

Errata

Halliday – Fundamentos de Física Vol. 3 - Eletromagnetismo 9ª Edição/2012 – 2ª Impressão

As correções na 2ª impressão da 9ª edição estão destacadas nas páginas abaixo.

nada y de uma terceira partícula de carga $q_3 = +4,0 \mu\text{C}$ para que a força exercida sobre a partícula 2 pelas partículas 1 e 3 seja nula.

••16 Na Fig. 21-26a, a partícula 1 (de carga q_1) e a partícula 2 (de carga q_2) são mantidas fixas no eixo x, separadas por uma distância de 8,00 cm. A força que as partículas 1 e 2 exercem sobre uma partícula 3 (de carga $q_3 = +8,00 \times 10^{-19} \text{ C}$) colocada entre elas é $\vec{F}_{3,\text{tot}}$. A Fig. 21-26b mostra o valor da componente x dessa força em função da coordenada x do ponto em que a partícula 3 é colocada. A escala do eixo x é definida por $x_s = 8,0 \text{ cm}$. Determine (a) o sinal da carga q_1 ; (b) o valor da razão q_2/q_1 .

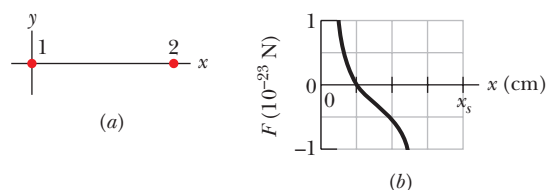


Figura 21-26 Problema 16.

••17 Na Fig. 21-27a, as partículas 1 e 2 têm uma carga de $20,0 \mu\text{C}$ cada uma e estão separadas por uma distância $d = 1,50 \text{ m}$. (a) Qual é o módulo da força eletrostática que a partícula 2 exerce sobre a partícula 1? Na Fig. 21-27b, a partícula 3, com uma carga de $20,0 \mu\text{C}$, é posicionada de modo a completar um triângulo equilátero. (b) Qual é o módulo da força eletrostática a que a partícula 1 é submetida devido à presença das partículas 2 e 3?

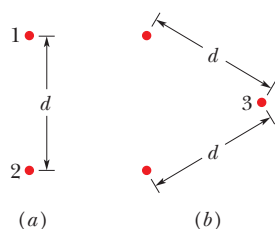


Figura 21-27 Problema 17.

••18 Na Fig. 21-28a, três partículas positivamente carregadas são mantidas fixas em um eixo x. As partículas B e C estão tão próximas que as distâncias entre elas e a partícula A podem ser consideradas iguais. A força total a que a partícula A está submetida devido à presença das partículas B e C é $2,014 \times 10^{-23} \text{ N}$ no sentido negativo do eixo x. Na Fig. 21-28b, a partícula B foi transferida para o lado oposto de A, mas mantida à mesma distância. Nesse caso, a força total a que a partícula A está submetida passa a ser $2,877 \times 10^{-24} \text{ N}$ no sentido negativo do eixo x. Qual é o valor da razão q_C/q_B ?

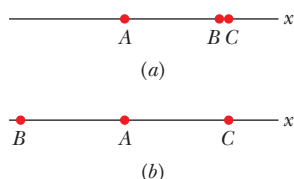


Figura 21-28 Problema 18.

••19 Na Fig. 21-25, a partícula 1, de carga $+q$, e a partícula 2, de carga $+4,00q$, estão a uma distância $L = 9,00 \text{ cm}$ uma da outra em um eixo x. Se as três partículas permanecem onde estão quando uma partícula 3 de carga q_3 é colocada nas proximidades das partículas

1 e 2, determine (a) a coordenada x da partícula 3; (b) a coordenada y da partícula 3; (c) a razão q_3/q .

