$$B = \frac{\mu_0 i \phi}{4\pi R} \quad \text{(no centro de um arco de circunferência).} \qquad (29\text{-}9)$$

Força entre Correntes Paralelas Fios paralelos percorridos por correntes no mesmo sentido se atraem, e fios paralelos percorridos por correntes em sentidos opostos se repelem. O módulo da força que age sobre um segmento de comprimento L de um dos fios é dado por

$$F_{ba} = i_b L B_a \operatorname{sen} 90° = \frac{\mu_0 L i_a i_b}{2\pi d}, \qquad (29\text{-}13)$$

em que d é a distância entre os fios, e i_a e i_b são as correntes nos fios.

Lei de Ampère De acordo com a **lei de Ampère**,

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 i_{\text{env}} \quad \text{(lei de Ampère).} \qquad (29\text{-}14)$$

A integral de linha que aparece na Eq. 29-14 deve ser calculada para uma curva fechada conhecida como *amperiana*. A corrente i é a corrente *total* envolvida pela amperiana. No caso de algumas distribuições de corrente, a Eq. 29-14 é mais fácil de usar que a Eq. 29-3 para calcular o campo magnético produzido por correntes.

Campos Magnéticos de um Solenoide e de um Toroide No interior de um *solenoide* percorrido por uma corrente i, em pontos não muito próximos das extremidades, o módulo B do campo magnético é dado por

$$B = \mu_0 i n \quad \text{(solenoide ideal),} \qquad (29\text{-}23)$$

em que n é o número de espiras por unidade de comprimento. O campo interno de um solenoide, portanto, é uniforme. Do lado de fora do solenoide, o campo é praticamente nulo.

Em um ponto no interior de um *toroide*, o módulo B do campo magnético é dado por

$$B = \frac{\mu_0 i N}{2\pi} \frac{1}{r} \quad \text{(toroide),} \qquad (29\text{-}24)$$

em que r é a distância entre o ponto e o centro do toroide.

Campo de um Dipolo Magnético O campo magnético produzido por uma bobina plana percorrida por uma corrente (que se comporta como um *dipolo magnético*) em um ponto P situado no eixo da bobina, a uma distância z do centro da bobina, é paralelo ao eixo central e é dado por

$$\vec{B}(z) = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{\vec{\mu}}{z^3}, \qquad (29\text{-}27)$$

em que $\vec{\mu}$ é o momento dipolar da bobina. A Eq. 29-27 é válida apenas para valores de z muito maiores que as dimensões da bobina.

Perguntas

1 A Fig. 29-24 mostra três circuitos formados por dois segmentos radiais e dois arcos de circunferência concêntricos, um de raio r e o outro de raio $R > r$. A corrente é a mesma nos dois circuitos, e o ângulo entre os dois segmentos radiais é o mesmo. Coloque os circuitos na ordem decrescente do módulo do campo magnético no centro dos arcos (indicado na figura por um ponto).

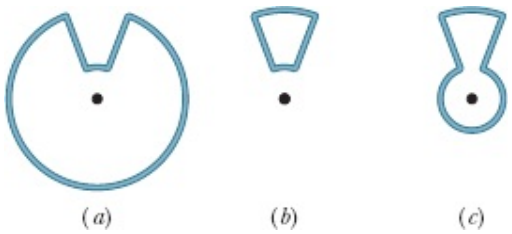


Figura 29-24 Pergunta 1.

2 A Fig. 29-25 mostra os vetores velocidade de quatro elétrons nas vizinhanças de um fio percorrido por uma corrente i. As velocidades têm módulos iguais e a velocidade $\vec{v}_2$ aponta para dentro do papel. Os elétrons 1 e 2 estão à mesma distância do fio, e o mesmo acontece com os elétrons 3 e 4. Coloque os elétrons na ordem decrescente do módulo da força magnética a que estão sujeitos devido à corrente i.

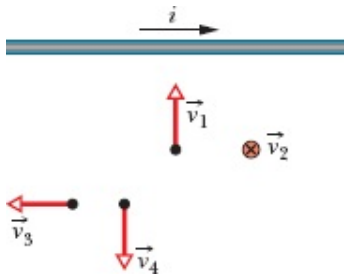


Figura 29-25 Pergunta 2.

3 A Fig. 29-26 mostra quatro arranjos nos quais fios paralelos longos conduzem correntes iguais para dentro ou para fora do papel nos vértices de quadrados iguais. Coloque os arranjos na ordem decrescente do módulo do campo magnético no centro do quadrado.

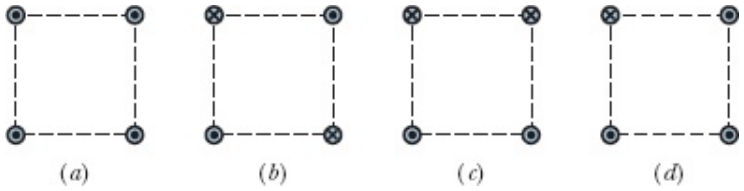


Figura 29-26 Pergunta 3.

4 A Fig. 29-27 mostra seções retas de dois fios longos, retilíneos; a corrente do fio da esquerda, i_1, é para fora do papel. Para que o campo magnético total produzido pelas duas correntes seja zero no ponto P, (a) o sentido da corrente i_2 do fio da direita deve ser para dentro ou para fora do papel? (b) O valor absoluto da corrente i_2 deve ser maior, menor ou igual ao valor absoluto de i_1?



Figura 29-27 Pergunta 4.

5 A Fig. 29-28 mostra três circuitos formados por segmentos retilíneos e arcos de circunferência concêntricos (semicircunferências ou quartos de circunferência de raio r, $2r$ ou $3r$). A corrente é a mesma nos três circuitos. Coloque os circuitos na ordem decrescente do módulo do campo magnético no centro dos arcos (indicado na figura por um ponto).

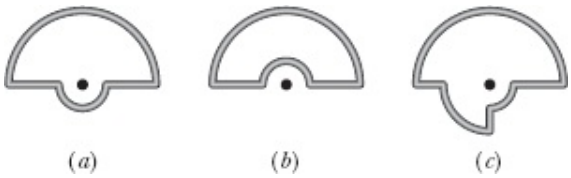


Figura 29-28 Pergunta 5.

6 A Fig. 29-29 mostra, em função da distância radial r, o módulo B do campo magnético do lado de dentro e do lado de fora de quatro fios (a, b, c, d), cada um dos quais conduz uma corrente uniformemente distribuída ao longo da seção reta. Os trechos em que os gráficos correspondentes a dois dos fios se superpõem estão indicados por duas letras. Coloque os fios na ordem decrescente (a) do raio, (b) do módulo do campo magnético na superfície e (c) da corrente. (d) O módulo da densidade de corrente do fio a é maior, menor ou igual ao do fio c?

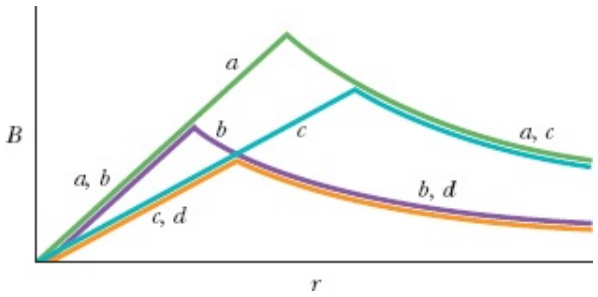


Figura 29-29 Pergunta 6.

7 A Fig. 29-30 mostra quatro amperianas circulares (a, b, c, d) concêntricas com um fio cuja corrente é dirigida para fora do papel. A corrente é uniforme ao longo da seção reta do fio (região sombreada). Coloque as amperianas na ordem decrescente do valor absoluto de $\oint \vec{B} \cdot d\vec{s}$ ao longo da curva.

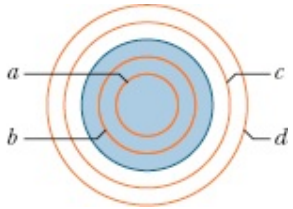


Figura 29-30 Pergunta 7.

8 A Fig. 29-31 mostra quatro arranjos nos quais fios longos, paralelos, igualmente espaçados, conduzem correntes iguais para dentro e para fora do papel. Coloque os arranjos na ordem decrescente do módulo da força a que está submetido o fio central.

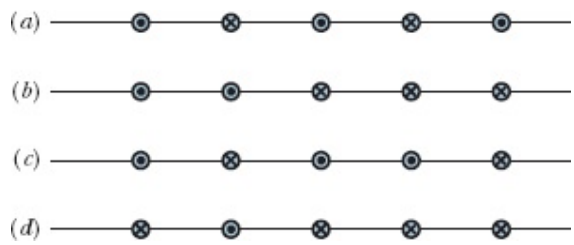


Figura 29-31 Pergunta 8.

9 A Fig. 29-32 mostra quatro amperianas circulares (*a*, *b*, *c*, *d*) e, em seção reta, quatro condutores circulares longos (regiões sombreadas), todos concêntricos. Três dos condutores são cilindros ocos; o condutor central é um cilindro maciço. As correntes nos condutores são, do raio menor para o maior, 4 A para fora do papel, 9 A para dentro do papel, 5 A para fora do papel e 3 A para dentro do papel. Coloque as amperianas na ordem decrescente do valor absoluto de $\oint \vec{B} \cdot d\vec{s}$.

