

# INDUÇÃO MAGNÉTICA

(a) Quando um ímã permanece em repouso, não existe NENHUMA corrente induzida.



Estas ações INDUZEM uma corrente na bobina. O que elas têm em comum?\*

(b) Aproximando ou afastando o ímã da bobina



(c) Aproximando ou afastando da primeira bobina uma segunda bobina que transporta corrente



(d) Variando a corrente na segunda bobina (ao fechar ou abrir uma chave).



\*Elas causam variação no campo magnético através induzida.

Figura 29.1 Demonstração do fenômeno da corrente induzida.

Estudar esse fenômeno nos permite entender, por exemplo, como a energia elétrica que consumimos é produzida nas usinas hidrelétricas (ou em qualquer outra).

# INDUÇÃO MAGNÉTICA

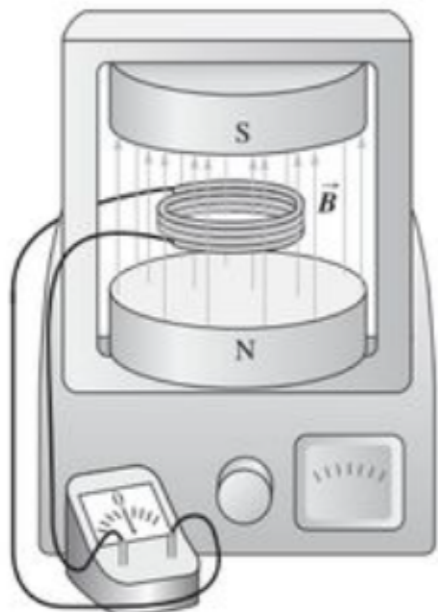


Figura 29.2 Uma bobina em um campo magnético. Quando o campo magnético  $\vec{B}$  é constante, não existe nenhuma corrente induzida e permanecem constante a forma, a orientação e a posição da bobina. Quando alteramos qualquer um desses três fatores, surge uma corrente induzida.

$$\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (\text{fluxo de } \vec{B})$$

Lei de Faraday:  $\boxed{\mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt}}$  (1)

Para N espiras:  $\mathcal{E} = -N \frac{d\Phi_B}{dt}$

Uma maneira análoga de escrever a Lei de Faraday é:

$$\boxed{\mathcal{E} = \oint (\vec{v} \wedge \vec{B}) \cdot d\vec{\ell}} \quad (2)$$

Exemplo 1:

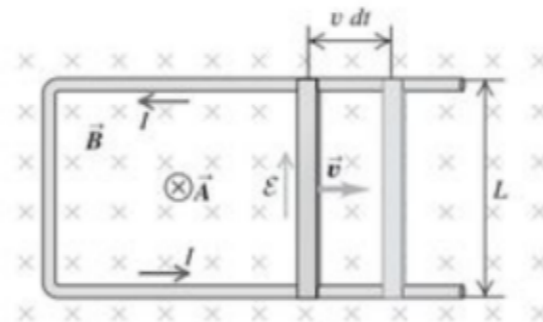


Figura 29.11 Um gerador com haste deslizante. Os vetores  $\vec{B}$  e  $\vec{A}$  estão entrando no plano da página. O aumento do fluxo magnético (devido ao aumento da área) produz uma fem e uma corrente induzida, cujo sentido é indicado na figura.

$$\mathcal{E} = vBL$$

Exemplo 2:

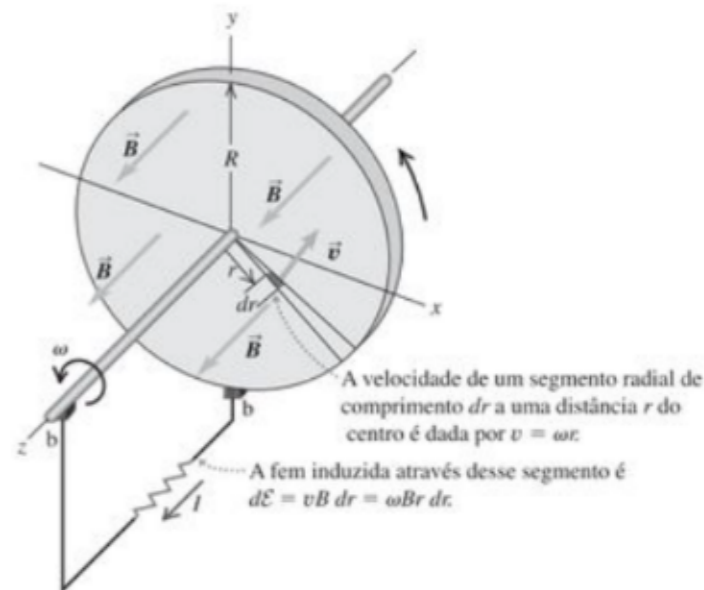
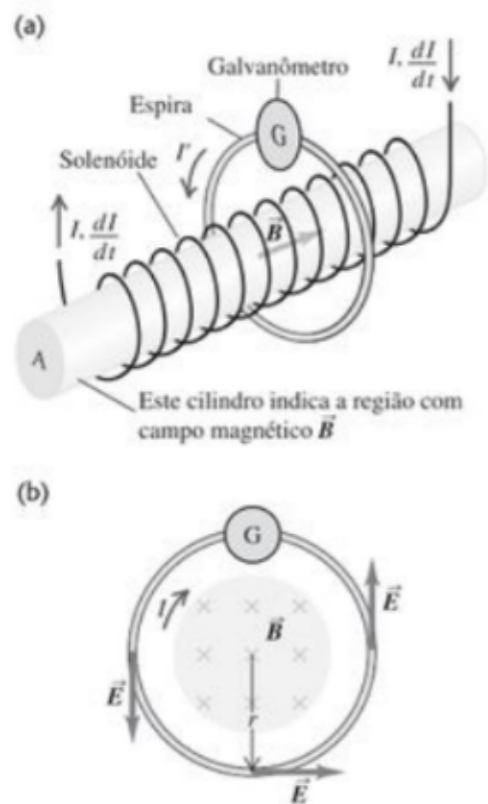


Figura 29.16 Um disco condutor de raio  $R$  girando com uma velocidade angular  $\omega$  em um campo magnético  $\vec{B}$ . A fem é induzida em uma direção radial do disco e produz uma corrente no circuito externo através de contatos deslizantes designados pela letra  $b$ .

$$\mathcal{E} = \frac{1}{2} \omega B R^2$$

Há ainda uma terceira maneira de escrever a Lei de Faraday:

# INDUÇÃO MAGNÉTICA



**Figura 29.17** (a) As espiras de um solenóide longo que conduz uma corrente  $I$  que cresce com uma taxa  $dI/dt$ . O fluxo magnético no solenóide cresce com uma taxa  $d\Phi_B/dt$  e esse fluxo variável passa através da espira. Uma fem  $\mathcal{E} = -d\Phi_B/dt$  é induzida na espira produzindo uma corrente induzida  $I'$  medida pelo galvanômetro G. (b) Vista mostrando a seção reta.

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = \mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

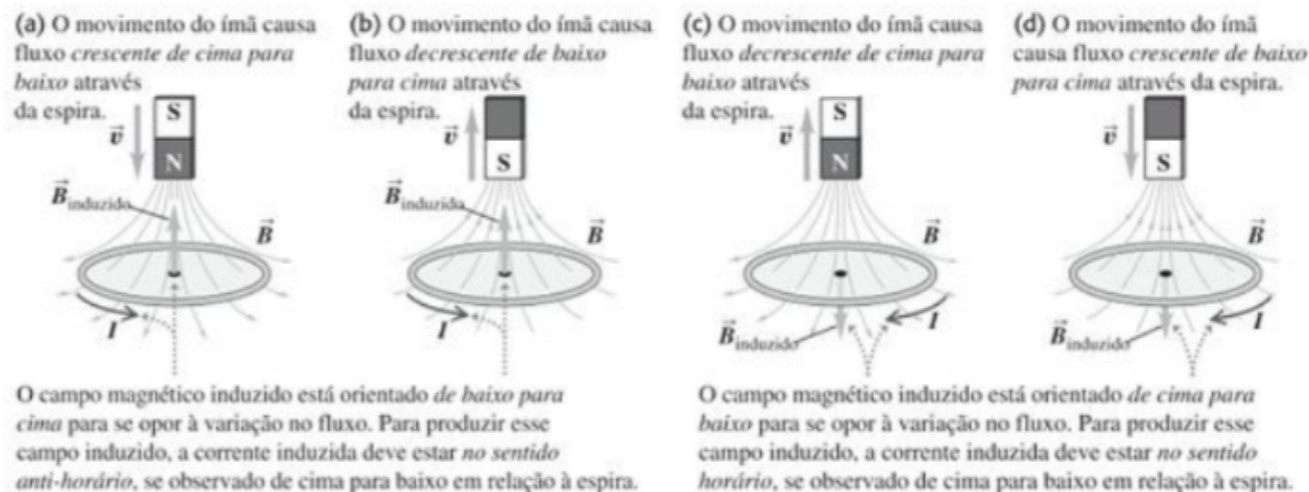
(percurso de integração estático)

No exemplo da figura 29.17:

$$\mathcal{E} = \frac{1}{2\pi r} \left| \frac{d\Phi_B}{dt} \right|$$

IMPORTANTE:  $\vec{E}$  aqui é um campo INDUZIDO. Logo, ele é diferente do campo elétrico gerado por cargas. Tanto é diferente que ele não é conservativo, pois  $\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} \neq 0$  nesse caso.

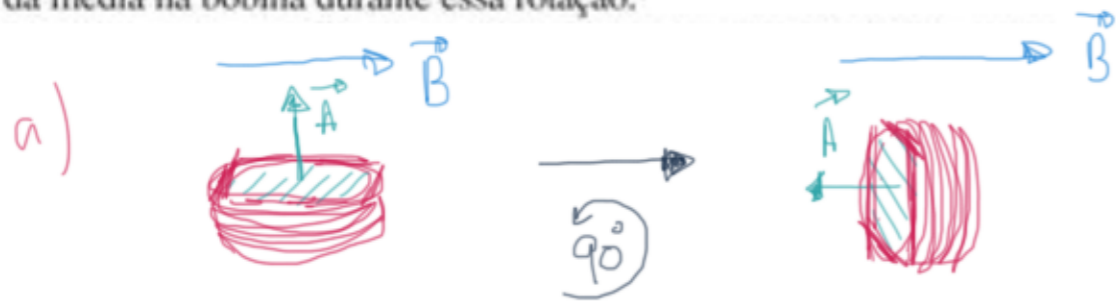
Sobre o sinal de  $\mathcal{E}$ : Lei de Lenz



**Figura 29.14** Sentidos das correntes induzidas quando um ímã se desloca ao longo do eixo de uma espira condutora. Quando o ímã está em repouso, não existe nenhuma corrente induzida.

## Lei de Faraday

29.1 Uma bobina retangular plana com 50 espiras possui dimensões de 25,0 cm por 30,0 cm. Ela está em um campo magnético uniforme, de 1,20 T, com o seu plano no sentido paralelo em relação ao campo. Em 0,222 s, ela gira de modo que o seu plano fique perpendicular ao campo. (a) Qual é a variação no fluxo magnético através da bobina produzida por essa rotação? (b) Determine o módulo da fem induzida média na bobina durante essa rotação.



$$\begin{aligned}\phi_{B_i} &= \vec{B} \cdot \vec{A} N \\ &= 0\end{aligned}\quad \begin{aligned}\phi_{B_f} &= \vec{B} \cdot \vec{A} N \\ &= -BAN\end{aligned}$$
$$\Delta\phi_B = \phi_{B_f} - \phi_{B_i}$$
$$= -BAN = \boxed{-4,50 \text{ Wb}}$$

Obs: Note que o sinal de "-" só tem relação com a orientação de  $\vec{A}$  relativo à  $\vec{B}$ . Assim, o resultado poderia muito bem ser positivo, porque o enunciado não especificou nada.

$$b) |\mathcal{E}| = \left| -\frac{\Delta\phi_B}{\Delta t} \right|$$

$$\boxed{|\mathcal{E}| = 20,3 \text{ V}}$$

## Lei de Faraday

29.6 Uma bobina com raio de 4,0 cm, com 500 espiras, é colocada em um campo magnético uniforme que varia com o tempo de acordo com a relação  $B = (0,0120 \text{ T/s}) t + (3,0 \times 10^{-5} \text{ T/s}^4) t^4$ . A bobina está conectada a um resistor de  $600 \Omega$  e seu plano é perpendicular ao campo magnético. A resistência da bobina pode ser desprezada. (a) Calcule o módulo da fem induzida na bobina em função do tempo. (b) Qual é o módulo da corrente que passa no resistor para  $t = 5,0 \text{ s}$ ?

$$a) \quad |\mathcal{E}| = \left| -N \frac{d\phi_B}{dt} \right|$$

$$= N \left| \frac{d}{dt} (B \cdot A) \right|$$

$$= NA \left| \frac{dB}{dt} \right|$$

$$= \underline{0,0302 + 3,02 \cdot 10^{-4} t^3} \quad (\text{V})$$

$$b) \quad E_m \quad t = 5,0 \text{ s},$$

$$|\mathcal{E}| = 0,0680 \text{ V}$$

Logo:

$$i = \frac{|\mathcal{E}|}{R}$$

$$\rightarrow \boxed{i = 1,13 \cdot 10^{-4} \text{ A}}$$

29.12 Fem induzida. Um motor com um dispositivo escova-comutador, semelhante ao descrito no Exemplo 29.5, possui uma bobina circular com raio igual a 2,5 cm e 150 espiras. O campo magnético apresenta módulo igual a 0,060 T e a bobina gira com 440 rev/min. (a) Qual é a fem máxima induzida na bobina? (b) Qual é o valor médio da fem induzida?

→  $= \frac{440 \cdot 2\pi \text{ rad}}{60 \text{ s}} = 46,1 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$  (tomar cuidado!)

a) Esse exercício complementa o que conversamos na ocasião do motor CC simples. O fluxo de campo magnético na bobina é, assumindo  $\omega = \text{constante}$ , dado por:  $\Phi_B = NBA \cos \theta = NBA \cos(\omega t)$ .

Logo,

$$\mathcal{E} = - \frac{d\Phi_B}{dt} = NBA\omega \sin(\omega t),$$

cujos valor máximo é

$$\mathcal{E}_{\text{max}} = NBA\omega$$

Usando os valores numéricos,  $\mathcal{E}_{\text{max}} = 0,1814 \text{ V}$

$$b) \overline{\mathcal{E}} = \frac{\omega}{\pi} \int_0^{\pi/\omega} \mathcal{E} dt = \frac{NBA\omega^2}{\pi} \int_0^{\pi/\omega} \sin(\omega t) dt =$$

$$= \frac{NBA\omega^2}{\pi \omega} [-\cos(\omega t)]_0^{\pi/\omega} = \frac{NBA\omega}{\pi} (-\cos \pi + \cos 0) =$$

$$= \frac{NBA\omega}{\pi} \cdot 2 = \frac{2}{\pi} \mathcal{E}_{\text{max}} = 0,1159 \text{ V}$$

→ esse é um resultado importante!

Para entender melhor...

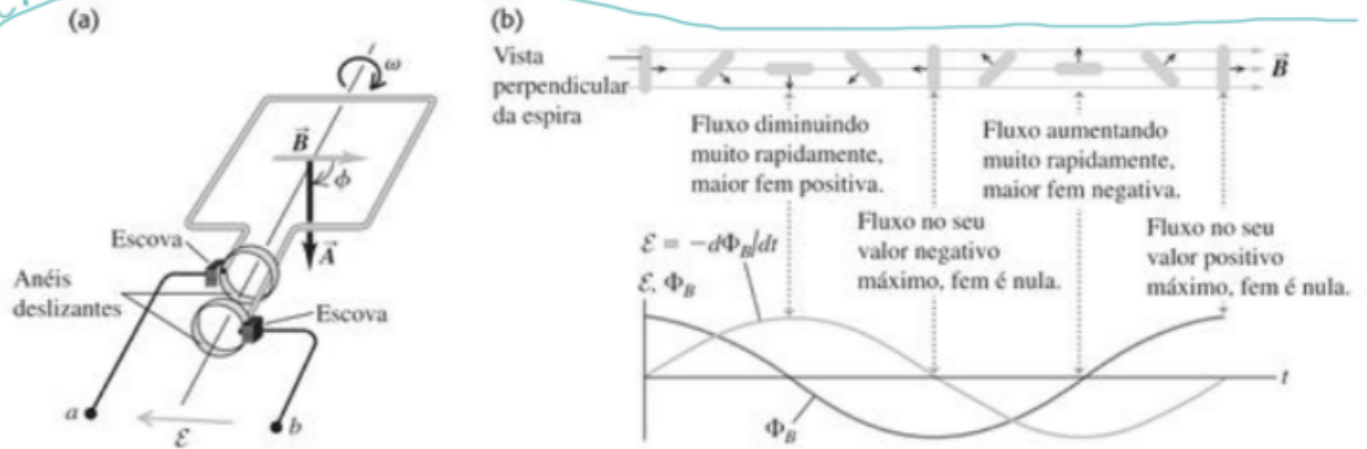


Figura 29.8 (a) Diagrama esquemático de um alternador simples, usando uma espira condutora girando em um campo magnético. As conexões das extremidades da espira com o circuito externo são feitas por meio de dois anéis deslizantes, colocados nessas extremidades. O sistema é indicado no instante para o qual o ângulo  $\phi = \omega t = 90^\circ$ . (b) Gráfico do fluxo magnético através da espira e da fem resultante nos terminais ab, indicando também as posições correspondentes da espira durante uma rotação completa.

Lei de Lenz

29.15 Um anel circular está em uma região do espaço onde existe um campo magnético uniforme, como indica a Figura 29.31. O campo magnético está entrando no plano da figura. Determine o sentido (horário ou anti-horário) da corrente induzida no anel quando (a)  $B$  está aumentando; (b)  $B$  está diminuindo; (c)  $B$  permanece constante com um valor igual a  $B_0$ . Explique seu raciocínio.

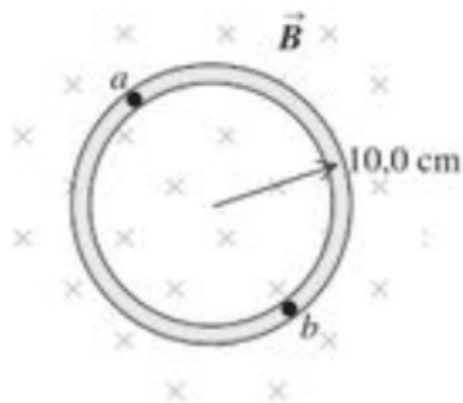
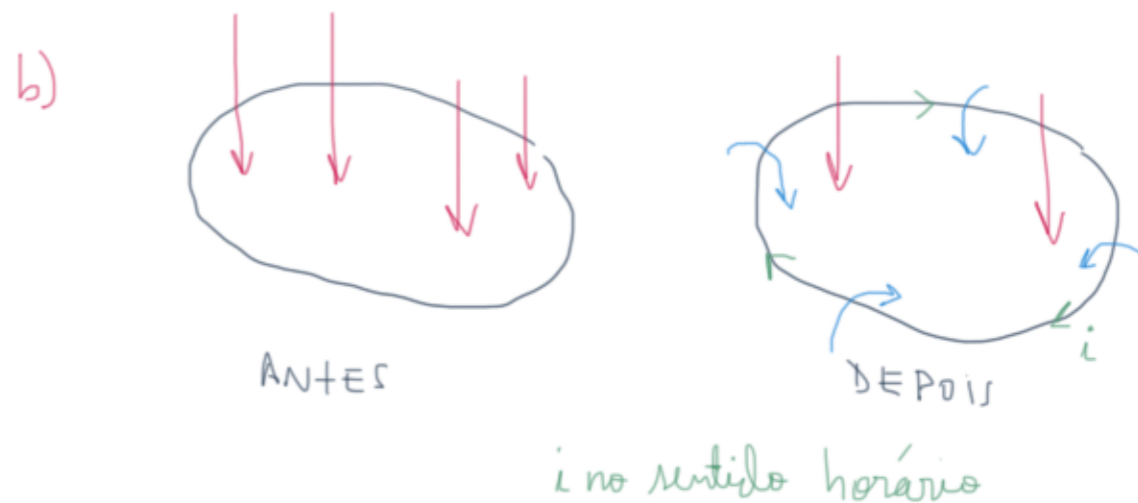
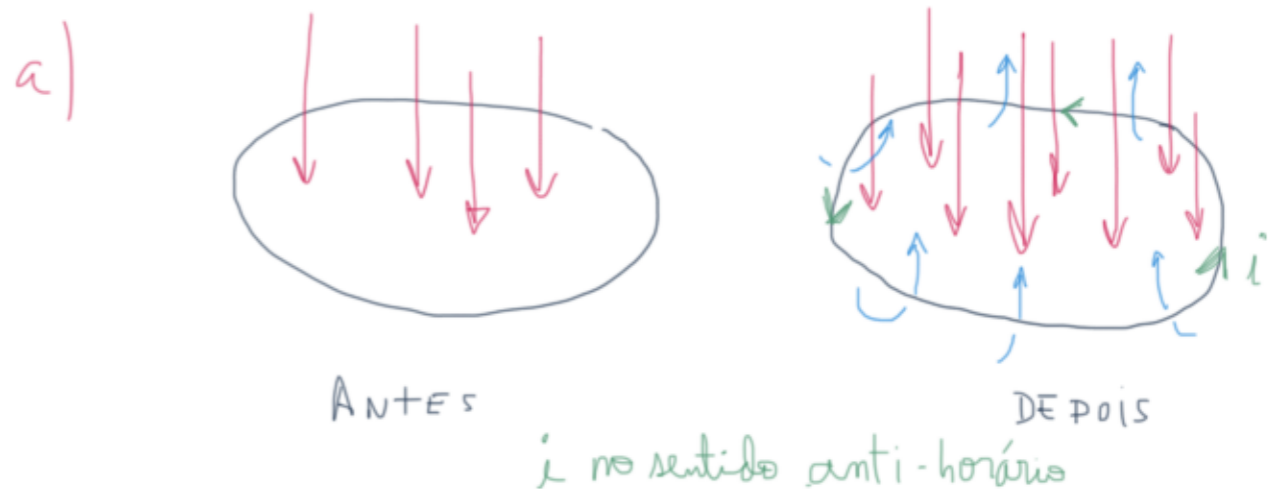


Figura 29.31 Exercícios 29.15 e 29.30.



c) Se  $B$  é constante,  $\mathcal{E} = 0$  e  $i = 0$ .