•••20 A Fig. 21-29a mostra um sistema de três partículas carregadas separadas por uma distância d. As partículas A e C estão fixas no lugar no eixo x, mas a partícula B pode se mover ao longo de uma circunferência com centro na partícula A. Durante o movimento, um segmento de reta ligando os pontos A e B faz um ângulo θ com o eixo x (Fig. 21-29b). As curvas da Fig. 21-29c mostram, para dois valores diferentes da razão entre a carga da partícula C e a carga da partícula B, o módulo F_{tot} da força eletrostática total que as outras partículas exercem sobre a partícula A. A força total foi plotada em função do ângulo θ e como múltiplo de uma força de referência F_0 . Assim, por exemplo, na curva 1, para $\theta = 180^\circ$, vemos que $F_{\text{tot}} = 2F_0$. (a) Nas condições em que foi obtida a curva 1, qual é a razão entre a carga da partícula C e a carga da partícula B (incluindo o sinal)? (b) Qual é a razão nas condições em que foi obtida a curva 2?

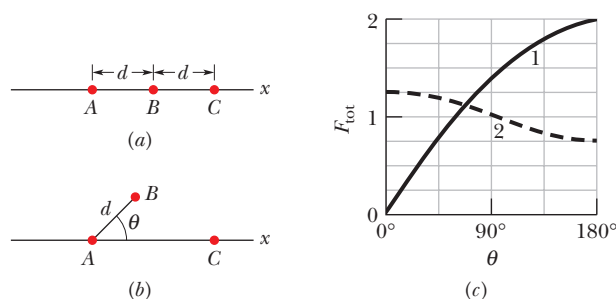


Figura 21-29 Problema 20.

•••21 Uma casca esférica não condutora, com um raio interno de 4,0 cm e um raio externo de 6,0 cm, possui uma distribuição de cargas não uniforme. A densidade volumétrica de carga ρ é a carga por unidade de volume, medida em coulombs por metro cúbico. No caso dessa casca, $\rho = b/r$, em que r é a distância em metros a partir do centro da casca e $b = 3,0 \mu\text{C}/\text{m}^2$. Qual é a carga total da casca?

•••22 A Fig. 21-30 mostra um sistema de quatro partículas carregadas, com $\theta = 30,0^\circ$ e $d = 2,00 \text{ cm}$. A carga da partícula 2 é $q_2 = +8,00 \times 10^{-19} \text{ C}$; a carga das partículas 3 e 4 é $q_3 = q_4 = -1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$. (a) Qual deve ser a distância D entre a origem e a partícula 2 para que a força que age sobre a partícula 1 seja nula? (b) Se as partículas 3 e 4 são aproximadas do eixo x mantendo-se simétricas em relação a esse eixo, o valor da distância D é maior, menor ou igual ao do item (a)?

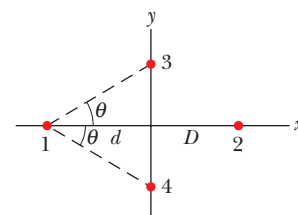


Figura 21-30 Problema 22.

•••23 Na Fig. 21-31, as partículas 1 e 2, de carga $q_1 = q_2 = +3,20 \times 10^{-19} \text{ C}$, estão no eixo y, a uma distância $d = 17,0 \text{ cm}$ da origem. A partícula 3, de carga $q_3 = +6,40 \times 10^{-19} \text{ C}$, é deslocada ao longo do eixo x, de $x = 0$ até $x = +5,0 \text{ m}$. Para que valor de x o módulo da força eletrostática exercida pelas partículas 1 e 2 sobre a partícula 3 é (a) mínimo e (b) máximo? Qual é o valor (c) mínimo e (d) máximo do módulo?

dizemos que o cristal possui um *defeito*; qual é o módulo da força eletrostática exercida sobre o íon Cl^- pelos íons Cs^+ restantes?

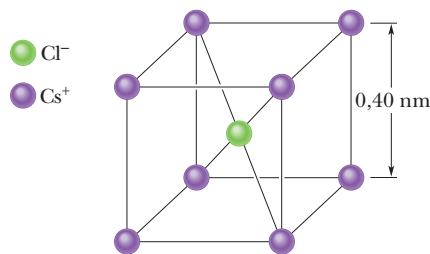


Figura 21-35 Problema 35.

