia potencial elétrica consumida no transporte da carga  $q$ , entre as extremidades do fio. Vamos representá-la por  $\varepsilon$ .

( $\Delta \varepsilon_p = \varepsilon$ ). Assim,

$$\varepsilon = V \cdot i \cdot t. \quad (3)$$

**Q20** — Escreva a expressão da energia dissipada,  $\varepsilon$ , em função somente de  $R$ ,  $i$  e  $t$ . Utilize a Lei de Ohm e a equação (3).

## RESPOSTAS

**R<sub>19</sub>** -

**R<sub>20</sub>** -

**R<sub>21</sub>** -

$$\text{Obtivemos } \varepsilon = R \cdot i^2 \cdot t. \quad (4)$$

Então, podemos dizer que a energia dissipada, isto é, a energia térmica ou calor liberado, é proporcional à resistência  $R$ , ao quadrado da corrente  $i$  e ao tempo  $t$ .

**Q21** — Volte às questões **Q17** e **Q18** e, com base na expressão (4), calcule a energia térmica liberada em cada caso. A seguir, verifique: esses cálculos confirmam suas respostas **R17** e **R18**?

Se duplicarmos o valor da resistência  $R$ , mantendo  $V$  constante, a quantidade de energia dissipada dobrará? Vamos verificar.

Monte um circuito com uma pilha, em série com um resistor de uns  $22 \Omega$ , e meça a corrente.



R9 —  $T_I > T_{II} > T_{III}$ .

R10 — Veja texto após a questão.

R11 — Em geral, sim, a menos que esteja em condições de supercondutor.

R12 — Não, pois não há colisões dos elétrons com os átomos.

R13 — Sim.

R14 — O fio foi aquecendo. À medida que a distância foi sendo reduzida, o fio ficava rubro.

R15 — Sim.

R16 — Maior.

R17 — No segundo. Se for mantida a mesma corrente, o de maior resistência dissipará mais energia, pois o número de choques dos elétrons com os átomos do fio será maior.

R18 — No que passa maior corrente, porque o número de choques dos elétrons com os átomos do fio será maior.

R19 —  $\tau = q \cdot V = i \cdot t \cdot V$

R20 —  $\epsilon = R \cdot i \cdot i \cdot t = R \cdot i^2 t$

R21 — Em um segundo a energia liberada é  $Ri^2$ :

Q17 —  $\epsilon_1 = 1 \cdot 1 = 1J$ ;

$\epsilon_2 = 2 \cdot 1 = 2J$

Q18 —  $\epsilon_1 = 1,5 \cdot 1 = 1,5J$ ;

$\epsilon_2 = 1,5 \cdot 9 = 13,5J$ , de acordo com R17 e R18.

**Q22** — Que valor você encontrou para a corrente?

**Q23** — Calcule a quantidade de energia dissipada no resistor, quando o circuito é ligado durante 5 segundos.

Substitua, no circuito, o resistor de resistência  $22 \Omega$  por outro, cujo valor é aproximadamente o dobro,  $47 \Omega$ .

**Q24** — Meça a corrente e calcule a energia que seria dissipada durante o mesmo intervalo de tempo neste outro resistor.

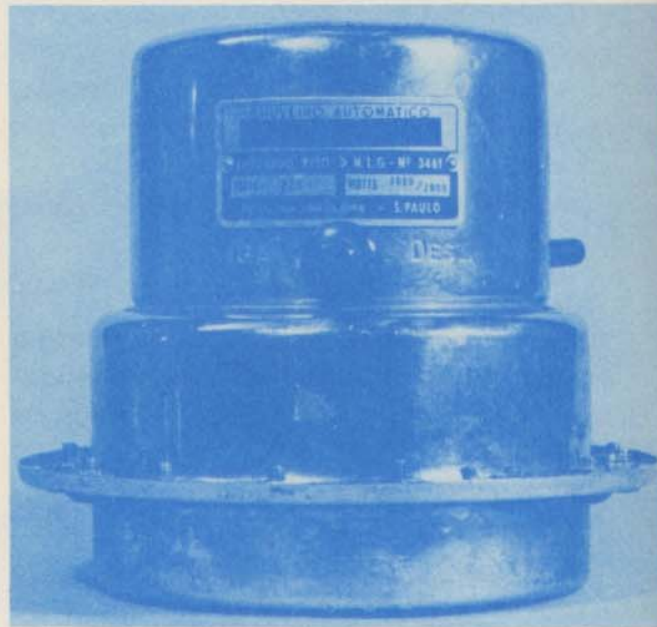
**Q25** — A energia dissipada dobrou? Por quê?

A energia dissipada foi muito menor. O fato de colocar, no circuito, um resistor cuja resistência é o dobro da primeira fez diminuir, para a metade, a corrente que

8-10

Em alguns casos, a solda é feita com um material que é derretido por um ferro de soldar, como o que aparece à direita. Em outro processo, os próprios componentes a serem soldados são fundidos através da passagem de uma corrente elétrica muito alta.

Um exemplo de como utilizar o efeito Joule para nosso bem-estar é o chuveiro elétrico. Todo chuveiro traz consigo uma plaqueta que identifica as condições de uso. Abaixo temos um chuveiro que funciona com uma tensão de 220V e dissipa uma potência média de 2 800 watts, ou seja, colocado em funcionamento, consumirá, em 5 minutos, o mesmo que 40 lâmpadas de 60 watts durante o mesmo tempo.



fluía (a tensão foi mantida a mesma, por uma pilha de 1,5 V). A energia consumida foi praticamente a metade, pois, como vimos,  $\epsilon$  é proporcional a  $i^2$ .

Para que a energia dissipada também dobrasse, quando foi dobrada a resistência, seria necessário manter a mesma corrente.

**Q26** — De que modo se poderia manter inalterada a corrente e introduzir, no circuito, resistores de maior resistência, em série?

## 4. Potência elétrica

Muitas vezes a grandeza mais importante não é a energia total dissipada por um resistor, mas a taxa de dissipação de energia por unidade de tempo, que se chama **potência dissipada**:





$$P = \frac{\varepsilon}{t} \quad (5)$$

Como vimos,  $\varepsilon = R \cdot i^2 \cdot t$ , então:

$$P = \frac{R \cdot i^2 \cdot t}{t} \therefore P = R i^2 \quad (6)$$

A unidade de potência é o **watt**, representada por W, que vale um joule por segundo.

De  $\frac{\varepsilon \text{ (joule)}}{t \text{ (s)}} = P \text{ (watt)}$ , dizemos que

$$1 \text{ W} = 1 \text{ J/s.}$$

Convém exprimir a potência dissipada em função de R e V e em função de i e V.

**Q27** — Deduza uma expressão de P em função somente de R e de V, utilizando a equação (6) e a Lei de Ohm.

## RESPOSTAS

**R<sub>22</sub>** -

**R<sub>23</sub>** -

**R<sub>24</sub>** -

**R<sub>25</sub>** -

**R<sub>26</sub>** -

**R<sub>27</sub>** -



R22 — Cerca de 0,07A (70mA). Esse valor poderá variar um pouco, pois vários fatores poderão influir na medida feita; entre eles, a precisão com que é dado o valor da resistência do resistor, o estado das pilhas, a resistência interna do amperímetro.

R23 —  $\epsilon = R \cdot i^2 t$   
 $\epsilon \cong 0,5 \text{ joule}$

R24 — A corrente deve ser de aproximadamente 30mA;  $\epsilon = R \cdot i^2 t$   $\epsilon \cong 0,2J$

R25 — Não. Veja texto após a questão.

R26 — Aumentar a tensão de acordo com os valores das resistências dos resistores introduzidos no circuito. No caso do circuito que você montou inicialmente com o resistor de  $22\Omega$  e depois com o de  $47\Omega$ , a solução seria dobrar a tensão aplicada no resistor cuja resistência é praticamente o dobro ( $47\Omega$ ). Com isso se conseguiria manter a mesma corrente.

$$R27 — P = R \cdot i^2 = R \left( \frac{V}{R} \right)^2 = \frac{V^2}{R}$$

**Q28** — Deduza uma expressão de P em função somente de V e de i, utilizando a equação (6) e a Lei de Ohm.

Há três modos equivalentes de escrever a potência dissipada de um resistor R, no qual está aplicada uma diferença de potencial V e passa uma corrente i:

$$P = V \cdot i = R \cdot i^2 = \frac{V^2}{R} \quad (7)$$

As três expressões são exatamente equivalentes. Em cada aplicação deve-se usar a mais conveniente.

**Q29** — A diferença de potencial entre as extremidades de um resistor é 18 V e a corrente que passa por ele é 2 A. Qual a potência dissipada neste resistor?

**Q30** — Um rolo de fio de cobre com resistência  $15 \Omega$  é submetido a uma diferença de potencial de 110 V. Qual a potência dissipada?

