

PROJETO
DE ENSINO
DE FÍSICA

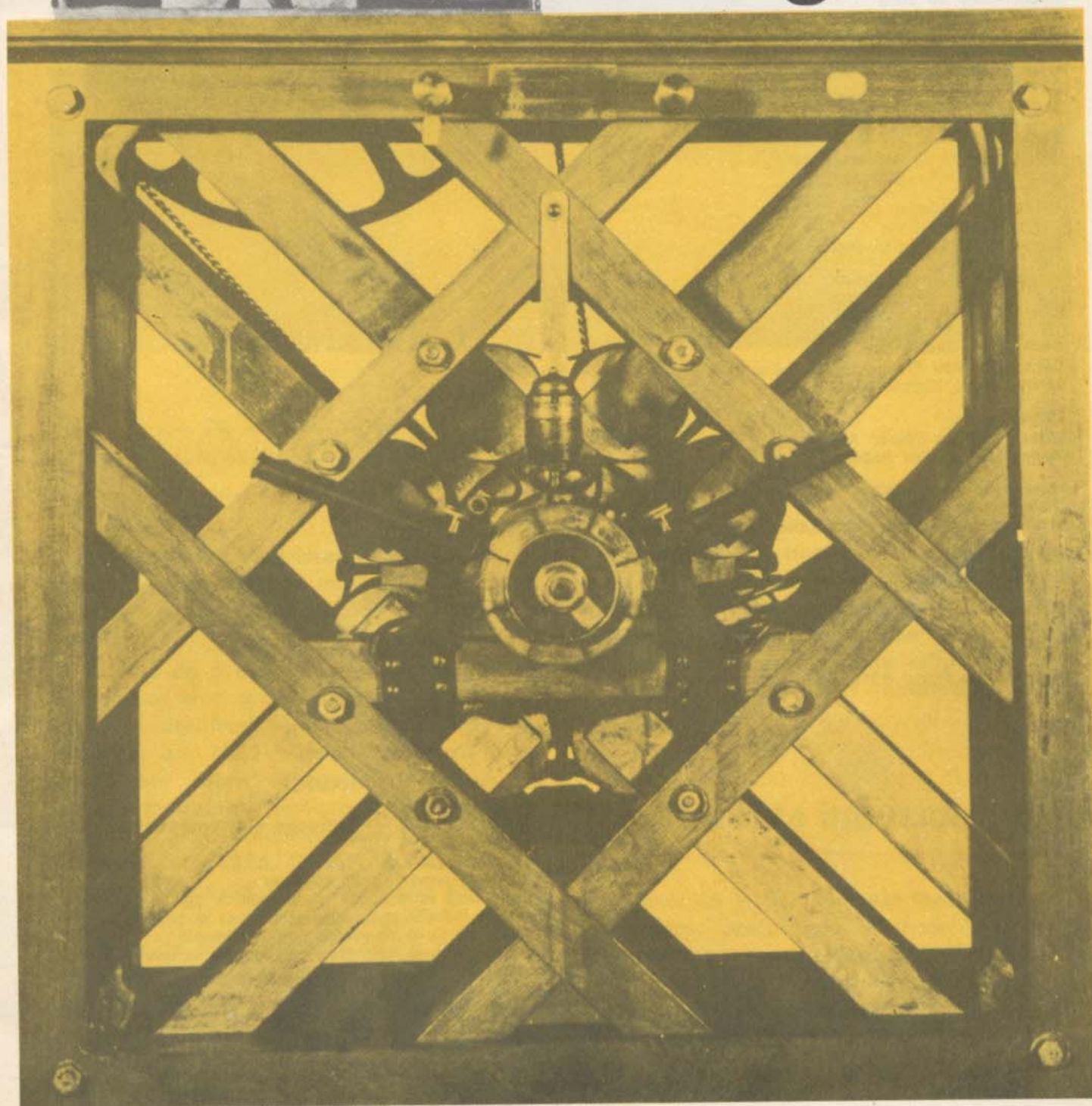
IFUSP — Instituto de Física da Universidade de São Paulo

MEC/FENAME/PREMEN

eletromagnetismo

5

Indução eletromagnética



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

Elettricidade

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

Eletromagnetismo

Jesuina Lopes de Almeida Pacca
João Evangelista Steiner

Programação Visual

Carlos Egidio Alonso
Ettore Michele di San Fili Bottini

Fotografias e Reproduções

José Augusto Machado Calil
Washington Mazzola Racy

Secretaria e Datilografia

Carlos Eduardo Franco de Siqueira
Janete Vieira Garcia Novo

Linguagem

Claudio Renato Weber Abramo
Maria Nair Moreira Rebello

Construção de Protótipos

José Ferreira
Voanerges do Espírito Santo Brites

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

A famosa "Máquina de Aliança" é de 1862 e está atualmente no Museu do Conservatório Nacional de Artes e Ofícios de Paris. Esta máquina produzia eletricidade utilizando o efeito da indução eletromagnética. Na época, ela competiu com a pilha voltaica de incômoda utilização e de pouca duração.

ÍNDICE

CAPÍTULO 5 — Indução eletromagnética

1. Corrente induzida	5-1
2. Indução de corrente num condutor	5-4
3. Indução pela variação da quantidade de campo	5-7
4. Fluxo de indução magnética	5-8
5. Variação do fluxo magnético pelo movimento	5-8
6. Variação do fluxo magnético por campos variáveis ..	5-9
7. Sentido da corrente	5-12
8. Criação do campo elétrico	5-14
9. Exercícios de aplicação	5-15

Leitura Suplementar

Michael Faraday	5-21
O bétatron	5-26



Cabeçote de pick-up:
o aproveitamento da vibração
da agulha no sulco de discos para
mover uma pequena bobina de fios em
volta de um ímã é uma das
utilizações práticas
da indução eletromagnética.

Indução eletromagnética

Nos capítulos anteriores você já trabalhou bastante com campos magnéticos e já viu que eles podem ser produzidos por correntes elétricas.

O fato de o campo magnético poder ser criado por uma corrente elétrica — fato esse que foi verificado pela primeira vez por Oersted, em 1822 — levou os físicos a especularem sobre a possibilidade de um campo magnético provocar o aparecimento de uma corrente elétrica num fio condutor. Faraday, em 1826, investigou esse efeito. De um de seus artigos apresentado em 1831, foi extraída a seguinte passagem: "...a esperança de obter eletricidade a partir do magnetismo ordinário tem-se estimulado, em várias ocasiões, a investigar experimentalmente o efeito indutivo da corrente elétrica. Ultimamente, alcancei resultados positivos; não somente vi as minhas esperanças

cumpridas, como também obtive a chave que me parece abrir uma explicação completa de alguns fenômenos magnéticos, e também descobri um estado novo que, provavelmente, poderá exercer grande influência sobre alguns dos efeitos mais importantes da corrente elétrica."

1. Corrente induzida

Você vai iniciar a investigação destes fenômenos, procurando verificar experimentalmente o aparecimento de uma corrente elétrica num fio colocado numa região em que há um campo magnético.

Como você poderia realizar tal experiência?

Você deve tomar um fio condutor, formar

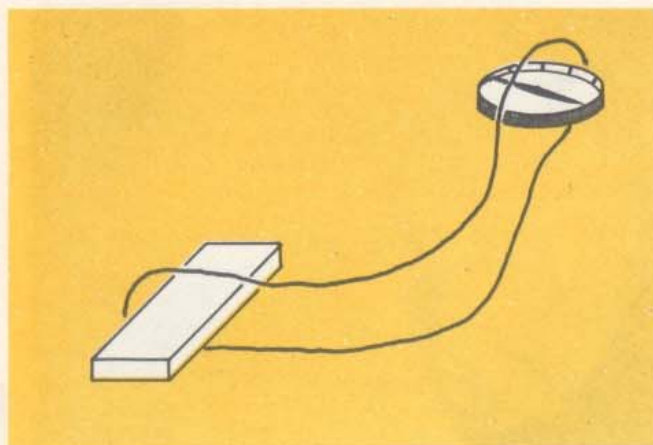


figura 1

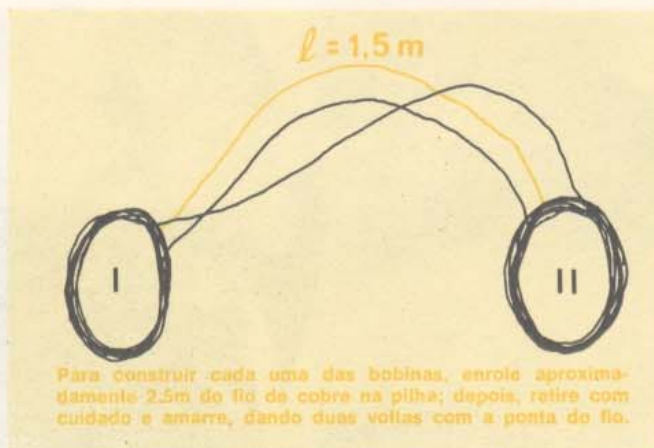


figura 2

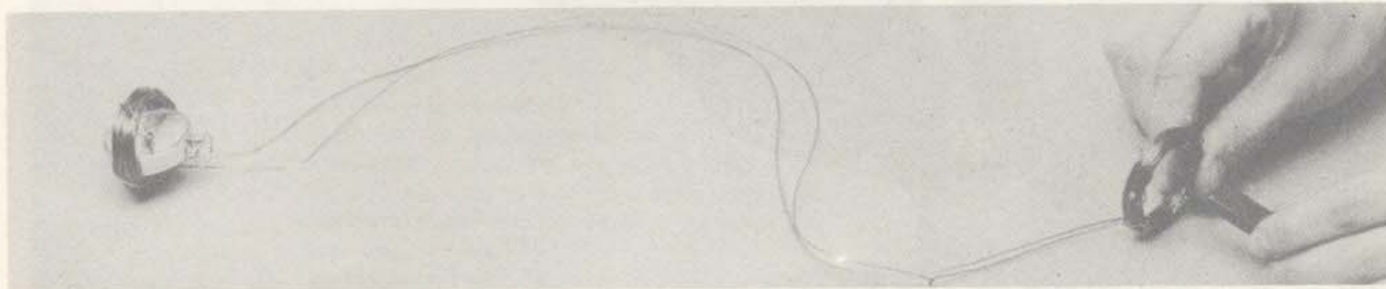


figura 3

com ele um circuito fechado e colocá-lo numa região em que há um campo magnético. O campo magnético pode ser produzido por um ímã de barra, por exemplo. Em seguida, deve verificar se passa corrente pelo fio.

- Q1** — Como se pode evidenciar a passagem de corrente por esse fio?
- Q2** — Uma bússola poderia servir como indicador de corrente? Por quê?
- Q3** — Imagine uma experiência em que você utiliza um ímã, um fio e uma bússola, todos próximos entre si. Que cuidado deve tomar, para que a bússola não seja perturbada pelo campo do ímã?

Para que o ímã não perturbe diretamente a bússola, você deve utilizar um fio condutor bem longo e tentar verificar a passagem de corrente, com a bússola, na parte do fio que está mais distante do ímã (figura 1).

Para esta experiência você vai utilizar um fio de cobre de 8m de comprimento, aproximadamente, enrolado em duas bobinas, que

podem ficar separadas por uma distância de 1,5m (figura 2).

A concentração de fios serve para aumentar o efeito que se quer observar.

Coloque a bússola dentro de uma das bobinas (figura 3). Procurando manter a bússola na posição horizontal, gire o conjunto até que a agulha da bússola coincida com um diâmetro da bobina. Fixe o conjunto na sua mesa.

Afaste ao máximo a outra bobina (II) e coloque um ímã de barra dentro dela na direção do seu eixo (figura 3).

Nesta montagem, a bobina II constitui o condutor que está no campo magnético produzido pelo ímã de barra.

A função da bobina I é evidenciar o aparecimento de corrente através do fio.

- Q4** — O que deve ocorrer com a agulha da bússola, se passar corrente no fio?

Observe se, na sua experiência, está passando corrente pelo fio.

- Q5** — A posição da agulha da bússola sofreu alguma alteração quando você colocou o ímã? O que conclui desse resultado?

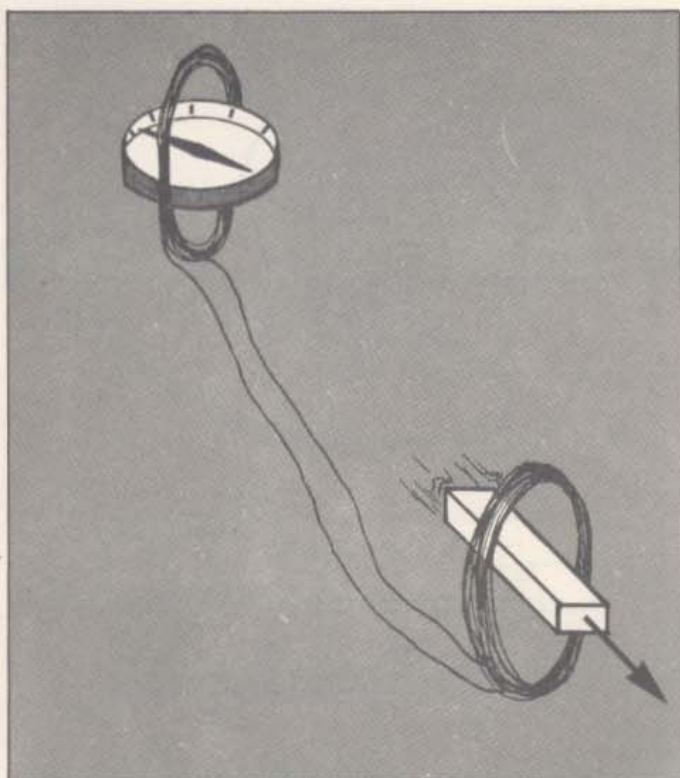


figura 4

A montagem que você utilizou é semelhante à utilizada por Faraday*.

Uma observação atenta da bússola, no momento em que o ímã é colocado ou retirado da sua posição dentro da bobina, mostra que aparece uma corrente elétrica.

Para facilitar essa observação, recoloque o ímã e a bússola de acordo com a montagem da experiência já descrita.

Fazendo um movimento bem rápido com a mão, **afaste** o ímã da bobina (II) e observe atentamente a bússola (figura 4).

Repita, algumas vezes, esse movimento rápido de afastar o ímã da bobina.

Q6 — O que acontece com a agulha da bússola?

Q7 — O que deve ter ocorrido na bobina (I), para que a agulha da bússola mude momentaneamente de direção?

* Michael Faraday (1791-1867) abandonou a escola aos 12 anos para ajudar no sustento da família. Entrou em contato com a Química e a Eletricidade lendo, à noite, os livros que encadernava numa livraria. Em 1813, ingressou como auxiliar na Royal Institution (a instituição de pesquisa mais importante da Inglaterra na época), da qual mais tarde se tornou diretor e onde trabalhou por quase meio século. Suas contribuições ao Eletromagnetismo o colocam como um dos maiores homens da Ciência.