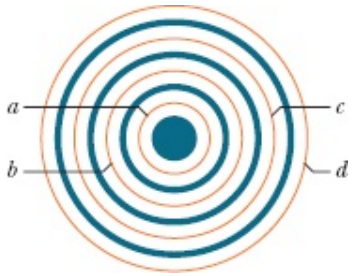


Figura 29-32 Pergunta 9.

10 A Fig. 29-33 mostra quatro correntes iguais *i* e cinco amperianas (*a*, *b*, *c*, *d*, *e*) envolvendo essas correntes. Coloque as amperianas na ordem do valor de $\oint \vec{B} \cdot d\vec{s}$ nos sentidos indicados, começando pelo maior valor positivo.

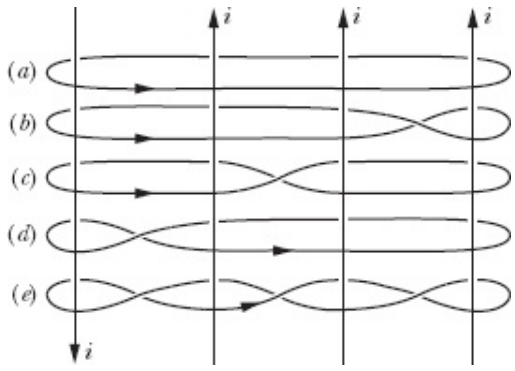


Figura 29-33 Pergunta 10.

11 A Fig. 29-34 mostra três arranjos de três fios longos, retilíneos, conduzindo correntes iguais para

dentro e para fora do papel. (a) Coloque os arranjos na ordem decrescente do módulo da força magnética a que está submetido o fio *A*. (b) No arranjo 3, o ângulo entre a força a que está submetido o fio *A* e a reta tracejada é igual, maior ou menor que 45°?

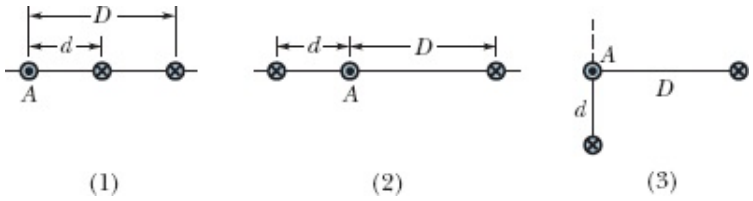


Figura 29-34 Pergunta 11.

Problemas

. - ... O número de pontos indica o grau de dificuldade do problema.

Informações adicionais disponíveis em *O Circo Voador da Física* de Jearl Walker, LTC, Rio de Janeiro, 2008.

Módulo 29-1 O Campo Magnético Produzido por uma Corrente

·1 Um topógrafo está usando uma bússola magnética 6,1 m abaixo de uma linha de transmissão que conduz uma corrente constante de 100 A. (a) Qual é o campo magnético produzido pela linha de transmissão na posição da bússola? (b) Esse campo tem uma influência significativa na leitura da bússola? A componente horizontal do campo magnético da Terra no local é 20 μT.

·2 A Fig. 29-35*a* mostra um elemento de comprimento ds = 1,00 μm em um fio retilíneo muito longo percorrido por uma corrente. A corrente no elemento cria um campo magnético elementar $d\vec{B}$ no espaço em volta. A Fig. 29-35*b* mostra o módulo dB do campo para pontos situados a 2,5 cm de distância do elemento em função do ângulo θ entre o fio e uma reta que liga o elemento ao ponto. A escala vertical é definida por dB_s = 60,0 pT. Qual é o módulo do campo magnético produzido pelo fio inteiro em um ponto situado a 2,5 cm de distância do fio?

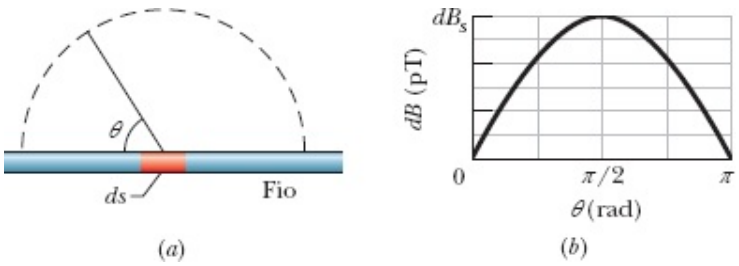


Figura 29-35 Problema 2.

·3 Em certo local das Filipinas, o campo magnético da Terra tem um módulo de 39 μT, é horizontal e

aponta exatamente para o norte. Suponha que o campo total é zero 8,0 cm acima de um fio longo, retilíneo, horizontal, que conduz uma corrente constante. Determine (a) o módulo da corrente e (b) a orientação da corrente.

·4 Um condutor retilíneo percorrido por uma corrente $i = 5{,}0$ A se divide em dois arcos semicirculares, como mostra a Fig. 29-36. Qual é o campo magnético no centro C da espira circular resultante?

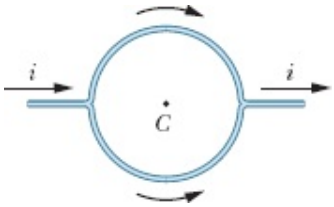


Figura 29-36 Problema 4.

·5 Na Fig. 29-37, uma corrente $i = 10$ A circula em um condutor longo formado por dois trechos retilíneos e uma semicircunferência de raio $R = 5{,}0$ mm e centro no ponto a. O ponto b fica a meio caminho entre os trechos retilíneos e tão afastado da semicircunferência que os dois trechos retos podem ser considerados fios infinitos. Determine (a) o módulo e (b) o sentido (para dentro ou para fora do papel) do campo magnético no ponto a. Determine também (c) o módulo e (d) o sentido do campo magnético no ponto b.



Figura 29-37 Problema 5.

·6 Na Fig. 29-38, o ponto P está a uma distância perpendicular $R = 2{,}00$ cm de um fio retilíneo muito longo que conduz uma corrente. O campo magnético $\vec{B}$ no ponto P é a soma das contribuições de elementos de corrente $i\,\vec{ds}$ ao longo de todo o fio. Determine a distância s entre o ponto P e o elemento (a) que mais contribui para o campo $\vec{B}$ e (b) responsável por 10% da maior contribuição.

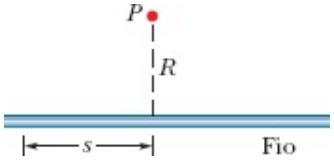


Figura 29-38 Problema 6.

·7 Na Fig. 29-39, dois arcos de circunferência têm raios $a = 13{,}5$ cm e $b = 10{,}7$ cm, subtendem um ângulo $\theta = 74{,}0^{\circ}$, conduzem uma corrente $i = 0{,}411$ A e têm o mesmo centro de curvatura P. Determine (a) o módulo e (b) o sentido (para dentro ou para fora do papel) do campo magnético no ponto P.

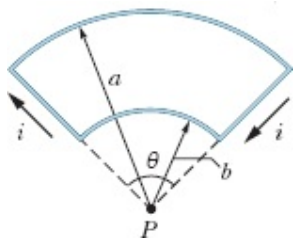


Figura 29-39 Problema 7.

·8 Na Fig. 29-40, dois arcos de circunferência têm raios $R_2 = 7{,}80$ cm e $R_1 = 3{,}15$ cm, subtendem um ângulo $\theta = 180^o$, conduzem uma corrente $i = 0{,}281$ A e têm o mesmo centro de curvatura C. Determine (a) o módulo e (b) o sentido (para dentro ou para fora do papel) do campo magnético no ponto C.

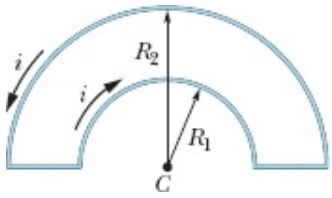


Figura 29-40 Problema 8.

·9 Dois fios retilíneos, longos, são paralelos e estão separados por uma distância de 8,0 cm. As correntes nos fios são iguais, e o campo magnético em um ponto situado exatamente a meio caminho entre os dois fios tem um módulo de 300 μT. (a) As correntes têm o mesmo sentido ou sentidos opostos? (b) Qual é o valor das correntes?

·10 Na Fig. 29-41, um fio é formado por uma semicircunferência de raio $R = 9{,}26$ cm e dois segmentos retilíneos (radiais) de comprimento $L = 13{,}1$ cm cada um. A corrente no fio é $i = 34{,}8$ mA. Determine (a) o módulo e (b) o sentido (para dentro ou para fora do papel) do campo magnético no centro de curvatura C da semicircunferência.

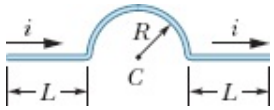


Figura 29-41 Problema 10.

·11 Na Fig. 29-42, dois fios retilíneos, longos, são perpendiculares ao plano do papel e estão separados por uma distância $d_1 = 0{,}75$ cm. O fio 1 conduz uma corrente de 6,5 A para dentro do papel. Determine (a) o módulo e (b) o sentido (para dentro ou para fora do papel) da corrente no fio 2 para que o campo magnético seja zero no ponto P, situado a uma distância $d_2 = 1{,}50$ cm do fio 2.