**Q31** — Qual é a energia dissipada por um chuveiro elétrico de 2 800 watts em 100 segundos?

**Q32** — O mesmo chuveiro está ligado a uma tensão de 220 V. Qual a corrente que flui por ele?

**Q33** — Qual a resistência deste chuveiro?

**Q34** — O chuveiro tem potência . . . . . 2 800 W. Se funcionasse com tensão 110 V, qual deveria ser a corrente e qual a resistência?

## 5. Efeito Joule

Num circuito composto apenas de fios condutores e resistores, a energia elétrica absorvida é transformada em energia térmica (calor). Diz-se, neste caso, que o circuito é **resistivo**. Se, por outro lado, o circuito contém condensadores ou indutores, ou, ainda, motores, geradores, parte da energia da corrente elétrica é transformada em energia do campo eletromagnético e o circuito diz-se **reativo**.

Vamos considerar, aqui, somente circuitos que possam ser considerados, com boa aproximação, resistivos. Neste caso, a energia potencial elétrica da fonte de corrente é transformada em energia térmica (calor). Do ponto de vista da fonte de cor-



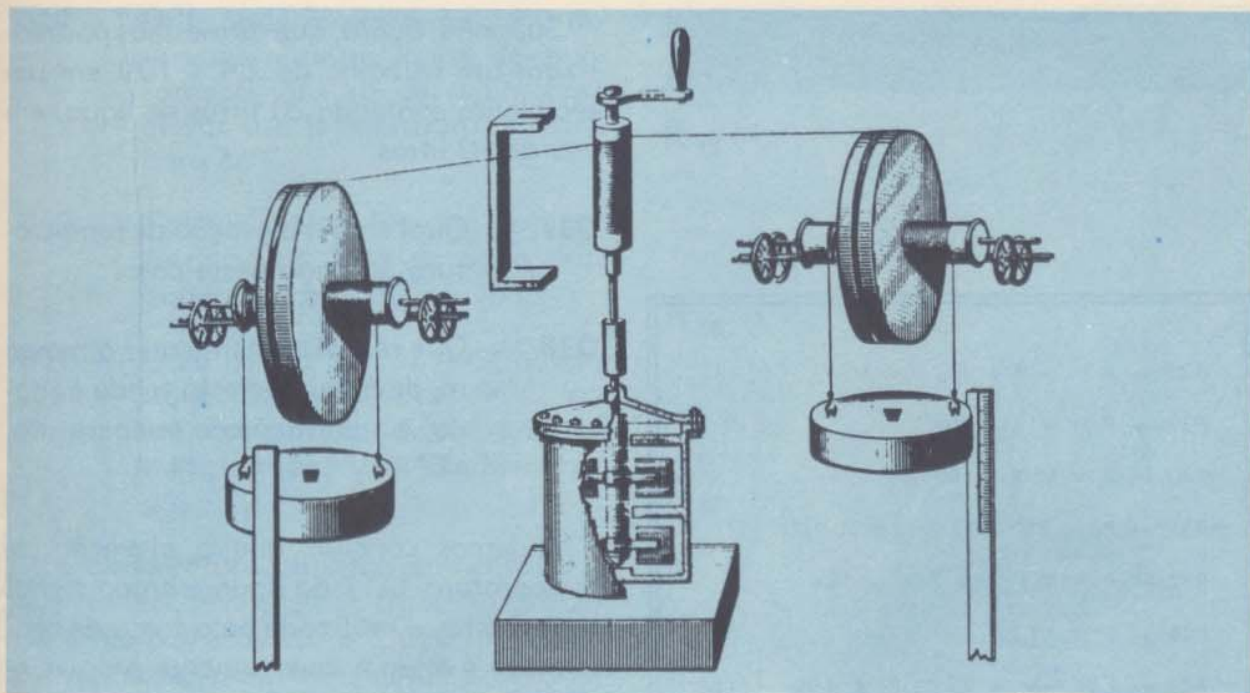


figura 6

rente, o circuito consumiu energia elétrica, produzindo energia térmica. É o **efeito Joule**.

Vamos verificar se, num circuito em que não há outros elementos além dos condutores e resistores, a quantidade de energia transformada em calor é igual à energia elétrica despendida.

Inicialmente, vamos fazer algumas considerações e, a seguir, você poderá fazer uma experiência para calcular as energias elétrica e térmica e comparar os valores obtidos. Para fazer essa comparação, precisará medir a energia térmica liberada por um resistor durante certo tempo. Para isso você medirá a elevação de temperatura de certa quantidade de água, na qual estará colocado o resistor.

Todos sabemos que as mãos esquentam quando esfregamos uma contra a outra.

Sempre que duas superfícies, entre as quais há atrito, deslizam uma sobre a outra há aquecimento. Quando um sólido se desloca dentro de um líquido, por exemplo um remo ou a pá de uma hélice de barco a motor na água, também há atrito e aquecimento.

Considere um aparelho semelhante ao de Joule (figura 6), em que um recipiente termicamente isolado, com dez litros de

## RESPOSTAS

R<sub>28</sub> -

R<sub>29</sub> -

R<sub>30</sub> -

R<sub>31</sub> -

R<sub>32</sub> -

R<sub>33</sub> -

R<sub>34</sub> -



$$R28 \text{ — } P = R \cdot i^2 = R \cdot i \cdot i = V \cdot i$$

$$R29 \text{ — } P = V \cdot i = 36W$$

$$R30 \text{ — } P = V^2/R \cong 800W$$

$$R31 \text{ — } P \cdot t = 280\,000J = 2,8 \times 10^5J$$

$$R32 \text{ — } P = V \cdot i \quad i = P/V \cong 13A$$

$$R33 \text{ — } R = 17,3\Omega$$

$$R34 \text{ — } i = P/V = 25,5A \quad R = 4,3\Omega$$

água, contém pás girantes, que agitam a água. Suponha que foram realizadas duas medidas. Na primeira, o trabalho realizado pelas pás, na água, foi de  $1,2 \times 10^5J$  e observou-se uma elevação de temperatura de  $20^\circ C$  para  $23^\circ C$ , isto é,  $\Delta T = 3^\circ C$ . Na segunda experiência, o trabalho realizado pelas pás foi o dobro:  $2,4 \times 10^5J$ .

**Q35** — Qual será a elevação de temperatura  $\Delta T$  no segundo caso?

**Q36** — É correto afirmar que Joule verificou que, em todos os casos, a elevação de temperatura é proporcional ao trabalho realizado pela força de atrito?

As experiências de Joule e todas as experiências realizadas posteriormente mostraram que a elevação de temperatura da água é proporcional ao trabalho realizado pela força de atrito (pás girantes), contanto que o recipiente esteja termicamente isolado, isto é, que não haja transmissão de energia térmica para o ambiente.

8-14

Suponha, agora, que as mesmas pás realizam um trabalho de  $2,4 \times 10^5J$  em um recipiente contendo 20 litros de água, em vez de 10 litros.

**Q37** — Qual será a elevação de temperatura da água neste caso?

**Q38** — Que relação existe entre a massa  $m$ , de água que está sendo agitada, e a elevação de temperatura,  $\Delta T$ ?

Podemos concluir que a elevação de temperatura ( $\Delta T$ ) da água é proporcional ao trabalho  $\tau$  realizado pela força de atrito sobre a água e inversamente proporcional à massa de água.  $\Delta T \propto \tau$ ;

$\Delta T \propto \frac{1}{m}$ , então,  $\Delta T$  é proporcional ao produto  $\tau \cdot \frac{1}{m}$ .

Portanto:

$$\Delta T \propto \frac{\tau}{m} \text{ ou } \tau \propto m \Delta T, \text{ ou, ainda,}$$

$$\tau = c \cdot m \Delta T \quad (8)$$

onde  $c$  é uma constante.

Muitas medidas comprovaram que  $c$ , dado por  $c = \frac{\tau}{m \Delta T}$ , é realmente constante.

Medidas quantitativas mostram que, se  $\Delta T$  for medido em celsius ( $^\circ C$ ),  $m$  em kg e  $\tau$  em joules (J), então,

$$c = 4180 \frac{J}{kg^\circ C}$$

(Esse é o valor de  $c$  para a água pura; para outras substâncias, o quociente  $\frac{\tau}{m \Delta T} = c$  também é constante, mas de valor diferente.)



## RESPOSTAS

**Q39** — Utilizando a expressão (8), determine quantos joules devemos fornecer a 1 kg de água, para elevar sua temperatura de 21°C para 22°C.

**Q40** — Calcule o trabalho que deve ser fornecido a 1 kg de água para aquecê-la de 20°C até 70°C.

**Q41** — Uma massa de 132 g de água é aquecida de 20°C até 44°C, por meio de palhetas girantes. Determine o trabalho realizado sobre a água.

A temperatura da água aumenta, porque ela recebe energia: o trabalho realizado pelas palhetas sobre a água representa, para ela, uma transferência de energia.

