

PROJETO
DE ENSINO
DE FÍSICA

IFUSP - Instituto de Física da Universidade de São Paulo

MEC/FENAME/PREMEN

BIBLIOTECA
INSTRUMENTAÇÃO PARA O.T.P. I
- IFUSP - SALA. EP. 210 -

eletromagnetismo

6

Aplicações do eletromagnetismo



MEC/FENAME/PREMEN

PEF — PROJETO DE ENSINO DE FÍSICA, constituído de quatro conjuntos destinados ao Ensino de 2º 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

Eletricidade

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 Egídio Alonso
Carlos Roberto Monteiro de Andrade
Ettore Michele di San Fili Bottini
João Baptista Novelli Junior

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

Desenho Industrial

Plínio Ugo Meneghini dos Santos

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

IFUSP: Caixa Postal 8 219, São Paulo — SP.

CAPA

Eletroímã usado por Joseph Henry em suas experiências.

A barra vista abaixo era envolvida por outra bobina (que não aparece na figura), onde aparecia corrente induzida.

MEC/FENAME/PREMEN

INDICE

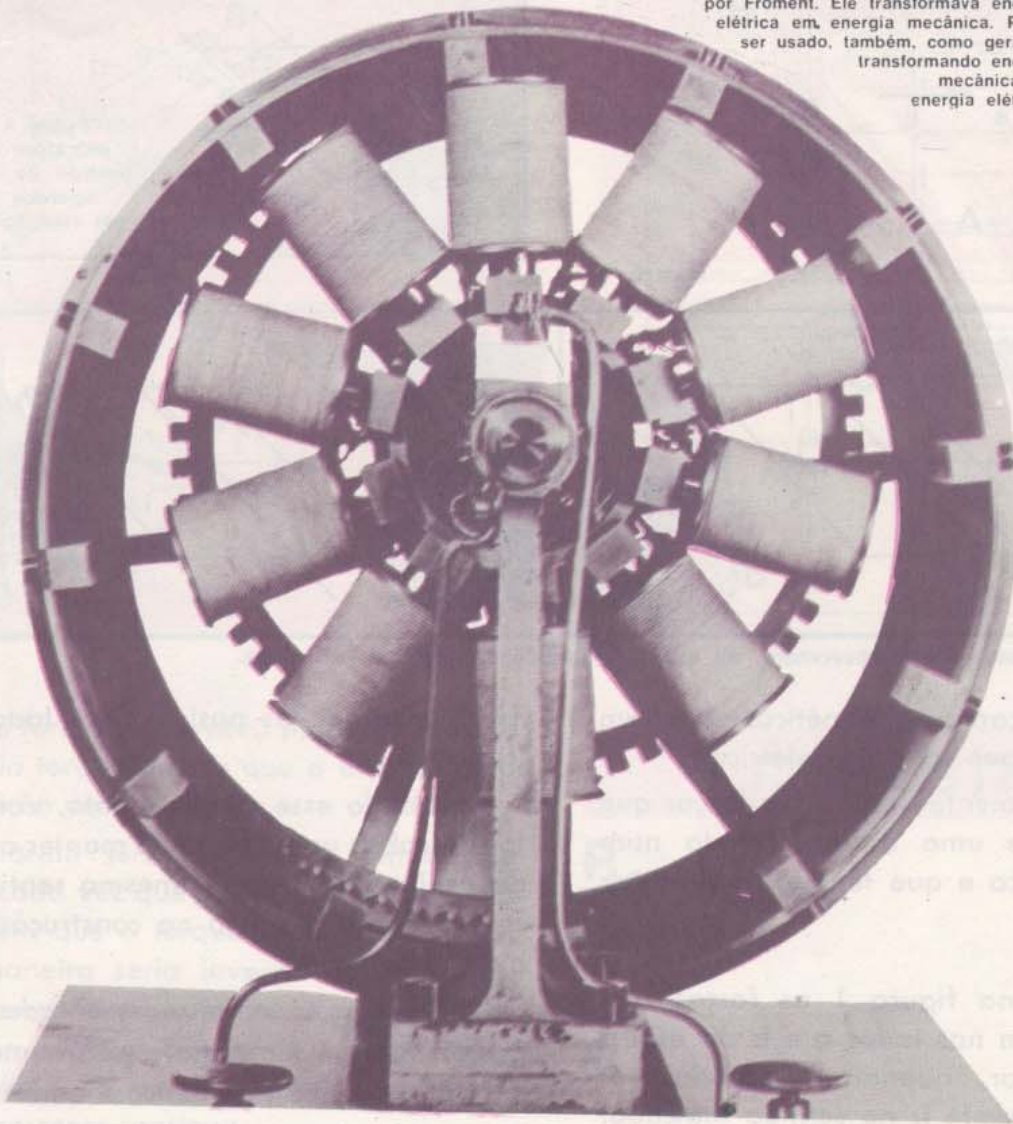
CAPITULO 6 — Aplicações do eletromagnetismo

1. Motor elétrico	6-1
2. Medidor de corrente	6-7
3. Transformador	6-12

Leitura Suplementar

A tecnologia elétrica	6-18
-----------------------------	------

Este motor elétrico foi construído em 1847 por Froment. Ele transformava energia elétrica em energia mecânica. Podia ser usado, também, como gerador, transformando energia mecânica em energia elétrica.



Aplicações do eletromagnetismo

1. Motor elétrico

Como você já sabe, um fio percorrido por uma corrente elétrica, colocado numa região em que há um campo magnético, fica sujeito à ação de forças. Quando o fenômeno foi descoberto, pensou-se logo em aproveitar essas forças para produzir trabalho.

Os dispositivos capazes de produzir trabalho à custa dessas forças são chamados **motores elétricos**.

Com o que foi estudado até aqui, você tem condições para entender como funciona e como se monta um motor elétrico simples.

Rotação de uma espira num campo magnético

Você viu no capítulo 4 que uma espira percorrida por corrente tende a girar, quando colocada de forma conveniente num campo magnético.

Por comodidade, vamos utilizar ímãs permanentes para produzir campos magnéticos;

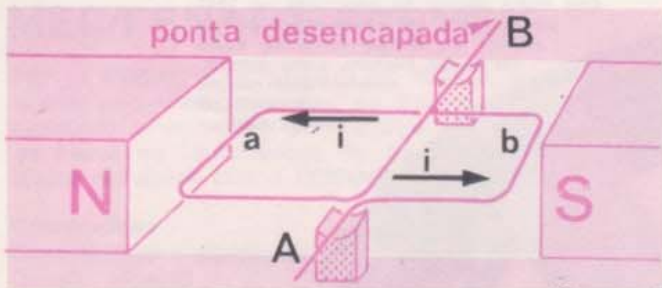


figura 1

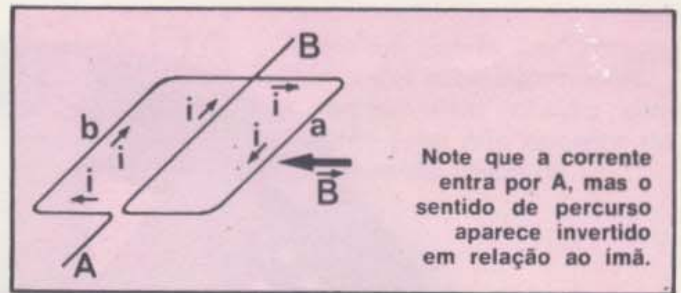


figura 2

Note que a corrente entra por A, mas o sentido de percurso aparece invertido em relação ao ímã.

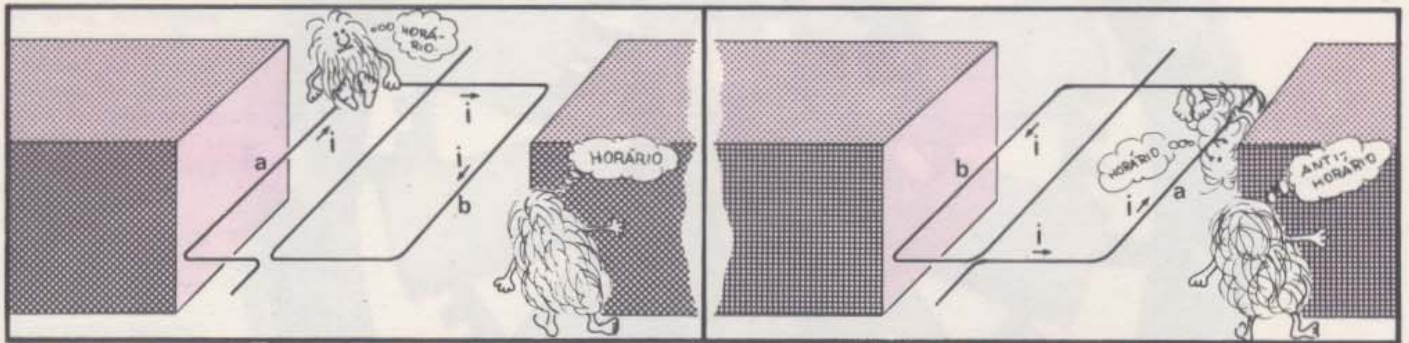


figura 3 — Note que, para o observador, na espira o sentido da corrente não muda.

entretanto, tais campos magnéticos poderiam ser produzidos por correntes elétricas.

Vamos inicialmente analisar as forças que aparecem sobre uma espira situada num campo magnético e que tendem a produzir sua rotação.

Q1 — Indique na figura 1 as forças que aparecem nos lados **a** e **b** da espira retangular, quando percorrida por uma corrente **i**, no sentido indicado.

Suponhamos que a espira, depois de girar meia volta, adquira a posição indicada na figura 2; isto é, as posições dos lados **a** e **b** se apresentam invertidas em relação às posições da figura 1.

Q2 — Nesta nova situação indique as forças que aparecem nos lados **a** e **b**.

Q3 — O sentido da rotação que estas forças tendem a produzir no caso da figura 2 é o mesmo do caso da figura 1?

Como você deve ter notado, a inversão no sentido de rotação da espira se deve a uma inversão no sentido de percurso da corrente. Neste caso, a inversão se faz em relação ao ímã, quando a espira dá um giro de

180°, trocando as posições dos lados **a** e **b** (figura 3).

Aplicando esse conhecimento, vamos tentar descobrir uma forma de manter a rotação da espira sempre num mesmo sentido. Esse será o primeiro passo na construção de um motor elétrico.

Na figura 4 estão representadas várias posições de uma mesma espira numa região em que o campo magnético é uniforme.

Q4 — Indique, na figura 4, a direção e o sentido das forças em **a** e **b** para cada posição.

Q5 — Indique, para cada posição, o sentido de rotação que as forças tendem a produzir.

Q6 — Considerando a resposta dada anteriormente, a partir de qual posição as forças invertem o sentido com que tendem a fazer girar a espira?

Q7 — Supondo que a espira continue em rotação, em que nova posição a corrente deverá ser invertida para que a rotação se mantenha no mesmo sentido?

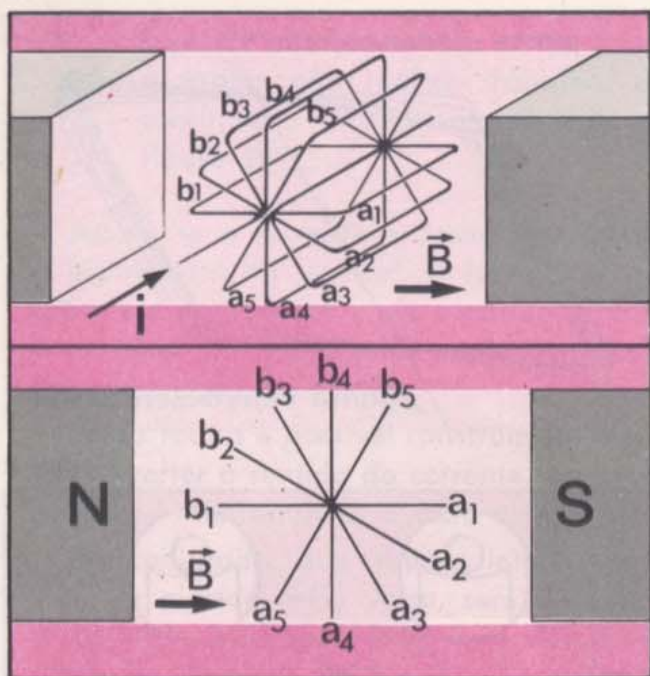


figura 4

De que forma poder-se-ia manter o mesmo sentido do torque depois que a espira passa pela posição vertical ?

