

Lista 07 – Campo magnético devido a correntes e Indução Eletromagnética

**Sequência didática proposta para os exercícios (Cap. 30):**

Perguntas: 2, 3 e 9 (Halliday)

Exercícios e Problemas: 5, 6, 7, 8, 9, 16, 19, 23, 25, 29, 30, 35, 37, 38, 41, 45 e 49 (Halliday)

+ Exercício Extra (p. 8 da lista)

**Sequência didática proposta para os exercícios (Cap. 31):**

Perguntas: 3 e 6 (Halliday)

Exercícios e Problemas: 3, 4, 9, 17, 18, 21, 22, 24, 27, 28, 30, 32 e 35 (Halliday)

PERGUNTAS

1. A Fig. 30.23 mostra quatro arranjos nos quais fios longos paralelos transportam correntes iguais perpendiculares à página para dentro ou para fora da página nos vértices de quadrados idênticos. Ordene os arranjos de acordo com a intensidade do campo magnético resultante no centro de cada quadrado, da maior para a menor.

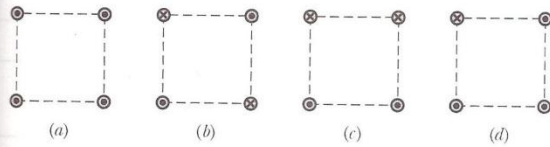


Fig. 30.23 Pergunta 1.

2. A Fig. 30.24 mostra seções transversais de dois fios retos longos; o fio da esquerda transporta uma corrente  $i_1$  perpendicular à página saindo. Se o campo magnético resultante devido às duas correntes tiver que ser nulo no ponto  $P$ , (a) o sentido da corrente  $i_2$  no fio da direita deveria estar perpendicular à página apontando para dentro ou para fora e (b)  $i_2$  deveria ser maior, menor ou igual a  $i_1$ ?

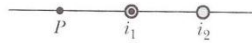


Fig. 30.24 Pergunta 2.

3. A Fig. 30.25 mostra três circuitos, cada um deles composto de dois arcos circulares concêntricos, um de raio  $r$  e o outro de um raio maior  $R$ , e dois segmentos radiais. Os circuitos são percorridos pela mesma corrente, e os segmentos radiais possuem o mesmo ângulo entre eles. Ordene os circuitos de acordo com a intensidade do campo magnético resultante no centro, da maior para a menor.

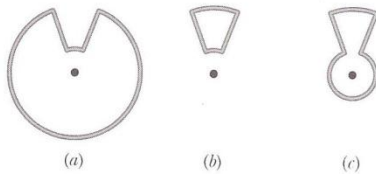


Fig. 30.25 Pergunta 3.

4. A Fig. 30.26 mostra quatro arranjos nos quais fios longos e paralelos, igualmente espaçados, transportam correntes iguais dirigidas para dentro ou para fora da página. Ordene os arranjos de acordo com a intensidade da força resultante sobre o fio central devida às correntes nos outros fios, da maior para a menor.

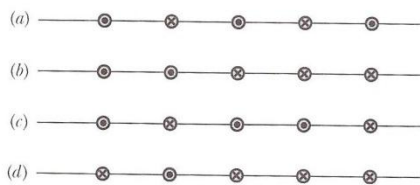


Fig. 30.26 Pergunta 4.

5. A Fig. 30.27 mostra três arranjos de três fios retos longos, transportando correntes iguais dirigidas para dentro ou para fora da página. (a) Ordene os arranjos de acordo com a intensidade da força resultante sobre o fio com a corrente dirigida para fora da página devida às corren-

tes nos outros fios, a maior intensidade primeiro. (b) No arranjo 3, o ângulo entre a força resultante sobre esse fio e a linha tracejada é igual, menor ou maior do que  $45^\circ$ ?

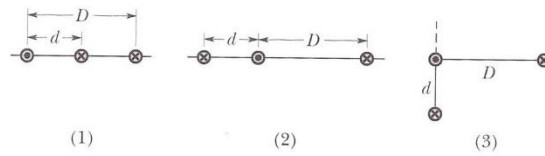


Fig. 30.27 Pergunta 5.

6. A Fig. 30.28 mostra um campo magnético uniforme  $\vec{B}$  e quatro trajetórias em linha reta de comprimentos iguais. Ordene as trajetórias de acordo com a intensidade de  $\int \vec{B} \cdot d\vec{s}$  computada ao longo das trajetórias, da maior para a menor.

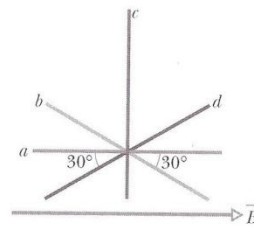


Fig. 30.28 Pergunta 6.

7. A Fig. 30.29a mostra quatro laços de Ampère concêntricos com um fio cuja corrente está dirigida para fora da página. A corrente é uniforme na seção transversal circular do fio. Ordene os laços de acordo com a intensidade de  $\oint \vec{B} \cdot d\vec{s}$  ao redor de cada uma delas, da maior para a menor.

8. A Fig. 30.29b mostra quatro laços de Ampère circulares (em linha fina) e, em seção transversal, quatro condutores circulares longos (em linha grossa), todos concêntricos. Três dos condutores são cilindros ocos; o condutor central é um cilindro sólido. As correntes nos condutores são, do menor raio para o maior raio, 4 A para fora da página, 9 A para dentro da página, 5 A para fora da página e 3 A para dentro da página. Ordene os laços de acordo com a intensidade de  $\oint \vec{B} \cdot d\vec{s}$  ao redor de cada uma delas, da maior para a menor.

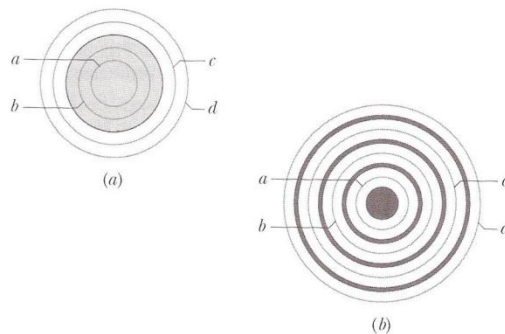


Fig. 30.29 Perguntas 7 e 8.

9. A Fig. 30.30 mostra quatro correntes idênticas  $i$  e cinco trajetórias de Ampère circundando-as. Ordene as trajetórias de acordo com o valor da integral  $\oint \vec{B} \cdot d\vec{s}$  calculada nos sentidos mostrados, a mais positiva primeiro e a mais negativa por último.

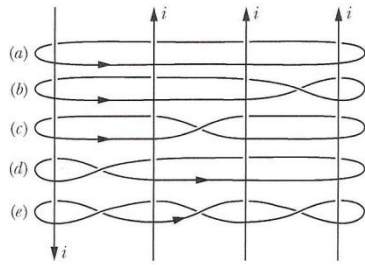


Fig. 30.30 Pergunta 9.

10. A seguinte tabela fornece o número de voltas por unidade de comprimento  $n$  e a corrente  $i$  que passa por seis solenóides ideais de raios

Solenóide:	1	2	3	4	5	6
$n$ :	5	4	3	2	10	8
$i$ :	5	3	7	6	2	3

EXERCÍCIOS E PROBLEMAS

SEÇÃO 30.1 Calculando o Campo Magnético Devido a uma Corrente

1E. Um topógrafo está usando uma bússola magnética 6,1 m abaixo de uma linha de transmissão, na qual há uma corrente estacionária de 100 A. (a) Qual o campo magnético no local onde está a bússola devido à linha de transmissão? (b) Isto irá interferir seriamente com a leitura da bússola? A componente horizontal do campo magnético da Terra no local é igual a  $20 \mu\text{T}$ .

2E. O canhão de elétrons em um tubo de televisão tradicional dispara elétrons com energia cinética de 25 keV sobre a tela em um feixe circular de 0,22 mm de diâmetro;  $5,6 \times 10^{14}$  elétrons chegam por segundo. Calcule o campo magnético produzido pelo feixe em um ponto distante 1,5 mm do eixo do feixe.

3E. Em um certo local nas Filipinas, o campo magnético da Terra de  $39 \mu\text{T}$  é horizontal e está voltado para o norte. Suponha que o campo resultante seja nulo a exatamente 8,0 cm acima de um fio horizontal reto e longo que transporta uma corrente constante. Qual (a) a intensidade e (b) o sentido da corrente?

4E. Um fio longo, transportando uma corrente de 100 A é colocado em um campo magnético externo uniforme de 5,0 mT. O fio é perpendicular a este campo magnético. Localize os pontos nos quais o campo magnético resultante é nulo.

5E. Uma partícula, com carga positiva  $q$  está a uma distância  $d$  de um fio reto longo que transporta uma corrente  $i$ ; a partícula está se movendo com velocidade escalar  $v$  perpendicular ao fio. Qual a direção, o sentido e a intensidade da força que age sobre a partícula se ela estiver se movendo (a) em direção ao fio e (b) se afastando dele?

6E. Um condutor reto transportando uma corrente  $i$  se divide em dois arcos semicirculares idênticos como mostrado na Fig. 30.31. Qual o campo magnético no centro  $C$  da espira circular resultante?

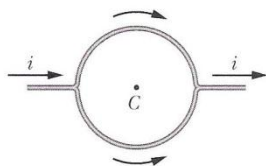


Fig. 30.31 Exercício 6.

7P. Um fio transportando uma corrente  $i$  possui a configuração mostrada na Fig. 30.32. Dois trechos retos semi-infinitos, ambos tangentes ao mesmo círculo, estão ligados por um arco circular, de ângulo central  $\theta$ , ao longo da circunferência do círculo, com todas as seções localizadas no mesmo plano. Qual deve ser o valor de  $\theta$  para que  $B$  seja nulo no centro do círculo?

diferentes. Você quer combinar concentricamente vários deles para produzir um campo magnético resultante nulo ao longo do eixo central. Isto pode ser feito (a) com dois deles, (b) com três deles, (c) com quatro deles e (d) com cinco deles? Caso seja possível, responda listando quais solenóides devem ser usados e indique o sentido das correntes.

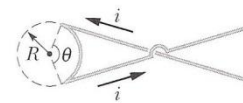


Fig. 30.32 Problema 7.

8P. Use a lei de Biot-Savart para calcular o campo magnético  $\theta$  em  $C$ , o centro comum dos arcos semicirculares  $AD$  e  $HJ$  na Fig. 30.33a. Os dois arcos, de raios  $R_2$  e  $R_1$ , respectivamente, formam parte do circuito  $ADJHA$  que transporta a corrente  $i$ .

9P. No circuito da Fig. 30.33b, os segmentos curvos são arcos de círculo de raios  $a$  e  $b$  com centro comum  $P$ . Os segmentos retos estão ao longo dos raios. Determine o campo magnético  $B$  no ponto  $P$ , supondo uma corrente  $i$  no circuito.

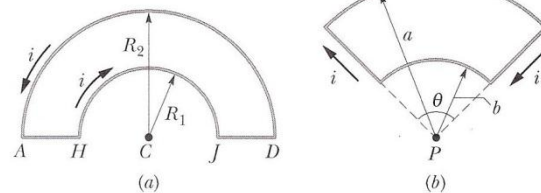


Fig. 30.33 Problemas 8 e 9.

10P. O fio mostrado na Fig. 30.34 transporta uma corrente  $i$ . Qual o campo magnético  $B$  produzido no centro  $C$  do semicírculo (a) por cada segmento reto de comprimento  $L$ , (b) pelo segmento semicircular de raio  $R$  e (c) por todo o fio?

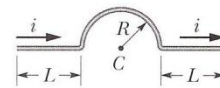


Fig. 30.34 Problema 10.

11P. Na Fig. 30.35, um fio reto de comprimento  $L$  transporta uma corrente  $i$ . Mostre que a intensidade do campo magnético  $B$  produzido por este segmento em  $P_1$ , a uma distância  $R$  do segmento ao longo de uma bissetriz perpendicular, é

$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi R} \frac{L}{(L^2 + 4R^2)^{1/2}}$$



Mostre que esta expressão para  $B$  se reduz a um resultado esperado quando  $L \rightarrow \infty$ .