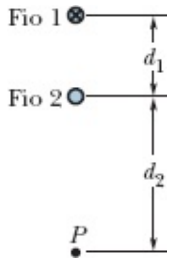


Figura 29-42 Problema 11.

·12 Na Fig. 29-43, dois fios retilíneos, longos, separados por uma distância d = 16,0 cm, conduzem correntes i_1 = 3,61 mA e $i_2 = 3{,}00i_1$ dirigidas para fora do papel. (a) Em que ponto do eixo x o campo magnético total é zero? (b) Se as duas correntes são multiplicadas por dois, o ponto em que o campo magnético é zero se aproxima do fio 1, se aproxima do fio 2 ou permanece onde está?

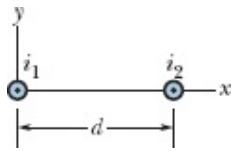


Figura 29-43 Problema 12.

··13 Na Fig. 29-44, o ponto P_1 está a uma distância R = 13,1 cm do ponto médio de um fio retilíneo de comprimento L = 18,0 cm que conduz uma corrente i = 58,2 mA. (Note que o fio *não é* longo.) Qual é o módulo do campo magnético no ponto P_1?

··14 A Eq. 29-4 fornece o módulo B do campo magnético criado por um fio retilíneo *infinitamente longo* em um ponto P situado a uma distância R do fio. Suponha que o ponto P esteja, na verdade, a uma distância R do ponto médio de um fio de comprimento *finito* L. Nesse caso, o uso da Eq. 29-4 para calcular B envolve um certo erro percentual. Qual deve ser a razão L/R para que o erro percentual seja 1,00%? Em outras palavras, para qual valor de L/R a igualdade

$$\frac{(B \text{ da Eq. } 29\text{-}4) - (B \text{ real})}{(B \text{ real})}(100\%) = 1{,}00\%$$

é satisfeita?

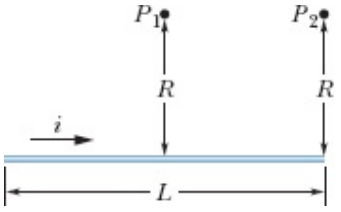


Figura 29-44 Problemas 13 e 17.

··15 A Fig. 29-45 mostra dois fios. O fio de baixo conduz uma corrente i_1 = 0,40 A e inclui um arco de circunferência com 5,0 cm de raio e centro no ponto P, que subtende um ângulo de 180°. O fio de cima

conduz uma corrente $i_2 = 2i_1$ e inclui um arco de circunferência com 4,0 cm de raio e centro também no ponto P, que subtende um ângulo de 120°. Determine (a) o módulo e (b) a orientação do campo magnético $\vec{B}$ para os sentidos das correntes que estão indicados na figura. Determine também (c) o módulo e (d) a direção de $\vec{B}$ se o sentido da corrente i_1 for invertido.

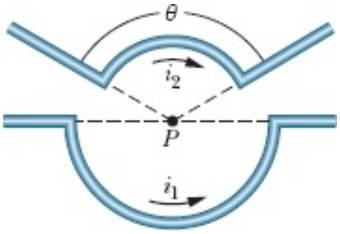


Figura 29-45 Problema 15.

··16 Na Fig. 29-46, duas espiras circulares, concêntricas, que conduzem correntes no mesmo sentido, estão no mesmo plano. A espira 1 tem 1,50 cm de raio e conduz uma corrente de 4,00 mA. A espira 2 tem 2,50 cm de raio e conduz uma corrente de 6,00 mA. O campo magnético $\vec{B}$ no centro comum das duas espiras é medido enquanto se faz girar a espira 2 em torno de um diâmetro. Qual deve ser o ângulo de rotação da espira 2 para que o módulo do campo $\vec{B}$ seja 100 nT?



Figura 29-46 Problema 16.

··17 Na Fig. 29-44, o ponto P_2 está a uma distância perpendicular R = 25,1 cm de uma das extremidades de um fio retilíneo de comprimento L = 13,6 cm que conduz uma corrente i = 0,693 A. (Note que o fio *não é longo*.) Qual é o módulo do campo magnético no ponto P_2?

··18 Uma corrente é estabelecida em uma espira constituída por uma semicircunferência de 4,00 cm de raio, uma semicircunferência concêntrica de raio menor e dois segmentos retilíneos radiais, todos no mesmo plano. A Fig. 29-47*a* mostra o arranjo, mas não está desenhada em escala. O módulo do campo magnético produzido no centro de curvatura é 47,25 μT. Quando a semicircunferência menor sofre uma rotação de 180° (Fig. 29-47*b*), o módulo do campo magnético produzido no centro de curvatura diminui para 15,75 μT e o sentido do campo se inverte. Qual é o raio da semicircunferência menor?



Figura 29-47 Problema 18.

··19 Um fio longo está no eixo x e conduz uma corrente de 30 A no sentido positivo do eixo. Um

segundo fio longo é perpendicular ao plano *xy*, passa pelo ponto (0; 4,0 m; 0) e conduz uma corrente de 40 A no sentido positivo do eixo *z*. Determine o módulo do campo magnético produzido pelos fios no ponto (0; 2,0 m; 0).

··20 Na Fig. 29-48, parte de um fio longo, isolado, que conduz uma corrente i = 5,78 mA é encurvada para formar uma espira circular de raio R = 1,89 cm. Determine o campo magnético C no centro da espira, na notação dos vetores unitários, (a) se a espira estiver no plano do papel e (b) se o plano da espira for perpendicular ao plano do papel, depois de a espira sofrer uma rotação de 90° no sentido anti-horário, como mostra a figura.

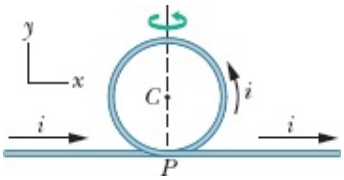


Figura 29-48 Problema 20.

··21 A Fig. 29-49 mostra, em seção reta, dois fios retilíneos muito longos, ambos percorridos por uma corrente de 4,00 A orientada para fora do papel. A distância entre os fios é d_1 = 6,00 m e a distância entre o ponto P, equidistante dos dois fios, e o ponto médio do segmento de reta que liga os dois fios é d_2 = 4,00 m. Determine o módulo do campo magnético total produzido no ponto P pelos dois fios.

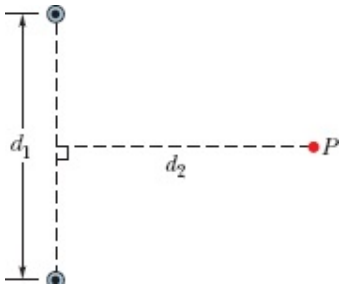


Figura 29-49 Problema 21.

··22 A Fig. 29-50*a* mostra, em seção reta, dois fios longos e paralelos, percorridos por correntes e separados por uma distância L. A razão i_1/i_2 entre as correntes é 4,00; o sentido das correntes não é conhecido. A Fig. 29-50*b* mostra a componente B_y do campo magnético em função da posição no eixo x à direita do fio 2. A escala vertical é definida por B_{ys} = 4,0 nT e a escala horizontal é definida por x_s = 20,0 cm. (a) Para qual valor de $x > 0$ a componente B_y é máxima? (b) Se i_2 = 3 mA, qual é o valor máximo de B_y? Determine o sentido (para dentro ou para fora do papel) (c) de i_1 e (d) de i_2.

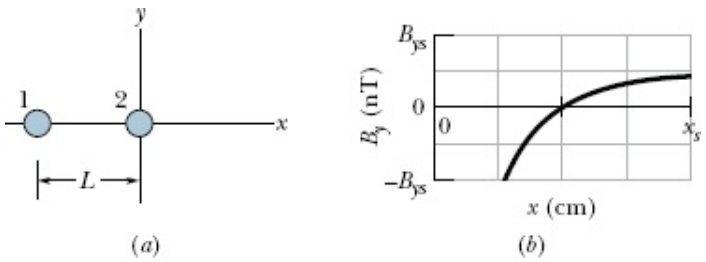


Figura 29-50 Problema 22.

··23 A Fig. 29-51 mostra um próton que se move com velocidade $\vec{v}$ = (−200 m/s) $\hat{j}$ em direção a um fio longo, retilíneo, que conduz uma corrente i = 350 mA. No instante mostrado, a distância entre o próton e o fio é d = 2,89 cm. Na notação dos vetores unitários, qual é a força magnética a que o próton está submetido?

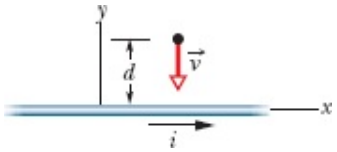


Figura 29-51 Problema 23.

··24 A Fig. 29-52 mostra, em seção reta, quatro fios finos paralelos, retilíneos e muito compridos, que conduzem correntes iguais nos sentidos indicados. Inicialmente, os quatro fios estão a uma distância d = 15,0 cm da origem do sistema de coordenadas, onde criam um campo magnético total $\vec{B}$. (a) Para qual valor de x o fio 1 deve ser deslocado ao longo do eixo x para que o campo $\vec{B}$ sofra uma rotação de 30° no sentido anti-horário? (b) Com o fio 1 na nova posição, para qual valor de x o fio 3 deve ser deslocado ao longo do eixo x para que o campo $\vec{B}$ volte à orientação inicial?

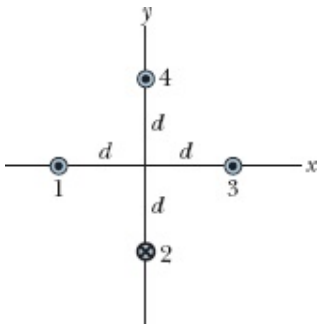


Figura 29-52 Problema 24.

··25 A Fig. 29-53 mostra um fio que conduz uma corrente i = 3,00 A. Dois trechos retilíneos semi-infinitos, ambos tangentes à mesma circunferência, são ligados por um arco de circunferência que possui um ângulo central θ e coincide com parte da circunferência. O arco e os dois trechos retilíneos estão no mesmo plano. Se B = 0 no centro da circunferência, qual é o valor de θ?



Figura 29-53 Problema 25.

··26 Na Fig. 29-54*a*, o fio 1 é formado por um arco de circunferência e dois segmentos radiais e conduz uma corrente i_1 = 0,50 A no sentido indicado. O fio 2, mostrado em seção reta, é longo, retilíneo e perpendicular ao plano do papel. A distância entre o fio 2 e o centro do arco é igual ao raio R do arco, e o fio conduz uma corrente i_2 que pode ser ajustada. As duas correntes criam um campo magnético total $\vec{B}$ no centro do arco. A Fig. 29-54*b* mostra o quadrado do módulo do campo, B^2, em função do quadrado da corrente, i^2_2. Qual é o ângulo subtendido pelo arco?

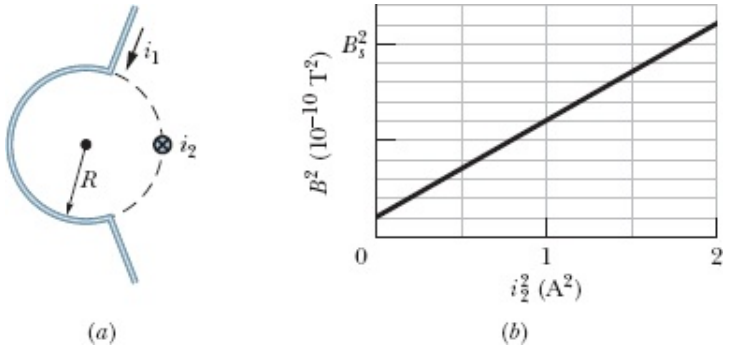


Figura 29-54 Problema 26.

··27 Na Fig. 29-55, dois fios longos, retilíneos (mostrados em seção reta), conduzem correntes i_1 = 30,0 mA e i_2 = 40,0 mA dirigidas para fora do papel. Os fios estão à mesma distância da origem, onde criam um campo magnético $\vec{B}$. Qual deve ser o novo valor de i_1 para que $\vec{B}$ sofra uma rotação de 20,0° no sentido horário?

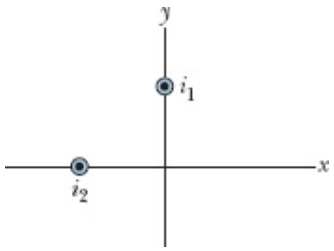


Figura 29-55 Problema 27.

··28 A Fig. 29-56*a* mostra dois fios. O fio 1 é formado por um arco de circunferência de raio R e dois segmentos radiais e conduz uma corrente i_1 = 2,0 A no sentido indicado. O fio 2 é longo e retilíneo, conduz uma corrente i_2 que pode ser ajustada e está a uma distância $R/2$ do centro do arco. O campo magnético $\vec{B}$ produzido pelas duas correntes é medido no centro de curvatura do arco. A Fig. 29-56*b* mostra a componente de $\vec{B}$ na direção perpendicular ao plano do papel em função da corrente i_2. A escala horizontal é definida por i_{2s} = 1,00 A. Determine o ângulo subtendido pelo arco.

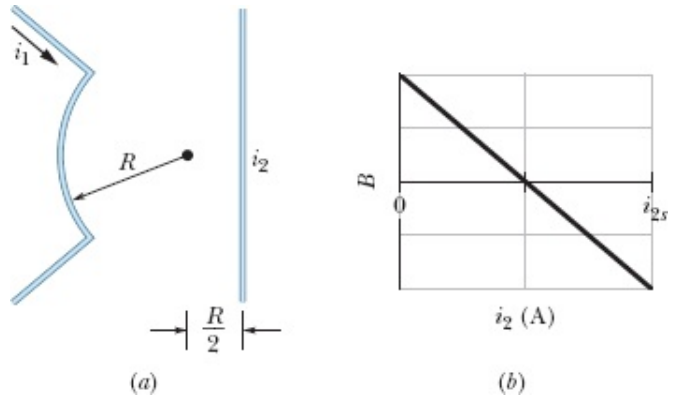


Figura 29-56 Problema 28.

··29 Na Fig. 29-57, quatro fios longos, retilíneos, são perpendiculares ao papel, e suas seções retas formam um quadrado de lado a = 20 cm. As correntes são para fora do papel nos fios 1 e 4 e para dentro do papel nos fios 2 e 3, e todos os fios conduzem uma corrente de 20 A. Na notação dos vetores unitários, qual é o campo magnético no centro do quadrado?

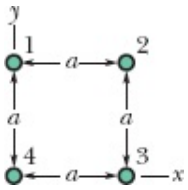


Figura 29-57 Problemas 29, 37 e 40.

···30 Dois fios longos retilíneos percorridos por uma corrente estão apoiados na superfície de um cilindro longo, de plástico, de raio R = 20,0 cm, paralelamente ao eixo do cilindro. A Fig. 29-58*a* mostra, em seção reta, o cilindro e o fio 1, mas não o fio 2. Com o fio 2 mantido fixo no lugar, o fio 1 é deslocado sobre o cilindro, do ângulo $\theta_1 = 0^o$ até o ângulo $\theta_1 = 180^o$, passando pelo primeiro e segundo quadrantes do sistema de coordenadas xy, e o campo magnético $\vec{B}$ no centro do cilindro é medido em função de θ_1. A Fig. 29-58*b* mostra a componente B_x de $\vec{B}$ em função de θ_1 (a escala vertical é definida por B_{xs} = 6,0 μT) e a Fig. 29-58*c* mostra a componente B_y em função de θ_1 (a escala vertical é definida por B_{ys} = 4,0 μT). (a) Qual é o ângulo θ_2 que define a posição do fio 2? Determine (b) o valor absoluto e (c) o sentido (para dentro ou para fora do papel) da corrente no fio 1. Determine também (d) o valor absoluto e (e) o sentido da corrente no fio 2.

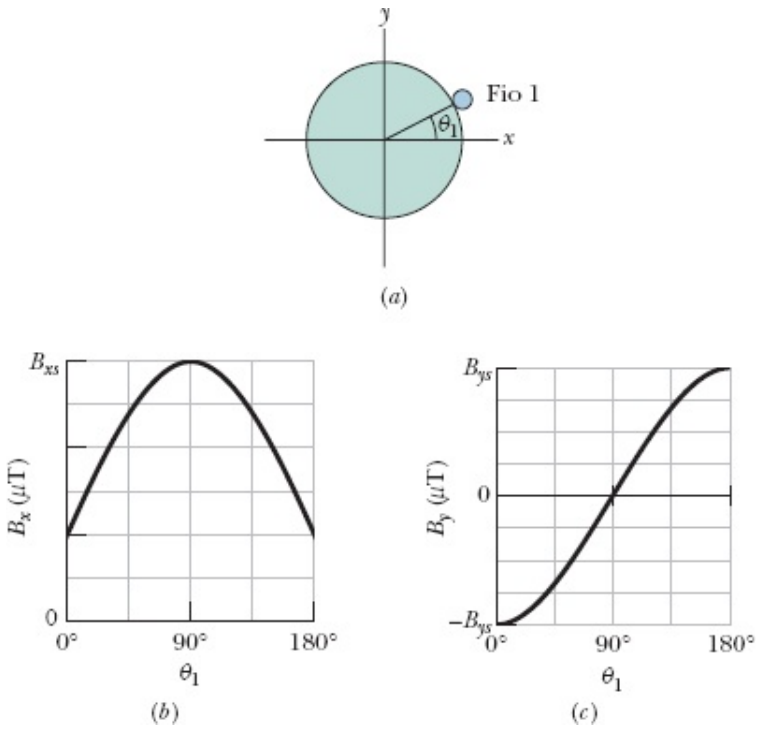


Figura 29-58 Problema 30.

···31 Na Fig. 29-59, a = 4,7 cm e i = 13 A. Determine (a) o módulo e (b) o sentido (para dentro ou para fora do papel) do campo magnético no ponto P.

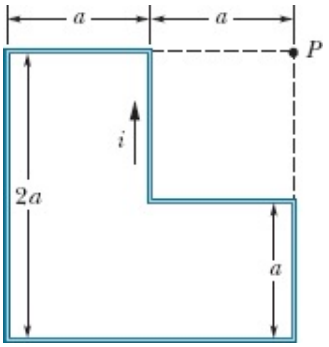


Figura 29-59 Problema 31.

···32 A espira percorrida por corrente da Fig. 29-60*a* é constituída por uma semicircunferência com 10,0 cm de raio, uma semicircunferência menor com o mesmo centro e dois segmentos radiais, todos no mesmo plano. A semicircunferência menor sofre uma rotação de um ângulo θ para fora do plano (veja a Fig. 29-60*b*). A Fig. 29-60*c* mostra o módulo do campo magnético no centro de curvatura em função do ângulo θ. A escala vertical é definida por B_a = 10,0 μT e B_b = 12,0 μT. Qual é o raio do semicírculo menor?

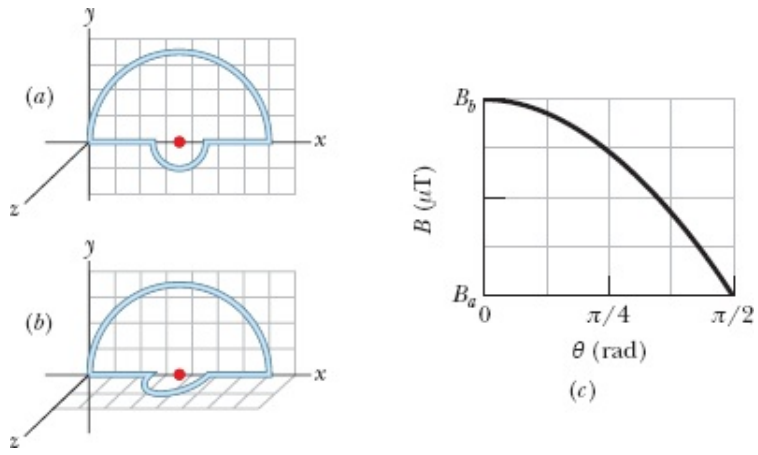


Figura 29-60 Problema 32.

···33 A Fig. 29-61 mostra a seção reta de uma fita longa e fina, de largura w = 4,91 cm, que está conduzindo uma corrente uniformemente distribuída i = 4,61 μA para dentro do papel. Na notação dos vetores unitários, qual é o campo magnético $\vec{B}$ em um ponto P no plano da fita situado a uma distância d = 2,16 cm de uma das bordas? (*Sugestão*: Imagine a fita como um conjunto formado por um número muito grande de fios finos paralelos.)

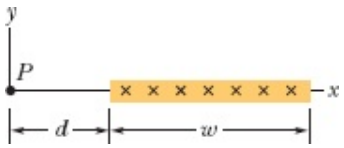


Figura 29-61 Problema 33.

···34 A Fig. 29-62 mostra, em seção reta, dois fios retilíneos, longos, apoiados na superfície de um cilindro de plástico com 20,0 cm de raio e paralelos ao eixo do cilindro. O fio 1 conduz uma corrente i_1 = 60,0 mA para fora do papel e é mantido fixo no lugar, do lado esquerdo do cilindro. O fio 2 conduz uma corrente i_2 = 40,0 mA para fora do papel e pode ser deslocado em torno do cilindro. Qual deve ser o ângulo (positivo) θ_2 do fio 2 para que, na origem, o módulo do campo magnético total seja 80,0 nT?

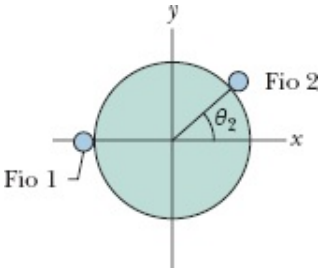


Figura 29-62 Problema 34.

Módulo 29-2 Forças entre Duas Correntes Paralelas

·35 A Fig. 29-63 mostra o fio 1 em seção reta; o fio é longo e retilíneo, conduz uma corrente de 4,00 mA para fora do papel e está a uma distância d_1 = 2,40 cm de uma superfície. O fio 2, que é paralelo ao

fio 1 e também longo, está na superfície a uma distância horizontal d_2 = 5,00 cm do fio 1 e conduz uma corrente de 6,80 mA para dentro do papel. Qual é a componente x da força magnética *por unidade de comprimento* que age sobre o fio 2?

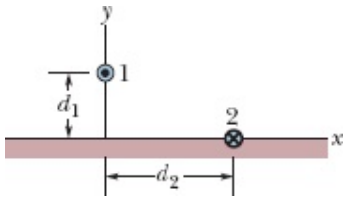


Figura 29-63 Problema 35.

··36 Na Fig. 29-64, cinco fios longos, paralelos no plano xy, estão separados por uma distância d = 8,00 cm, têm 10,0 m de comprimento e conduzem correntes iguais de 3,00 A para fora do papel. Determine, na notação dos vetores unitários, a força magnética a que está submetido (a) o fio 1, (b) o fio 2, (c) o fio 3, (d) o fio 4 e (e) o fio 5.

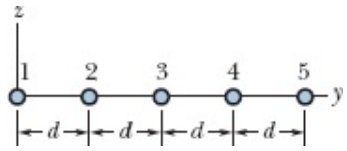


Figura 29-64 Problemas 36 e 39.

··37 Na Fig. 29-57, quatro fios longos, retilíneos, são perpendiculares ao papel, e suas seções retas formam um quadrado de lado a = 13,5 cm. Todos os fios conduzem correntes de 7,50 A, e as correntes são para fora do papel, nos fios 1 e 4, e para dentro do papel, nos fios 2 e 3. Na notação dos vetores unitários, qual é a força magnética *por metro de fio* que age sobre o fio 4?

··38 A Fig. 29-65*a* mostra, em seção reta, três fios percorridos por corrente que são longos, retilíneos e paralelos. Os fios 1 e 2 são mantidos fixos no eixo x, separados por uma distância d. O fio 1 conduz uma corrente de 0,750 A, mas o sentido da corrente é desconhecido. O fio 3, com uma corrente de 0,250 para fora do papel, pode ser deslocado ao longo do eixo x, o que modifica a força $\vec{F}_2$ a que está sujeito o fio 2. A componente y dessa força é F_{2y} e o seu valor por unidade de comprimento do fio 2 é F_{2y}/L_2. A Fig. 29-65*b* mostra o valor de F_{2y}/L_2 em função da coordenada x do fio 3. O gráfico possui uma assíntota F_{2y}/L_2 = −0,627 μN/m para $x \rightarrow \infty$. A escala horizontal é definida por x_s = 12,0 cm. Determine (a) o valor e (b) o sentido (para dentro ou para fora do papel) da corrente no fio 2.

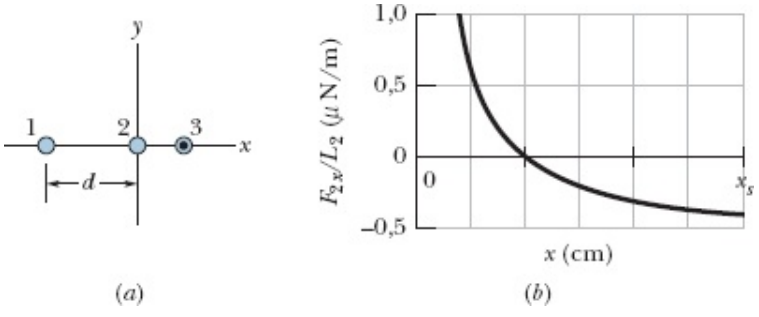


Figura 29-65 Problema 38.

··39 Na Fig. 29-64, cinco fios paralelos, longos, no plano *xy*, estão separados por uma distância d = 50,0 cm. As correntes para dentro do papel são i_1 = 2,00 A, i_3 = 0,250 A, i_4 = 4,00 A e i_5 = 2,00 A; a corrente para fora do papel é i_2 = 4,00 A. Qual é o módulo da força *por unidade de comprimento* que age sobre o fio 3?

··40 Na Fig. 29-57, quatro fios longos, retilíneos, são perpendiculares ao papel, e suas seções retas formam um quadrado de lado a = 8,50 cm. Todos os fios conduzem correntes de 15,0 A para fora do papel. Em termos dos vetores unitários, qual é a força magnética *por metro de fio* que age sobre o fio 1?

···41 Na Fig. 29-66, um fio longo, retilíneo, conduz uma corrente i_1 = 30,0 A, e uma espira retangular conduz uma corrente i_2 = 20,0 A. Suponha que a = 1,00 cm, b = 8,00 cm e L = 30,0 cm. Na notação dos vetores unitários, qual é a força a que está submetida a espira?

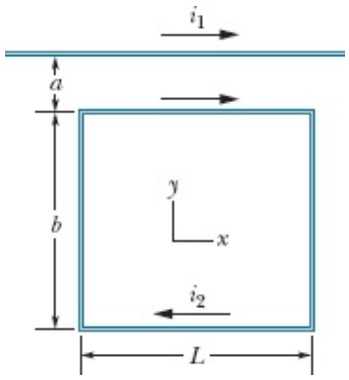


Figura 29-66 Problema 41.

