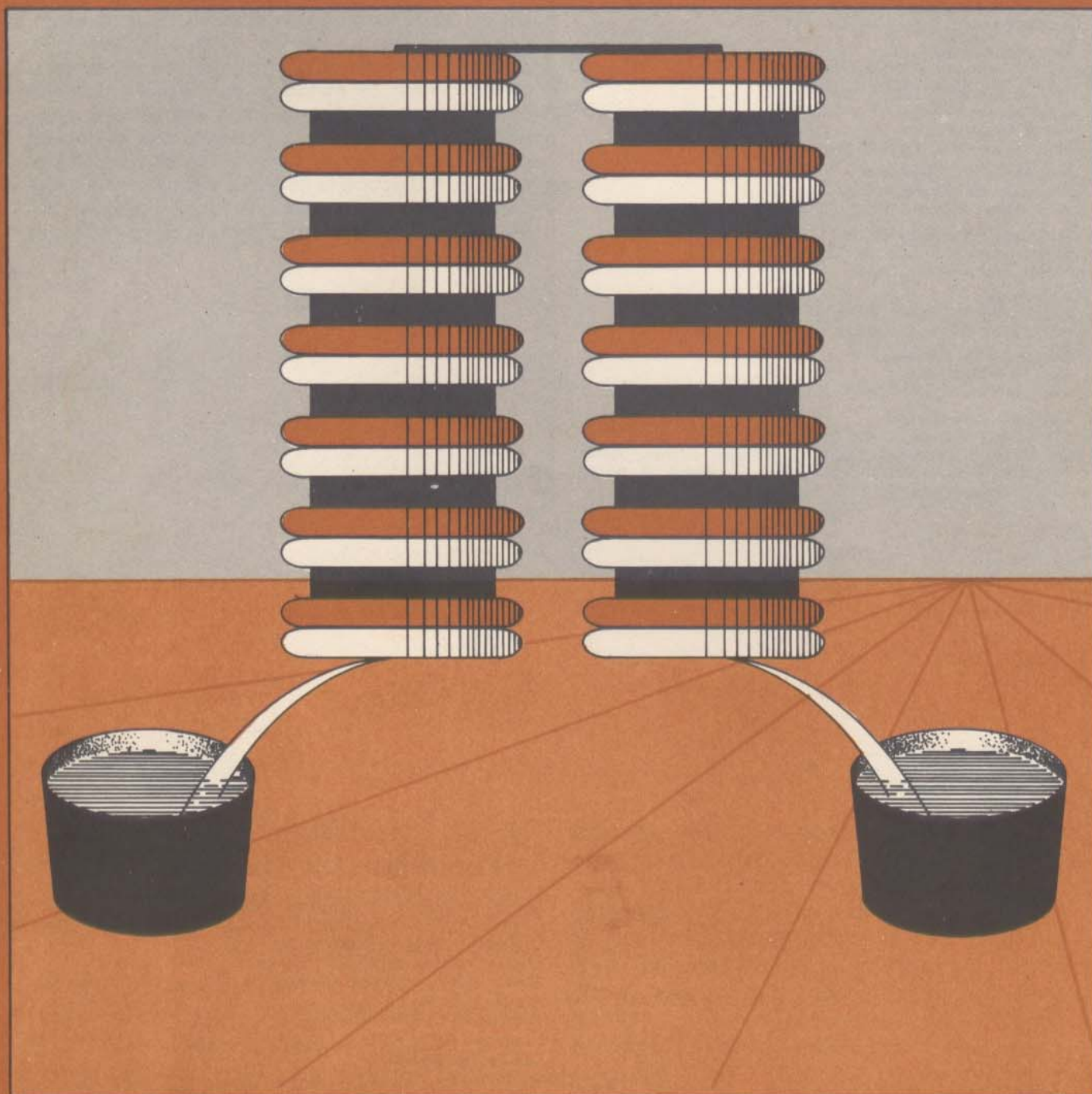


Campo elétrico



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 primeira pilha elétrica foi construída por Alessandro Volta (1745-1827), na Itália, no ano

de 1796. Antes da pilha, a produção de eletricidade era somente por atrito e por indução eletrostática; assim era possível obter diferenças de potencial altas mas somente correntes muito pequenas (nos próximos capítulos você vai aprender o significado destes termos). A pilha produzia correntes elétricas relativamente altas. O dispositivo de Volta era constituído de discos de cobre e de zinco e pedaços de pano embebidos em solução, amontoados em uma pilha, daí o nome **pilha** utilizado até hoje; Volta chegou a utilizar até sessenta discos de cada metal. Quando tocava os terminais da pilha sentia a sensação de um leve choque elétrico. Volta acreditava que a eletricidade da pilha era originada do simples contato entre os metais e a solução. Quarenta anos mais tarde é que Faraday estabeleceu definitivamente que a energia elétrica era produzida graças às reações químicas entre os metais e a solução. A descoberta de Volta iniciou um fecundo período de pesquisas em que foram estudados os efeitos da corrente elétrica sobre reações químicas e sobre ímãs.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 2 — Campo elétrico

1. Campo criado por um corpo carregado	2—2
2. Efeito do campo sobre corpos carregados	2—3
3. O campo entre placas carregadas	2—5
4. Caráter vetorial do campo elétrico	2—6
5. Campo elétrico num fio condutor	2—8
6. A pilha elétrica	2—9
7. Combinações entre pilhas	2—12
8. Exercícios de aplicação	2—14
Leitura Suplementar	
Alessandro Volta	2—19



Campo elétrico

Em princípios do século XIX o estudo da eletricidade já ganhara grande importância. Uma série de descobertas novas e a perspectiva de utilização prática dos fenômenos elétricos aumentavam grandemente o interesse pelo seu estudo.

Foi Faraday (1791-1867) quem desenvolveu o conceito de campo elétrico quando estudava a interação entre corpos car-

regados. Faraday considerou a ação a distância entre corpos carregados não mais como sendo direta, mas causada pela ação do campo criado por um dos corpos sobre o outro e vice-versa. Esta maneira de interpretar, bem como a forma de representar o campo, através de linhas de força, permitem uma boa visualização do que ocorre na vizinhança de corpos eletrizados.

1. Campo criado por um corpo carregado

Observamos no capítulo anterior que quando certos corpos são atritados tornam-se eletricamente carregados. Isto significa que o número total de elétrons existentes no corpo passa a ser diferente do número de prótons.

Quanto maior a diferença entre o número de prótons e o número de elétrons, mais intensos são os fenômenos elétricos dos quais o corpo participa. Dizemos então que quanto maior essa diferença, maior é a **carga elétrica** do corpo.

Não é possível, entretanto, medir a intensidade da carga elétrica de um corpo determinando a diferença entre o número de prótons e o de elétrons. Na próxima seção, discutiremos uma maneira mais prática de determinar a carga elétrica de um corpo.

A carga elétrica de um corpo costuma ser medida numa unidade chamada COULOMB (abrev.: **C**). 1 coulomb de carga corresponde aproximadamente à carga de $6,3 \times 10^{18}$ prótons.

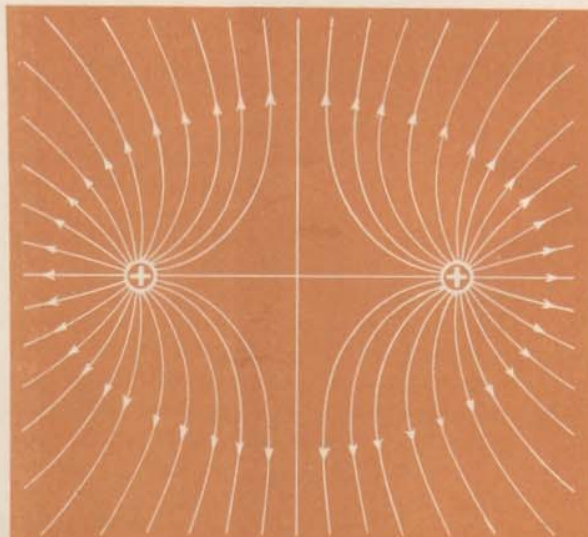
Q1 — Quanto vale a carga **e** de 1 elétron, na unidade coulomb?

Observação: A carga do elétron tem o mesmo valor que a carga do próton, mas seus sinais são opostos.

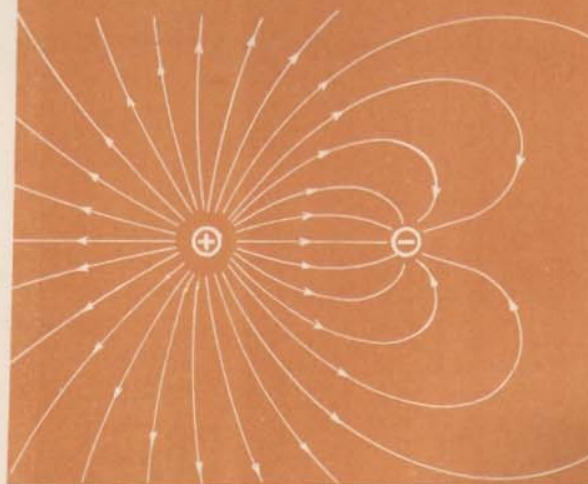
Na experiência que você realizou no capítulo anterior (com bolinhas de papel de alumínio e a caneta de plástico) verificou que, se a caneta não estava carregada, nenhuma força era exercida sobre a bolinha. Só depois que você atritava a caneta é que a bolinha passava a sofrer a ação de uma força.

Assim, você pôde verificar que um corpo carregado causa modificações nas propriedades elétricas do espaço nas suas proximidades. Estas propriedades afetam o comportamento de corpos carregados, ou não, colocados nesta região do espaço. Dizemos então que, quando um corpo sofre força elétrica ao ser colocado numa região do espaço, nessa região existe um **campo elétrico**.

2-2



Linhas de força que representam os campos elétricos produzidos por cargas elétricas. Na figura superior, onde as cargas elétricas são de mesmo sinal e valor, as linhas se repelem e são simétricas. Na figura inferior, as cargas são de sinais contrários e valores diferentes; temos, então, linhas de força não-simétricas.



Temos assim um critério **qualitativo** para decidir se em determinada região do espaço há um campo elétrico: basta verificar se um corpo aí colocado fica submetido a forças elétricas. No entanto, as propriedades **quantitativas** do campo elétrico somente podem ser determinadas a partir de experiências realizadas em condições as mais próximas possíveis das ideais; e isso não é realizável neste curso. O máximo que podemos fazer é relatar alguns resultados experimentais.

2. Efeito do campo sobre corpos carregados

Com base nos resultados experimentais que relataremos nesta seção, conseguiremos uma maneira mais prática de determinar a carga de um corpo, baseada na força a que ele fica submetido quando está presente um campo elétrico.

Sabemos que se um pequeno corpo está carregado, com carga $+Q$, ele dá origem a um campo elétrico nas suas proximidades. Verifica-se experimentalmente que, se um outro pequeno corpo com carga $+q$ for colocado próximo ao primeiro (figura 1), ficará submetido a uma força F .

A força F tem a direção da linha que une os dois corpos, e seu sentido depende dos sinais das cargas elétricas envolvidas. No caso da figura 1, ambas têm o mesmo sinal, e assim a força é de repulsão.

Se agora colocarmos na mesma posição um segundo corpo com carga $+q$, o conjunto sofrerá uma força de intensidade duas vezes maior que a primeira, isto é, $2F$ (figura 2). Isto significa que o conjunto dos dois corpos, cada um deles com carga $+q$, equivale a um corpo com carga $+2q$.

Se juntarmos mais um corpo com carga $+q$ na mesma posição, o conjunto ficará submetido a uma força de intensidade $3F$ (figura 3), e assim por diante.

Dessa forma concluímos que a força que age sobre um conjunto de n corpos, cada um com carga $+q$, é igual a nF , sendo F a força que age sobre um corpo de carga $+q$.

Isso sugere imediatamente um processo de determinação da carga elétrica de qualquer corpo; basta para isso tomar uma carga elétrica como padrão.

Q2 — Se um corpo de carga $+q$ sofre uma força de $8 \times 10^{-3} \text{N}$ ao ser colocado num determinado ponto onde exista um campo elétrico, qual será a carga de um corpo que, colocado nesse ponto, sofre uma força de $32 \times 10^{-3} \text{N}$?

Veja as respostas da **Q1** e **Q2** na página 2-4.

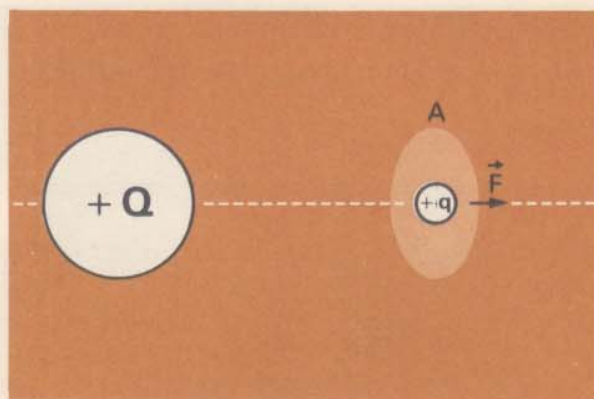


figura 1

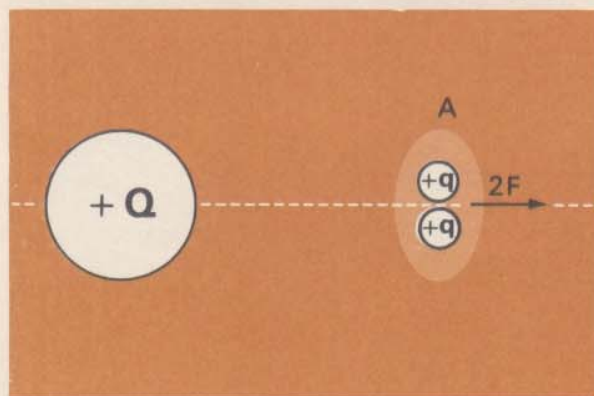


figura 2

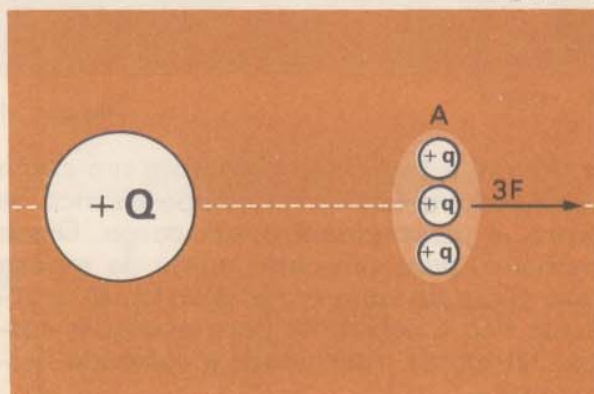


figura 3

RESPOSTAS

R₁ -

R₂ -

$$\begin{aligned} \text{R1} - e &= -\frac{1}{6,3 \times 10^{18}} = -0,16 \times 10^{-18} \text{C} = \\ \text{R2} - 4q &= -1,6 \times 10^{-19} \text{C}. \end{aligned}$$

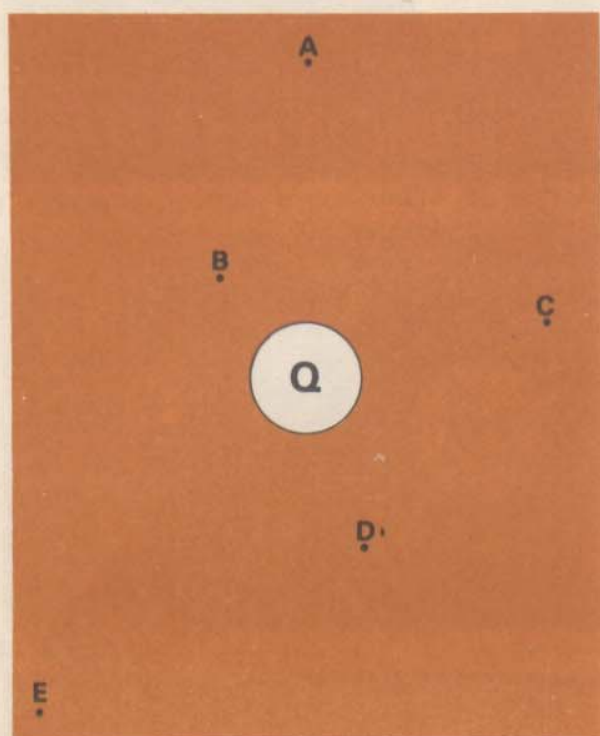


figura 4

Assim, a força que age sobre um corpo carregado, colocado no campo elétrico de outro, é proporcional à sua carga. Dessa maneira, para um certo ponto do espaço que circunda uma carga elétrica Q , a relação F/q é constante para qualquer carga elétrica de intensidade q colocada nesse ponto.

Essa constante caracteriza quantitativamente o campo elétrico naquele ponto, independe do valor de q e é representada pela letra E . Dessa maneira, para um certo ponto P de um campo elétrico, a intensidade do campo elétrico $E_{(P)}$ vale $F_{(P)} / q$, ou seja: $E_{(P)} = F_{(P)} / q$.

Se a força é dada em newton (N) e a carga em coulomb (C), a unidade de campo elétrico será N/C.

Q3 — Uma carga elétrica de $3 \times 10^{-8} \text{C}$ é colocada num ponto P , próxima a um corpo carregado, sofrendo a ação de uma força de $6 \times 10^{-8} \text{N}$.

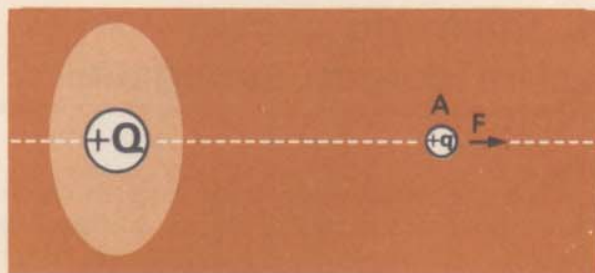


figura 5



figura 6

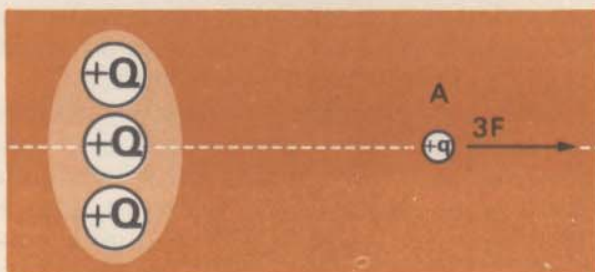


figura 7

Qual é o valor do campo elétrico no ponto P ?

Podemos sempre determinar o valor do campo elétrico em um ponto pela relação F/q . Em outro ponto, essa razão pode tomar outro valor, ou seja, o campo elétrico pode variar de intensidade quando se passa de um ponto a outro.

Verifica-se experimentalmente que, quanto mais aproximamos uma carga q de outra carga Q , maior é a força que atua entre elas.

Q4 — Tendo em vista que o campo elétrico E é proporcional à força F exercida sobre corpos carregados, ordene os pontos da figura 4 em ordem decrescente de intensidade do campo elétrico.

Veja as respostas da **Q3** e **Q4** na página 2-6.

Percebemos então que o campo elétrico em um certo ponto da região que circunda uma carga Q é tanto maior quanto mais próximo o ponto estiver de Q .

Vejam agora como o campo varia quando variamos a intensidade da carga Q que o produz.

Suponhamos que quando colocamos uma carga $+q$ num certo ponto **A**, a força que age tem intensidade F (figura 5). Se agora juntarmos ao corpo de carga $+Q$ um segundo corpo de carga também $+Q$ (resultando uma carga $+2Q$ naquele ponto), a força que age sobre a carga $+q$ passa a ter intensidade igual a $2F$ (figura 6). Se juntarmos outro corpo de carga $+Q$, a intensidade da força será $3F$ (figura 7), e assim por diante.

Assim, n corpos de carga $+Q$ (o que equivale a um corpo com carga $+nQ$) fazem com que uma força de intensidade nF aja sobre a carga $+q$. Resulta que o campo na posição **A** se torna n vezes mais intenso que aquele criado por uma só carga $+Q$.

Concluimos, assim, que o campo elétrico E num determinado ponto é tanto mais intenso quanto maior for o valor da carga do corpo que o cria.

3. O campo entre placas carregadas

Qualquer corpo carregado, independentemente da sua forma, dá origem a um campo elétrico. Como exemplo, mostramos na figura 8 a fotografia de uma placa carregada, parcialmente imersa num líquido isolante, em cuja superfície flutuam sementinhas de grama. A disposição das sementinhas evidencia a existência do campo elétrico criado pela placa. Se não houvesse carga na placa, as sementinhas estariam distribuídas ao acaso.

Se dispusermos paralelamente duas dessas placas, carregadas com cargas de mesmo valor mas de sinais opostos, o campo produzido por uma delas se combina com o da outra. O fato é evidenciado, na figura 9, pela disposição das sementinhas.



figura 8

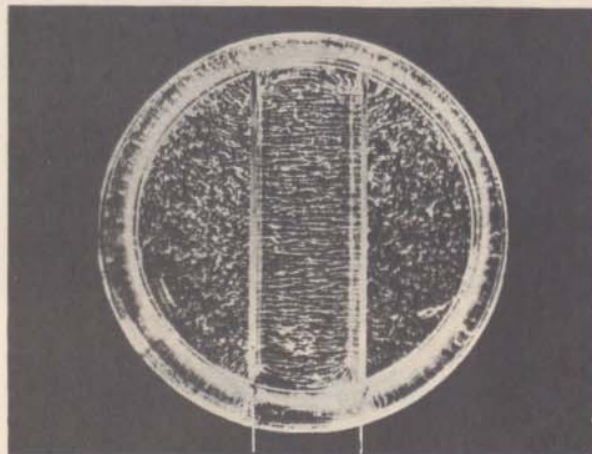


figura 9

RESPOSTAS

$R_3 -$

$R_4 -$

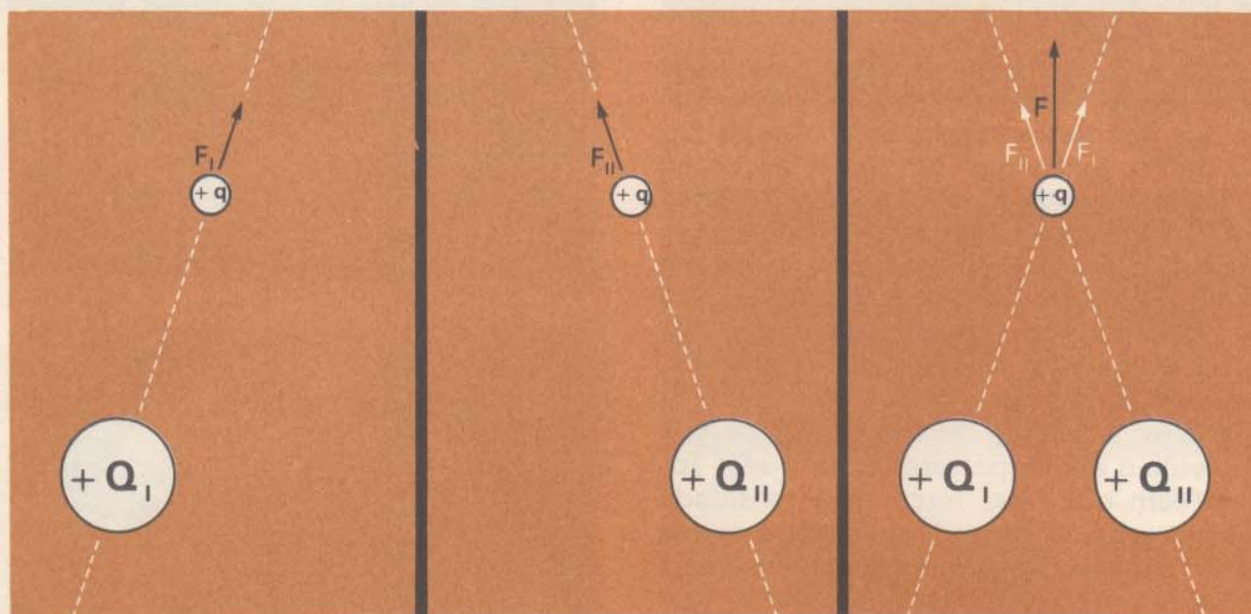


figura 10

4. Caráter vetorial do campo elétrico

Como você sabe, força é uma grandeza vetorial. Suponha que dois corpos (I e II), cada um deles com cargas $+Q$, sejam fixados próximos um do outro. Se um outro corpo com carga $+q$ for colocado nas proximidades dos dois primeiros, ficará sujeito à ação de duas forças (\vec{F}_I e \vec{F}_{II}), devidas aos corpos I e II. Desta forma, o corpo de carga $+q$ ficará sujeito à ação da força resultante \vec{F} , igual à soma das forças \vec{F}_I e \vec{F}_{II} (figura 10), ou seja:

$$\vec{F} = \vec{F}_I + \vec{F}_{II}.$$

Verifica-se experimentalmente que, para corpos de pequenas dimensões, a força que age sobre a carga $+q$, quando os corpos I e II estão presentes simultaneamente, é igual à soma das forças que agem sobre esta carga quando cada um dos corpos I e II age separadamente (figura 10A e 10B).

Da definição de campo elétrico como $E = F/q$, podemos dizer que, neste caso, o campo elétrico no ponto onde se encontra a carga $+q$ é dada por

$$\vec{F}/q = \vec{F}_I/q + \vec{F}_{II}/q,$$

onde \vec{F}_I/q representa o campo devido à carga Q do corpo I, \vec{F}_{II}/q é devido à carga Q do corpo II e \vec{F}/q é devido às duas cargas agindo simultaneamente. Assim:

$$\vec{E} = \vec{E}_I + \vec{E}_{II},$$

onde $\vec{E} = \vec{F}/q$; $\vec{E}_I = \vec{F}_I/q$; $\vec{E}_{II} = \vec{F}_{II}/q$.

Esta conclusão evidencia a possibilidade de haver combinação entre campos criados por várias cargas. Esta propriedade é conhecida por **princípio da superposição de campos**.

O fato de o campo elétrico originado por um corpo se combinar com o originado por outro, da mesma forma como se somam vetores, implica que, como a força, o campo elétrico é também uma grandeza vetorial. Dessa maneira, podemos representar o campo elétrico por intermédio de vetores.

O campo entre as duas placas da figura 9 pode, então, ser esquematizado como

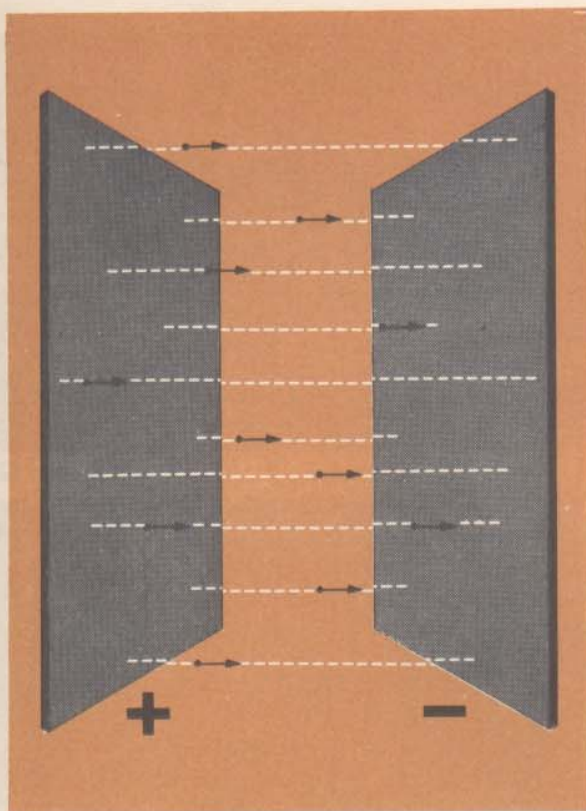


figura 11

indica a figura 11. Nesta figura, representamos o campo elétrico em alguns pontos por flechas. O sentido do campo em cada ponto é, por convenção, igual ao sentido da força que agiria sobre uma carga positiva colocada naquele ponto. Assim, o sentido do campo elétrico é, neste caso, dirigido da placa positiva para a negativa.

Q5 — Se um elétron (e^-) for abandonado em qualquer posição entre as placas (figura 12), qual será a direção e o sentido do seu movimento?

Q6 — O sentido de deslocamento do elétron coincide com o sentido do campo elétrico?

Q7 — Se ligarmos através de um fio metálico duas placas carregadas com cargas de sinais opostos, o que acontecerá com os elétrons livres do fio?

Veja as respostas da **Q5** à **Q7** na página 2-8.

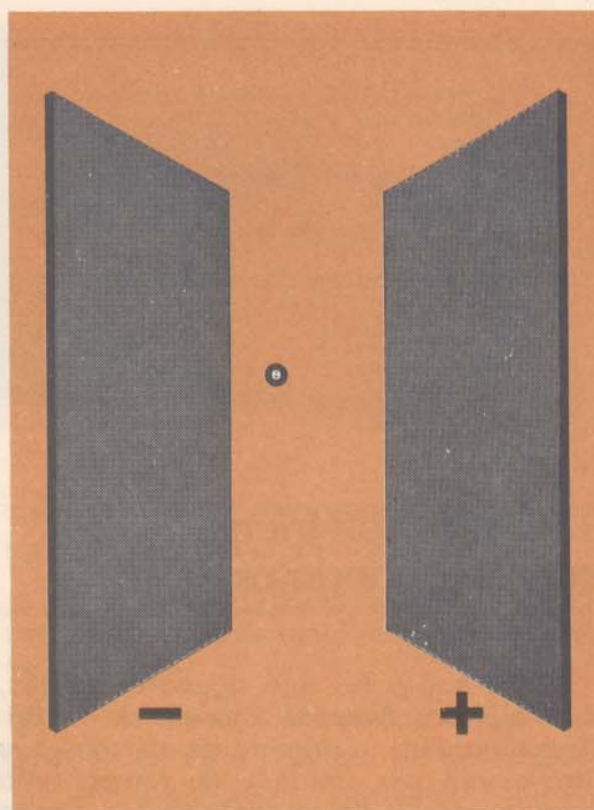


figura 12

RESPOSTAS

R₅ -

R₆ -

R₇ -

- R5 — A direção será perpendicular às placas e o sentido será da placa negativa para a positiva.
- R6 — Não. O sentido é oposto.
- R7 — Os elétrons livres se deslocarão no sentido da placa negativa para a placa positiva.

5. Campo elétrico num fio condutor

Antes que o fio seja ligado às placas, seus elétrons livres se movem ao acaso. Dessa maneira, o número de elétrons que atravessam por unidade de tempo uma seção qualquer da esquerda para a direita é igual ao número de elétrons que atravessam essa seção da direita para a esquerda (figura 13).

Quando ligamos os terminais do fio às placas, os elétrons que se moviam ao acaso ficam sujeitos à ação do campo elétrico que existe entre elas, e passam a se deslocar preferencialmente num dos sentidos do fio. Nesta nova situação, o número de elétrons que atravessam uma seção do fio da direita para a esquerda não é mais igual ao número que a atravessa da esquerda para a direita: há mais elétrons se movendo num sentido que em outro. Como resultado, há um movimento global de elétrons em uma certa direção, de acordo com o sentido do campo elétrico. No caso da figura 14, esse movimento é da direita para a esquerda. Resulta daí que as placas se descarregam, e o movimento rapidamente cessa.

Esse mesmo tipo de movimento ordenado dos elétrons livres de um fio condutor é também observado quando se ligam as extremidades do fio aos terminais de uma pilha elétrica. Dessa forma, concluímos que uma pilha elétrica também deve ser capaz de criar um campo elétrico no interior de um fio condutor. Uma das consequências da criação de um campo elé-

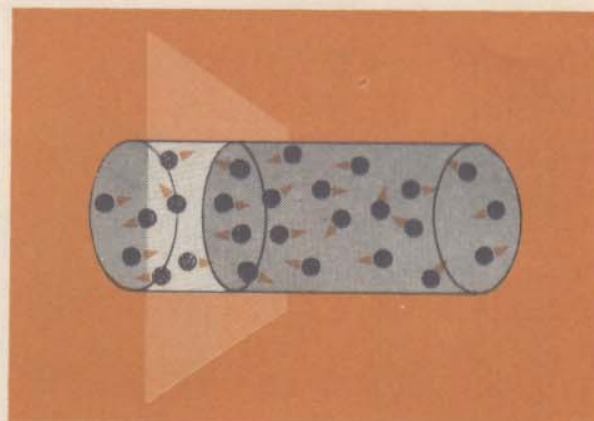


figura 13

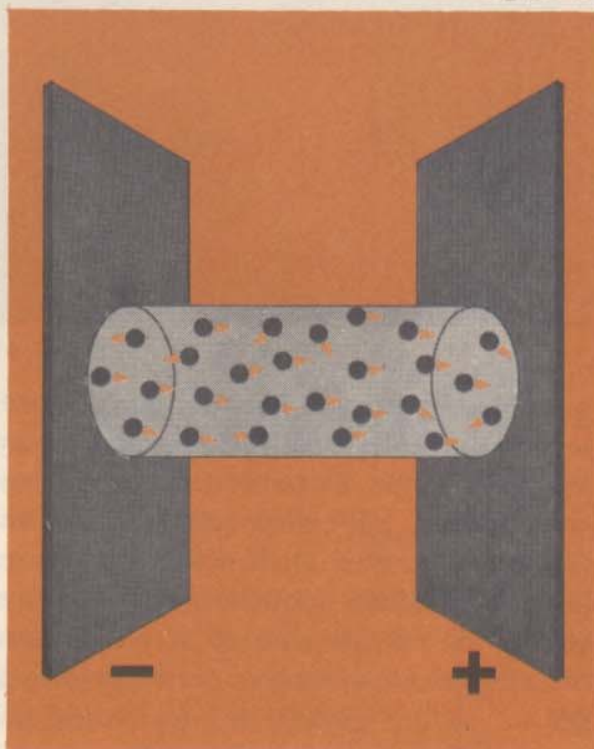


figura 14

trico no interior do fio é, como já vimos, a modificação do movimento dos elétrons em seu interior. Se o campo elétrico no interior do fio é muito intenso, o movimento dos elétrons pode ser tal, que provoca efeitos facilmente observáveis no próprio fio.

Para entender melhor a ação de um campo elétrico sobre um fio, você vai realizar algumas experiências. Como fonte do campo elétrico usaremos uma pilha; o fio cujo comportamento estudaremos será o filamento de uma lâmpada.

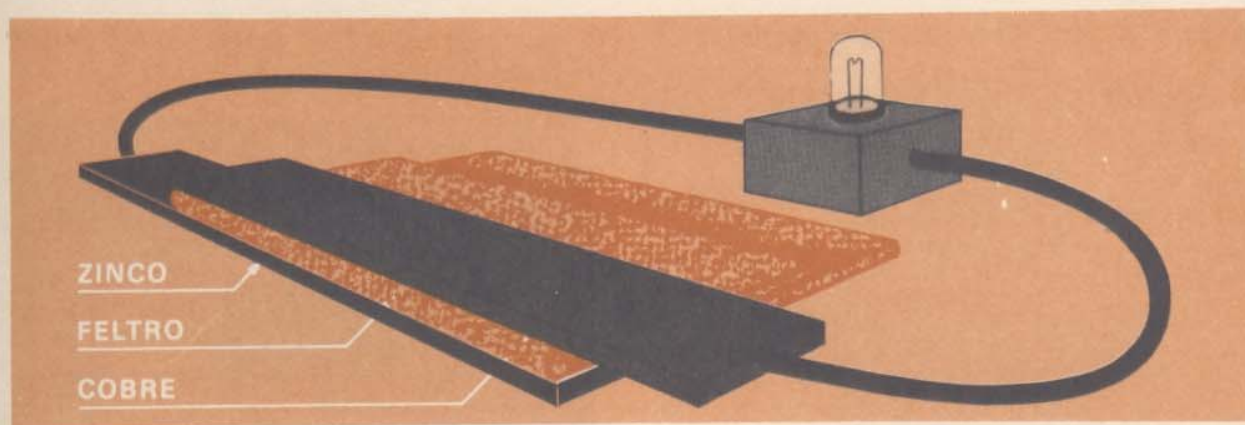


figura 15

6. A pilha elétrica

Vejamos, inicialmente, como uma pilha é capaz de criar um campo elétrico. Para isso, você iniciará por construir e testar uma pilha elétrica simples, usando o seguinte material:

- 10 g de sulfato de cobre (aproximadamente uma colher das de sopa);
- 100 ml de água em um copo;
- 10 cm² de feltro, ou tecido similar;
- 1 placa de zinco (10 cm × 2 cm);
- 1 placa de cobre (10 cm × 2 cm);
- 1 lâmpada de 6 V/50 mA
- 1 soquete para a lâmpada;
- fios de ligação;
- 1 recipiente (por exemplo, um copo).

Ligue um fio de ligação a cada uma das placas metálicas (cobre e zinco); as extremidades restantes desses dois fios devem ser ligadas aos terminais do soquete da lâmpada. Coloque o pedaço de feltro (seco) entre as duas placas metálicas, formando um "sanduíche" (veja a figura 15). Coloque a lâmpada no soquete e observe o que acontece.

Q8 — A lâmpada acendeu?

Dissolva o sulfato de cobre na água, de modo a obter uma solução homogênea, chamada **solução eletrolítica**.

Retire o feltro de entre as placas e mergulhe uma parte na solução eletrolítica, fazendo com que ele fique embebido; a outra parte do feltro deve ficar seca, para

que você possa manusear o tecido sem tocar na solução eletrolítica.

Coloque a parte embebida do feltro entre as duas placas metálicas, refazendo o "sanduíche".

Q9 — E agora, a lâmpada acendeu?

Q10 — Se você desfizer o "sanduíche", por exemplo, afastando uma das placas metálicas, o que ocorre com a lâmpada?

Q11 — Recoloque novamente a placa em contato com o feltro e pressione o conjunto com um palito de madeira ou outro objeto. O que acontece com o brilho da lâmpada?

Veja as respostas da **Q8** à **Q11** na página 2-10.

RESPOSTAS

R₈ -

R₉ -

R₁₀ -

R₁₁ -

- R8 — Não.
 R9 — Sim.
 R10 — A lâmpada apaga.
 R11 — O brilho da lâmpada aumenta.

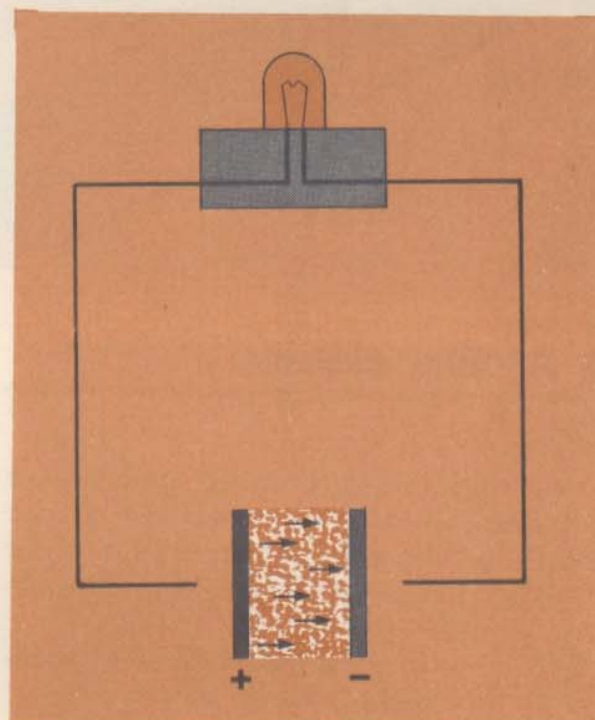


figura 16

Vamos agora tentar compreender por que a lâmpada acendeu quando colocamos as placas metálicas em contato com o feltro umedecido com a solução de sulfato de cobre.

Quando formamos o "sanduíche", passam a se produzir reações químicas entre a placa de zinco e o sulfato de cobre, assim como entre a placa de cobre e o sulfato de cobre. Nessas reações há transferência de elétrons entre as placas metálicas e os íons da solução de sulfato; essas transferências fazem com que a placa de zinco fique com excesso de elétrons, e a placa de cobre, com falta de elétrons. Assim, a placa de zinco fica negativamente carregada, ao passo que a de cobre, positivamente carregada (por isso, as placas metálicas são chamadas respectivamente terminal — ou pólo — negativo e terminal — ou pólo — positivo da pilha).

Ora, o fato de uma placa estar negativamente carregada e a outra positivamente carregada faz surgir um campo elétrico

entre elas (figura 16). Mas essas placas estão ligadas por fios condutores de ligação e pelo filamento da lâmpada, de modo que os elétrons do fio passam a se mover numa direção preferencial, por efeito do campo elétrico criado no interior dos fios. Esse movimento se dá no sentido da placa negativa para a positiva (isto é, da placa de zinco para a de cobre) (figura 17).

Dessa maneira, os elétrons que percorrem o fio condutor de ligação atravessam o filamento da lâmpada — que é constituído de um material condutor apropriado —, aquecendo-o tanto, que ele passa a emitir luz.

Os fios de ligação, devido às suas dimensões, não emitem luz neste caso. (Você entenderá melhor isto no decorrer do curso.)

Assim, o fato de o filamento da lâmpada emitir luz (brilhar), ao ser ligado aos terminais de uma pilha, evidencia a criação de um campo elétrico por parte desta última.

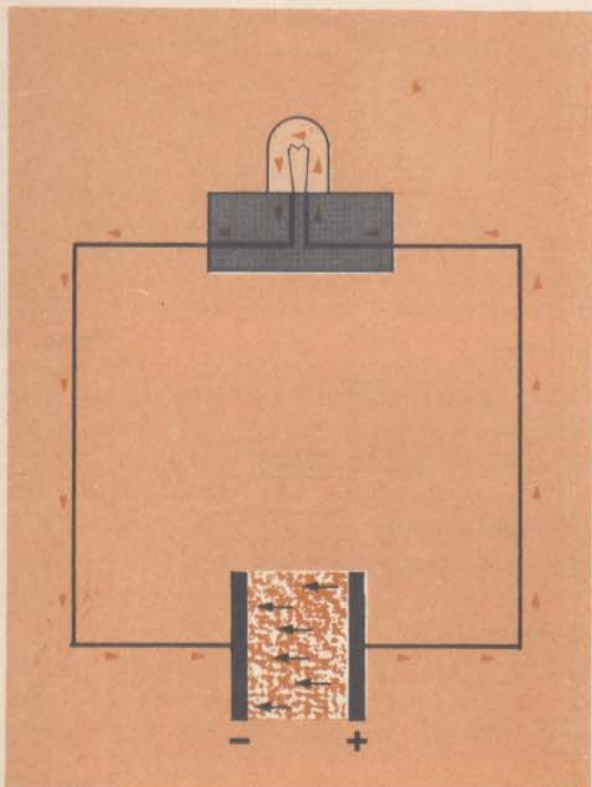


figura 17

Uma pilha sempre cria um campo elétrico, que permanece constante enquanto a pilha não se gasta; assim, quando ligamos seus terminais através de um fio, o campo elétrico faz com que os elétrons do fio se movam num certo sentido.