Seção 21-6 A Carga É Conservada

•36 Elétrons e pósitrons são produzidos em reações nucleares envolvendo prótons e nêutrons conhecidas pelo nome genérico de *decaimento beta*. (a) Se um próton se transforma em um nêutron, é produzido um elétron ou um pósitron? (b) Se um nêutron se transforma em um próton, é produzido um elétron ou um pósitron?

•37 Determine X nas seguintes reações nucleares: (a) ${}^1\text{H} + {}^9\text{Be} \rightarrow \text{X} + \text{n}$; (b) ${}^{12}\text{C} + {}^1\text{H} \rightarrow \text{X}$; (c) ${}^{15}\text{N} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + \text{X}$. (Sugestão: consulte o Apêndice F.)

Problemas Adicionais

••38 A Fig. 21-36 mostra quatro esferas condutoras iguais, que estão separadas por grandes distâncias. A esfera W (que estava inicialmente neutra) é colocada em contato com a esfera A e depois as esferas são novamente separadas. Em seguida, a esfera W é colocada em contato com a esfera B (que possuía inicialmente uma carga de $-32e$) e depois as esferas são novamente separadas. Finalmente, a esfera W é colocada em contato com a esfera C (que possuía inicialmente uma carga de $+48e$) e depois as esferas são novamente separadas. A carga final da esfera W é $+18e$. Qual era a carga inicial da esfera A?

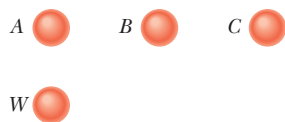


Figura 21-36 Problema 38.

39 Na Fig. 21-37, a partícula 1, de carga $+4e$, está a uma distância $d_1 = 2,00$ mm do solo e a partícula 2, de carga $+6e$, está sobre o solo, a uma distância horizontal $d_2 = 6,00$ mm da partícula 1. Qual é a componente x da força eletrostática exercida pela partícula 1 sobre a partícula 2?

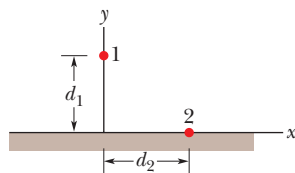


Figura 21-37 Problema 39.

40 Na Fig. 21-22, as partículas 1 e 2 são mantidas fixas. Se a força eletrostática total exercida sobre a partícula 3 é zero e $L_{23} = 2,00L_{12}$, qual é o valor da razão q_1/q_2 ?

41 (a) Que cargas iguais e positivas teriam que ser colocadas na Terra e na Lua para neutralizar a atração gravitacional entre os dois

astros? (b) Por que não é necessário conhecer a distância entre a Terra e a Lua para resolver este problema? (c) Quantos quilogramas de íons de hidrogênio (ou seja, prótons) seriam necessários para acumular a carga positiva calculada no item (a)?

42 Na Fig. 21-38, duas pequenas esferas condutoras de mesma massa m e mesma carga q estão penduradas em fios não condutores de comprimento L . Suponha que o ângulo θ é tão pequeno que a aproximação $\tan \theta \approx \sin \theta$ pode ser usada. (a) Mostre que a distância de equilíbrio entre as esferas é dada por

$$x = \left(\frac{q^2 L}{2\pi\epsilon_0 mg} \right)^{1/3}$$

(b) Se $L = 120$ cm, $m = 10$ g e $x = 5,0$ cm, qual é o valor de $|q|$?

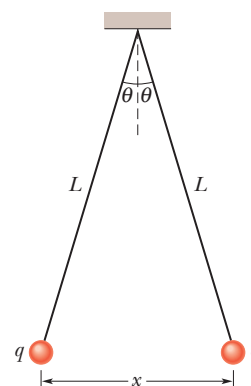


Figura 21-38 Problemas 42 e 43.

43 (a) