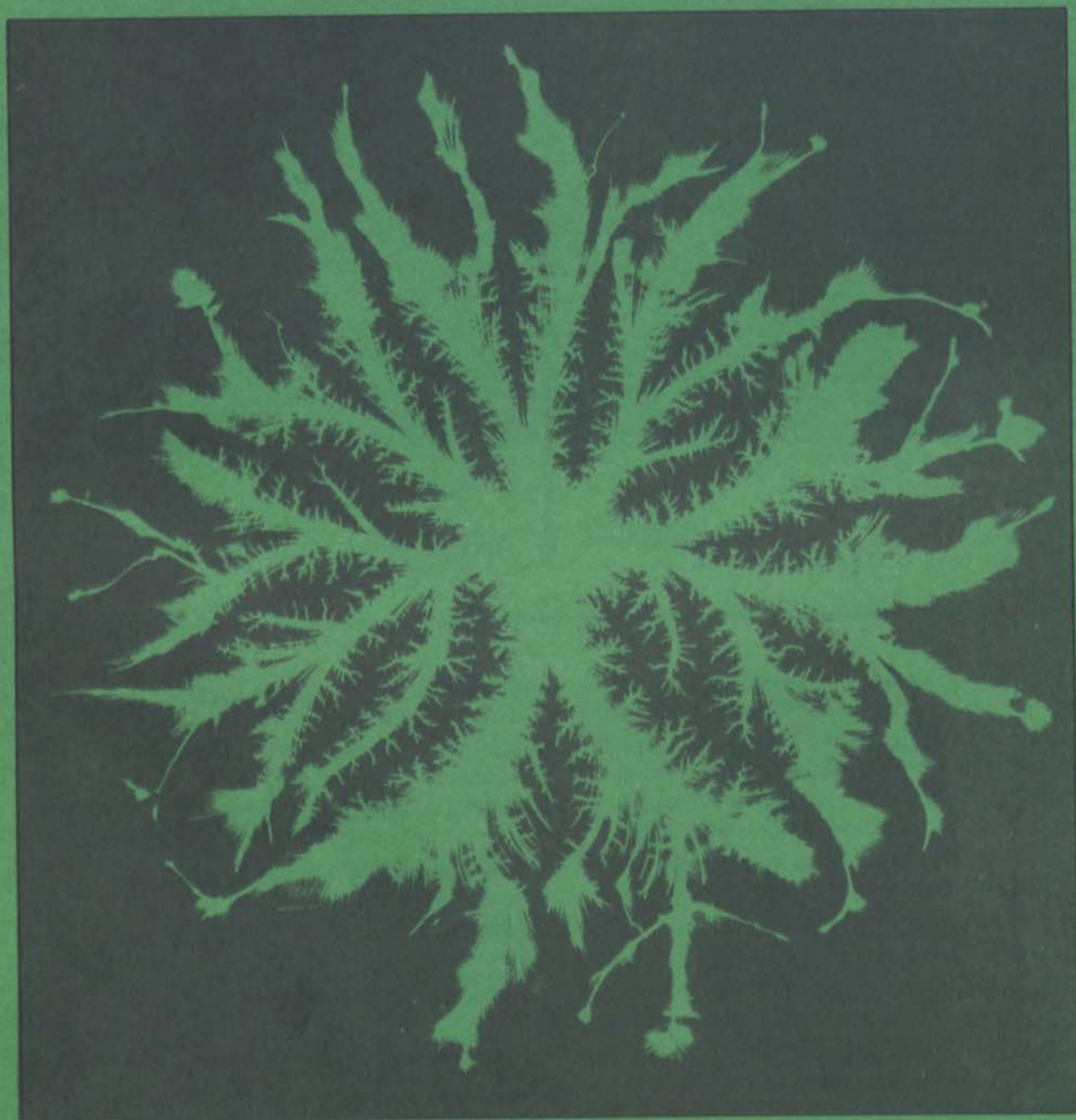


PROJETO
DE ENSINO
DE FÍSICA
IFUSP — Instituto de Física da Universidade de São Paulo
MEC/FENAME/PREMEN

eletricidade **3**

Potencial elétrico



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 Mascati

Mecânica

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

Eletricidade

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

Eletromagnetismo

Jesuina Lopes de Almeida Pacca
João Evangelista Steiner

Leitura Suplementar

Oscar Sala

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

Instantâneo fotográfico de uma faísca elétrica de alta velocidade, produzida diretamente sobre o filme. Fotografia de Manfred Kage (1960).

SUMÁRIO

CAPÍTULO 3 — Potencial elétrico

| | |
|--|------|
| 1. Energia potencial mecânica | 3—2 |
| 2. Energia potencial elétrica | 3—4 |
| 3. Elétrons em um campo elétrico | 3—4 |
| 4. Diferença de potencial entre dois pontos | 3—8 |
| 5. Diferença de potencial entre dois pontos quaisquer .. | 3—10 |
| 6. Relação entre V e E | 3—10 |
| 7. A unidade de diferença de potencial | 3—12 |
| 8. Como medir a diferença de potencial | 3—12 |
| 9. Exercícios de aplicação | 3—14 |
| Leitura Suplementar | |
| Aceleradores eletrostáticos | 3—19 |
| Algumas aplicações da eletrostática | 3—28 |

A invenção do pára-raios por Franklin levou, como acontece freqüentemente com novas invenções, a toda espécie de extravagantes aplicações. Jacques Barbeu Dubourg é o responsável pelo pára-raios portátil ao lado.



Potencial elétrico

As manifestações da Eletricidade sempre foram fenômenos estranhos para o homem. Havia o pavor pelas trovoadas e tempestades, as superstições e lendas de descargas em hastes metálicas, a diversão pela atração da magnetita.

Embora haja alguns trabalhos anteriores, a Eletricidade começou a se desenvolver como ciência somente após o século XVII. Alguns homens se destacaram, mas muitos outros também contribuíram e são desconhecidos.

Estudos muito importantes foram realizados por B. Franklin (1706-1790). Ele verificou que faíscas produzidas em laboratório eram de mesma natureza que o

relâmpago. Desenvolveu o conceito de eletricidade positiva e eletricidade negativa. Foi o inventor do pára-raios, que se tornou a primeira aplicação prática, de importância, da Eletricidade, sendo um grande estímulo a novas invenções e descobertas. Conta-se que o rei da Inglaterra ficou furioso com o fato de um cidadão dos Estados Unidos, que na época era colônia inglesa, ter feito tão importante invenção; procurando menosprezar Franklin, mandou construir em seu palácio um pára-raios arredondado, em vez de pontiagudo.

O assunto deste capítulo é um dos importantes conceitos utilizados no estudo da Eletricidade — o Potencial Elétrico.

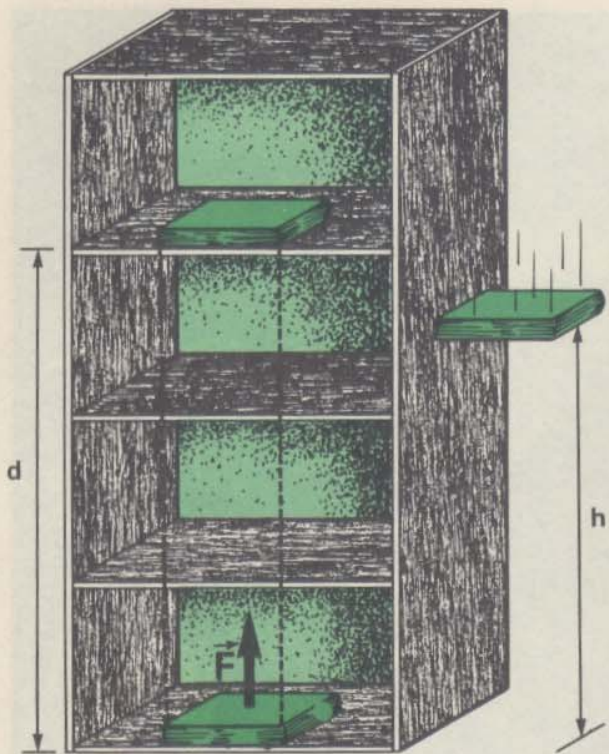


figura 1

1. Energia potencial mecânica

Quando você eleva um livro do chão até uma prateleira situada a uma altura d (figura 1), seus músculos realizam um trabalho τ (letra grega; lê-se "tau"), dependendo assim uma certa quantidade de energia total ε_T .

Num determinado instante, durante o processo, o livro terá energia cinética e energia potencial, sendo a soma dessas duas energias igual à energia total fornecida até aquele instante.

Se, após alcançar a altura d , o livro permanecer nessa posição, ele não mais possuirá energia cinética e toda sua energia estará na forma de energia potencial ε_p .

$$\varepsilon_T = \varepsilon_p = \tau$$

Se agora deixamos o livro cair livremente, sob a ação da força de atração gravitacional, sua energia potencial irá se transformando em energia cinética: durante essa transformação, quando o livro se encontra a uma altura h do chão, a soma de sua energia cinética $\varepsilon_c(h)$ com

3-2

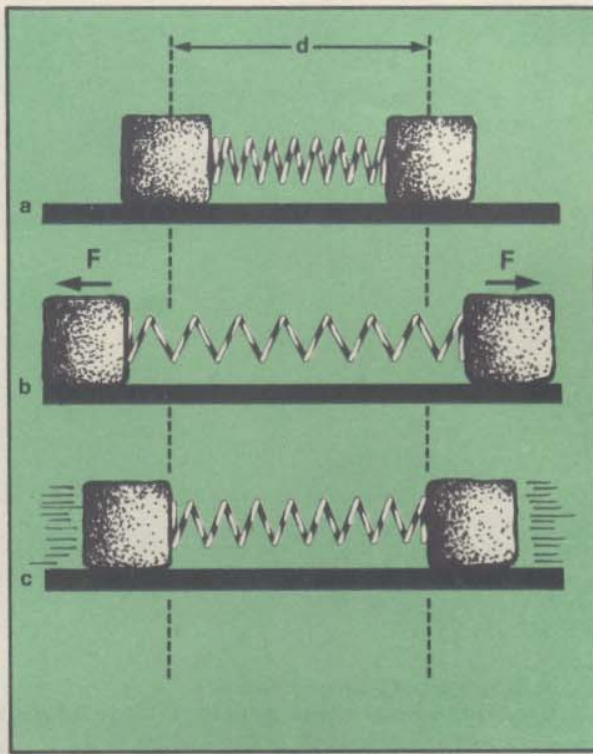


figura 2

sua energia potencial $\varepsilon_p(h)$ é igual à energia total:

$$\varepsilon_c(h) + \varepsilon_p(h) = \varepsilon_T$$

A expressão acima resulta de uma aplicação de um dos princípios fundamentais da Física — **o princípio da conservação da energia**.

Q1 — Que relação existe entre a energia potencial armazenada e a altura da prateleira em que o livro se encontra?

Na situação que acabamos de descrever, falamos sempre em energia cinética e potencial do livro; no entanto, não podemos nos esquecer de que o problema envolve a presença da Terra. De fato, assim como a Terra atrai o livro, este atrai o planeta com uma força de mesma intensidade.

Podemos utilizar o conceito de campo gravitacional para nos referirmos mais corretamente a esse tipo de situação. Dizemos então que, quando realizamos um certo trabalho fazendo com que o livro se afaste da Terra, esse trabalho é armazenado sob a forma de energia potencial no sistema livro-Terra, ou no campo gravitacional.

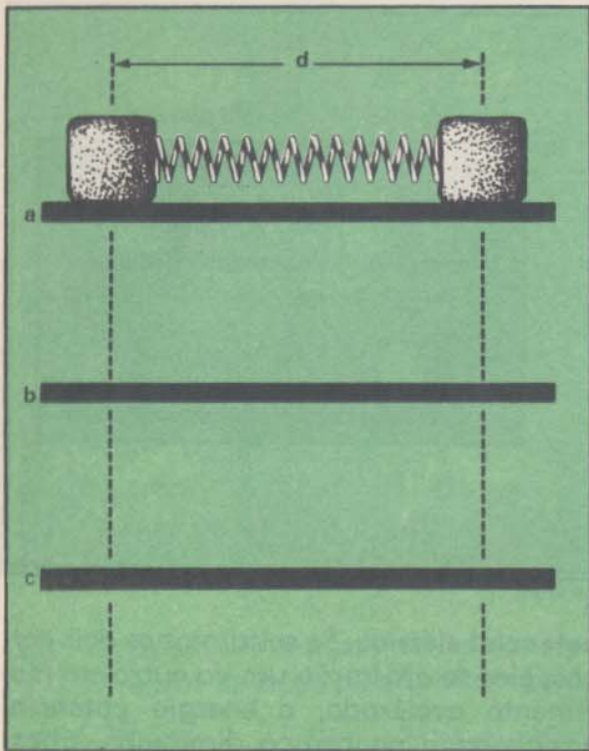


figura 3

Vamos agora discutir outro exemplo de armazenamento de energia potencial. O sistema que estudaremos se compõe de dois blocos de massas iguais, presos às extremidades de uma mola, e situados sobre uma mesa horizontal (figura 2). Consideraremos que o atrito entre esses blocos e a mesa é muito pequeno, podendo ser desprezado.

Na situação **a** da figura 2, a mola está com seu comprimento natural, isto é, não está distendida nem comprimida. Se deslocamos os dois blocos, afastando-os um do outro, a mola se distende (figura 2b). Se depois de afastados forem soltos, eles se aproximam um do outro, sob a ação da mola (figura 2c).

Analisemos agora o que ocorreu com o sistema, do ponto de vista da energia. Quando afastamos os blocos, aplicamos sobre eles forças, realizando assim trabalho. Esse trabalho é armazenado no sistema (mais precisamente, na mola) sob a forma de energia potencial.

Quando abandonamos os blocos, as forças com que a mola age sobre eles realizam trabalho, transformando a energia potencial armazenada na mola em ener-

gia cinética dos blocos. Há também, no caso, conservação da energia mecânica.

Considere, agora, uma situação semelhante à anterior (figura 3a).

Q2 — Se, ao invés de afastarmos os blocos, nós os aproximarmos, haverá armazenamento de energia potencial na mola?

Q3 — O que acontecerá se soltarmos os blocos depois de os aproximarmos?

Q4 — Com base em suas respostas, complete a figura 3 indicando a sequência dos movimentos executados pelos dois blocos.

A mola armazena energia potencial tanto quando está distendida como quando está comprimida; e, em ambos os casos, essa energia potencial pode ser transferida aos blocos que adquirem energia cinética.

Q5 — Duas molas iguais são distendidas, uma até alcançar o dobro de seu comprimento normal e a outra até o triplo. Em que caso a energia potencial armazenada é maior?