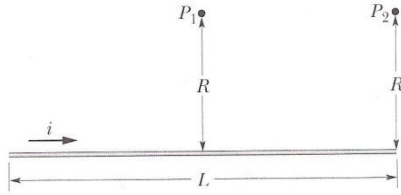


Fig. 30.35 Problemas 11 e 13.

12P. Uma espira quadrada de fio com comprimento de lado  $a$  transporta uma corrente  $i$ . Usando o Problema 11, mostre que, no centro da espira, a intensidade do campo magnético produzido pela corrente é

$$B = \frac{2\sqrt{2}\mu_0 i}{\pi a}$$

13P. Na Fig. 30.35, um fio reto de comprimento  $L$  transporta uma corrente  $i$ . Mostre que

$$B = \frac{\mu_0 i}{4\pi R} \frac{L}{(L^2 + R^2)^{1/2}}$$

fornece a intensidade do campo magnético  $\vec{B}$  produzido pelo fio em  $P_2$ , a uma distância perpendicular  $R$  de uma das extremidades do fio.

14P. Usando o Problema 11, mostre que a intensidade do campo magnético produzido no centro de uma espira retangular de fio de comprimento  $L$  e largura  $W$ , transportando uma corrente  $i$ , é

$$B = \frac{2\mu_0 i}{\pi} \frac{(L^2 + W^2)^{1/2}}{LW}$$

15P. Uma espira quadrada de fio com comprimento de lado  $a$  transporta uma corrente  $i$ . Usando o Problema 11, mostre que a intensidade do campo magnético produzido em um ponto sobre o eixo da espira e a uma distância  $x$  do seu centro é

$$B(x) = \frac{4\mu_0 i a^2}{\pi(4x^2 + a^2)(4x^2 + 2a^2)^{1/2}}$$

Prove que este resultado é consistente com o resultado do Problema 12.

16P. Na Fig. 30.36, um fio reto de comprimento  $a$  transporta uma corrente  $i$ . Mostre que a intensidade do campo magnético produzido pela corrente no ponto  $P$  é  $B = \sqrt{2}\mu_0 i/8\pi a$ .

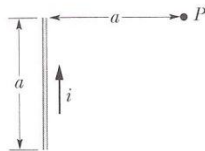


Fig. 30.36 Problema 16.

17P. Dois fios, ambos de comprimento  $L$ , são conformados segundo um círculo e um quadrado, e cada um deles transporta uma corrente  $i$ . Mostre que o quadrado produz um campo magnético maior em seu centro do que o círculo no seu centro. (Veja o Problema 12.)

18P. Determine o campo magnético  $\vec{B}$  no ponto  $P$  da Fig. 30.37. (Veja o Problema 16.)

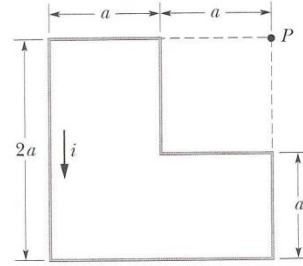


Fig. 30.37 Problema 18.

19P. A Fig. 30.38 mostra uma seção transversal de uma fita longa e fina de largura  $w$  que está transportando uma corrente total  $i$  uniformemente distribuída para dentro da página. Calcule a intensidade, a direção e o sentido do campo magnético  $\vec{B}$  no ponto  $P$  do plano da tira a uma distância  $d$  da sua borda. (Dica: Imagine a fita sendo constituída de muitos fios paralelos longos e finos.)

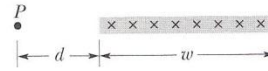


Fig. 30.38 Problema 19.

20P. Determine o campo magnético  $\vec{B}$  no ponto  $P$  da Fig. 30.39 para  $i = 10$  A e  $a = 8,0$  cm. (Veja os Problemas 13 e 16.)

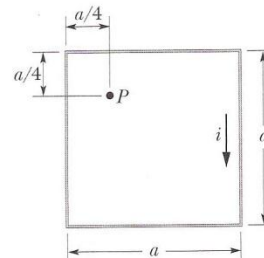


Fig. 30.39 Problema 20

### SEÇÃO 30.2 Força entre Duas Correntes Paralelas

21E. Dois fios longos paralelos estão separados por uma distância de 8,0 cm. Que correntes iguais devem existir nos fios para que o campo magnético a meio caminho entre os dois fios tenha uma intensidade de  $300 \mu\text{T}$ ? Responda para correntes (a) paralelas e (b) antiparalelas.

22E. Dois fios longos paralelos separados por uma distância  $d$  transportam correntes de  $i$  e  $3i$  no mesmo sentido. Localize o ponto ou pontos nos quais seus campos magnéticos se cancelam.

23E. Dois fios paralelos, retos e longos, separados por uma distância de 0,75 cm são perpendiculares ao plano da página, como mostrado na

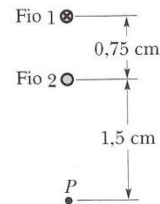


Fig. 30.40 Exercício 23.

Fig. 30.40. O fio 1 transporta uma corrente de 6,5 A para dentro da página. Qual deve ser a corrente (intensidade e sentido) no fio 2 para que o campo magnético resultante no ponto  $P$  seja nulo?

24E. A Fig. 30.41 mostra cinco fios longos paralelos no plano  $xy$ . Cada um dos fios transporta uma corrente  $i = 3,00$  A no sentido positivo de  $x$ . A separação entre fios adjacentes é  $d = 8,00$  cm. Usando notação com vetores unitários, qual a força magnética por metro exercida sobre cada um destes cinco fios pelos outros fios?

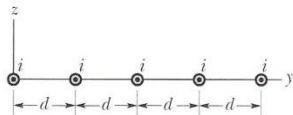


Fig. 30.41 Exercício 24.

25P. Quatro fios longos de cobre são paralelos uns aos outros, e suas seções transversais formam os vértices de um quadrado de lado  $a = 20$  cm. Existe uma corrente de 20 A em cada fio nos sentidos mostrados na Fig. 30.42. Qual a intensidade, a direção e o sentido de  $\vec{B}$  no centro do quadrado?

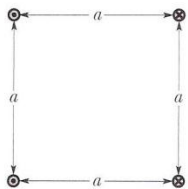


Fig. 30.42 Problemas 25, 26 e 27.

26P. Quatro correntes paralelas idênticas  $i$  estão dispostas formando um quadrado com comprimento de lado  $a$  como na Fig. 30.42, só que agora elas estão todas para fora da página. Qual a força por unidade de comprimento (intensidade, direção e sentido) sobre qualquer um dos fios?

27P. Na Fig. 30.42, qual a força por unidade de comprimento que age sobre o fio inferior da esquerda, em intensidade, direção e sentido, com os sentidos de correntes indicados na figura? A intensidade da corrente em cada fio é  $i$ .

28P. A Fig. 30.43 é um desenho esquemático idealizado de um canhão sobre trilhos. Um projétil  $P$  está posicionado entre dois trilhos largos de seção transversal circular; uma fonte de corrente envia corrente através dos trilhos e ela passa através do próprio projétil, que é condutor (não se usa um fusível). (a) Seja  $w$  a distância entre os trilhos,  $R$  o raio dos trilhos e  $i$  a corrente. Mostre que a força que age sobre o projétil está dirigida para a direita ao longo dos trilhos e é dada aproximadamente por

$$F = \frac{i^2 \mu_0}{2\pi} \ln \frac{w + R}{R}$$

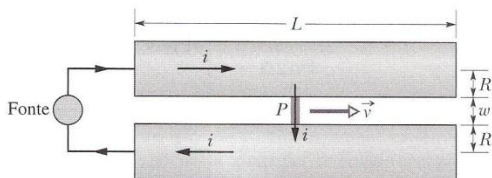


Fig. 30.43 Problema 28.

(b) Se o projétil partir do repouso da extremidade esquerda dos trilhos, determine a velocidade escalar  $v$  com que ele é expelido na direita. Suponha que  $i = 450$  kA,  $w = 12$  mm,  $R = 6,7$  cm,  $L = 4,0$  m e que a massa do projétil é  $m = 10$  g.

29P. Na Fig. 30.44, o fio longo reto transporta uma corrente de 30 A e a espira retangular transporta uma corrente de 20 A. Calcule a força resultante que atua sobre a espira. Suponha que  $a = 1,0$  cm,  $b = 8,0$  cm e  $L = 30,0$  cm.

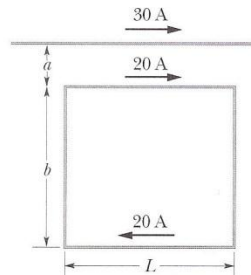


Fig. 30.44 Problema 29.

SEÇÃO 30.3 A Lei de Ampère

30E. Oito fios cortam a página perpendicularmente nos pontos mostrados na Fig. 30.45. Um fio identificado pelo número inteiro  $k$  ( $k = 1, 2, \dots, 8$ ) transporta a corrente  $ki$ . Para os fios de numeração  $k$  ímpar, a corrente está para fora da página; para os de numeração  $k$  par, seu sentido é para dentro da página. Compute  $\oint \vec{B} \cdot d\vec{s}$  ao longo da trajetória fechada no sentido indicado.

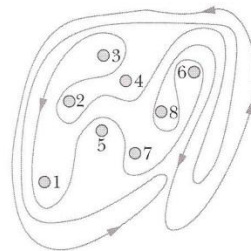


Fig. 30.45 Exercício 30.

31E. Cada um dos oito condutores da Fig. 30.46 transporta 2,0 A de corrente para dentro ou para fora da página. Duas trajetórias são indicadas para a integral de linha  $\oint \vec{B} \cdot d\vec{s}$ . Qual o valor da integral para a trajetória (a) à esquerda e (b) à direita?

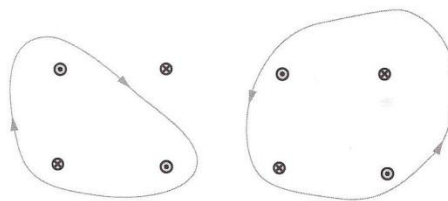


Fig. 30.46 Exercício 31.



32E. A Fig. 30.47 mostra uma seção transversal de um condutor cilíndrico longo de raio  $a$ , transportando uma corrente  $i$  uniformemente distribuída. Suponha que  $a = 2,0$  cm e  $i = 100$  A, e faça o gráfico de  $B(r)$  na faixa  $0 < r < 6,0$  cm.

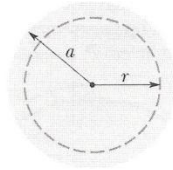


Fig. 30.47 Exercício 32.

33P. Mostre que um campo magnético uniforme  $\vec{B}$  não pode cair abruptamente para zero (como é sugerido pela ausência de linhas à direita do ponto  $a$  na Fig. 30.48) ao nos movermos perpendicularmente a  $\vec{B}$ , digamos, ao longo da seta horizontal da figura. (Dica: Aplique a lei de Ampère à trajetória retangular indicada pelas linhas tracejadas.) Em ímãs reais, uma “distorção de borda” das linhas de campo magnético sempre ocorre, o que significa que  $\vec{B}$  se aproxima de zero de maneira gradual. Modifique as linhas de campo da figura para indicar uma situação mais realística.

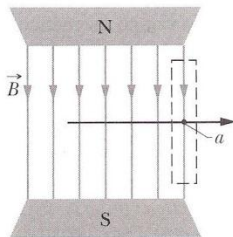


Fig. 30.48 Problema 33.

34P. Duas espiras condutoras quadradas transportam correntes de 5,0 e 3,0 A, como mostrado na Fig. 30.49. Qual o valor de  $\oint \vec{B} \cdot d\vec{s}$  para cada uma das duas trajetórias fechadas mostradas?

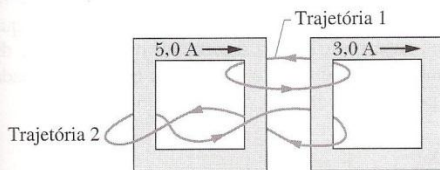


Fig. 30.49 Problema 34.

35P. A densidade de corrente no interior de um fio cilíndrico sólido e longo de raio  $a$  está na direção do eixo central e varia linearmente com a distância radial  $r$  contada a partir do eixo de acordo com  $J = J_0 r/a$ . Determine o campo magnético no interior do fio.

36P. Um fio reto longo (raio = 3,0 mm) transporta uma corrente constante distribuída uniformemente sobre uma seção transversal perpendicular ao eixo do fio. Se a densidade de corrente for de  $100 \text{ A/m}^2$ , quais serão as intensidades dos campos magnéticos (a) a 2,0 mm do eixo do fio e (b) a 4,0 mm do eixo do fio?

37P. A Fig. 30.50 mostra uma seção transversal de um condutor cilíndrico longo de raio  $a$ , contendo um furo cilíndrico longo de raio  $b$ . Os eixos do cilindro e do furo são paralelos e estão separados por uma distância  $d$ ; uma corrente  $i$  está distribuída uniformemente sobre a área escurificada.

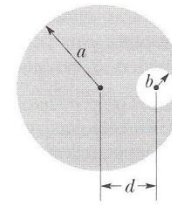


Fig. 30.50 Problema 37.

(a) Use o princípio da superposição para mostrar que o campo magnético no centro do furo é

$$B = \frac{\mu_0 i d}{2\pi(a^2 - b^2)}.$$

(b) Discuta os dois casos especiais  $b = 0$  e  $d = 0$ . (c) Use a lei de Ampère para mostrar que o campo magnético no furo é uniforme. (Dica: Encaixe o furo cilíndrico como resultante da superposição de um cilindro inteiro (sem furo) transportando uma corrente em um sentido com um cilindro de raio  $b$  transportando uma corrente no sentido contrário, os dois cilindros tendo a mesma densidade de corrente.)

38P. Um tubo circular longo com raio externo  $R$  transporta uma corrente  $i$  (uniformemente distribuída) para dentro da página, como é mostrado na Fig. 30.51. Um fio corre paralelo ao tubo a uma distância de  $3R$  de centro a centro. Determine a intensidade e o sentido da corrente no fio tais que o campo magnético resultante no ponto  $P$  tenha a mesma intensidade que o campo magnético resultante no centro do tubo, mas que esteja no sentido contrário.

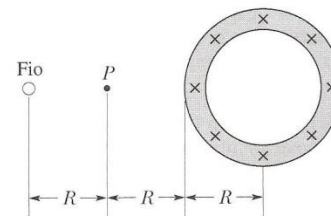


Fig. 30.51 Problema 38.

39P. A Fig. 30.52 mostra uma seção transversal de uma chapa condutora infinita que transporta uma corrente por unidade de comprimento na direção de  $x$  igual a  $\lambda$ ; a corrente emerge perpendicularmente para fora da página. (a) Use a lei de Biot-Savart e simetria para mostrar que para todos os pontos  $P$  acima da chapa, e para todos os pontos  $P'$  abaixo dela, o campo magnético é paralelo à chapa e possui a direção e os sentidos mostrados.<sup>10</sup> (b) Use a lei de Ampère para provar que  $B = 1/3\mu\lambda$  em todos os pontos  $P$  e  $P'$ .

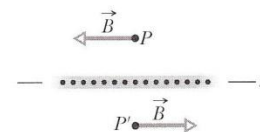


Fig. 30.52 Problemas 39 e 44.

### SEÇÃO 30.4 Solenóides e Toróides

40E. Um solenóide, com comprimento igual a 95,0 cm, possui um raio de 2,0 cm e um enrolamento de 1200 voltas; ele transporta uma corrente de 3,60 A. Calcule a intensidade do campo magnético no interior do solenóide.

<sup>10</sup>Neste caso, existe uma descontinuidade do campo magnético através da chapa. (N.T.)

41E. Um solenóide de 200 voltas tendo um comprimento de 25 cm e um diâmetro de 10 cm transporta uma corrente de 0,30 A. Calcule a intensidade do campo magnético  $B$ , no interior do solenóide.

42E. Um solenóide de 1,30 m de comprimento e 2,60 cm de diâmetro transporta uma corrente de 18,0 A. O campo magnético no interior do solenóide é 23,0 mT. Determine o comprimento do fio que forma o solenóide.

43E. Um toróide de seção transversal quadrada, com 5,00 cm de lado, e um raio interno de 15,0 cm possui 500 voltas e transporta uma corrente de 0,800 A. (Ele é formado por um solenóide quadrado — em vez de um solenóide redondo como o da Fig. 30.16 — curvado na forma de uma câmara de pneu.) Qual o campo magnético no interior do toróide (a) no seu raio interno e (b) no raio externo do toróide?

44P. Considere um solenóide ideal como um condutor cilíndrico fino cuja corrente por unidade de comprimento, medida paralela ao eixo do cilindro, é  $\lambda$ . (a) Fazendo isso, mostre que a intensidade do campo magnético no interior de um solenóide ideal pode ser escrita como  $B = \mu_0 \lambda$ . Este é o valor da *variação* de  $B$ , que você encontra quando se move do interior para fora do solenóide, atravessando a parede do solenóide. (b) Mostre que a mesma variação ocorre quando você se move através de uma chapa de corrente plana infinita como a da Fig. 30.52 (veja o Problema 39). Esta igualdade o surpreende?

45P. Na Seção 30.4, mostramos que o campo magnético em qualquer raio  $r$  no interior de um toróide é dado por

$$B = \frac{\mu_0 i N}{2\pi r}$$

Mostre que quando você se move de qualquer ponto interior bem próximo à superfície de um toróide para um ponto exterior bem próximo à mesma superfície, a intensidade da *variação* em  $B$ , que você encontra é exatamente  $\mu_0 \lambda$ . Aqui  $\lambda$  é a corrente por unidade de comprimento ao longo de uma circunferência de raio  $r$  no interior do toróide. Compare este resultado com o resultado análogo encontrado no Problema 44. A igualdade não é surpreendente?

46P. Um solenóide longo possui 100 voltas/cm e transporta uma corrente  $i$ . Um elétron se move no interior do solenóide em um círculo de raio 2,30 cm perpendicular ao eixo do solenóide. A velocidade do elétron é 0,0460c ( $c$  = velocidade da luz). Determine a corrente  $i$  no solenóide.

47P. Um solenóide longo com 10,0 voltas/cm e um raio de 7,00 cm transporta uma corrente de 20,0 mA. Existe uma corrente de 6,00 A em um condutor reto localizado ao longo do eixo central do solenóide. (a) A que distância radial do eixo a direção do campo magnético resultante estará a 45,0° em relação à direção axial? (b) Qual a intensidade do campo magnético neste local?

**SEÇÃO 30.5 Uma Bobina Transportando Corrente como um Dipolo Magnético**

48E. A Fig. 30.53a mostra um comprimento de fio transportando uma corrente  $i$  curvado segundo a forma de uma bobina circular de uma volta. Na Fig. 30.53b o mesmo comprimento de fio foi curvado com um raio menor, dando origem a uma bobina de duas voltas, cada uma com metade do raio original. (a) Se  $B_a$  e  $B_b$  forem as intensidades dos campos magnéticos nos centros das duas bobinas, quanto vale a razão  $B_b/B_a$ ? (b) Qual a razão entre os momentos de dipolo,  $\mu_b/\mu_a$ , das bobinas?

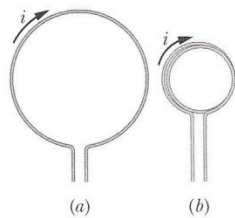


Fig. 30.53 Exercício 48.

49E. Qual o momento de dipolo magnético  $\vec{\mu}$  do solenóide descrito no Exercício 41?

50E. A Fig. 30.54 mostra um arranjo conhecido como uma bobina de Helmholtz. Ela é formada por duas bobinas circulares coaxiais, cada uma delas de  $N$  voltas e raio  $R$ , separadas por uma distância  $R$ . As duas bobinas transportam correntes iguais  $i$  no mesmo sentido. Determine a intensidade do campo magnético resultante em  $P$ , a meio caminho entre as bobinas.

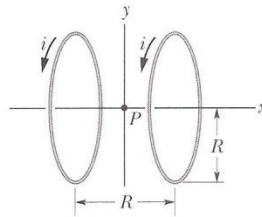


Fig. 30.54 Exercício 50; Problemas 53 e 55.

51E. Um estudante constrói um eletroímã curto enrolando 300 voltas de fio ao redor de um cilindro de madeira de diâmetro  $d = 5,0$  cm. A bobina é ligada a uma bateria produzindo uma corrente de 4,0 A no fio. (a) Qual o momento magnético deste dispositivo? (b) A que distância axial  $z \gg d$  do campo magnético deste dipolo possui intensidade de 5,0  $\mu$ T (aproximadamente um décimo do campo magnético da Terra)?

52E. A intensidade  $B(x)$  do campo magnético em pontos sobre o eixo de uma espira de corrente quadrada de lado  $a$  é dada no Problema 15. (a) Mostre que o campo magnético axial desta espira, para  $x \gg a$ , é o de um dipolo magnético (veja a Eq. 30.29). (b) Qual o momento de dipolo magnético desta espira?

53P. Duas bobinas de 300 voltas de raio  $R$  cada transportam uma corrente  $i$ . Elas estão dispostas separadas de uma distância  $R$  uma da outra, como na Fig. 30.54. Para  $R = 5,0$  cm e  $i = 50$  A, faça o gráfico da intensidade  $B$  do campo magnético resultante em função da distância  $x$  ao longo do eixo comum  $x$ , na faixa de  $x = -5$  cm até  $x = +5$  cm, considerando  $x = 0$  no ponto médio  $P$ . (Bobinas como esta geram um campo especialmente uniforme  $B$ , próximo ao ponto  $P$ .) (Dica: Veja a Eq. 30.28.)

54P. Um condutor transporta uma corrente de 6,0 A ao longo da trajetória fechada  $abcdefgha$  que envolve 8 das 12 arestas de um cubo de lado igual a 10 cm, como mostrado na Fig. 30.55. (a) Por que se pode considerar este problema como a superposição de três espiras quadradas:  $bcfgb$ ,  $abgha$  e  $cdefc$ ? (Dica: Desenhe correntes ao redor dessas espiras quadradas.) (b) Use esta superposição para determinar o momento de dipolo magnético  $\vec{\mu}$  (intensidade, direção e sentido) da trajetória fechada. (c) Calcule  $\vec{B}$ , nos pontos  $(x, y, z) = (0; 5,0 \text{ m}; 0)$  e  $(5,0 \text{ m}; 0; 0)$ .

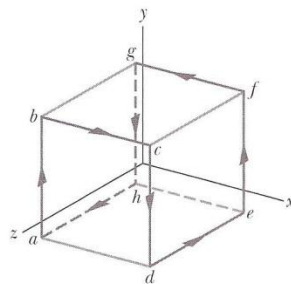


Fig. 30.55 Problema 54.

55P. No Exercício 50 (Fig. 30.54), considere a separação entre as bobinas como uma variável  $s$  (não necessariamente igual ao raio  $R$  das bobinas). (a) Mostre que a derivada primeira da intensidade do campo magnético resultante das bobinas ( $dB/dx$ ) desaparece no ponto médio  $P$  independentemente do valor de  $s$ . Por que você espera que isso seja verdade a partir de simetria? (b) Mostre que a derivada segunda ( $d^2B/dx^2$ )



bém tende a zero em  $P$ , desde que  $s = R$ . Isso explica a uniformidade de  $B$  nas proximidades de  $P$  para esta separação particular entre as bobinas.

**56P.** Um comprimento de fio é conformado em um circuito fechado com raios  $a$  e  $b$ , como mostrado na Fig. 30.56, e transporta uma corrente  $i$ . (a) Qual a intensidade, a direção e o sentido de  $\vec{B}$ , no ponto  $P$ ? (b) Determine o momento de dipolo magnético do circuito.

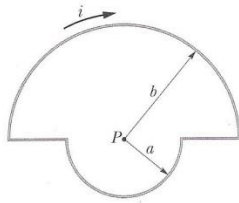


Fig. 30.56 Problema 56.

**57P.** Uma espira circular com 12 cm de raio transporta uma corrente de 15 A. Uma bobina plana com raio de 0,82 cm, tendo 50 voltas e uma corrente de 1,3 A, está concêntrica com a espira. (a) Qual o campo

magnético  $\vec{B}$  que a espira produz em seu centro? (b) Qual torque atua sobre a bobina? Suponha que os planos da espira e da bobina sejam perpendiculares e que o campo magnético devido à espira seja essencialmente uniforme em todo o volume ocupado pela bobina.

**58P.** (a) Um fio longo é curvado no formato mostrado na Fig. 30.57, sem que o próprio fio realmente toque nele mesmo em  $P$ . O raio do trecho circular é  $R$ . Determine a intensidade, a direção e o sentido de  $\vec{B}$ , no centro  $C$  do trecho circular quando a corrente  $i$  tiver os sentidos indicados. (b) Suponha que o trecho circular do fio é girado sem distorção em torno do diâmetro indicado, até que o plano do círculo esteja perpendicular aos trechos retos do fio. O momento de dipolo magnético associado ao trecho circular está agora no sentido da corrente no trecho reto do fio. Determine  $\vec{B}$ , em  $C$  neste caso.

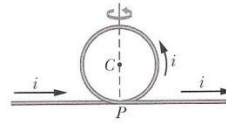


Fig. 30.57 Problema 58.

### Exercício Extra

**91** A Fig. 29-87 mostra uma seção reta de um condutor cilíndrico oco, de raios  $a$  e  $b$ , que conduz uma corrente  $i$  uniformemente distribuída. (a) Mostre que o módulo do campo magnético  $B(r)$  a uma distância  $r$  do eixo do cilindro, para  $b < r < a$ , é dado por

$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi(a^2 - b^2)} \frac{r^2 - b^2}{r}.$$

(b) Mostre que para  $r = a$  esta equação fornece o campo magnético na superfície de um fio longo retilíneo percorrido por uma corrente  $i$ ; para  $r = b$ , fornece o valor zero para o campo magnético; para  $b = 0$ , fornece o campo magnético no interior de um fio maciço de raio  $a$  percorrido por uma corrente  $i$ . (c) Suponha que  $a = 2,0$  cm,  $b = 1,8$  cm e  $i = 100$  A e faça um gráfico de  $B(r)$  para  $0 < r < 6$  cm.

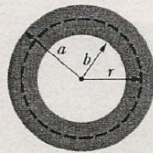


Fig. 29-87 Problema 91.

### Respostas dos exercícios propostos

#### CAPÍTULO 30

**PV** 1.  $a, c, b$  2.  $b, c, a$  3.  $d$ , empate de  $a$  e  $c$ , e então  $b$  4.  $d$ , a empate de  $b$  e  $c$  (zero) **P** 1.  $c, d$ , então  $a$  e  $b$  empatados 3.  $c, a, b$  5. (a) 1, 3, 2; (b) menor 7.  $c$  e  $d$  empatados, então  $b$ , a 9.  $d$ , então empate de  $a$  e  $e$ , então  $b, c$  **EP** 1. (a)  $3,3 \mu\text{T}$ ; (b) sim 3. (a) 16 A; (b) de oeste para leste 5. (a)  $\mu_0 q v l / 2\pi d$ , antiparalela a  $i$ ; (b) mesmo módulo, paralela

a  $i$  7. 2 rad 9.  $\frac{\mu_0 i \theta}{4\pi} \left( \frac{1}{b} - \frac{1}{a} \right)$ , para fora da página 19.

$(\mu_0 i / 2\pi w) \ln(1 + w/d)$ , para cima 21. (a) é impossível ter algo que seja diferente de  $B = 0$  a meio caminho entre os fios; (b) 30 A 23. 4,3 A, para fora da página 25. 80  $\mu\text{T}$ , para cima da página 27.  $0,791 \mu_0 i^2 / \pi a$ , formando um ângulo de  $162^\circ$  no sentido anti-horário com a horizontal 29. 3,2 mN, em direção ao fio 31. (a)  $(-2,0 \text{ A}) \mu_0$ ; (b) 0 35.  $\mu_0 J_0 r^2 / 3a$  41. 0,30 mT 43. (a) 533  $\mu\text{T}$ ; (b) 400  $\mu\text{T}$  47. (a) 4,77 cm; (b) 35,5  $\mu\text{T}$  49. 0,47  $\text{A} \cdot \text{m}^2$  51. (a) 2,4  $\text{A} \cdot \text{m}^2$ ; (b) 46 cm 57. (a) 79  $\mu\text{T}$ ; (b)  $1,1 \times 10^{-6} \text{N} \cdot \text{m}$

#### Cap. 30

6) Zero

10)  $B = \frac{\mu_0 i}{4} \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$

38)  $(3/8)i$ , entrando na pág



$L$ , a corrente aumentará até atingir um valor de equilíbrio igual a  $\mathcal{E}/R$  de acordo com

$$i = \frac{\mathcal{E}}{R} (1 - e^{-t/\tau_L}) \quad (\text{subida da corrente}). \quad (31.43)$$

Nesta equação,  $\tau_L (= L/R)$  governa a taxa de crescimento da corrente e é chamada de **constante de tempo indutiva** do circuito. Quando a fonte de fem constante é removida, há um decaimento da corrente a partir de um valor  $i_0$  de acordo com

$$i = i_0 e^{-t/\tau_L} \quad (\text{decaimento da corrente}). \quad (31.47)$$

**Energia Magnética** Se um indutor  $L$  transporta uma corrente  $i$ , o campo magnético do indutor armazena uma energia dada por

$$U_B = \frac{1}{2} Li^2 \quad (\text{energia magnética}). \quad (31.51)$$

Se  $B$  é a intensidade de um campo magnético em qualquer ponto (em um indutor ou em qualquer outro local), a densidade de energia magnética armazenada nesse ponto é

$$u_B = \frac{B^2}{2\mu_0} \quad (\text{densidade de energia magnética}). \quad (31.56)$$

**Indução Mútua** Se duas bobinas (identificadas como 1 e 2) estão próximas uma da outra, uma corrente variável em uma delas pode induzir uma fem na outra. Esta indução mútua é descrita por

$$\mathcal{E}_2 = -M \frac{di_1}{dt} \quad (31.66)$$

e

$$\mathcal{E}_1 = -M \frac{di_2}{dt}, \quad (31.67)$$

onde  $M$  (medido em henrys) é a indutância mútua para o conjunto das bobinas.

**PERGUNTAS**

1. Na Fig. 31.24, um fio reto longo com corrente  $i$  passa (sem tocar) por três espiras retangulares de fio com comprimentos de lados iguais a  $L$ ,  $1.5L$  e  $2L$ . As espiras estão bastante espaçadas (de modo a não se afetarem umas às outras). As espiras 1 e 3 são simétricas em relação ao fio longo. Ordene as espiras de acordo com a intensidade de corrente induzida nelas se a corrente  $i$  for (a) constante e (b) crescente, a maior intensidade primeiro.

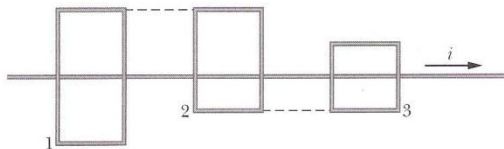


Fig. 31.24 Pergunta 1.

2. Se o condutor circular na Fig. 31.25 for submetido a uma expansão térmica enquanto ele está imerso em um campo magnético, uma corrente será induzida no sentido horário ao redor dele. O sentido do campo magnético é para dentro ou para fora da página?

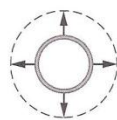


Fig. 31.25 Pergunta 2.

3. A Fig. 31.26 mostra dois circuitos nos quais se desliza uma barra condutora com a mesma velocidade  $v$  através do mesmo campo magnético uniforme e ao longo de um fio em forma de U. Os lados parale-

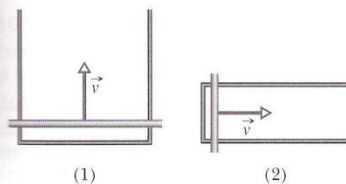


Fig. 31.26 Pergunta 3.

los do fio estão separados por uma distância  $2L$  no circuito 1 e por  $L$  no circuito 2. A corrente induzida no circuito 1 está no sentido anti-horário. (a) O sentido do campo magnético é para dentro ou para fora da página? (b) O sentido da corrente induzida no circuito 2 é horário ou anti-horário? (c) A fem induzida no circuito 1 é maior, menor ou igual à do circuito 2?

4. A Fig. 31.27 mostra duas bobinas enroladas ao redor de barras não-condutoras. A bobina X está ligada a uma bateria e a uma resistência variável. Qual o sentido da corrente induzida que passa pelo amperímetro ligado à bobina Y (a) quando se move a bobina Y em direção da bobina X e (b) quando a corrente na bobina X é reduzida sem que haja qualquer mudança nas posições relativas das bobinas?

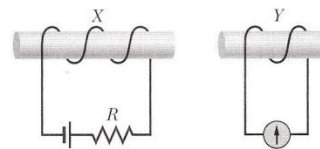


Fig. 31.27 Pergunta 4.

5. A Fig. 31.28a mostra uma região circular na qual um campo magnético uniforme crescente está voltado para fora da página, bem como uma trajetória circular concêntrica ao longo da qual  $\oint \vec{E} \cdot d\vec{s}$  deve ser calculada. A tabela fornece a intensidade inicial do campo magnético, o aumento dessa intensidade e o intervalo de tempo para o aumento em três situações. Ordene as situações de acordo com a intensidade do campo elétrico induzido ao longo da trajetória, o maior primeiro.

Situação	Campo Inicial	Aumento	Tempo
a	$B_1$	$\Delta B_1$	$\Delta t_1$
b	$2B_1$	$\Delta B_1/2$	$\Delta t_1$
c	$B_1/4$	$\Delta B_1$	$\Delta t_1/2$

6. A Fig. 31.28b mostra uma região circular na qual um campo magnético uniforme decrescente está dirigido para fora da página, bem como

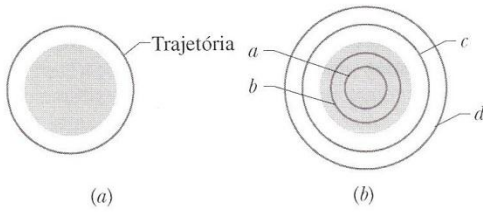


Fig. 31.28 Perguntas 5 e 6.

quatro trajetórias circulares concêntricas. Ordene as trajetórias de acordo com a intensidade de  $\oint \vec{E} \cdot d\vec{s}$  calculada ao longo delas, com a maior intensidade primeiro.

7. A Fig. 31.29 fornece a variação com o tempo da diferença de potencial  $V_R$  entre as extremidades de um resistor em três circuitos com os componentes conectados como o mostrado na Fig. 31.18. Os circuitos contêm a mesma resistência  $R$  e a mesma fem  $\mathcal{E}$ , mas diferem no valor da indutância  $L$ . Ordene os circuitos de acordo com o valor de  $L$ , da maior indutância para a menor.

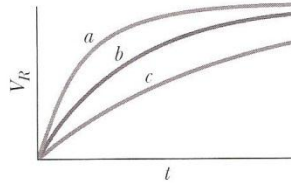


Fig. 31.29 Pergunta 7.

8. A Fig. 31.30 mostra três circuitos com baterias, indutores e resistências idênticos. Ordene os circuitos de acordo com o tempo para que a

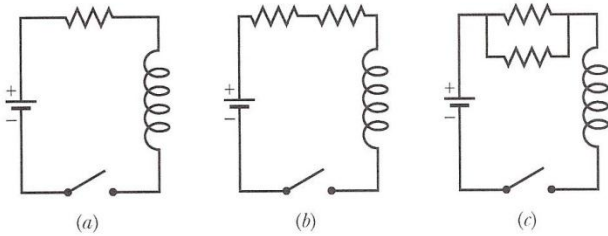


Fig. 31.30 Pergunta 8.

corrente alcance 50% do seu valor de equilíbrio após fechar as chaves, do maior tempo para o menor.

9. A Fig. 31.31 mostra um circuito com dois resistores idênticos e um indutor ideal. A corrente que passa pelo resistor central é maior, menor ou igual à corrente que passa pelo outro resistor (a) imediatamente após o fechamento da chave  $S$ , (b) muito tempo depois do fechamento de  $S$ , (c) imediatamente após  $S$  ser reaberta, um bom tempo depois e (d) muito tempo após a reabertura de  $S$ ?

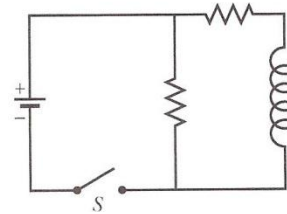


Fig. 31.31 Pergunta 9.

10. A chave no circuito da Fig. 31.17 foi fechada sobre  $a$  durante muito tempo, quando então ela foi virada para o conector  $b$ . A corrente resultante que passa pelo indutor está indicada na Fig. 31.32 para quatro conjuntos de valores para a resistência  $R$  e a indutância  $L$ : (1)  $R_0$  e  $L_0$ , (2)  $2R_0$  e  $L_0$ , (3)  $R_0$  e  $2L_0$  e (4)  $2R_0$  e  $2L_0$ . Qual conjunto corresponde a qual curva?

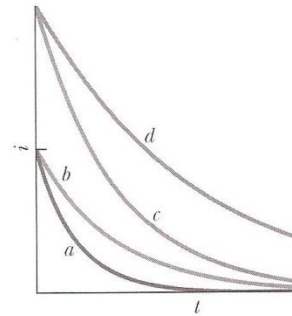


Fig. 31.32 Pergunta 10.

## EXERCÍCIOS E PROBLEMAS

### SEÇÃO 31.4 A Lei de Lenz

1E. Uma antena circular de quadro para sinais UHF (Ultra-High Frequency — Freqüência Ultra-elevada) de televisão possui um diâmetro de 11 cm. O campo magnético de um sinal de TV é normal ao plano da espira e, em um determinado instante, sua intensidade está variando a uma taxa de 0,16 T/s. O campo magnético é uniforme. Qual a fem induzida na antena?

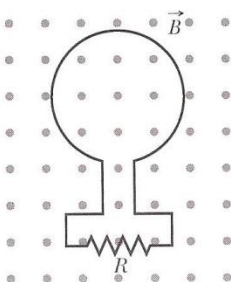


Fig. 31.33 Exercício 3 e Problema 11.

2E. Uma pequena espira de área  $A$  está no interior de um solenóide longo de  $n$  voltas por unidade de comprimento que conduz uma corrente  $i$ . O seu eixo está na mesma direção do eixo do solenóide. Se  $i = i_0 \sin \omega t$ , determine a fem induzida na espira.

3E. O fluxo magnético através da espira mostrada na Fig. 31.33 cresce de acordo com a relação  $\Phi_B = 6,0t^2 + 7,0t$ , onde  $\Phi_B$  está em miliwebers e  $t$  está em segundos. (a) Qual a intensidade da fem induzida na espira quando  $t = 2,0$  s? (b) Qual é o sentido da corrente que passa por  $R$ ?

4E. O campo magnético através de uma única espira de fio com 12 cm de raio e resistência de  $8,5 \Omega$  varia com o tempo, como mostrado na Fig. 31.34. Calcule a fem na espira em função do tempo. Considere os

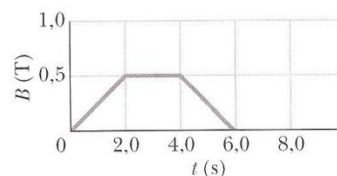


Fig. 31.34 Exercício 4.



intervalos de tempo (a) de  $t = 0$  a  $t = 2,0$  s, (b) de  $t = 2,0$  s a  $t = 4,0$  s, (c) de  $t = 4,0$  s a  $t = 6,0$  s. O campo magnético (uniforme) é perpendicular ao plano da espira.

**5E.** Um campo magnético uniforme é normal ao plano de uma espira circular de 10 cm de diâmetro, feita de um fio de cobre (de diâmetro igual a 2,5 mm). (a) Calcule a resistência do fio. (Veja a Tabela 27.1.) (b) Com que taxa o campo magnético tem que variar com o tempo para que apareça uma corrente induzida de 10 A na espira?

**6P.** A corrente no solenóide do Problema Resolvido 31.1 varia, não como afirmado lá, mas de acordo com  $i = 3,0t + 1,0t^2$ , onde  $i$  está em ampères e  $t$  em segundos. (a) Faça o gráfico da fem induzida na bobina de  $t = 0$  até  $t = 4,0$  s. (b) A resistência da bobina é  $0,15 \Omega$ . Qual a corrente na bobina em  $t = 2,0$  s?

**7P.** Na Fig. 31.35, uma bobina de 120 voltas com raio de 1,8 cm e resistência de  $5,3 \Omega$  é colocada no exterior de um solenóide como o do Problema Resolvido 31.1. Se a corrente no solenóide variar como nesse problema resolvido, qual a corrente que aparece na bobina enquanto a corrente no solenóide estiver variando?

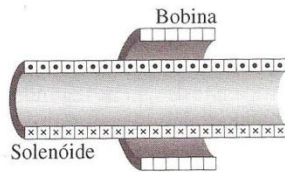


Fig. 31.35 Problema 7.

**8P.** Um material condutor elástico é esticado segundo uma espira circular de 12,0 cm de raio. A espira é colocada com o seu plano perpendicular a um campo magnético uniforme de 0,800 T. Ao ser liberada, o raio da espira começa a encolher a uma taxa instantânea de 75,0 cm/s. Qual a fem induzida na espira neste instante?

**9P.** A Fig. 31.36 mostra duas espiras de fio paralelas tendo um eixo comum. A espira menor (de raio  $r$ ) está acima da espira maior (de raio  $R$ ) a uma distância  $x \gg R$ . Conseqüentemente, o campo magnético devido à corrente  $i$  na espira maior é aproximadamente constante em toda a espira menor. Suponha que  $x$  esteja aumentando a uma taxa constante  $dx/dt = v$ . (a) Determine o fluxo magnético através da área limitada pela espira menor em função de  $x$ . (Dica: Veja a Eq. 30.29.) Na espira menor, determine (b) a fem induzida e (c) o sentido da corrente induzida.

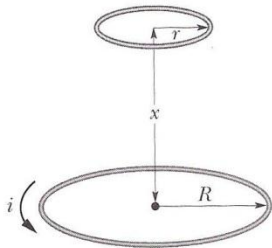


Fig. 31.36 Problema 9.

**10P.** Na Fig. 31.37, uma espira circular de fio de 10 cm de diâmetro (vista lateralmente) está posicionada com a sua normal  $\vec{N}$  formando  $\theta = 30^\circ$  com a direção de um campo magnético uniforme  $\vec{B}$  de intensidade igual a 0,50 T. A espira é então girada de modo tal que  $\vec{N}$  gira descrevendo um cone em torno da direção do campo a uma taxa constante de 100 rpm; o ângulo  $\theta$  permanece inalterado durante o processo. Qual a fem induzida na espira?

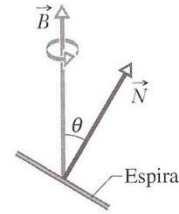


Fig. 31.37 Problema 10.

**11P.** Na Fig. 31.33, seja  $\Phi_B(0)$  o fluxo através da espira no instante  $t = 0$ . Considere então que o campo magnético  $\vec{B}$  varie de uma forma contínua mas não especificada, tanto em módulo quanto em direção, de modo que, em um instante  $t$ , o fluxo seja representado por  $\Phi_B(t)$ . (a) Mostre que a carga resultante  $q(t)$  que passou pelo resistor  $R$  no tempo  $t$  é

$$q(t) = \frac{1}{R} [\Phi_B(0) - \Phi_B(t)]$$

e que ela independe da maneira como variou. (b) Se  $\Phi_B(t) = \Phi_B(0)$  em um caso particular, temos  $q(t) = 0$ . A corrente induzida é necessariamente nula durante o intervalo de 0 a  $t$ ?

**12P.** Uma pequena espira circular com área de  $2,00 \text{ cm}^2$  é colocada no mesmo plano e concêntrica com uma grande espira circular de raio igual a 1,00 m. Varia-se a corrente na espira grande uniformemente de 200 A até  $-200$  A (uma mudança de sentido) em um intervalo de tempo de 1,00 s, começando em  $t = 0$ . (a) Qual o campo magnético no centro da pequena espira circular devido à corrente na espira grande em  $t = 0$ ,  $t = 0,500$  s e em  $t = 1,00$  s? (b) Qual a fem induzida na espira pequena em  $t = 0,500$  s? (Como a espira interna é pequena, suponha que o campo  $\vec{B}$  devido à espira mais externa seja uniforme em toda a área da espira menor.)

**13P.** Cem voltas de um fio de cobre isolado são enroladas ao redor de um núcleo cilíndrico de madeira com área de seção transversal igual a  $1,20 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ . Os dois terminais estão ligados a um resistor. A resistência total no circuito é de  $13,0 \Omega$ . Se um campo magnético longitudinal uniforme aplicado externamente ao núcleo variar de 1,60 T em um sentido até 1,60 T no sentido contrário, que quantidade de carga flui através do circuito? (Dica: Veja o Problema 11.)

**14P.** Em um certo local, o campo magnético da Terra possui intensidade  $B = 0,590$  gauss e está inclinado para baixo fazendo um ângulo de  $70^\circ$  com a horizontal. Uma bobina de fio plana, horizontal e circular com um raio de 10,0 cm possui 1000 voltas e uma resistência total de  $85,0 \Omega$ . Ela está ligada a um galvanômetro com resistência de  $140 \Omega$ . A bobina é girada de meia volta em torno de um diâmetro, de modo que ela fique novamente horizontal. Quanta carga flui através do galvanômetro durante o giro? (Dica: Veja o Problema 11.)

**15P.** Uma espira de fio quadrada com 2,00 m de lado está perpendicular a um campo magnético uniforme, com metade da área da espira imersa no campo, como mostrado na Fig. 31.38. A espira contém uma bateria de 20,0 V com resistência interna desprezível. Se a intensidade do campo variar com o tempo de acordo com  $B = 0,0420 - 0,870t$ , com  $B$  em teslas e  $t$  em segundos, qual (a) a fem resultante no circuito e (b) o sentido da corrente através da bateria?

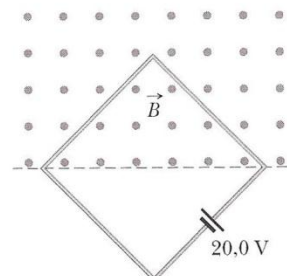


Fig. 31.38 Problema 15.



**16P.** Um fio é curvado em três segmentos circulares, cada um deles com raio  $r = 10$  cm, como mostrado na Fig. 31.39. Cada segmento é um quadrante de um círculo,  $ab$  situado no plano  $xy$ ,  $bc$  situado no plano  $yz$  e  $ca$  situado no plano  $zx$ . (a) Se um campo magnético uniforme  $\vec{B}$  estiver dirigido no sentido positivo do eixo  $x$ , qual a intensidade da fem desenvolvida no fio quando  $B$  aumenta a uma taxa de  $3,0$  mT/s? (b) Qual o sentido da corrente no segmento  $bc$ ?

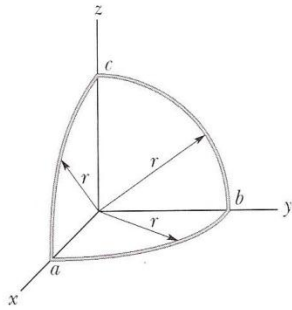


Fig. 31.39 Problema 16.

**17P.** Uma bobina retangular de  $N$  voltas e de comprimento  $a$  e largura  $b$  é girada a uma frequência  $f$  no interior de um campo magnético uniforme  $\vec{B}$ , como indicado na Fig. 31.40. A bobina está ligada a cilindros que giram junto com ela, contra os quais escovas metálicas deslizam para estabelecer contato. (a) Mostre que a fem induzida na bobina é dada (em função do tempo  $t$ ) por

$$\mathcal{E} = 2\pi f N a b B \sin(2\pi f t) = \mathcal{E}_0 \sin(2\pi f t).$$

Este é o princípio do gerador comercial de corrente alternada. (b) Projete uma espira que produzirá uma fem com  $\mathcal{E}_0 = 150$  V quando girada a  $60,0$  rev/s em um campo magnético uniforme de  $0,500$  T.

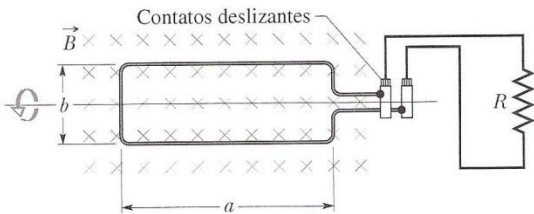


Fig. 31.40 Problema 17.