RESPOSTAS

R₁ -

R₂ -

R₃ -

R₄ -

R₅ -

R₆ -

R₇ -

O que, então, ocasionou a presença de uma corrente elétrica no nosso circuito? Repita a experiência, mantendo o ímã parado e afastando rapidamente a bobina (II). Tome cuidado para que a bobina (I) e a bússola se mantenham fixas durante o movimento da bobina (II).

Q8 — Aparece corrente na bobina?

Observe agora o que acontece quando você **aproxima** rapidamente o ímã da bobina (II).

Observe o sentido inicial do desvio da agulha quando se **afasta** ou se **aproxima** o ímã rapidamente.

Q9 — Esse desvio se dá no mesmo sentido, nos dois casos?

Veja e discuta as respostas.

Através de todo esse procedimento, você verificou que pode aparecer uma corrente elétrica num circuito fechado, quando este se movimenta numa região em que há um campo magnético, mesmo que não haja baterias ou pilhas.

Utilizamos uma bobina (I) com a bússola, apenas para evidenciar o aparecimento dessa corrente através do efeito magnético que ela produz. A corrente elétrica que aparece na sua experiência é pequena e seria insuficiente para acender uma pequena lâmpada.

Numa experiência deste tipo você percebe que o fator importante no aparecimento de uma corrente elétrica é um movimento **relativo** entre o circuito e o ímã. Com efeito, o fato de se aproximar ou afastar um do outro fez com que aparecesse a corrente elétrica, não importando se foi a bobina ou o ímã que permaneceu parado.

A corrente elétrica que aparece em consequência do movimento de uma bobina num campo magnético é chamada **corrente induzida**.

Como se explica o aparecimento da corrente induzida na espira da bobina? Será este um fenômeno totalmente novo ou pode ser explicado com base em conhecimentos que você já tem?

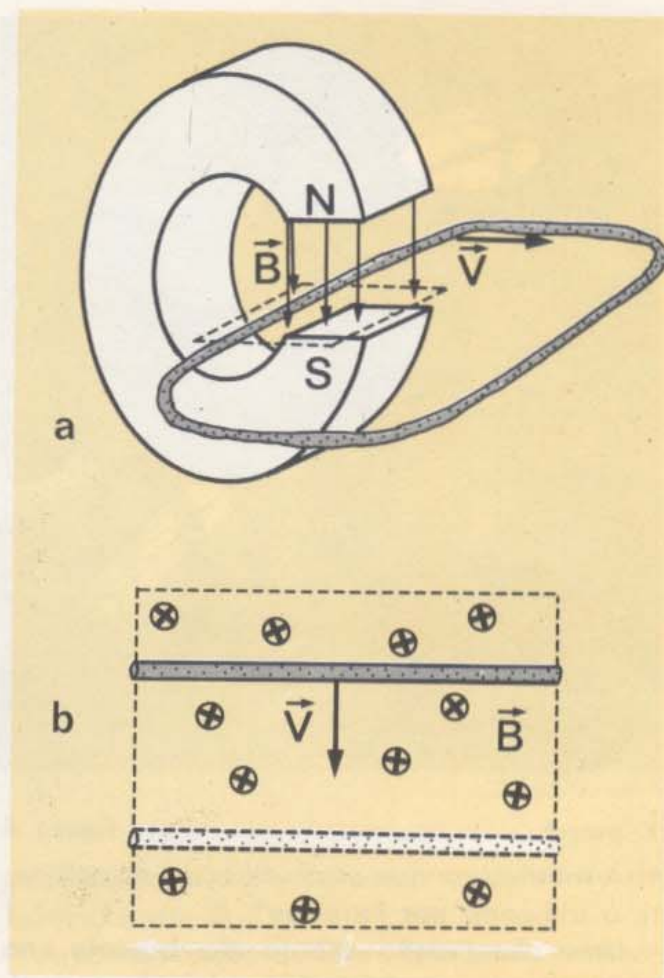


figura 5 — (a) Na região delimitada pelo retângulo há um campo magnético que é perpendicular ao plano do retângulo. Utilizaremos a representação esquematizada em (b), indicando que somente dentro do retângulo assinalado existe campo magnético perpendicular ao plano do papel e entrando nele; fora desse retângulo, o campo magnético é considerado nulo.

2. Indução de corrente num condutor

Para compreender o aparecimento da corrente induzida numa espira, vamos analisar o que acontece quando um trecho de um fio condutor fechado é deslocado com uma velocidade constante \vec{v} , num campo magnético uniforme, conforme a figura 5.

Sabemos que um elétron em movimento num campo magnético fica sujeito a uma força perpendicular à velocidade. Ora, um material condutor possui elétrons livres em seu interior e esses elétrons são facilmente deslocáveis.

Quando o fio se desloca no campo mag-

RESPOSTAS

$R_8 -$

$R_9 -$

figura 6 — A figura mostra o sentido em que os elétrons se deslocam no condutor e o sentido da corrente i , de acordo com a convenção usual.

nético, os elétrons acompanham o fio no seu movimento, portanto, ficam sujeitos a uma força na direção do eixo do condutor, como foi visto no capítulo 4.

$$F = qvB \quad (1)$$

Esta força faz com que os elétrons entrem em movimento ao longo do fio. É esse movimento que constitui a corrente i que atravessa o condutor* (figura 6).

Vemos assim que é possível explicar a corrente induzida em termos da força que age sobre os elétrons do fio.

A intensidade da corrente i que percorre o fio depende de vários fatores, tais como as propriedades do fio, a velocidade de deslocamento do condutor e a intensidade do campo magnético \vec{B} .

Será possível determinar o valor da corrente i a partir dessas características?

O movimento dos elétrons no condutor

* Faraday não interpretou a corrente induzida do ponto de vista microscópico, isto é, como movimento de elétrons ao longo do condutor. Naquela época não se sabia que a matéria era composta de prótons e elétrons, que foram descobertos cerca de 70 anos mais tarde.

pode ser interpretado como devido a um campo elétrico que aparece no seu interior. No capítulo 2 de **Eletricidade** (PEF), você viu que o campo elétrico E , num ponto em que uma carga elétrica q sofre ação de uma força F , é calculado pela expressão $E = \frac{F}{q}$.

Substituindo F pelo seu valor (1)

$$E = \frac{qvB}{q} = vB$$

Dessa forma, podemos interpretar a força como sendo devida a um campo elétrico $E = vB$ no interior do fio. Com isso, estamos substituindo o efeito do campo magnético e da velocidade por um campo elétrico no fio, que produz a mesma força sobre os elétrons livres.

Esse campo elétrico é, assim, responsável pelo movimento dos elétrons, portanto, pela corrente elétrica que surge.

Se considerarmos um comprimento ℓ do condutor em que existe um campo elétrico E , podemos determinar a diferença de potencial ou tensão nesse trecho pela relação $V = \ell E$.

- R1 — A passagem de corrente pode ser evidenciada pelos efeitos dessa corrente sobre uma bússola próxima do fio condutor. Um amperímetro ou uma lâmpada também poderiam ser utilizados para verificar a passagem de corrente elétrica.
- R2 — Sim. Porque a bússola pode acusar o efeito magnético da corrente.
- R3 — Se o ímã estiver muito próximo da bússola, seu efeito direto poderá perturbar a observação do efeito da corrente elétrica.
- R4 — A agulha da bússola deve sofrer um desvio, tendendo à posição do eixo da bobina.
- R5 — A sua resposta é, provavelmente, não. O fato de haver um ímã dentro da bobina não faz com que apareça corrente.
- R6 — Ela se desvia momentaneamente.
- R7 — Deve ter circulado corrente elétrica.
- R8 — Sim.
- R9 — Não, ele se dá em sentidos opostos.

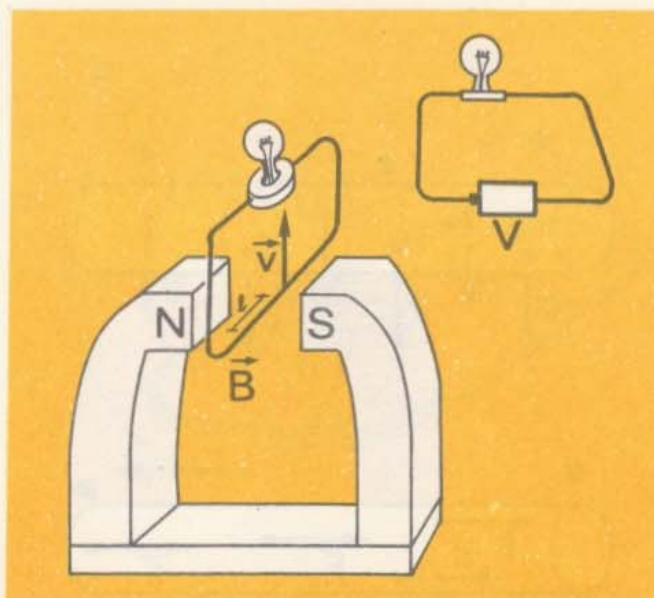


figura 7 — As duas situações representam uma lâmpada de resistência R , que é percorrida por uma corrente i . Em (a) a corrente é devida ao fenômeno da indução e em (b) a corrente é devida à existência da pilha no circuito. Em ambos os casos, a corrente será a mesma se a tensão V da pilha, a velocidade \vec{v} , o campo magnético \vec{B} e o comprimento ℓ satisfizerem a igualdade $V = v\ell B$.

Substituindo o valor de \vec{E} por $v\vec{B}$, teremos

$$V = \ell v B \quad (2)$$

que representa a diferença de potencial que se estabelece num trecho ℓ de um condutor que se desloca com velocidade \vec{v} num campo magnético \vec{B} . Essa tensão é chamada de **tensão induzida**.

A corrente i no condutor é a mesma que se obteria se o mesmo condutor fosse ligado a uma pilha que fornecesse uma diferença de potencial igual a V (figura 7).

Se conhecermos a resistência do circuito, podemos calcular a corrente que percorre o condutor, pela lei de Ohm: $i = V/R$.

Portanto

$$i = \frac{\ell v B}{R} \quad (3)$$

Esta equação permite calcular a corrente induzida que aparece no condutor de resistência R , quando um trecho de comprimento ℓ tem velocidade \vec{v} em relação a um campo magnético de intensidade \vec{B} .

Q10 — O que ocorrerá com o valor da corrente i , se a intensidade do campo magnético for duplicada?

Q11 — O que ocorrerá com o valor de i , se o valor da velocidade \vec{v} diminuir?

Q12 — De que forma você poderia verificar esse fato na sua experiência?

A experiência que realizou com as bobinas não era tão simples quanto a que acabamos de analisar; naquele caso, \vec{B} e a velocidade \vec{v} não eram constantes e o condutor que se movimentava não era reto. Entretanto, poderíamos aplicar o que estudamos também àquele caso; para isso, deveríamos subdividir a espira em pequenos trechos aproximadamente retos e imaginar deslocamentos pequenos em que a variação de \vec{B} e de \vec{v} pudesse ser desprezada.

A corrente induzida em cada instante na bobina seria obtida pela soma dos efeitos em todos os trechos.

Dessa maneira, podemos entender o aparecimento da corrente induzida a partir do que estudamos sobre forças que agem sobre cargas em movimento num campo magnético e da relação entre tensão, corrente e resistência do fio.

— 11 — 11 —

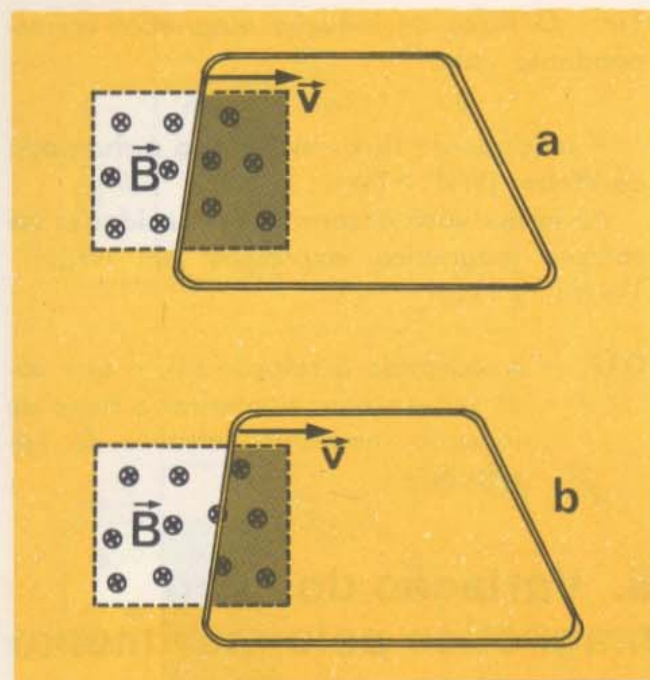


figura 8 — A área cinza é a parte da área do circuito dentro do campo; (a) e (b) representam dois instantes sucessivos.

3. Indução pela variação da quantidade de campo

Acabamos de estudar a corrente induzida que aparece num fio, quando este se move num campo magnético.

Existem, entretanto, outros fenômenos de indução, que não podem ser reduzidos ao movimento de um condutor num campo magnético.

Vamos, a seguir, explicar o aparecimento de corrente induzida de uma forma que se aplique a todos os fenômenos de indução.

Na figura 8 esquematizamos a experiência da figura 5, que é semelhante à experiência que você realizou. Na experiência da figura 5, o condutor se move em relação a um campo magnético e aparece corrente induzida.

Você poderá também compreender o que ocorre, se considerar a quantidade de linhas de campo — quantidade de campo — que passa dentro do circuito.

Na figura 8 está representada uma região em que o campo magnético é uniforme. Nessa região as linhas de campo são perpendiculares ao plano do circuito.

RESPOSTAS

R₁₀ -

R₁₁ -

R₁₂ -

R₁₃ -

R₁₄ -

R₁₅ -

Q13 — Em qual das situações, (a) ou (b) da figura 8, há maior quantidade de campo dentro do circuito?

Q14 — Enquanto o circuito se move, o que acontece com a quantidade de campo dentro dele?

Considere agora a experiência com as duas bobinas.

Q15 — Quando o ímã se aproxima da bobina, o que acontece com a quantidade de campo dentro da bobina?

Na experiência realizada aparece uma corrente induzida, quando o fio se move no campo magnético e ao mesmo tempo a quantidade de campo dentro do circuito está variando.

Será que podemos atribuir a corrente induzida à **variação** da quantidade de campo?

Para responder, deveríamos estudar uma situação em que a quantidade de campo variasse sem que o fio se movimentasse no campo magnético. Seria possível criar esta situação?

R10 — Será o dobro do valor anterior.

R11 — A corrente i será menor.

R12 — Afastando lentamente o ímã da bobina, a deflexão da agulha será menor ou imperceptível. Foi necessário afastar o ímã rapidamente para observar a corrente induzida.

R13 — Em (a) há maior quantidade de campo.

R14 — A quantidade de campo aumenta.

R15 — A quantidade de campo aumenta.

4. Fluxo de indução magnética

Para podermos verificar se a corrente induzida pode ser atribuída a uma variação da quantidade de campo, vamos definir uma grandeza física que representa a quantidade de campo dentro de um circuito.