RESPOSTAS

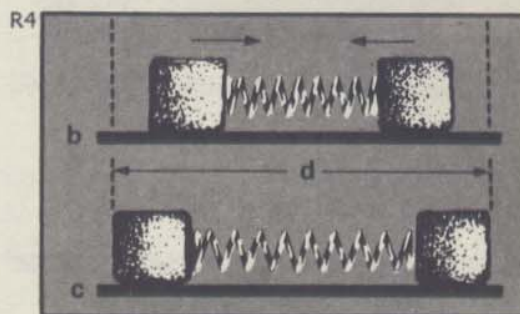
R₁ -

R₂ -

R₃ -

R₅ -

- R1 — Quanto mais alta a prateleira, maior será a energia potencial armazenada, pois maior é o trabalho realizado para levar o livro até lá.
- R2 — Sim.
- R3 — Os blocos se afastarão um do outro sob a ação da força elástica da mola. A energia potencial armazenada na mola se transformará em energia cinética dos blocos.
- R5 — A energia armazenada na mola será maior quando ela é distendida até o triplo de seu comprimento, pois é maior o trabalho realizado.



Vimos em dois exemplos como se pode transferir energia através da realização de trabalho, e como essa energia pode ser armazenada sob a forma de energia potencial. No primeiro caso, a energia potencial era armazenada no campo gravitacional, enquanto que no segundo caso essa energia era armazenada na mola.

Vejam os que acontece quando forças elétricas realizam trabalho. Haverá nesse caso a possibilidade de armazenar energia sob a forma de energia potencial elétrica?

2. Energia potencial elétrica

As forças elétricas também podem realizar trabalho; dessa maneira, podemos armazenar energia potencial em um campo elétrico, de modo análogo ao que ocorre com o campo gravitacional e com a mola.

Imagine dois corpos carregados positivamente sendo aproximados um do outro (figura 4a). É necessário exercer uma força sobre cada corpo para vencer a repulsão elétrica entre eles (figura 4b). O trabalho assim realizado fica armazenado no campo elétrico criado por esses corpos, na forma de energia chamada **energia**

3-4

potencial elétrica. Se soltarmos os dois corpos, eles se afastarão um do outro em movimento acelerado; a energia potencial armazenada no campo diminuirá, transformando-se em energia cinética dos corpos (figura 4c).

Novamente aqui se verifica a conservação da energia.

Q6 — Se na situação que acabamos de descrever os dois corpos estivessem carregados com cargas de sinais opostos, como poderíamos aumentar a energia potencial no campo elétrico?

Q7 — Descreva as semelhanças que existem, do ponto de vista da energia potencial armazenada, entre os dois sistemas seguintes: dois blocos unidos por uma mola e dois corpos eletrizados situados próximos um ao outro.

3. Elétrons em um campo elétrico

Suponhamos que duas placas metálicas planas carregadas com cargas de sinais opostos são dispostas paralelamente numa região onde exista vácuo (figura 5).

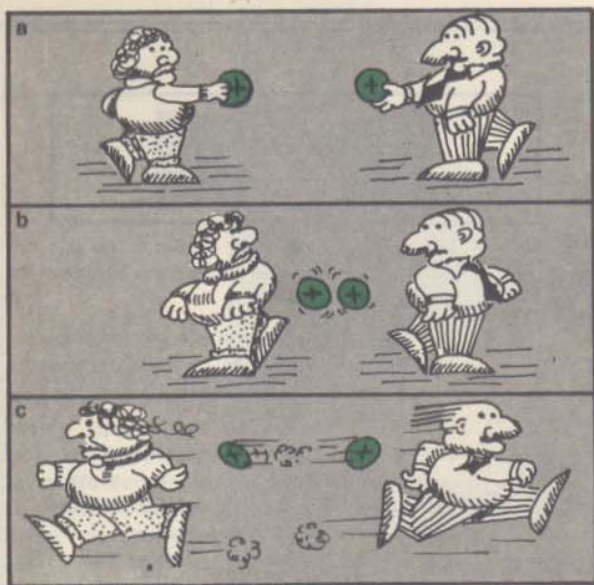


figura 4

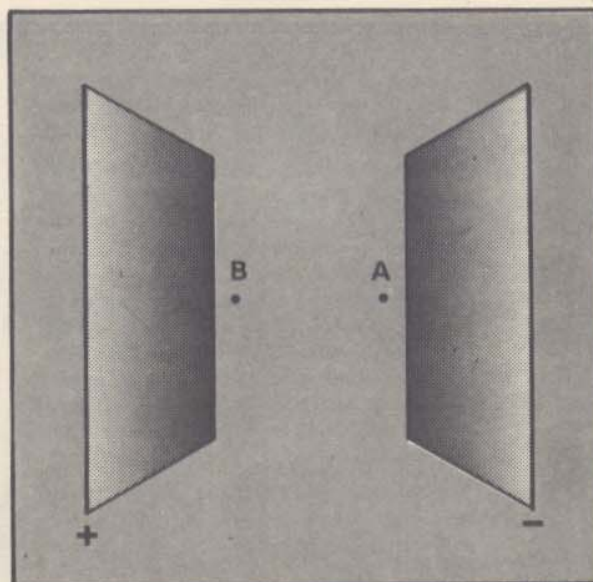


figura 5

Q8 — Existe um campo elétrico na região entre as duas placas? Por quê?

Q9 — Indique, na figura 5, o sentido do campo elétrico entre as placas.

Q10 — Se um elétron for abandonado entre as placas na posição **A** da figura 5, qual será o sentido de seu movimento?

Q11 — O movimento do elétron tem a mesma direção e o mesmo sentido do campo elétrico?

Q12 — O elétron terá velocidade constante, ou seu movimento será acelerado?

Quando o elétron está parado na posição **A** da figura 5, o sistema (placas carregadas-elétron) tem uma certa energia potencial, que está armazenada no campo elétrico. Depois que o elétron é abandonado, ele se desloca em direção à placa positiva sob a ação da força elétrica, adquirindo velocidade e, portanto, energia cinética.

Q13 — A força que age sobre o elétron, devida ao campo elétrico, realiza trabalho enquanto o elétron está parado em **A**? E enquanto o elétron se desloca de **A** para **B**?

RESPOSTAS

R₆ -

R₇ -

R₈ -

R₁₀ -

R₁₁ -

R₁₂ -

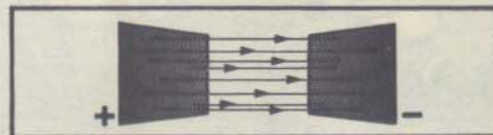
R₁₃ -

R6 — Dever-se-ia exercer em cada corpo uma força que vencesse a atração elétrica entre eles; ou seja, afastando os corpos entre si.

R7 — Aproximar os blocos comprimindo a mola, equivale a aproximar entre si dois corpos com cargas de mesmo sinal; afastar os blocos, distendendo a mola, equivale a afastar dois corpos com cargas de sinais opostos. Por outro lado, há diferenças fundamentais: entre dois blocos presos a uma mola a força pode ser atrativa, repulsiva ou nula, dependendo da distância que os separa; entre dois corpos carregados a força será só atrativa ou só repulsiva dependendo dos sinais relativos das cargas.

R8 — Sim, porque uma pequena carga (carga de prova) colocada na região entre as placas carregadas estará sob a ação de uma força.

R9



R10 — Seu movimento será de A para B; ou seja, ele se moverá no sentido da placa negativa para a positiva.

R11 — A direção será a mesma e o sentido oposto, pois, sendo a carga do elétron negativa, a força que age sobre ele tem sentido oposto ao do campo.

R12 — Seu movimento será acelerado, pois o campo elétrico que existe entre as placas carregadas dá origem a uma força exercida continuamente sobre ele.

R13 — Não. Sim.

Quando o elétron estava na posição **A**, o sistema tinha uma certa energia potencial; enquanto o elétron se desloca de **A** até **B**, o sistema perde energia potencial e realiza trabalho.

Q14 — O que acontece com essa energia potencial perdida pelo sistema?

Se o elétron for freado, por exemplo, penetrando num objeto sólido em **B**, sua energia cinética será transformada em calor. A energia térmica adquirida pelo objeto será igual à diminuição de energia potencial do sistema.

Como poderíamos agir para fazer com que o sistema voltasse à sua situação original, readquirindo sua energia potencial perdida?

Isto seria possível trazendo o elétron de volta à posição **A**, aplicando-lhe, por exemplo, uma força externa de sentido contrário ao da força que o campo elétrico exerce nele. O trabalho realizado sobre o elétron causa novamente o armazenamento de energia potencial no sistema.

Esta é uma maneira de restituir ao campo elétrico a energia potencial perdida quando um elétron se desloca das proximidades da placa negativa para as proximidades da placa positiva (de **A** para **B**).

Se, em vez de um só elétron, houvesse **n** elétrons próximos à placa negativa, eles

tenderiam a se deslocar em direção à placa positiva e neste deslocamento o sistema (placas e elétrons) perderia energia potencial. Vamos supor novamente que os elétrons são freados por um objeto sólido em **B**.

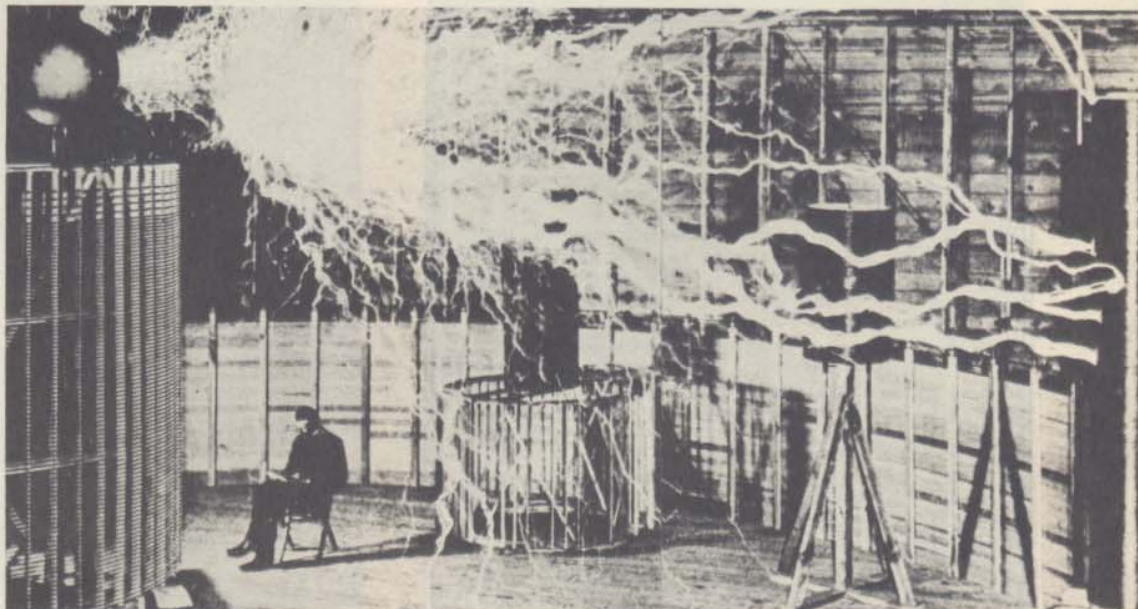
Q15 — Como poderíamos restituir ao sistema a energia potencial perdida?

Se uma força externa oposta à força elétrica é aplicada aos **n** elétrons, eles são levados de volta à posição inicial. O trabalho exercido nessa operação é armazenado, no campo elétrico, sob a forma de energia potencial. Dessa forma, a energia potencial é restituída ao sistema.

Consideramos, até aqui, que as duas placas estão isoladas no vácuo. Supusemos ainda que foram carregadas inicialmente, ligando-as momentaneamente aos terminais de uma pilha de lanterna. Depois, elas não perderam e nem receberam cargas de fora.

Suponhamos, agora, que os pontos **A** e **B** estão nas **placas**, de modo que os elétrons se deslocam **da placa negativa para a positiva**. Haveria, neste caso, uma maneira simples de restituir esta energia ao campo, sem levar **os mesmos n** elétrons à posição inicial?

A fotografia ao lado é de Nicolau Tesla, que, em 1901, produziu descargas com alta tensão (diferença de potencial) alternada de frequência elevada.



Se a mesma pilha utilizada inicialmente para carregar as placas for novamente ligada a elas, e assim mantida, as cargas nas placas permanecerão constantes, apesar do deslocamento de elétrons de uma placa a outra. A pilha manterá as cargas iniciais, cedendo elétrons à placa negativa e retirando elétrons da placa positiva.

Q16 — Se as placas **não estão** ligadas à pilha, o que ocorre com o campo elétrico quando elétrons são deslocados da placa negativa para a positiva?

Q17 — Se as placas **estão** ligadas à pilha, o que ocorre com o campo elétrico quando elétrons são deslocados da placa negativa para a positiva?

A pilha é capaz de manter a energia potencial do sistema, restituindo-lhe a energia que perde, quando os elétrons passam de uma placa a outra: para cada elétron que vai da placa negativa para a positiva, a pilha retira um elétron da placa positiva e fornece um elétron à placa negativa. As placas permanecem sempre com as mesmas quantidades de carga, e o campo se mantém constante. Além disso, a energia que a pilha fornece ao sistema mantém constante a energia armazenada no campo entre as placas.

RESPOSTAS

R₁₄ -

R₁₅ -

R₁₆ -

R₁₇ -

R14 — Se transforma em energia cinética do elétron.

R15 — Fazendo os n elétrons retornarem às proximidades da placa negativa, por meio da aplicação de uma força externa dirigida no sentido oposto à força devida ao campo elétrico.

R16 — O valor do campo elétrico diminui, pois há transferência de elétrons de uma placa a outra, que resulta numa diminuição da carga negativa na placa negativa e numa diminuição da carga positiva na placa positiva.

R17 — O valor do campo elétrico permanecerá constante, pois a pilha manterá constante a carga de cada placa.

Q18 — Duas placas estão ligadas a uma pilha. Para cada elétron que se desloca da placa negativa para a positiva, o sistema perde $2,4 \times 10^{-19}$ joules. Esta energia se transforma, inicialmente, em energia cinética do elétron; posteriormente o elétron é freado na placa positiva, cedendo sua energia cinética à placa sob a forma de calor. Qual será a energia fornecida pela pilha se 20 elétrons se deslocam de uma placa a outra?

Q19 — A carga de cada elétron é de $1,6 \times 10^{-19}$ C. Qual a energia fornecida pela pilha por unidade de carga (1C) deslocada de uma placa a outra? Considere o dado da **Q18**.

Q20 — No caso anterior, qual é a energia que a pilha deve fornecer ao sistema, quando 0,2C de carga é deslocado de uma placa a outra?

Q21 — Se as placas não estão ligadas à pilha, o que ocorre com a energia do sistema (placas carregadas), quando elétrons são deslocados da placa negativa para a positiva?

A **energia** fornecida pelo sistema, por **unidade de carga**, quando uma pequena carga se desloca de um ponto **A** até um ponto **B**, nesse sistema, é uma grandeza muito importante no estudo da Eletricidade. É chamada **diferença de potencial elétrico** entre os pontos **A** e **B**, que é medida em joule por coulomb (J/C).

Q22 — Qual é, no caso da questão 19, a diferença de potencial elétrico entre um ponto situado na placa negativa e outro, situado na placa positiva?

4. Diferença de potencial entre dois pontos

A energia fornecida quando uma pequena carga se desloca do ponto **A** ao ponto **B** independe do percurso entre esses dois pontos (figura 6). Assim, a energia fornecida será a mesma, tanto quando a carga se move ao longo da trajetória I como das trajetórias II, III ou IV. Por outro lado, quando uma pequena carga se desloca de um ponto a outro de uma **mesma placa**, a energia potencial do sistema permanece constante. Estando as placas

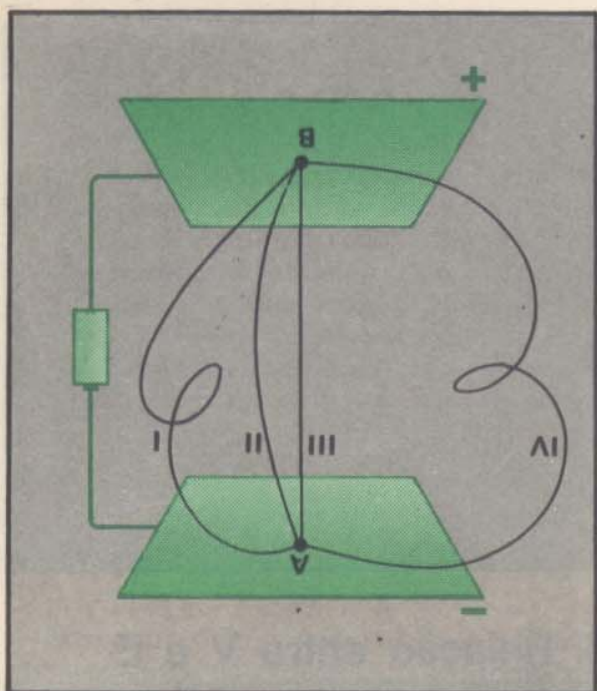


figura 6

em equilíbrio eletrostático, mesmo carregadas, o campo elétrico em seu interior é nulo, não agindo forças elétricas sobre as cargas da placa. Podemos entender melhor esta idéia lembrando que se houvesse campo elétrico internamente à placa e sendo esta condutora, os elétrons sofreriam acelerações. Assim, a diferença de potencial elétrico entre dois pontos situados **na mesma placa é igual a zero**.

Portanto, a energia fornecida quando uma carga vai de um ponto **A** da placa negativa até alcançar um ponto **B** da placa positiva (figura 7) é igual à energia fornecida quando essa mesma carga vai do ponto **A** ao ponto **C**, ou qualquer outro ponto da placa positiva. Neste caso, em vez de falarmos na diferença de potencial entre um ponto de uma placa e um ponto de outra placa, podemos nos referir à diferença de potencial entre as placas.

Como você já calculou na **Q20** e **Q21**, a energia por unidade de carga que uma pilha fornece a um sistema é constante e é igual à **diferença de potencial** entre os seus terminais. A diferença de potencial entre os terminais de uma pilha é uma de suas propriedades características. Nas pilhas comuns de lanterna, essa diferença de potencial é de 1,5 J/C.

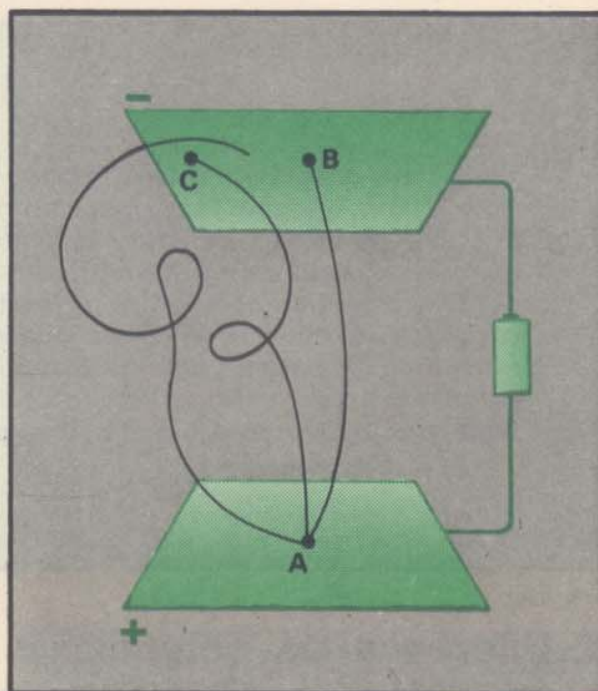


figura 7

RESPOSTAS

R₁₈ -

R₁₉ -

R₂₀ -

R₂₁ -

R₂₂ -

Chegamos ao conceito de diferença de potencial elétrico por meio de uma experiência imaginada. Uma experiência imaginada é aquela que, embora não seja efetuada na prática, poderia ser realizada caso seja possível construir os instrumentos apropriados. Às vezes, experiências imaginadas são efetivamente realizadas. Albert Einstein, por exemplo, analisou várias experiências imaginadas para discutir os princípios da Relatividade e da Mecânica Quântica. Apenas experiências imaginadas não são, entretanto, suficientes para descobrir as leis da natureza; elas são um artifício utilizado freqüentemente pelos físicos para esclarecer conceitos.

5. Diferença de potencial entre dois pontos quaisquer

Podemos representar a diferença de potencial entre dois pontos M e N de um campo elétrico qualquer por meio da expressão $V_N - V_M$. Essa diferença de potencial mede a variação da energia potencial $\Delta\varepsilon_P$ do sistema por unidade de carga quando uma carga q é levada de M para N. É igual ao trabalho τ realizado, por unidade de carga, para deslocar uma carga q de uma posição a outra. Assim,

$$V_N - V_M = \frac{\Delta\varepsilon_P}{q} \quad (1)$$

ou ainda

$$V_N - V_M = \frac{\tau}{q} \quad (2)$$

O símbolo $\Delta\varepsilon_P$ na expressão (1) exprime a diferença entre a energia potencial do sistema quando a carga está em M (ε_M) e a energia potencial do sistema quando a carga está em N (ε_N).

Dessa maneira,

$$\Delta\varepsilon_P = \varepsilon_N - \varepsilon_M$$

Q23 — Dois pontos P e Q de um campo elétrico uniforme distam 0,15m. Uma carga de $5 \cdot 10^{-17}C$ situada nesse campo fica sujeita a uma força de $2 \cdot 10^{-15}N$. Determine a diferença de potencial entre P e Q.

6. Relação entre V e E

Vamos agora relacionar a diferença de potencial ($V_2 - V_1$) entre as placas 1 e 2 (figura 8) com o campo elétrico E entre elas. Sabemos que este campo é perpendicular às placas e que seu valor é constante. Assim, se uma carga q se deslocar da placa 1 até a placa 2, estará submetida a uma força constante durante todo o trajeto, sendo a força sempre paralela ao deslocamento.

O valor da força é, como sabemos,

$$F = E \cdot q$$

O trabalho τ realizado por esta força, quando a carga vai da placa 1 até a placa 2, vale, pela definição de trabalho,

$$\tau = F \cdot d;$$

onde d é a distância entre as placas.

Q24 — Com relação à situação descrita acima, exprima a razão $\frac{\tau}{q}$ em função de d e E .

Na expressão que você acabou de obter,

$$\frac{\tau}{q} = E \cdot d,$$

o trabalho por unidade de carga é a diferença de potencial entre as placas. Assim:

$$\frac{\tau}{q} = V_2 - V_1 = E \cdot d \text{ ou } E = \frac{V_2 - V_1}{d}$$

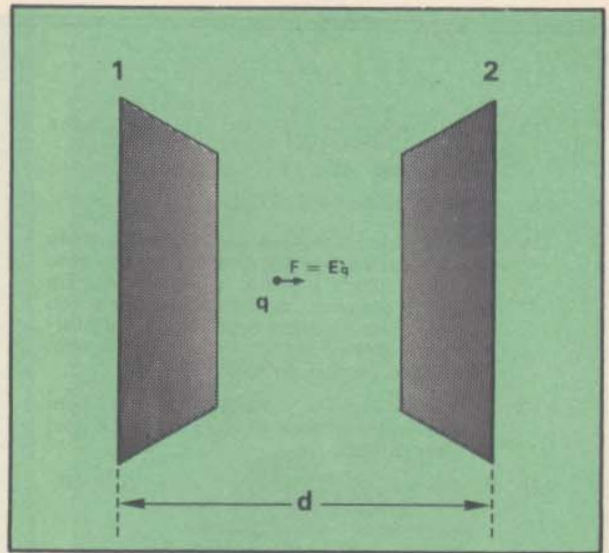
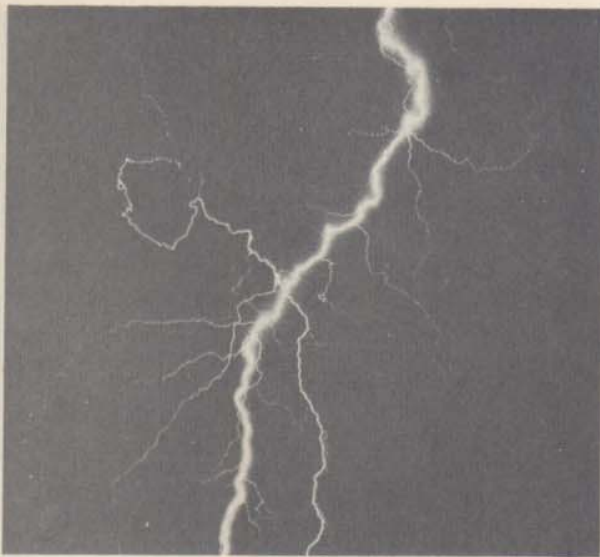


figura 8

Esta expressão nos mostra que o campo elétrico entre as placas está intimamente relacionado com a diferença de potencial entre elas.

Quando não há perigo de confusões, exprimimos a diferença de potencial simplesmente pela letra **V**. É isso o que faremos daqui por diante; no entanto, você deve sempre ter em mente que o símbolo se refere a uma **diferença** de potencial. Podemos, então, escrever a expressão que relaciona diferença de potencial com o campo assim:

$$V = E \cdot d$$

- Q25** — Duas placas estão ligadas a uma pilha de $1,5\text{J/C}$, estando separadas por uma distância de $0,01\text{m}$. Qual é o valor do campo elétrico existente entre as placas? Em que unidade esse campo é medido?
- Q26** — Se a distância entre as placas for duplicada, qual será o valor do campo elétrico entre elas, sendo mantida a mesma diferença de potencial?
- Q27** — Como varia a intensidade do campo elétrico existente entre as duas placas em função da distância que as separa?
- Q28** — Como se pode variar a intensidade do campo elétrico entre as duas placas, sem variar a distância entre elas?

RESPOSTAS

R₂₃ -

R₂₄ -

R₂₅ -

R₂₆ -

R₂₇ -

R₂₈ -

R18 — $20 \times 2,4 \times 10^{-19} = 4,8 \times 10^{-18} \text{J}$.

R19 — $\epsilon = \frac{2,4 \times 10^{-18}}{1,6 \times 10^{-19}} = 1,5 \text{J/C}$ (joule/coulomb).

R20 — $\epsilon = Vq \therefore \epsilon = 1,5 \times 0,2 = 0,3 \text{J}$.

R21 — A energia do sistema diminui pois é gasta para acelerar os elétrons que se chocarão com a placa positiva, aquecendo-a. Em outras palavras, quando os elétrons são deslocados da placa negativa para a positiva, o sistema realiza trabalho; será, pois, retirada energia do sistema.

R22 — $1,5 \text{J/C}$ ($1,5 \text{J}$ é a energia necessária para levar uma unidade de carga, 1C , de uma placa a outra).

R23 — $q = 5 \times 10^{-17} \text{C}$ $d = 1,5 \times 10^{-1}$
 $F = 2 \times 10^{-16} \text{N}$
 $V_q - V_r = T/q = F \cdot d/q$
 $V_q - V_p = (3/5) \times 10 = 6 \text{J/C}$

R24 — Sabemos que $\tau = F \cdot d$, $F = E \cdot d$, então:
 $\tau = Eqd \therefore \tau/q = E \cdot d$

R25 — $V = E \cdot d \therefore V = 1,5 \text{J/C}$
 $d = 10^{-2} \text{m} \therefore E = V/d = 1,5 \times 10^2$
 $E = 150 \text{ (J/C) m} \therefore E = 150 \text{N/C}$

R26 — $V = E \cdot d$. Logo
 $E = V/2d = 75 \text{N/C}$

R27 — Quanto maior a distância entre as placas, menor será a intensidade do campo elétrico e vice-versa.

R28 — Variando a diferença de potencial entre elas. Isto pode ser realizado variando o número de pilhas entre as placas.

7. A unidade de diferença de potencial

A unidade de diferença de potencial, o joule/coulomb, recebe um nome especial: **volt**, abreviado pela letra **V**. Assim, 1 joule/1 coulomb = 1 volt.

Essa unidade homenageia Alessandro Volta, que construiu a primeira pilha elétrica.

Da definição de volt vemos que, se a energia de 1 joule é despendida para mover uma carga de 1 coulomb de uma posição a outra, então a diferença de potencial entre as duas posições é de 1 volt.

Q29 — Se a diferença de potencial entre dois pontos é de $4,5 \text{V}$, qual será o trabalho realizado para transportar uma carga de $2,0 \text{C}$ de um a outro destes pontos?

Os múltiplos e submúltiplos do volt são definidos da mesma forma que os de outras unidades (veja o quadro na página ao lado). Assim, um **milivolt** (mV) vale 10^{-3}V , isto é, $0,001 \text{V}$; um **quilovolt** (kV) vale 10^3V , ou 1000V .

Q30 — A quantos volts corresponde um megavolt (MV)? E um microvolt (μV)?

Q31 — Expresse em volt, com a potência de dez conveniente, as diferenças de potencial abaixo:

- potencial do terminal do acelerador eletrostático Pelletron, da USP; 9 megavolts (MV);
- descarga atmosférica (raio) — 1 megavolt (MV);
- linha de altíssima tensão — 600 quilovolts (kV);
- linha de alta tensão — 13 quilovolts (kV);
- tomada industrial — 0,22 quilovolt (kV);
- tomada doméstica — 110 volts (V);
- pilha de lanterna — 1,5 volt (V).