**Q42** — É possível aquecer água utilizando outro modo de transferir energia que não seja o trabalho?

Na questão **Q38**, consideramos 20 l de água, que sofriam um trabalho de  $2,4 \times 10^5 \text{ J}$  por forças de atrito e cuja temperatura se elevou em 3°C.

**Q43** — Se a mesma quantidade de água recebesse a mesma quantidade de energia em forma de energia térmica transmitida por uma chama, qual seria a elevação da temperatura?

Se colocarmos um aquecedor elétrico num recipiente com massa conhecida de água e medirmos a variação de sua temperatura, estaremos em condições de determinar a energia que o aquecedor cedeu à água. Você fará uma experiência deste tipo, para verificar que as expressões encontradas para a energia dissipada num circuito são corretas.

A generalização da equação  $\tau = cm \Delta t$  para a energia térmica  $\varepsilon$ , proveniente de qualquer origem, absorvida pela água é:

$$\varepsilon = c.m. \Delta t \quad (9)$$

**R<sub>35</sub>** -

**R<sub>36</sub>** -

**R<sub>37</sub>** -

**R<sub>38</sub>** -

**R<sub>39</sub>** -

**R<sub>40</sub>** -

**R<sub>41</sub>** -

**R<sub>42</sub>** -

**R<sub>43</sub>** -



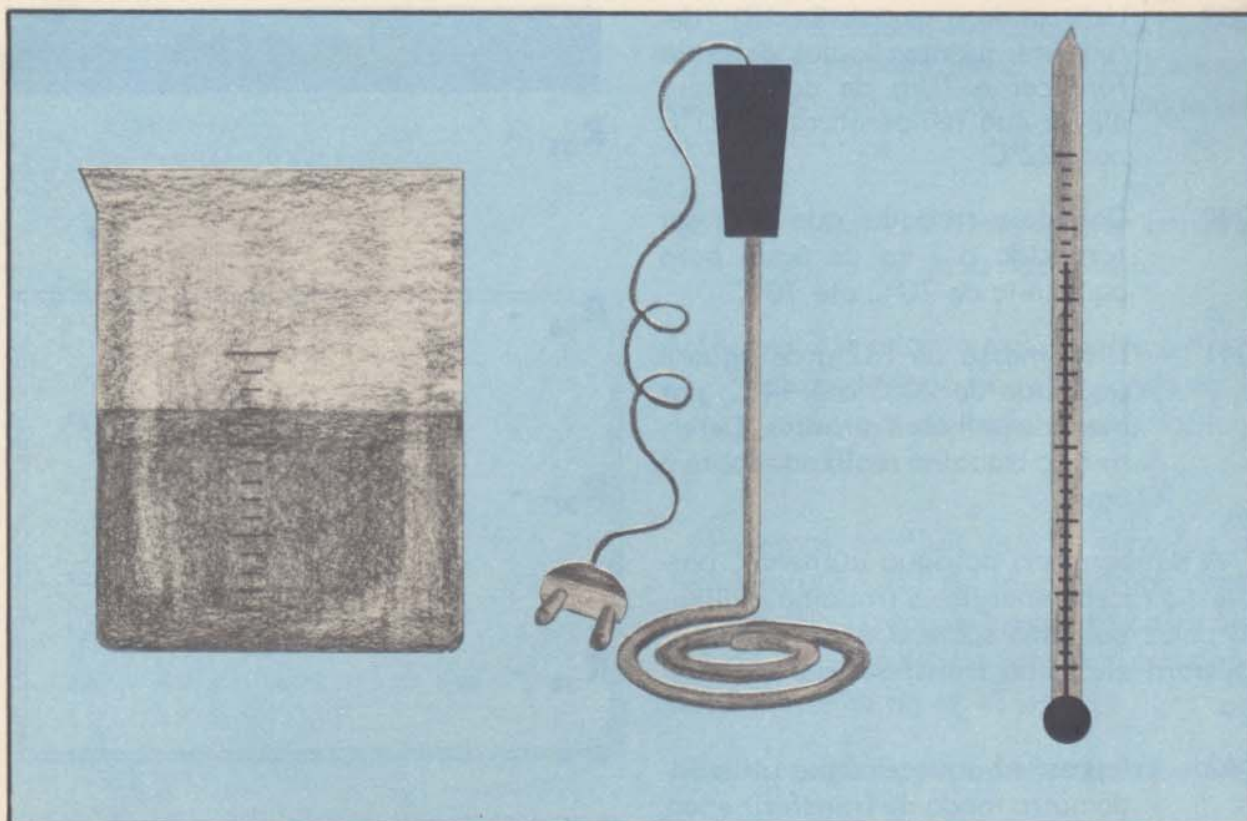


figura 7

Para a experiência a seguir você precisará de um ebulidor, de uma quantidade de água de massa conhecida e de um termômetro com escala até  $100^{\circ}\text{C}$  (figura 7).

Se não houver possibilidade de realizar esta experiência, acompanhe seu desenvolvimento, utilizando os resultados que obtivemos, que se encontram nas respostas às questões.

**Observação:** A resistência elétrica dos metais aumenta com a temperatura. Os ebulidores são feitos, em geral, com fios de Ni-Cr, que, no entanto, dentro do intervalo de  $0^{\circ}\text{C}$  a  $100^{\circ}\text{C}$ , têm uma variação de resistência muito pequena e não significativa para esta experiência.

**Q44** — Meça a resistência elétrica do ebulidor. Escreva o valor encontrado.

**Q45** — Conhecendo a resistência  $R$  do ebulidor e a tensão  $V$  aplicada durante  $t$  segundos, como você calcula a energia  $\epsilon$  consumida?

**Q46** — Se você ligasse (NÃO LIGUE) o ebulidor a uma tomada de 110 V durante 60 segundos, qual seria a energia elétrica consumida?

O valor da energia que você encontrou na questão anterior vai ser comparado com a energia térmica transferida para a água.

Providencie uma certa quantidade conhecida de água, por exemplo, 300 ml (300 g). Procure, se possível, isolar o recipiente, para que a água não perca calor para o meio-ambiente. Você poderá colocá-lo num vaso de isopor ou numa caixa de papelão forrada com jornal amassado. A tampa do recipiente deve ter aberturas, para introduzir o termômetro e colocar o ebulidor.

**Q47** — Meça o valor da temperatura inicial  $T_0$ . Qual o valor lido?

Introduza o ebulidor na água. Ligue-o a uma tomada de 110 V, durante 60 segundos, e desligue. Procure uniformizar a temperatura da água, movendo levemente

## RESPOSTAS

R<sub>44</sub> -

R<sub>45</sub> -

R<sub>46</sub> -

R<sub>47</sub> -

o ebulidor durante alguns minutos; meça logo a seguir a temperatura  $T$  da água, antes que haja perdas apreciáveis de calor para o ambiente.

R<sub>48</sub> -

**Q48** — Qual o valor de  $T$  encontrado?

**Q49** — Você conhece a massa  $m$  da água e sua variação de temperatura  $\Delta T = T - T_0$ . Utilizando a expressão (9), calcule a energia térmica  $\varepsilon$  fornecida à água.

R<sub>49</sub> -

Compare este resultado com o encontrado na questão (Q46).

R<sub>50</sub> -

**Q50** — São aproximadamente iguais?

**Q51** — Considerando as perdas de calor da água para o meio-ambiente, você pode dizer que a energia térmica recebida pela água é igual à que foi dissipada pelo ebulidor, quando foi ligado à tomada e houve passagem de corrente durante 60 segundos?

R<sub>51</sub> -



R35 — O dobro do primeiro caso, portanto,  $\Delta T = 6^\circ\text{C}$ , porque o trabalho da força de atrito no segundo caso é o dobro do primeiro.

R36 — Sim. Veja texto após a questão.

R37 — Metade da anterior, isto é, cerca de  $3^\circ\text{C}$ .

R38 — A elevação de temperatura é inversamente proporcional à massa de água:  $\Delta T \propto 1/m$ .

R39 — 4180J

R40 —  $2,09 \times 10^5$

R41 — 13242J

R42 — Sim, por exemplo, aquecendo o recipiente com uma chama ou com radiação solar ou com um resistor elétrico percorrido por uma corrente elétrica.

R43 — A mesma,  $3^\circ\text{C}$ .

R44 —  $R \cong 14\Omega$ . **Observação:** Essa é a resistência do ebulidor que utilizamos. É provável que o ebulidor com o qual você fará a experiência tenha uma resistência diferente.

R45 — Utilizando a equação  $\varepsilon = \frac{V^2}{R} \cdot t$

R46 — Considerando  $R = 14\Omega$ , teríamos:  
 $\varepsilon \cong 5,2 \times 10^4$

R47 —  $T_0 = 19^\circ\text{C}$ . Valor encontrado por nós.