Lei de Lenz

MOVIMENTO  
condutores

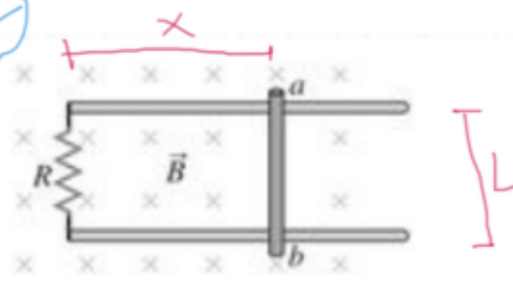
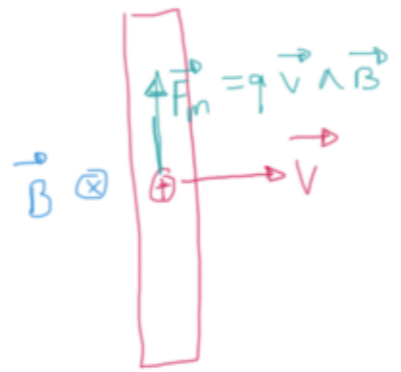


Figura 29.36 Exercício 29.20 e Problema 29.64.

29.20 Uma barra metálica com 1,50 m de comprimento é puxada para a direita a 5,0 m/s regulares e perpendicularmente a um campo magnético uniforme de 0,750 T. A barra desliza sobre trilhos metálicos paralelos, conectados através de um resistor de 25,0  $\Omega$ , como indica a Figura 29.36, de modo que o aparato faz um círculo completo. A resistência da barra e dos trilhos pode ser desprezada. (a) Calcule o módulo da fem induzida no circuito. (b) Determine o sentido da corrente induzida no circuito (i) usando a força magnética sobre as cargas na barra que se move; (ii) usando a lei de Faraday; (iii) usando a lei de Lenz. (c) Calcule a corrente através do resistor.

a)  $|\mathcal{E}| = BLv = 5,6 \text{ V}$

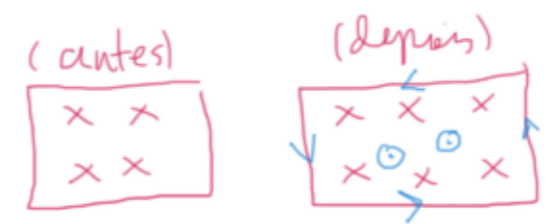
b) i)



Como a força magnética é para cima, isso faz com que a corrente seja no sentido anti-horário.

ii) Vamos usar, arbitrariamente, um  $\vec{A}$  saindo da página. Logo, pela regra da mão direita,  $\mathcal{E} > 0$  está no sentido anti-horário. Em um dado instante  $t$  qualquer,  $\Phi_B = \vec{B} \cdot \vec{A} = -BLx \rightarrow \frac{d\Phi_B}{dt} = -BLv$ . Portanto,  $\mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt} = +BLv$ . Como  $\mathcal{E} > 0$ , está no sentido anti-horário, assim como a corrente induzida.

iii)



c)  $i = \frac{|\mathcal{E}|}{R} = 0,22 \text{ A}$



29.23 As fms do movimento são uma fonte prática de eletricidade? Com que velocidade (em m/s) uma barra de cobre com 5,0 cm teria de se mover formando ângulos retos com um campo magnético de 0,650 T, para gerar 1,50 V (similar a uma pilha AA) através de suas extremidades? Esta parece ser uma forma prática de gerar eletricidade?

$$|\mathcal{E}| = BLv \rightarrow v = \frac{|\mathcal{E}|}{BL}$$

$$v = \frac{1,50}{0,650 \cdot 5,0 \cdot 10^{-2}}$$

$$v = 46,2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Essa velocidade ( $46,2 \frac{\text{m}}{\text{s}} \equiv 166 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ )

não é prática. Da mesma forma,

também não é prático usar um comprimento de 5,0 cm se movendo numa região de campo uniforme dessa magnitude

29.24 **Fems do movimento nos transportes.** Aviões e trens se movem através do campo magnético da Terra a velocidades escalares relativamente altas, portanto é razoável imaginar se esse campo pode exercer substancial efeito sobre eles. Devemos usar um valor típico de 0,50 G para o campo da Terra. (a) O trem francês TGV e o 'trem bala' japonês atingem velocidade de até 180 mph, deslocando-se sobre trilhos separados por uma distância aproximada de 1,5 m. Na velocidade máxima, no sentido perpendicular ao campo magnético da Terra, qual é a diferença de potencial induzida através dos trilhos enquanto as rodas giram? Esse valor é grande o suficiente para produzir efeitos notáveis? (b) O avião Boeing 747-400 possui envergadura de asa de 64,4 m e uma velocidade de cruzeiro de 565 mph. Quando não há vento soprando (de modo que essa é também sua velocidade em relação ao solo), qual é a diferença de potencial máxima que poderia ser induzida entre as pontas opostas das asas? Esse valor é grande o suficiente para causar problemas ao avião?

$$1 \text{ mph} = 0,4470 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$1 \text{ G} = 10^{-4} \text{ T}$$

$$a) \quad \mathcal{E} = BLV = 0,50 \cdot 10^{-4} \cdot 1,5 \cdot 180 \cdot 0,4470$$

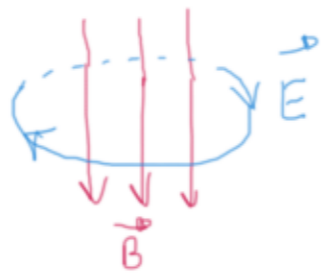
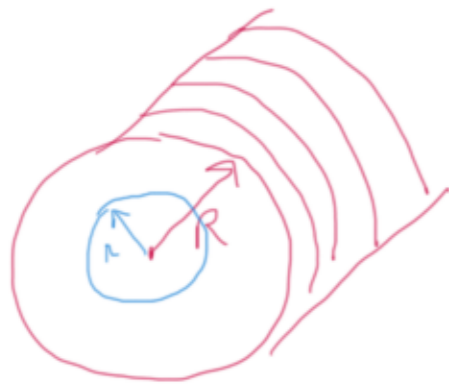
$$\boxed{\mathcal{E} = 6,0 \text{ mV}} \quad ! \quad \text{Essa fem é bem pequena p/ ser percebida.}$$

$$b) \quad \mathcal{E} = BLV = 0,50 \cdot 10^{-4} \cdot 64,4 \cdot 565 \cdot 0,4470$$

$$\boxed{\mathcal{E} = 0,71 \text{ V}} \quad ! \quad \text{Novamente esse fem é bem pequena para ser notada.}$$

$\Delta B$  quando  $E!$

29.28 Um solenóide fino possui 900 espiras por metro e raio igual a 2,50 cm. A corrente no solenóide cresce com uma taxa uniforme de 60,0 A/s. Qual é o módulo do campo elétrico induzido em um ponto próximo do centro do solenóide e situado a uma distância do eixo do solenóide (a) igual a 0,500 cm? (b) igual a 1,0 cm?



$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = \mathcal{E} = - \frac{d\phi_B}{dt}$$

$$|\oint \vec{E} \cdot d\vec{l}| = E \cdot 2\pi r$$

$$|\phi_B| = |BA| = \mu_0 i n \cdot \pi r^2$$

$$\left| \frac{d\phi_B}{dt} \right| = \mu_0 n \pi r^2 \left| \frac{di}{dt} \right|$$

Juntando tudo:

$$E \cdot 2\pi r = \mu_0 n \pi r^2 \left| \frac{di}{dt} \right|$$

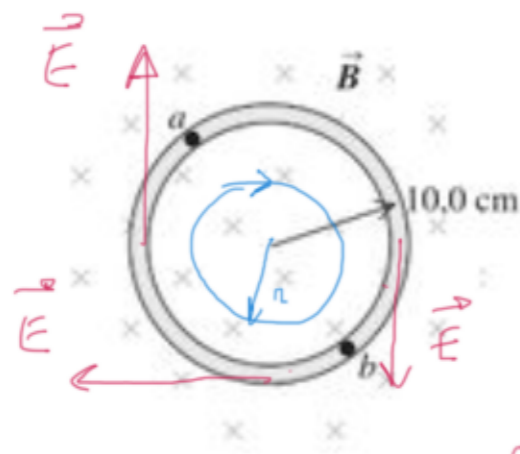
$$E = \frac{\mu_0 n r}{2} \left| \frac{di}{dt} \right|$$

$$a) r = 0,500 \text{ cm} \rightarrow \boxed{E = 1,70 \cdot 10^{-4} \frac{\text{V}}{\text{m}}}$$

$$b) r = 1,0 \text{ cm} \rightarrow \boxed{E = 3,4 \cdot 10^{-4} \frac{\text{V}}{\text{m}}}$$

x2!

29.30 O campo magnético  $\vec{B}$  em todos os pontos do círculo no interior do anel indicado na Figura 29.31 possui um módulo inicial igual a 0,750 T. (O círculo poderia representar aproximadamente o espaço no interior de um solenóide longo.) O campo magnético está direcionado para o interior da figura e diminui com uma taxa igual a  $-0,0350$  T/s. (a) Qual é a forma das linhas do campo elétrico induzido, indicado na Figura 29.31, no interior desse círculo? (b) Qual é o módulo, a direção e o sentido desse campo em qualquer ponto do anel condutor com raio igual a 0,100 m? (c) Qual é a corrente que circula no anel, sabendo que sua resistência é de  $4,0 \Omega$ ? (d) Qual é a fem entre os pontos  $a$  e  $b$  do anel? (e) Se o anel for cortado em um certo ponto e as extremidades forem separadas ligeiramente, qual será a fem entre essas extremidades?



Como  $E$  é horário,  $\vec{E}$  é aquele mostrado ao lado. O mesmo vale para os pontos no interior do círculo.

Figura 29.31 Exercícios 29.15 e 29.30.

$$b) \quad \underbrace{\oint \vec{E} \cdot d\vec{l}}_{E 2\pi r} = \varepsilon = - \underbrace{\frac{d\phi_B}{dt}}_{\frac{d(BA)}{dt} = \pi r^2 \left| \frac{dB}{dt} \right|}$$

$$\therefore E = \frac{r}{2} \left| \frac{dB}{dt} \right| = \frac{0,100}{2} \cdot 0,0350 \rightarrow \boxed{E = 1,75 \cdot 10^{-3} \frac{V}{m}}$$

$$c) \quad \varepsilon = \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = E 2\pi r = 1,10 \cdot 10^{-3} V$$

$$\therefore \boxed{i = \frac{\varepsilon}{R} = 2,75 \cdot 10^{-4} A}$$

$$d) \quad a \text{ e } b \text{ estão separados por uma distância } \pi r.$$

Assim:  $\boxed{\varepsilon = E \pi r = 5,50 \cdot 10^{-4} V}$

$$e) \quad \text{Independente da distância de separação, a fem continuará associada ao campo elétrico em } 2\pi r. \text{ Logo,}$$

$$\boxed{\varepsilon = 1,10 \cdot 10^{-3} V} \quad (\text{item c})$$

29.34 Um dielétrico de permissividade  $3,5 \times 10^{-11}$  F/m preenche completamente o volume entre duas placas capacitadas. Para  $t > 0$ , o fluxo elétrico através do dielétrico é  $(8,0 \times 10^3 \text{ V} \cdot \text{m/s}^3)t^3$ . O dielétrico é ideal e não-magnético; a corrente de condução no dielétrico é igual a zero. Em qual instante a corrente de deslocamento no dielétrico é igual a  $21 \mu\text{A}$ ?