8. Como medir a diferença de potencial

Podemos medir a diferença de potencial, que também é chamada **tensão**, entre dois pontos (como, por exemplo, entre os terminais de uma pilha, de uma lâmpada, etc.), utilizando medidores, chamados **voltímetros**.

Os voltímetros usam um processo indireto para medir a tensão, sem precisar medir trabalho e carga elétrica (assim

Prefixos para indicar múltiplos e submúltiplos de uma unidade:

| |
|-----------------------------|
| Giga (G) = 10^9 |
| Mega (M) = 10^6 |
| Quilo (k) = 10^3 |
| Deci (d) = 10^{-1} |
| Centi (c) = 10^{-2} |
| Mili (m) = 10^{-3} |
| Micro (μ) = 10^{-6} |
| Nano (n) = 10^{-9} |
| Pico (p) = 10^{-12} |

| PILHAS EM SÉRIE | |
|------------------|---------------|
| Número de pilhas | Tensão (em V) |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |

tabela 1

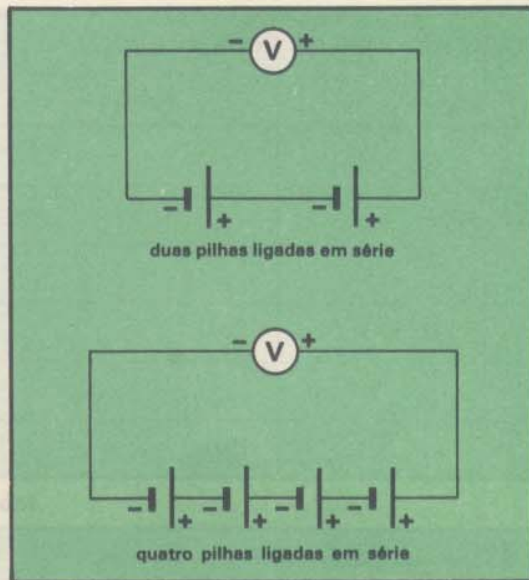


figura 9

como o velocímetro do automóvel usa um processo indireto para medir velocidade sem medir espaço e tempo).

Utilizaremos agora o voltímetro para efetuar algumas medidas de tensão. Leia **atentamente** o Guia do multímetro (no final do capítulo 9), na parte que se refere a medidas de tensão. Responda às questões ali propostas. Em seguida, realize as experiências descritas abaixo.

Importante: Não utilize por enquanto o medidor para efetuar nenhuma outra medida que não seja sugerida no texto, para evitar danificá-lo.

Meça a tensão de cada uma das pilhas de que você dispõe e a seguir ligue **sucessivamente** os terminais de seu medidor a uma, duas, ... até cinco pilhas de 1,5V ligadas em série (figura 9). Anote, na tabela 1, os valores de tensão que você encontrou. Observe que, nessa figura, os elementos estão representados por símbolos. Esta representação é chamada esquema. Veja, na página 3-18, como os diferentes elementos se relacionam com seus respectivos símbolos.

Q32 — A tensão medida é proporcional ao número de pilhas em série?

Q33 — Existe alguma analogia entre esse resultado e aquele observado no capítulo 2, quando o brilho da lâmpada variava com o número de pilhas? Explique.

RESPOSTAS

R₂₉ -

R₃₀ -

R₃₁ -

R₃₂ -

R₃₃ -

| PILHAS EM PARALELO | |
|--------------------|---------------|
| Número de pilhas | TENSÃO (em V) |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |

tabela 2

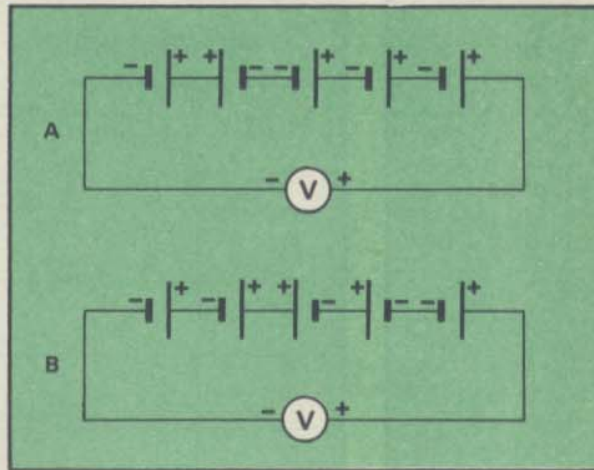


figura 11

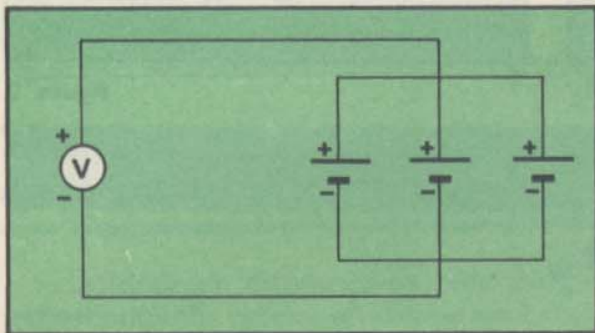


figura 10

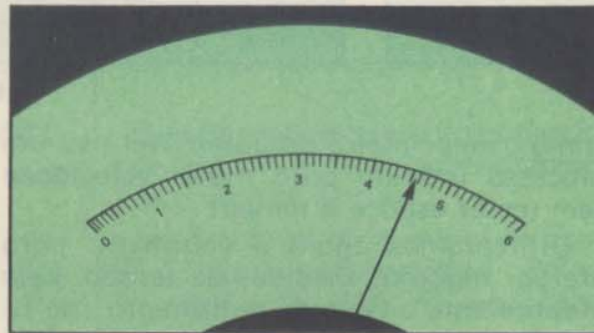


figura 12

Repita o procedimento anterior, ligando as pilhas como mostra a figura 10. Preste atenção para que a polaridade das pilhas seja concordante, para impedir que elas se descarreguem rapidamente.

Uma ligação como a da figura 10 é chamada ligação **em paralelo**; dizemos, então, que as pilhas estão ligadas em paralelo.

Preencha a tabela 2 com os dados obtidos em suas medidas.

Q34 — Como varia a tensão em função do número de pilhas ligadas em paralelo?

Agora você vai medir a tensão fornecida por pilhas ligadas de acordo com os esquemas das figuras 11-A e 11-B, em que uma ou mais pilhas são invertidas.

Q35 — Qual arranjo fornece a maior tensão?

Q36 — Que conclusão você pode tirar dos resultados obtidos?

No final do capítulo 2, quando você fez a ligação em série com pilhas e lâmpada, 3-14

you verified that the inversion of the polarity of one of the cells implied a smaller brightness of the lamp. Here you verified that, proceeding in the same way with the cells, the voltage decreased.

9. Exercícios de aplicação

E1 — O voltímetro mostrado na figura 12 está graduado em mV. Qual o valor que se lê em volts?

- a) 45V; b) 45×10^2V ;
c) 0,45V; d) $4,5 \times 10^{-2}V$;
e) 45mV.

E2 — A figura 13 representa duas placas planas carregadas distando entre si 15cm. O campo elétrico entre elas é de 20N/C. Determine o trabalho realizado para deslocar elétrons entre os pontos AB, AC, AD e AF, quando saem de A e seguem as trajetórias indicadas. Qual a diferença de potencial entre estes pontos?

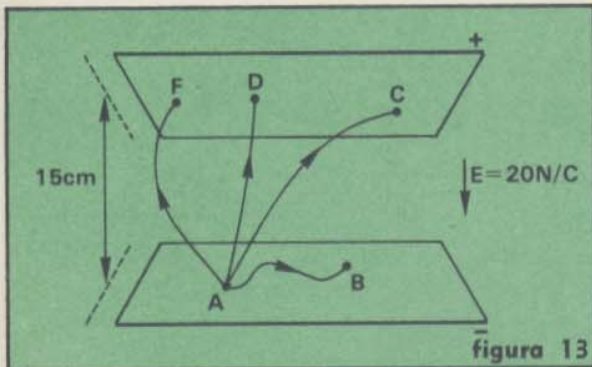


figura 13



figura 14

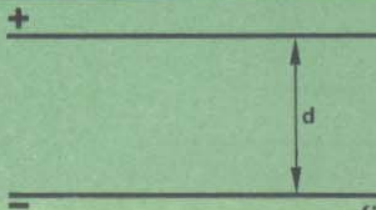


figura 15

E3 — Uma carga elétrica de $+3 \times 10^{-8} \text{ C}$ está em repouso em um campo elétrico num ponto M (figura 14). Ao ser largada, a mesma é acelerada pelo campo de modo que ao passar pelo ponto N está com uma energia cinética de $75 \times 10^{-7} \text{ joules}$. Qual a diferença de potencial entre os pontos N e M?

O esquema da figura 15 se refere às questões 4a, 4b e 4c.

- E4** — a) Qual a distância **d** entre as placas, sabendo-se que o campo existente entre elas é de 500 N/C e a diferença de potencial entre as placas é de 20 V ?
- b) Qual o trabalho realizado pelo campo elétrico para deslocar uma carga de $+5 \times 10^{-8} \text{ C}$ da placa positiva até a placa negativa?
- c) Se o campo elétrico **E** sofresse um decréscimo, passando para 250 N/C , qual seria o novo valor da diferença de potencial

RESPOSTAS

R₃₄ -

R₃₅ -

R₃₆ -

RESPOSTAS DE EXERCÍCIOS

R₁ -

R₂ -

R₃ -

R₄ - a)

b)

c)

- R29 — $V = \tau/q e$, assim,
 $\tau = Vq = 4,5 \times 2,0 = 9,0J$
- R30 — $1MV = 10^6V = 1\,000\,000V$
 $1\mu V = 10^{-6}V = 0,000001V$
- R31 — a) $9MV = 9 \times 10^6V$
 b) $1MV = 10^6V$
 c) $600kV = 600 \times 10^3V = 6 \times 10^5V$
 d) $13kV = 13 \times 10^3V = 1,3 \times 10^4V$
 e) $0,22kV = 0,22 \times 10^3V = 2,2 \times 10^2V$
 f) $110V = 1,1 \times 10^2V$
 g) $1,5V$
- R32 — A tensão medida é proporcional ao número de pilhas em série; isto é, duplicando o número de pilhas em série, a tensão duplica; triplicando o número de pilhas, a tensão triplica, e assim por diante.
- R33 — Nesta experiência a tensão aumenta com o número de pilhas. Na experiência do capítulo 2, o brilho da lâmpada também aumentava à medida que se aumentava o número de pilhas.
- R34 — A tensão permanece **constante**.
- R35 — A maior tensão é a que corresponde ao esquema da figura 11-B.
- R36 — Quando invertemos a posição de uma pilha em um circuito em que há várias pilhas ligadas em série, a tensão diminui.

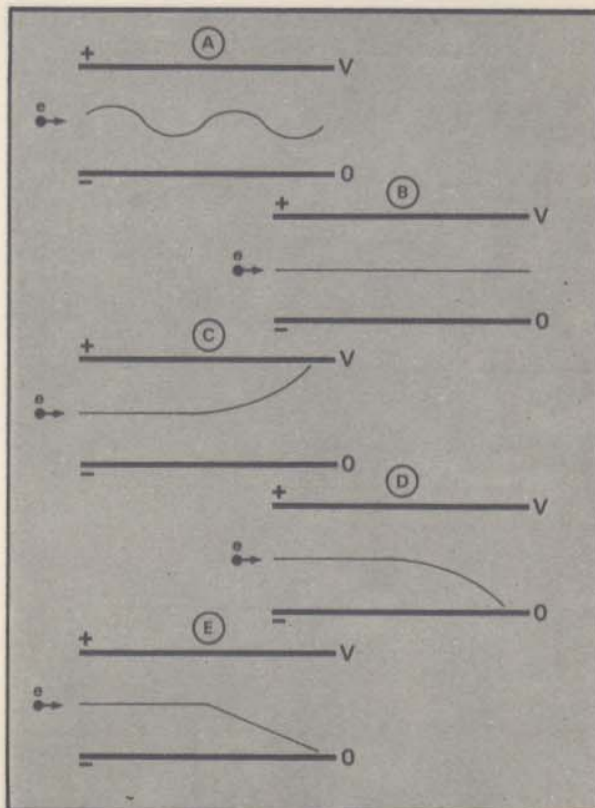


figura 16

entre as placas mantendo a distância entre elas constante?

- E5 — Sejam duas placas metálicas paralelas conforme esquema mostrado na figura 16. A placa superior encontra-se a um potencial V positivo, isto é, está positivamente eletrizada e a placa inferior tem potencial zero, isto é, não está eletrizada. Um elétron com velocidade horizontal constante penetra no espaço entre as placas. A trajetória seguida pelo elétron é melhor representada por:
- E6 — Experiência de Millikan — Você, no capítulo 2, calculou a carga da gota de óleo utilizada na experiência de Millikan para determinar a carga do elétron. O valor encontrado para a carga da gota deve ter sido $9,6 \times 10^{-19}C$. O campo elétrico entre as placas era de $2 \times 10^5N/C$ e as placas estavam separadas de $0,015m$. Determine a diferença de potencial entre as placas e o trabalho realizado para deslocar a referida carga.

O enunciado que segue refere-se aos exercícios 7 a 12.