**18P.** Gira-se um fio rígido curvado segundo um semicírculo de raio  $a$  com frequência  $f$  em um campo magnético uniforme, como sugere a Fig. 31.41. Qual (a) a frequência e (b) a amplitude da fem variável induzida na espira?

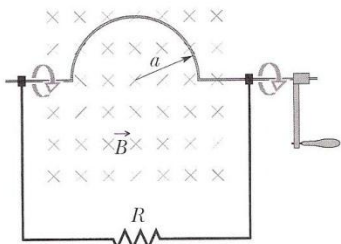


Fig. 31.41 Problema 18.

**19P.** Um gerador elétrico é formado por 100 voltas de fio na forma de uma espira retangular de  $50,0$  cm por  $30,0$  cm, inteiramente imersa em um campo magnético uniforme com intensidade  $B = 3,50$  T. Qual o

valor máximo da fem produzida quando a espira for girada a  $1000$  rpm em torno de um eixo perpendicular a  $\vec{B}$ ?

**20P.** Na Fig. 31.42, um fio forma uma espira circular fechada, com raio  $R = 2,0$  m e resistência de  $4,0 \Omega$ . O círculo está centrado em um fio reto longo: no instante  $t = 0$ , a corrente no fio reto longo é de  $5,0$  A para a direita. Depois disso, a corrente varia de acordo com  $i = 5,0 \text{ A} - (2,0 \text{ A/s}^2)t^2$ . (O fio reto está isolado, portanto não há nenhum contato elétrico entre ele e o fio da espira.) Quais a intensidade e o sentido da corrente induzida na espira para tempos  $t > 0$ ?

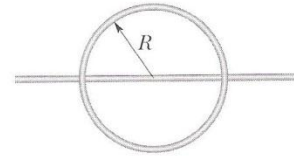


Fig. 31.42 Problema 20.

**21P.** Na Fig. 31.43, a espira quadrada de fio possui lados de comprimento  $2,0$  cm. Um campo magnético é perpendicular ao plano da página e aponta para fora da página; a sua intensidade é dada por  $B = 4,0t^2y$ , onde  $B$  está em teslas,  $t$  em segundos e  $y$  em metros. Determine a fem induzida ao redor do quadrado em  $t = 2,5$  s e indique o seu sentido.

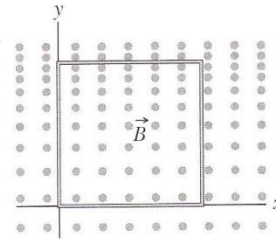


Fig. 31.43 Problema 21.

**22P.** Para a situação mostrada na Fig. 31.44,  $a = 12,0$  cm e  $b = 16,0$  cm. A corrente no fio reto longo é dada por  $i = 4,50t^2 - 10,0t$ , onde  $i$  está em ampères e  $t$  em segundos. (a) Encontre a fem na espira quadrada em  $t = 3,00$  s. (b) Qual o sentido da corrente induzida na espira?

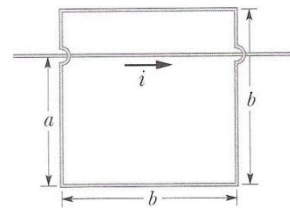


Fig. 31.44 Problema 22.

**23P\*.** Dois fios de cobre longos e paralelos com diâmetros de  $2,5$  mm transportam correntes de  $10$  A em sentidos contrários. (a) Supondo que seus eixos centrais estejam distantes  $20$  mm, calcule o fluxo magnético por metro de fio que existe no espaço entre esses eixos. (b) Que parcela deste fluxo está localizada no interior dos fios? (c) Repita a parte (a) para correntes paralelas.

**24P.** Uma espira retangular de fio com comprimento  $a$ , largura  $b$  e resistência  $R$  localiza-se próximo a um fio infinitamente longo que transporta uma corrente  $i$ , como mostrado na Fig. 31.45. A distância do fio longo ao centro da espira é  $r$ . Determine (a) a intensidade do fluxo

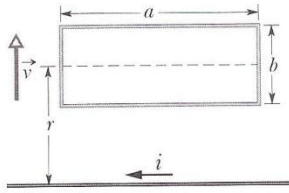


Fig. 31.45 Problema 24.

magnético que atravessa a espira e (b) a corrente na espira quando ela se afasta do fio longo com velocidade escalar  $v$ .

**SEÇÃO 31.5 Indução e Transferências de Energia**

**25E.** Se 50,0 cm de fio de cobre (diâmetro = 1,00 mm) forem moldados na forma de uma espira circular e esta for colocada perpendicularmente a um campo magnético uniforme que está aumentando a uma taxa constante de 10,0 mT/s, a que taxa está sendo gerada energia térmica na espira?

**26E.** Uma antena de quadro em forma de espira circular com área  $A$  e resistência  $R$  está perpendicular a um campo magnético uniforme  $B$ . O campo cai linearmente até zero em um intervalo de tempo  $\Delta t$ . Determine uma expressão para a energia térmica total dissipada na espira.

**27E.** Uma haste metálica é forçada a se mover com velocidade constante  $\vec{v}$  ao longo de dois trilhos metálicos paralelos, ligados por uma tira de metal em uma extremidade, como mostrado na Fig. 31.46. Um campo magnético  $B = 0,350$  T aponta para fora da página. (a) Se os trilhos estiverem separados por uma distância de 25,0 cm e a velocidade escalar da haste for de 55,0 cm/s, qual a fem gerada? (b) Se a haste tiver uma resistência de 18,0  $\Omega$  e os trilhos e o conector tiverem resistência desprezível, qual a corrente na haste? (c) Com que taxa a energia está sendo transferida para energia térmica?

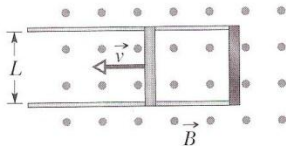


Fig. 31.46 Exercício 27 e Problema 29.

**28P.** Na Fig. 31.47, uma espira retangular longa condutora, de largura  $L$ , resistência  $R$  e massa  $m$ , está pendurada em um campo magnético uniforme horizontal  $B$  dirigido para dentro da página e que existe apenas acima da linha  $aa$ . A espira é então solta; durante a sua queda, ela é acelerada até alcançar uma certa velocidade terminal  $v_t$ . Ignorando o arrasto do ar, determine essa velocidade terminal.

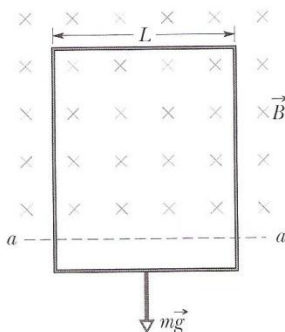


Fig. 31.47 Problema 28.

**29P.** A haste condutora mostrada na Fig. 31.46 possui comprimento  $L$  e está sendo puxada ao longo de trilhos condutores horizontais sem atrito a uma velocidade constante  $\vec{v}$ . Os trilhos estão ligados em uma extre-

midade por uma tira metálica. Um campo magnético uniforme  $\vec{B}$ , dirigido para fora da página, preenche a região na qual a haste se move. Suponha que  $L = 10$  cm,  $v = 5,0$  m/s e  $B = 1,2$  T. (a) Quais a intensidade e o sentido da fem induzida na haste? (b) Qual a corrente na espira condutora? Suponha que a resistência da haste é de 0,40  $\Omega$  e que a resistência dos trilhos e da tira metálica seja desprezível. (c) A que taxa está sendo gerada energia térmica na haste? (d) Que força deve ser aplicada à haste por um agente externo para manter o seu movimento? (e) A que taxa este agente externo realiza trabalho sobre a haste? Compare esta resposta com a resposta para o item (c).

**30P.** Dois trilhos condutores retos formam um ângulo reto no local onde suas extremidades são unidas. Uma barra condutora em contato com os trilhos parte do vértice no instante  $t = 0$  e se move com velocidade constante de 5,20 m/s ao longo deles, como mostrado na Fig. 31.48. Um campo magnético com  $B = 0,350$  T está dirigido para fora da página. Calcule (a) o fluxo que atravessa o triângulo formado pelos trilhos e pela barra em  $t = 3,00$  s e (b) a fem ao redor do triângulo nesse instante. (c) Se escrevermos a fem como  $\mathcal{E} = at^n$ , onde  $a$  e  $n$  são constantes, qual o valor de  $n$ ?

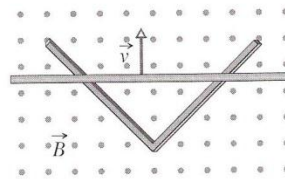


Fig. 31.48 Problema 30.

**31P.** A Fig. 31.49 mostra uma haste de comprimento  $L$  forçada a se mover a uma velocidade constante  $v$  ao longo de trilhos condutores horizontais. O campo magnético no qual a haste se move não é uniforme; ele é gerado por uma corrente  $i$  em um fio longo paralelo aos trilhos. Suponha que  $v = 5,00$  m/s,  $a = 10,0$  mm,  $L = 10,0$  cm e  $i = 100$  A. (a) Calcule a fem induzida na haste. (b) Qual a corrente na espira condutora? Suponha que a resistência da haste é de 0,400  $\Omega$  e que a resistência dos trilhos e da tira que os liga no lado direito seja desprezível. (c) A que taxa está sendo gerada energia térmica na haste? (d) Que força deve ser aplicada à haste por um agente externo para manter o seu movimento? (e) Com que taxa este agente externo realiza trabalho sobre a haste? Compare esta resposta com a dada para (c).

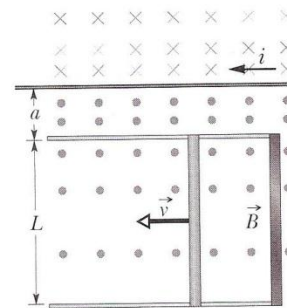


Fig. 31.49 Problema 31.

**SEÇÃO 31.6 Campos Elétricos Induzidos**

**32E.** A Fig. 31.50 mostra duas regiões circulares  $R_1$  e  $R_2$  com raios  $r_1 = 20,0$  cm e  $r_2 = 30,0$  cm. Em  $R_1$  existe um campo magnético uniforme  $B_1 = 50,0$  mT para dentro da página e em  $R_2$  existe um campo magnético uniforme  $B_2 = 75,0$  mT para fora da página (ignore qualquer distorção de borda destes campos). Os dois campos estão diminuindo a uma taxa de 8,50 mT/s. Calcule a integral  $\oint \vec{E} \cdot d\vec{s}$  para cada uma das três trajetórias tracejadas.



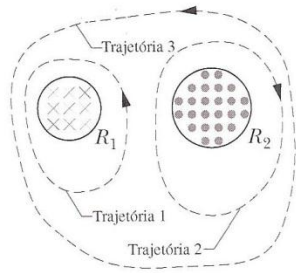


Fig. 31.50 Exercício 32.

**33E.** Um solenóide longo possui 12,0 cm de diâmetro. Quando existe uma corrente  $i$  em seus enrolamentos, um campo magnético uniforme  $B = 30,0$  mT é produzido no seu interior. Diminuindo-se  $i$ , provoca-se a diminuição do campo a uma taxa de 6,50 mT/s. Calcule a intensidade do campo elétrico induzido (a) a 2,20 cm e (b) a 8,20 cm do eixo do solenóide.

**34P.** No início de 1981, o *Francis Bitter National Magnet Laboratory* no M.I.T. deu início à operação de um ímã cilíndrico de 3,3 cm de diâmetro, que produz um campo de 30 T, na época o maior campo estacionário do mundo. O campo pode ser variado senoidalmente entre os limites de 29,6 e 30,0 T a uma frequência de 15 Hz. Quando isto é feito, qual o valor máximo do campo elétrico induzido a uma distância radial de 1,6 cm do eixo? (Dica: Veja o Problema Resolvido 31.4.)

**35P.** Prove que o campo elétrico  $\vec{E}$  em um capacitor de placas paralelas não pode cair abruptamente para zero (como sugerido no ponto  $a$  da Fig. 31.51), quando se move perpendicularmente ao campo, digamos, ao longo da seta horizontal na figura. Distorção de borda das linhas de campo sempre ocorre em capacitores reais, o que significa que  $\vec{E}$  se aproxima de zero de uma maneira contínua e gradual (veja o Problema 33 no Cap. 30). (Dica: Aplique a lei de Faraday à trajetória retangular mostrada pelas linhas tracejadas.)

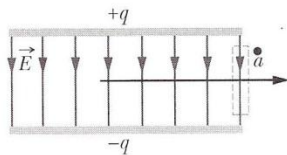


Fig. 31.51 Problema 35.

**SEÇÃO 31.7 Indutores e Indutância**

**36E.** Uma bobina circular possui 10,0 cm de raio e é formada por 30,0 voltas de fio bem coladas umas nas outras. Um campo magnético produzido externamente de 2,60 mT está perpendicular à bobina. (a) Se não há nenhuma corrente na bobina, qual fluxo magnético enlaça as suas espiras? (b) Quando a corrente na bobina é de 3,80 A em um certo sentido, o fluxo resultante através da bobina desaparece. Qual a indutância da bobina?

**37E.** A indutância de uma bobina compacta de 400 voltas é 8,0 mH. Calcule o fluxo magnético através da bobina quando a corrente é de 5,0 mA.

**38P.** Uma tira larga de cobre de largura  $W$  é curvada na forma de um tubo de raio  $R$  com duas extensões planas paralelas, como mostrado na Fig. 31.52. Uma corrente  $i$  atravessa a tira, distribuída uniformemente sobre a sua largura. Desta maneira, forma-se um “solenóide de uma volta”. (a) Deduza uma expressão para a intensidade do campo magnético  $B$  na parte tubular (bem distante das bordas). (Dica: Suponha que o campo

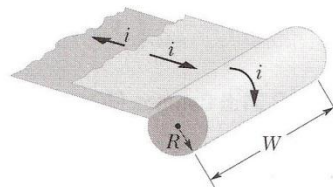


Fig. 31.52 Problema 38.

magnético fora deste solenóide de uma volta seja desprezível.) (b) Determine a indutância deste solenóide de uma volta, desprezando as duas extensões planas.

**39P.** Dois fios longos paralelos, ambos com raio  $a$  e cujos centros estão separados por uma distância  $d$ , transportam correntes iguais em sentidos contrários. Mostre que, desprezando o fluxo no interior dos fios, a indutância de um comprimento  $l$  deste par de fios é dada por

$$L = \frac{\mu_0 l}{\pi} \ln \frac{d - a}{a}.$$

(Dica: Calcule o fluxo através de um retângulo no qual os fios formem dois lados contrários.)

**SEÇÃO 31.8 Auto-indução**

**40E.** Em um dado instante, a corrente e a fem auto-induzida em um indutor estão orientadas como indicado na Fig. 31.53. (a) A corrente está aumentando ou diminuindo? (b) A fem induzida é igual a 17 V e a taxa de variação da corrente é igual a 25 kA/s; determine a indutância.

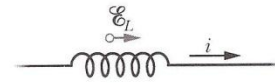


Fig. 31.53 Exercício 40.

**41E.** Um indutor de 12 H transporta uma corrente permanente de 2,0 A. Como se pode fazer aparecer uma fem auto-induzida de 60 V no indutor?

**42P.** A corrente  $i$  através de um indutor de 4,6 H varia com o tempo  $t$ , como mostrado no gráfico da Fig. 31.54. O indutor possui uma resistência de 12  $\Omega$ . Determine a intensidade da fem induzida  $\mathcal{E}$  durante os intervalos de tempo (a) de  $t = 0$  até  $t = 2$  ms, (b) de  $t = 2$  ms até  $t = 5$  ms, (c) de  $t = 5$  ms até  $t = 6$  ms. (Ignore o comportamento nos extremos dos intervalos.)

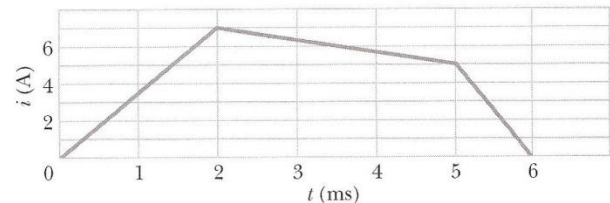


Fig. 31.54 Problema 42.

**43P. Indutores em série.** Dois indutores  $L_1$  e  $L_2$  estão ligados em série e estão separados por uma grande distância. (a) Mostre que a indutância equivalente é dada por

$$L_{eq} = L_1 + L_2.$$

(Dica: Reveja as deduções para resistores em série e capacitores em série. Qual é semelhante neste caso?) (b) Por que a separação entre eles tem que ser grande para que esta relação seja válida? (c) Qual é a generalização de (a) para  $N$  indutores em série?

**44P. Indutores em paralelo.** Dois indutores  $L_1$  e  $L_2$  estão ligados em paralelo e separados por uma grande distância. (a) Mostre que a indutância equivalente é dada por

$$\frac{1}{L_{eq}} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2}.$$

(Dica: Reveja as deduções para resistores em paralelo e capacitores em paralelo. Qual é semelhante neste caso?) (b) Por que a separação entre eles tem que ser grande para que esta relação seja válida? (c) Qual é a generalização de (a) para  $N$  indutores em paralelo?



**SEÇÃO 31.9 Circuitos RL**

**45E.** Em termos de  $\tau_L$ , quanto tempo devemos esperar para que a corrente em um circuito RL cresça até ficar a 0,100% do seu valor de equilíbrio?

**46E.** A corrente em um circuito RL cresce até um terço do seu valor de equilíbrio em 5,00 s. Encontre a constante de tempo indutiva.

**47E.** A corrente em um circuito RL cai de 1,0 A para 10 mA no primeiro segundo após a retirada da bateria do circuito. Se  $L$  é igual a 10 H, encontre a resistência  $R$  no circuito.

**48E.** Considere o circuito RL da Fig. 31.17. Em termos da fem  $\mathcal{E}$  da bateria, (a) qual a fem auto-induzida  $\mathcal{E}_L$  quando a chave tiver acabado de ser fechada sobre  $a$  e (b) quanto vale  $\mathcal{E}_L$  quando  $t = 2,0 \tau_L$ ? (c) Em termos de  $\tau_L$ , quando  $\mathcal{E}_L$  será exatamente metade da fem da bateria  $\mathcal{E}$ ?

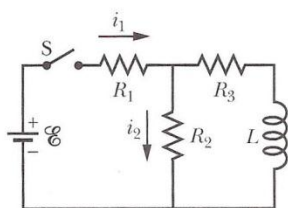
**49E.** Um solenóide tendo uma indutância de  $6,30 \mu\text{H}$  é ligado em série com um resistor de  $1,20 \text{ k}\Omega$ . (a) Se uma bateria de  $14,0 \text{ V}$  for ligada a este par, quanto tempo levará para que a corrente através do resistor atinja 80% do seu valor final? (b) Qual a corrente que passa pelo resistor no instante  $t = 1,0 \tau_L$ ?

**50P.** Suponha que a fem da bateria no circuito da Fig. 31.18 varie com o tempo  $t$  de modo que a corrente seja dada por  $i(t) = 3,0 + 5,0t$ , onde  $i$  está em ampères e  $t$  em segundos. Adote  $R = 4,0 \Omega$  e  $L = 6,0 \text{ H}$  e determine uma expressão para a fem da bateria em função do tempo. (Dica: Aplique a regra das malhas.)

**51P.** No instante  $t = 0$ , uma diferença de potencial de  $45,0 \text{ V}$  é aplicada subitamente a uma bobina com  $L = 50,0 \text{ mH}$  e  $R = 180 \Omega$ . A que taxa a corrente está aumentando em  $t = 1,20 \text{ ms}$ ?

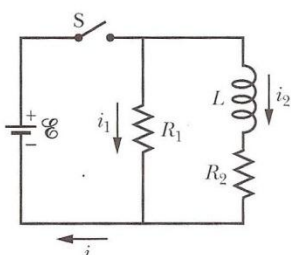
**52P.** Um núcleo toroidal de madeira com uma seção transversal quadrada possui um raio interno de 10 cm e um raio externo de 12 cm. Ele é enrolado com uma camada de fio (de diâmetro igual a 1,0 mm e uma resistência por metro de  $0,020 \Omega/\text{m}$ ). Quais são (a) a indutância e (b) a constante de tempo indutiva do toróide resultante? Ignore a espessura do isolamento sobre o fio.

**53P.** Na Fig. 31.55,  $\mathcal{E} = 100 \text{ V}$ ,  $R_1 = 10,0 \Omega$ ,  $R_2 = 20,0 \Omega$ ,  $R_3 = 30,0 \Omega$  e  $L = 2,00 \text{ H}$ . Determine os valores de  $i_1$  e de  $i_2$  (a) imediatamente após o fechamento da chave S, (b) muito tempo após o fechamento, (c) imediatamente após a reabertura da chave S e (d) muito tempo após a reabertura.



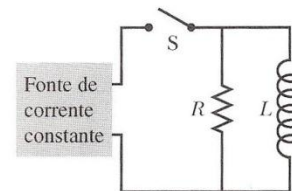
**Fig. 31.55** Problema 53.

**54P.** No circuito da Fig. 31.56,  $\mathcal{E} = 10 \text{ V}$ ,  $R_1 = 5,0 \Omega$ ,  $R_2 = 10 \Omega$  e  $L = 5,0 \text{ H}$ . Para as duas situações distintas (I) a chave S acaba de ser fechada e (II) a chave S fechada há muito tempo, calcule (a) a corrente  $i_1$  através de  $R_1$ , (b) a corrente  $i_2$  através de  $R_2$ , (c) a corrente  $i$  através da chave, (d) a diferença de potencial entre os terminais de  $R_2$ , (e) a diferença de potencial entre os terminais de  $L$  e (f) a taxa de variação  $di_2/dt$ .



**Fig. 31.56** Problema 54.

**55P\*.** No circuito mostrado na Fig. 31.57, a chave S é fechada no instante  $t = 0$ . Depois disso, a fonte de corrente constante, variando a sua fem, mantém uma corrente constante  $i$  na saída do seu terminal superior. (a) Deduza uma expressão para a corrente que atravessa o indutor em função do tempo. (b) Mostre que a corrente que atravessa o resistor é igual à corrente que atravessa o indutor no instante  $t = (L/R) \ln 2$ .



**Fig. 31.57** Problema 55.

**SEÇÃO 31.10 Energia Armazenada em um Campo Magnético**

**56E.** Considere o circuito da Fig. 31.18. Em termos da constante de tempo indutiva, em que instante, após a bateria ter sido ligada, a energia armazenada no campo magnético do indutor será metade do seu valor em regime permanente?

**57E.** Suponha que a constante de tempo indutiva para o circuito da Fig. 31.18 seja igual a  $37,0 \text{ ms}$  e que a corrente no circuito seja nula em  $t = 0$ . Em que instante a taxa com que se dissipa energia no resistor iguala a taxa com que está sendo armazenada energia no indutor?

**58E.** Uma bobina com uma indutância de  $2,0 \text{ H}$  e uma resistência de  $10 \Omega$  é subitamente ligada a uma bateria que não possui resistência com  $\mathcal{E} = 100 \text{ V}$ . Em  $0,10 \text{ s}$  após a ligação ter sido feita, quais são as taxas com que (a) a energia está sendo armazenada no campo magnético, (b) a energia térmica está aparecendo na resistência e (c) a energia está sendo entregue pela bateria?

**59P.** Uma bobina está ligada em série com um resistor de  $10,0 \text{ k}\Omega$ . Uma bateria de  $50,0 \text{ V}$  é ligada aos dois terminais livres dos dois dispositivos, e a corrente alcança um valor de  $2,00 \text{ mA}$  após  $5,00 \text{ ms}$ . (a) Determine a indutância da bobina. (b) Quanta energia está armazenada na bobina neste mesmo instante?

**60P.** Para o circuito da Fig. 31.18, suponha que  $\mathcal{E} = 10,0 \text{ V}$ ,  $R = 6,70 \Omega$  e  $L = 5,50 \text{ H}$ . A bateria é ligada no instante  $t = 0$ . (a) Quanta energia é entregue pela bateria durante os primeiros  $2,00 \text{ s}$ ? (b) Quanto desta energia é armazenada no campo magnético do indutor? (c) Quanto desta energia é dissipada no resistor?

**61P.** Prove que, após a chave S na Fig. 31.17 ter sido virada de  $a$  para  $b$ , toda a energia armazenada no indutor irá, no fim das contas, aparecer como energia térmica no resistor.

**SEÇÃO 31.11 Densidade de Energia de um Campo Magnético**

**62E.** Um indutor toroidal com indutância de  $90,0 \text{ mH}$  engloba um volume de  $0,0200 \text{ m}^3$ . Se a densidade média de energia no toróide é  $70,0 \text{ J/m}^3$ , qual a corrente através do indutor?

**63E.** Um solenóide que possui  $85,0 \text{ cm}$  de comprimento tem uma área de seção transversal de  $17,0 \text{ cm}^2$ . Existem  $950$  voltas de fio transportando uma corrente de  $6,60 \text{ A}$ . (a) Calcule a densidade de energia do campo magnético no interior do solenóide. (b) Encontre a energia total armazenada no campo magnético no interior do solenóide (despreze efeitos de borda).

**64E.** O campo magnético no espaço interestelar da nossa galáxia possui uma intensidade de cerca de  $10^{-10} \text{ T}$ . Quanta energia é armazenada, neste campo, em um cubo com  $10$  anos-luz de aresta? (Para ter uma noção da escala, observe que a estrela mais próxima está distante de nós  $4,3$  anos-luz e que o raio da nossa galáxia é de cerca de  $8 \times 10^4$  anos-luz.)



65E. Qual deve ser a intensidade de um campo elétrico uniforme para que ele tenha a mesma densidade de energia que um campo magnético de 0,50 T possui?

66E. Uma espira circular de 50 mm de raio transporta uma corrente de 100 A. (a) Determine a intensidade do campo magnético no centro da espira. (b) Calcule a densidade de energia no centro da espira.

67P. Um pedaço de fio de cobre transporta uma corrente de 10 A, uniformemente distribuída pela sua seção transversal. Calcule a densidade de energia (a) do campo magnético e (b) do campo elétrico na superfície do fio. O diâmetro do fio é igual a 2,5 mm e a sua resistência por unidade de comprimento é de 3,3 Ω/km.

**SEÇÃO 31.12 Indução Mútua**

68E. Uma bobina 1 possui  $L_1 = 25$  mH e  $N_1 = 100$  voltas. Uma bobina 2 possui  $L_2 = 40$  mH e  $N_2 = 200$  voltas. As bobinas estão posicionadas rigidamente uma em relação à outra. Sua indutância mútua  $M$  é de 3,0 mH. Uma corrente de 6,0 mA na bobina 1 está variando a uma taxa de 4,0 A/s. (a) Que fluxo magnético  $\Phi_{12}$  enlaça a bobina 1, e qual fem auto-induzida aparece nesta bobina? (b) Qual fluxo magnético  $\Phi_{21}$  enlaça a bobina 2 e qual fem mutuamente induzida aparece na bobina 2?

69E. Duas bobinas estão em posições fixas. Quando não há corrente na bobina 1 e a corrente na bobina 2 aumenta à taxa de 15,0 A/s, a fem na bobina 1 é de 25,0 mV. (a) Qual a indutância mútua destas bobinas? (b) Quando não há corrente na bobina 2 e a bobina 1 possui uma corrente de 3,60 A, qual é o enlace de fluxo na bobina 2?

70E. Dois solenóides fazem parte da bobina indutora de centelhas de um automóvel. Quando a corrente em um solenóide cai de 6,0 A para zero em 2,5 ms, uma fem de 30 kV é induzida no outro solenóide. Qual a indutância mútua  $M$  dos solenóides?

71P. Duas bobinas, ligadas como mostrado na Fig. 31.58, possuem separadamente indutâncias  $L_1$  e  $L_2$ . A indutância mútua delas é  $M$ . (a) Mostre que esta combinação pode ser substituída por uma única bobina de indutância equivalente dada por

$$L_{eq} = L_1 + L_2 + 2M.$$

(b) Como as bobinas da Fig. 31.58 poderiam ser religadas para produzir uma indutância equivalente de

$$L_{eq} = L_1 + L_2 - 2M?$$

(Este problema é uma extensão do Problema 43, mas a exigência de que as bobinas estivessem muito distantes foi removida.)

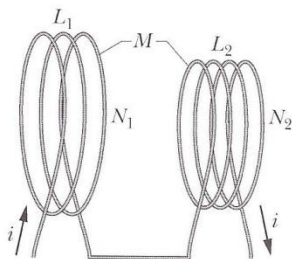


Fig. 31.58 Problema 71.

72P. Uma bobina C de  $N$  voltas é colocada ao redor de um solenóide longo S de raio  $R$  e  $n$  voltas por unidade de comprimento, como na Fig. 31.59. Mostre que a indutância mútua para a combinação bobina-solenóide é dada por  $M = \mu_0 \pi R^2 n N$ . Explique por que  $M$  não depende do formato, do tamanho ou até mesmo de uma possível falta de um enrolamento compacto da bobina.

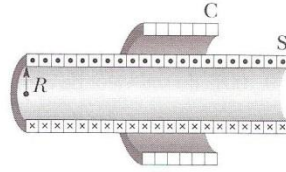


Fig. 31.59 Problema 72.

73P. A Fig. 31.60 mostra, em seção longitudinal, dois solenóides coaxiais. Mostre que a indutância mútua  $M$  para um comprimento  $l$  desta combinação solenóide-solenóide é dada por  $M = \pi R_1^2 l \mu_0 n_1 n_2$ , onde  $n_1$  e  $n_2$  são os respectivos números de voltas por unidade de comprimento e  $R_1$  é o raio do solenóide interno. Por que  $M$  depende de  $R_1$ , mas não de  $R_2$ ?

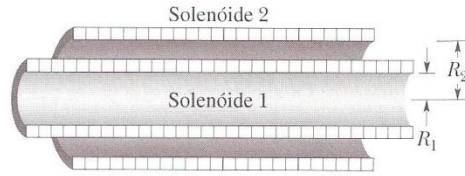


Fig. 31.60 Problema 73.

74P. A Fig. 31.61 mostra uma bobina de  $N_2$  voltas enroladas como mostrado ao redor de parte de um toróide de  $N_1$  voltas. O raio interno do toróide é  $a$ , seu raio externo é  $b$  e sua altura é  $h$ . Mostre que a indutância mútua  $M$  para a combinação toróide-bobina é

$$M = \frac{\mu_0 N_1 N_2 h}{2\pi} \ln \frac{b}{a}.$$

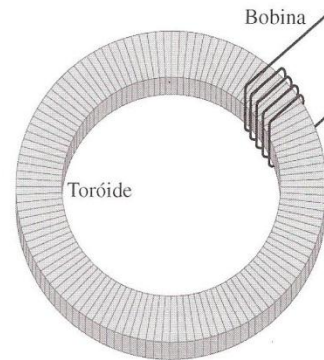


Fig. 31.61 Problema 74.

75P. Uma bobina retangular compacta de  $N$  voltas é posicionada próximo de um fio reto longo, como mostrado na Fig. 31.62. (a) Qual a indutância mútua  $M$  para a combinação bobina-fio? (b) Calcule o valor numérico de  $M$  para  $N = 100$ ,  $a = 1,0$  cm,  $b = 8,0$  cm e  $l = 30$  cm.

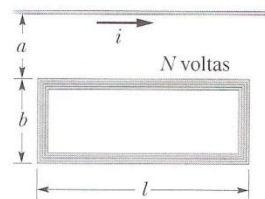


Fig. 31.62 Problema 75.

CAPÍTULO 31

**PV 1.** *b*, então *d* e *e* empatadas, e então *a* e *c* empatadas (zero) **2.** *a* e *b* empatadas, então *c* (zero) **3.** *c* e *d* empatadas, então *a* e *b* empatadas **4.** *b*, para fora; *c*, para fora; *d*, para dentro; *e*, para dentro **5.** *d* e **6.** (a) 2, 3, 1 (zero); (b) 2, 3, 1 **7.** *a* e *b* empatados, então *c* **P 1.** (a) todas empatadas (zero); (b) 2, então empate de 1 e 3 (zero) **3.** (a) para dentro; (b) anti-horário; (c) maior **5.** *c*, *a*, *b* **7.** *c*, *b*, *a* **9.** (a) maior; (b) igual; (c) igual; (d) igual (zero) **EP 1.** 1,5 mV **3.** (a) 31 mV; (b) da direita para a esquerda **5.** (a)  $1,1 \times 10^{-3} \Omega$ ; (b) 1,4 T/s **7.** 30 mA **9.** (a)  $\mu_0 i R^2 \pi r^2 / 2x^3$ ; (b)  $3\mu_0 i \pi R^2 r^2 / 2x^4$ ; (c) no mesmo sentido que o da corrente na espira maior **11.** (b) não **13.** 29,5 mC **15.** (a) 21,7 V; (b) anti-horário **17.** (b) projete de modo que  $Nab = (5/2\pi) m^2$  **19.** 5,50 kV **21.** 80  $\mu V$ , sentido horário **23.** (a) 13  $\mu Wb/m$ ; (b) 17%; (c) 0 **25.** 3,66  $\mu W$  **27.** (a) 48,1 mV; (b) 2,67 mA; (c) 0,128 mW **29.** (a) 600 mV, para cima da página; (b) 1,5 A, sentido horário; (c) 0,90 W; (d) 0,18 N; (e) na mesma taxa que a do item (c) **31.** (a) 240  $\mu V$ ; (b) 0,600 mA; (c) 0,144  $\mu W$ ; (d)  $2,88 \times 10^{-8} N$ ; (e) na mesma taxa que a do item (c) **33.** (a) 71,5  $\mu V/m$ ; (b) 143  $\mu V/m$  **37.** 0,10  $\mu Wb$  **41.** fazendo a corrente varia a 5,0 A/s **43.** (b) para que o campo magnético variável

de um não induza corrente no outro; (c)  $L_{eq} = \sum_{j=1}^N L_j$  **45.** 6,91  $\tau_L$  **47.** 46

$\Omega$  **49.** (a) 8,45 ns; (b) 7,37 mA **51.** 12,0 A/s **53.** (a)  $i_1 = i_2 = 3,33 A$ ; (b)  $i_1 = 4,55 A$ ,  $i_2 = 2,73 A$ ; (c)  $i_1 = 0$ ,  $i_2 = 1,82 A$  (invertido); (d)  $i_1 = i_2 = 0$  **55.** (a)  $i(1 - e^{-Rt/L})$  **57.** 25,6 ms **59.** (a) 97,9 H; (b) 0,196 mJ **63.** (a) 34,2 J/m<sup>3</sup>; (b) 49,4 mJ **65.**  $1,5 \times 10^8 V/m$  **67.** (a) 1,0 J/m<sup>3</sup>; (b)  $4,8 \times 10^{-15} J/m^3$  **69.** (a) 1,67 mH; (b) 6,00 mWb **71.** (b) enrolando as voltas dos solenóides em sentidos contrários **73.** o campo magnético existe apenas no interior da seção transversal do solenóide **1** **75.** (a)

$\frac{\mu_0 N I}{2\pi} \ln \left( 1 + \frac{b}{a} \right)$ ; (b) 13  $\mu H$

Cap. 31

4) -0,25 V, 0, 0,25 V;

18) (a)  $f$  da fem =  $f$  da rotação da bobina;

$$(b) \varepsilon = B\pi^2 a^2 f \cdot \text{sen}(2\pi f t);$$

22) (a)  $6 \cdot 10^{-7} V$ ; (b) antihorário;

$$24) (a) \Phi_B = \frac{\mu_0 i a}{2\pi} \ln \left( \frac{r+b/2}{r-b/2} \right); (b) \varepsilon = \frac{\mu_0 i a b v}{2\pi} \cdot \frac{1}{r^2 - (b/2)^2}$$

$$28) v_t = \frac{mgR}{B^2 l^2}$$

30) (a) 85,18 T.m<sup>2</sup>

(b) -56,78 V

35) Lembre-se que o campo elétrico no interior de um capacitor é conservativo.