Quando interrompemos o circuito, os elétrons do fio deixam de ficar sob a ação do campo elétrico e a lâmpada apaga.

O campo elétrico gerado por uma pilha apresenta comportamento um pouco diferente do campo elétrico produzido por um pente eletrizado.

Quando o pente é atritado, ele fica carregado com um certo número de cargas elétricas. Dessa forma, se removemos todas as cargas que o pente ganhou — por exemplo, manuseando-o bastante —, ele fica descarregado e o campo elétrico que ele produzia desaparece.

No caso da pilha, entretanto, as coisas são diferentes: se tocarmos um de seus terminais com a mão, removendo assim cargas elétricas, novas cargas são liberadas no interior da pilha por meio de rea-

ções químicas, de modo a manter constante o excesso de cargas no terminal.

Assim, para um determinado fio que liga os terminais da pilha, o campo elétrico por ela produzido permanece constante.

Toda pilha elétrica funciona baseada nos mesmos princípios da pilha que você construiu. Assim, toda pilha apresenta como componentes dois terminais (também chamados **elétrodos**), entre os quais existe uma solução eletrolítica.

Os metais que compõem os elétrodos podem variar, como também a solução eletrolítica. Dessa maneira, as pilhas comuns de lanterna usam como elétrodo positivo um bastão de carvão e, como elétrodo negativo, uma placa de zinco. A solução eletrolítica dessas pilhas é constituída por uma pasta úmida que contém cloreto de amônio, dióxido de manganês e água. Elas produzem o mesmo efeito que a pilha que você construiu. Experimente.

7. Combinações entre pilhas

Você observou o efeito do campo elétrico no interior de um fio utilizando apenas uma pilha. Como poderíamos utilizar várias pilhas de lanterna para obter um campo elétrico mais intenso? A seguir você realizará algumas experiências que darão resposta a essa pergunta.

Monte um circuito semelhante ao da figura 18 utilizando fios de ligação, uma lâmpada de 6 V e uma pilha. Observe o brilho da lâmpada. Em seguida, junte mais uma pilha ao circuito, como mostra a figura 19. Observe o brilho da lâmpada.

Q12 — O brilho da lâmpada é maior quando ligada a uma ou a duas pilhas?

O efeito que você observou no brilho da lâmpada, ao ligar mais uma pilha, indica que o campo elétrico aumentou.

Vá juntando mais pilhas ao circuito, até um máximo de quatro pilhas. Na montagem dos circuitos, você deve fazer com que o terminal de uma pilha fique ligado ao terminal da seguinte; você pode ligar o terminal de uma pilha a qualquer dos dois terminais de outra.

Mude à vontade a disposição das pilhas, prestando atenção às ligações e ao brilho da lâmpada. Só prossiga a leitura após descobrir qual a disposição das pilhas que resulta no maior brilho da lâmpada.

Q13 — Desenhe na figura 20 o circuito correspondente ao maior brilho da lâmpada.

Essa ligação deve ter sido assim: o terminal positivo de cada pilha é ligado ao terminal negativo da pilha seguinte. Nesta ligação, deve restar um fio livre na primeira e outro na última. Se o terminal

2-12

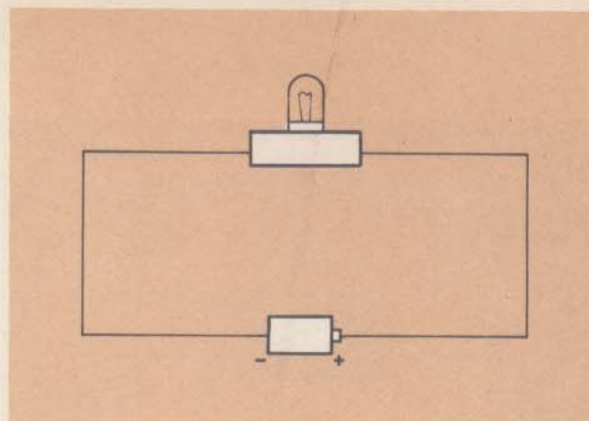


figura 18

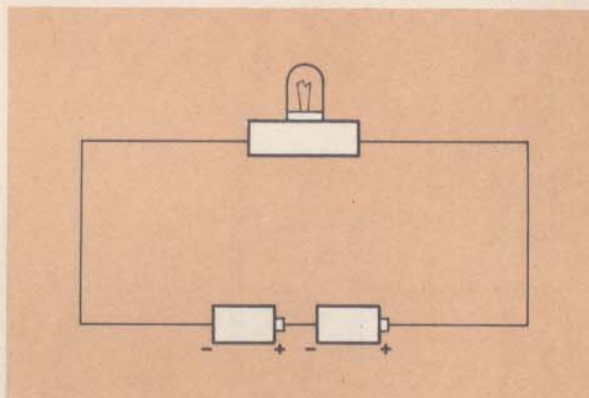


figura 19

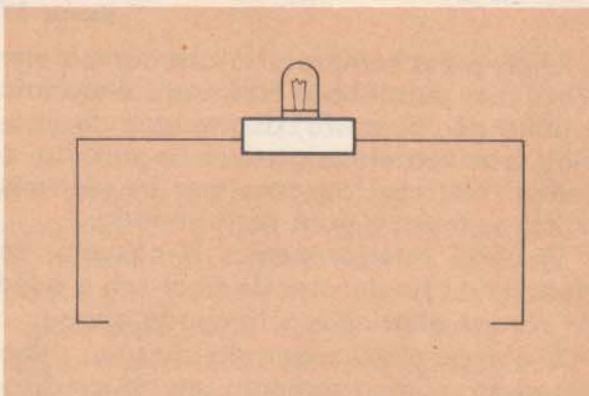


figura 20

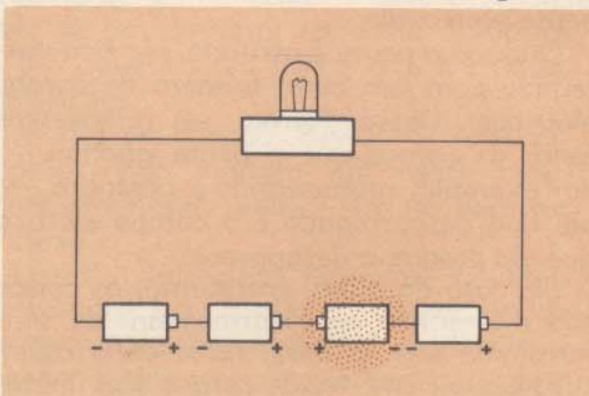


figura 21

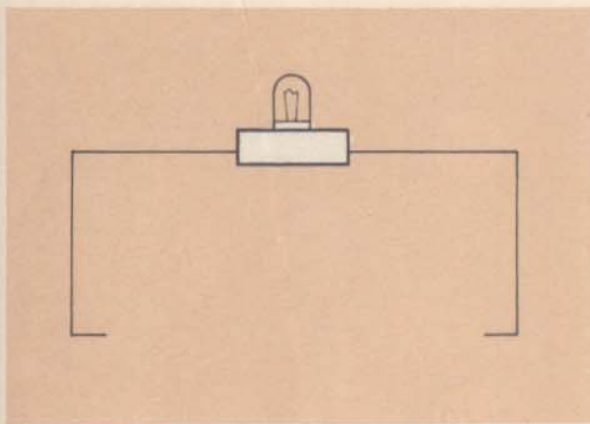


figura 22

livre da primeira pilha for o negativo, o da última deve ser o positivo, ou vice-versa. Esses terminais são ligados aos terminais da lâmpada.

Quando a ligação das pilhas é feita da maneira acima, dizemos que elas estão ligadas **em série**.

Volte agora ao circuito com as quatro pilhas ligadas em série e inverta a posição de uma delas, de modo a inverter sua polaridade em relação às outras, como mostra a figura 21.

Q14 — O que acontece com o brilho da lâmpada?

Agora inverta a polaridade de mais uma pilha.

Q15 — O que acontece com o brilho da lâmpada?

Q16 — Utilizando três pilhas de lanterna, é possível obter um conjunto que, ligado à lâmpada, faça com que esta adquira o mesmo brilho que apresentou quando ligada a uma única pilha?

Q17 — Como você interpreta esse resultado?

Q18 — Desenhe nas figuras 22 e 23 a disposição das pilhas referentes às questões 14 e 16, indicando quais das pilhas se compensam e quantas são responsáveis pela manutenção do campo elétrico.

Veja as respostas da **Q12** à **Q18** na página 2-14.

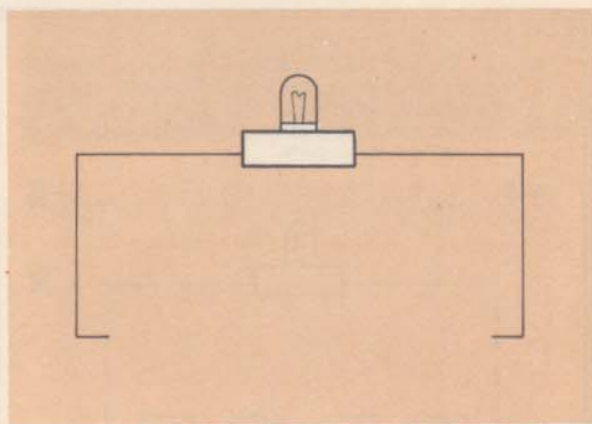


figura 23

RESPOSTAS

R₁₂ -

R₁₄ -

R₁₅ -

R₁₆ -

R₁₇ -

R12 — Quanto maior o número de pilhas ligadas em série, maior será a energia cedida. Isto é evidenciado pelo aumento de brilho da lâmpada quando você acrescenta mais pilhas ao circuito.

R13

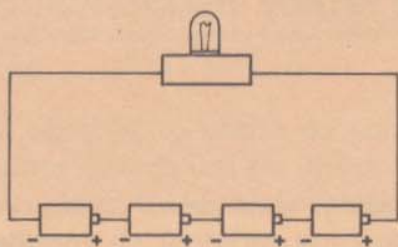


figura 20 — resposta

R14 — O brilho da lâmpada diminui.

R15 — A lâmpada apaga.

R16 — Sim. Basta, para isto, ligar as três pilhas em série e inverter a polaridade de uma delas em relação às outras duas (veja a figura 23B — resposta).

R17 — O campo elétrico devido a cada pilha tem a mesma intensidade. Assim, quando invertemos a polaridade de uma delas, o campo elétrico desta compensa o campo elétrico de uma outra (figura da R16), permanecendo apenas o campo elétrico criado por uma pilha.

R18

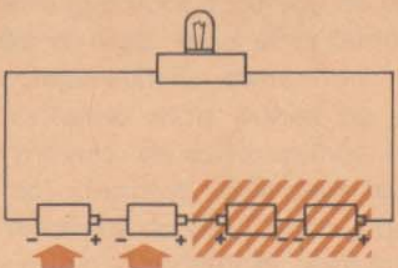


figura 22 — resposta

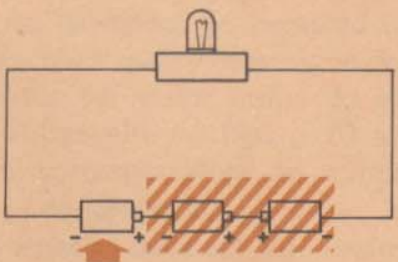


figura 23 — resposta

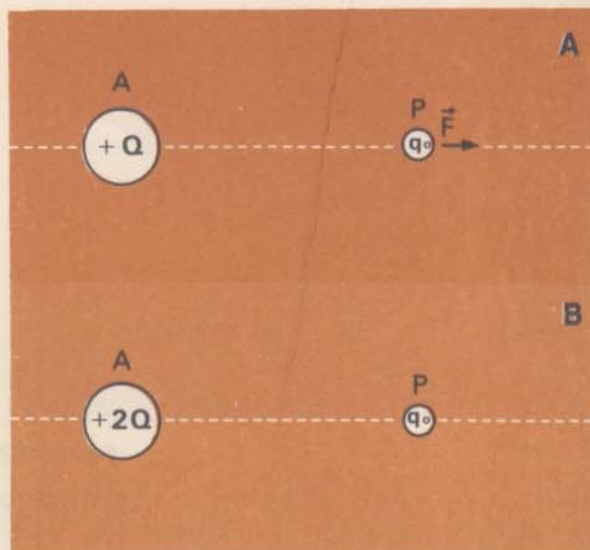


figura 24

8. Exercícios de aplicação

- E1 — Em que unidade se mede a carga elétrica? O valor da carga de um elétron é de $-1,6 \times 10^{-19} \text{C}$. A quantos elétrons corresponde um coulomb?
- E2 — Um corpo eletrizado apresenta um excesso de 28×10^5 elétrons. Qual a carga deste corpo, em coulomb? Qual o sinal da carga?
- E3 — Um corpo eletrizado apresenta uma falta de 3×10^2 elétrons. Qual a carga deste corpo em coulomb?
- E4 — Quando você eletriza uma caneta de plástico e a aproxima de uma bolinha de papel aluminizado, o que acontece com a bolinha?
- E5 — Quando uma carga elétrica colocada em um ponto do espaço modifica as características elétricas do espaço ao seu redor, dizemos que ela cria um _____.
- E6 — Em um ponto do espaço existe um campo elétrico. Como pode ser verificado este fato?
- E7 — A figura 24A mostra uma carga Q que produz um campo E . No ponto P é colocada uma carga de pro-

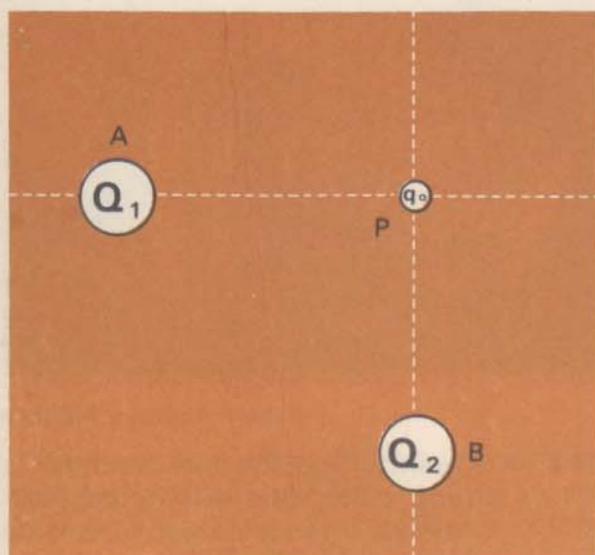


figura 25

va pequena, que irá sofrer a ação de uma força \vec{F} . Na figura 24B duplicamos a carga Q , para $2Q$. O campo que age sobre a carga de prova no ponto P é maior ou menor no segundo caso? Qual a relação entre a força que age no primeiro caso e a força do segundo caso?

- E8** — Neste capítulo você viu que o campo elétrico em um ponto depende da carga que o produz. O exercício anterior exemplificou esta propriedade. Se, em lugar de duplicarmos a carga Q , colocarmos uma segunda carga Q_2 na posição B (figura 25), qual será o campo resultante sobre a carga q_0 ? E a força resultante sobre q_0 ? (Lembre-se da superposição de campos elétricos.) Dê sua resposta graficamente.
- E9** — Uma carga $q = + 8 \times 10^{-17} \text{C}$ sofre uma força elétrica de 10^{-10}N . Qual o valor do campo elétrico em que esta carga está situada?
- E10** — Em certa região do espaço existe um campo elétrico. Seu valor é de $5,0 \times 10^4 \text{N/C}$. Colocando nesse campo uma carga de $- 1,5 \times 10^{-15} \text{C}$, qual vai ser o valor da força sofrida pela carga?

RESPOSTAS DE EXERCÍCIOS

R₁ -

R₂ -

R₃ -

R₄ -

R₅ -

R₆ -

R₇ -

R₉ -

R₁₀ -

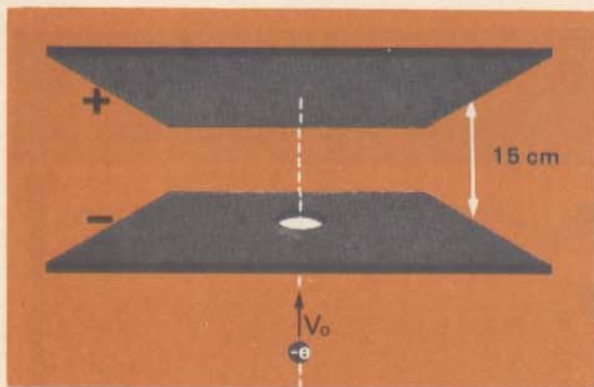


figura 26



Robert Andrews Millikan

E11 — Temos um corpo carregado com $3 \times 10^{-12} \text{C}$, situado em uma região cujo campo elétrico é de $7,5 \times 10^5 \text{N/C}$. A este corpo adicionamos uma certa quantidade de carga desconhecida. Após a adição da carga, o corpo passa a sofrer uma força de $8,0 \times 10^{-6} \text{N}$.

Qual foi a quantidade de carga adicionada ao corpo se o campo elétrico não foi modificado?

E12 — Uma carga de $3,2 \times 10^{-15} \text{C}$ está sujeita a um campo elétrico de $2,0 \times 10^8 \text{N/C}$. Qual a força que age sobre esta carga, devido ao campo elétrico? A massa da carga é da ordem de $18 \times 10^{-12} \text{kg}$. Determine sua aceleração, lembrando que $F = ma$.

E13 — A figura 26 mostra duas placas condutoras paralelas carregadas que estão no vácuo, distando uma da outra de 15 cm; entre elas há um campo elétrico constante, de 20N/C . Um elétron é lançado com uma velocidade inicial de $3 \cdot 10^6 \text{m/s}$ através do orifício da placa negativa.

Dados: $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{kg}$
 $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$

- Qual a força elétrica que age sobre o elétron entre as placas?
- Qual a aceleração sofrida pelo elétron na região entre as placas?
- Qual a velocidade do elétron ao chegar à placa positiva?
- Qual o tempo gasto pelo elétron para ir da placa negativa à positiva?

E14 — Quando ligamos um condutor a uma pilha, que alterações ocorrem no interior do condutor e no interior da pilha?

E15 — Assinale a(s) proposição(ões) correta(s) referente(s) à pilha que você construiu, quando ela está ligada à lâmpada:

I — Os íons da solução eletrolítica reagem com os metais das duas placas, cedendo a estas cargas de sinais respectivamente positivos e negativos.

II — Quando a pilha está ligada o campo elétrico produzido pela pilha não é constante e a lâmpada apresenta o mesmo brilho.

III — O movimento dos elétrons no interior do fio condutor tem velocidade constante, enquanto a pilha está ligada a uma lâmpada.

- | | |
|--------|-------------|
| a) I | d) I e II |
| b) II | e) I e III |
| c) III | f) II e III |

EXPERIÊNCIA DE MILLIKAN

No início deste capítulo dissemos que a carga do elétron vale $1,6 \times 10^{-19} \text{C}$. Este valor só foi determinado depois de inúmeras tentativas experimentais. Entre 1906 e 1916, R. A. Millikan construiu um aparelho que, depois de muitas modificações e melhorias, permitiu determinar a carga do elétron. Este aparelho é esquematizado no diagrama da figura 27.

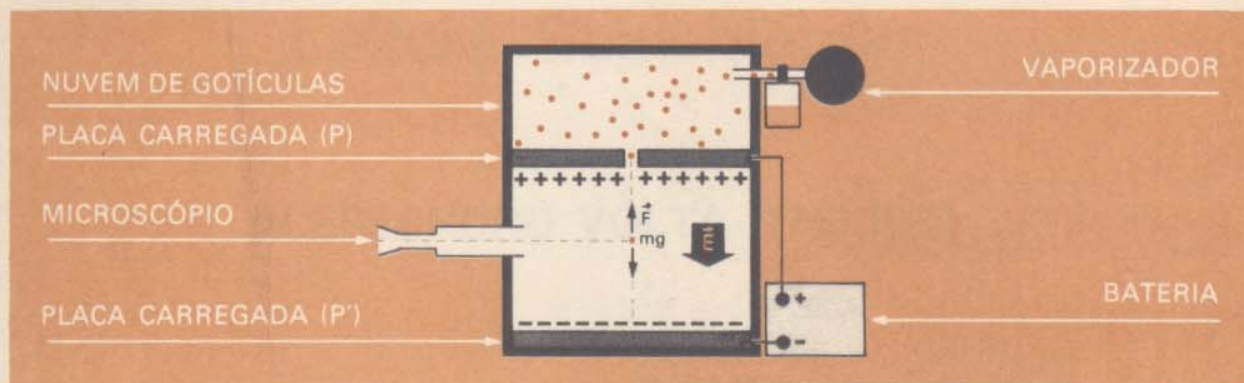


figura 27

Com o vaporizador, Millikan conseguia produzir gotículas de óleo no interior da câmara fechada C. Estas gotículas caíam e algumas delas, passando pelo orifício O, penetravam na região entre as placas paralelas carregadas (P e P'). Millikan eletrizou as gotículas, irradiando-as com feixes de raios X. Deste modo, as gotículas eletrizadas sofriam ação do campo elétrico. Ele conseguiu "equilibrar" a força-peso que faz a gotícula cair com a força elétrica produzida pelo campo — que tinha sentido vertical para cima. Conhecendo a massa da gota e o campo elétrico capaz de equilibrar a gota, Millikan foi capaz de determinar a carga de inúmeras gotículas. Analisando os valores obtidos, concluiu que todas as gotas estudadas tinham carga igual ou múltipla de $1,6 \times 10^{-19} \text{C}$. Concluiu daí que este é o valor da carga de **um elétron**. A massa (m) da gota foi calculada a partir da velocidade com que ela cai livremente no ar. O raio das gotículas era da ordem de $R = 1,6 \times 10^{-7} \text{m}$, e sua massa de $8 \times 10^{-15} \text{g}$. O campo entre as placas era de $2 \times 10^4 \text{N/C}$.

Millikan, junto com seus colaboradores, levou 10 anos para determinar a carga do elétron, através da experiência citada.

E16 — Determine a carga da gota de óleo, lembrando que a força-peso equilibra a força elétrica. Considere uma gota de massa $19,2 \times 10^{-15} \text{kg}$, um campo de $2 \times 10^5 \text{N/C}$ e aceleração da gravidade $\vec{g} = 10 \text{ m/s}^2$. A carga de quantos elétrons corresponde à carga da gota?

RESPOSTAS DE EXERCÍCIOS

R₁₁ -

R₁₂ -

R₁₃ -

R₁₄ -

R₁₅ -

R₁₆ -

R1 — A unidade com que usualmente se mede a carga elétrica é o coulomb. Um coulomb de carga é igual, em valor absoluto, à carga de $6,28 \times 10^{18}$ elétrons.

R2 — $Q = 4,4 \times 10^{-12} \text{C}$
O sinal de carga é negativo.

R3 — $Q = 4,7 \times 10^{-17} \text{C}$

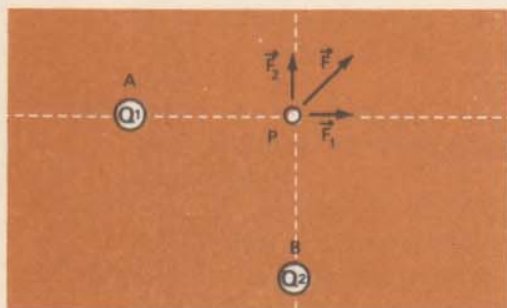
R4 — Inicialmente, a bolinha é atraída pela caneta, pois fica eletrizada por indução. Ao entrar em contato com a caneta, ela é carregada com cargas iguais à da caneta; quando isto acontece, a bolinha é repelida.

R5 — Campo elétrico.

R6 — Colocando pequenas cargas ($q_1, q_2, q_3 \dots$) naquele ponto e verificando se as forças ($F_1, F_2, F_3 \dots$) satisfazem à relação

$$\frac{q_1}{F_1} = \frac{q_2}{F_2} = \frac{q_3}{F_3} \dots \text{ Se esta relação for satisfeita, existe campo elétrico de valor constante igual à razão acima. Caso a razão } q/F \text{ não seja constante há duas possibilidades: ou não existe campo (antes da colocação das cargas } q_1, q_2, q_3 \dots) \text{ ou as cargas } q_1, q_2, q_3 \text{ são demasiadamente grandes, de modo a causar uma redistribuição das cargas que criam o campo.}$$

R7 — A intensidade do campo será maior. A força no primeiro caso é \vec{F} . No segundo caso, devido à duplicação da carga, a força será $F_2 = 2F_1$.



R8 — O campo resultante é devido à soma vetorial dos campos criados pelas duas cargas (Q_1 e Q_2). A força resultante é dada pelo produto entre o campo elétrico resultante (E_r) e a carga q_0 ; ou, de outro modo, a força resultante é a soma das forças que agem sobre a carga q_0 devidas a cada uma das cargas.

$$F_r = q_0 E_r \text{ ou } F_r = F_1 + F_2$$

R9 — $E = 1,25 \times 10^6 \text{N/C}$

R10 — $F = -7,5 \times 10^{-11} \text{N}$

R11 — $F_1 = q_1 E = (3 \times 10^{-12} \text{C}) (7,5 \times 10^5 \text{N/C})$

$$F_1 = 22,5 \times 10^{-7} \text{N}$$

$$F_2 = 8 \times 10^{-6} \text{N}$$

$$\Delta F = F_2 - F_1 = 5,75 \times 10^{-6} \text{N}$$

$$\Delta F = \Delta q E$$

$$\Delta q = \frac{\Delta F}{E} = 7 \times 10^{-12}$$

$$\Delta q = q_2 - q_1$$

$$q_2 = \Delta q + q_1 = 10 \times 10^{-12} \text{C}$$

R12 — $F = 64 \times 10^{-12} \text{N}$

$$a = \frac{F}{m} = 3,5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

R13 — a) $F = 3,2 \times 10^{-18} \text{N}$

b) $a = 3,5 \times 10^{12} \text{m/s}^2$

$$c) v = v_0 + 2ad = 10,7 \times 10^5 \text{m/s}$$

$$d) t = \frac{v - v_0}{a} = 2,2 \times 10^{-7} \text{s}$$

R14 — Quando ligamos um condutor a uma pilha, os elétrons deste condutor passam a ter um movimento preferencial em direção ao terminal positivo da pilha. Tal movimento é devido ao campo elétrico criado pela pilha. No interior da pilha ocorrem reações químicas que eletrizam seus terminais, de modo que elétrons são liberados pelo terminal negativo e reabsorvidos pelo terminal positivo, passando pelo condutor.

R15 — e) I e III.

R16 — $F_{\text{peso}} = F_{\text{elétrica}}$

$$mg = qE$$

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

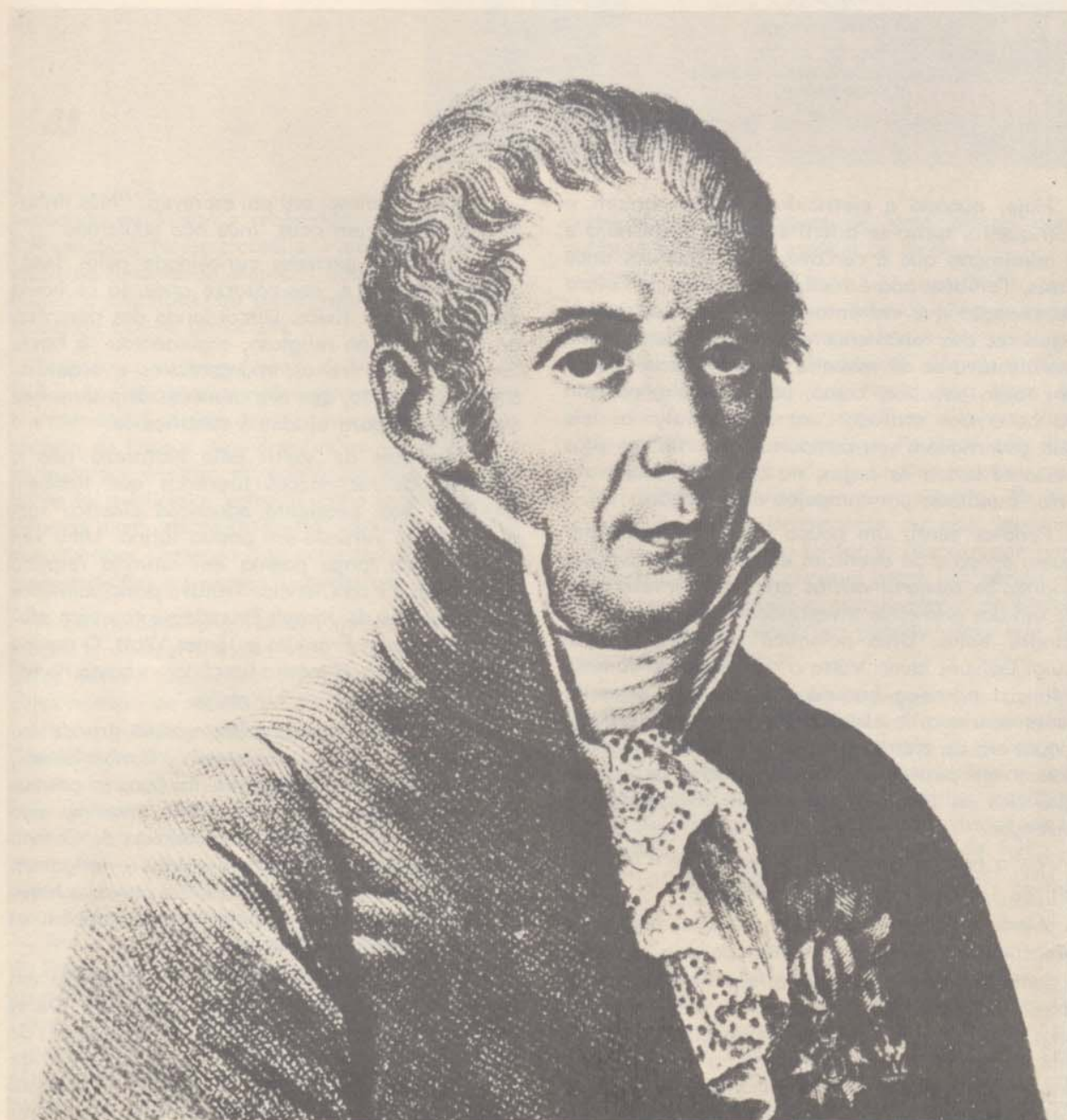
$$q = 9,6 \times 10^{-19} \text{C}$$

$$n^\circ \text{ elétrons} = \frac{9,6 \times 10^{-19}}{1,6 \times 10^{-19}} = 6 \text{ elétrons}$$

Leitura Suplementar

ALESSANDRO VOLTA (1745-1827)

(Adaptado da tradução de Ruth Silva Loewenstein para o artigo de Giorgio Santillana, publicado em janeiro de 1965 na revista *Scientific American*).



DE VI ATTRACTIVA
IGNIS ELECTRICI,
AC PHENOMENIS INDE PENDENTIBUS
ALEXANDRI VOLTAE
PATRICII NOVO-COMENSIS
AD JOANNEM BAPTISTAM
BECCARIAM
EX SCHOLIS PIIS
IN REGIA TAURINENSI UNIVERSITATE
MATHEMATICÆ PROFESSOREM
DISSERTATIO EPISTOLARIS



NOVO COMI, MDCLXIX.

Typis Odavii Staurenghi Impressoris Episcopalis,
Superiorum Facultate.

Scilicet auctori in vi. volta de portuaria p. LXV-VII
1745

"Das forças de
Atração do Fogo Elétrico",
de A. Volta, publicado
em Turim, em 1769.

Hoje, quando a eletricidade é tão comum e corriqueira, torna-se difícil entender o mistério e a admiração que a cercavam há duzentos anos atrás. Também não é fácil ter uma imagem clara da situação que enfrentavam os primeiros investigadores dos fenômenos elétricos. A eletricidade manifestava-se de maneira às vezes dramática e um tanto peculiar, como, por exemplo, no raio ou no âmbar atritado com lã. Formular as leis que governavam seu comportamento foi um processo de busca às cegas, na base de tentativa e erro, auxiliado por lampejos de intuição.

Pode-se sentir um pouco da mistificação daquela época e da aventura de qualquer inovação, quando se reexaminam as atividades intelectuais de um dos primeiros investigadores, o físico Alessandro Volta. Uma polêmica com seu patrício Luigi Galvani levou Volta a construir sua famosa pilha, a primeira bateria elétrica e a primeira fonte contínua de eletricidade. Esse aparelho iniciou a era da eletricidade, apesar de seu inventor pouco ter participado da avalanche de consequências na técnica, que vieram logo após sua invenção.

Volta nasceu em 18 de fevereiro de 1745, na antiga cidade de Como, na Lombárdia.

Ainda criança, Alessandro já era motivo de preocupação para sua família: parecia teimoso, e demorou tanto a aprender a falar (até os quatro anos não havia dito uma única palavra), que seus pais estavam convencidos de que era mudo. Aos quatro anos sua mente entrou em ignição e aos sete anos já era considerado excepcionalmente bem dotado na escola. Depois de Alessandro ter-

-se tornado famoso, seu pai escreveu: "Nós tínhamos uma jóia em casa, mas não sabíamos."

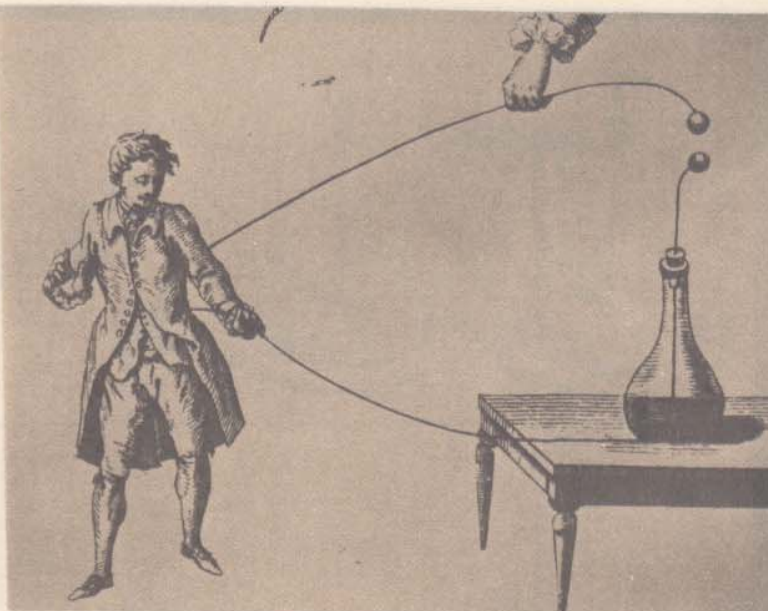
Volta tinha extrema curiosidade pelos fenômenos naturais e, aos catorze anos, já se havia decidido: ia ser físico. Discordando dos parentes, de forte vocação religiosa, argumentou já haver tantos padres, freiras, monsenhores e arqui-diáconos na família, que era desnecessário tornar-se ele mais um para ajudar a santificá-la.

O interesse de Volta pela Natureza não o afastou das inclinações literárias que também revelava. Sua excelente educação clássica tornou-o muito versado em poesia latina. Uma vez escreveu um longo poema em latim a respeito da Natureza e da Ciência. Tratava principalmente das pesquisas de Joseph Priestley e também elogiava Benjamin Franklin e James Watt. O poema tinha considerável mérito literário — havia no escrito de Volta ecos de Lucrécio.

Com dezesseis anos Volta recebia grande influência de um amigo mais velho, Canon Gatoni, que providenciava o equipamento para as primeiras experiências de Volta. Este, porém, não concordava com as posições ortodoxas de Gatoni. Chegou ao ponto de escrever para o amigo um longo diálogo, em que se propunha provar a heresia de que não só os homens, mas também os animais, possuíam alma.

A mesma atitude audaciosa transparecia em seu primeiro trabalho científico publicado: **De vi attractiva ignis eletrici** (Das forças de atração do fogo elétrico). Escrito quando Volta contava vinte e quatro anos, o trabalho dirigia-se a Giovanni Batista Beccaria, catedrático de Física na Uni-

O descobrimento de que o corpo humano podia ser eletrificado e transmitir cargas elétricas tomou conta das imaginações em todo o mundo civilizado, desde a Rússia até a América do Norte. A ilustração mostra uma das experiências de Nollet, em que os efeitos de cargas elétricas no corpo humano são testados.



versidade de Turim e renomado pesquisador da Eletrostática. Nesse trabalho, Volta defendia que todos os fenômenos elétricos poderiam ser atribuídos a um fluido ou força, semelhantes, senão idênticos, aos da gravidade.

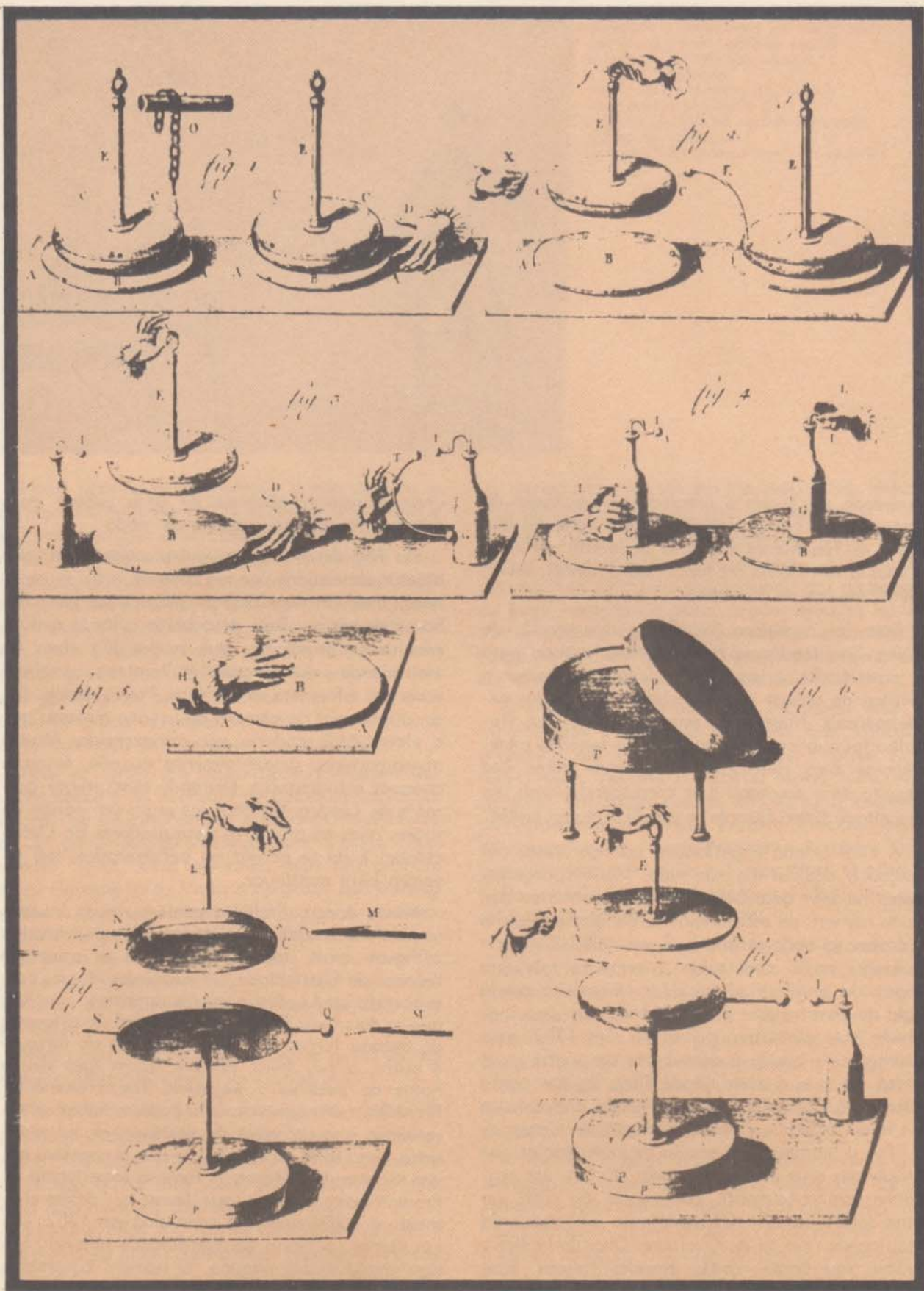
Esse foi o último "vôo" de especulação de Volta. Sua tendência maior estava voltada para a experiência, e isso logo o levou a dominar a técnica de basear suas conclusões em dados experimentais. Mesmo na época em que esse trabalho foi publicado, Volta já vinha fazendo experiências com eletricidade há vários anos. Aos dezoito anos começou a se corresponder com um respeitado físico francês: o abade Antoine Nollet.

A Eletricidade engatinhava quando Volta começou a dedicar-lhe sua vida. Vários pesquisadores haviam descoberto no século anterior que certo número de substâncias se comportava como o âmbar, quando atritadas. E, em 1660, Otto von Guericke havia construído a primeira máquina capaz de produzir eletricidade. Consistia numa bola de enxofre que girava movida por uma manivela e se eletrizava por atrito. Em 1733, essa invenção — aliada à descoberta de quatro anos antes, de que a eletricidade fluía de um ponto para outro, através de um condutor conveniente — levou Nollet e Charles François de Cisternay du Fay a realizar uma sessão de experiências que envolviam seus próprios corpos. Du Fay era suspenso horizontalmente por cordas de seda em uma sala escura e eletrizado com uma máquina elétrica do tipo da de Guericke. Quando Nollet o tocava seu corpo emitia grandes faíscas. Essa experiência chamou a atenção da corte francesa,

onde transmitir choques de uma pessoa para outra se tornou uma espécie de moda.

Du Fay descobriu, em outra experiência, que objetos eletrizados por um tubo de vidro se repeliam, mas atraíam objetos eletrizados por uma barra de resina. Essa descoberta o levou a duas conclusões principais: que havia dois tipos de eletricidade e que cargas semelhantes se repeliam e cargas diferentes se atraíam. Pouco depois disso, a invenção da garrafa de Leyden mostrou que a eletricidade poderia ser armazenada. Muitos investigadores, acidentalmente ou não, levaram choques estonteantes, tentando descarregar garrafas de Leyden. Os choques eram um perigo de rotina para os primeiros pesquisadores da Eletricidade. É de se pensar na perseverança que tiveram para continuar.

Nessa época, Franklin começou suas investigações dos fenômenos elétricos e logo se revelou a figura mais importante dentre os primeiros teóricos da Eletricidade. De suas experiências com a garrafa de Leyden e outros aparatos, concluiu que os dois tipos de eletricidade eram duas formas da mesma força: uma era o excesso de força, e a outra, a sua falta. Foi ele quem lhes deu o nome de **positiva** e **negativa**, respectivamente. Franklin, naturalmente, não poderia saber que a condição que chamava de **positiva** era, na realidade, uma falta de elétrons, e que a **negativa** era um excesso de elétrons. A famosa experiência de Franklin com a pipa, que levou ao desenvolvimento do pára-raios, foi concluída em 1752. Daí em diante, a teoria da Eletricidade adquiriu um significado quase mágico. O homem controlava o raio!



OS ELETROPHORUS DE VOLTA

Sua 1.^a importante invenção consistia de 1 prato de metal inferior e 1 superior (A e C), separados por 1 disco (B) de material não-condutor, como a resina.

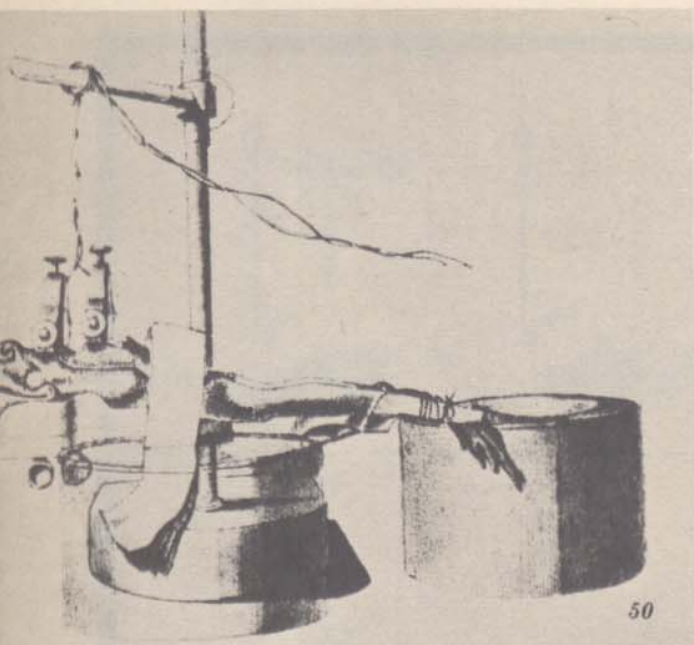
Foi nessa situação que Volta iniciou suas investigações, em 1763. Em 1774 tornou-se diretor da Escola Real de Como. Pouco depois foi chamado para a cátedra de Física da Universidade de Pávia, graças à proteção do imperador austríaco, que, na época, governava o Norte da Itália. Nessa época, Volta já possuía as características que comumente o descrevem: era um simpático senhor, magro em seu 1 metro e 80 de altura, afável e generoso, amigo dos ambientes ao ar livre, apreciador dos passatempos simples com gente simples — apesar de ser bem conhecido em sua cidade e de ter contato com os homens mais eminentes da Europa —, prudentemente conservador em seus pontos de vista e moderado em seus interesses.

Em 1774, Volta deu sua primeira contribuição importante para a Eletricidade, com a invenção do **eletrophorus**, que propiciou aos pesquisadores, pela primeira vez, uma fonte constante e recarregável de eletricidade estática. O aparelho funcionava baseado no então recém-descoberto princípio da indução eletrostática, substituindo o atrito diretamente aplicado, que se empregava para produzir eletricidade nos engenhos anteriores. Consistia num disco de resina, ou algum outro material não-condutor, com um prato de metal abaixo e outro acima; o prato de cima tinha um cabo isolado por meio do qual podia ser retirado (ver ilustração G). Removia-se o prato de cima, friccionava-se a resina, eletrizando-a e repunha-se o prato no lugar. Tocando o prato de cima, a carga negativa da resina repelia os elétrons desse prato para a terra. O prato ficava com uma carga positiva induzida. Levantando-se o prato de cima, criava-se um potencial elétrico. Tocando no prato,

obtinha-se uma faísca. Quando o prato se descarregava, podia ser carregado da mesma maneira, e assim indefinidamente. Descrevendo o eletróforo em uma carta a Priestley, em 1775, Volta escreveu: "Apresento a você um corpo que, eletrificado apenas uma vez, durante pouco tempo, e não muito intensamente, nunca mais perde sua eletricidade, e obstinadamente mantém sua força, mesmo se for tocado repetidas vezes."

O fato de sua invenção seguinte ter ocorrido por ocasião de uma pescaria no lago Maggiore ilustra a curiosidade de Volta. Enquanto observava as bolhas de um gás (agora conhecido como metano) que subia à superfície da água, nas regiões pantanosas, descobriu que era inflamável. Começou uma série de experiências com o gás, e desenvolveu seu **eudiômetro**, que era um tubo fechado de um lado. Os gases eram introduzidos no tubo sob forma de bolhas, passavam por água e eram levados a explodir por ação de uma faísca elétrica. Esse engenho tornou-se útil na determinação das proporções em que os gases se combinam. Como Volta disse depois, se ele tivesse sido capaz de coletar os gases sobre o mercúrio, teria conseguido determinar a composição da água. Não o fez apenas porque não possuía mercúrio suficiente.

Outra das invenções de Volta, anunciada em 1782, foi o eletroscópio de condensação, um indicador da presença de eletricidade muito mais sensível que os utilizados na época. Esse aparato era uma espécie de microscópio para eletricidade, e foi o que chamou a atenção de outros homens de ciência para o nome de Volta. Mais tarde, Volta usou o eletroscópio de condensação para



Por volta de 1791, as experiências de Luigi Galvani sobre patas de rãs tornaram-se famosas. Por efeito da aplicação de cargas elétricas relativamente insignificantes, ele constatou a violenta contração das patas, tirando daí a sua teoria da "eletricidade animal".

Apesar de Galvani ter se equivocado em algumas de suas explicações, verificou-se mais tarde que era correta sua "eletricidade animal" no interior dos tecidos animais.

aperfeiçoar uma forma antiga de eletrômetro, que determinava a diferença de potencial, equilibrando a força elétrica com a gravitacional.

Nessa época, Volta fazia longas e freqüentes viagens ao exterior, costume que lhe permitiu entrar em contato com muitos proeminentes pesquisadores e outras personalidades. Em uma viagem, realizada em 1771, visitou Voltaire, longe de imaginar que, depois de algum tempo, Napoleão pararia diante de uma inscrição, que dizia: "Ao grande Voltaire", e riscaria as últimas letras, para que ficasse: "Ao grande Volta". Noutra viagem, em 1789, Volta escreveu para sua casa: "Finalmente encontrei o grande Franklin." Os contatos que Volta realizou durante essas viagens, sem dúvida, o ajudaram a fortalecer seu prestígio durante a longa disputa que manteve com Galvani.

Galvani era médico e professor de anatomia na Universidade de Bolonha, e começou suas experiências com a eletricidade em 1780. Seus interesses incluíam os efeitos de descargas elétricas no sistema nervoso de um sapo. Descobriu, por puro acaso, que os membros inferiores do sapo, mesmo amputados, se movimentariam convulsivamente se fizessem parte de um circuito elétrico. (Na ocasião da descoberta, o circuito fora fechado por um dos assistentes de Galvani, que tocava o nervo do sapo com um bisturi, no momento em que uma máquina elétrica nas proximidades soltou uma faísca.)

Galvani realizou muitas experiências desse tipo, durante muitos anos, e descobriu que o fenômeno ocorria quando havia por perto uma faísca ou raio e que, mesmo com bom tempo, as pernas do

sapo se contraíam, desde que ele fosse dependurado numa grade de ferro por um gancho de ferro ou cobre. Analisando o fenômeno, Galvani reconheceu que poderia ser explicado por uma de duas hipóteses: ou a eletricidade era uma propriedade animal (as influências externas apenas causavam o seu aparecimento), ou o contato de dois metais causava a contração, caso em que as pernas funcionariam apenas como indicadoras de uma carga externa. Galvani decidiu-se pela primeira hipótese: o tecido animal continha **força vital**, que ele chamou de **eletricidade animal**.

Seus resultados, publicados em 1791, causaram sensação. Aparentemente havia descoberto uma chave para o mistério da vida. Entre os que se impressionaram com os resultados estava Volta, amigo de Galvani, a quem Galvani enviou uma das doze cópias do trabalho, que havia impresso como panfleto.

Inicialmente, Volta pensou, como Galvani, que havia alguma desproporção elétrica entre o nervo e o músculo e que, quando o metal os conectava, na perna do sapo, o equilíbrio era restaurado. Quando Volta refez a experiência desse fenômeno, começou a ter dúvidas. Observou que os músculos se contraíam mesmo que não fizessem parte de um circuito elétrico: contraíam-se quando contatos elétricos eram simplesmente aplicados ao nervo. No curso das experiências, concluiu que mais atenção deveria ser dada aos metais.

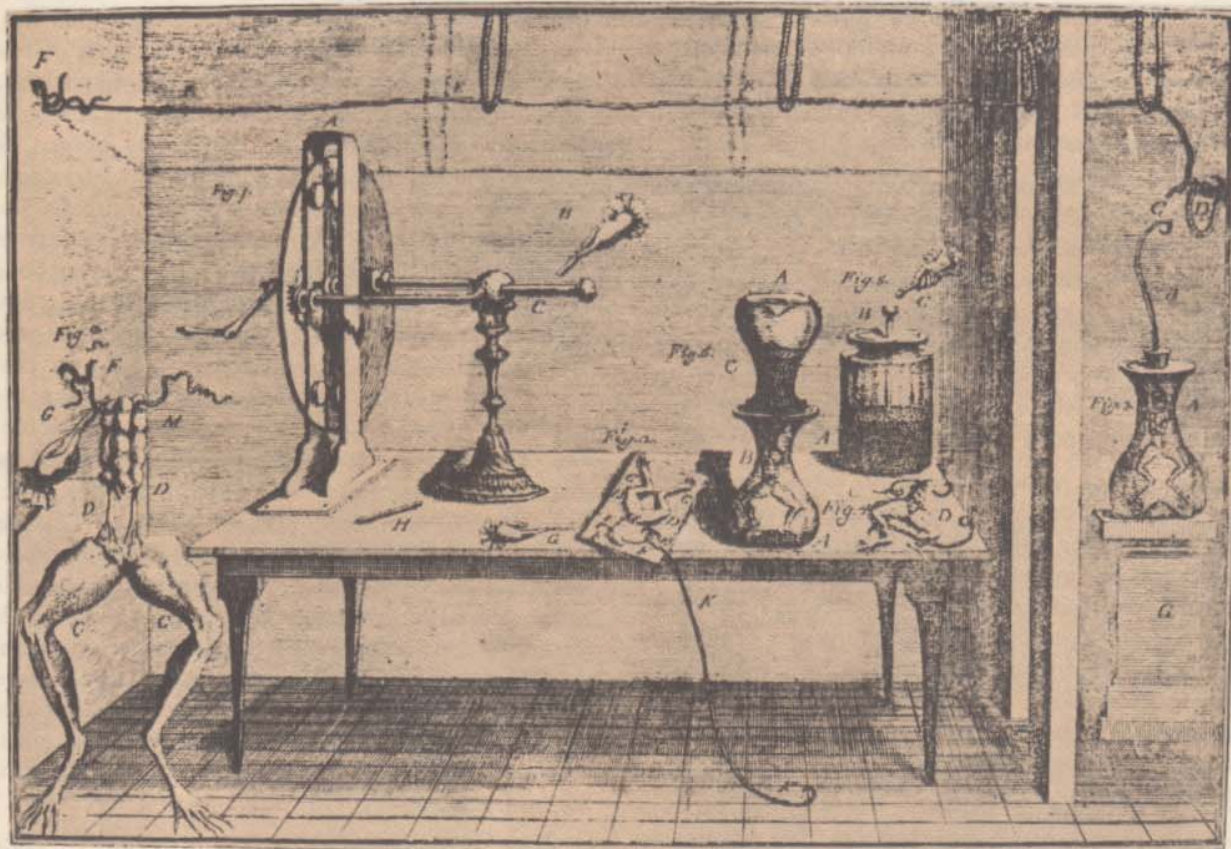
Essa história tem sido contada como exemplo típico da Natureza guiando o bom senso e levando-o à descoberta. Esse conceito, todavia, não faz justiça à situação intrincada e amedrontadora

Luigi Galvani
 Ele e A. Volta tiveram uma
 longa disputa sobre o que Galvani
 chamou de "eletricidade
 animal" e A. Volta,
 de "eletricidade metálica".



EXPERIÊNCIA DE GALVANI (abaixo)

Galvani descobriu que as pernas de
 rãs dissecadas se
 contorciam quando tocadas
 por metal em presença de eletricidade.
 Entre suas fontes de
 eletricidade estavam uma máquina
 eletrostática (à esquerda da mesa)
 e uma garrafa de Leyden (à direita).



**A. Volta explicando
a Napoleão o funcionamento
de sua pilha
elétrica.**

que os pesquisadores precisavam enfrentar. Realmente havia intervalos de boa sorte, como a descoberta de que o contato de ganchos de cobre e grades de ferro produzia melhor contração das pernas do sapo. Agora isso parece decisivo, mas na época não. A situação continuava um emaranhado de possibilidades.

Tal era o cenário para uma das grandes decisões da História, uma decisão que envolvia nada menos que o ponto inicial da revolução científica. A nova força de eletricidade era um aspecto especial da vida, ou havia chegado para fundar a era tecnológica? A quem seria dada a única forma de imortalidade permitida pelo rápido esquecimento, isto é, a escolha para a posteridade de seu nome para designar a unidade elétrica?

Foi apenas justiça histórica o fato de a escolha ter recaído sobre Volta. Enquanto Galvani defendia as antigas ciências biológicas, Volta era o novo tipo de cientista: possuía mente quantitativa, mesmo sem matemática, e era mestre na recente abordagem experimental. Era também dotado de boa dose de frieza, enquanto o sensível e atormentado Galvani era vítima nata das circunstâncias.

Entretanto, durante os anos em que manteve o longo debate com Galvani, Volta esteve sozinho e havia poucos que o entendessem. Seu adversário preparara seu caso durante dez anos, e os argumentos eram fortes. A Natureza tinha "camuflado" os fatos em favor de Galvani, tanto que existia mais de uma eletricidade envolvida. Havia uma eletricidade artificial, que produzia descargas espetaculares, comparáveis às do peixe elé-

trico, ao passo que ainda era difícil obter choques e faíscas da eletricidade metálica, por pequenas que fossem. Havia ainda a eletricidade dos tecidos, que, atualmente, é registrada pelos eletrocardiogramas. Era, sem dúvida, uma eletricidade muito fraca, mas a Natureza possuía os mais sensíveis eletroscópios, em forma de pernas de sapos. Não se conseguia detectar a eletricidade natural ou metálica com os instrumentos de medida eletrostáticos, como se esperava. Finalmente, o quadro era ainda mais turvado pela ação a distância e pela indução, que não estavam completamente entendidas. Assim que Volta pensou ter achado um ponto de partida seguro na presença de um arco bimetálico, Galvani conseguiu confundir-lo, mostrando que contrações musculares podiam ser obtidas sem qualquer metal no circuito. Volta precisou de muita firmeza e raciocínio claro para se manter na disputa. "Eu sei que aqueles senhores me querem morto", Volta escreveu a um amigo, "mas prefiro ir para o inferno a deixá-los fazer isso comigo." Tinha de descobrir seus próprios eletroscópios para detectar a eletricidade metálica: usou para isso os sensíveis tecidos de sua língua e olhos. Devia provar que os nervos é que eram estimulados, e não os músculos. Concluiu uma comunicação com firmeza: "É a diferença de metais que causa o fenômeno."

Para poder prosseguir nesta abordagem, Volta teve de reformular os conceitos de eletricidade. Foi nesse ponto, especialmente, que precisou definir tensão e diferenciá-la de quantidade. "A quantidade de eletricidade", escreveu, "que é posta em movimento pelo contato de metais não é pequena, é de fato considerável, mas a corrente



tem tão pouca tensão, que não é detectada no eletrômetro e pode ser facilmente isolada por maus condutores. É uma vazão grande, mas muito suave." Essa descrição era perfeita.

Ao argumento principal de Galvani — remoção dos metais —, Volta respondeu estendendo o conceito de condutor e de contato motor aos corpos de segunda classe, os líquidos. Esse conceito levou ao problema da adição de forças eletromotrizes em condutores ligados em série. Passando da eletrodinâmica à eletrostática, lidando engenhosamente com instrumentos inadequados e suas minúsculas cargas, conseguiu finalmente sobrepor suas forças exclusivamente de contato até obter uma tensão detetável no eletrômetro. Novamente foi um processo quantitativo que o levou a esse feito. Depois de procurar, durante dois anos, um meio de multiplicar a tensão de contato dos metais, reunindo muitas junções, deparou com a idéia da pilha, que comunicou a Sir Joseph Banks, presidente da Royal Society, numa carta datada de 20 de março de 1800. A **pilha** era originalmente uma pilha de discos: pares de cobre-zinco, cada um separado dos outros por discos de papelão umedecidos com água acidulada. A batalha de dez anos fora vencida: a força elétrica dava entrada no mundo.

Tanto Volta quanto Galvani possuíam suas limitações. Galvani descobriu a eletricidade galvânica, e acreditava que sua origem era animal — um conceito errôneo que levou seus seguidores à crença vitalista e quase condenou seu descobridor. Volta salvou essa descoberta e, na realidade, fundou a Eletroquímica sem o saber, mas

parou à vista da terra prometida. Deixou que Anthony Carlisle e William Nicholson, da Inglaterra, conseguissem depois de poucos dias a eletrólise da água. O que tiveram de fazer foi apenas ler a carta para Banks e construir a pilha. Volta nunca desejou se aventurar no imenso campo novo. É estranho lembrar que ainda estava com cinquenta anos, bem disposto, quando a avalanche de descobertas da eletroquímica invadiu o mundo depois de Humphry Davy ter eletrolisado os álcalis e ter obtido o arco voltaico.

É interessante que, numa famosa apresentação, em Paris, no ano de 1801, em presença de Napoleão, Volta deu absurda ênfase à semelhança de sua pilha com um peixe elétrico, chegando a vesti-la com uma pele. Não era por simples brincadeira. Era um ponto final à longa disputa com Galvani a respeito da eletricidade animal. O sobrinho de Galvani, Giovanni Aldini, ainda estava defendendo a causa de Galvani, mesmo depois de sua morte; por isso, Volta tinha razões para tomar essa atitude. Ele havia vencido a idéia de Galvani, mas ainda tinha de fazê-la desaparecer.

Seria simples concluir que esse último ato do episódio é exemplo de uma mente em estado de cristalização, depois de seu momento de criatividade. Mas nada na História é tão simples assim: Volta havia conseguido uma fortaleza — tratou de mantê-la durante os atormentados tempos que se seguiram. Por essa razão é que suas idéias continuaram a ter poderosa influência na geração seguinte. Volta defendia o método em lugar da aventura.

Fig. 1.

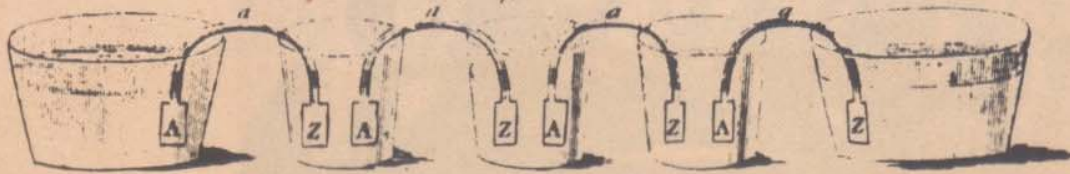


Fig. 2.

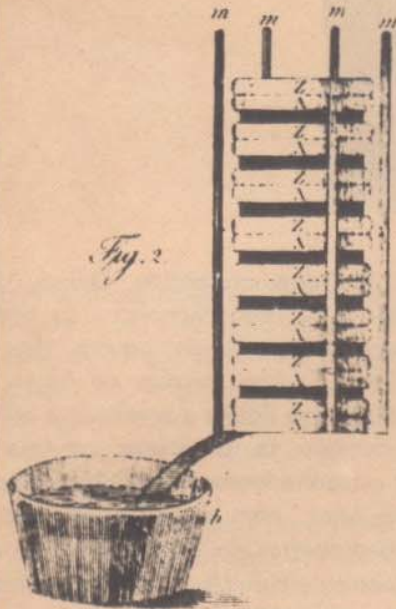


Fig. 3.

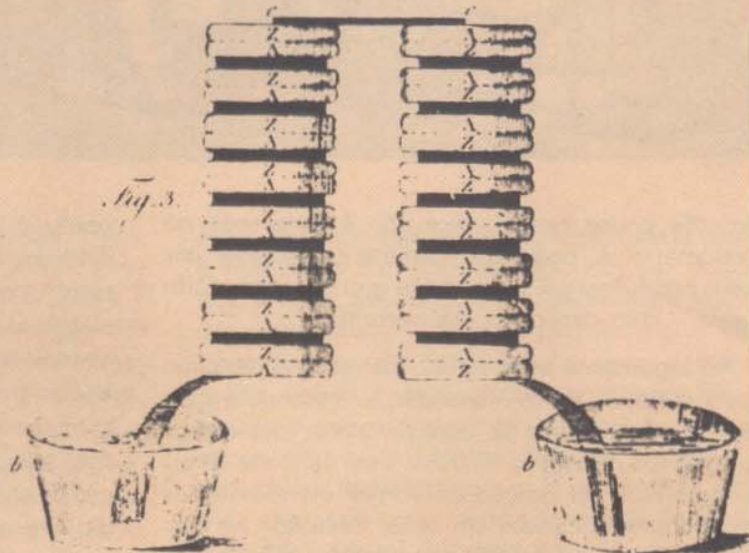
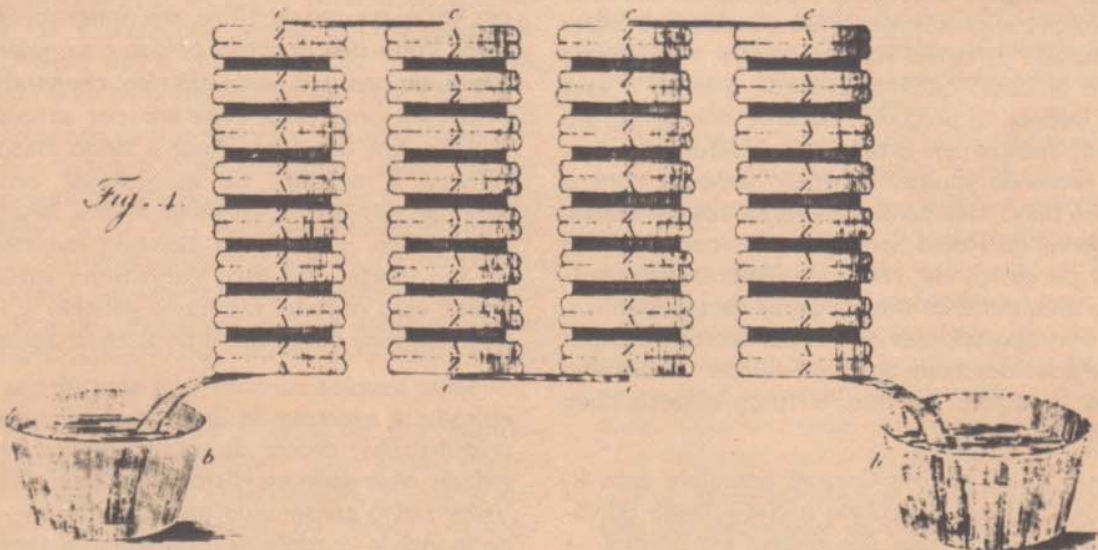


Fig. 4.



Último retrato de A. Volta

Mostra-o em sua velhice ao lado de duas de suas invenções: a pilha e o **eletrophorus**. A data em que foi feito o retrato e o seu autor são desconhecidos. Volta morreu em 1827, aos 82 anos de idade.



1.ª **bateria elétrica**, à qual Volta deu o nome de **pilha**. Na primeira figura (à esquerda), a bateria aparece na forma em que ele chamou de **cadeia de copos**; o aparato consiste de metais diferentes, como prata e zinco, imersos em água salgada — “eles são feitos para se comunicarem, formando uma espécie de cadeia, por meio de vários arcos metálicos”. As outras figuras mostram aspectos da forma “em coluna” da bateria, cujos pares com prata e zinco eram separados por discos de cartão umedecido.

Davy, em novembro de 1800, concluiu que o poder de ação da pilha era essencialmente proporcional à oxidação do zinco pelo líquido entre o par de discos. Volta, entretanto, já havia tomado como certo que o simples contato entre dois metais era suficiente. De fato, Volta forneceu o que parecia ser uma prova convincente. Tomando um disco de cobre e um de zinco, ele os segurou por meio de cabos isolados e os uniu por alguns instantes. Depois de os discos terem sido separados, o eletroscópio mostrou que estavam eletrizados com cargas opostas. Volta compreendeu todo o fenômeno e explicou a impossibilidade de se fazer uma pilha sem a utilização de separadores umedecidos. Demonstrou, em 1801, que, numa pilha de discos de diferentes metais em contato direto, os discos superior e inferior estariam sempre com as mesmas características que os discos em contato direto. Em sua opinião, as camadas úmidas teriam unicamente o papel de condutores.

Como, então, Volta concebeu o funcionamento da pilha? Considere-se inicialmente um disco de zinco colocado sobre um de cobre, estando o conjunto sobre um suporte isolado. Pode-se supor, a partir da teoria do fluido elétrico, que Volta havia aprendido com Franklin que a eletricidade se deslocaria do cobre para o zinco. Pode-se representar a tensão do cobre como $-1/2$, a do zinco $1/2$, a diferença tomada arbitrariamente igual a 1 e a soma, por causa do isolamento, zero. Nessa linha de raciocínio, Volta usava **tensão** como um amálgama de duas idéias que hoje são distintas: carga e potencial.

Se, todavia, for posto outro par de discos de cobre e zinco, separados do primeiro par por pa-

pelão úmido, haverá contato somente através do condutor úmido e o cobre receberá a carga do zinco. Dessa maneira a tensão aumenta quando a pilha é construída.

É evidente que por trás dessa teoria estava a garrafa de Leyden, uma forma primitiva de condensador. O experimentador recebe o choque de uma descarga elétrica quando toca os discos superior e inferior da pilha. A grande dificuldade que restava (e Volta sabia disso) era que a pilha não se descarregava, o que ocorria facilmente com a garrafa de Leyden e o condensador. A pilha mantinha seu estado. “Essa intermitente circulação ou esse movimento perpétuo do fluido elétrico”, escreveu Volta, “pode parecer paradoxal e pode ser inexplicável, mas realmente ocorre.” Sua mente exata não penetrava na obscuridade da ação química. Isso ocorreu também quando tentou mais uma vez explicar a falha das experiências iniciais: a polarização das pilhas. Apesar das dificuldades, continuou sempre evitando a idéia de relacionar reações químicas com força elétrica.

O rigor de Volta pode parecer teimoso e improdutivo para a mente moderna dotada de visão. Sem dúvida, essa atitude isolou-o do mundo das novas descobertas que surgiram em sua época. Deve-se considerar, no entanto, quão confusa era a teoria da Eletricidade naquele tempo, e quantas especulações infrutíferas podia favorecer, em lugar de teorias sólidas. Volta defendia a clareza e a prudência. E as mesmas virtudes que o levaram através da confusão do galvanismo agora lhe freavam o espírito.

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