Na figura 17 temos o esquema de um canhão de elétrons (componente utilizado no interior do tubo de imagem dos televisores). O canhão de elétrons é composto de um cátodo e um ânodo. O cátodo é um filamento negativo que emite elétrons, com velocidade inicial desprezível ($v_0 \simeq 0$), em direção do ânodo, espécie de disco metálico com um orifício central. Entre o cátodo e o ânodo existe uma diferença de potencial de $1\,500V$. Esta diferença de potencial tem a função de acelerar os elétrons dentro da região **ab**. Os elétrons, ao atravessarem o orifício do ânodo, passam a ter velocidade horizontal constante, penetrando em uma região entre placas paralelas carregadas. Entre as placas existe um campo elétrico de $2 \times 10^3N/C$. A lei de conservação da energia é levada em conta para a determinação da velocidade final dos elétrons, onde a energia cinética é dada por $\epsilon = \frac{1}{2} m_e v^2$.

dados:

$$m_e = 9,1 \times 10^{-31}kg$$

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

RESPOSTAS DE EXERCÍCIOS

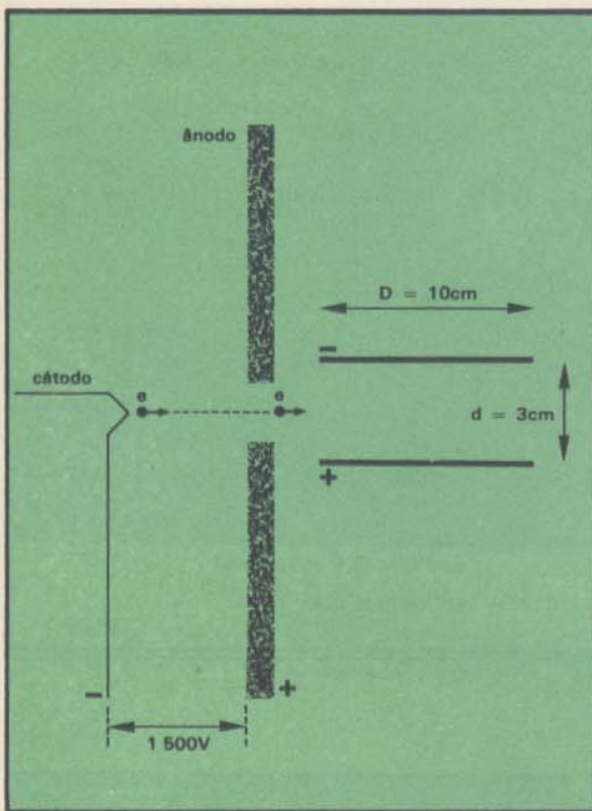


figura 17

- E7** — Qual a velocidade v do elétron emitido ao penetrar no espaço entre as placas?
- E8** — Quanto tempo levam os elétrons para percorrer a distância D igual ao comprimento das placas?
- E9** — Qual a diferença de potencial entre as placas defletoras?
- E10** — No espaço entre as placas, os elétrons sofrem um desvio. Qual a força que cada elétron sofre devido ao campo elétrico entre as placas?
- E11** — Qual a aceleração sofrida pelos elétrons em direção à placa positiva?
- E12** — Qual a direção e sentido da aceleração dos elétrons entre as placas paralelas?
- horizontal para a direita;
 - horizontal para a esquerda;
 - zero;
 - vertical para cima;
 - vertical para baixo.

R₅ -

R₆ -

R₇ -

R₈ -

R₉ -

R₁₀ -

R₁₁ -

R₁₂ -

R1 — $4,5 \times 10^{-9} \text{V}$.

R2 — a) $\tau = F \cdot d = Eed$, $\tau_{AB} = 0$ (mesma placa)
 $\tau_{AC} = \tau_{AD} = \tau_{AP}$
 São iguais, pois o trabalho entre as placas é o mesmo.
 $\tau_{AC} = Eed = 4,8 \times 10^{-19} \text{J}$
 b) $V_{AB} = 0 \rightarrow \tau = 0$, $V_{AC} = V_{AD} = V_{AP}$
 $V_{AC} = \tau_{AC}/F = E \cdot d \therefore V_{AC} = 3 \text{V}$

R3 — $V = \frac{\tau_N - \tau_M}{q}$, logo $V = 250 \text{V}$.

R4 — a) $V = Ed$, $d = V/E = 0,04 \text{ m} = 4 \text{ cm}$
 b) $V = \Delta\epsilon/q$,
 $\Delta\epsilon = Vq = 20 \times 5 \times 10^{-2} \text{C}$
 $\Delta\epsilon = 10^{-3} \text{J}$
 c) $V = Ed \therefore V = 250 \times 4 \times 10^{-2}$
 $V = 10 \text{V}$

R5 — C.

R6 — a) $V = Ed$ logo $V = 3 \times 10^6 \text{V}$
 b) $V = \tau/q$
 $\tau = Vq = 3 \times 10^6 \text{V} \times 9,6 \times 10^{-19} \text{C}$
 $\tau = 28,8 \times 10^{-13} \text{J}$

R7 — $V = \Delta\epsilon/e$
 $\epsilon = Ve$, $\epsilon = 1/2mv^2$
 $1/2mv^2 = Ve$
 $v = Ve/2m = 2,3 \times 10^7 \text{m/s}$

R8 — $v = D/t$
 $t = D/v = 0,43 \times 10^{-8} \text{s}$

R9 — $V = Ed$
 $V = 2 \times 10^9 \text{N/C} \times 3 \times 10^{-2}$
 $V = 60 \text{V}$

R10 — $E = F/e$,
 $F = Ee$
 $F = 2 \times 10^9 \text{N/C} \times 1,6 \times 10^{-19} \text{C}$
 $F = 3,2 \times 10^{-10} \text{N}$

R11 — $F = ma$
 $a = F/m = 3,9 \times 10^{14} \text{m/s}^2$

R12 — e) Vertical para baixo.

| DESENHO | NOME | SÍMBOLO |
|---------|---|---------|
| | Voltímetro | |
| | amperímetro | |
| | ohmímetro | |
| | lâmpada | |
| | pilha | |
| | díodo | |
| | resistências a) LDR b) NTC c) comuns | |

Um circuito elétrico pode ser apresentado através do desenho dos componentes e aparelhos utilizados ou na forma de esquema ou diagrama (símbolos dos componentes e aparelhos utilizados).



Acelerador
eletrostático
Pelletron
IFUSP

Leitura Suplementar

Prof. Oscar Sala

Aceleradores eletrostáticos

A idéia da transmutação dos elementos sempre exerceu grande fascínio sobre o homem. Com a descoberta do fenômeno da radioatividade (Becquerel, 1896) e da primeira transmutação controlada pelo homem (Rutherford, 1919), a indução de transmutações nos laboratórios de pesquisa em Física Nuclear tornou-se um fato de rotina, principalmente após a invenção dos vários tipos de aceleradores de partículas (aceleradores atômicos). Entre eles destacam-se os aceleradores eletrostáticos, também conhecidos pelo nome de aceleradores Van de Graaff, que, devido às suas características, tornaram-se os mais populares nos laboratórios de Física Nuclear existentes no mundo.

Antes, porém, de discutirmos esse tipo de acelerador, responderemos à pergunta: qual a necessidade de acelerarmos partículas atômicas para induzir uma transmutação ou para estudar o núcleo atômico?

O núcleo atômico é a parte central do átomo. É cerca de 10 000 vezes menor que o átomo. Quase toda a massa do átomo está localizada no núcleo e este possui carga elétrica positiva igual, em valor absoluto, à carga total dos elétrons no átomo, que no seu estado normal é sempre neutro.

Uma das maneiras de produzir uma transmutação (reação nuclear) é colocarmos dentro de

um núcleo atômico um outro núcleo, ou uma das partículas constituintes do núcleo: o próton ou o nêutron. Por exemplo, pode-se tentar colocar um próton dentro de um núcleo de oxigênio. Tanto o próton como o núcleo de oxigênio possuem cargas elétricas positivas; portanto, ambos se repelem quando tentamos aproximar um do outro. Essa força de repulsão eletrostática cresce rapidamente ao diminuir a distância entre eles, dificultando a aproximação. A fim de vencer essa força repulsiva, é necessário que um dos núcleos possua grande energia cinética. A função dos aceleradores é precisamente acelerar as partículas atômicas, para que estas adquiram a energia cinética suficiente para vencer a repulsão eletrostática.

Convém, entretanto, recordar que existem partículas neutras, os nêutrons, que são utilizadas para produzir transmutações. Neste caso, não existe a repulsão eletrostática e o nêutron pode penetrar no núcleo, mesmo sem possuir energia cinética. Entretanto, os nêutrons não são partículas estáveis quando livres, logo, não estão sempre disponíveis. É necessário que eles sejam produzidos no momento de sua utilização e a produção de nêutrons só pode ser feita através de reações nucleares, por exemplo, utilizando-se partículas carregadas. Voltamos, portanto, ao ponto inicial da necessidade de acelerar partículas.

Quais as características desejáveis num acelerador? Elas se tornarão óbvias se indagarmos o que faz um físico nuclear.

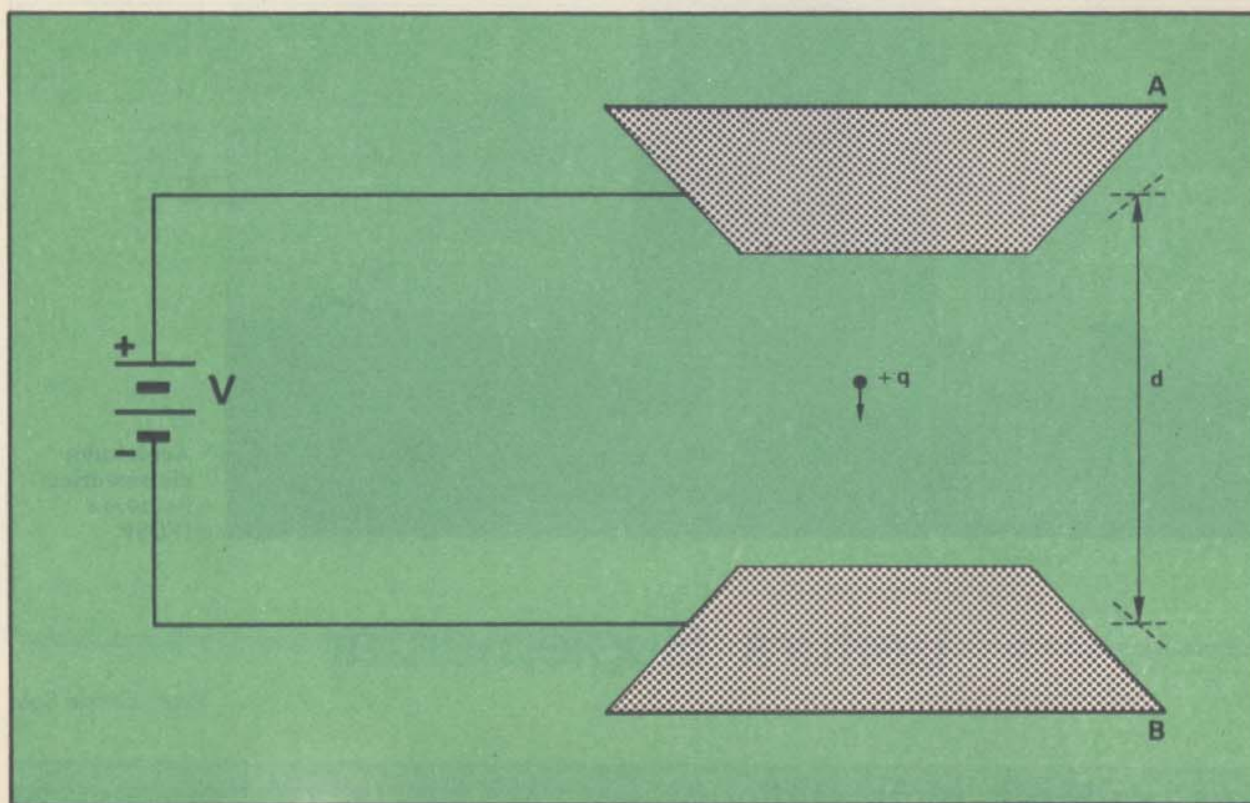


figura 18

O físico nuclear experimental utiliza a maior parte de seu tempo investigando a interação dos vários tipos de radiações ou partículas com os núcleos. A probabilidade dessas interações, entretanto, depende muito da energia da radiação utilizada para o **bombardeio atômico**; freqüentemente, uma pequena variação na energia tem como conseqüência uma variação drástica na probabilidade de interação. Por isso, convém que o físico disponha de radiações com energia bem definida e possa variá-la facilmente numa faixa ampla.

Os aceleradores possibilitam aos físicos obterem radiações com essas características e os aceleradores do tipo Van de Graaff são ideais para atender a essas necessidades.

Como acelerar as partículas atômicas?

Para acelerar uma partícula, precisamos aplicar uma força. No caso de uma partícula com carga elétrica, um próton por exemplo, a aplicação da força à partícula depende apenas de que esta seja colocada sob a ação de um campo elétrico. A força será igual ao produto do valor da carga elétrica pela intensidade do campo elétrico.

Como produzir campos elétricos intensos?

Todos nós estamos familiarizados com as altas voltagens que podem ser facilmente geradas nas experiências de eletrostática. Como nos aceleradores de partículas, as correntes elétricas utilizadas são muito pequenas, a possibilidade de aplicar os princípios da Eletrostática na geração de altas

voltagens para acelerar as partículas atômicas tornou-se logo atraente. Quanto maior a voltagem, maior a energia cinética final das partículas aceleradas.

Para esclarecer melhor este ponto, consideremos o seguinte exemplo: vamos tomar duas placas metálicas planas, separadas por uma distância d (é o que chamamos de um capacitor de placas paralelas — figura 18). Quando aplicamos uma diferença de potencial V entre essas duas placas, criamos entre elas um campo elétrico uniforme, cuja intensidade é: $E = V/d$. Uma carga elétrica $+e$ que sai da placa **A** é então sujeita a uma força: $F = eE$.

Quando a partícula carregada atinge a placa **B**, possui uma energia cinética que é igual ao trabalho realizado para deslocá-la da placa **A** até **B**, portanto:

$$\begin{aligned} \text{energia cinética} &= \frac{1}{2} mv^2 = F \cdot d = eE \cdot d = \\ &= e \frac{V}{d} d = eV. \end{aligned}$$

Ou seja, a energia cinética final é dada pelo produto do valor da carga elétrica pela diferença de potencial. Isto nos sugere uma unidade conveniente para a medida da energia, e amplamente utilizada pelos físicos nucleares, que é o elétron-volt (abreviadamente eV). O elétron-volt, então, é definido como a energia que uma partícula com carga elétrica com módulo igual à do elétron ad-

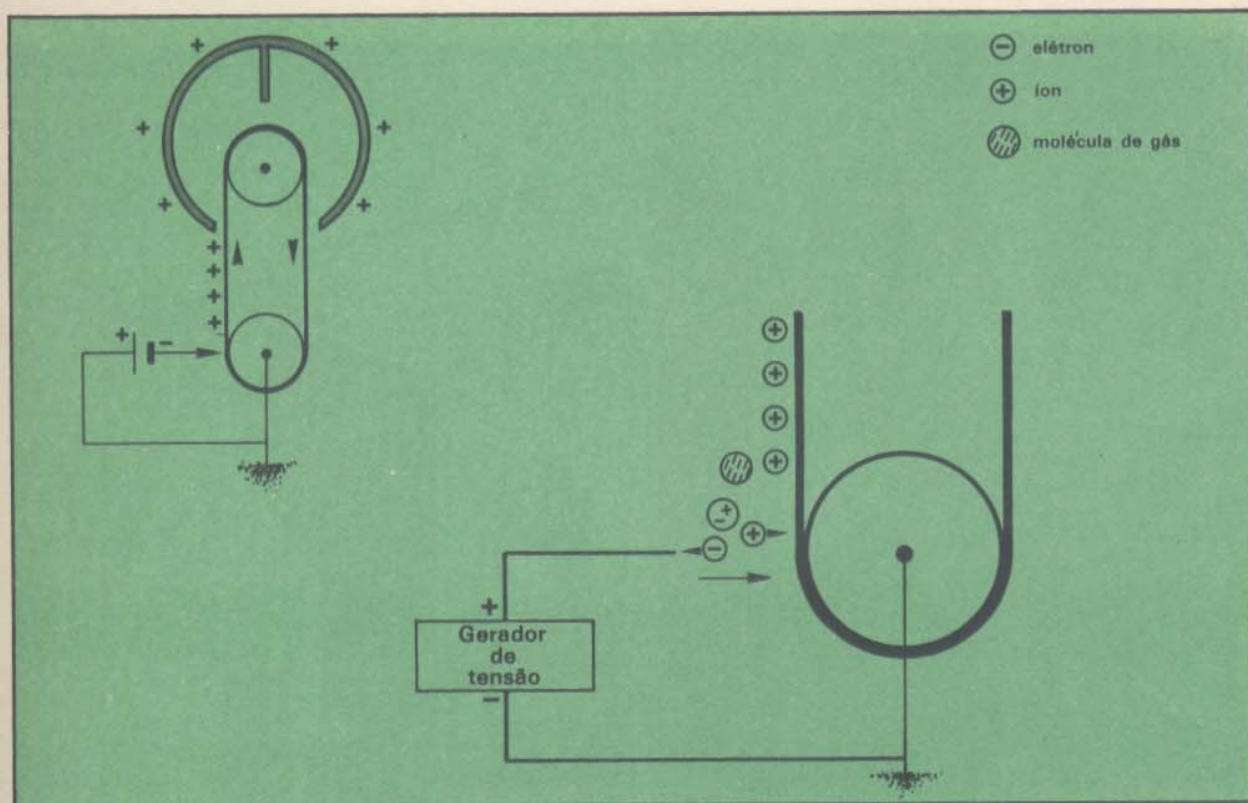


figura 19

quire, quando acelerada entre dois pontos cuja diferença de potencial é de 1 volt. Se a diferença do potencial for de 1 milhão de volts (1 MV), a energia que adquire uma partícula com carga elétrica igual à do elétron (um próton, por exemplo) será de um milhão de elétrons-volts (abreviadamente, 1 MeV).

Para que as partículas possam ser aceleradas livremente, elas são introduzidas num tubo, onde é feito o vácuo. Entre os extremos desse tubo, conhecido como **tubo acelerador**, aplicamos a alta voltagem que gera o campo elétrico para a aceleração das partículas atômicas.

Como obter altas voltagens?

Robert J. Van de Graaff estava na Universidade de Princeton, durante o período de 1929 a 1931, quando construiu o primeiro gerador de alta tensão. Baseou-se numa idéia exposta por Lord Kelvin, em 1890. Lord Kelvin sugeria que se utilizasse uma correia para transportar cargas elétricas, a fim de elevar o potencial de uma esfera metálica. O primeiro gerador construído por Van de Graaff atingiu um potencial de 1.2 MV. Era tão simples que foi possível descrevê-lo adequadamente num resumo com cerca de duzentas palavras! Esse resumo foi publicado em 1931, na principal revista norte-americana de Física, **The Physical Review**.

O gerador construído por Van de Graaff despertou pronta atenção entre os físicos, que ime-

diatamente reconheceram a potencialidade de seu invento. Em linhas gerais, esse gerador consiste numa correia sem fim, em geral de tecido de material isolante. Quando em movimento, o sistema transporta as cargas elétricas, que são depositadas na parte da correia em contato com a polia inferior (ver figura 19). O método utilizado por Van de Graaff para a deposição das cargas, e ainda hoje amplamente em uso, era bastante simples. Utilizava um pente feito de agulhas metálicas, colocado rente à correia e próximo à polia inferior. Quando se aplica uma diferença de potencial de alguns quilovolts entre o pente e a polia, produz-se uma ionização do gás isolante (pelo efeito corona) e os íons resultantes vão sendo depositados na correia. Essas cargas são transportadas para o interior de um terminal metálico (terminal de alta tensão), onde o campo elétrico é nulo, e as cargas podem ser facilmente retiradas da correia, passando para o terminal e tornando-o eletricamente carregado.

A energia mecânica empregada para o transporte das cargas elétricas, fornecida por um motor elétrico que movimenta a correia, é utilizada para gerar a diferença de potencial entre o terminal de alta tensão e o terra. O valor máximo dessa diferença de potencial é, entretanto, determinado pelas condições de isolamento elétrica desse terminal. Devido a essa limitação, quando

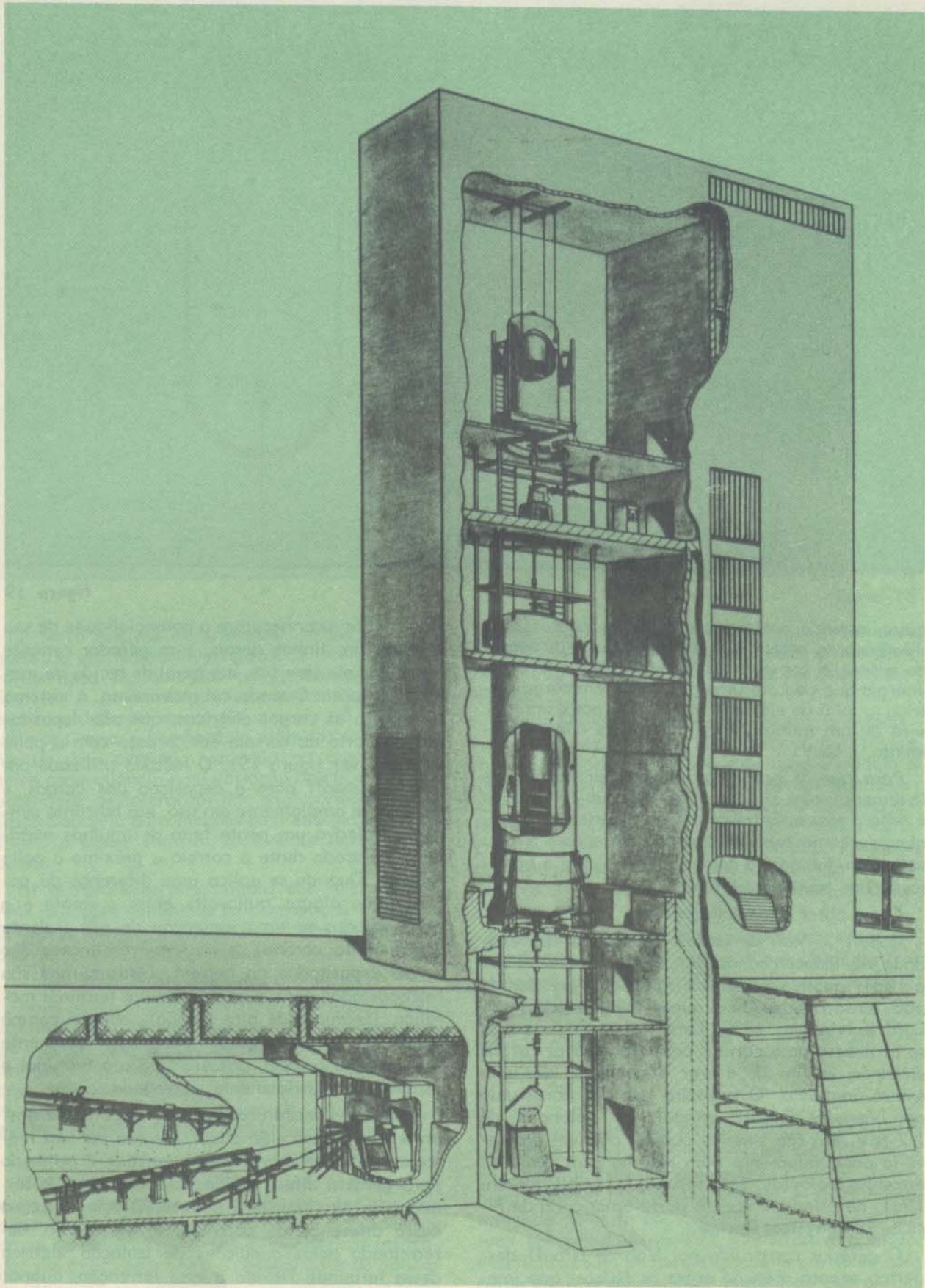


figura 20 — ... O acelerador Pelletron da Universidade de São Paulo, que foi o primeiro acelerador construído, e operacional, a utilizar esse novo princípio...

... com esse acelerador Tuve, Hafstadt e Dahl aceleraram prótons até uma energia de 600 KeV...

a diferença de potencial atinge um valor crítico, chamado **tensão de ruptura**, ocorre uma descarga elétrica entre o terminal de alta tensão e o terra. Normalmente, opera-se o gerador numa tensão inferior à de ruptura e em condições de equilíbrio tais que a corrente das cargas transportadas pela correia seja igual à corrente das partículas aceleradas mais as eventuais correntes de perda.

O sistema de correia transportadora usado por Van de Graaff, embora amplamente utilizado, apresenta alguns inconvenientes quando se pretende conseguir tensões muito elevadas. Várias idéias foram propostas para substituí-lo. Mas a única alternativa que demonstrou ser vantajosa em relação à tradicional correia foi o sistema Pelletron desenvolvido por R. G. Herb, na Universidade de Wisconsin. O Pelletron consiste numa cadeia sem fim de pequenos cilindros metálicos (**pellets**) ligados por isolantes de **nylon**. Os cilindros metálicos são carregados por um sistema de indução eletrostática. A figura 20 mostra o acelerador Pelletron da Universidade de São Paulo, que foi o primeiro acelerador construído, e operacional, a utilizar esse novo princípio de transporte de carga.

O primeiro gerador eletrostático efetivamente usado para a aceleração de partículas atômicas, com a finalidade de produzir reações nucleares,

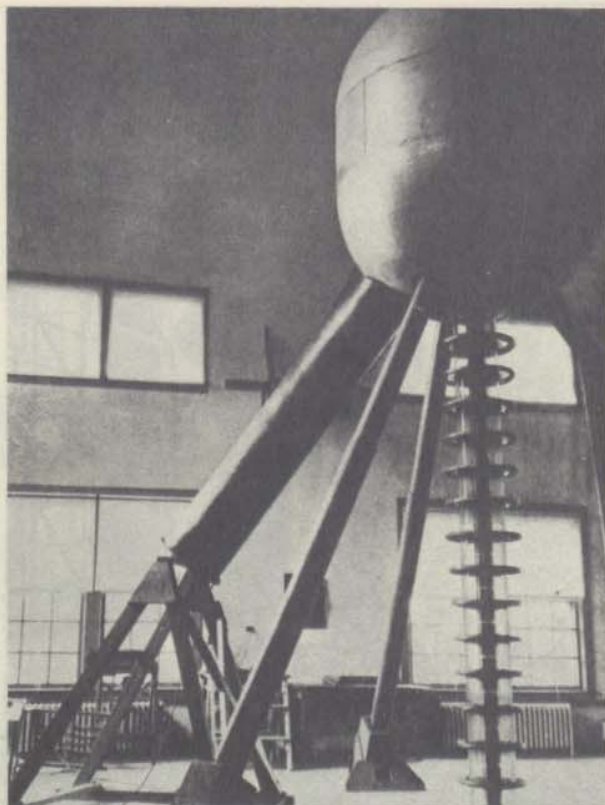


figura 21

foi construído e colocado em funcionamento em 1933, no Departamento de Magnetismo Terrestre do Instituto Carnegie, em Washington. Com esse acelerador, Tuve, Hafstadt e Dahl aceleraram prótons até uma energia de 600 KeV (600 mil elétrons-volts) em suas primeiras experiências na Física Nuclear.

Em seguida, esses mesmos pesquisadores construíram, na mesma instituição, um gerador Van de Graaff de maiores dimensões. O eletrodo de alta tensão era uma esfera metálica de 2 m de diâmetro e que podia atingir uma tensão de 1,2 MV. A figura 21 nos mostra esse histórico acelerador. Na figura mencionada, observa-se claramente na parte central um tubo vertical, o tubo acelerador, onde são aceleradas as partículas. Com esse acelerador foram realizadas importantes pesquisas sobre o núcleo atômico.

O gerador Van de Graff original e os que se seguiram imediatamente após trabalhavam em aberto, ao ar atmosférico. Mas as descargas elétricas e o efeito corona limitavam seriamente a voltagem que podiam atingir. A umidade, por exemplo, afeta seriamente os fenômenos eletrostáticos. Todos sabem das dificuldades e frustrações que podem surgir quando se pretende realizar experiências eletrostáticas num dia úmido.

Em condições de baixa umidade, o ar, à pressão atmosférica, suporta, sem ruptura de descar-

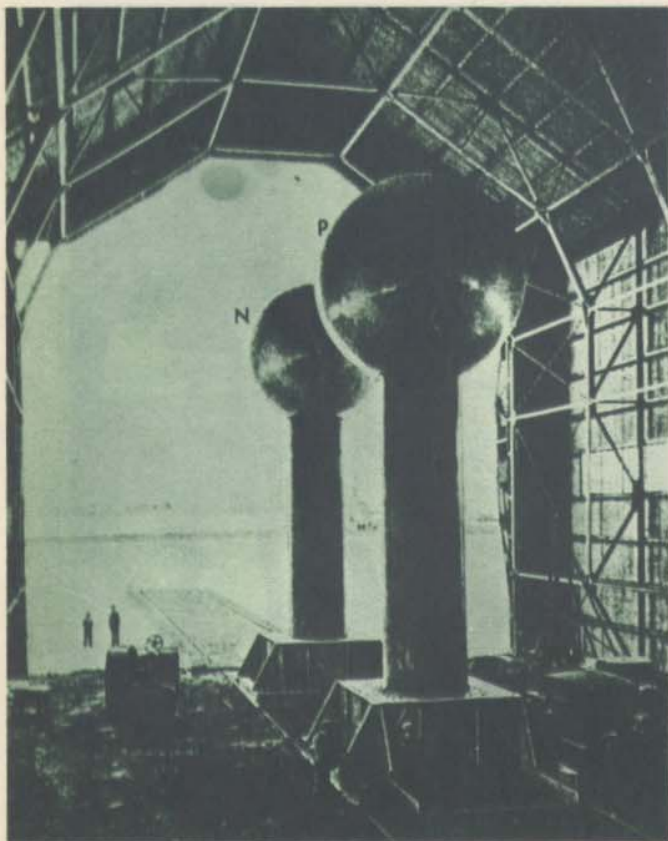


figura 22

gas elétricas, um campo elétrico de 20 mil volts por centímetro. Isto significa que, para atingirmos uma tensão de 2 milhões de volts, um terminal de forma esférica deve ter um raio de pelo menos 2 m! O maior desses geradores convencionais foi construído pelo próprio Van de Graaff, em 1936, no M.I.T.,* atingindo uma tensão de 2,7 MV. Para isso, o terminal de alta tensão era uma esfera de 4,5 m de diâmetro e foi montado no interior de um hangar de aviões (figura 22).

Herb, na Universidade de Wisconsin, construiu o primeiro gerador eletrostático no interior de um tanque de pressão, utilizando o ar com pressões superiores à atmosférica. Sabe-se que, dentro de certos limites, quanto maior a pressão do gás isolante, maior é a voltagem que se pode atingir sem que ocorram descargas elétricas. Em 1940, Herb construiu um gerador que operava no interior de um tanque de pressão com 2 m de diâmetro, usando como gás isolante uma mistura de ar e fréon numa pressão de 7 atm. Com esse acelerador atingiu uma voltagem de 4,5 MV (ao ar, à pressão atmosférica, para atingirmos essa tensão, o eletrodo de alta tensão deveria ter pelo menos 9 m de diâmetro!). Durante dez anos, esse acelerador manteve o recorde de voltagem e com ele se realizaram alguns dos trabalhos mais importantes da Física Nuclear. A figura 23 mos-

3-24

... O maior desses geradores convencionais foi construído pelo próprio Van de Graaff, em 1936, atingindo uma tensão de 2,7 MV...

figura 23

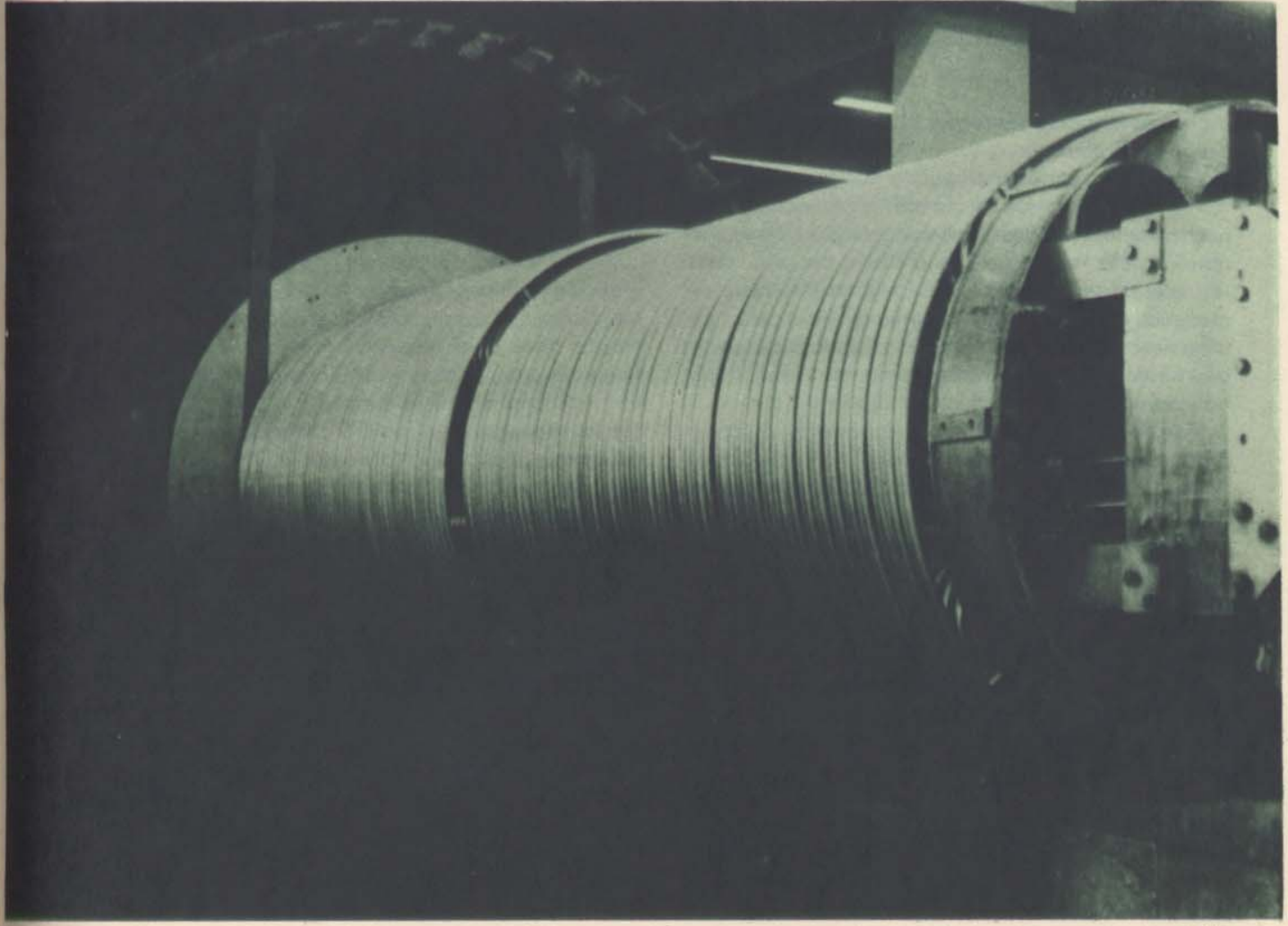
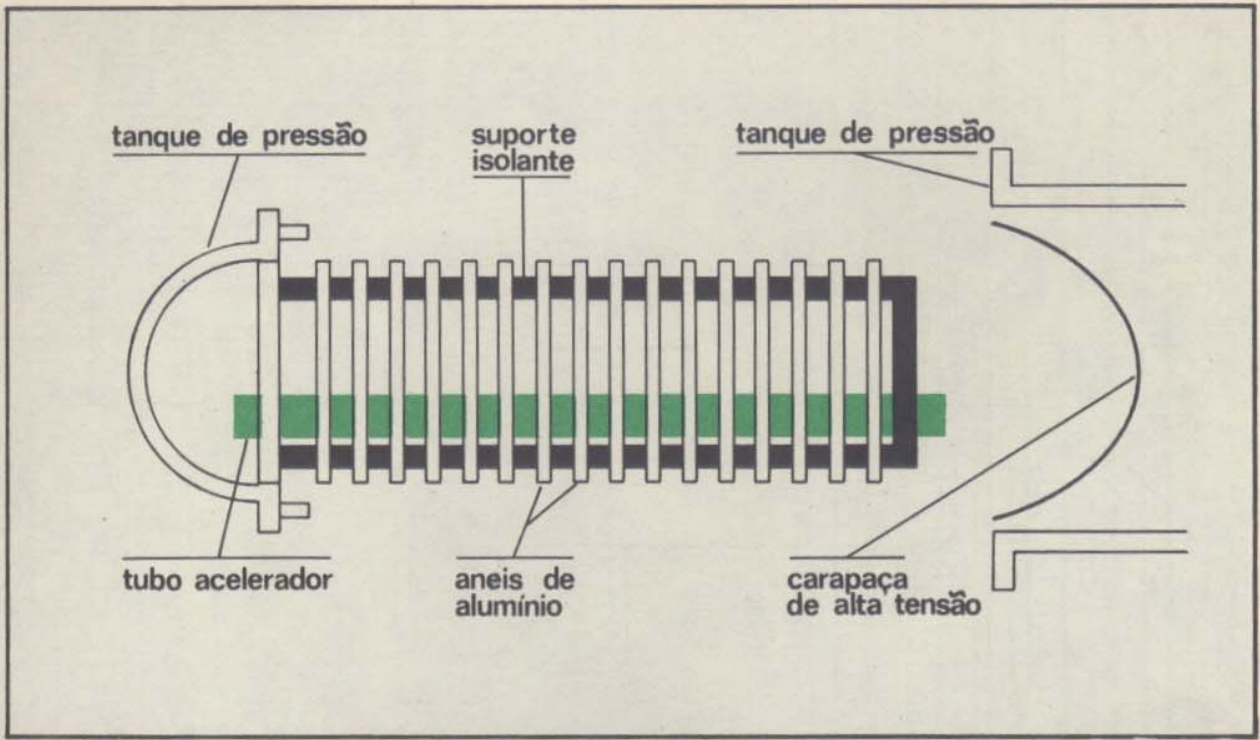
... Pode-se notar uma série de anéis metálicos, cuja finalidade é estabelecer um campo elétrico uniforme ao longo das isolantes...

tra o acelerador Van de Graaff construído na Universidade de São Paulo, em 1954. Este acelerador atingiu 3,8 milhões de volts. Na figura pode-se notar uma série de anéis metálicos, cuja finalidade é estabelecer um campo elétrico uniforme ao longo dos isolantes, tubo acelerador e correia transportadora de carga. Com este acelerador foi possível realizar várias pesquisas na Física Nuclear, o que permitiu o treinamento de um grande número de físicos brasileiros.

Os geradores eletrostáticos mais modernos utilizam como gás isolante o hexafluoreto de enxofre (SF_6), que oferece excelentes características de isolante. O Pelletron de São Paulo utiliza esse gás. Com uma pressão de 8 atm, podemos atingir tensões de 10 MV num tanque de pressurização cujo diâmetro é de 3 metros.

Um avanço importante na tecnologia dos aceleradores foi a introdução do chamado **sistema de troca de cargas**. A idéia básica desse sistema é que, se aceleramos uma partícula carregada num campo elétrico gerado por uma diferença de potencial, essa mesma partícula pode ser novamente acelerada pela mesma diferença de potencial, se a carga elétrica mudar de sinal. Se a operação de mudança de carga puder ser feita várias vezes, essa partícula poderá ser repetidamente acelerada; portanto, poderá adquirir uma energia

* Massachusetts Institute of Technology



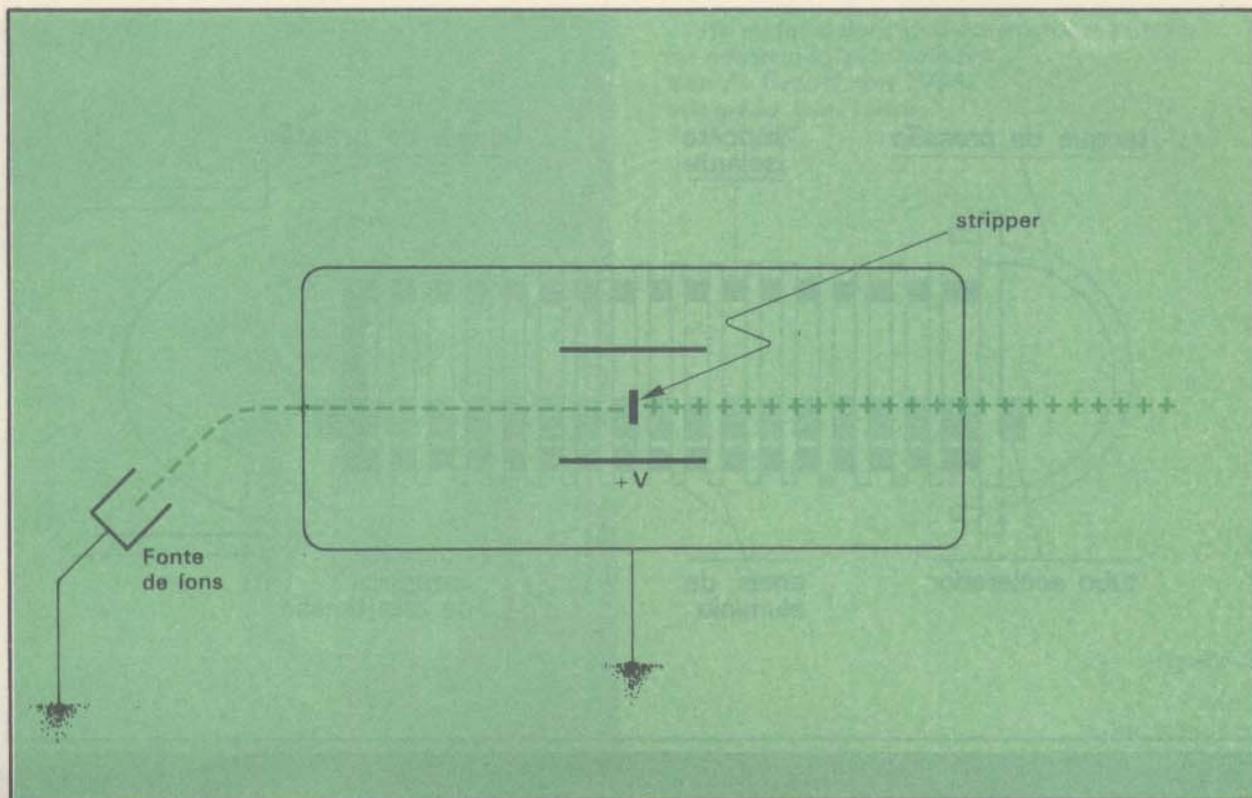


figura 24

múltipla daquela que seria obtida num único processo de aceleração.

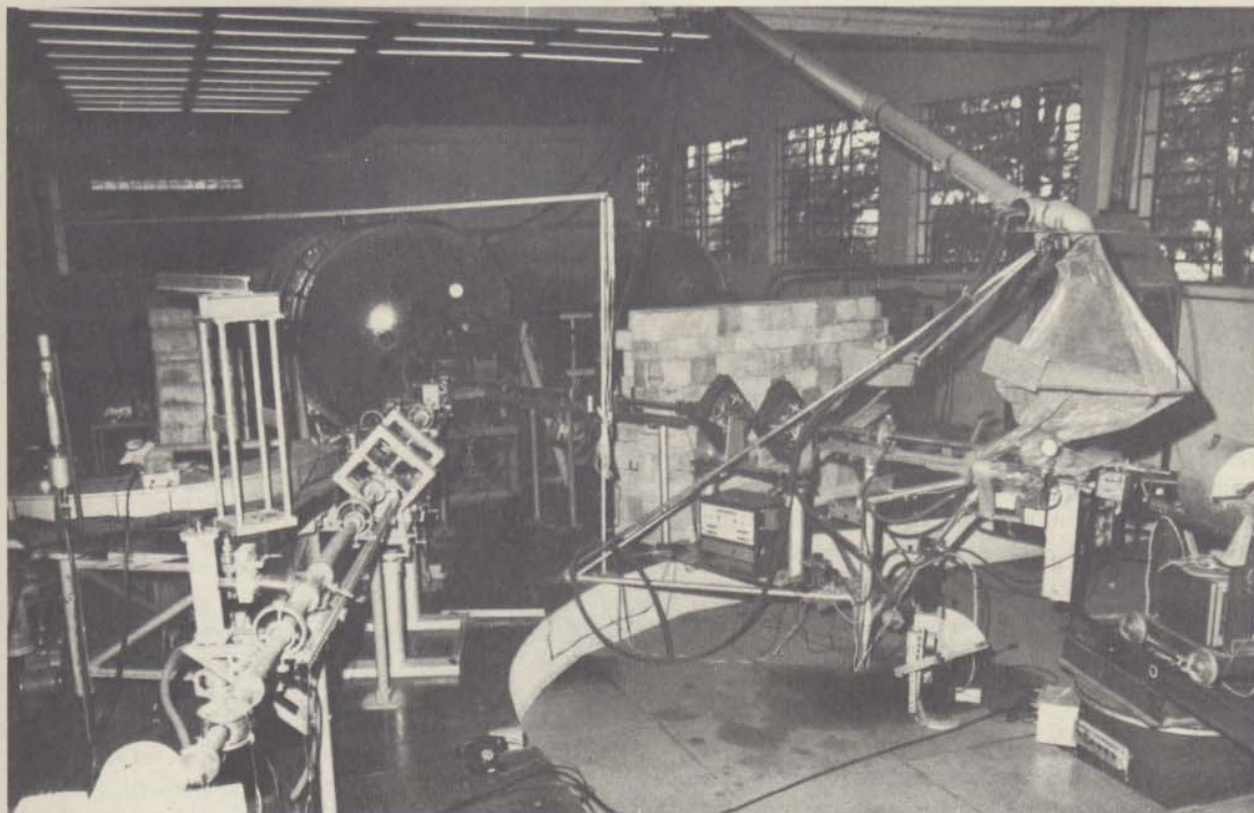
Como efetuar essa troca de carga?

Num gerador Van de Graaff convencional, as partículas aceleradas são íons positivos. Estes são obtidos pela ionização dos átomos, ou seja, pela retirada de um ou mais de seus elétrons. Essa ionização é conseguida facilmente por meio de uma descarga elétrica no gás ou vapor dos átomos que se deseja acelerar. Este processo é realizado na chamada fonte de íons.

Por exemplo, se o objetivo é acelerar prótons, produz-se uma descarga elétrica no hidrogênio. Os íons assim produzidos (prótons) são retirados do plasma formado pela descarga e introduzidos no tubo acelerador. Quando esses íons positivos ainda possuem pequena velocidade, é fácil para eles capturar um ou dois elétrons. Esses elétrons existem em abundância no próprio plasma da descarga e podem, ainda, ser transferidos de átomos que têm a tendência de perdê-los, como, por exemplo, os metais alcalinos como o potássio ou o cézio. Dessa maneira, um íon positivo de hidrogênio pode facilmente capturar dois elétrons, tornando-se um íon negativo; quando esse íon negativo possui alta velocidade, pode facilmente perder os elétrons, transformando-se num íon positivo. É, entretanto, impossível a captura de elétrons por íons que se movimentam com velocidade

des superiores às dos elétrons do próprio átomo. Conseqüentemente, deve-se iniciar com íons negativos lentos e terminar com íons positivos velozes, quando se pretende efetuar uma troca de sinal de cargas.

A utilização do sistema de troca de cargas, proposta independentemente por vários eminentes físicos, foi, entretanto, abandonada durante muitos anos pela inexistência de uma fonte suficientemente intensa de íons negativos. Esta fonte passou a existir, na prática, em 1956, graças a Weinman e Cameron, dois pesquisadores da Universidade de Wisconsin. A idéia foi então imediatamente reavivada. Van de Graaff persuadiu a companhia High Voltage Engineering Corporation, que já possuía grande experiência na construção de geradores eletrostáticos, a construir o primeiro grande acelerador de íons negativos com troca de carga. O primeiro desses aceleradores foi instalado nos laboratórios de Chalk River, pertencentes à Comissão de Energia Atômica do Canadá. Esse acelerador começou a funcionar em 1959 e tornou-se grande sucesso. A figura 24 nos ilustra um esquema de funcionamento desse acelerador. Na realidade, consiste efetivamente em dois aceleradores em série, daí ser conhecido também pelo nome de acelerador tandem. Partindo de íons negativos de hidrogênio no potencial terra (lado esquerdo da ilustração) e ope-



Aspecto do acelerador Van de Graaff — IFUSP.

rando-se o acelerador numa tensão $+V$ no terminal de alta tensão, os íons negativos acelerados até esse terminal adquirem uma energia eV . Realizada a troca de cargas, que se dá quando o feixe negativo passa através de uma película delgada de carbono (o **stripper**), os íons, agora positivos, são novamente acelerados, adquirindo uma energia adicional eV , portanto, uma energia total $2eV$.

Uma das maiores vantagens desses aceleradores reside no fato de que a fonte de íons é montada na parte externa da máquina e em pontencial terra. Apesar de quarenta anos de desenvolvimento, as fontes de íons ainda são bastante "temperamentais" quanto ao seu funcionamento. Com a fonte externa, o acesso é fácil e os ajustes podem ser feitos sem grande perda de tempo. Além do mais, é possível a montagem de mais de uma fonte de íons num mesmo acelerador. Fontes extremamente complexas, como, por exemplo, as que produzem um feixe de partículas polarizadas, que ocupam grande espaço e requerem grande manutenção, podem ser facilmente acopladas a esses aceleradores.

Inicialmente, pensou-se que somente íons de hidrogênio negativo podiam ser formados com relativa facilidade. Hoje existem fontes que produzem íons negativos de, praticamente, qualquer elemento da tabela periódica.

Com o emprego de um acelerador de troca de cargas e acelerando-se íons pesados, é possível atingir energias elevadas. Isso porque, na mudança da carga negativa para positiva, o átomo pode perder mais de um elétron. Para exemplificarmos, vamos considerar um acelerador com 10 MV no terminal e um feixe de oxigênio. Formados os íons negativos de oxigênio, quando estes atingem o terminal de alta tensão possuem uma energia de 10 MeV. Se arrancarmos todos os 8 elétrons do átomo de oxigênio, ele se torna um íon positivo com carga $+8e$ que, acelerado pela diferença de potencial de 10 MV, adquirirá uma energia de 80 MeV. Adicionando a esses 80 MeV os 10 MeV já adquiridos, quando acelerado como íon negativo, teremos uma energia total de 90 MeV. O uso de íons tão energéticos abriu a oportunidade para novas áreas de pesquisa na Física Nuclear, que estão hoje sendo exploradas com grande intensidade e interesse pelos físicos.

As novas tecnologias desenvolvidas recentemente, na construção desses aceleradores, dos quais o Pelletron é um exemplo, permitem-nos prever a possibilidade de construção, nos próximos anos, de aceleradores com 30 MV no terminal de alta tensão. Isso tornará esses aceleradores universais no sentido de que o físico nuclear poderá ter total liberdade de escolha de projétil e alvo para as suas experiências.

Algumas aplicações da Eletrostática

O papel dos campos elétricos é, praticamente, fundamental em todas as aplicações da Eletricidade. Não vamos considerar aqui os casos em que campos elétricos em condutores criam correntes. Trataremos de situações em que partículas carregadas no ar, num gás qualquer, ou no vácuo, adquirem movimentos que são controlados pela presença de campos elétricos.

Se uma partícula com carga Q se encontra em um campo elétrico \vec{E} , a partícula estará sujeita a uma força \vec{F} tal que:

$$\vec{F} = Q\vec{E}$$

A existência dessa força sugere imediatamente que a partícula pode ser deslocada pelo campo.

O uso de campos elétricos para movimentar partículas carregadas encontra aplicações quando as partículas têm pequena massa, pois nesse caso adquirem grande aceleração. As mais leves partículas carregadas são os prótons e os elétrons.

Como foi visto no texto anterior (aceleradores eletrostáticos) existem aceleradores capazes de acelerar essas partículas até grandes velocidades. Algumas das aplicações de feixes de prótons de altas energias consistem na indução de reações nucleares. Elétrons de alta velocidade são utilizados em tubos de televisores e em microscópios eletrônicos para a formação da imagem.

Há, no entanto, outras partículas leves que podem ser eletrizadas, como, por exemplo, gotículas e pós. Dessa possibilidade resultam muitas aplicações, entre elas os filtros eletrostáticos para pó e fumaça.

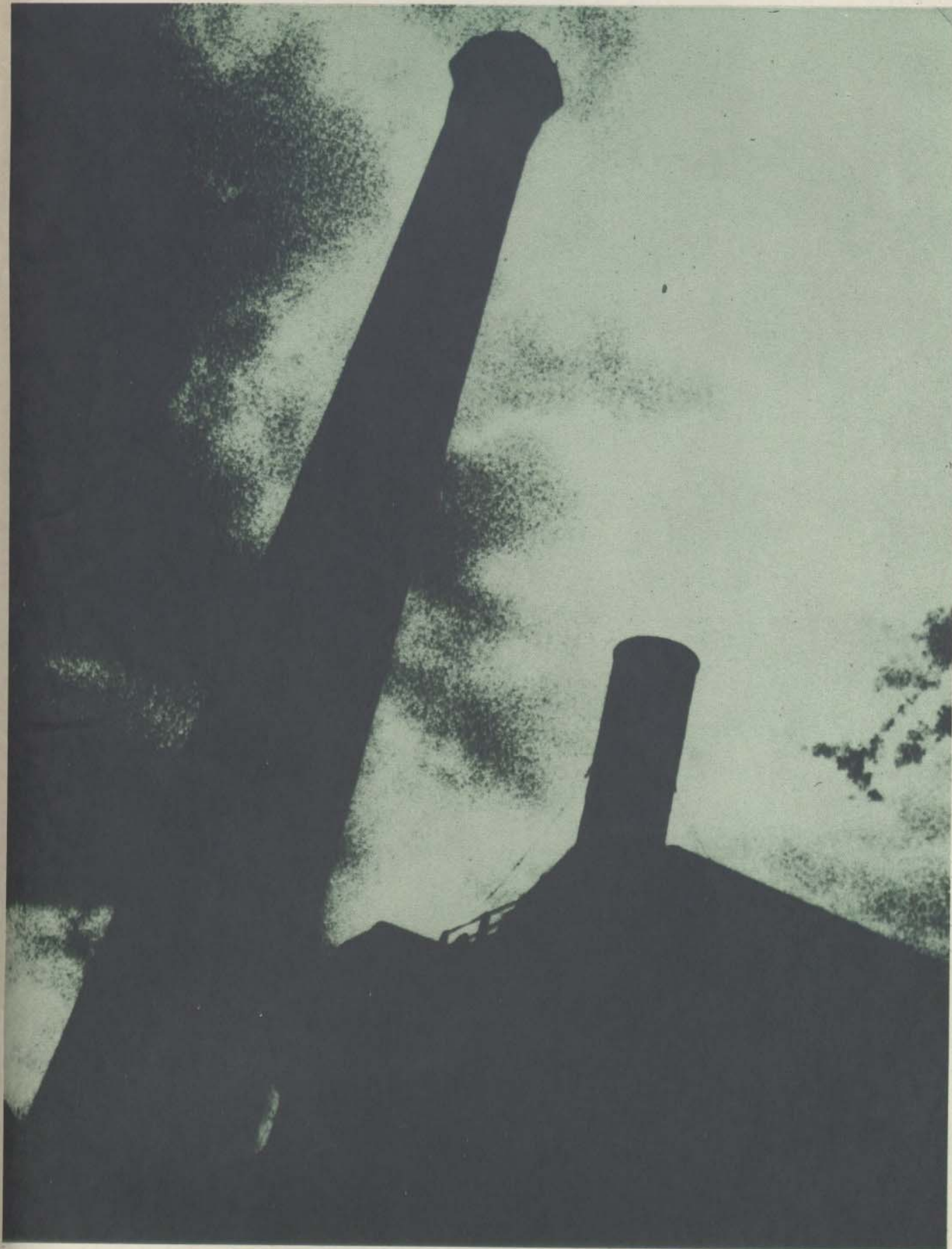
Os filtros eletrostáticos são utilizados para retirar partículas sólidas de um gás. Essa necessidade pode ocorrer numa chaminé, para evitar que fuligem e outros resíduos contaminem a atmosfera. Outra aplicação importante é a retirada de pó suspenso no ar de um recinto, por exemplo, em salas de cirurgia de hospitais. O ar, com partículas em suspensão, passa entre um fio e uma placa entre os quais há um campo elétrico muito forte, capaz de ionizar o ar. Os íons se ligam às partículas sólidas, que, sob a ação do campo elétrico, vão depositar-se na placa, purificando assim o ar.

Os fenômenos eletrostáticos têm muitas outras aplicações simples e interessantes. Por exemplo, quando se vai pulverizar tinta ou inseticida, pode-se usar um pulverizador eletricamente carregado e as partículas de tinta saem carregadas. Se o objeto a ser pintado ou a planta a ser pulverizada estão carregados com cargas opostas, as gotículas são atraídas por esses objetos, diminuindo o desperdício e distribuindo mais uniformemente o líquido.

Outra aplicação dos fenômenos eletrostáticos são as impressoras eletrostáticas. Se formos eletrizando certas regiões de uma folha de papel conforme o desenho de letras e depois espalhar-mos tinta pulverizada que adere à região eletrizada, teremos um processo não-mecânico de imprimir. Esse processo torna possível atingir grandes velocidades de impressão. O processo eletrostático de impressão é usado nas copiadoras a seco (xerografia). Sobre um tambor coberto de selênio, previamente eletrizado, projeta-se a imagem luminosa do objeto a ser copiado. A luz remove as cargas só das regiões claras, mas não modifica as escuras. Tinta em pó adere às partes eletrizadas e é transferida a uma folha de papel previamente eletrizada. Por aquecimento, a tinta em pó se funde, dando uma cópia.

Processos eletrostáticos criam às vezes problemas devidos ao acúmulo de cargas indesejáveis em objetos e instrumentos. Toda vez que objetos isolantes em contato se movem em relação a gases, podem surgir cargas estáticas. Estas podem prejudicar o funcionamento de aparelhos. Quando chegam a produzir faíscas, há o perigo de explosão, se houver combustíveis voláteis nas proximidades. Esses efeitos devem ser controlados em cada caso, para a eficiência e segurança do trabalho em fábricas, laboratórios e meios de transporte.

Apesar dos efeitos de eletrização por atrito serem conhecidos há muitos séculos, muitos de seus aspectos ainda não são bem compreendidos. Um melhor entendimento disso poderá esclarecer fenômenos mal compreendidos, como a formação da chuva, das descargas atmosféricas (raios), e explicar acidentes provocados por descargas de origem eletrostática.



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