$$\begin{aligned} i_D &= \epsilon \frac{d\phi_E}{dt} \\ &= 3,5 \cdot 10^{-11} \cdot 8,0 \cdot 10^3 \frac{d(t^3)}{dt} \end{aligned}$$

$$i_D = 8,4 \cdot 10^{-7} t^2 \text{ A}$$

Impondo  $i_D = 21 \cdot 10^{-6} \text{ A}$ , temos:

$$\boxed{t = 5,0 \text{ s}}$$

29.35 O fluxo elétrico através de certa área de um dielétrico é  $(8,76 \times 10^3 \text{ V} \cdot \text{m/s}^4)t^4$ . A corrente de deslocamento através dessa área é igual a  $12,9 \text{ pA}$  no instante  $t = 26,1 \text{ ms}$ . Calcule a constante dielétrica para o dielétrico.

$$i_D = \epsilon \frac{d\phi_E}{dt} \rightarrow \epsilon = \frac{i_D}{\frac{d\phi_E}{dt}}$$

onde  $\frac{d\phi_E}{dt} = 35,0 \cdot 10^3 t^3$ . Usando

$$t = 26,1 \cdot 10^{-3} \text{ s} \text{ e } i_D = 12,9 \cdot 10^{-12} \text{ A},$$

temos que

$$\epsilon = 2,107 \cdot 10^{-11} \frac{\text{F}}{\text{m}}$$

A constante dielétrica é:

$$K = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \frac{2,107 \cdot 10^{-11}}{8,85 \cdot 10^{-12}} \rightarrow \boxed{K = 2,34}$$

29.36 Um capacitor de placas paralelas e cheio de ar está sendo carregado, como indica a Figura 29.23. As placas circulares possuem raio de 4,0 cm e, em um dado instante, a corrente de condução nos fios é de 0,280 A. (a) Qual é a densidade de corrente de deslocamento  $j_D$  no espaço entre as placas? (b) Qual é a taxa de variação do campo elétrico entre as placas? (c) Qual é o campo magnético induzido entre as placas a uma distância de 2,0 cm do eixo? (d) E a 1,0 cm do eixo?

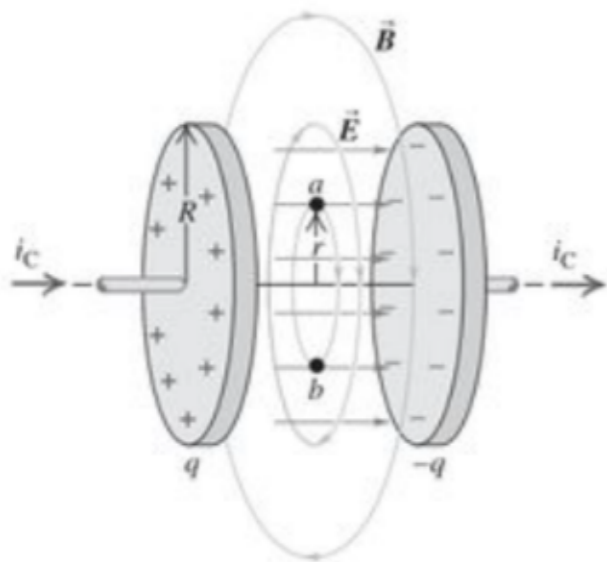


Figura 29.23 Um capacitor sendo carregado por uma corrente  $i_c$  possui uma corrente de deslocamento igual a  $i_c$  entre as placas, com densidade de corrente de deslocamento  $j_D = \epsilon dE/dt$ . Isso pode ser considerado como a fonte do campo magnético entre as placas.

$$a) i_c = i_D \rightarrow j_D = \frac{i_D}{A} = \frac{i_c}{A} = \frac{0,280}{\pi R^2} \rightarrow j_D = 55,7 \frac{A}{m^2}$$

$$b) \text{ Como } i_D = \epsilon \frac{d\Phi_E}{dt} = \epsilon \frac{d}{dt}(EA) = \epsilon A \frac{dE}{dt}, \text{ vem:}$$

$$j_D = \frac{i_D}{A} = \epsilon \frac{dE}{dt} \rightarrow \frac{dE}{dt} = \frac{j_D}{\epsilon} \approx \frac{j_D}{\epsilon_0} \text{ pois}$$

$$\text{ar preenche o espaço entre as placas. Assim: } \frac{dE}{dt} = 6,29 \cdot 10^{12} \frac{V}{m \cdot s}$$

c) Usando o percurso mostrado na figura:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 (i_c + i_D)_{int}$$

$$B \cdot 2\pi r = \mu_0 (0 + j_D \cdot \pi r^2) \rightarrow B = \frac{\mu_0 j_D r}{2}$$

$$\text{Com } r = 2,0 \cdot 10^{-2} \text{ m, } B = 7,0 \cdot 10^{-7} \text{ T}$$

$$d) \text{ com } r = 1,0 \cdot 10^{-2} \text{ m, } B = 3,5 \cdot 10^{-7} \text{ T}$$

29.37 **Corrente de deslocamento em um dielétrico.** Suponha que as placas paralelas na Figura 29.23 possuam área de  $3,0 \text{ cm}^2$  e estejam separadas por uma lâmina de dielétrico com  $2,50 \text{ mm}$  de espessura, que preenche completamente o volume entre as placas. O dielétrico possui constante dielétrica de  $4,70$ . (Os efeitos das bordas podem ser desprezados.) Em determinado instante, a diferença de potencial entre as placas é igual a  $120 \text{ V}$  e a corrente de condução  $i_c$  é igual a  $6,0 \text{ mA}$ . Nesse instante, quais são (a) a carga  $q$  em cada placa; (b) a taxa de variação da carga sobre as placas; (c) a corrente de deslocamento no dielétrico?

$$a) \quad q = CV = \left( \frac{\epsilon A}{d} \right) V = \frac{4,70 \epsilon_0 \cdot 3,0 \cdot 10^{-4} \cdot 120}{2,50 \cdot 10^{-3}}$$

$$q = 5,99 \cdot 10^{-10} \text{ C}$$

$$b) \quad \left[ \frac{dq}{dt} = i_c = 6,0 \text{ mA} \right]$$

$$c) \quad \left[ \bar{i}_D = i_c = 6,0 \text{ mA} \right]$$

29.38 Na Figura 29.23, as placas do capacitor possuem área de  $5,0 \text{ cm}^2$  e separação de  $2,0 \text{ mm}$ . As placas estão em um vácuo. A corrente de carga possui um valor *constante* de  $1,80 \text{ mA}$ . No instante  $t = 0$ , a carga nas placas é igual a zero. (a) Calcule a carga sobre as placas, o campo elétrico entre as placas e a diferença de potencial entre elas quando  $t = 0,500 \mu\text{s}$ . (b) Calcule  $dE/dt$ , a taxa de variação com o tempo do campo elétrico entre as placas.  $dE/dt$  varia com o tempo? (c) Calcule a densidade de corrente de deslocamento  $j_D$  entre as placas e, partir desse valor, a corrente de deslocamento total  $i_D$ . Como  $i_C$  e  $i_D$  se comparam?

a) Em  $t=0$ ,  $q=0$ . Com o tempo,  $q$  aumenta e é dado por:

$$q = i_c \Delta t = 1,80 \cdot 10^{-3} \cdot 0,500 \cdot 10^{-6}$$

$$q = 9,00 \cdot 10^{-10} \text{ C}$$

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{q}{\epsilon_0 A} \rightarrow E = 2,03 \cdot 10^5 \frac{\text{V}}{\text{m}}$$

$$\Delta V = Ed \rightarrow \Delta V = 406 \text{ V}$$

$$b) E = \frac{q}{\epsilon_0 A} \rightarrow \frac{dE}{dt} = \frac{1}{\epsilon_0 A} \frac{dq}{dt} = \frac{i_c}{\epsilon_0 A} \rightarrow \frac{dE}{dt} = 4,07 \cdot 10^{11} \frac{\text{V}}{\text{m} \cdot \text{s}}$$

$$c) \frac{dE}{dt} = \frac{i_c}{\epsilon_0 A} = \frac{j_c}{\epsilon_0} \rightarrow j_c = j_D = \epsilon_0 \frac{dE}{dt}$$

$$j_D = 3,60 \frac{\text{A}}{\text{m}^2}$$

$$i_D = j_D \cdot A = 1,80 \cdot 10^{-3} \text{ A}$$

Conclui-se que  $i_C = i_D$ .



29.39 **Corrente de Deslocamento em um Fio.** Um fio de cobre longo e retilíneo, com área de seção reta circular  $2,1 \text{ mm}^2$ , transporta uma corrente de  $16 \text{ A}$ . A resistividade do material é de  $2,0 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ . (a) Qual é o campo elétrico uniforme no material? (b) Quando a corrente varia a uma taxa de  $4000 \text{ A/s}$ , qual é a taxa de variação do campo elétrico no material? (c) Qual é a densidade da corrente de deslocamento no material do item (b)? (*Sugestão:* como  $K$  para o cobre é muito próximo de 1, use  $\epsilon = \epsilon_0$ .) (d) Quando a corrente varia como no item (b), qual é o módulo do campo magnético a  $6,0 \text{ cm}$  do centro do fio? Note que tanto a corrente de condução quanto a corrente de deslocamento devem ser incluídas no cálculo de  $B$ . A contribuição dada pela corrente de deslocamento é significativa?

$$a) \boxed{E = \rho j = \rho \frac{i}{A} = 0,115 \frac{\text{V}}{\text{m}}}$$

$$b) \boxed{\frac{d(E)}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \rho \frac{i}{A} \right) = \frac{\rho}{A} \frac{di}{dt} = 38 \frac{\text{V}}{\text{m} \cdot \text{s}}}$$

$$c) \boxed{j_D = \epsilon_0 \frac{dE}{dt} = 3,4 \cdot 10^{-10} \frac{\text{A}}{\text{m}^2}}$$

$$d) i_D = j_D A = 7,14 \cdot 10^{-16} \text{ A}$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 (i_c + i_D)$$

Como  $i_c \gg i_D$ ,

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} \approx \mu_0 i_c$$

$$\boxed{B_c = \frac{\mu_0 i_c}{2\pi R} = 5,33 \cdot 10^{-5} \text{ T}}$$

Para fins de comparação:

$$B_D = \frac{\mu_0 i_D}{2\pi R} = 2,38 \cdot 10^{-21} \text{ T}, \text{ que é desprezível MAS EXISTE!}$$