Módulo 29-3 Lei de Ampère

·42 Em uma região existe uma densidade de corrente uniforme de 15 A/m^2 no sentido positivo do eixo z. Determine o valor de $\oint \vec{B} \cdot d\vec{s}$ se a integral de linha for calculada para o percurso fechado formado por três segmentos de reta, de (4d, 0, 0) para (4d, 3d, 0), de (4d, 3d, 0) para (0, 0, 0) e de (0, 0, 0) para (4d, 0, 0), com d = 20 cm.

·43 A Fig. 29-67 mostra a seção reta de um fio cilíndrico, longo, de raio a = 2,00 cm, que conduz uma corrente uniforme de 170 A. Determine o módulo do campo magnético produzido pela corrente a uma distância do eixo do fio igual a (a) 0, (b) 1,00 cm, (c) 2,00 cm (superfície do fio) e (d) 4,00 cm.

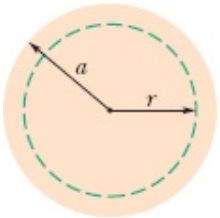


Figura 29-67 Problema 43.

·44 A Fig. 29-68 mostra duas curvas fechadas envolvendo duas espiras que conduzem correntes i_1 = 5,0 A e i_2 = 3,0 A. Determine o valor da integral $\oint \vec{B} \cdot d\vec{s}$ (a) para a curva 1 e (b) para a curva 2.

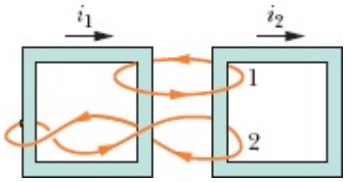


Figura 29-68 Problema 44.

·45 Os oito fios da Fig. 29-69 conduzem correntes iguais de 2,0 A para dentro ou para fora do papel. Duas curvas estão indicadas para a integral de linha $\oint \vec{B} \cdot d\vec{s}$. Determine o valor da integral (a) para a curva 1 e (b) para a curva 2.

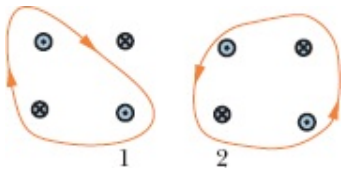


Figura 29-69 Problema 45.

·46 Oito fios são perpendiculares ao plano do papel nos pontos indicados na Fig. 29-70. O fio k (k = 1, 2, ..., 8) conduz uma corrente ki, em que i = 4,50 mA. Para os fios com k ímpar, a corrente é para fora do papel; para os fios com k par, a corrente é para dentro do papel. Determine o valor de $\oint \vec{B} \cdot d\vec{s}$ para a curva fechada mostrada na figura, no sentido indicado.

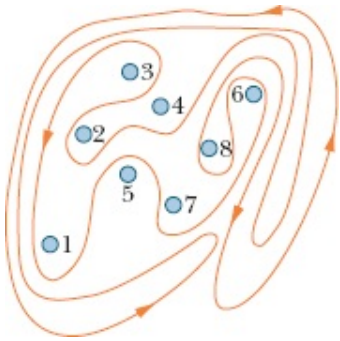


Figura 29-70 Problema 46.

··47 A densidade de corrente $\vec{J}$ no interior de um fio cilíndrico, longo, de raio a = 3,1 mm, é paralela ao eixo central, e o módulo varia linearmente com a distância radial r de acordo com a equação $J = J_0 r/a$, em que J_0 = 310 A/m^2. Determine o módulo do campo magnético (a) para r = 0, (b) para $r = a/2$ e (c) para $r = a$.

··48 Na Fig. 29-71, um cano longo, circular, de raio externo R = 2,6 cm, conduz uma corrente (uniformemente distribuída) i = 8,00 mA para dentro do papel. Existe um fio paralelo ao cano a uma distância de 3,00R do eixo do cano. Determine (a) o valor e (b) o sentido (para dentro ou para fora do

papel) da corrente no fio para que o campo magnético no ponto *P* tenha o mesmo módulo que o campo magnético no eixo do cano e o sentido oposto.

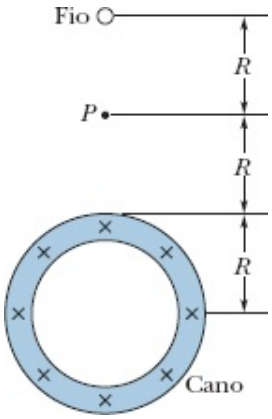


Figura 29-71 Problema 48.

Módulo 29-4 Solenoides e Toroides

·49 Um toroide de seção reta quadrada, com 5,00 cm de lado e raio interno de 15,0 cm, tem 500 espiras e conduz uma corrente de 0,800 A. (O toroide é feito a partir de um solenoide quadrado, em vez de redondo, como o da Fig. 29-17.) Determine o campo magnético no interior do toroide (a) a uma distância do centro igual ao raio interno e (b) a uma distância do centro igual ao raio externo.

·50 Um solenoide com 95,0 cm de comprimento tem um raio de 2,00 cm e 1200 espiras; a corrente é de 3,60 A. Calcule o módulo do campo magnético no interior do solenoide.

·51 Um solenoide de 200 espiras com 25 cm de comprimento e 10 cm de diâmetro conduz uma corrente de 0,29 A. Calcule o módulo do campo magnético $\vec{B}$ no interior do solenoide.

·52 Um solenoide com 1,30 m de comprimento e 2,60 cm de diâmetro conduz uma corrente de 18,0 A. O campo magnético no interior do solenoide é de 23,0 mT. Determine o comprimento do fio de que é feito o solenoide.

··53 Um solenoide longo tem 100 espiras/cm e conduz uma corrente *i*. Um elétron se move no interior do solenoide em uma circunferência de 2,30 cm de raio perpendicular ao eixo do solenoide. A velocidade do elétron é 0,0460*c* (*c* é a velocidade da luz). Determine a corrente *i* no solenoide.

··54 Um elétron é introduzido em uma das extremidades de um solenoide ideal com uma velocidade de 800 m/s que faz um ângulo de 30° com o eixo central do solenoide. O solenoide tem 8000 espiras e conduz uma corrente de 4,0 A. Quantas revoluções o elétron descreve no interior do solenoide antes de chegar à outra extremidade? (Em um solenoide real, no qual o campo não é uniforme perto das extremidades, o número de revoluções é ligeiramente menor que o valor calculado neste problema.)

··55 Um solenoide longo com 10,0 espiras/cm e um raio de 7,00 cm conduz uma corrente de 20,0 mA. Um condutor retilíneo situado no eixo central do solenoide conduz uma corrente de 6,00 A. (a) A que distância do eixo do solenoide a direção do campo magnético resultante faz um ângulo de 45° com a

direção do eixo? (b) Qual é o módulo do campo magnético a essa distância do eixo?

Módulo 29-5 Relação entre uma Bobina Plana e um Dipolo Magnético

·56 A Fig. 29-72 mostra um dispositivo conhecido como bobina de Helmholtz, formado por duas bobinas circulares coaxiais, de raio $R = 25{,}0$ cm, com 200 espiras, separadas por uma distância $s = R$. As duas bobinas conduzem correntes iguais $i = 12{,}2$ mA no mesmo sentido. Determine o módulo do campo magnético no ponto P, situado no eixo das bobinas, a meio caminho entre elas.

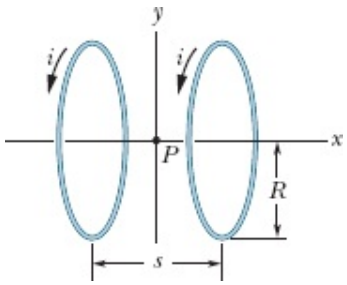


Figura 29-72 Problema 56.

·57 Um estudante fabrica um pequeno eletroímã enrolando 300 espiras de fio em um cilindro de madeira com um diâmetro $d = 5{,}0$ cm. A bobina é ligada a uma bateria que produz uma corrente de 4,0 A no fio. (a) Qual é o módulo do momento dipolar magnético do eletroímã? (b) A que distância axial $z >> d$ o campo magnético do eletroímã tem um módulo de 5,0 μT (aproximadamente um décimo do campo magnético da Terra)?

·58 A Fig. 29-73*a* mostra um fio que conduz uma corrente i e forma uma bobina circular com uma espira. Na Fig. 29-73*b*, um fio de mesmo comprimento forma uma bobina circular com duas espiras de raio igual à metade do raio da espira da Fig. 29-73*a*. (a) Se B_a e B_b são os módulos dos campos magnéticos nos centros das duas bobinas, qual é o valor da razão B_b/B_a? (b) Qual é o valor da razão μ_b/μ_a entre os momentos dipolares das duas bobinas?

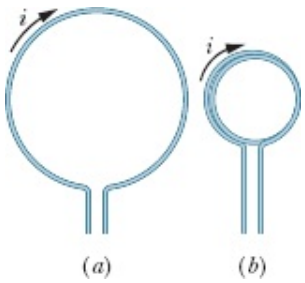


Figura 29-73 Problema 58.

·59 Qual é o módulo do momento dipolar magnético $\vec{\mu}$ do solenoide descrito no Problema 51?

··60 Na Fig. 29-74*a*, duas espiras circulares, com diferentes correntes e o mesmo raio de 4,0 cm, têm o centro no eixo y e estão separadas inicialmente por uma distância $L = 3{,}0$ cm, com a espira 2 posicionada na origem do eixo. As correntes nas duas espiras produzem um campo magnético na origem cuja

componente y é B_y. Essa componente é medida enquanto a espira 2 é deslocada no sentido positivo do eixo y. A Fig. 29-74*b* mostra o valor de B_y em função da coordenada y da espira 2. A curva tem uma assíntota $B_y = 7{,}20\ \mu T$ para $y \rightarrow \infty$. A escala horizontal é definida por $y_s = 10{,}0$ cm. Determine (a) a corrente i_1 na espira 1 e (b) a corrente i_2 na espira 2.

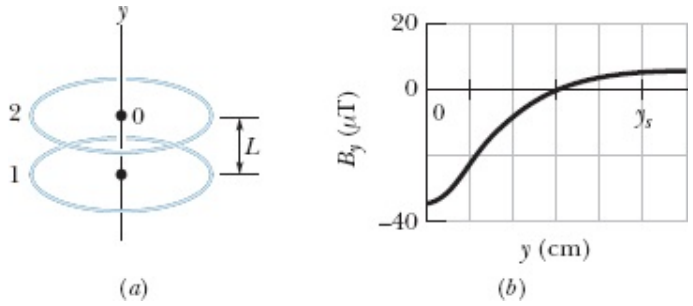


Figura 29-74 Problema 60.

··61 Uma espira circular com 12 cm de raio conduz uma corrente de 15 A. Uma bobina plana, com 0,82 cm de raio e 50 espiras, conduzindo uma corrente de 1,3 A, é concêntrica com a espira. O plano da espira é perpendicular ao plano da bobina. Suponha que o campo magnético da espira é uniforme na região em que se encontra a bobina. Determine (a) o módulo do campo magnético produzido pela espira no centro comum da espira e da bobina e (b) o módulo do torque exercido pela espira sobre a bobina.

··62 Na Fig. 29-75, uma corrente $i = 56{,}2$ mA circula em uma espira formada por dois segmentos radiais e duas semicircunferências de raios $a = 5{,}72$ cm e $b = 9{,}36$ cm com um centro comum P. Determine (a) o módulo e (b) o sentido (para dentro ou para fora da página) do campo magnético no ponto P e (c) o módulo e (d) o sentido do momento magnético da espira.

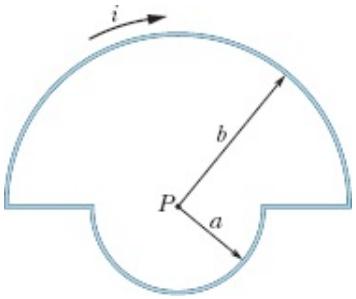


Figura 29-75 Problema 62.

··63 Na Fig. 29-76, um fio conduz uma corrente de 6,0 A ao longo do circuito fechado *abcdefgha*, que percorre 8 das 12 arestas de um cubo com 10 cm de aresta. (a) Considerando o circuito uma combinação de três espiras quadradas (*bcfgb*, *abgha* e *cdefc*), determine o momento magnético total do circuito na notação dos vetores unitários. (b) Determine o módulo do campo magnético total no ponto de coordenadas (0; 5,0 m; 0).

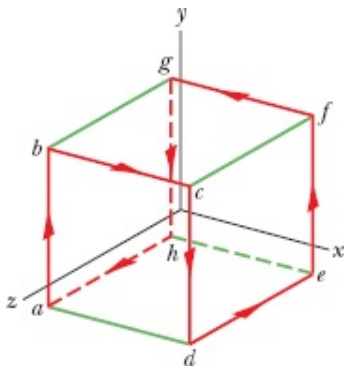


Figura 29-76 Problema 63.

Problemas Adicionais

64 Na Fig. 29-77, uma espira conduz uma corrente i = 200 mA. A espira é formada por dois segmentos radiais e dois arcos de circunferência concêntricos de raios 2,00 m e 4,00 m. O ângulo θ é $\pi/4$ rad. Determine (a) o módulo e (b) o sentido (para dentro ou para fora do papel) do campo magnético no centro de curvatura P.

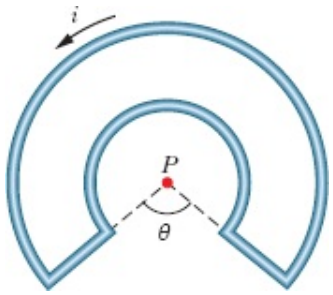


Figura 29-77 Problema 64.

65 Um fio cilíndrico, com 8,00 mm de raio, conduz uma corrente de 25,0 A, uniformemente distribuída ao longo da seção reta. A que distância do eixo central existem pontos no interior do fio, nos quais o módulo do campo magnético é 0,100 mT?

66 Dois fios longos estão no plano xy e conduzem correntes no sentido positivo do eixo x. O fio 1 está em y = 10,0 cm e conduz uma corrente de 6,00 A; o fio 2 está em y = 5,00 cm e conduz uma corrente de 10,0 A. (a) Na notação dos vetores unitários, qual é o campo magnético $\vec{B}$ na origem? (b) Para qual valor de y o campo $\vec{B}$ é zero? (c) Se a corrente no fio 1 for invertida, para qual valor de y o campo $\vec{B}$ será zero?

67 Duas espiras, uma em forma de circunferência e outra em forma de quadrado, têm o mesmo comprimento L e conduzem a mesma corrente i. Mostre que o campo magnético produzido no centro da espira quadrada é maior que o campo magnético produzido no centro da espira circular.

68 Um fio longo, retilíneo, conduz uma corrente de 50 A. Um elétron está se movendo com uma velocidade de $1{,}0 \times 10^7$ m/s a 5,0 cm de distância do fio. Determine o módulo da força magnética que age sobre o elétron se o elétron estiver se movendo (a) na direção do fio, (b) paralelamente ao fio, no sentido da corrente e (c) perpendicularmente às direções dos itens (a) e (b).

69 Três fios longos são paralelos ao eixo *z* e conduzem uma corrente de 10 A no sentido +*z*. Os pontos de interseção dos fios com o plano *xy* formam um triângulo equilátero com 50 cm de lado, como mostra a Fig. 29-78. Um quarto fio (fio *b*) passa pelo ponto médio da base do triângulo e é paralelo aos outros três fios. Se a força magnética exercida sobre o fio *a* é zero, determine (a) o valor e (b) o sentido (+*z* ou −*z*) da corrente no fio *b*.

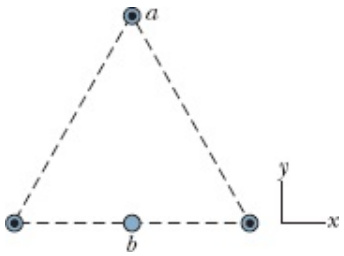


Figura 29-78 Problema 69.

70 A Fig. 29-79 mostra uma espira percorrida por uma corrente $i = 2{,}00$ A. A espira é formada por uma semicircunferência de 4,00 m de raio, dois quartos de circunferência de 2,00 m de raio cada um e três segmentos retilíneos. Qual é o módulo do campo magnético no centro comum dos arcos de circunferência?

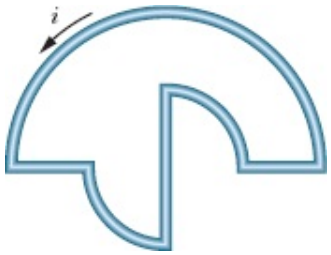


Figura 29-79 Problema 70.

71 Um fio nu, de cobre, calibre 10 (ou seja, com 2,6 mm de diâmetro), pode conduzir uma corrente de 50 A sem superaquecer. Qual é, para essa corrente, o módulo do campo magnético na superfície do fio?

72 Um fio longo, vertical, conduz uma corrente desconhecida. Uma superfície cilíndrica de espessura desprezível, coaxial com o fio, com 3,0 mm de raio, conduz uma corrente de 30 mA, dirigida para cima. Se o módulo do campo magnético em um ponto situado a 5,0 mm de distância do fio é 1,0 μT, determine (a) o valor e (b) o sentido da corrente no fio.

73 A Fig. 29-80 mostra a seção reta de um condutor longo, cilíndrico, de raio $r = 4{,}00$ cm, que contém um furo longo, cilíndrico, de raio $b = 1{,}50$ cm. Os eixos centrais do cilindro e do furo são paralelos e estão separados por uma distância $d = 2{,}00$ cm; uma corrente $i = 5{,}25$ A está distribuída uniformemente na região sombreada. (a) Determine o módulo do campo magnético no centro do furo. (b) Discuta os casos especiais $b = 0$ e $d = 0$.

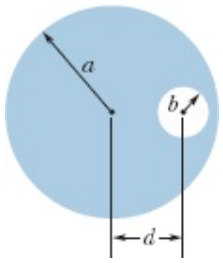


Figura 29-80 Problema 73.