R48 —  $T = 60^\circ\text{C}$

R49 —  $\varepsilon = mc \Delta t$  (expressão 9); portanto,  
 $\varepsilon = 0,3 \cdot 41 \cdot 4180 = 51414$ J

R50 — Sim, podemos considerá-los aproximadamente iguais.

R51 — Sim.

Você provavelmente encontrou valores de energia próximos nas duas determinações, calculando a energia elétrica dissipada no ebulidor e calculando a energia térmica que a água recebeu. Se não houvesse imprecisões nas medidas, você encontraria o mesmo valor. (Caso você não tenha obtido resultados próximos, reanalise ou refaça as medidas.)

Concluimos que, de fato, a energia dissipada em um resistor percorrido por corrente pode ser calculada pelas fórmulas que deduzimos e que essa energia é realmente transferida à água. Se quiséssemos aquecer a água por meios mecânicos (por agitação), deveríamos gastar a mesma energia.

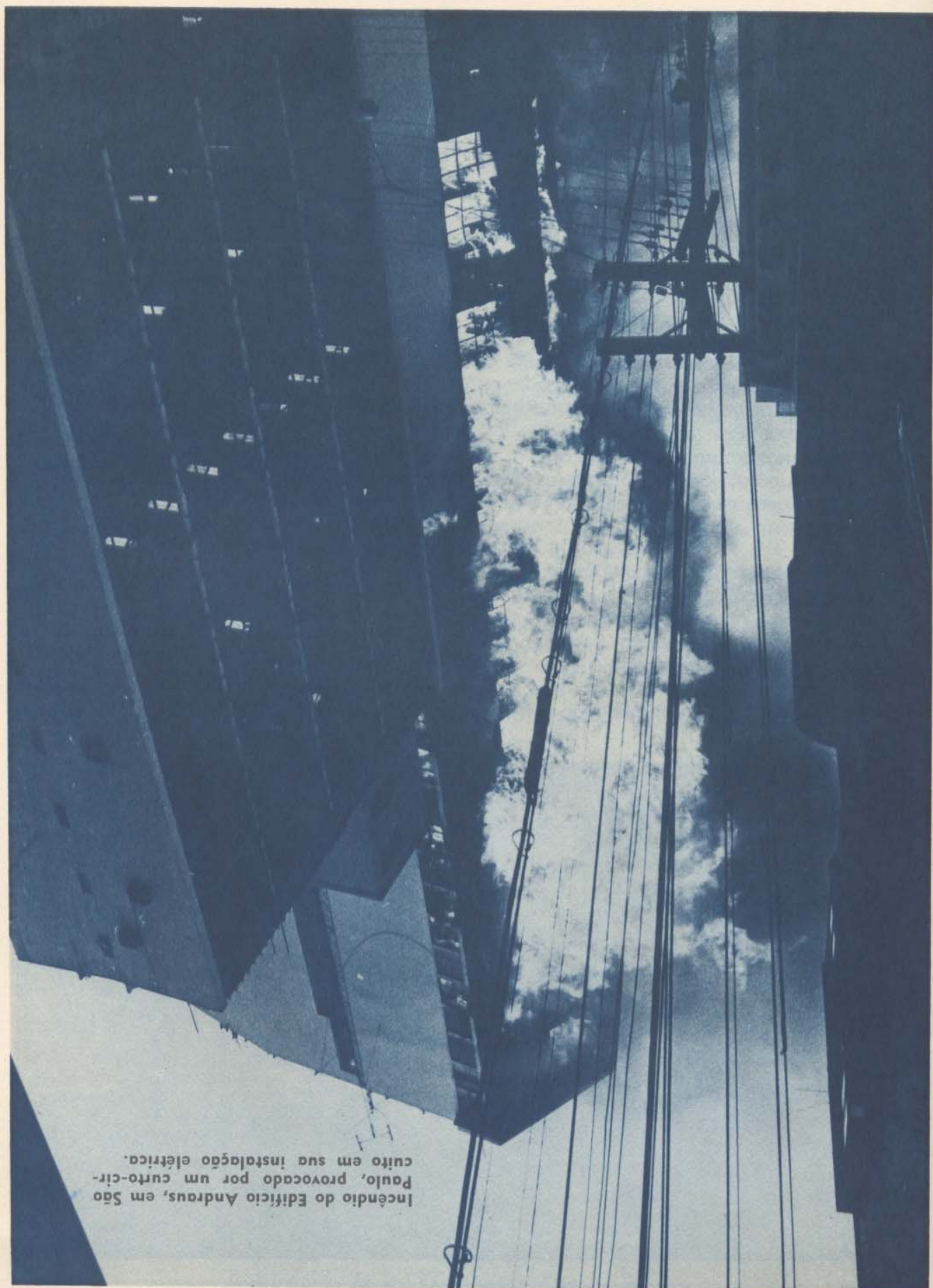
Você acabou de ver como energia elétrica pode ser transformada em energia térmica e também que essa transformação está de acordo com um princípio muito geral da Física, chamado **princípio da conservação da energia**. Este princípio é muito útil, quando há transformação da energia de uma forma para outra. Consideramos, aqui, transformações de energia mecânica em térmica e, principalmente, de elétrica em térmica. Esta última é o **efeito Joule**.

O efeito Joule é um fenômeno às vezes útil, pois a transformação de energia em térmica pode ser desejável para uma série de aplicações relacionadas com aquecimento.

Outras vezes, o efeito Joule atrapalha, como no caso do aquecimento dos fios que conduzem energia elétrica; nessa situação, só representa perdas.

Outras vezes, ainda, o resultado pode ser catastrófico, como quando um fio, por excesso de corrente, se aquece demais e causa a combustão de materiais próximos, provocando um incêndio.

Enfim, o estudo do efeito Joule, além de permitir melhor compreensão dos mecanismos da condução da corrente elétrica em condutores, nos abre possibilidades importantes de aplicações.



Incêndio do Edifício Andraus, em São Paulo, provocado por um curto-circuito em sua instalação elétrica.