Essa grandeza vai depender da intensidade do campo magnético e da parte da área interna ao circuito em que há campo magnético. É chamada **fluxo de indução magnética** e é indicada pela letra grega maiúscula Φ (fi).

Se chamarmos S a área ocupada pelo campo magnético (área cinza na figura 8) e B a intensidade do campo, teremos:

$$\Phi = B \cdot S \quad (4)$$

Você deve notar que, no cálculo de Φ , leva-se em conta a parte da área da espira que está dentro do campo magnético. Assim, o fluxo de indução magnética através de uma determinada espira, próxima de um ímã, depende da posição relativa entre o ímã e a espira.

Q16 — Em qual das situações (a) ou (b) da figura 8 o fluxo magnético é maior? Se S_a é o dobro de S_b , qual a relação entre Φ_a e Φ_b ?

Suponhamos que um campo magnético de intensidade igual a $1T$ atravessa perpendicularmente uma superfície de área igual a

$1m^2$. O fluxo de indução magnética correspondente vale:

$$\Phi = 1T \cdot 1m^2 = 1T \cdot m^2$$

A unidade de fluxo magnético é chamada de **Weber (W)***. $1W = 1T \cdot m^2$.

Às vezes você encontrará intensidades de campo magnético expressas em W/m^2 . $1W/m^2 = 1T$.

Q17 — Analisando a relação (4), o que você sugere para aumentar o fluxo de indução magnética através de um circuito?

5. Variação do fluxo magnético pelo movimento

Já perguntamos se a corrente induzida poderia ser atribuída à **variação** da quantidade de campo, isto é, à **variação do fluxo magnético**.

Vamos, então, calcular a variação do fluxo magnético por unidade de tempo, para a situação representada na figura 9, em função da velocidade \vec{v} , do campo magnético \vec{B} e de fatores geométricos (ℓ).

Quando o condutor se desloca, passando de (a) para (b) na figura 9, a parte da área do circuito ocupada pelo campo magnético varia de uma quantidade

$$\Delta S = S_B - S_A = \ell \cdot d.$$

A variação de fluxo $\Delta\Phi$ será então:

$$\begin{aligned} \Delta\Phi &= \Phi_B - \Phi_A = BS_B - BS_A = \\ &= B(S_B - S_A) = B \cdot \Delta S \text{ ou } \Delta\Phi = B \cdot \ell \cdot d \end{aligned}$$

Se o deslocamento se deu num intervalo de tempo Δt , teremos $d = v \cdot \Delta t$.

$$\Delta\Phi = B \cdot \ell \cdot v \cdot \Delta t$$

$$\text{onde } \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = B \cdot \ell \cdot v$$

Como vimos anteriormente, a corrente induzida, de acordo com a relação (3),

$$\text{— era } i = \frac{\ell \cdot v \cdot B}{R}$$

* Wilhelm Edward Weber (1804-1891), físico alemão que contribuiu para o estudo da Eletricidade e do Eletromagnetismo.

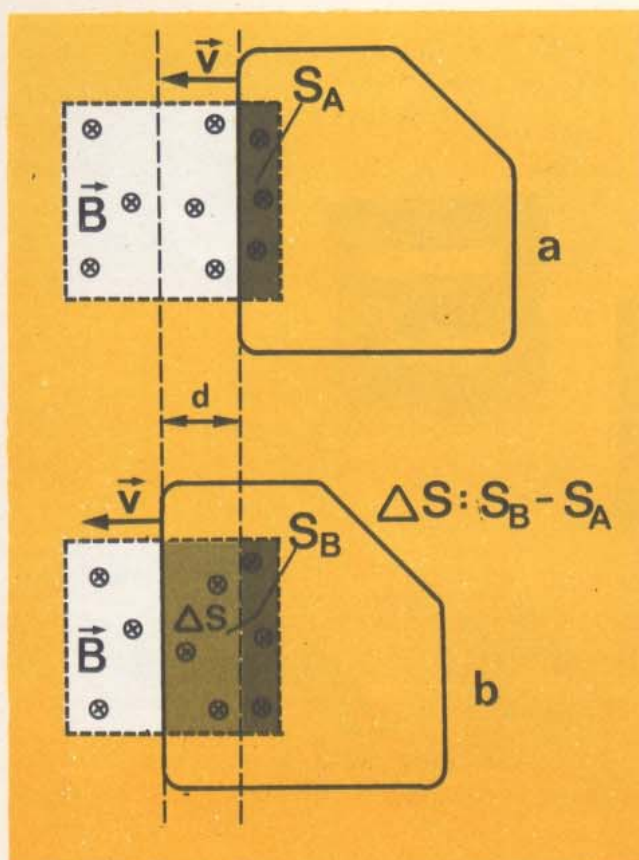


figura 9 — A região cinza-clara representa a variação de área que é atravessada pelo campo magnético, quando o condutor passa da posição (a) para (b).

Portanto, em termos da variação de fluxo, essa corrente será:

$$i = \frac{\Delta\Phi/\Delta t}{R}$$

Dessa forma, a tensão V de uma pilha capaz de produzir uma corrente igual a essa terá o valor

$$V = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (5)$$

Isto é, a tensão induzida será igual à variação de fluxo através do circuito por unidade de tempo.

Esta expressão, apesar de ter sido deduzida em uma situação geométrica particular, é válida para fios de qualquer forma, que se movem em relação a ímãs com campo magnético constante.

Nas experiências analisadas, a variação do fluxo foi devida à variação da área do circuito, ocupada pelo campo magnético. Será que a variação de um fluxo magnético pode ser obtida de outra forma?

RESPOSTAS

$R_{16} -$

$R_{17} -$

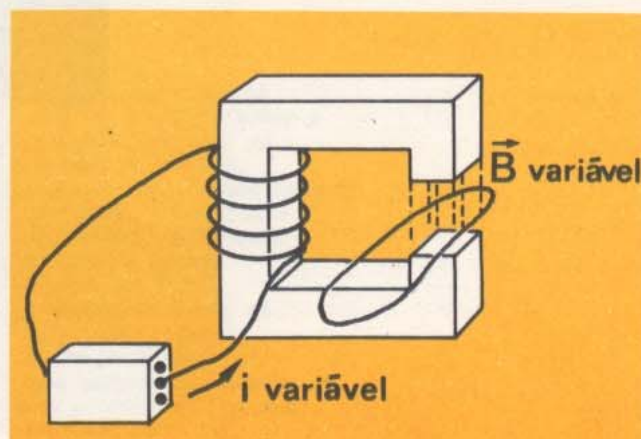


figura 10

6. Variação do fluxo magnético por campos variáveis

O fluxo magnético foi definido como sendo $\mathbf{B} \times \mathbf{S}$, portanto, uma variação de \mathbf{B} pode produzir variação do fluxo mesmo que \mathbf{S} seja constante.

Experimentalmente pode-se obter um campo magnético variável, usando um eletroímã como o esquematizado na figura 10.

Imagine que uma espira seja colocada numa região em que exista um campo magnético variável. Nestas condições, a relação (4) sugere uma corrente induzida na espira.

Você irá verificar experimentalmente que isso de fato ocorre.

Por motivos práticos, os dispositivos para esta experiência terão uma forma diferente da mostrada na figura 10; no entanto, eles exercerão funções análogas.

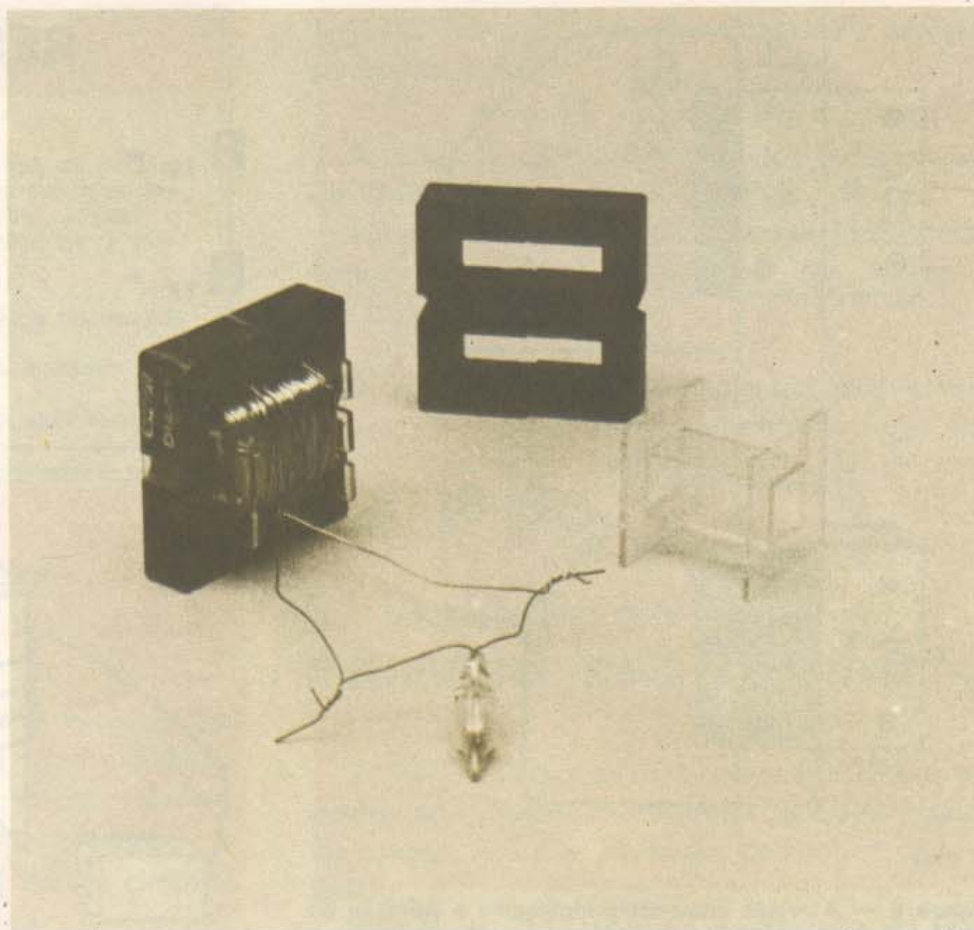


figura 11

Tome a bobina de fio de cobre número 29 que está enrolada num carretel de plástico; esse carretel pode ser encaixado numa peça (de duas partes) de ferrite, um material ferromagnético (figura 11). Chamaremos esta bobina de l_2 .

Aos extremos do fio ligue uma lâmpada, para indicar a passagem da corrente (figura 11). Essa lâmpada tem função análoga à da bússola envolvida pela bobina, na experiência que você realizou no início do capítulo.

Para obter um campo magnético variável, proceda do seguinte modo: por cima da bobina l_2 , enrole um fio de cobre n.º 22, dando aproximadamente 10 voltas; deixe duas pontas do fio livres para ligá-las a uma pilha (figura 12). Esse fio enrolado formará outra bobina, que chamaremos de l_1 . A bobina terá função análoga à da espira dentro da qual você movia o ímã.

Quando as pontas do fio de cobre são ligadas a uma pilha, começará a circular corrente elétrica pela bobina l_1 . A corrente elétrica vai crescer rapidamente, atingindo num

curto intervalo de tempo Δt um valor constante i_m , que depende da resistência do fio.

Enquanto a corrente vai crescendo, o núcleo de ferrite se comporta como o eletroímã da figura 10.

Durante o intervalo de tempo Δt , o campo magnético dentro das bobinas (isto é, dentro do núcleo de ferrite) é variável e cresce de 0 até B_m ; esse valor máximo do campo depende do valor de i_m e das características da bobina.

Q18 — O que deve ocorrer com o valor do campo magnético, quando se interromper a ligação com a pilha?

Deixe somente uma das pontas do fio ligada permanentemente à pilha. Observe atentamente a lâmpada e faça um contato rápido da outra ponta do fio com a pilha.

Q19 — Circulou corrente pela bobina ligada à lâmpada? De que forma você pode observá-la?

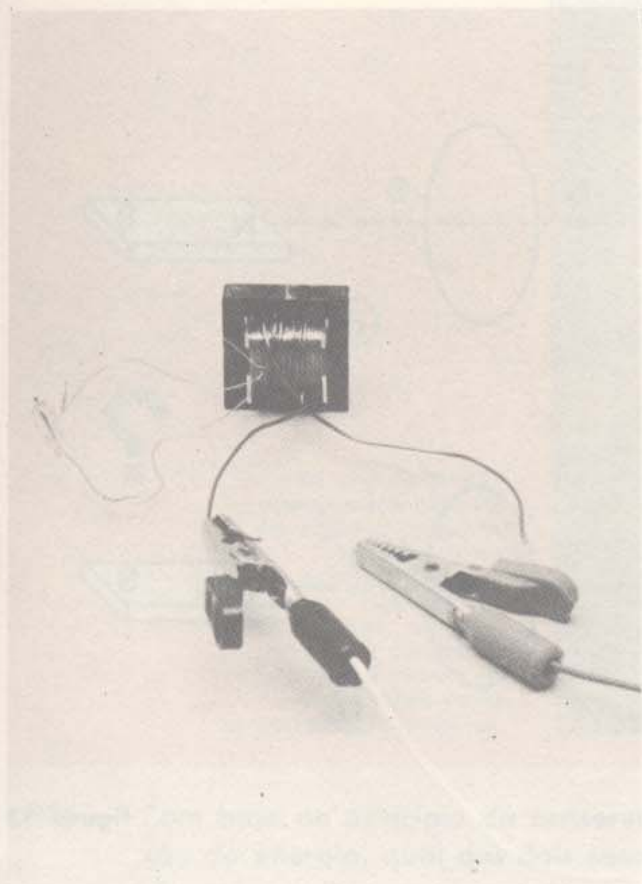


figura 12

Mantenha, agora, a ligação das duas pontas com a pilha e observe atentamente a lâmpada.

Q20 — Circula corrente pela bobina ligada à lâmpada, enquanto a ligação é mantida? Por quê?

Q21 — Mantenha a pilha ligada durante alguns segundos e observe atentamente a lâmpada, quando se desliga um dos fios. A lâmpada acende? Por quê?

—n—n—

Os resultados da experiência permitem verificar que uma variação do fluxo magnético, devida a uma variação do campo magnético, também produz uma corrente induzida. Medidas precisas podem mostrar que neste caso ainda continua válida a expressão (5) $V = \Delta\Phi/\Delta t$.

Esta expressão é, portanto, geral e, na verdade, ela descreve todos os fenômenos de indução eletromagnética conhecidos.

O fio de cobre nº 22 deve ser enrolado sobre a bobina já existente no carretel de plástico; assim, resultam duas bobinas que serão atravessadas pela mesma quantidade de campo, quando a pilha for ligada. É importante o fato de os fios de cobre serem encapados por uma camada de isolante, não permitindo o contato entre os fios das espiras das bobinas.

RESPOSTAS

R₁₈ -

R₁₉ -

R₂₀ -

R₂₁ -

R16 — Em (a) o fluxo magnético é maior.

$$\phi_a = 2\phi_b.$$

R17 — Pode-se aumentar a intensidade do campo magnético B ou a área do circuito dentro do campo.

R18 — Deve decrescer de B_m para 0 (cessando de passar corrente elétrica pelo fio, a ferrite fica desmagnetizada).

R19 — Sim. A lâmpada ligada à bobina acendeu momentaneamente.

R20 — Não. Porque a corrente é constante e não há variação de fluxo magnético.

R21 — Sim. Porque o campo magnético decresce de B_m para 0, havendo variação de fluxo.

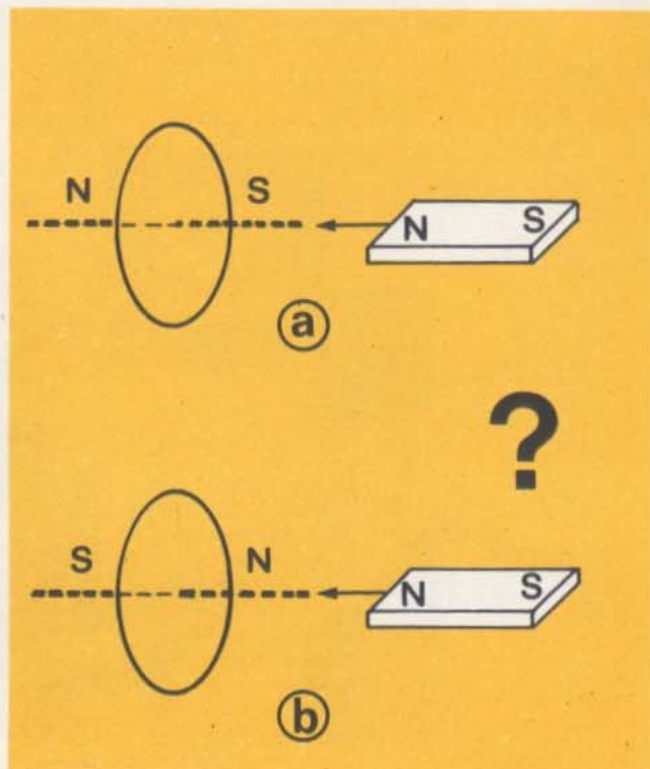


figura 13

7. Sentido da corrente

O sentido da corrente induzida pode ser previsto quando consideramos a conservação da energia.

Já vimos que, quando circula corrente numa espira, esta se aquece e a energia vai sendo dissipada em forma de calor. De onde provém essa energia?

Suponha que você aproxima, de uma espira condutora, o norte de um ímã de barra (figura 13); o sentido da corrente induzida será horário ou anti-horário?

Se o sentido da corrente for horário, o efeito magnético da espira produzirá um pólo sul voltado para o norte do ímã. Se o sentido da corrente for anti-horário, o efeito magnético da espira produzirá um pólo norte voltado para o norte do ímã (figura 13).

Q22 — Em qual dos dois casos há repulsão e em qual há atração?

Q23 — Para que o ímã e a bússola se aproximem, em qual dos dois casos você precisa exercer força externa?

Se você exercer força, estará realizando trabalho, portanto, cedendo energia ao conjunto.

Q24 — Em qual dos dois casos você cede energia ao conjunto?

Por outro lado, você sabe que uma corrente elétrica dissipa energia num condutor (efeito Joule). Portanto, nos dois casos que estamos considerando, há dissipação de energia no condutor.

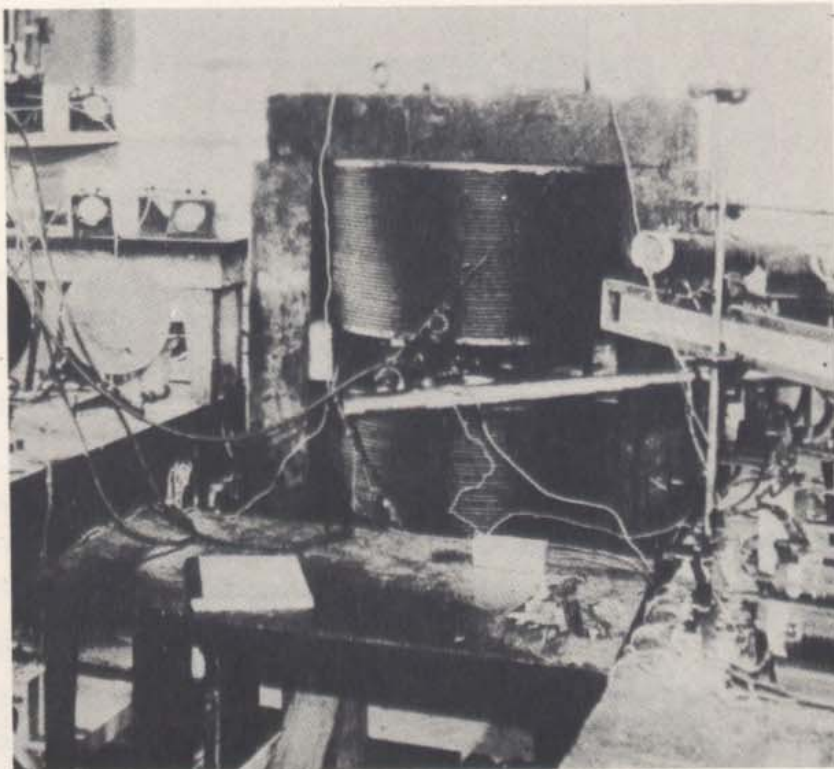
Se a bobina e o ímã se repelem, você cede energia ao conjunto e essa energia é dissipada por efeito Joule. Neste caso haverá conservação de energia, se o calor dissipado for igual ao trabalho realizado.

Se a bobina e o ímã se atraírem, haverá dissipação de energia por efeito Joule e o sistema realizará trabalho.

Q25 — Haverá conservação de energia neste caso?

Num dos casos considerados, o sistema recebe trabalho e cede calor. No outro caso, o sistema cede calor e simultaneamente realiza trabalho.

Os eletroímãs são componentes notáveis em algumas máquinas utilizadas para acelerar partículas carregadas. O ciclotron, ao lado, possui eletroímãs envolvendo a câmara de vácuo, onde estão as partículas carregadas.



Q26 — Com base no princípio da conservação da energia, qual dos dois casos deve ocorrer?

Veja e discuta as respostas.

Se um sistema pudesse realizar trabalho continuamente, sem receber qualquer forma de energia, seria uma fonte permanente de energia e poderíamos construir um moto-perpétuo. A impossibilidade de construir uma máquina deste tipo constitui uma das leis básicas da Física, que é conhecida como lei da conservação da energia.

No segundo caso considerado não haverá conservação de energia. De fato, a experiência mostra que o sentido da corrente é sempre tal que as forças magnéticas que aparecem fazem um agente externo realizar trabalho para induzir corrente.

Assim, neste caso, novamente se verifica a lei da conservação da energia.

A lei que permite determinar o sentido da corrente induzida é chamada lei de Lenz.

RESPOSTAS

R₂₂ -

R₂₃ -

R₂₄ -

R₂₅ -

R₂₆ -

Heinrich Emil Lenz (1804-1865), cientista russo, após ter estudado Teologia, dedicou-se à Física e, em 1834, enunciou a lei que leva seu nome.

8. A criação do campo elétrico

Você viu que, no condutor em movimento num campo magnético, surge um campo elétrico responsável pela corrente elétrica. Isto também ocorre no caso mais geral. Sempre que há corrente induzida, há um campo elétrico ao longo do condutor.

Se considerarmos o condutor representado na figura 14(a), concluímos que, devido à variação de fluxo interno ao circuito, aparece um campo elétrico \vec{E} na região do fio.

Esse campo elétrico aparece mesmo que não haja um condutor. Existem experiências (que você não tem condições de realizar com o seu material) que comprovam que, se uma partícula carregada, como, por exemplo, um próton, for colocada nessa região, como na figura 14(b), estará sujeita a uma força $\vec{F} = \vec{E} \cdot q$, sendo q a carga do próton.

O aparecimento de um campo elétrico devido a campos magnéticos variáveis nas proximidades é um fenômeno fundamental da Física, que se desenvolveu a partir da procura de correntes que poderiam aparecer em condutores próximos a ímãs.

O efeito inicialmente procurado não foi encontrado; entretanto, surgiu dessa pesquisa um novo conjunto de fenômenos que ampliou nosso conhecimento com respeito às relações entre correntes e campos magnéticos e que tem inúmeras aplicações práticas.

A observação de campos elétricos criados por campos magnéticos variáveis nos leva a novas perguntas. Será que um campo elétrico variável produz um campo magnético?

A procura da resposta a esta pergunta nos revelará a impossibilidade de considerar fenômenos elétricos e magnéticos como independentes e resultará numa teoria unificada do eletromagnetismo.

- R22 — Haverá atração se o sentido da corrente for horário e repulsão se o sentido for anti-horário.
- R23 — Precisa-se exercer força externa quando o sentido da corrente é anti-horário.
- R24 — Cede-se energia no 2º caso.
- R25 — Não, porque a energia é dissipada sem que seja fornecida ao sistema.
- R26 — O sistema recebe trabalho e cede calor. Isso corresponde à corrente no sentido anti-horário.

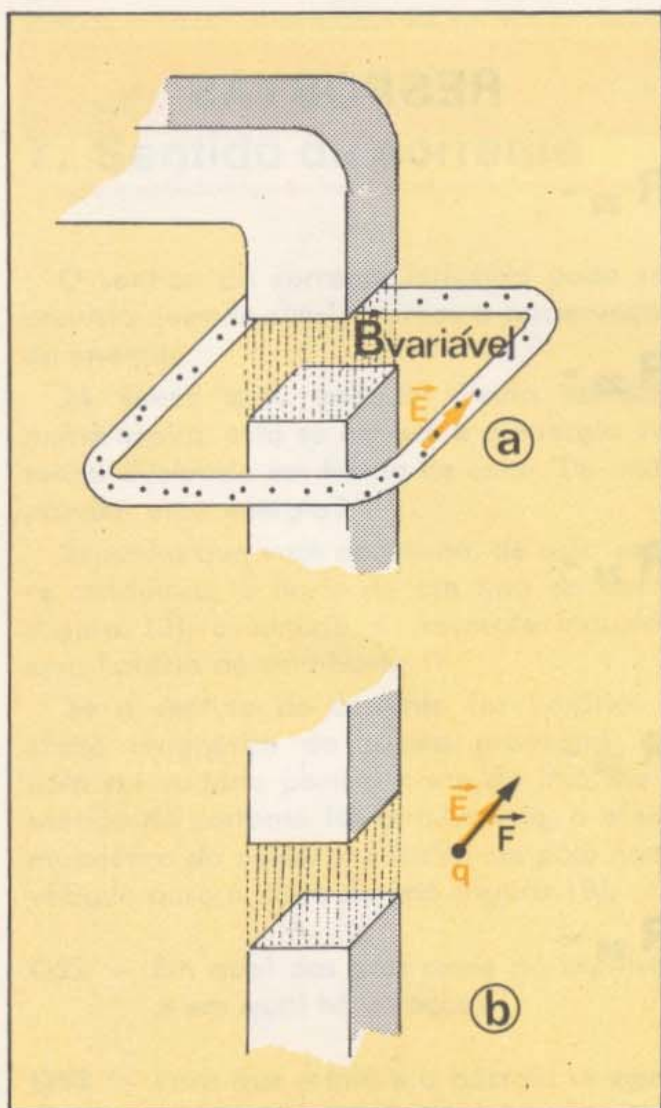


figura 14

RESPOSTAS DE EXERCÍCIOS

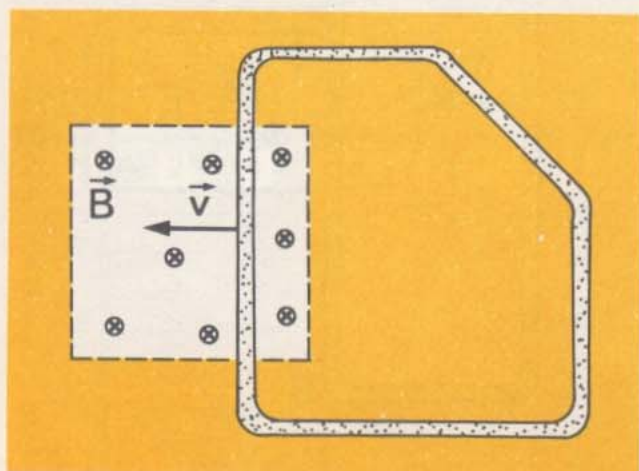


figura 15

9. Exercícios de aplicação

E1 — Neste capítulo você foi levado a realizar uma experiência, para verificar se circula corrente em um condutor imerso num campo magnético.

a) Que fato anterior sugeriu essa experiência?

b) Qual foi o resultado obtido dessa experiência?

c) Em que condições aparece corrente elétrica no condutor? Com que nome é designada essa corrente?

E2 — Um fio condutor se encontra numa região onde existe um campo magnético constante, conforme está esquematizado na figura 15. O campo magnético é perpendicular ao plano do papel, e tem sentido entrando nele. Num certo instante o fio se desloca com uma velocidade \vec{v} no sentido indicado no plano do papel. Indique, na figura 15:

a) direção e sentido da força que aparecem sobre os elétrons do condutor;

R₁ -

R₃ -

b) direção e sentido da corrente elétrica que aparecem no condutor;

c) direção e sentido do vetor indução magnética causados pela corrente induzida na região interna à espira.

E3 — Uma espira, cuja resistência vale 10Ω , é percorrida por uma corrente $5A$, quando um de seus lados se move com velocidade constante, numa região onde o campo magnético é constante e tem uma intensidade de $2T$.

a) Se o fio estivesse em repouso e ligado a uma pilha, qual deveria ser a tensão da pilha para produzir a mesma corrente?

b) De quanto varia por segundo o fluxo magnético interno à espira, enquanto o fio se desloca?

c) O que produz essa variação do fluxo magnético?

d) Se o comprimento da parte do fio que se move no campo magnético é $1m$, qual o valor da velocidade \vec{v} com que o fio se move?

e) Qual o valor da energia dissipada no fio por efeito Joule, em $0,01$ segundo?

E4 — Um fio condutor de resistência 2Ω tem um trecho de $0,2\text{m}$ de comprimento, que está numa região em que o campo magnético é uniforme e igual a 2T . Esse trecho do condutor se movimenta perpendicularmente às linhas de campo com velocidade de $5,0\text{m/s}$.

a) Se o condutor formar um circuito fechado, aparece corrente induzida? Por quê?

b) Se o fio estiver totalmente fora do campo magnético, qual a tensão que se deve aplicar a seus extremos para que seja percorrido pela mesma corrente i ?

c) Calcule o valor da corrente i que percorre o fio, nos dois casos.

d) Suponha agora que a resistência do fio seja igual a 4Ω . Qual será o valor da tensão induzida e o da corrente?

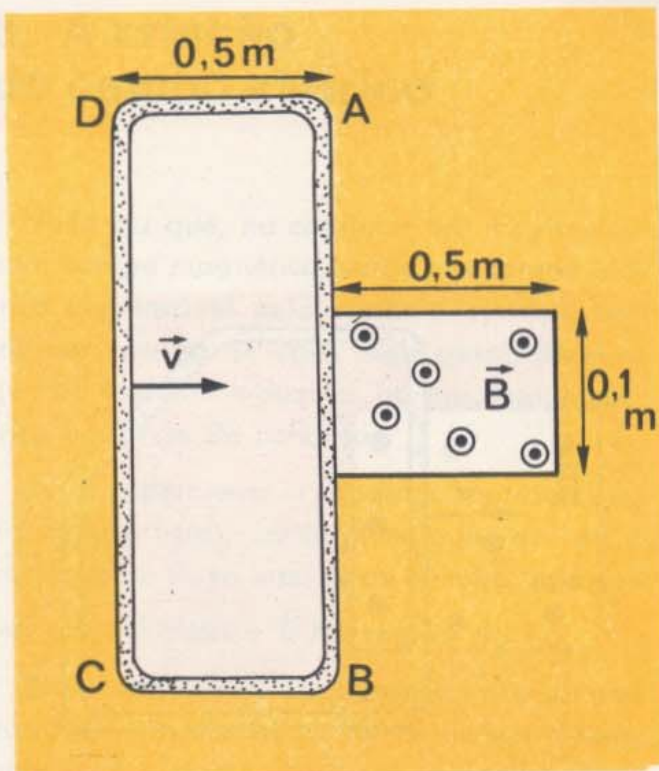


figura 16

E5 — Um fio condutor forma um retângulo e tem resistência de $0,001\Omega$. O condutor se move com uma velocidade de $0,1\text{m/s}$ numa região de campo magnético uniforme de intensidade 2T , como está representado na figura 16. Suponha que, no instante $t = 0$, o lado **AB** começa a entrar no campo magnético.

a) Qual a posição do lado **AB** decorridos 5s ?

b) Indique o sentido da corrente que aparece no retângulo, no intervalo de tempo entre 0 e 5s .

c) Calcule a corrente que aparece nesse intervalo.

d) Faça o gráfico da corrente em função do tempo para esse intervalo na figura 17.

Considere agora o intervalo de tempo entre 5 e 10s :

e) A área interna ao campo está crescendo ou decrescendo. Sua variação é positiva ou negativa?

f) O sentido da corrente é o mesmo do item b)?

g) Calcule a corrente nesse intervalo.

h) Faça o gráfico da corrente em função do tempo para o intervalo 5 a 10s na figura 17.

i) Qual o valor da corrente depois de 10s ?

j) Qual a energia dissipada no fio, no intervalo entre 0 e 5s ? E entre 5 e 10s ? E no intervalo total 0 a 10s ?

E6 — Suponha que, no exercício anterior, a espira pode girar em torno de um de seus lados. Neste caso apareceria corrente induzida? Justifique.

E7 — É possível aparecer corrente induzida numa espira fixa em relação a um dispositivo que cria campo magnético? Justifique. Você já efetuou alguma experiência que ilustra esse fato?

E8 — Uma espira condutora está numa região de campo magnético produzido por um eletroímã, alimentado por corrente alternada. Neste caso aparece corrente induzida na espira? Justifique.

E9 — Na primeira experiência feita neste capítulo, um ímã era deslocado em

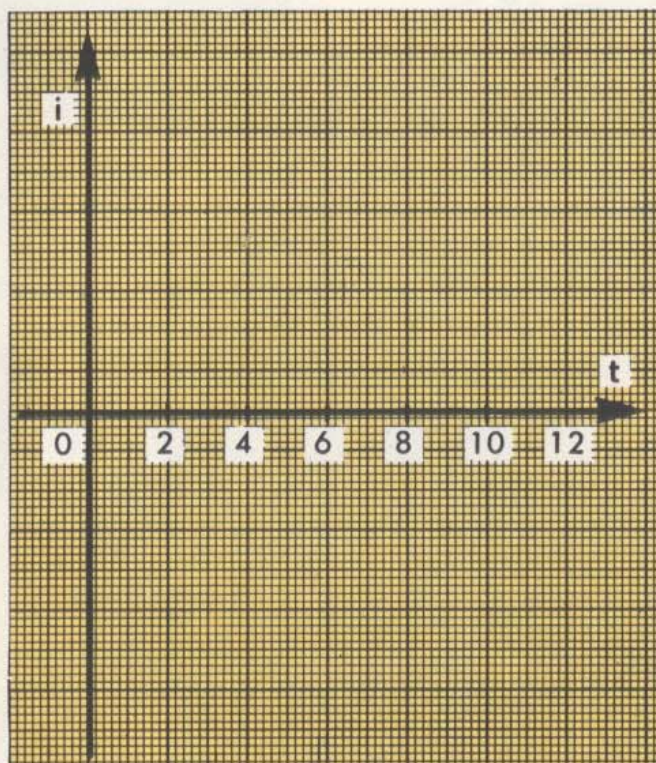


figura 17

relação a uma bobina de fio de cobre, aproximando-se ou afastando-se dela.

a) Você notou diferença no desvio da agulha da bússola, quando o ímã se afastava ou se aproximava?

b) Como explica essa diferença, utilizando o conceito de fluxo magnético como foi definido neste capítulo?

E10 — Uma espira retangular de resistência 1Ω , de dimensões $50\text{cm} \times 20\text{cm}$, está colocada numa região onde o campo magnético é de 10^{-2}T . O fio que forma a espira é deformado e sua área é reduzida a zero em 10^{-1} segundos.

a) Qual o valor da corrente induzida?

b) Durante quanto tempo o fio é percorrido por corrente?

E11 — Suponha que, no exercício 10, a espira não sofre variação na área, mas o campo magnético é extinto em 10^{-1} segundos. Neste caso, qual será a tensão induzida na espira?

RESPOSTAS DE EXERCÍCIOS

R_4 -

R_5 -

R_6 -

R_7 -

R_8 -

R_9 -

R_{10} -

R_{11} -

RESPOSTAS DE EXERCÍCIOS

R₁₂ -

R₁₃ -

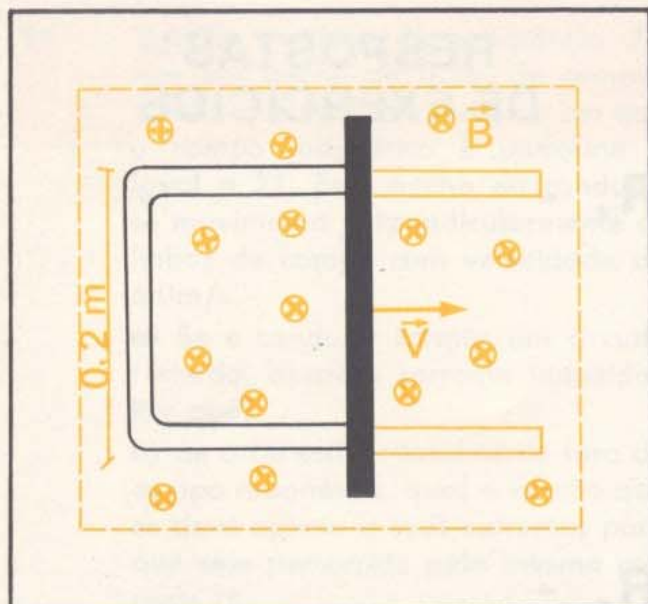


figura 18

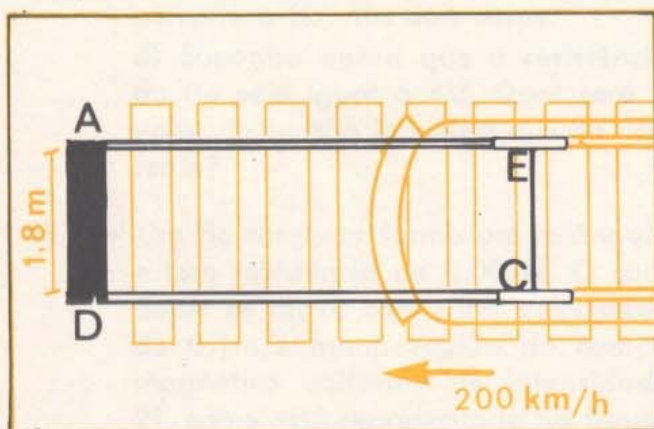


figura 19

E12 — Uma espira é formada por um condutor em forma de "U" sobre o qual corre uma barra condutora, como está indicado na figura 18. A espira está imersa numa região de campo magnético uniforme, de intensidade igual a 1T, perpendicular ao plano da espira. Suponha que um experimentador desloca a barra sobre o "U" com velocidade 1m/s, na direção indicada.

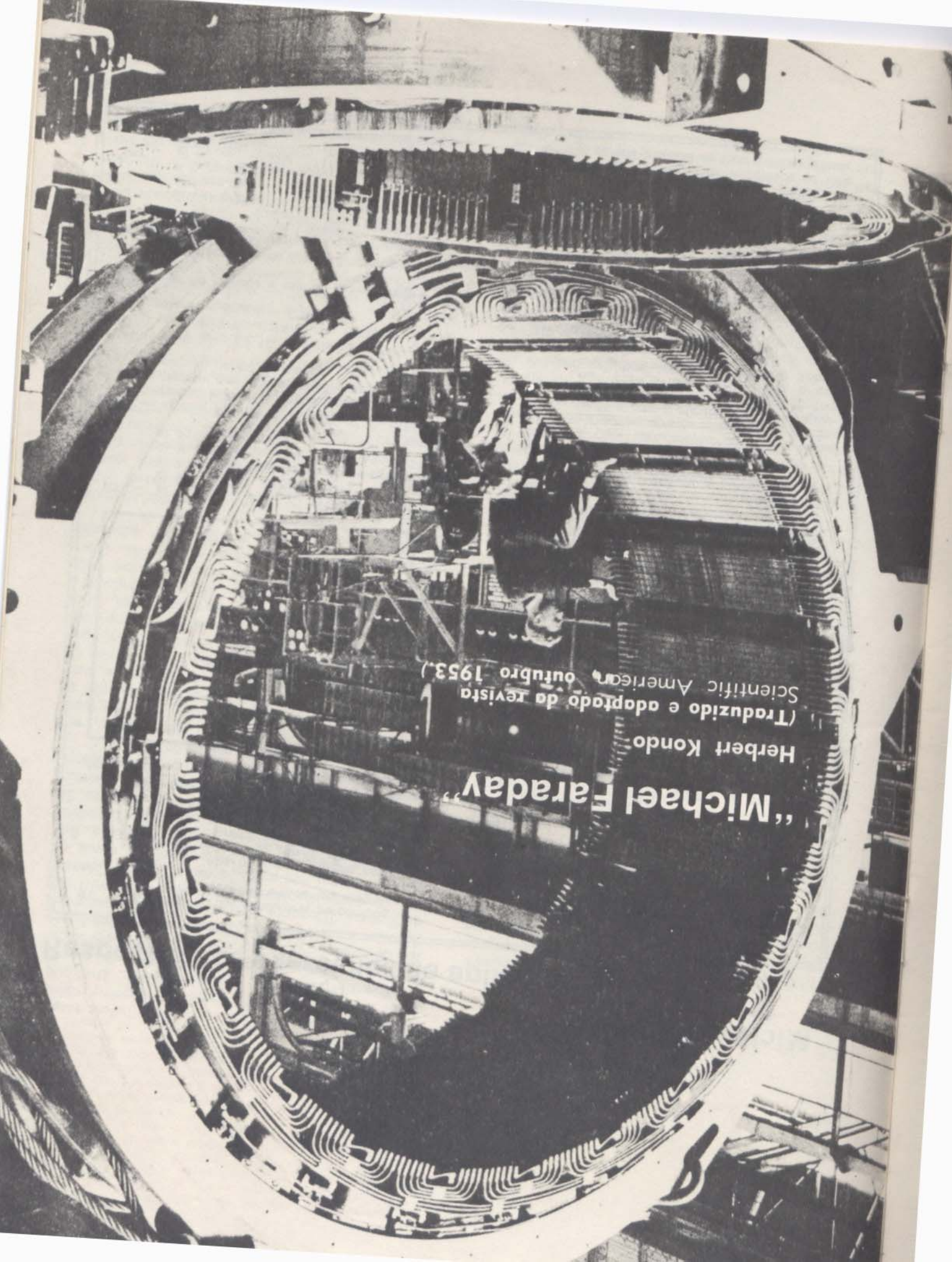
- Qual a variação de área ΔS da espira num intervalo de tempo Δt ?
- Qual a tensão induzida na espira?
- Invertendo o sentido de \vec{B} , há modificação no sentido da corrente?
- Qual a variação de fluxo magnético por segundo?

E13 — Os trilhos de uma estrada de ferro

distam entre si 1,8m e estão numa região em que a componente vertical do campo magnético terrestre vale $10^{-5}T$. Uma barra de ferro faz o contato entre os dois trilhos numa posição AD e um trem BC aproxima-se dessa posição com velocidade de 200km/h. Suponha que, num dado instante, a resistência total dos trilhos (comprimento AECD) é 5Ω (figura 19).

a) Aparece corrente induzida nos trilhos e no eixo do trem? Qual o seu valor?

b) Supondo que o eixo do trem é um condutor se deslocando num campo magnético, qual o valor da força que age sobre ele? Essa força produz alteração na velocidade do trem? Qual?



"Michael Faraday"
Herbert Kondo
(Traduzido e adaptado da revista
Scientific American, outubro 1953.)

Antes de Faraday, os cientistas já tinham descoberto que a eletricidade podia também produzir luz e calor; mas todos

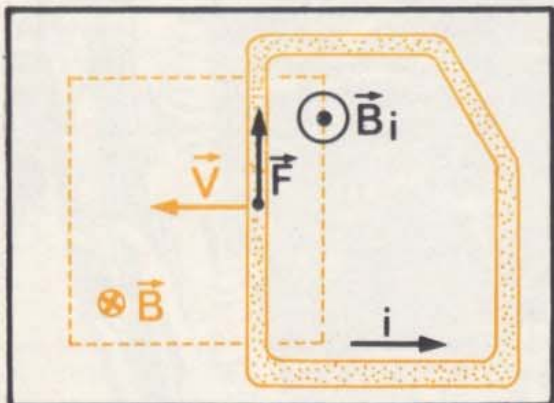
os motores elétricos e máquinas elétricas hoje em uso resultam de uma aplicação direta das descobertas de Faraday, desde as formas de galvanoplastia até os acumuladores e baterias modernos. O motor elétrico, que foi de início desenvolvido experimentalmente por Faraday, tornou-se agora de vital importância na indústria.

A fotografia da página anterior é de um cilindro fixo ao chão, onde estão presas bobinas, que fazem parte de um imenso motor elétrico. Dentro desse cilindro vai encaixado o eixo principal do motor, com outro conjunto de bobinas.

Respostas dos exercícios de aplicação

- R1 — a) O fato de fios condutores percorridos por corrente produzirem campo magnético.
b) Quando não há movimento do condutor em relação ao campo magnético não surge corrente induzida.
c) Quando há movimento relativo entre o condutor e o campo magnético aparece uma corrente induzida.

R2 —



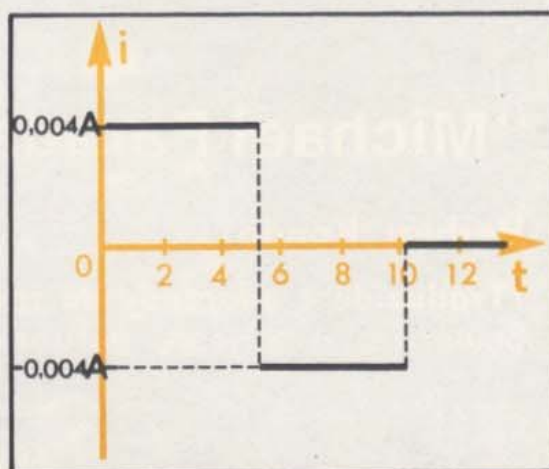
- R3 — a) $V = Ri = 10 \times 5 = 50$ volts.
b) $V = \Delta\phi/\Delta t = 50$ weber/s.
c) A variação da área dentro do campo.
d) $V = B \cdot \ell \cdot v \therefore v = 25$ m/s.
e) $E = Ri^2t = 2,5$ J.

- R4 — a) Sim. Porque os elétrons do material ficarão sujeitos a forças. Podemos dizer também que haverá variação da área do circuito dentro do campo.

- b) $V = B \cdot \ell \cdot v = 2$ volts.
c) $i = V/R = 1$ A.
d) $V = 2$ v e $i = 0,5$ A.

- R5 — a) AB começa a sair do campo magnético.
b) O sentido é de A para B, percorrendo todo o retângulo.
c) Para o instante t qualquer
 $\Delta\phi = 0,02\Delta t \therefore i = 0,004$ A.
d) Ver gráfico.
e) Negativa.
f) É contrário ao de b.
g) $\Delta\phi = -0,02\Delta t \therefore i = 0,004$ A.
h) Ver gráfico.
i) Depois de 10s, a corrente é zero.

- j) $E = Ri^2t \therefore E = 8 \times 10^{-8}$ J entre 0 e 5s
 $E = 8 \times 10^{-8}$ J entre 5 e 10s
 $E = 16 \times 10^{-8}$ J entre 0 e 10s



- R6 — Sim, porque o fluxo magnético na espira varia.

- R7 — É possível, basta que o campo magnético varie com o tempo. A experiência com a lâmpada de néon ilustra esse fato.

- R8 — Sim. A corrente alternada produz campo magnético variável. A corrente induzida também será alternada.

- R9 — a) Sim.
b) Com aproximação do ímã, o fluxo magnético através dela estava aumentando e com o afastamento estava diminuindo. A variação de fluxo era positiva num caso e negativa no outro, o que criava uma corrente num ou noutro sentidos.

- R10 — a) $\Delta\phi = -10^{-3}$ Weber $\therefore V = -10^{-2}$ v
 $i = -10^{-2}$ A.
b) 10^{-1} s.

- R11 — $\Delta\phi = -10^{-3}$ W $\therefore V = -10^{-2}$ v.

- R12 — a) $\Delta S = 0,2\Delta t$.
b) $\Delta\phi = 0,2\Delta t \therefore V = 0,2$ v.
c) Sim.
d) $\Delta\phi/\Delta t = 0,2$ weber/s.

- R13 — a) Sim, $i = 2 \times 10^{-2}$ A.
b) $F = 3,6 \times 10^{-7}$ N.

Essa força não produz, na prática, nenhuma alteração na velocidade do trem porque a massa do trem é muito grande.

Leitura Suplementar

Michael Faraday

Michael Faraday celebrou-se como o experimentador que descobriu a indução eletromagnética, mas a História parece ter esquecido que ele foi também um dos grandes fundadores da Física Moderna. Na verdade, pode-se dizer que foi ele quem começou a revolução que abalou o longo reinado de Newton e reconstruiu a Física sobre novos alicerces teóricos. Com efeito, Faraday foi o primeiro cientista que sugeriu a moderna idéia de campo — conceito que haveria de tornar-se a pedra fundamental da teoria eletromagnética de James Clark Maxwell, da Teoria da Relatividade Geral de Albert Einstein e do progresso do século XX na compreensão da realidade física.

Não menos interessante que tudo isso é que Faraday estudou pouca matemática e sua instrução formal não passou dos primeiros anos. Aos físicos de hoje, sua realização talvez pareça incrível. Na realidade, a ignorância de Faraday em matemática, contribuiu para sua inspiração. Levou-o a desenvolver um conceito simples e não matemático, quando buscava explicação de seus fenômenos elétricos e magnéticos. Sua dedução da teoria do campo ilustra duas qualidades que lhe compensaram amplamente a falta de instrução: fantástica intuição e independência e originalidade de espírito.

Os biógrafos de Faraday têm salientado sua grande energia intelectual e sua obsessão pelas pesquisas experimentais. Felizmente, para os biógrafos, ele costumava deixar tudo por escrito; suas notas e apontamentos foram depois publicados sob forma de diário, em sete volumes. A Física e a Química eram as grandes paixões de sua vida. Poderia ter feito fortuna com suas descobertas, mas abandonava deliberadamente os projetos científicos quando começavam a ter interesse comercial. Nasceu e morreu na pobreza — seu trabalho foi para ele uma recompensa suficiente.

Filho de um ferreiro, Faraday nasceu perto de Londres, em 22 de setembro de 1791. Sua família era muito pobre para mantê-lo na escola. "Minha instrução", anotou em seu diário, "foi das mais simples, consistindo em pouco mais que rudimentos de leitura, escrita e aritmética numa escola comum. As horas fora da escola

foram passadas em casa e na rua." Aos treze anos arranhou emprego como mensageiro numa livraria pertencente a um tal Riebau. Um ano depois, o patrão passou-o à categoria de aprendiz de encadernador por um período de sete anos. Faraday manifestou grande interesse pelos livros de Riebau. "Durante meu aprendizado", escreveu no seu diário, "gostava de ler os livros científicos que me caíam nas mãos, e entre eles as **Conversas Sobre Química**, de Marcat, assim como os tópicos sobre eletricidade da **Enciclopédia Britânica**." Faraday assistiu a algumas palestras sobre Química, feitas pelo famoso cientista Sir Humphrey Davy, e tomou notas muito exatas. Não tardou em pleitear um emprego na Sociedade Real, mas foi logo rejeitado.

Terminada a aprendizagem de Faraday, em 1812, passou a trabalhar como encadernador tarefeiro para um Sr. De la Roche. Mas não se sentia feliz no trabalho e tratou de pedir emprego a Davy, apresentando-lhe, como prova de seu desvelo, as notas que tomara. Davy, que era homem vaidoso, ficou impressionado e contratou Faraday como seu secretário, mas, após alguns meses, o dispensou, aconselhando-o a que voltasse ao ofício de encadernador. Não muito depois, reconsiderando a decisão, Davy contratou Faraday como assistente de laboratório.

Daí por diante, Faraday iria dedicar todas as suas horas de trabalho à ciência pura. Após uma viagem de dois anos pela Europa, com o Sr. Humphrey, dedicou-se exclusivamente a trabalhar no laboratório do patrão. Realizou experimentos de química, eletroquímica e metalurgia, que seriam suficientes para dar-lhe reputação de cientista: descobriu o benzeno, produziu o primeiro aço inoxidável, foi o primeiro a liquefazer muitos gases, descobriu as leis da eletrólise e as leis da rotação magnética do plano de polarização da luz. Mas aqui estamos interessados no seu trabalho principal — o eletromagnetismo.

Em 1820, o físico dinamarquês Hans Christian Oersted anunciara ter descoberto uma relação entre magnetismo e eletricidade. Verificara que uma corrente contínua, num fio, causava a deflexão de uma agulha magnética colocada perto dela. Oersted levantou a hipótese de que o fio condutor seria cercado por um campo magnético, que agiria em círculos em torno do fio e perpendicularmente a este. No ano seguinte, o francês André Marie Ampère substituiu a agu-

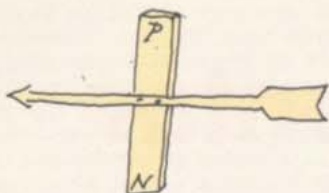


figura 20

lha magnética por um outro fio percorrido por corrente e encontrou uma força magnética de atração ou repulsão entre os dois fios, dependendo do sentido da corrente.

Embora absortos em pesquisas químicas, Davy e Faraday logo se interessaram pelas novas descobertas eletromagnéticas. Repetiram as experiências, por simples prazer. Ao mesmo tempo, o famoso cientista inglês William Hyde Wollaston sugeriu a Davy a possibilidade de que o campo magnético pudesse produzir rotação. Faraday interpretou isso como rotação de um fio em torno de seu eixo. Não conseguiu encontrar tal resultado, mas logo estabeleceu para si mesmo — independentemente, ou logo após ouvir falar da teoria de Oersted — a ação circular e perpendicular de um campo magnético em torno de um condutor. Raciocinou que, se um pólo magnético tivesse liberdade de se mover, deveria girar em volta do condutor, e que o contrário também deveria ser verdadeiro. O próprio condutor deveria ser capaz de girar em torno do pólo magnético.

Faraday imediatamente realizou as famosas experiências que o levariam a descobrir os princípios básicos do motor elétrico. Em sua primeira experiência dobrou um fio de cobre, dando-lhe forma parecida com a de um arco de pua; enfiou uma das extremidades numa rolha, posta a flutuar numa cuba de mercúrio, e a outra extremidade ligou-a a uma bateria por meio de uma taça de prata invertida. Colocou então um ímã de barra dentro da parte curva do fio. Quando a corrente passava através do circuito fio-mercúrio, o fio encurvado girava até tocar o ímã. Depois, Faraday modificou a experiência, de modo que o fio girasse sem obstrução em torno do ímã. Utilizava, então, um pedaço reto de fio, com uma das extremidades presa na rolha, que flutuava no recipiente com mercúrio. A passagem de corrente pelo fio fazia-o girar continuamente em volta do ímã. Quando se invertia a direção da corrente, o fio girava no sentido oposto. As figuras 21 e 22 mostram os esquemas simplificados destas duas experiências, esboçados pelo próprio Faraday. Na figura 22, o fio reto vertical e o fio curvo mergulhando no mercúrio foram ligados a uma bateria.

5-22

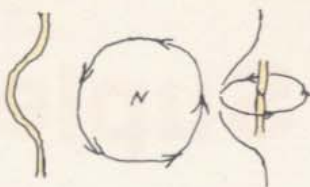


figura 21

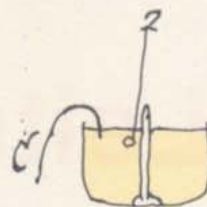


figura 22

Prosseguindo, Faraday realizou a experiência contrária, para verificar se um ímã giraria em torno de um condutor fixo. Desta vez o ímã de barra (carregado com platina na extremidade inferior) flutuava livremente no mercúrio e o fio estava fixo. Como ele esperava, o ímã realmente girou em volta do fio que conduzia corrente.

Quando Faraday publicou os resultados dessas experiências, foi logo acusado de haver aproveitado a idéia de Wollaston sem fazer menção disso. Na verdade, Faraday interpretara mal a sugestão de Wollaston, acreditando que ele se referisse a uma rotação do fio em torno de seu próprio eixo. As experiências e descobertas que realizou foram, de fato, inteiramente suas. Desfez-se a tempo a divergência e Faraday foi nomeado membro da Royal Society. Wollaston apoiou a sua candidatura, mas Davy votou contra ele, possivelmente por inveja. Assim mesmo ele foi eleito em 1824.

Faraday interrompeu então as suas experiências eletromagnéticas e voltou à Química. Mas uma idéia irreprimível permaneceu em seu espírito. Se uma corrente elétrica podia produzir magnetismo, não poderia um ímã produzir eletricidade? Em 1824 e novamente em 1825 ele tentou induzir corrente num fio, colocando um ímã próximo a ele, mas essas tentativas falharam. Faraday ainda não tinha percebido a capital importância do movimento nos fenômenos revelados por Oersted. Era o movimento das cargas elétricas no fio que produzia o magnetismo. Para obter o efeito oposto, tornava-se necessário mover o ímã em relação ao condutor.

Em 1831, Faraday, subitamente, encerrou suas pesquisas químicas e dedicou-se completamente ao problema que o intrigava. Num só dia, 29 de agosto de 1831, achou uma resposta que o colocou na pista certa. Seu raciocínio, dessa vez, partiu da analogia com a indução eletrostática. Sabia-se que um corpo carregado poderia induzir corrente elétrica em outro corpo colocado em sua vizinhança. Talvez um fio que conduzisse corrente pudesse induzir corrente em outro fio colocado perto dele. Para verificar isso, Faraday montou um aparelho espantosamente grosseiro, ilustrado aqui com o seu próprio esboço (figura 23). Eis a descrição que ele mesmo fez, em seu diário, da famosa experiência:

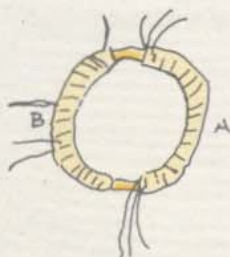


figura 23



figura 24

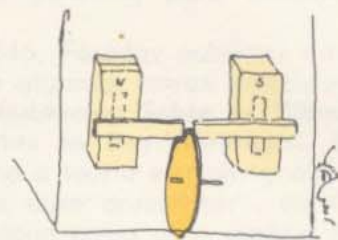


figura 25

"Mandi fazer um anel de ferro (ferro doce), ferro redondo de 7/8 de polegada de espessura, e anel de diâmetro externo de seis polegadas. Enrolei muitas espiras de cobre, sendo a metade das espiras separadas por fio de retrós e chita; havia três pedaços de fio, cada um com aproximadamente 24 pés de comprimento, e eles podiam ser ligados como se fossem um só fio, ou usados como fios separados. Por meio de tentativas com uma bateria, cada um deles foi isolado do outro. Chamarei esse lado do anel de **A**. No outro lado, mas separado por um intervalo, enrolei o fio em duas peças, perfazendo as duas 60 pés de comprimento, e sua direção, a mesma das espiras anteriores. Chamarei a esse lado de **B**.

"Carreguei uma bateria de dez pares de placas de quatro polegadas de lado. Fiz do enrolamento do lado **B** uma bobina e liguei-lhe as extremidades por um fio de cobre que passava a alguma distância e logo acima de uma agulha magnética (a 3 pés de um anel de fio); então, liguei as pontas de um dos pedaços do lado **A** com a bateria. Imediatamente notei um efeito sensível na agulha. Ela oscilou e finalmente fixou-se em sua posição original. Interrompendo as ligações do lado **A** com a bateria, novamente notei uma perturbação da agulha."

Faraday notou que, quando fechava o circuito, a agulha sofria deflexão num sentido; quando abria o circuito, ela se movia em sentido oposto. Mas não havia deflexão, enquanto a eletricidade passava na primeira bobina.

Obtivera afinal eletricidade a partir do magnetismo. Mas ele estava desapontado. Esperava que a corrente na bobina primária induzisse uma corrente contínua na secundária; em vez disso, apenas produzia impulsos momentâneos, quando o circuito primário era ligado ou interrompido. Não obstante, pressentiu que se achava próximo do êxito. Escreveu a um amigo: "Ando novamente ocupado com o eletromagnetismo e penso que consegui uma boa coisa, mas não posso dizer. Depois de tanto trabalho, pode ser que eu tenha finalmente fígado uma alga em vez de um peixe."

Faraday continuou suas experiências e, em 17 de outubro de 1831, realizou uma que revelou

haver ele apanhado um peixe de fato muito grande. Nessa experiência, a mais simples e famosa de quantas realizou, enrolou, em torno de um cilindro oco de papel, uma bobina, cujas extremidades foram ligadas a um galvanômetro (figura 24). Quando enfiava, rapidamente, um ímã de barra no cilindro, a agulha do galvanômetro sofria deflexão. Ela também se movia quando o ímã era retirado, mas no sentido oposto. Na verdade, não fazia diferença mover o ímã ou a bobina; em qualquer caso, ele obtinha corrente induzida no fio. Estava perfeitamente claro, agora, que o que produzia a corrente era o movimento relativo do condutor e do campo magnético.

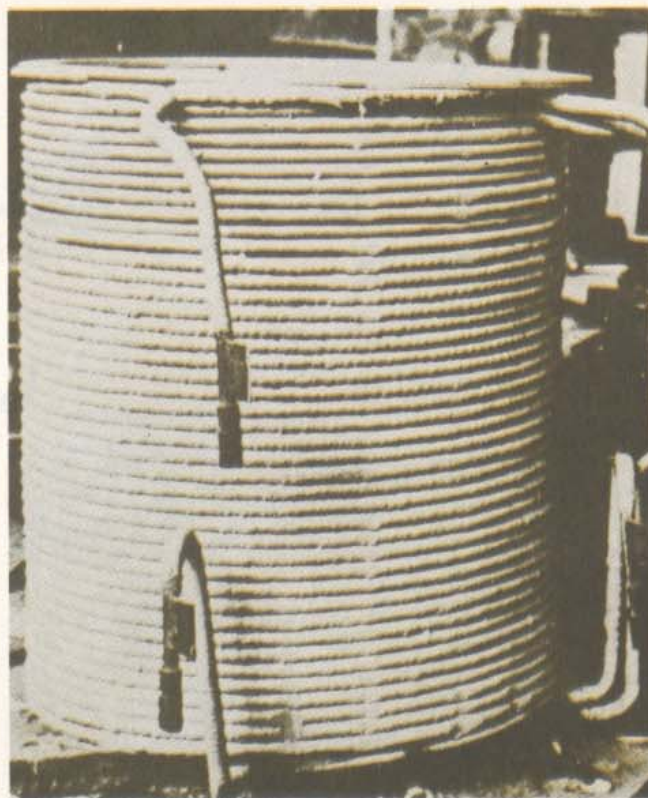
Assim, Faraday descobriu o princípio básico do gerador elétrico. Essa experiência estava a um passo apenas da indução de uma corrente elétrica contínua. Onze dias mais tarde, Faraday conseguiu realizá-la com o dispositivo representado na figura 25. Utilizando o ímã composto da Royal Society, concentrou a intensidade polar, colocando dois pequenos ímãs de seis polegadas nas extremidades dos grandes pólos. Entre estes pólos girava um disco de cobre num eixo de latão. No bordo do disco adaptou dois contatos de cobre, espaçados, a distâncias diferentes dos pólos, ligados por fios a um galvanômetro. Girando o disco, obteve deflexão mais ou menos constante da agulha — "mais ou menos", porque não lhe era fácil manter os contatos.

Realizou Faraday muitas outras experiências de indução eletromagnética, mas em sua maioria não passaram de variações básicas destas. Sua primeira experiência, com o anel de ferro, dera ao mundo o primeiro transformador elétrico; a que acabamos de descrever produziu o primeiro dínamo.

Faraday comunicou seus resultados à Royal Society um mês depois e mais tarde publicou esses trabalhos como primeira parte de suas **Experimental Researches in Electricity**, mas modificou a ordem de muitas experiências de tal modo que confundiu os historiadores.

Logo que os resultados foram publicados, levantou-se novamente a questão da prioridade. O físico norte-americano Joseph Henry já havia descoberto a auto-indução, e Leopoldo Nobili e

Fornos de indução são utilizados para aquecer metais muito puros, que não devem ser tocados enquanto são aquecidos, para que não adquiram impurezas. A bobina da foto é parte de um destes fornos; ela é percorrida por uma corrente alternada muito intensa que produz um campo magnético variável no seu interior. Este campo variável induz correntes no metal aí colocado, aquecendo-o.



Cavaliere Antinori, da Itália, reclamavam a descoberta da indução eletromagnética antes de Faraday ter publicado seus trabalhos. Mas eles haviam realizado suas experiências após saberem das de Faraday, que pôde provar sua prioridade.

Faraday não se satisfaz com a descoberta da indução eletromagnética. Queria saber por que ela ocorria. Incapaz de atacar o assunto matematicamente, recorreu a um modelo físico, o conhecido fenômeno do modo como a limalha de ferro se distribui numa folha de papel, formando linhas ordenadas segundo determinado padrão, em torno de um ímã. Por que linhas? Faraday propôs a idéia de que o espaço em torno do ímã estivesse cheio de linhas de força. A força magnética manifestava-se como linhas invisíveis em estado de tensão — como fitas de borracha estiradas — e a limalha distribuía-se ao longo dessas linhas por atração magnética.

Faraday não se deteve aí. Encheu todo o espaço com linhas de força e delineou o revolucionário conceito de que o espaço estava permeado por várias espécies de forças: magnética, elétrica, radiante, térmica e gravitacional. Por toda parte as linhas indicam a direção e a intensidade da força que se considera. Num ímã de barra, por exemplo, o sentido da linha de força é do pólo positivo para o negativo, ou do pólo norte para o sul; e o número de linhas de força procedentes de um pólo magnético indica sua intensidade num determinado lugar. São mais densas perto do ímã do que mais distante dele, no espaço. A quantidade de eletricidade que um corpo possui, analogamente, seria determinada, segundo

Faraday, pelo número de linhas de forças que dele procedem. Todas as linhas de força terminam em algum lugar, seja em outro corpo próximo, seja nas paredes de uma sala ou nos planetas no espaço. Em cada ponto terminal há uma quantidade de eletricidade igual, mas de carga oposta à do corpo original.

Faraday achou que a teoria das linhas de força explicava como a corrente é induzida num condutor: ela é induzida sempre que o condutor atravessa linhas de força magnéticas. Descobriu que a velocidade do movimento era importante. "Se um fio se desloca lentamente", escreveu, "nele se produz uma corrente fraca, que continua enquanto dura o movimento; se ele se desloca através das mesmas linhas rapidamente, produz-se corrente mais forte por tempo menor." Estritamente falando, o que se induz não é uma corrente, mas uma voltagem. A corrente apenas resulta dessa voltagem.

Da idéia da existência de linhas de força de várias espécies no espaço, Faraday partiu para a sugestão de que essas forças enchem todo o espaço. Em seu diário escreveu, em 1846: "Tudo o que posso dizer é que não percebo em qualquer parte do espaço, esteja ele (para usar a frase comum) vazio ou cheio de matéria, outra coisa senão forças e as linhas nas quais elas se exercem."

Eis aí a origem histórica da teoria de campo. Faraday jamais se referiu pessoalmente ao seu sistema como uma **teoria de campo** ou um **conceito de campo**. Na verdade, ele adotou essas idéias como hipóteses e estava pronto a aban-

doná-las, se a evidência experimental as pudesse negar.

Que há de tão revolucionário no conceito de campo? Apenas isto. Até Faraday, os físicos haviam-se concentrado na partícula material. Do conceito de partícula procuravam deduzir todos os fenômenos. Os processos físicos eram explicados por leis e forças newtonianas de mútua interação, agindo sobre a partícula. Faraday relegou a partícula a um plano secundário, colocando em lugar principal as linhas de força através do espaço. Para Faraday, o importante não eram as partículas elétricas ou magnéticas, mas o espaço em que elas atuam. E isso é toda a base do conceito de campo. Na teoria de campo, o fundamental é a condição física e geométrica do próprio espaço.

Faraday foi muito claro a respeito disso. Em suas **Experimental Researches** escreveu: "Nesta concepção do ímã, o meio ou o espaço em torno dele é tão essencial como o próprio ímã e faz parte do verdadeiro e completo sistema magnético."

Por aí se vê que Faraday, na realidade, sustentava o que hoje chamamos de teoria quântica dos campos, na qual tanto a partícula quanto o campo são fundamentais, mas na qual o campo desempenha o papel básico e diretor. Foi ele, pois, precursor da moderna revolução relativística na Física e a construção do conceito de campo deve ser colocada como uma das maiores criações do pensamento científico.

Faraday não considerava a idéia de campo como teoria distinta do sistema newtoniano, mas antes como complemento deste. Não procurava destronar o conceito de partícula; isto ocorreu como consequência ulterior de sua sugestão. Ele também começou a derrubada de um outro conceito importante — a idéia de ação a distância. Newton supôs, como aliás acreditavam os filósofos muito antes dele, que as forças podiam agir a grandes distâncias — instantaneamente e sem necessidade da intervenção de qualquer meio. Somente dessa maneira, pensavam, seria possível explicar a força gravitacional entre planetas e estrelas.

No século XIX, a ação a distância tinha pé firme na Física. Faraday achava, entretanto, que tal conceito não era satisfatório e que os postulados da mecânica newtoniana não eram consistentes com os fenômenos eletrodinâmicos. Não hesitou em abandonar a ação a distância e formular seu próprio conceito. A força exige tempo para transmitir-se, disse ele, e os meios de transmissão são as linhas de força. Sempre que possível, Faraday realizou experiências para demonstrar que a força em questão demandava tempo. Fracassou no caso da força gravitacional, mas não se afastou da idéia de que estava com a razão. Faraday não destruiu, por si mesmo, o conceito da ação a distância; quem o fez foram

Maxwell, eliminando-o da eletrodinâmica, e Hendrik Lorentz, cujas equações de transformação baniram esse conceito, para sempre, da Física.

Em maio de 1846, Faraday publicou interessante artigo sobre algumas novas especulações, sob o título de **Meditações Sobre as Vibrações dos Raios (Thoughts on Ray-Vibrations)**. Esboçava nesse trabalho a teoria eletromagnética da luz. "A idéia que ousou apresentar", escreveu, "considera a radiação como uma espécie superior de vibrações nas linhas de força, que, segundo sabemos, mantêm unidas as partículas e também as massas de matéria. Procura eliminar o éter, mas não as vibrações." Pouco depois, Maxwell desenvolveu matematicamente essa "ousada" idéia, anunciando sua teoria eletromagnética. Faraday estabelecera, empiricamente, uma relação entre luz e magnetismo. Numa série de brilhantes experiências, demonstrou que um campo magnético pode fazer girar o plano de polarização da luz.

Faraday tinha profunda e profética crença na unidade essencial da natureza e das leis da Física. Acreditava que as forças gravitacionais e eletromagnéticas estavam relacionadas de alguma forma e que alguma lei ou princípio devia governar essa relação. Em 1849, rabiscou em seu caderno de laboratório: "Gravidade. Esta força deve por certo ter uma relação experimental com a eletricidade, o magnetismo e as outras forças, unindo-se a elas em ação recíproca e efeito equivalente. Considerem por meio de fatos e tentativas." Mas as numerosas experiências que efetuou para demonstrar tal relação fracassaram. Em nota triste, apesar de otimista, concluiu ele: "Aqui terminam minhas tentativas por enquanto. Os resultados são negativos. Não abalam, porém, minha forte sensação de que existe relação entre gravidade e eletricidade, embora não me tragam prova desse fato."

Estava ainda a trabalhar nesse problema dez anos mais tarde, quando escreveu seu último artigo. Apesar de seu mau estado de saúde, não deixara de experimentar e especular. Sofria prolongados lapsos de memória e, por esquecimento, repetia às vezes experiências que acabara de realizar com êxito pouco antes. O cientista nascido na pobreza e sem estudos era agora professor vitalício da Royal Institution e vivia em Hampton Court. Em 1867, sua sobrinha, Senhora Reid, escreveu ao íntimo amigo de Faraday, Bence Jones: "O querido tio tem passado um pouco melhor do que de outras vezes, mas, coitado!, dá pena ver como o seu espírito novamente se apagou. . . O início deste ano nos traz a triste impressão de declínio do seu estado de semiparalisia. . ."

A 25 de agosto de 1867, Michael Faraday morreu em paz em sua cadeira de estudo, sem se dar conta do tumulto que provocaria a questão sobre o que era supremo: o campo ou a partícula.

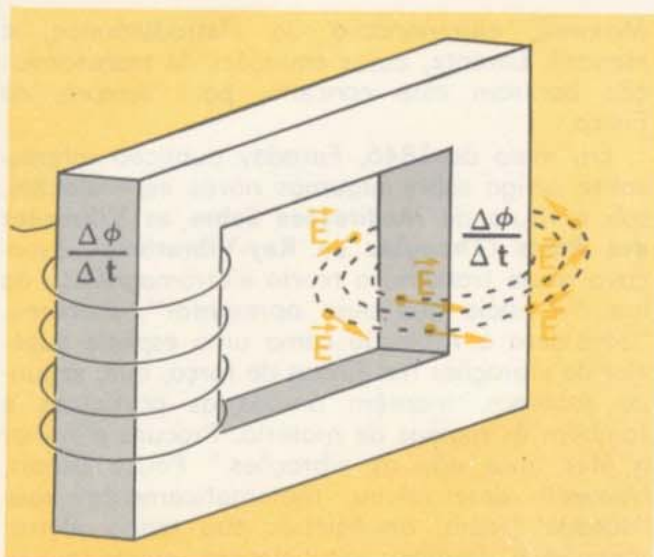


figura 26

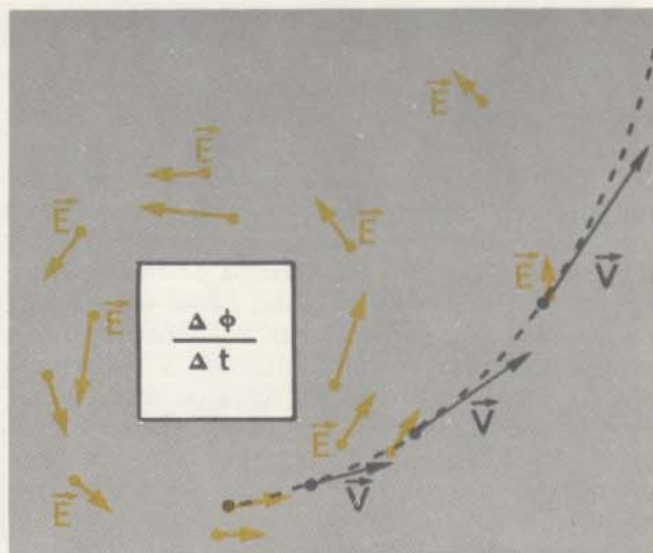


figura 27

O bétatron

O bétatron é um dispositivo que utiliza a indução eletromagnética, para acelerar elétrons até atingirem grandes energias.

Os **aceleradores de partículas** são usados em vários campos da pesquisa e da tecnologia, para obter feixes de partículas com grandes velocidades. As partículas mais comumente aceleradas são elétrons, prótons, partículas α (alfa) e núcleos de átomos pesados, como oxigênio, neônio etc.

Qual o interesse em obter partículas com grandes velocidades?

Feixes de partículas carregadas são de grande interesse na Medicina, na indústria e no estudo de ciências fundamentais, como a Física e a Biologia.

Em **Elettricidade** você estudará que uma partícula carregada e livre, em um campo elétrico \vec{E} , fica sujeita a uma força, portanto, a uma aceleração, e, assim, adquire velocidade.

Como você acabou de estudar neste capítulo, nas proximidades de um eletroímã, enquanto o campo magnético está variando, existem campos elétricos.

Será possível usar esses campos elétricos para acelerar partículas?

Vejamos inicialmente qual é a configuração do campo elétrico próximo a um eletroímã. A figura 26 nos mostra que as linhas do campo elétrico são fechadas. Isto significa que, se uma partícula percorrer uma circunferência, a força que agirá sobre ela terá sempre o mesmo sentido. Você já viu também que, nas espiras do secundário de um transformador, essa é a força que produz a corrente induzida. Entretanto, os elétrons não atingem grandes velocidades na espira, pois se movem no metal e perdem energia constantemente, por colisão com os átomos.

O que ocorrerá se colocarmos um elétron livre na região do campo?

É fácil ver que será acelerado. Sua trajetória será semelhante à da figura 27. Assim, em pouco tempo o elétron se afastará da região em que o campo é intenso, deixando de ser acelerado.

Para manter a partícula sob a ação do campo por mais tempo, é necessário mantê-la em órbita circular próxima do ímã. Isso pode ser obtido por meio de um campo magnético \vec{B} normal à trajetória (figura 28). Esse campo faz com que a partícula carregada e em movimento fique su-

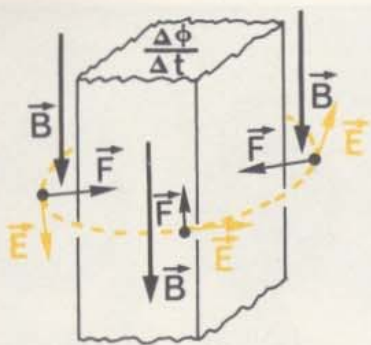


figura 28

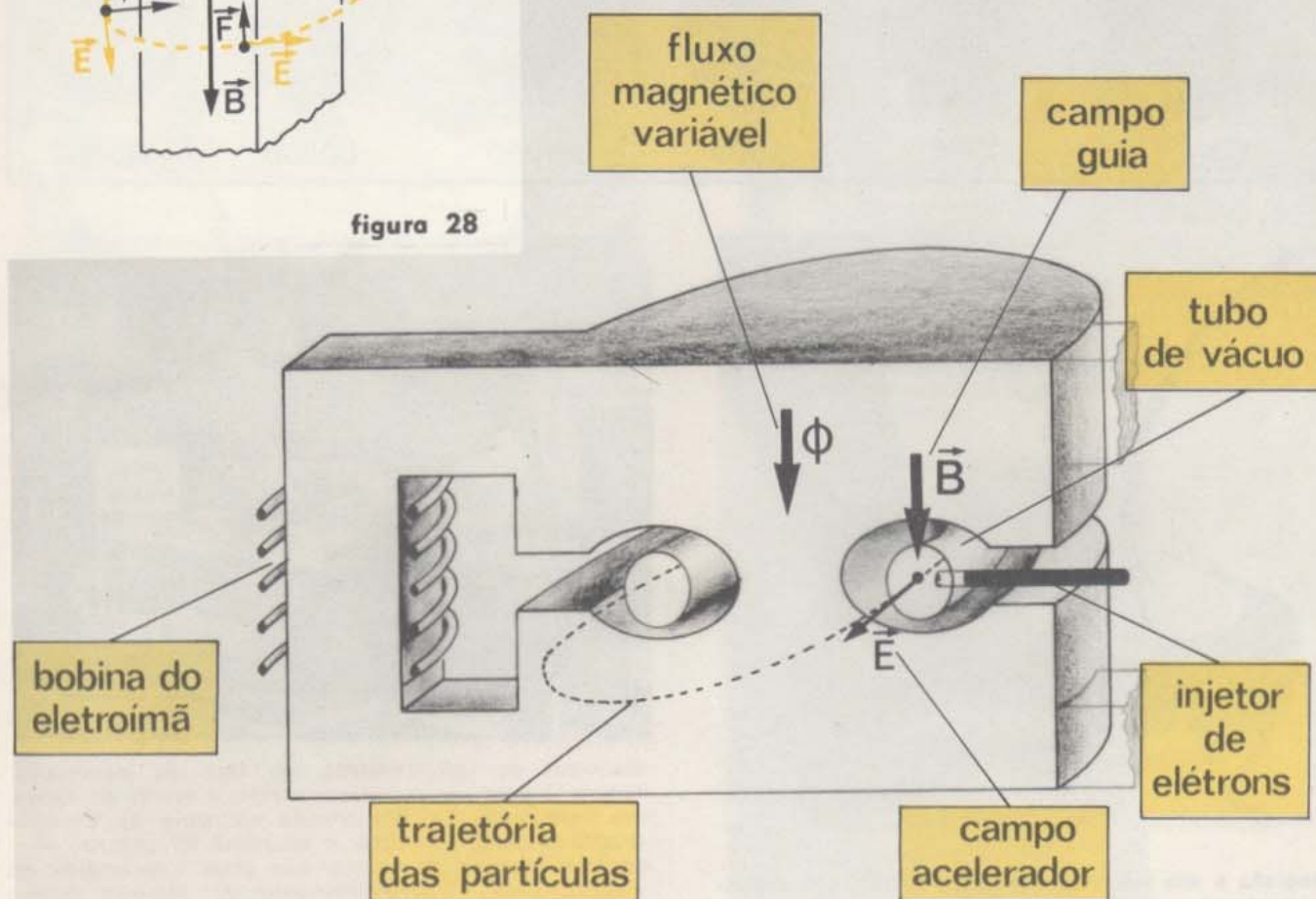


figura 29

jeita a uma força centrípeta \vec{F} . Então, a partícula poderá dar muitas voltas, sendo acelerada até atingir grandes velocidades.

Agora é mais fácil compreender os constituintes essenciais e o funcionamento de um acelerador de partículas do tipo betatron. Esses constituintes estão representados na figura 29.

Quando uma corrente passa pela **bobina do eletroímã**, aparece na região da trajetória das partículas um **campo-guia** \vec{B} que mantém as partículas em **órbita** circular. Enquanto a corrente está variando, o fluxo Φ varia e, por indução, aparece um **campo acelerador** \vec{E} , que faz as partículas ganharem velocidade. Quanto maior a velocidade das partículas, maior deverá ser o valor de \vec{B} , para manter as partículas em órbita circular.

O eletroímã de um betatron é projetado de forma que o aumento de velocidade das partículas seja acompanhado de um aumento do valor de \vec{B} . Assim, a órbita das partículas será uma circunferência de raio constante.

Os betatrons, como o nome sugere, aceleram

partículas β (beta), isto é, elétrons. Para acelerar essas partículas, devem elas ser injetadas em um **tubo com vácuo**, por um **injetor de elétrons**, que contém um fio aquecido. Esse fio é semelhante ao filamento de uma lâmpada incandescente (lâmpada comum de lanterna), que emite elétrons continuamente.

Como os elétrons são muito leves, adquirem rapidamente velocidades próximas à da luz, mas não podem ultrapassá-la, como explica a teoria da relatividade (veja "Leitura Suplementar" do capítulo 5 de **Mecânica**). Ao se aproximarem dessa velocidade, a velocidade dos elétrons aumenta muito lentamente; entretanto, sua energia continua crescendo. De acordo com a teoria da relatividade, esse aumento de energia vem acompanhado de um aumento da massa do elétron e disso há comprovação experimental; um elétron acelerado em um betatron tem sua massa dezenas de vezes aumentada.

Durante o processo de aceleração das partículas, o campo e o fluxo magnético crescem de zero até um valor máximo.

Para iniciar o processo de aceleração de um novo grupo de partículas, o valor do fluxo e do



Radiografia a alta velocidade feita em $1/1\,000\,000$ segundos, mostrando uma bola de futebol americano sob o impacto do pé do jogador.

campo magnético deve ter novamente reduzido a zero.

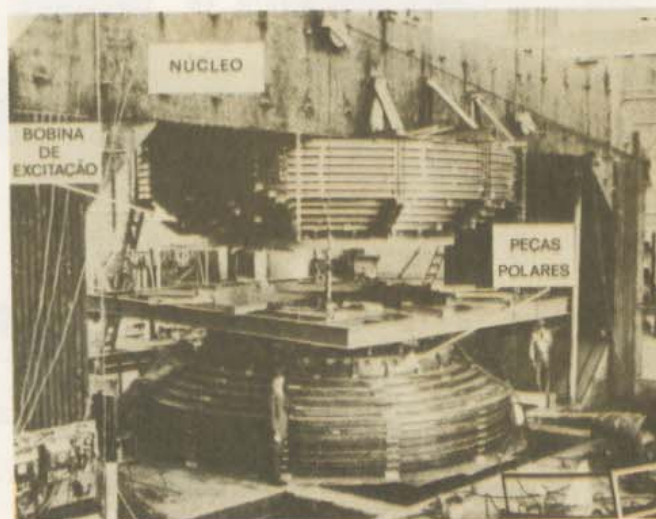
Durante o processo de aceleração, que num betatron típico dura cerca de 0,001s, os elétrons executam cerca de 10^5 voltas em uma órbita de aproximadamente 20cm de raio, a uma velocidade próxima à da luz (300 000 km/s) e percorrem um espaço de aproximadamente 300 km.

Os betatrons funcionam normalmente com corrente alternada e produzem cerca de 180 "pacotes" de elétrons por segundo. Cada "pacote" contém aproximadamente 10^8 elétrons. Você sabe que a carga de um elétron é igual a $1,6 \times 10^{-19}$ coulombs; logo, a corrente média de um feixe de elétrons, produzidos pelo betatron, é de 3×10^{-9} A.

Os elétrons são acelerados até alcançarem a energia da ordem de 25 MeV (milhões de elétrons-volts). Para acelerar um elétron até que ele adquira essa energia, seria necessária uma diferença de potencial de 25 milhões de volts.

Como você acabou de ver, a aplicação prática da indução eletromagnética permite construir dispositivos capazes de acelerar elétrons até que eles atinjam grandes energias: os betatrons.

5-28



Eletroímã de um ciclotron em fase de construção. Projetado para ser o acelerador mais potente da época, sua construção foi interrompida no início da Segunda Guerra Mundial. Em 1942, o eletroímã foi utilizado para separar isótopos de urânio, que eram empregados em estudos para o desenvolvimento da primeira bomba atômica. Em 1945, o acelerador foi terminado, sendo usado até hoje em pesquisas.

Além dos betatrons, existem outros tipos de aceleradores, como o Van de Graaf (veja a "Leitura Suplementar" do capítulo 3 de **Eletricidade**), o ciclotron, o síncrotron, o acelerador linear etc.

Alguns desses aceleradores aceleram prótons, outros elétrons e cada um deles tem uma faixa de energia, corrente e frequência de repetição que vai determinar qual o mais vantajoso para o uso que se tem em vista.

Os aceleradores servem para muitos usos, mas vamos tratar só de três deles: obtenção de raios X, estudo da estrutura do núcleo dos átomos e estudo da estrutura dos sólidos.

1) Obtenção de raios X. Quando elétrons de grande velocidade são lançados contra um material pesado (massa atômica grande), como ouro, tungstênio ou urânio, produzem-se raios X. Esses raios, que constituem radiação eletromagnética de comprimento de onda muito curto, são capazes de atravessar materiais e destruir células dos seres vivos. São muito usados em radiografias, para "ver" regiões internas do corpo



Metade inferior do ímã de um ciclotron moderno em construção, em 1972. A equipe dos construtores aparece na foto e dá uma idéia de suas dimensões.



O betatron e seu idealizador, Prof. Donald W. Kerst. Sobre a mesa está o primeiro betatron construído; o do fundo é um mais moderno.

Este betatron foi usado em estudos de Física Nuclear na Universidade de São Paulo, de 1950 a 1965. Atualmente está exposto no Instituto de Física, na Cidade Universitária de São Paulo.



humano e de objetos vários. Além disso, os raios X são usados em radioterapia para destruição de tumores, para esterilizar material cirúrgico e preservar alimentos.

2) Estudo da estrutura do núcleo dos átomos. Pode-se estudar a estrutura do núcleo dos átomos observando o resultado de colisões entre esses núcleos e elétrons, prótons, partículas α e raios X. Foi estudando a colisão entre partículas α e átomos de ouro que, no começo do século, o físico inglês Ernst Rutherford comprovou que os átomos possuem um núcleo. Foi ainda no estudo da colisão de partículas α com núcleos que o físico brasileiro César Lattes produziu e observou, pela primeira vez, em laboratório, os mésons π . Os mésons π , de vida muito curta, menor do que 1 milionésimo de segundo (10^{-6} s), permitem compreender melhor as forças que existem no núcleo do átomo e mantêm ligados os prótons e os nêutrons. Essas forças, chamadas forças nucleares, têm características diferentes das forças eletromagnéticas e gravitacionais. A partir desses três tipos de forças procura-se explicar todas as interações entre as partículas encontradas na natureza.

3) Estudo da estrutura dos sólidos. Quando partículas de grande velocidade atingem materiais sólidos, colidem com os núcleos e com os elétrons dos átomos. As colisões com os núcleos são pouco frequentes devido às suas pequenas dimensões; nas colisões com os elétrons, estes adquirem energia e vão, aos poucos, freando a partícula incidente. Esses processos produzem alterações nas propriedades dos sólidos. O estudo dessas alterações permite compreender melhor a estrutura dos cristais e materiais sólidos. Além disso, as alterações produzidas nos sólidos podem ser de interesse industrial; assim, por exemplo, submetendo certos plásticos à irradiação, é possível aumentar sua resistência ao calor.

Como você pode perceber, é grande a utilidade dos feixes de partículas de grande energia. Essas partículas são obtidas em aceleradores que utilizam vários princípios engenhosos para o seu funcionamento.

Os aceleradores de partículas são hoje elementos indispensáveis ao progresso da ciência básica e aplicada.

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.