74 O módulo do campo magnético a 88,0 cm do eixo de um fio retilíneo, longo, é 7,30 μT. Determine a corrente no fio.

75 A Fig. 29-81 mostra um segmento de fio de comprimento Δs = 3,0 cm, com o centro na origem, percorrido por uma corrente i = 2,0 A no sentido positivo do eixo y (como parte de um circuito completo). Para calcular o módulo do campo magnético $\vec{B}$ produzido pelo segmento em um ponto situado a vários metros da origem, podemos usar a lei de Biot-Savart na forma $B = (\mu_0/4\pi)i\,\Delta s\,(\text{sen}\,\theta)/r^2$, já que r e θ podem ser considerados constantes para todo o segmento. Calcule $\vec{B}$ (na notação dos vetores unitários) para pontos situados nas seguintes coordenadas: (a) (0; 0; 5,0 m), (b) (0; 6,0 m; 0), (c) (7,0 m; 7,0 m; 0) e (d) (−3,0 m; −4,0 m; 0).

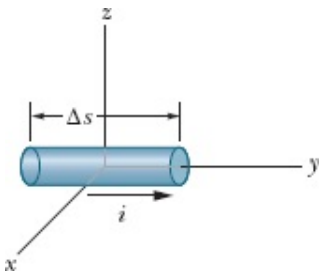


Figura 29-81 Problema 75.

76 A Fig. 29-82 mostra, em seção reta, dois fios longos, paralelos, separados por uma distância d = 10,0 cm; os dois fios conduzem uma corrente de 100 A, que tem o sentido para fora do papel no fio 1. O ponto P está na mediatriz do segmento de reta que liga os dois fios. Determine o campo magnético no ponto P, na notação dos vetores unitários, se o sentido da corrente 2 for (a) para fora do papel e (b) para dentro do papel.

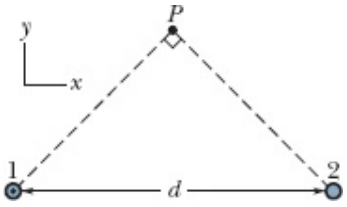


Figura 29-82 Problema 76.

77 Na Fig. 29-83, dois fios longos conduzem a mesma corrente i. Ambos seguem um arco de 90° da mesma circunferência de raio R. Mostre que o campo magnético $\vec{B}$ no centro da circunferência é igual ao

campo $\vec{B}$ em um ponto situado a uma distância R abaixo de um fio longo, retilíneo, que conduz uma corrente i para a esquerda.

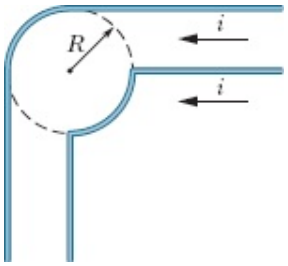


Figura 29-83 Problema 77.

78 Um fio longo que conduz uma corrente de 100 A é perpendicular às linhas de campo magnético de um campo magnético uniforme cujo módulo é 5,0 mT. A que distância do fio o campo magnético é zero?

79 Um condutor longo, oco, cilíndrico (raio interno 2,0 mm, raio externo 4,0 mm), é percorrido por uma corrente de 24 A distribuída uniformemente na seção reta. Um fio longo e fino, coaxial com o cilindro, conduz uma corrente de 24 A no sentido oposto. Determine o módulo do campo magnético a (a) 1,0 mm, (b) 3,0 mm e (c) 5,0 mm de distância do eixo central do fio e do cilindro.

80 Um fio longo tem um raio maior que 4,0 mm e conduz uma corrente uniformemente distribuída ao longo da seção reta. O módulo do campo magnético produzido pela corrente é 0,28 mT em um ponto situado a 4,0 mm do eixo do fio e 0,20 mT em um ponto situado a 10 mm do eixo do fio. Qual é o raio do fio?

81 A Fig. 29-84 mostra a seção reta de uma placa condutora infinita que conduz uma corrente λ por unidade de largura, dirigida para fora do papel. (a) Utilize a lei de Biot-Savart e a simetria da situação para mostrar que, para todos os pontos P acima da placa e para todos os pontos P' abaixo da placa, o campo magnético $\vec{B}$ é paralelo à placa e tem o sentido indicado na figura. (b) Use a lei de Ampère para mostrar que $B = \mu_0\lambda/2$ em todos os pontos P e P'.

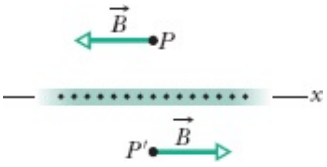


Figura 29-84 Problema 81.

82 A Fig. 29-85 mostra, em seção reta, dois fios longos, paralelos, separados por uma distância d = 18,6 cm. A corrente nos fios é 4,23 A, para fora do papel no fio 1 e para dentro do papel no fio 2. Na notação dos vetores unitários, qual é o campo magnético no ponto P, situado a uma distância R = 34,2 cm da reta que liga os dois fios?

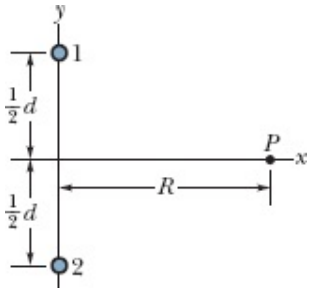


Figura 29-85 Problema 82.

83 Na notação dos vetores unitários, qual é o campo magnético no ponto *P* da Fig. 29-86 se $i = 10$ A e $a = 8{,}0$ cm? (Note que os fios *não são longos*.)

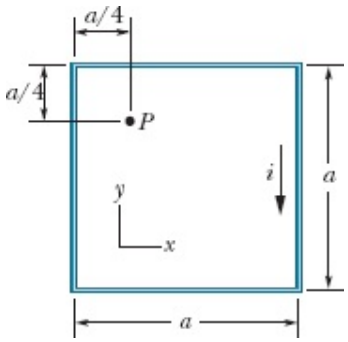


Figura 29-86 Problema 83.

84 Três longos fios estão no plano *xy*, são paralelos ao eixo *x* e guardam entre si uma distância de 10 cm. Os dois fios externos conduzem uma corrente de 5,0 A no sentido positivo do eixo *x*. Determine o módulo da força que age sobre um trecho de 3,0 m de um dos fios externos se a corrente no fio central é 3,2 A (a) no sentido positivo do eixo *x* e (b) no sentido negativo do eixo *x*.

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

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

(b) Mostre que, para $r = a$, a equação do item (a) fornece o módulo *B* do campo magnético na superfície do condutor; para $r = b$, o campo magnético é zero; para $b = 0$, a equação fornece o módulo do campo magnético no interior de um condutor cilíndrico, maciço, de raio *a*. (c) Faça um gráfico de $B(r)$, de $r = 0$ a $r = 6$ cm, para $a = 2{,}0$ cm, $b = 1{,}8$ cm e $i = 100$ A.

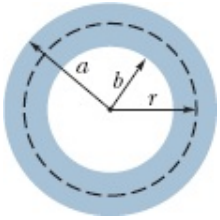


Figura 29-87 Problema 85.

86 Mostre que o módulo do campo magnético produzido no centro de uma espira retangular de comprimento L e largura W, percorrida por uma corrente i, é dado por

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

87 A Fig. 29-88 mostra a seção reta de um cabo coaxial, longo, de raios a, b e c. Correntes i de mesmo valor e sentidos opostos estão uniformemente distribuídas nos dois condutores. Escreva expressões para o módulo do campo magnético $B(r)$ em função da distância radial r (a) para $r < c$, (b) para $c < r < b$, (c) para $b < r < a$ e (d) para $r > a$. (e) Teste essas expressões para todos os casos especiais possíveis. (f) Suponha que $a = 2{,}0$ cm, $b = 1{,}8$ cm, $c = 0{,}40$ cm e $i = 120$ A e plote a função $B(r)$ no intervalo $0 < r < 3$ cm.

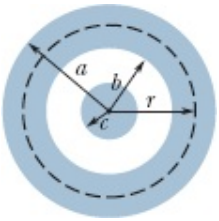


Figura 29-88 Problema 87.

88 A Fig. 29-89 é um desenho esquemático de um canhão eletromagnético. O projétil P é colocado entre dois trilhos de seção reta circular; uma fonte faz passar uma corrente nos trilhos e no projétil, que é feito de material condutor (não é necessário usar fusível). (a) Sejam w a distância entre os trilhos, R o raio dos trilhos e i a corrente. Mostre que o projétil é submetido a uma força para a direita, paralela aos trilhos, cujo módulo é dado aproximadamente por

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

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

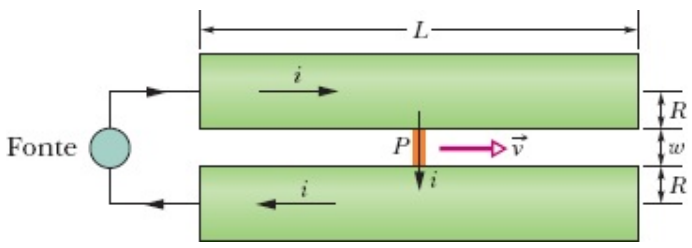


Figura 29-89 Problema 88.