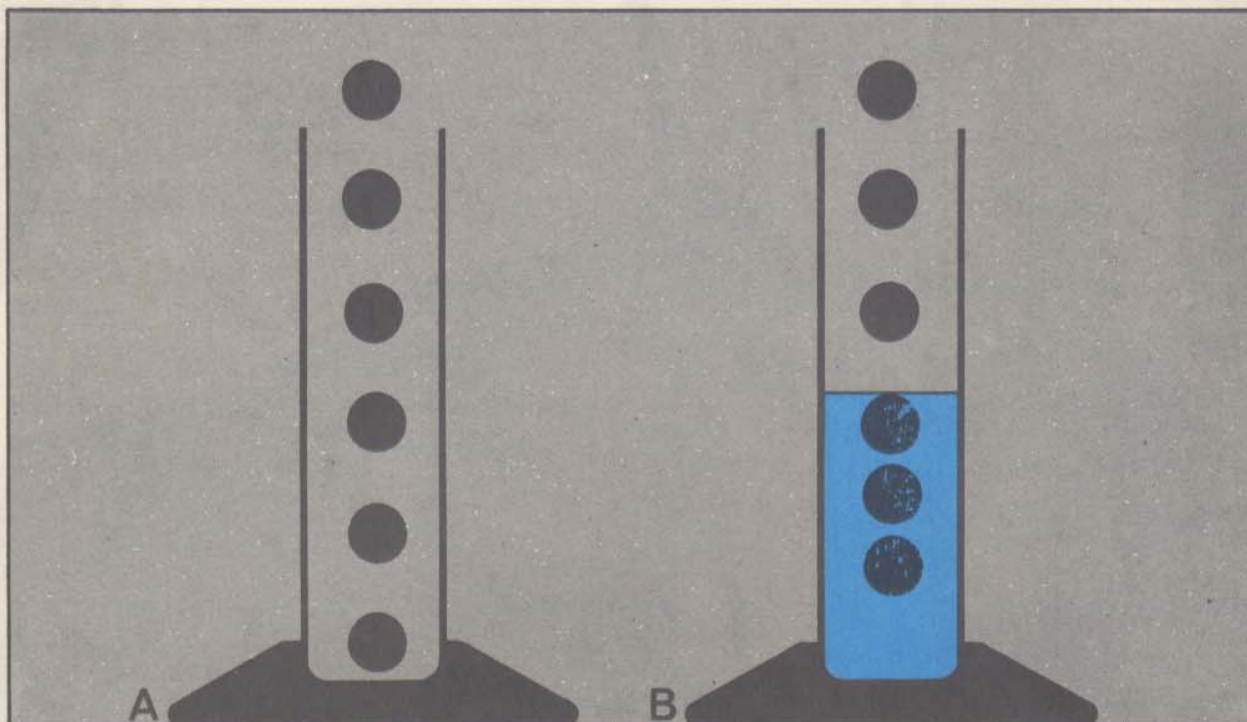


figura 8

## 6. Exercícios de aplicação

- E1** — Considere dois tubos verticais A e B (figura 8) de mesma altura. O tubo A está vazio e o B contém água. Duas esferas idênticas são soltas simultaneamente da posição indicada na figura.
- A energia potencial de ambas as bolinhas, na posição da figura, tem o mesmo valor antes de serem soltas?
  - A energia cinética das bolinhas, quando chegam ao fim do tubo, é igual em ambas?
  - Descreva como varia a energia total de cada bolinha.
  - Se quiséssemos comparar o movimento das esferas com o movimento dos elétrons de condução de um condutor e um supercondutor, qual das duas mais se aproximaria deles? Por quê?
- E2** — Descreva como varia o estado de vibração dos átomos de um condutor, quando há passagem de corrente elétrica.
- E3** — Você fez uma experiência aquecendo um fio de níquel-cromo (n.º 34) a uma chama. A seguir, ligou o mesmo fio em série, com quatro pilhas, e aproximou os terminais no fio. Descreva, em termos microscópicos, o que ocorreu nas duas situações.
- E4** — Considerando a experiência do exercício anterior, digamos que o fio de níquel-cromo ficou ligado às pilhas durante 10 s e o comprimento utilizado foi de 3 cm. Calcule a energia dissipada por efeito Joule nesse pedaço de fio.
- E5** — A potência elétrica dissipada por um chuveiro elétrico é de cerca de 2 800 watts. Calcule a potência dissipada pelos três centímetros de fio de níquel-cromo da questão anterior. Compare esse valor com a potência dissipada pelo chuveiro. Quantas vezes o chuveiro dissipa mais energia que o pedaço de fio de níquel-cromo?
- E6** — O funcionamento das lâmpadas incandescentes é baseado no efeito

## RESPOSTAS DE EXERCÍCIOS

R<sub>1</sub> -

R<sub>2</sub> -

R<sub>3</sub> -

R<sub>4</sub> -

R<sub>5</sub> -

R<sub>6</sub> -

R<sub>7</sub> -

R<sub>8</sub> -

R<sub>9</sub> -

Joule. Determine a quantidade de calor produzido por uma lâmpada de 100 watts durante duas horas, ligada à tensão de 110 V, supondo que 80% da energia cedida por efeito Joule são convertidos em energia luminosa.

- E7** — Na questão anterior, que quantidade de água poderia ser aquecida de 30°C até 45°C, com o calor produzido pela lâmpada.
- E8** — Faça uma lista de alguns aparelhos ou dispositivos que você conhece, cujo funcionamento se baseia no efeito Joule.
- E9** — Você quer construir um aquecedor de água (ebulidor) que ferva dois litros de água em 5 minutos. A temperatura inicial da água é de 20°C. Você possui um fio de níquel-cromo n.º 30 e uma fonte de tensão de 110 V.
- Qual a resistência que o fio deve ter?
  - Qual o comprimento utilizado na construção da resistência?



R1 — a) Sim.

b) Não.

c) A energia potencial inicial de cada bolinha é a mesma. A bolinha A ao cair pelo tubo, transforma toda a sua energia potencial em cinética, enquanto que a bolinha B perde parte de sua energia cinética como calor, devido ao atrito com a água.

d) O tubo A seria o mais próximo ao supercondutor; o tubo B se aproximaria mais do condutor, devido à perda de energia da bolinha na água.

R2 — A energia cinética dos elétrons de condução (corrente) é parcialmente transferida aos átomos do condutor e eles passam a vibrar com maior amplitude.

R3 — Veja texto após a questão 15.

R4 —  $\epsilon = V^2/R$

$$R = \rho \frac{\ell}{A} = 1,65 \Omega$$

$$V = 6V$$

$$\epsilon = 99 \text{ joules}$$

R5 —  $P = \frac{E}{t} = 9,9 \text{ watts}$

$$\frac{P_{\text{chuveiro}}}{P_{\text{fio}}} = \frac{2.800}{9,9} \approx 280$$

O chuveiro dissipa 280 vezes mais que o fio de Ni-Cr.

R6 — A energia total cedida pela corrente é:  
 $\epsilon = P \cdot t = 100 \times 7.200 = 72 \times 10^4 \text{ joules}$ . Cerca de 80% se transformam em energia luminosa e 20% são perdidos em calor. Logo, a quantidade de calor produzida será cerca de:

$$Q = \frac{\epsilon \times 20}{100} = 14,4 \times 10^4 \text{ joules}$$

R7 —  $Q = m C \Delta T$

$$m = \frac{Q}{C \Delta T} \approx 2,3 \text{ kg}$$

R8 — Chuveiro elétrico  
Aquecedores elétricos  
Estufas  
Torneira elétrica

R9 — a)  $mC \Delta T = \frac{V^2 t}{R}$

$$R = \frac{V^2 t}{mC \Delta T} \approx 23 \Omega$$

b)  $R = \rho \frac{\ell}{A}$

fio n.º 30  $\rightarrow d = 0,25 \text{ mm}$

$$\ell = 1,5 \text{ m}$$

**E10** — Outra aplicação prática do efeito Joule é a construção de aquecedores para salas e quartos. O funcionamento é igual ao dos aquecedores de água (ebulidores), mas a resistência é maior, para não derreter (queimar). Se você quiser construir um aquecedor, consiga um pedaço de fio de níquel-cromo n.º 26 e uma fonte de 110 V. Uma forma de montar o aquecedor está na figura 9. O aquecedor dessa figura dissipa uma potência de 200 watts.

a) Determine o valor da resistência do fio de níquel-cromo necessário para este aquecedor.

b) Qual o comprimento necessário de fio para construir esse resistor?

**E11** — Discuta com seus colegas como poderia montar uma serra de isopor (isto é, um fio quente que seja capaz de cortar isopor), utilizando fio de Ni-Cr e três pilhas de 1,5 V ligadas em série.

## O fusível elétrico

O fusível elétrico é um elemento utilizado nos circuitos elétricos, para segurança. É um condutor que suporta um determinado valor de corrente, acima do qual o calor produzido por efeito Joule é tal, que **funde** (derrete) o fusível.

O material empregado nos fusíveis tem, em geral, baixa temperatura de fusão. Por exemplo: o chumbo (327°C), o estanho (232°C) ou uma liga desses metais. O fio de metal é montado em um cartucho ou em uma peça de porcelana rosqueada (figura 10).

O fusível é construído de maneira a suportar a corrente máxima exigida por um circuito, para seu funcionamento. Assim, você encontrará fusíveis indicando: 1 A; 2 A; 20 A; 30 A ... etc. Essas correntes indicam que o calor produzido por efeito Joule com aquele valor não danificaria o circuito e nem o fusível. No entanto, se a corrente for superior ao indicado, o calor produzido será maior do que o suportado pelo fusível, que fundirá. Note, no entanto, que, para isso acontecer, é necessário

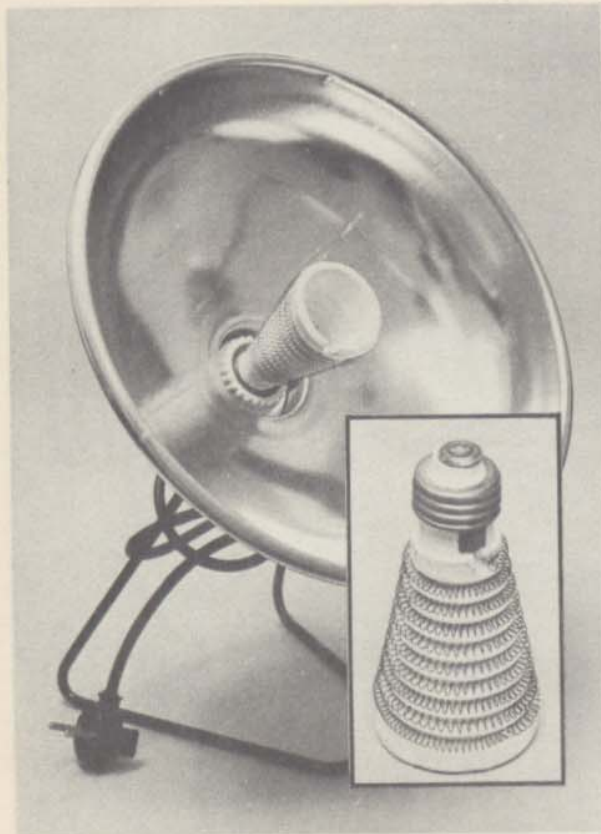


figura 9

que a corrente aqueça o fio até a temperatura de fusão. Quando o chumbo ou o estanho estão na temperatura de fusão, a energia elétrica é usada não mais para aquecer o fusível, mas sim para fazê-lo derreter. Por exemplo, para derreter 1g de chumbo é necessário fornecer 23,1 J de calor. Além disso, grande parte do calor produzido é absorvido pelo ambiente em que está o fio. A energia elétrica total cedida, para o fusível derreter, seria dada pela expressão:

$$\varepsilon_{\text{elétrica}} = \varepsilon_{\text{aumento T}} + \varepsilon_{\text{fusão}} + \varepsilon_{\text{ambiente}}$$

Note que parte da energia cedida pelo efeito Joule ao fusível é para aumentar sua temperatura, outra parte é para fundir o fusível e finalmente temos uma parte de energia cedida ao meio-ambiente. A energia cedida ao meio-ambiente depende da resistência do fusível. Por exemplo, um fusível de 10 A, de resistência 0,003  $\Omega$ , percorrido pela corrente máxima, dissipa uma potência de 0,3 watt; caso ultrapasse esta potência, a energia elétrica adicional

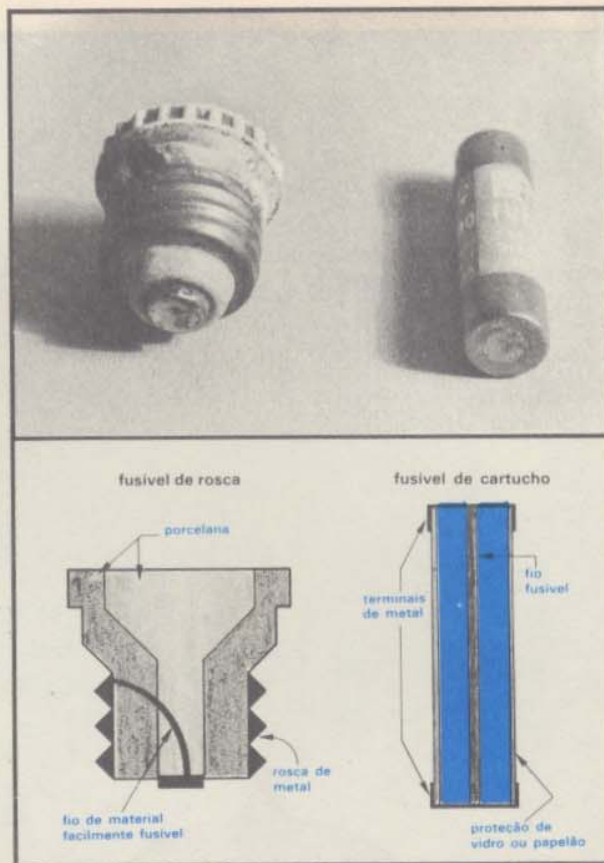


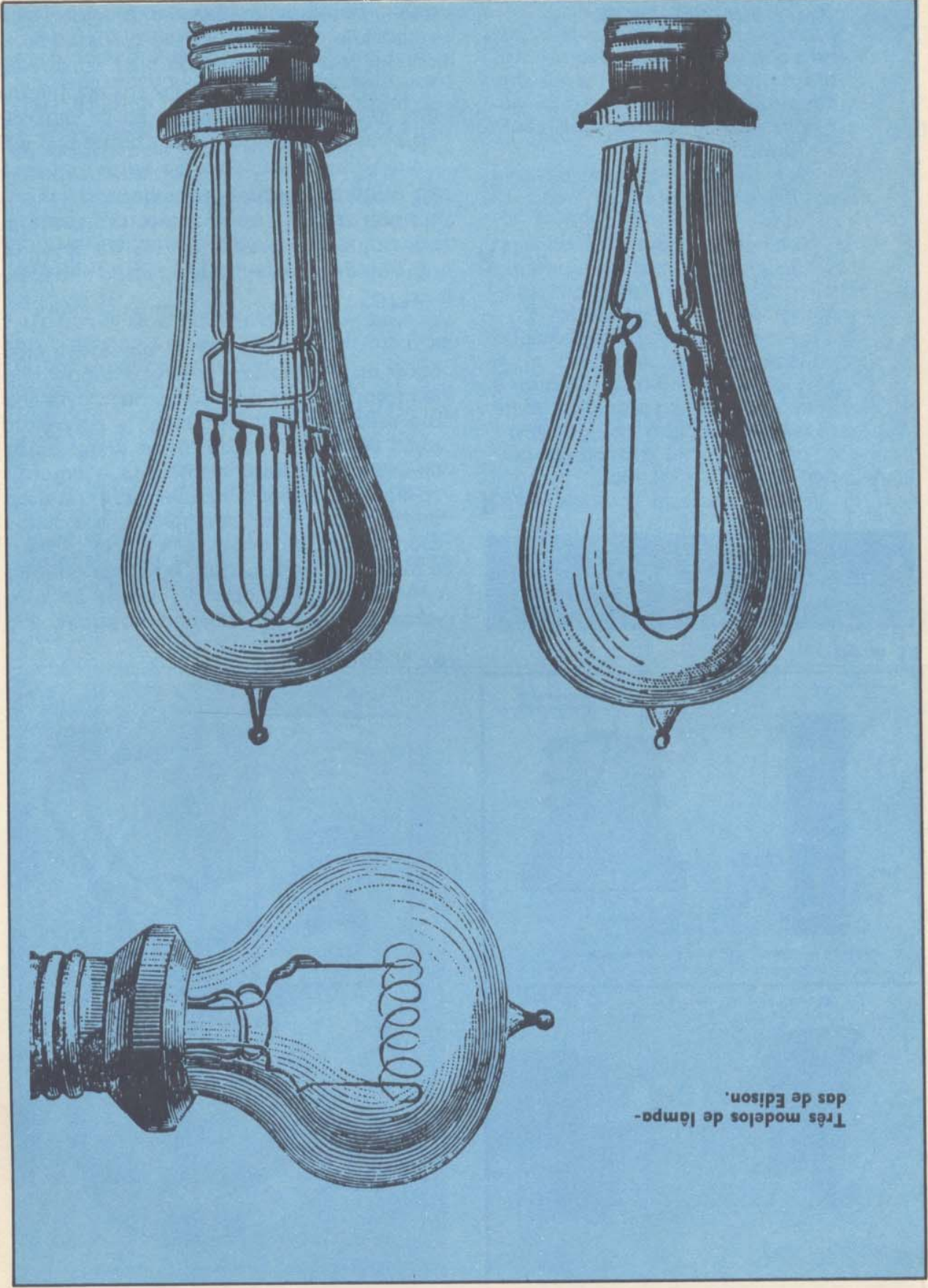
figura 10

## RESPOSTAS DE EXERCÍCIOS

R<sub>10</sub> -

R<sub>11</sub> -





Très modèles de lampes de Edison.

fará fundir ("queimar") o fusível. Portanto, a resistência do fusível e a corrente máxima que ele suporta permitem calcular a energia máxima cedida ao meio-ambiente sem danificá-lo.

A potência que um circuito elétrico, composto de resistores e fusível, dissipa é distribuída da seguinte forma:

$$P_{\text{fonte}} = P_{\text{circuito}} + P_{\text{fusível}}$$

$$V_i = Ri^2 + R_f i^2$$

- E12** — Qual é a resistência de um fusível de fio de chumbo de comprimento 3 cm e diâmetro 2 mm? Qual a potência máxima que ele suporta se a corrente do circuito a que está ligado é de 10 A?
- E13** — Qual a queda de tensão, produzida pelo fusível da questão anterior, no circuito? Se a fonte fornece 110 V, qual a tensão aplicada ao circuito?
- E14** — Em certa residência há dez quartos, cada um iluminado com uma lâmpada de 100 watts, e mais duas lâmpadas externas de 100 W e 150 W, respectivamente. A potência consumida pelas lâmpadas será de 1250 W. A tensão de entrada na residência é de 110 V e não há outros aparelhos consumidores de energia.
- Determinar a resistência total das lâmpadas, quando todas estiverem ligadas em paralelo.
  - Qual a corrente total puxada pelas lâmpadas?
  - Qual o valor mínimo de corrente que um fusível na caixa de entrada deve suportar? Um fusível de 11 A seria adequado?

## RESPOSTAS DE EXERCÍCIOS

**R<sub>12</sub>** -

**R<sub>13</sub>** -

**R<sub>14</sub>** -



$$R10 \text{ — a) } P = \frac{V^2}{R}$$

$$R = \frac{V^2}{P} = 60\Omega$$

$$\text{b) fio n.º 26} \rightarrow d = 0,4\text{mm}$$

$$R = \frac{\rho \ell}{A}$$

$$\ell = 7\text{m}$$

R11 — Com um fio de Ni-Cr de comprimento e diâmetro adequados para que, submetido a uma tensão de 4,5V, fique aquecido o suficiente para cortar o isopor.

$$R12 \text{ — } P = R i^2$$

$$R = \rho \frac{\ell}{A} = 0,19 \times 10^{-2}\Omega$$

$$P = 0,19 \text{ watt}$$

$$R13 \text{ — } V_{\text{fusível}} = R i = 1,9\text{V}$$

$$V_{\text{circuito}} = V_{\text{fonte}} - V_{\text{fusível}}$$

$$V = 110 - 1,9 = 108,1\text{V}$$

$$R14 \text{ — a) } P = \frac{V^2}{R} \therefore R = 9,7\Omega$$

$$\text{b) } P = R i^2 \therefore i = 11,3\text{A}$$

$$\text{c) } i = 11,3\text{A. Não.}$$

## Leitura Suplementar

### Supercondutividade

Em 1911, um físico holandês chamado Heike Kamerlingh-Onnes fez uma impressionante descoberta: quando resfriados a temperaturas muito baixas, certos materiais apresentam uma resistência elétrica completamente nula. Isso quer dizer que, passando uma corrente elétrica por um fio feito com este material, abaixo de uma certa temperatura crítica (característica do material), a voltagem que aparece nos terminais do fio é exatamente zero. Ou seja, o calor gerado no fio, ou então a potência necessária para fazer passar a corrente no fio, é exatamente zero.

Pouco tempo antes, H. K.-Onnes havia conseguido aperfeiçoar um refrigerador capaz de liquefazer o gás nobre mais leve que existe: o hélio. Para isso foi necessário resfriá-lo a uma temperatura de **4 graus absolutos** (4 kelvin), que correspondem a **269 celsius** abaixo de zero. Em seguida, passou a investigar o que acontecia com as propriedades dos materiais, quando colocados em um banho de hélio líquido, ou seja, quando resfriados a 4K. Um dos primeiros projetos foi descobrir o que acontecia com a resistividade elétrica dos materiais nessas temperaturas. Para sua surpresa, descobriu que em alguns materiais a resistividade caía abruptamente para zero, quando se atingia uma temperatura crítica perto de 4K e mantinha-se nula abaixo dessa temperatura. O primeiro material em que esta propriedade foi descoberta foi o mercúrio (Hg), que, por ser um metal líquido à temperatura ambiente, era mais

fácil de ser obtido puro. Por esse trabalho, H.K.-Onnes recebeu o Prêmio Nobel em 1913.

A primeira idéia para a utilização do fenômeno descoberto foi produzir campos magnéticos. Fazendo passar uma corrente elétrica por um anel (ou uma bobina curto-circuitada) de fio supercondutor, a corrente se mantém, indefinidamente, sem o auxílio de nenhuma bateria, produzindo assim um campo magnético que persiste também indefinidamente<sup>o</sup>. Aumentando a corrente e conseqüentemente o campo magnético, descobriu-se, entretanto, duas coisas desanimadoras: primeiro, que, acima de um certo valor do campo magnético, o material deixa de ser supercondutor, voltando a ter resistência elétrica normal; segundo, que a corrente elétrica também pode destruir a supercondutividade, ou seja, independente do efeito de campo magnético, um material deixa de ser supercondutor quando transporta uma corrente elétrica muito grande, superior a certo valor crítico.

Outra descoberta feita foi que o supercondutor é um perfeito diamagneto, ou seja, é completamente impenetrável por um campo magnético.

Na tabela 1, damos uma lista de alguns elementos supercondutores com sua temperatura e campos magnéticos críticos (abaixo desses valores, o material é supercondutor).

Várias décadas se passaram sem que os físicos conseguissem compreender esse fenômeno. Somente na década de 1950 é que começou a tomar corpo uma teoria capaz de explicar a supercondutividade. Essa teoria é hoje conhecida pela sigla BCS, iniciais dos seus inventores: John Bardeen — Leon Cooper — J. Robert Schrieffer. Ela é totalmente baseada em conceitos de Mecânica Quântica, a mecânica que descreve os fenômenos microscópicos em nível atômico. É claro que, para a elaboração dessa teoria, contribuíram muito as idéias de outros físicos anteriores. Por exemplo,

<sup>o</sup> Note que este fenômeno constitui o chamado moto-contínuo de terceira espécie, ou seja, a manutenção de um estado de movimento periódico sem nenhum fornecimento de energia.



	$T_c(K)$	$H_c(T=0)$ (Gauss)
Zinco (Zn)	0,5	50
Alumínio (Al)	1,2	99
Mercúrio (Hg)	4,1	410
Chumbo (Pb)	7,2	800
Nióbio (Nb)	9,5	2000

tabela 1

London, em 1948, foi quem sugeriu uma relação entre o movimento dos elétrons dentro de um anel supercondutor, com o movimento dos elétrons em torno do núcleo de um átomo. Esta foi a primeira idéia de que os elétrons que transportam a corrente elétrica em um supercondutor se encontram em um estado quântico macroscópico (ou seja, como se eles estivessem em uma órbita atômica gigante). Pela elaboração da teoria BCS, seus autores foram recentemente agraciados com o Prêmio Nobel de Física.

Assim como acontece com o desenvolvimento de uma teoria física, também foi necessário esperar muitos anos para tornar possível a aplicação prática da supercondutividade. Isto por causa das limitações de temperatura e campos magnéticos críticos. Os primeiros supercondutores descobertos precisavam ser resfriados a menos de 4 graus absolutos e não podiam suportar campos magnéticos de mais de algumas dezenas ou algumas centenas de gauss (unidade de campo magnético). Um ímã comum de ferro produz facilmente alguns milhares de gauss e, assim, os supercondutores não eram competitivos na produção de campos magnéticos, embora pudessem fazê-lo sem nenhum consumo de energia. A outra aplicação óbvia era fazê-lo funcionar como transportador de corrente elétrica sem consumo de energia (sem efeito Joule). Esta aplicação, durante muito tempo, esbarrou com as dificuldades praticamente intransponíveis de como manter constantemente o material a uma temperatura tão baixa, coisa que requeria técnicas possíveis somente em um laboratório de pesquisas, e em escalas muito pequenas.

Por volta de 1960, começaram a aparecer os chamados supercondutores do tipo II, ou seja, ligas supercondutoras com temperaturas críticas pouco mais altas (10 e 20 graus absolutos), mas capazes de suportar campos magnéticos externos

Principais ligas de supercondutores		
	$T_c(K)$	Campo Crítico (Gauss)
Nb-Ti	8,5	110.000
Nb-Sn	18,3	230.000
Nb-Al	19	320.000
Nb-Al-Ge	20	420.000

tabela 2

muito altos (100 a 500 mil gauss) e transportar correntes elétricas enormes\*. Isso abriu possibilidades imensas de aplicações tecnológicas de supercondutores. Motores elétricos e geradores de eletricidade, por exemplo, nada mais são do que bobinas que produzem um campo magnético que roda ou é forçado a rodar (rotor) no campo de outras bobinas fixas (estator). Essas bobinas em geral são feitas de fio de cobre e têm um núcleo de ferro para reforçar o campo magnético. Esse campo, em máquinas reais, nunca ultrapassa 10 000 gauss. Sua produção envolve núcleos de ferro volumosos, pesados e caros, além da potência dissipada pela resistência dos fios de cobre, o que em máquinas grandes requer um complicado e dispendioso sistema de refrigeração. Modernamente já se tem testado grandes motores elétricos e grandes geradores de eletricidade, usando rotores de fio supercondutor. Tais rotores podem produzir campos magnéticos de até 50 ou 60 mil gauss, ocupando um volume cem vezes menor do que o gerador convencional equivalente.

O problema de manter o fio supercondutor em temperaturas muito baixas (mesmo as ligas supercondutoras mais modernas ainda precisam trabalhar perto de 4 graus absolutos) revelou-se muito mais simples e econômico do que se esperava. Hoje, graças aos progressos da Engenharia Criogênica, manter um rotor de um gerador de 3 000 quilowatts (protótipo construído em 1971 no Massachusetts Institute of Technology) à temperatura de 4 graus absolutos não constitui nenhum problema e o custo da refrigeração é bem menor do que o custo do arrefecimento de um gerador convencional equivalente. Atualmente,

