

# Indução eletromagnética (Cap. 30)

186

Qual é a física envolvida na produção de quase toda a energia que consumimos?

→ indução eletromagnética

= fenômeno onde um fluxo magnético varia através de um circuito, gerando uma fem induzida e uma corrente induzida

Numa usina geradora de energia elétrica, o movimento de um ímã em relação a uma bobina produz o fluxo magnético variável e a fem induzida: há conversão de energia mecânica em energia elétrica.

A fonte da energia mecânica (→ movimento do ímã ou bobina) pode ser:

- uma queda de água dirigida contra as palhetas de uma turbina
- vapor de água (obtido com o calor da queima de carvão) dirigida contra as palhetas de uma turbina
- etc

Experiência "caseira":

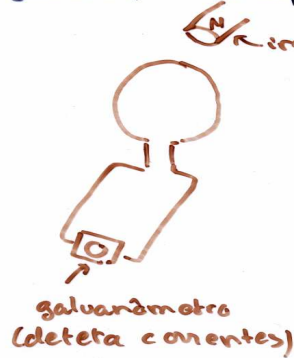


Ao aproximar ou afastar um ímã, <sup>da bobina</sup> o LED acende.  
(Não tem bateria no circuito!)

### Exemplos de experiências de indução

Durante a década de 1830, diversas experiências sobre fem induzida foram feitas por Faraday (Inglaterra) e Henry (EUA). Aqui estão 2 exemplos.

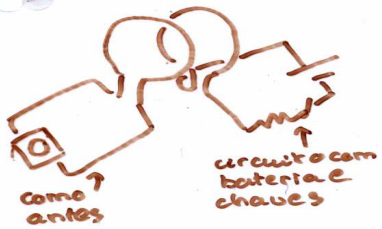
(i)



- (i) ímã movimentado p/ frente → galvanômetro detectando corrente
- (ii) ímã imóvel → não tem corrente
- (iii) ímã movimentado p/ trás → galvanômetro indicando corrente oposta a (i)
- (iv) mesmo tipo de efeito com ímã fixo e espira em mov.º

A corrente se chama corrente induzida o trabalho p. unidade de cargas que constituem esta corrente é chamado fem induzida (se expressa em V)

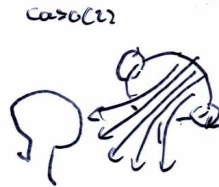
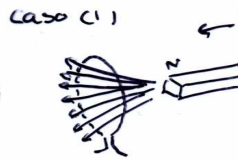
(ii)



- (i) S sendo fechada → galvanômetro detectando corrente
- (ii) S mantida fechada → não tem corrente
- (iii) S sendo aberta → galvanômetro indica corrente oposta a (i)

Característica comum a (i) e (ii):  
Uma fem induzida na bobina de esquerda quando o número de linhas de campo magnético que a atravessam estiver variando.

FOTOCOPIADORA P&B IMPRIMIR NO OUTRO LADO FILIPAPER F&B AÇO



### Lei de Faraday

Consideramos uma superfície plana ou não, limitada por uma espira condutora. O fluxo magnético que atravessa a espira é:  $\Phi_m = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{A}$

É comum (mas não obrigatório) orientar  $d\vec{A}$  assim (com sentido anti-horário suposto positivo)



dedos apontando no sentido anti-horário → polegar dá o sentido de  $d\vec{A}$

A unidade de  $\Phi_m$  é o Weber:  $1 \text{ Wb} = 1 \text{ T} \cdot \text{m}^2$

$\Phi_m$  é relacionado com o número de linhas através S. Esperamos que se este número varia, i.e., se  $\frac{d\Phi_m}{dt} \neq 0$ , aparece uma fem induzida.

De fato, a lei de Faraday se escreve

$$\mathcal{E} = - \frac{d\Phi_m}{dt}$$

fem induzida

fluxo magn. que varia com S (pode ser B ou S que varia)

vamos ver mais em detalhe

se tivermos N espiras idênticas:  $\mathcal{E} = -N \frac{d\Phi_m}{dt}$

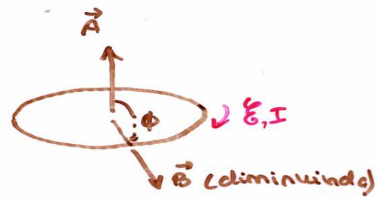
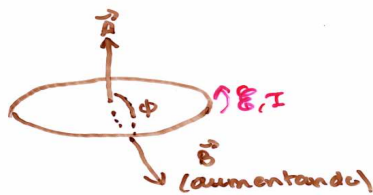
FOTOCOPIADORA P&B IMPRIMIR NO OUTRO LADO  
FILIPAPER  
FOTOCOPIADORA P&B IMPRIMIR NO OUTRO LADO  
FILIPAPER  
FOTOCOPIADORA P&B IMPRIMIR NO OUTRO LADO  
FILIPAPER  
FOTOCOPIADORA P&B IMPRIMIR NO OUTRO LADO  
FILIPAPER

Com esta equação, podemos achar o sentido da fem induzida (e da corrente induzida)



$\Phi_B = \int B dA \cos \phi > 0$   
 $\frac{d\Phi_B}{dt} > 0$  pois  $B \nearrow \Rightarrow \mathcal{E}$  negativa e horária

$\Phi_B > 0 \Rightarrow \mathcal{E}$  positiva e antihorária  
 $\frac{d\Phi_B}{dt} < 0$

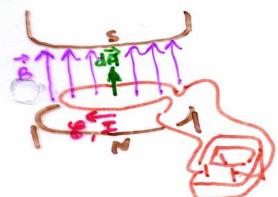


$\Phi_B < 0$   
 $\frac{d\Phi_B}{dt} < 0 \Rightarrow \mathcal{E}$  positiva e antihorária

$\Phi_B < 0$   
 $\frac{d\Phi_B}{dt} > 0 \Rightarrow \mathcal{E}$  negativa e horária

Exemplos

1



O campo  $\vec{B}$  é uniforme aumentando com taxa  $0,020 T/s$ . A área (imensa) da espira condutora é  $120 \text{ cm}^2$  e a resistência total do circuito  $5,0 \Omega$ . a) qual é a fem induzida? corrente? b) o que acontece se a espira é isolante?

a)  $\Phi_m = \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$  com  $S$  delimitada pela espira  
 $= \int B dA$  pois  $\vec{B} \parallel d\vec{A}$   
 $= B \int dA$  pois  $\vec{B}$  uniforme  
 $= BA$

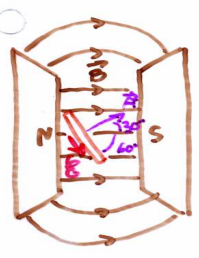
$\Rightarrow \frac{d\Phi_m}{dt} = \frac{d(BA)}{dt} = \frac{dB}{dt} A = (0,020 T/s)(0,012 \text{ m}^2) = 0,24 \text{ mV} > 0 \Rightarrow \mathcal{E}$  horária  
 $I = \mathcal{E}/R = 0,048 \text{ mA}$

b) A fem não se altera (a fem não se altera se aumentarmos R não) MAS  $I = \mathcal{E}/R = 0$  se R é infinita (isolante perfeito)

F  
FOTOCOPIADORA P&B  
IMPRESSÃO DE OUTRO LADO  
FILIPAPER  
FOTOCOPIADORA P&B  
IMPRESSÃO DE OUTRO LADO  
FILIPAPER  
FOTOCOPIADORA P&B  
IMPRESSÃO DE OUTRO LADO  
FILIPAPER  
FOTOCOPIADORA P&B  
IMPRESSÃO DE OUTRO LADO  
FILIPAPER



2



Bobina com  $N = 500$ ,  $A = \pi(4\text{cm})^2$ , entre os polos de um eletroímã (cf figura) cujo  $B$  decresce com taxa  $0,200\text{T/s}$ . Módulo e sentido da fem induzida?

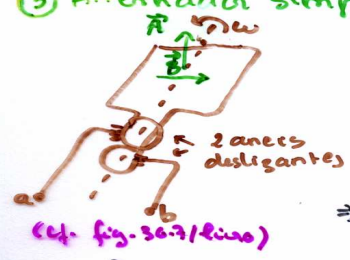
$$\frac{d\Phi_B}{dt} = \frac{dB}{dt} A \cos 30^\circ = (-0,200\text{T/s})(0,00503\text{m}^2)(0,866)$$

$$= -8,71 \times 10^{-4} \text{T} \cdot \text{m}^2/\text{s}$$

$$\mathcal{E} = -N \frac{d\Phi_B}{dt} = 0,435\text{V}$$

$\mathcal{E}$  tem sentido positivo em relação ao  $\vec{A}$  desenhado  $\rightarrow$  fica como indicado na figura. (Se escolher  $\vec{A}$  c/sentido oposto,  $\mathcal{E}$  negativamos fica como na figura também.)

3) Alternador simples (gerador de corrente alternada) fem induzida? (Supon  $\Phi = 0$  se  $t = 0$ )

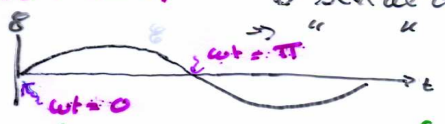


$$\Phi_B = BA \cos \phi = BA \cos \omega t$$

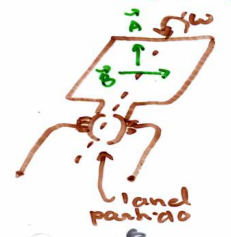
$\uparrow$   
ângulo entre  $\vec{B}$  e  $\vec{A}$

$$\Rightarrow \mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt} = \omega B A \sin \omega t$$

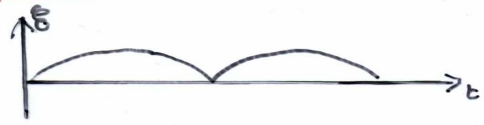
o sinal de  $\mathcal{E}$  muda com o tempo  $\rightarrow$  " " " " " " " " " " " "



4) Gerador de corrente contínua (contrário do motor elétr)



A cada meia-volta, o anel partido inverte o papel de cada contato + a fem induzida se inverte  $\Rightarrow$  a fem tem mesmo sinal

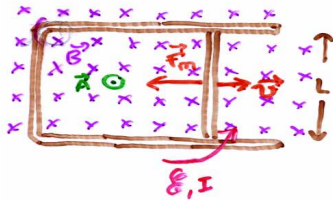


(com mais bobinas e contatos, pode-se ter um sinal sem protuberâncias)

FILIPAPER FOTOCOPIADORA P&B IMPRIMIR NO OUTRO LADO

5) Gerador com haste deslizante (com  $\vec{v}$  este)

189



fem induzida?

$$\frac{d\Phi_B}{dt} = -B \frac{dA}{dt} = -B \frac{d(Lvdt)}{dt} = -BLv$$

$$\Rightarrow \mathcal{E} = BLv \Rightarrow \text{gerador de corrente continua (se } \vec{v} \text{ este)}$$

Neste caso com  $B = \text{cte}$ , pode-se levar as contas mais adiante. Mostrar que a taxa de energia dissipada é igual a taxa do trabalho realizado p/ deslocar a haste. (Super R a resistência do circuito p/ uma certa posição da haste).

$$\begin{cases} P_{\text{diss}} = RI^2 \\ I = \mathcal{E}/R \end{cases} \Rightarrow P_{\text{diss}} = \frac{B^2 L^2 v^2}{R}$$

Como barra tem velocidade  $\vec{v}$  este, a força aplicada  $F_{\text{ap}}$  deve ser opor exatamente à força magnética  $F_{\text{m}}$   
 $I \vec{L} \wedge \vec{B}$  (cf. desenho)

$$P_{\text{ap}} = F_{\text{ap}} v = ILBv = \frac{B^2 L^2 v^2}{R}$$

A energia mecânica é transformada em en. elétrica a qual é transformada em energia térmica (efeito Joule)

Obs.: neste caso podemos entender a origem da fem induzida, mediante a análise das forças que atuam sobre os elétrons.



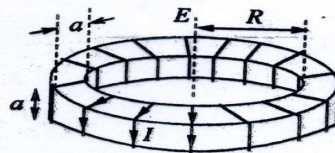
unic<sup>o</sup> na haste, os  $e^-$  são submetidos a  $\vec{f} = q\vec{v} \wedge \vec{B}$  e migram p/ baixo. Aparece carga + em cima e - embaixo. Se a haste fosse sozinha, como ela está num circuito, os elétrons circulam (Serway § 31.2)

## Física III

Escola Politécnica - 2008  
FGE 2203 - GABARITO DA P3  
3 de julho de 2008

### Questão 1

Na figura vemos uma bobina toroidal de seção reta quadrada de lado  $a$  e raio interno  $R$ . Ela possui um enrolamento com  $N$  espiras arranjadas de forma compacta e uniforme. A corrente que passa pelo enrolamento da bobina é  $I$ .



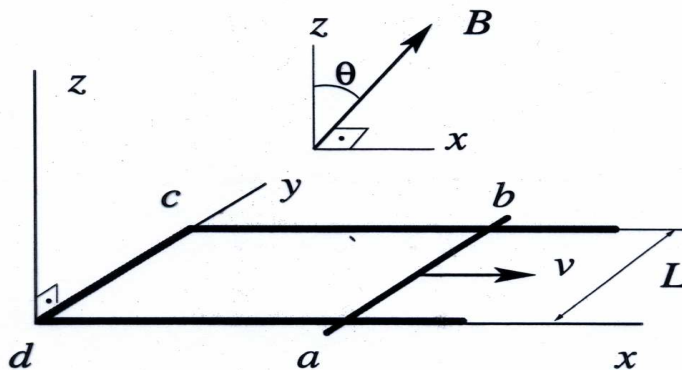
- (a) (1,0 ponto) Usando a lei de Ampère calcule o campo  $\vec{B}_0(r)$  no interior da bobina, onde  $r$  é a distância a partir do eixo central de simetria da bobina ( $E$ ).
- (b) (1,0 ponto) Calcule o fluxo do campo  $\vec{B}_0(r)$  através de uma espira e a auto-indutância  $L$  da bobina.
- (c) (0,5 ponto) Se a bobina estivesse preenchida com um material magnético de susceptibilidade  $\chi_m$ , qual seria o valor do campo magnético dentro da bobina?

P3/2000-

188

### Questão 2

Considere o circuito retangular  $abcd$  mostrado na figura. O lado  $ab$  é deslizado no sentido positivo de  $x$  com velocidade constante de módulo  $v$ . O circuito se encontra num campo magnético uniforme de módulo  $B$  perpendicular ao eixo  $x$  e fazendo um ângulo  $\theta$  ( $0 \leq \theta < 90^\circ$ ) com o eixo  $z$ .

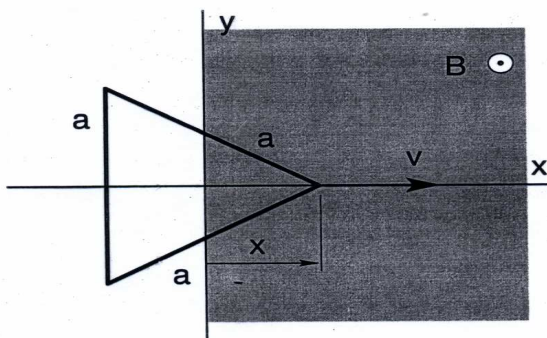


- (0,5 pontos) Determine o sentido ( $abcd$  ou  $dcba$ ) da força eletromotriz induzida. Justifique a sua resposta.
- (1,0 ponto) O circuito  $abcd$  é feito de um material de resistividade  $\rho$  e a área da secção é  $A$ . Sabendo-se que o lado  $ab$  parte de  $x = 0$  no instante  $t = 0$ , determine a corrente  $I$  como função do tempo.
- (1,0 ponto) Determine, como função do tempo, a força que deve ser aplicada ao lado  $ab$  para deslocá-lo com velocidade constante  $v$ .



**Questão 2**

Uma espira em forma de um triângulo equilátero de lado  $a$  está no plano  $xy$  como indicado na figura. A resistência da espira é  $R$ . No semi-espaço  $x > 0$  existe um campo magnético uniforme  $\mathbf{B} = B\hat{z}$ , onde  $B > 0$ . Uma força externa movimenta a espira para a direita com velocidade constante  $v$ .



- (a) (0,5 ponto) Determine o sentido (horário ou anti-horário) da força eletromotriz induzida. Justifique.
- (b) (1,0 ponto) Calcule a corrente induzida  $I$  como função da posição  $x$  do vértice do triângulo. Esboce o gráfico de  $I$  como função de  $x$  para  $x \in (-\infty, \infty)$ .
- (c) (0,5 ponto) Calcule a potência dissipada na espira devido à resistência  $R$ .
- (d) (0,5 ponto) Calcule a força externa  $F$ .

10