Uma forma seria inverter o sentido da corrente cada vez que a espira passasse pela posição em que o torque muda de sentido. Outra maneira seria inverter o sentido do campo magnético, quando a espira alcançasse essa posição. Esta outra forma é mais complicada e, em geral, não é usada em motores de corrente contínua.

A inversão do sentido da corrente deve ser feita de forma automática, pois não seria prático fazê-lo manualmente.

O processo usado para esta inversão consiste em colocar no eixo da espira um contato girante (comutador), como mostra esquematicamente a figura 5.

Montagem do motor

No nosso motor faremos uma modificação para simplificar a montagem do comutador.

Vejamos inicialmente o que ocorreria no motor da figura 5, se um dos fios de ligação fosse interrompido no ponto A.

Q8 — Como ficaria alterada a passagem da corrente na espira em a e b?

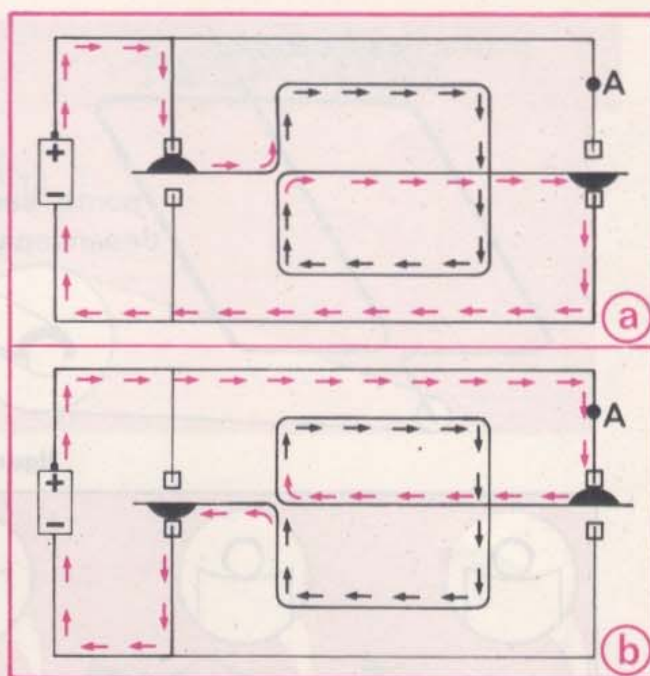


figura 5

RESPOSTAS

R₃ -

R₆ -

R₇ -

R₈ -

R₉ -

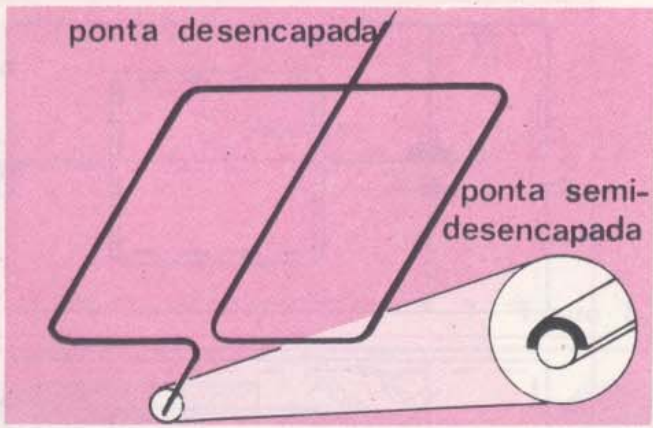


figura 6

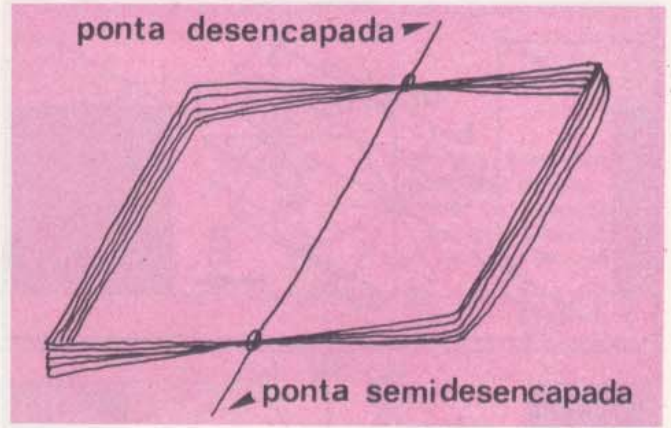


figura 8

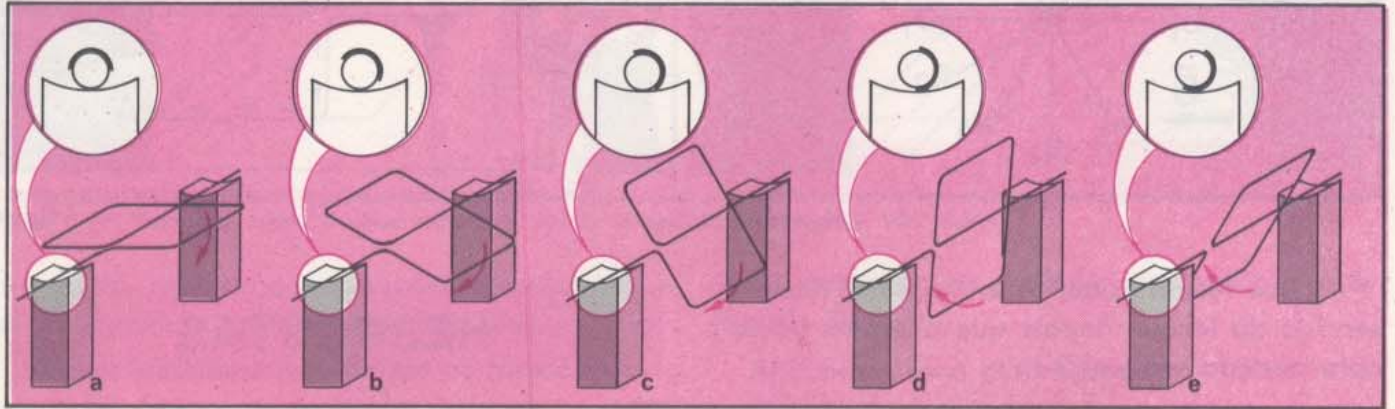


figura 7



A lei da indução que você estudou no capítulo 5 permite construir geradores de corrente elétrica. Estes geradores, também chamados dínamos, transformam energia mecânica em energia elétrica, e por essa razão desempenham um papel fundamental na civilização contemporânea. Esta fotografia mostra um dinamo simples. A roda da bicicleta faz girar um rotor (bobina móvel) dentro do campo magnético criado por um ímã fixo. Assim, aparece uma corrente induzida que acende o farol da bicicleta.

Q9 — Supondo que não haja atrito e que a espira não realize trabalho, ela continuaria girando na situação da figura 5b?

Assim, se a corrente é desligada quando a espira está na vertical, a força que age sobre ela desaparece e ela continua girando livremente até que o contato seja restabelecido depois de meia volta.

Dessa forma é possível construir um motor sem inverter o sentido da corrente, bastando para isso interrompê-la a cada meia volta.

Um comutador que apenas interrompe a corrente a cada meia volta, sem inverter o seu sentido, é de construção mais simples do que o da figura 5.

Para interromper a passagem da corrente a partir da posição vertical em que a rotação muda de sentido, vamos manter uma parte de uma das pontas da espira isolada. Ao raspar o esmalte do fio de cobre numa das pontas da espira, podemos fazê-lo de modo a manter uma lista longitudinal de esmalte, exatamente na região em que se quer desfazer o contato com a pilha (figura 6).

A figura 7 representa a espira em várias posições sobre o suporte que se liga à pilha.

Q10 — Em quais situações da figura 7 há passagem de corrente?

Para aumentar as forças que agem sobre a espira, vamos substituí-la por um conjunto de vários retângulos superpostos, percorridos por uma corrente elétrica (figura 8). Essa peça constituirá o **rotor** do motor.

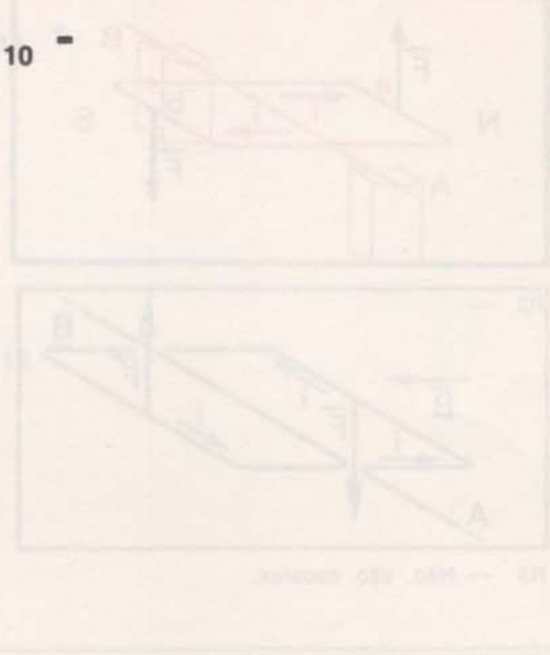
Quando o rotor é colocado no suporte de modo que se estabeleça a ligação com a pilha, ele começa a girar até que atinge uma posição próxima da vertical. Nessa posição, a lista isolante de uma das pontas interrompe a passagem da corrente elétrica; assim, ele continua a girar, movido pelo impulso inicial, até que o contato é restabelecido.

Desta forma, você construiu um motor simples que funciona ligado a uma pilha.

Existem outros tipos de motores elétricos

RESPOSTAS

R₁₀ -



O princípio do motor

Vamos estudar o princípio dos motores que funcionam com corrente alternada e podem ser ligados às tomadas de forças das residências e fábricas. Nos motores de corrente alternada pode-se aproveitar a inversão do sentido da corrente da rede de distribuição, evitando assim a necessidade de um comutador.

Existem vários tipos de motores de corrente alternada que acionam toda sorte de equipamentos, como geladeiras, liquidificadores, enceradeiras, tornos, ventiladores etc. Os motores de corrente alternada funcionam baseados em princípio semelhante ao que acabamos de estudar.

O motor que você construiu é de corrente contínua; estes motores são geralmente alimentados por pilhas ou acumuladores. O motor de partida e o motor do limpador de pára-brisas de um automóvel são motores de corrente contínua. Embora possa haver uma grande variação nos seus tamanhos e potências, todos os motores elétricos de corrente contínua funcionam de forma semelhante ao que você construiu.

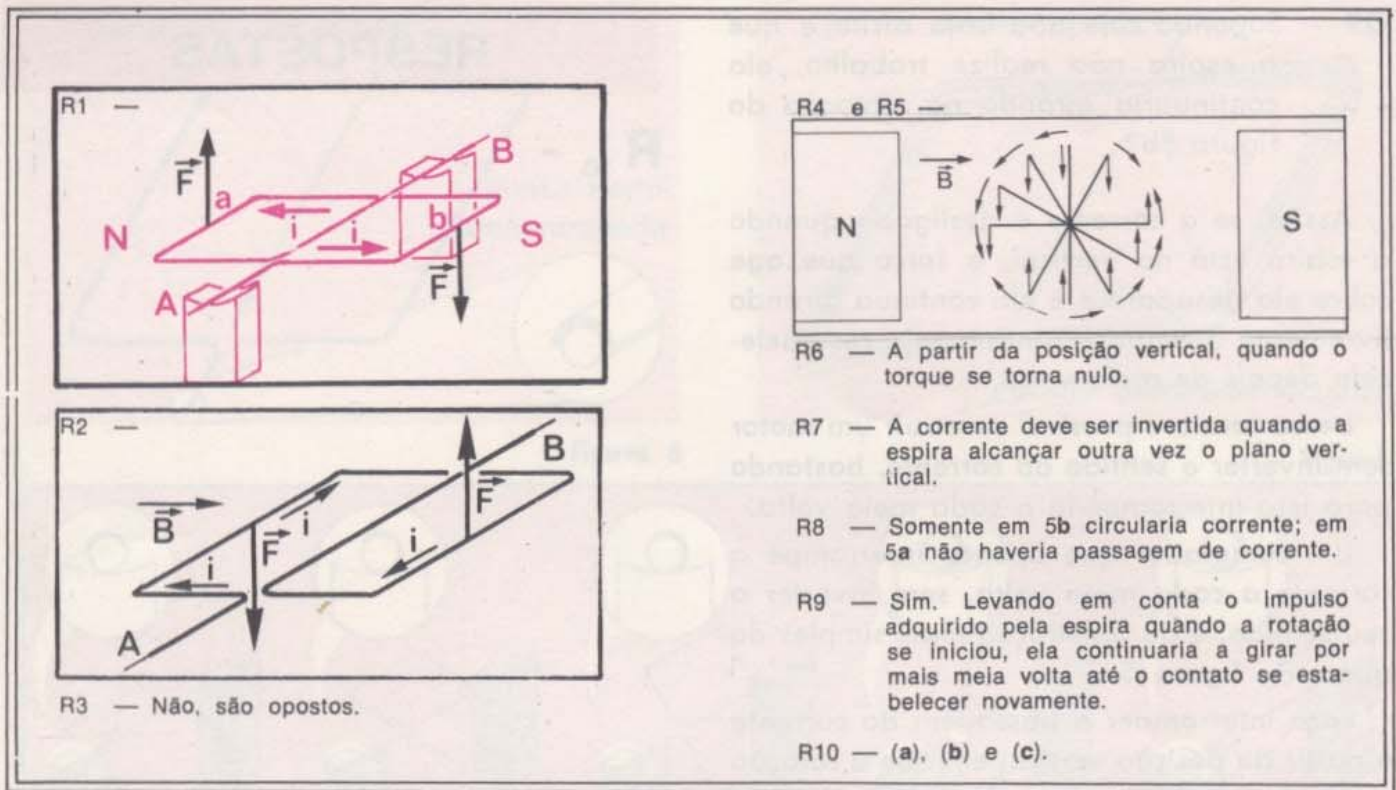
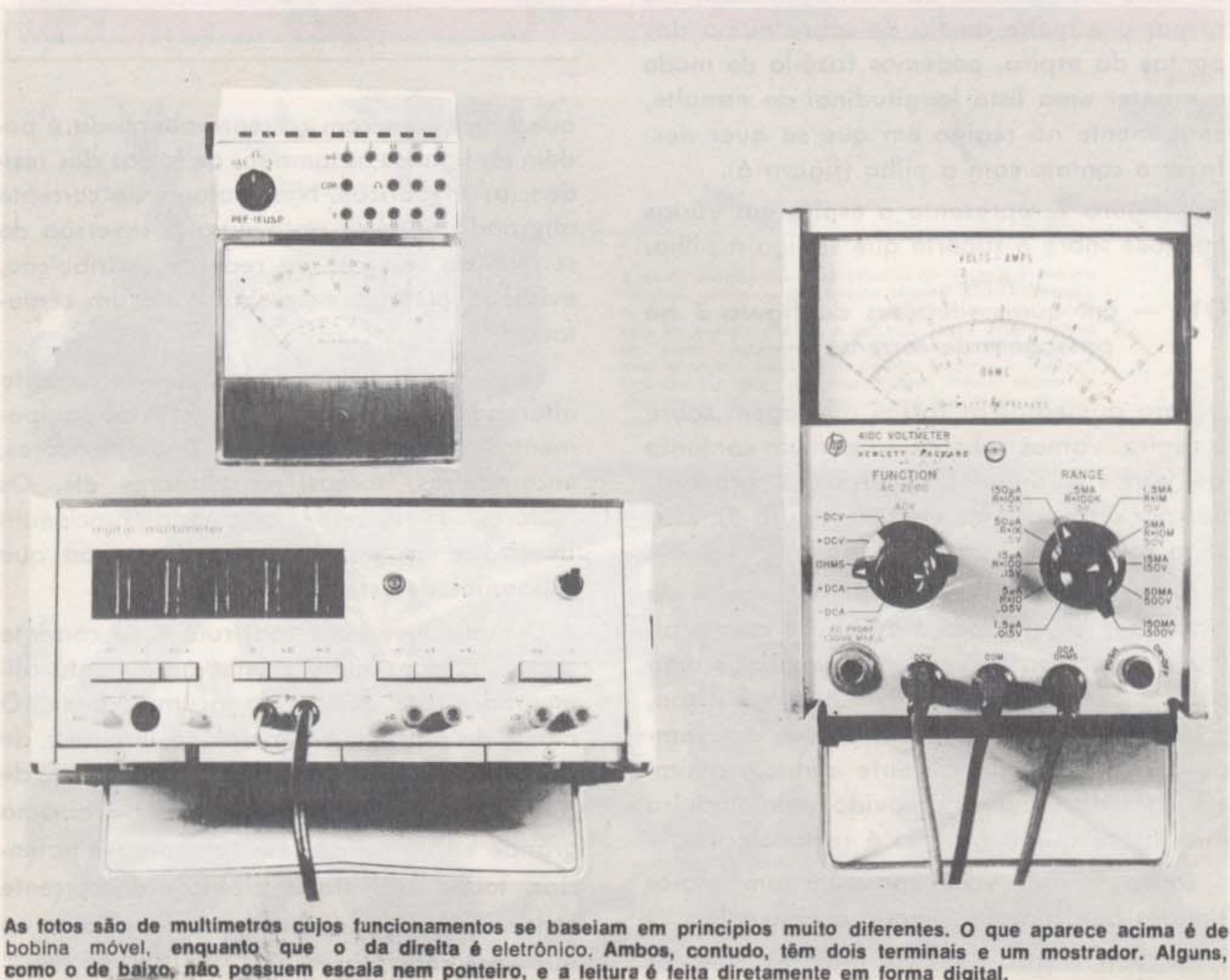


figura 9



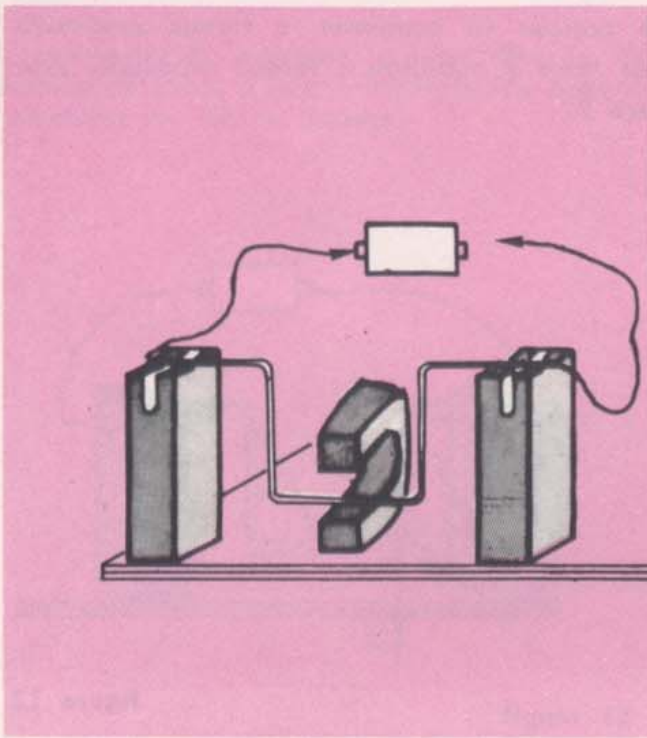


figura 10

2. Medidor de corrente

Quando você realizou experiências de eletricidade, utilizou um amperímetro para medir a corrente num circuito. Da mesma maneira, usou um voltímetro para medir a tensão entre dois pontos de um circuito, e um ohmímetro, para medir a resistência elétrica de resistores. Esses três medidores são freqüentemente associados num único instrumento, chamado multímetro (figura 9).

Ao usar o amperímetro, você não se preocupou com o seu funcionamento.

Entretanto, em algumas circunstâncias é importante conhecer como funciona um instrumento de medida. Por exemplo, para saber se o amperímetro funcionará corretamente quando imerso num campo magnético intenso ou no interior de um satélite artificial em órbita, é preciso saber como ele é construído.

O que você aprendeu sobre eletromagnetismo nos capítulos anteriores vai lhe permitir, agora, entender o funcionamento de um amperímetro.

RESPOSTAS

R₁₁ -

R₁₂ -

O princípio do medidor

Vamos estudar o princípio de funcionamento do amperímetro de **bobina móvel**.

A mesma peça de latão em forma de "U" com que você trabalhou no capítulo 4 vai ser utilizada para a explicação do funcionamento desse tipo de amperímetro.

Monte o dispositivo de latão no suporte e disponha o ímã em forma de ferradura da mesma maneira como fez no capítulo 4 (figura 10); você vai agora fazer algumas observações.

Você já verificou que, ao estabelecer a ligação com a pilha, o condutor fica submetido a uma força que tende a afastá-lo do plano vertical. Esse fato já sugere uma forma de verificar se passa ou não corrente num circuito qualquer.

Q11 - Como você poderia utilizar essa montagem para saber se passa ou não corrente num circuito?

Q12 - Com uma experiência desse tipo, você pode determinar o sentido da

A linha pontilhada representa a posição do "U" de latão, quando sobre ele não agem forças.

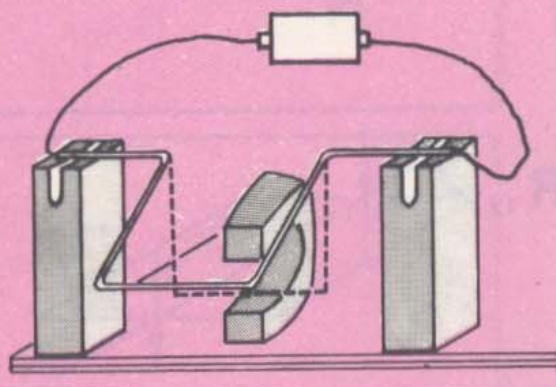


figura 11

corrente que flui através do circuito? De que forma?

Além de indicar passagem de corrente por um circuito, o amperímetro é capaz também de medir a intensidade dessa corrente.

De que forma essa montagem poderá dar uma medida da corrente?

Vamos fazer algumas considerações a respeito da força \vec{F} devida à corrente e da deflexão que ela causa no condutor, para determinar como essa deflexão varia quando o valor da corrente é alterado.

O que descrevemos a seguir não precisa ser reproduzido experimentalmente; no entanto, o seu conjunto lhe permite montar completamente essa experiência e verificar os resultados citados. A montagem requer algum cuidado e habilidade da sua parte, mas com um pouco de tempo e paciência é possível realizá-la.

O torque produzido pela força \vec{F} devida à corrente no condutor causa seu deslocamento, afastando-o do plano vertical. Nestas condições, a força-peso \vec{P} do condutor passa a contribuir também com um torque, que tem sentido oposto ao primeiro.

Q13 — Indique na figura 11 a direção e o sentido da

Na posição de equilíbrio, o torque produzido pela força \vec{F} equilibra o torque produzido pela força \vec{P} .

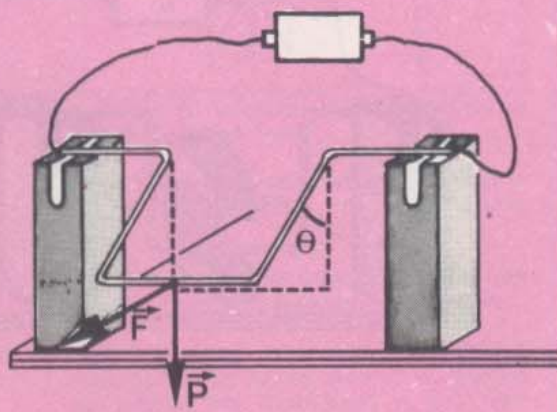


figura 12

sentido da força-peso e o sentido da rotação produzida por ela.

Q14 — Quando não passa corrente pelo condutor, quanto vale o torque produzido pela força-peso?

Q15 — Suponha que, na situação da figura 12, o torque da força-peso tem módulo igual ao da força devida à corrente, $F = P$. O que deve ocorrer com a posição do condutor de latão?

Quando os torques da força devida à corrente e da força-peso se compensam, o condutor de latão fica em equilíbrio num plano inclinado que forma um ângulo θ com a vertical (figura 12)

Se você fizer a experiência, provavelmente notará que, devido à precariedade dos contatos, o condutor não permanece fixo nessa posição, mas fica balançando.

Para melhorar os contatos elétricos, você pode interligar, por meio de um fio flexível, o condutor de latão ao fio que se liga à pilha. Essa ligação deve ser feita com um fio fino de cobre (n.º 40), enrolado em espiral, para que não aplique forças sobre o condutor (figura 13).

Dessa forma, você evitará as interrupções

A passagem de corrente se faz através do fiozinho de cobre e não é interrompida quando o condutor em "U" se desloca.

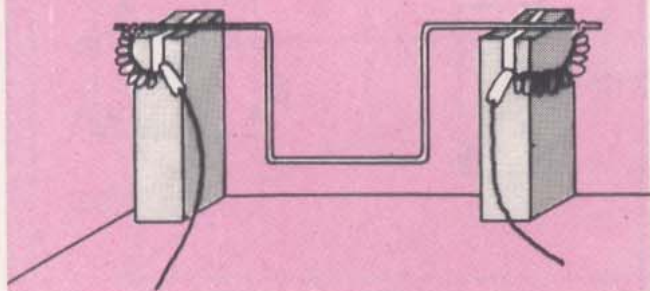


figura 13

na passagem da corrente através do contato deslizante, sem introduzir novos torques que perturbam o seu deslocamento.

Assim, o condutor deve adquirir uma posição definida de equilíbrio, tornando possível a medida do ângulo Θ .

Supondo que a corrente que passa pelo condutor foi aumentada, como deve ter variado o ângulo Θ correspondente à nova posição de equilíbrio?

Para responder a essa questão, vamos esquematizar as forças que agem sobre o condutor em "U" (figura 14).

Para simplificar a análise, vamos supor que todo o peso do condutor esteja concentrado no ponto M (veja figura 14) e que o campo magnético seja uniforme em toda a região em que o condutor pode se mover.

A posição de equilíbrio do condutor (ângulo Θ para o qual o torque da força devida à corrente anula o torque da força-peso) corresponde à situação em que a resultante das duas forças tem direção que passa pelo eixo de rotação do condutor, como na figura 14.

Nessas condições, a força resultante não exerce torque (não tende a fazer girar o condutor) e ele ficará em equilíbrio.

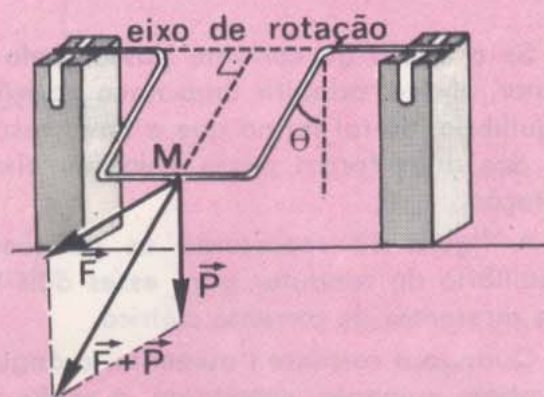


figura 14

RESPOSTAS

R₁₄ -

R₁₅ -

R₁₆ -

Q16 — Suponha que o valor da corrente i que passa pelo condutor é duplicada. O que acontece com o valor da força devida à corrente?

Se o dobro da corrente passar pelo condutor, ele vai adquirir uma nova posição de equilíbrio, de tal forma que a nova resultante das duas forças passe pelo seu eixo de rotação.

A figura 15 representa as posições de equilíbrio do condutor para esses dois valores diferentes de corrente elétrica.

Quando a corrente i aumenta, o ângulo Θ também aumenta; entretanto, a razão entre i e Θ não é constante (figura 16).

Para cada valor da corrente i haverá um ângulo Θ para o qual o sistema fica em equilíbrio; a correspondência entre ângulo e corrente permite conhecer o valor desta última, desde que se conheça o ângulo Θ .

Calibração experimental da escala

A correspondência entre i e Θ pode também ser determinada experimentalmente. Para isso fazemos que correntes de valores conhecidos percorram o condutor e medimos os correspondentes valores de Θ . Uma escala de ângulos adaptada ao dispositivo facilitará esse procedimento (figura 17).

Para usar esse dispositivo como amperímetro, podemos construir um gráfico de i em função de Θ ; o gráfico assim construído é característico do dispositivo.

Essa operação é chamada de **calibração da escala** do medidor de corrente; a calibração permite determinar o valor de uma corrente desconhecida a partir da medida do ângulo Θ correspondente.

Podemos também ler diretamente o valor da corrente i sem necessidade de medir o ângulo Θ ; basta, para isso, marcar sobre a escala de ângulos os valores de corrente correspondente a cada posição de equilíbrio (figura 18).

É claro que o seu dispositivo não fornece resultados com boa precisão, mas ele se baseia nos mesmos princípios do funcionamento dos amperímetros de bobina móvel.

6-10

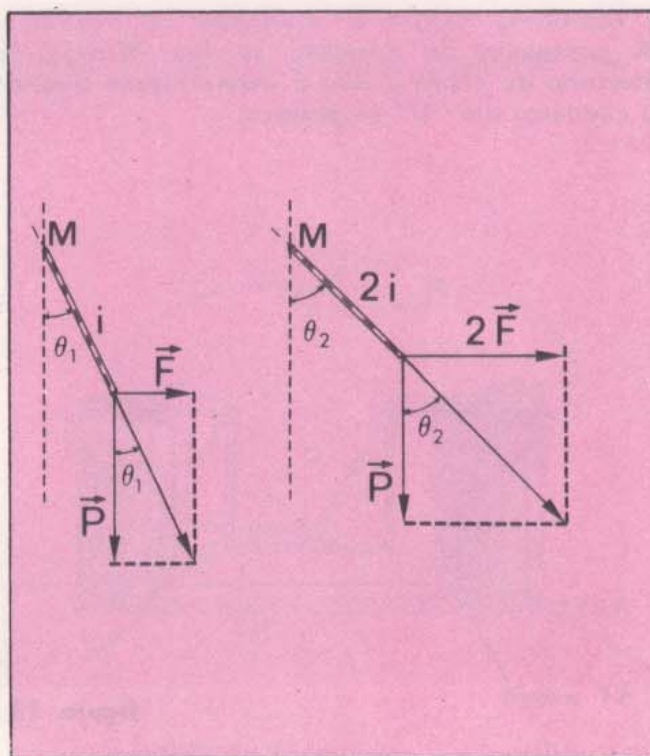


figura 15

Observe que, quando a corrente i é muito grande, o ângulo Θ varia muito pouco com a variação da corrente. Você pode notar, olhando a figura 16, que os valores de corrente se concentraram no final da escala, fornecendo leituras cada vez menos precisas.

Os amperímetros de uso comum têm uma escala linear; isto é, a deflexão do ponteiro (ângulo Θ) é proporcional ao valor de i . Nesse caso, a montagem do amperímetro é diferente da que utilizamos; as linhas de campo magnético têm uma configuração radial, e, em vez de um condutor em forma de "U", existe uma bobina quadrada com muitos fios (figura 19). Além disso, o torque que equilibra a força devida à corrente é produzido por uma mola, ficando o funcionamento independente da força da gravidade.

Os amperímetros com escala linear permitem leituras de precisão uniforme em toda a escala, que vai de zero a um valor máximo. Para permitir medidas em intervalos maiores, os amperímetros apresentam várias escalas. A cada escala corresponde uma associação conveniente de resistores dentro do medidor.

Outras combinações de resistores permitem utilizar um instrumento desse tipo como voltímetro.

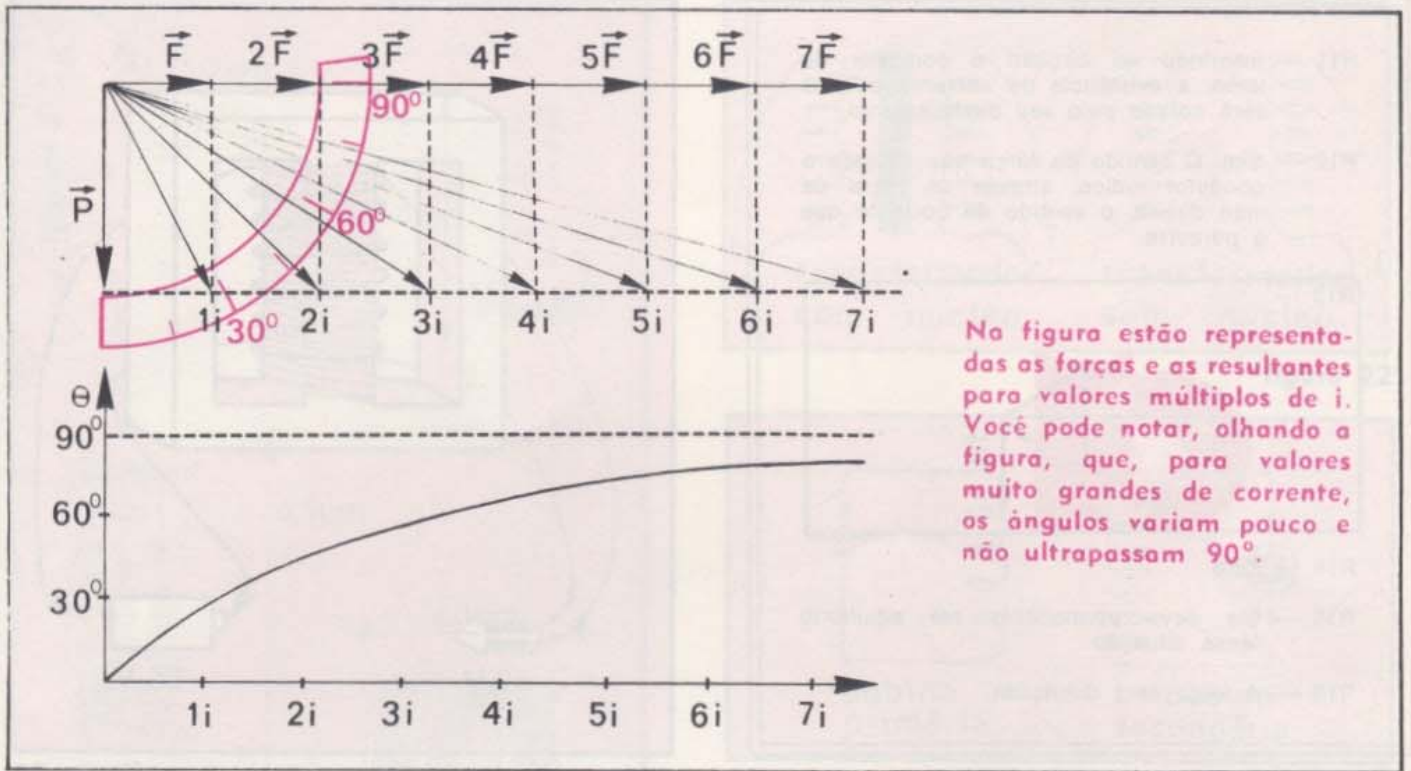


figura 16

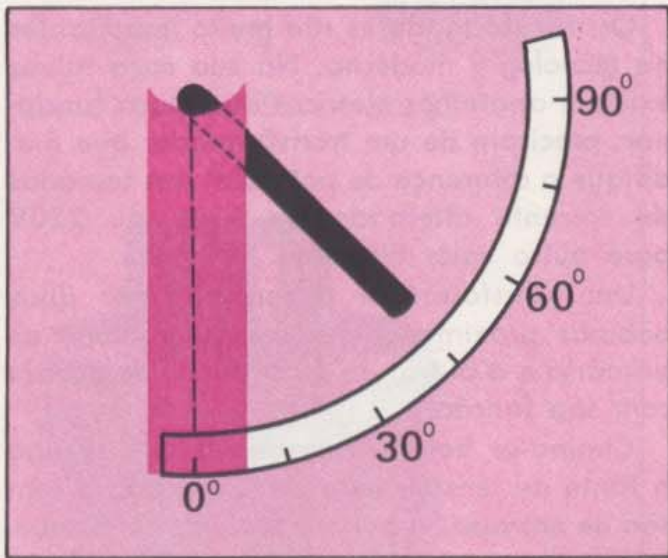


figura 17

figura 18

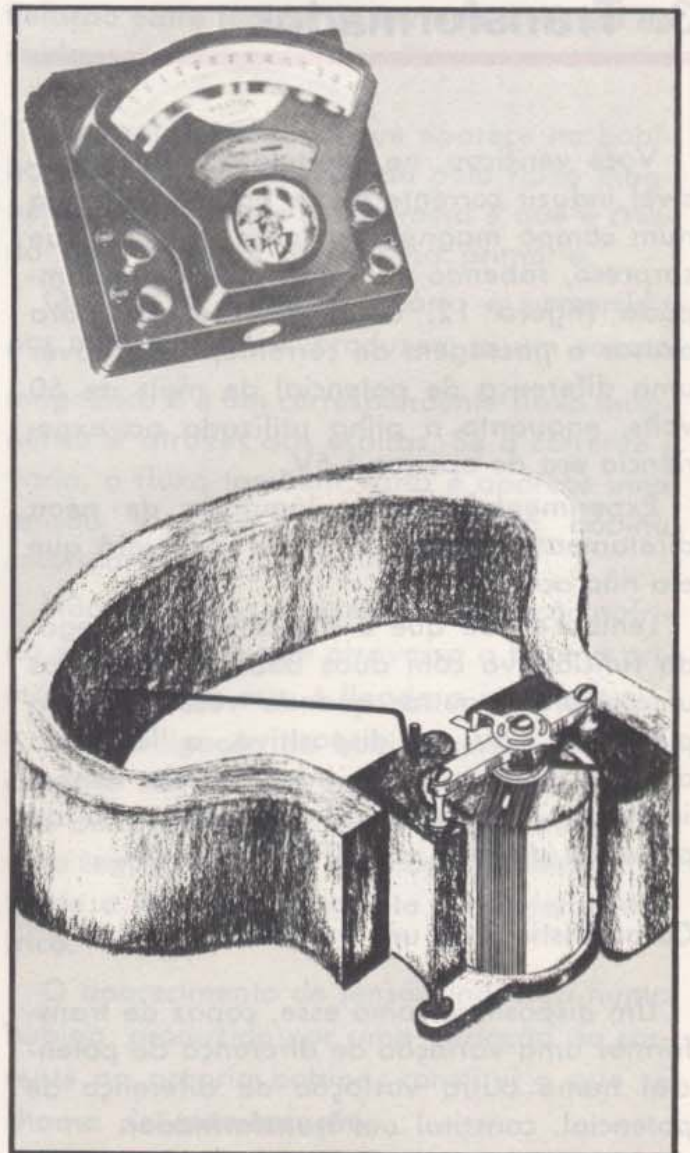
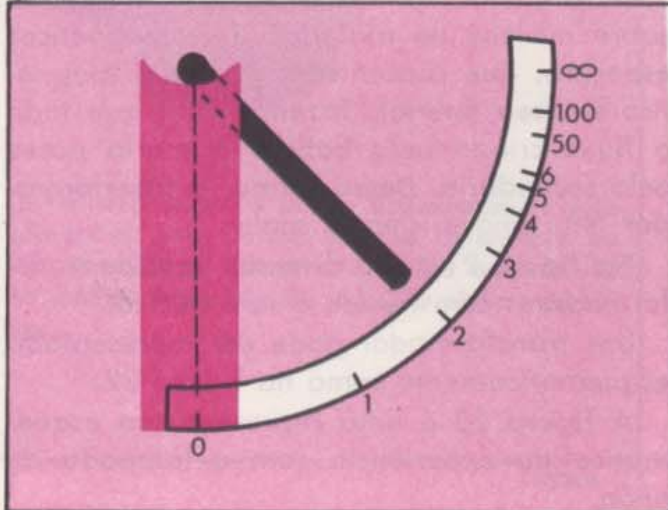
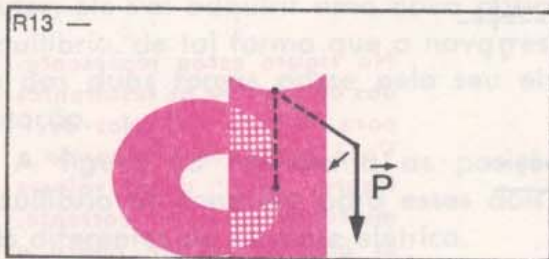


figura 19

R11 — Inserindo no circuito o condutor de latão, a existência de corrente elétrica será notada pelo seu deslocamento.

R12 — Sim. O sentido da força que desloca o condutor indica, através da regra da mão direita, o sentido da corrente que o percorre.



R14 — Zero.

R15 — Ele deve permanecer em equilíbrio nessa situação.

R16 — A força será duplicada.

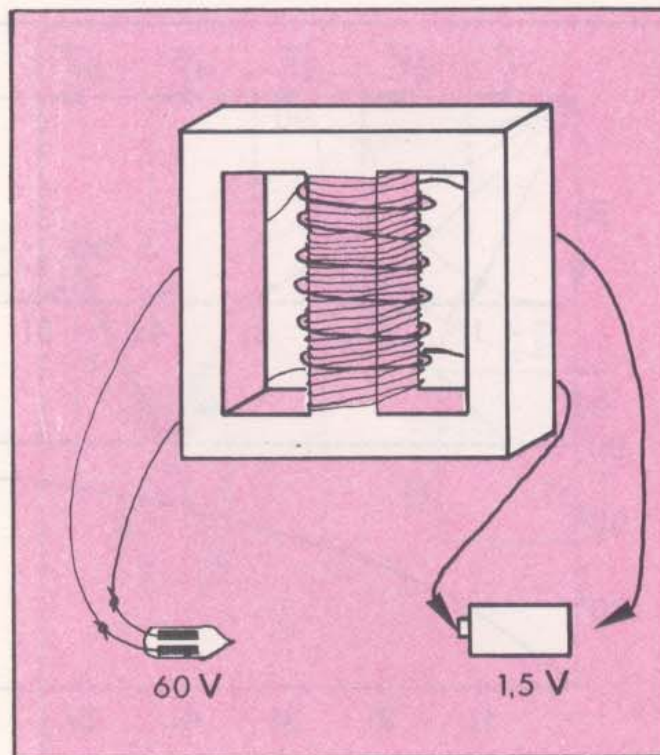


figura 20

3. Transformador

Você verificou, no capítulo 5, que é possível induzir corrente numa bobina colocada num campo magnético. Agora, talvez fique surpreso, sabendo que, para acender a lâmpada (figura 12, capítulo 5) usada para acusar a passagem de corrente, deve haver uma diferença de potencial de mais de 60 volts, enquanto a pilha utilizada na experiência era de apenas 1,5V.

Experimente ligar a lâmpada de néon diretamente à pilha de 1,5V; você verá que ela não acende.

Lembre-se de que o dispositivo empregado funcionava com duas bobinas enroladas uma sobre a outra; quando você ligava a pilha de 1,5V ao dispositivo, a lâmpada acendia durante curto intervalo de tempo, indicando que aparecia uma diferença de potencial de mais de 60V (figura 20).

Características de um transformador

Um dispositivo como esse, capaz de transformar uma variação de diferença de potencial numa outra variação de diferença de potencial, constitui um **transformador**.

Os transformadores são muito importantes na tecnologia moderna. Na sua casa talvez existam aparelhos elétricos que, para funcionar, precisam de um transformador que modifique a diferença de potencial das tomadas de corrente alternada de 110V ou 220V para outro valor diferente.

Um transformador é formado por duas bobinas próximas: uma recebe o nome de primária e a outra, de secundária, de acordo com sua função.

Chama-se **bobina primária** a que se liga à fonte de tensão: nela está aplicada a tensão de entrada. A **bobina secundária** é aquela em que aparece a tensão modificada, ou tensão de saída.

Geralmente as bobinas são enroladas sobre núcleos de materiais ferromagnéticos especiais, que concentram o campo magnético em seu interior, fazendo com que todo o fluxo criado pela bobina primária passe pela secundária. Dessa forma, o transformador tem uma eficiência maior.

Na figura 21 estão diversos tipos de transformadores com núcleo e sem núcleo.

Um transformador pode ser representado esquematicamente como na figura 22.

A figura 23 é uma representação esquemática da experiência com a lâmpada de néon.

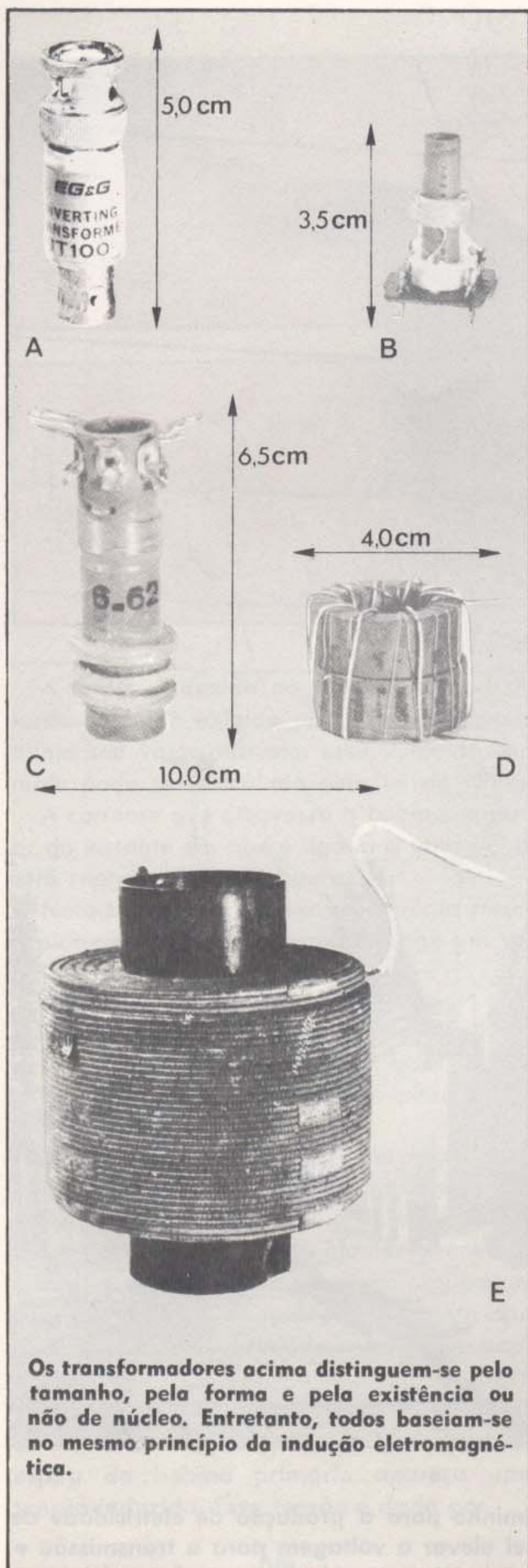


figura 21

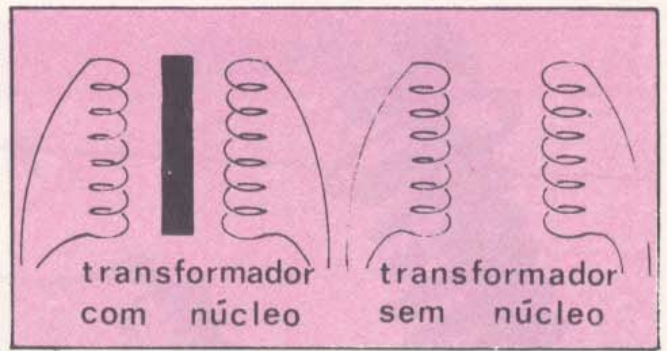


figura 22

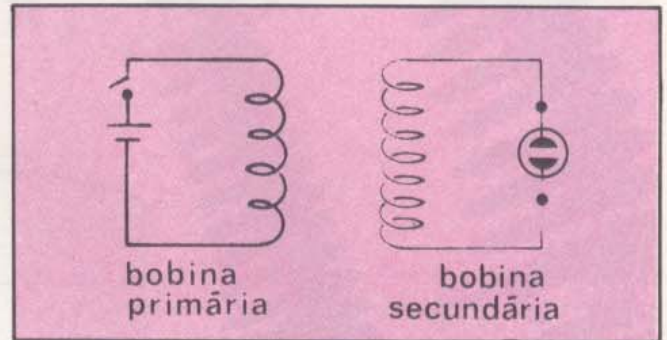


figura 23

Relação entre tensão de entrada e tensão de saída

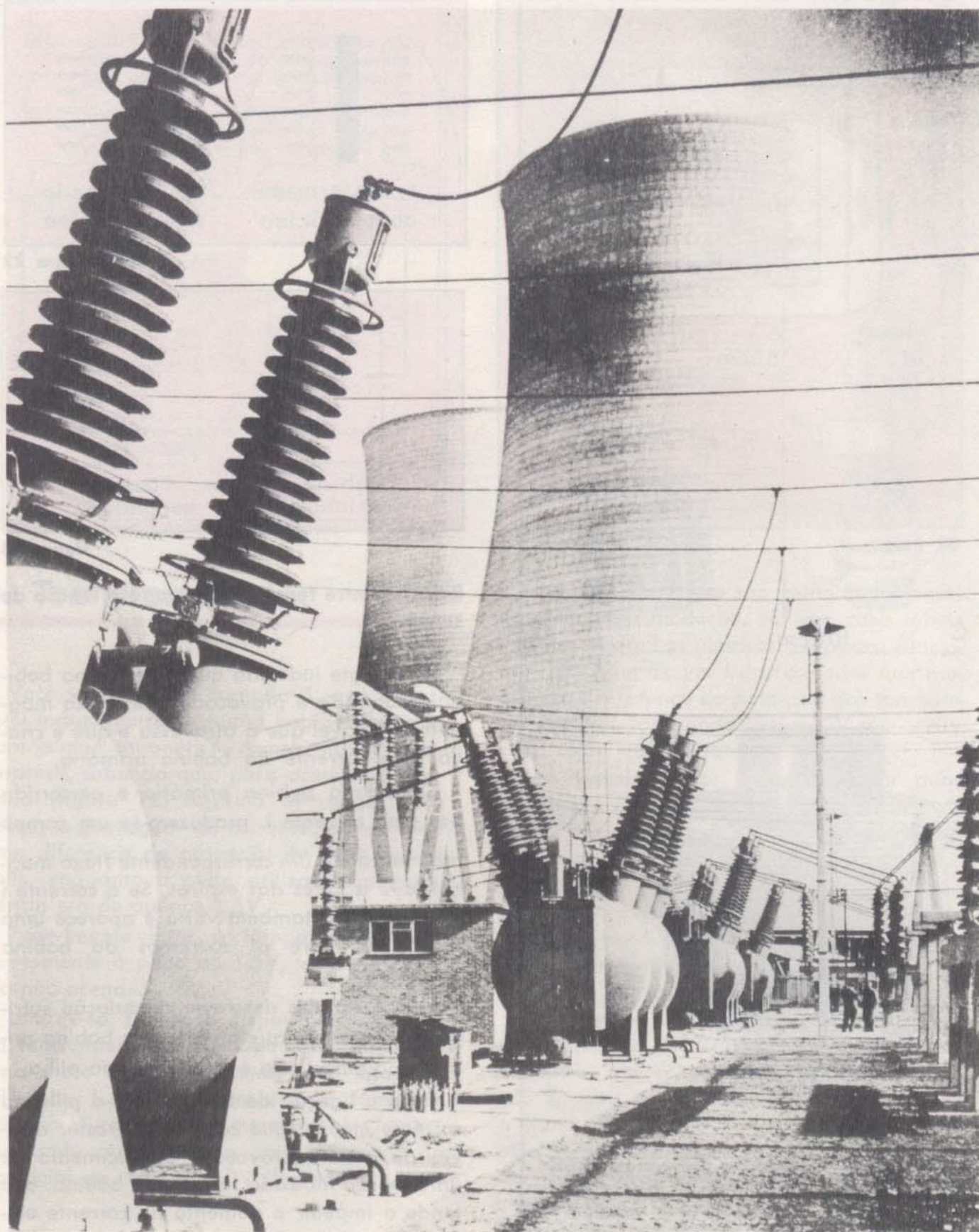
A corrente induzida que aparece na bobina secundária é provocada pelo fluxo magnético variável que a atravessa e que é criado pela corrente da bobina primária.

Quando a bobina primária é percorrida por uma corrente i , produzem-se um campo magnético \vec{B} e um correspondente fluxo magnético Φ através das espiras. Se a corrente i varia, o fluxo também varia e aparece uma tensão V entre os extremos da bobina secundária.

Não é simples descrever a variação sofrida pela corrente que atravessa a bobina primária, quando esta é ligada a uma pilha.

Feita a ligação da bobina com a pilha, a corrente elétrica que começa a circular através da bobina provoca o aparecimento de uma tensão induzida na própria bobina, que tende a impedir o aumento da corrente elétrica.

O aparecimento de tensão induzida numa bobina, produzido por uma variação da corrente na própria bobina, constitui o que se chama de **auto-indução**.



A descoberta da indução eletromagnética abriu caminho para a produção de eletricidade de alta voltagem; os transformadores tornaram possível elevar a voltagem para a transmissão e reduzi-la depois para o uso comercial e doméstico. Acima, você pode ver transformadores em uma usina elétrica.

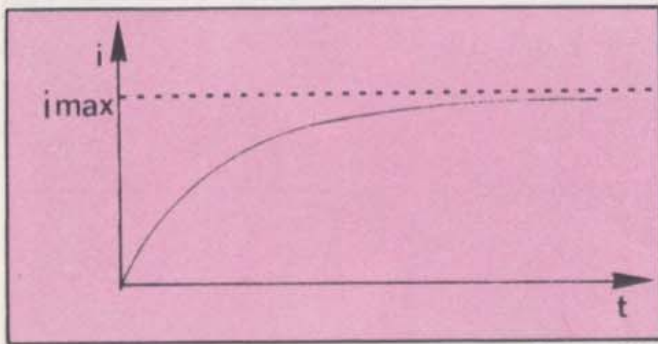


figura 24

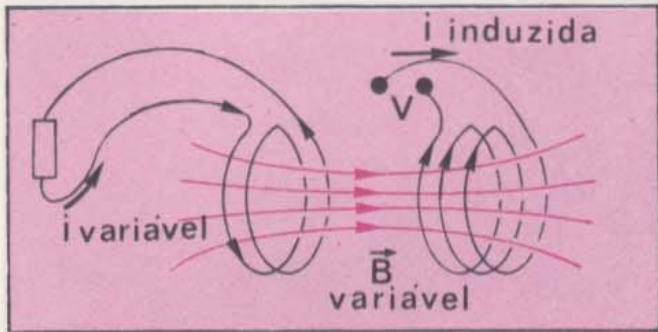


figura 25

A tensão induzida na própria bobina retarda o tempo exigido para que a corrente atinja seu valor máximo; esse valor da corrente pode ser calculado pela lei de Ohm.

A corrente que atravessa a bobina, a partir do instante em que é ligada a uma pilha, está representada na figura 24.

Nota-se que, no começo, a corrente cresce rapidamente e, com o tempo, atinge um valor constante.

Q17. — O que você poderá dizer do fluxo magnético criado por essa bobina, quando ela é ligada à pilha?

Na experiência realizada no capítulo 5, a lâmpada permanecia acesa somente durante um pequeno intervalo de tempo, imediatamente posterior ao momento em que ela era ligada à pilha; isto é, a lâmpada se acendia apenas enquanto a corrente que fluía pela bobina primária aumentava rapidamente.

Enquanto o fluxo magnético está variando a auto-indução faz com que em cada espira da bobina primária apareça uma tensão induzida. Essa tensão é dada por

$$V_p = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

RESPOSTAS

R₁₇ -

R₁₈ -

Para uma bobina formada por n espiras, a tensão total induzida na bobina é, então, $V = nV_p$. Esta tensão induzida é, no início, igual à tensão da pilha que se ligou à bobina primária.

Portanto,

$$n \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = nV_p = V \text{ ou } \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{V}{n}$$

Num transformador, o fluxo que está atravessando cada espira da bobina primária é igual ao fluxo que está atravessando cada espira da bobina secundária, como se pode ver na figura 25.

Assim, para cada espira, valem em cada instante:

$$\Phi_{\text{primária}} = \Phi_{\text{secundária}}$$

$$\left(\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}\right)_{\text{primária}} = \left(\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}\right)_{\text{secundária}}$$

Isto é, através de cada espira da bobina secundária há uma variação de fluxo por unidade de tempo igual a $\Delta\Phi/\Delta t$.

Q18 — Como se relaciona o valor $\Delta\Phi/\Delta t$ com a diferença de potencial V_s que surge para cada espira da bobina secundária?



O aperfeiçoamento do transformador possibilitou a transmissão de energia elétrica a grandes distâncias porque ele permite elevar a voltagem do gerador, o que diminui as perdas na linha, e depois reduzi-la novamente, para utilização doméstica e industrial.

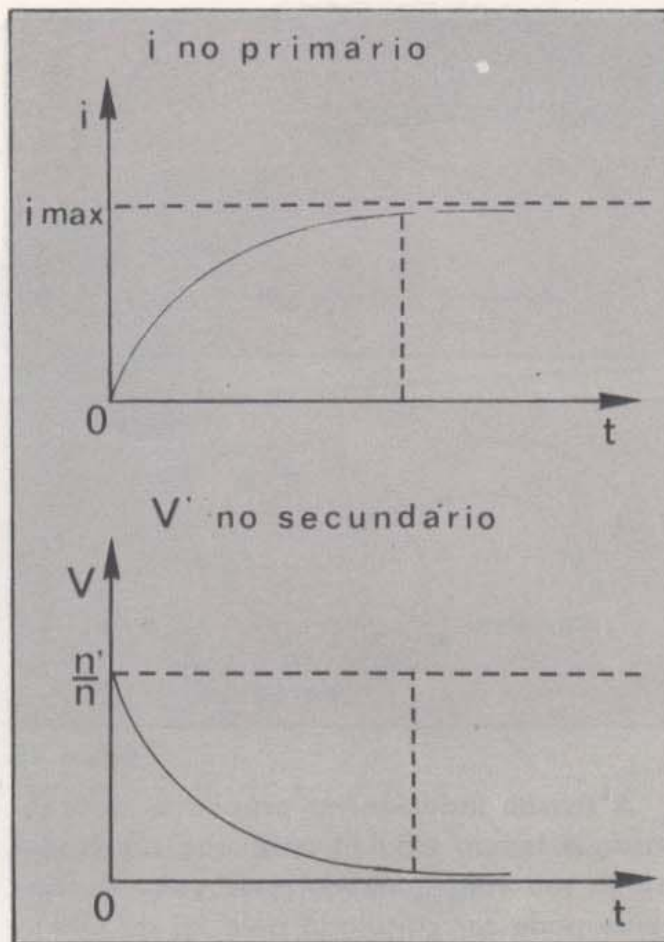


figura 26

Q19 — Se a bobina secundária tiver n' espiras, qual será o valor da diferença de potencial V' , entre os extremos da bobina secundária?

Q20 — Que resultado se obtém relacionando $\Delta\Phi/\Delta t$ com V' e n' ?

Assim, podemos relacionar a diferença de potencial V aplicada à bobina primária com a diferença de potencial V' que surge na secundária:

$$\frac{V}{n} = \frac{V'}{n'} \text{ ou } V' = V \frac{n'}{n} \quad (1)$$

Ou seja, a diferença de potencial nos extremos da bobina secundária é igual ao produto da diferença de potencial nos extremos da bobina primária pela relação entre o número de espiras da secundária e da primária.

Q21 — Na experiência com a lâmpada de 6-16

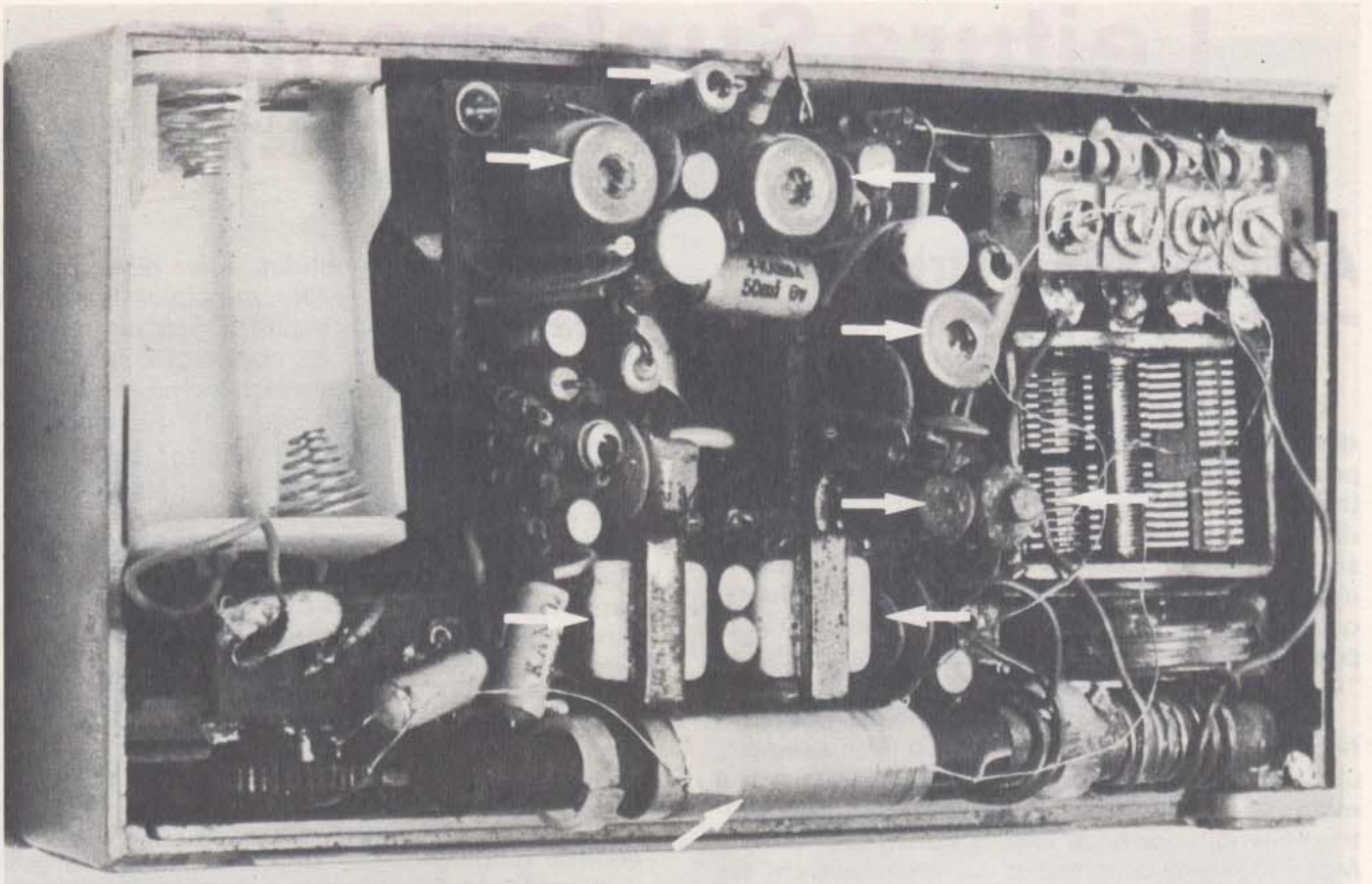
néon, a bobina primária tem 10 espiras e é ligada a uma pilha de 1,5V. Supondo que na secundária se atinge uma diferença de potencial de 100V, qual deve ser o número de espiras da secundária?

A relação (1) vale para instantes muito próximos do instante em que a pilha é ligada ao primário (bobina primária). Com o passar do tempo, a tensão v' no secundário (bobina secundária) vai decrescendo e se aproxima de zero, quando a corrente se aproxima de $i_{\text{máx}}$ (figura 26).

Na sua experiência, a lâmpada de néon permanece acesa durante um tempo tão curto que você talvez tenha dificuldade para medir. Deste fato pode-se concluir que o valor da tensão V' é superior a 60V, durante um tempo também muito curto.

Se considerarmos a resistência ligada à bobina secundária, esta será percorrida por uma corrente.

Um transformador permite transformar



Transformadores em um rádio de pilhas comum.

tensões variáveis em outras tensões variáveis.

Qual será a relação entre a corrente elétrica do primário e a do secundário?

Aplicando o princípio da conservação da energia e estudando este problema em detalhe, concluímos que, em cada instante, a potência que o primário absorve é cedida à resistência pelo secundário; portanto, $V_i = V'_i$. Dessa forma, se um transformador eleva a tensão, reduz a corrente.

Para obter correntes de grande intensidade, como, por exemplo, em máquinas de soldar, utilizam-se transformadores redutores de tensão.

O desenvolvimento dos transformadores deu grande impulso à distribuição de energia elétrica sob forma de corrente alternada. Com os transformadores é possível transportar energia elétrica em linhas de alta tensão e utilizá-la com tensões baixas que são mais convenientes e seguras. Esse procedimento possibilita grande economia no processo de distribuição da energia elétrica.

RESPOSTAS

R₁₉ -

R₂₀ -

R₂₁ -

Leitura Suplementar

Adaptado do livro **The Feynman Lectures on Physics**, de R. P. Feynman, R. B. Leighton e M. Sands — Adison Wesley Publishing Company.

A tecnologia elétrica

Quando Faraday tornou pública sua notável descoberta de que um fluxo magnético variável produz uma força eletromotriz, perguntaram-lhe (tal como se pergunta a qualquer um, quando descobre um novo fato da natureza): "Para que serve?" Tudo o que havia descoberto era o fato ímpar de que se produzia uma fraca corrente, quando ele movia um fio perto de um ímã. Qual poderia ser a "utilidade" disso? Sua resposta foi: "Qual é a utilidade de um bebê recém-nascido?"

Pensemos agora nas tremendas aplicações práticas que sua descoberta permitiu. Por exemplo, um anel giratório num campo alternado é um motor de indução. Esse anel tem um torque muito pequeno; você pode fazê-lo parar, com a mão. Mas, para um bom motor, as coisas devem ser mais bem ajustadas: não se deve "desperdiçar" tanto campo magnético no ar. Então, em primeiro lugar, trata-se de concentrar o campo, usando ferro. Não discutimos como o ferro faz isso, mas sabemos que ele pode tornar o campo magnético dezenas de milhares de vezes mais forte do que o obtido com as espiras de cobre sozinhas. Em seguida, percebe-se que seria melhor se os espaços entre as peças de ferro fossem menores; para conseguir isso, coloca-se ferro nos anéis girantes. Tudo é arranjado de forma a produzir maiores forças e maior eficiência — isto é, para converter energia elétrica em energia mecânica — até que o "anel" não possa mais ser parado pela força da sua mão.

Esse problema de preencher as lacunas é fazer a coisa trabalhar de maneira mais prática pertence à Engenharia. É uma situação que requer sérios estudos de projetos, mesmo sem contar com a existência de novos princípios básicos dos

quais as forças sejam obtidas. Além disso, há um longo caminho para ir dos princípios básicos a um projeto prático e econômico. E é exatamente tal minúcia no projeto de engenharia que torna possível algo tão espetacular como a Represa de Ilha Solteira e tudo o que a ela se refere.

Que é a Represa de Ilha Solteira? Um grande rio é interceptado por uma parede de concreto. Mas que parede! Sua forma, de uma curva perfeita, foi cuidadosamente calculada de modo que a menor quantidade possível de concreto detivesse todo um rio. Vai-se espessando para o fundo, assumindo uma forma maravilhosa que agrada aos artistas, mas que os engenheiros podem apreciar, porque sabem que tal espessamento está relacionado com o aumento da pressão proporcional à profundidade da água. Mas estamos nos afastando da eletricidade.

Em seguida, a água do rio é desviada por uma enorme tubulação. Isto só já constitui uma bela realização da Engenharia. A tubulação encaminha a água para uma "roda de água" — uma enorme turbina — e faz a roda virar (outra proeza da Engenharia). Mas para que girar as rodas? Elas estão acopladas a um emaranhado de ferro e cobre primorosamente intrincado, retorcido e entrelaçado, com duas partes: uma delas gira e a outra não. Toda uma mistura complexa de alguns materiais, na maioria ferro e cobre, mas também papel e verniz para isolamento. Algo monstruoso que gira. Um gerador. De um lado do emaranhado de cobre e ferro saem algumas peças especiais de cobre. A represa, a turbina, o ferro, o cobre, todos ali colocados para fazer com que algo especial surja em algumas barras de cobre — uma força eletromotriz. Daí as barras de cobre se afastam um pouco e se enrolam várias vezes em torno de uma outra peça de ferro num transformador: sua tarefa está, então, concluída.

Mas, em torno da mesma peça de ferro, enrola-se outro cabo de cobre que não tem ligação alguma com as barras que vêm do gerador; elas são influenciadas, apenas porque passam perto dele — para obter sua força eletromotriz. O transformador converte potência de voltagens relativamente baixas, necessárias para o projeto eficiente do gerador, em voltagens muito altas, que são as melhores para transmissão eficiente de energia elétrica através de longos cabos.

E tudo deve ser altamente eficiente — não pode haver desperdício nem perda. Por quê? Porque a energia que vai servir a uma metrópole caminha por aí. Se uma pequena fração é per-

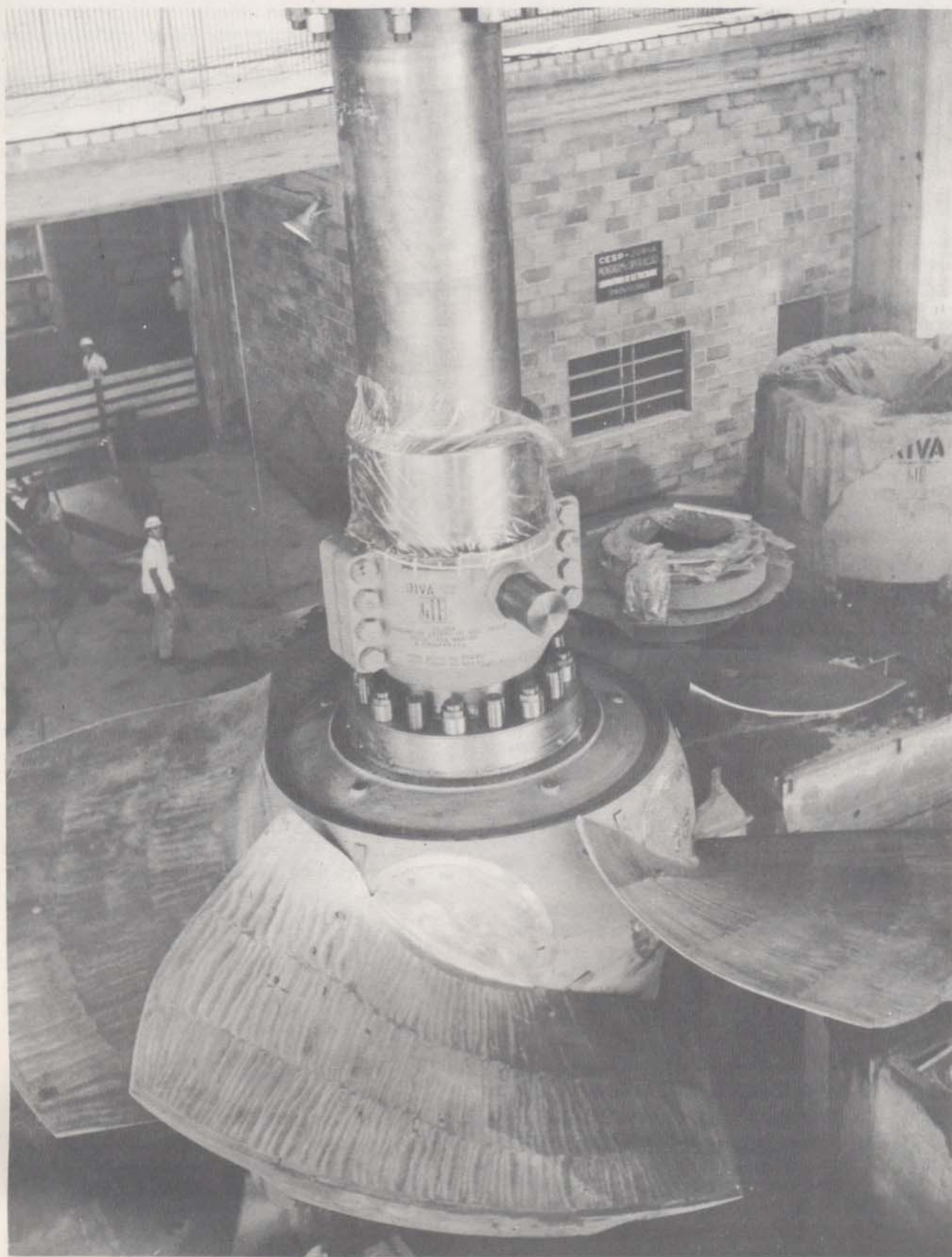
R17 — Inicialmente, o fluxo cresce rapidamente com o tempo, e, depois de algum tempo, fica constante.

R18 — $\Delta\phi/\Delta t = V_n$

R19 — $V' = n'V_n$ ou $V' = n' \Delta\phi/\Delta t$.

R20 — $\Delta\phi/\Delta t = V'/n'$.

R21 — 666 espiras.



A fotografia mostra uma turbina da usina hidrelétrica de Jupuí; a água faz girar a turbina que movimenta os imensos rotores dos dinamos. Jupuí e Ilha Solteira formam o complexo hidrelétrico de Urubupungá.

didada — um ou dois por cento —, imagine a energia deixada para trás! Se um por cento da energia fosse deixada no transformador, ela seria retirada de outra forma. Se ela aparecesse como calor, rapidamente fundiria tudo. Naturalmente há aqui uma pequena ineficiência, mas bastam algumas bombas que fazem circular óleo pelo radiador para evitar que o transformador se aqueça.

Saem da Represa de Ilha Solteira algumas dúzias de barras de cobre — barras de cobre muito longas, da espessura, talvez, do seu punho, que caminham por centenas de quilômetros em todas as direções. São insignificantes barras de cobre transportando a energia de um rio gigante. Adiante, as barras são divididas em mais barras; logo após, vão para mais transformadores, às vezes para grandes geradores que recriam a corrente noutra forma; outras vezes, para máquinas girantes para atender a grandes objetivos industriais; vão para mais transformadores, depois mais subdivisões e ramificações, até que finalmente o rio está espalhado pela cidade inteira — acionando motores, produzindo calor, gerando luz, fazendo funcionar engenhocas. O milagre de luzes quentes provenientes da água fria a mil quilômetros de distância — tudo feito com peças de cobre e ferro dispostas convenientemente. Grandes motores para laminar aço ou motores minúsculos para a broca de um dentista. Milhares de pequenas rodas, girando em resposta à rotação da grande roda da Represa de Ilha Solteira. Parem a grande roda e todas as pequenas rodas param; as luzes se vão. Tudo isso está realmente relacionado.

Ainda há mais. Os mesmos fenômenos que retiram a tremenda energia do rio e a espalham por toda parte, até que algumas poucas gotas do rio façam funcionar a broca do dentista, entram novamente na construção de instrumentos extremamente delicados que servem para detecção de quantidades de corrente incrivelmente pequenas, para transmissão de vozes, música, e imagens, para computadores, para máquinas automáticas de precisão fantástica.

Tudo isto se torna possível devido aos arranjos de cobre e ferro projetados cuidadosamente — campos magnéticos eficientemente criados, blocos de ferro de metros de diâmetro em rotação, proporções cuidadosas de cobre para eficiência ótima, formas estranhas todas com a mesma finalidade, como a curva da represa.

Se algum arqueólogo do futuro descobrisse a Represa de Ilha Solteira, podemos adivinhar que ele admiraria a beleza de suas curvas. Mas também os exploradores provenientes de grandes civilizações futuras olharão para os geradores e transformadores e dirão: "Observem que cada

pedaço de ferro tem uma forma bela e eficiente. Meditem sobre o saber que foi colocado em cada peça de cobre!"

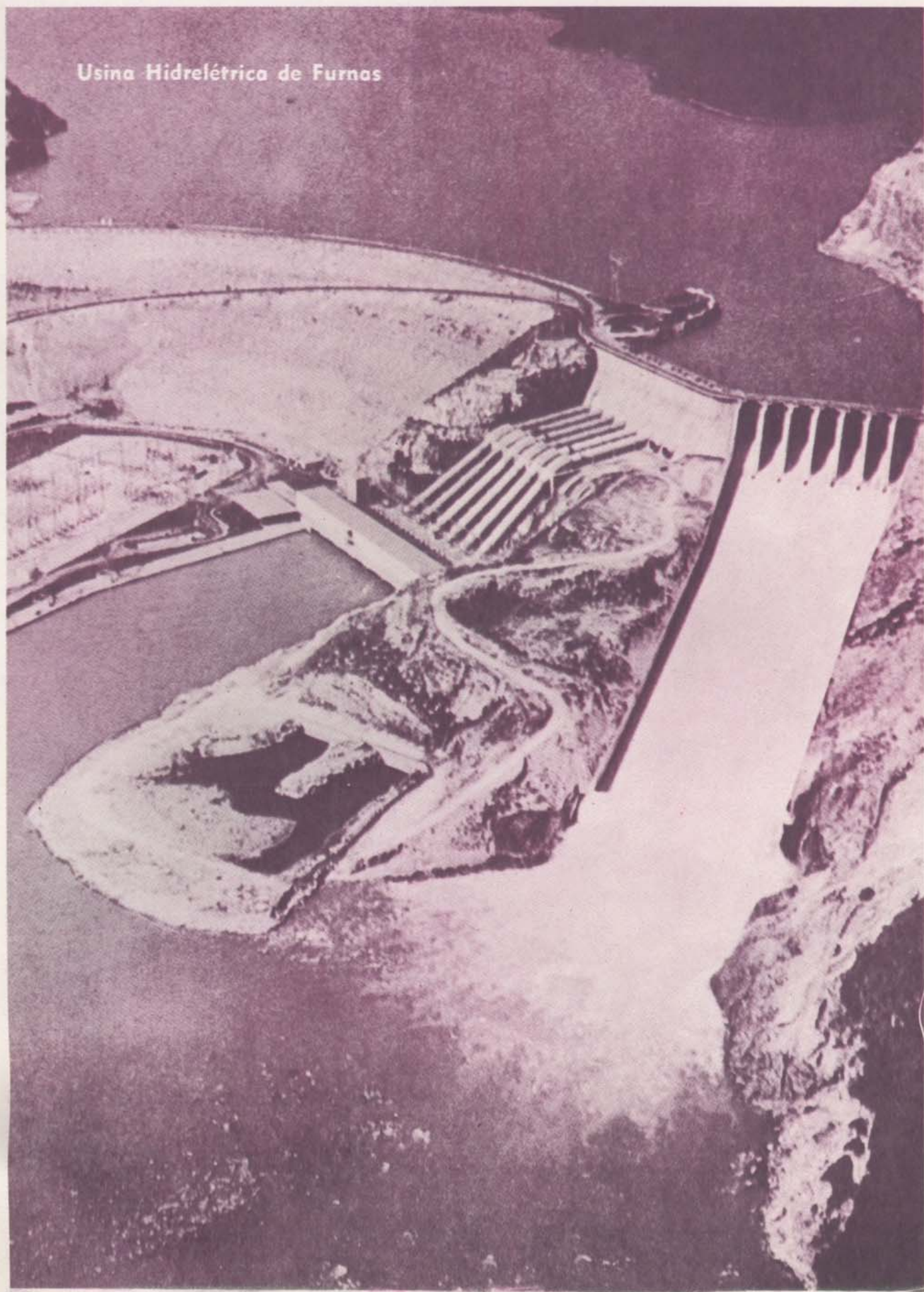
Este é o poder da Engenharia e o projeto cuidadoso da nossa tecnologia elétrica. Algo que não existia em nenhuma outra parte da natureza foi criado no gerador. É verdade que há forças de indução em outros lugares. Por certo, em alguns lugares em volta do Sol e das estrelas há efeitos de indução eletromagnética. É provável, também (embora não se tenha certeza), que o campo magnético da Terra seja mantido por algo análogo a um gerador elétrico, que opera com correntes que circulam no interior da Terra. Mas em nenhum lugar foram juntados pedaços com partes móveis para gerar energia elétrica, como acontece no gerador — com grande eficiência e regularidade.

Você pode pensar que projetar geradores elétricos já não é um assunto interessante; que é um assunto morto, porque estão todos projetados. Geradores ou motores quase perfeitos podem ser tirados de uma prateleira. Mesmo que isso seja verdade, podemos admirar o sucesso maravilhoso de um problema resolvido tão próximo da perfeição. Mas quantos problemas ficam inacabados! Mesmo geradores e transformadores estão voltando a ser problemas. É provável que todo o campo de baixas temperaturas e supercondutores seja aplicado ao problema de distribuição da energia elétrica. Desde que surja um fato inteiramente novo, novos projetos terão que ser criados. As redes de energia do futuro podem vir a ter pouca semelhança com as de hoje.

Você pode admitir um número interminável de aplicações e situações que poderia ser salientado quando se estudam as leis de indução. O estudo do projeto de máquinas elétricas é, por si mesmo, trabalho para toda uma vida. Não podemos ir muito longe nessa direção, mas devemos estar conscientes de que, quando o homem descobriu a lei de indução, ligou imediatamente sua teoria a um enorme desenvolvimento prático. Devemos, contudo, deixar o assunto para os engenheiros e os cientistas, que estão interessados em resolver os detalhes das aplicações particulares. A Física provê unicamente a base — os princípios básicos que se aplicam, quaisquer que sejam eles (ainda não completamos essa base, porque ainda nos resta considerar em detalhe as propriedades do ferro e do cobre. A Física também tem alguma coisa a dizer sobre isso).

A tecnologia elétrica moderna começou com as descobertas de Faraday. O bebê inútil converteu-se num prodígio e mudou a face da Terra de maneira tal que seu orgulhoso pai nunca imaginara.

Usina Hidrelétrica de Furnas



Preço único em todo o Brasil: Cr\$ 15,00

Esta obra foi impressa pela
Companhia Gráfica LUX
Estrada do Gabinal, n.º 1521 — 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
em 1976.