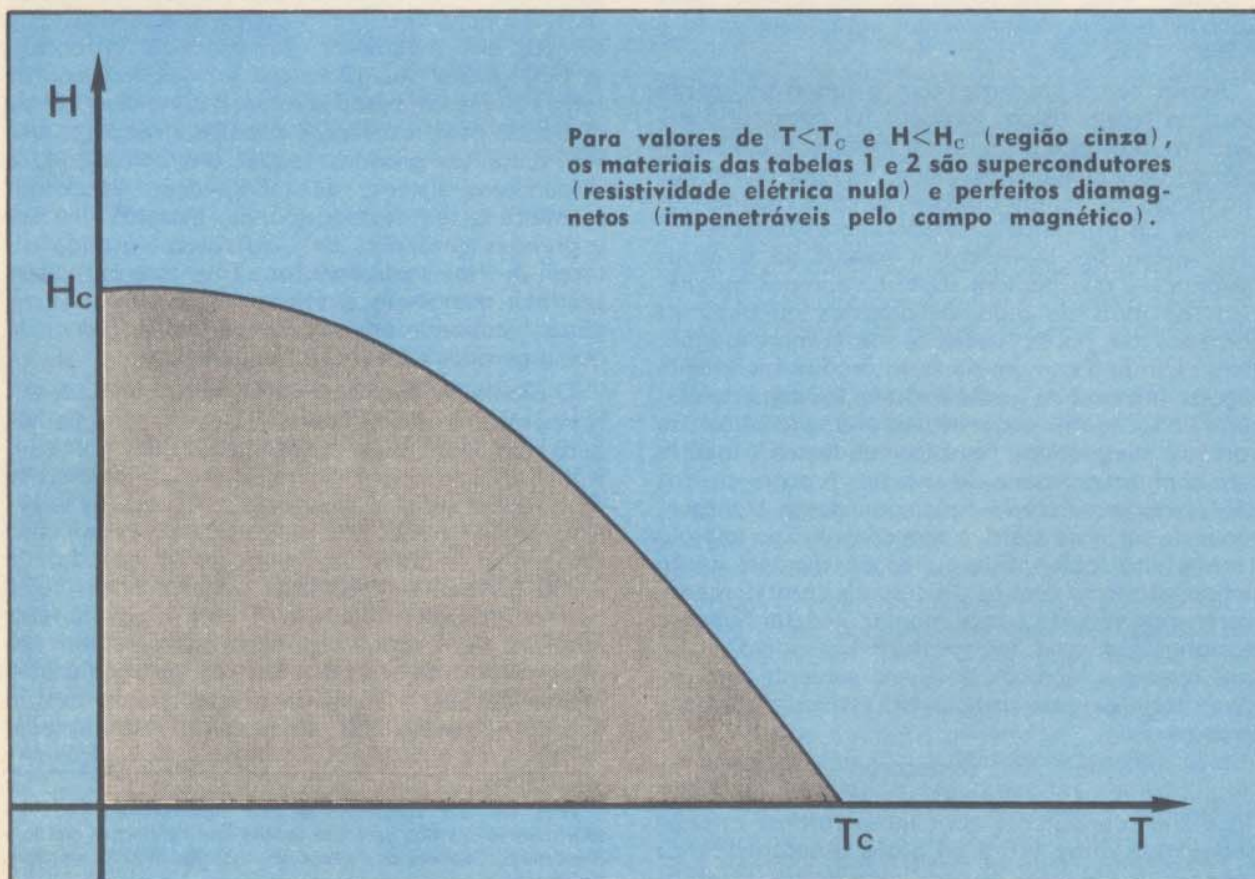
\* Hoje em dia constroem-se fios supercondutores muito semelhantes aos fios de cobre usados em instalações elétricas domésticas, capazes de transportar mais de 50 000 ampères, sem nenhum aquecimento.

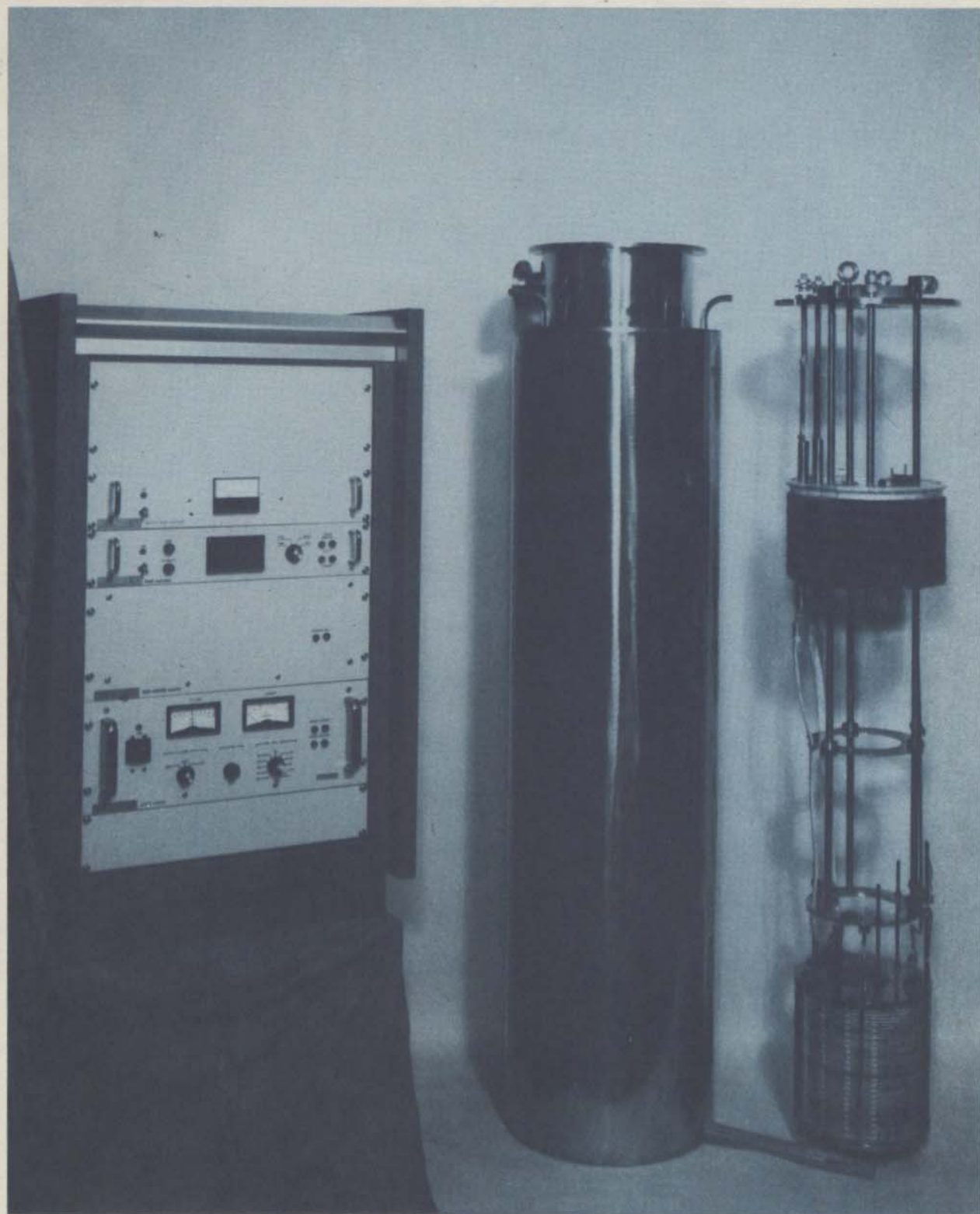


acham-se em construção máquinas bem maiores, que se espera em breve poderem substituir, com muitas vantagens, os geradores convencionais em usinas elétricas.

É claro que uma aplicação básica de fios supercondutores, o que hoje já se tornou totalmente comercial, é a produção de altíssimos campos magnéticos (até 150 000 gauss) por meio de bobinas supercondutoras para uso em laboratórios de pesquisa. Essas bobinas usam apenas uma fonte de corrente que não é maior do que um amplificador estereofônico doméstico, e todo o sistema pode ser instalado em um ou dois metros quadrados do laboratório. Para produzir o mesmo campo com uma bobina de cobre refrigerada a água, é necessário alimentá-la com um gerador de 5 megawatts, cuja instalação requer quase todo um edifício.

Outras aplicações estão hoje sendo aperfeiçoadas e muitas delas certamente constituirão uma revolução tecnológica em futuro não muito distante. Dentre elas destacamos: o cabo supercondutor para transporte de energia elétrica em grande escala; a suspensão por levitação magnética, que já está sendo aplicada em sistemas de transportes chamados **trens supercondutores**, atualmente sendo construído no Japão e na Alemanha; os aparelhos supersensíveis para medidas de voltagem, corrente elétrica e campo magnético.





Bobina supercondutora capaz de produzir 150 000 gauss em 5,5 cm de diâmetro útil, existente no Laboratório de Baixas Temperaturas e Estado Sólido do Instituto de Física da USP. Ao lado, o vaso Dewar necessário para manter a bobina a 4K, a fonte de corrente (150 ampères) e os demais aparelhos eletrônicos de controle necessários. A potência total dissipada pelo sistema é inferior a 2,4 quilowatts. Uma instalação convencional equivalente requer uma potência dissipada da ordem de 5 000 quilowatts.



Esta obra foi impressa pela  
AGGS — Indústrias Gráficas S.A.  
Rua Luís Câmara, 535 — Olaria — Rio de Janeiro — RJ  
para a  
FENAME — Fundação Nacional de Material Escolar  
Rua Miguel Ângelo, 96 — Maria da Graça — Rio de Janeiro — RJ  
República Federativa do Brasil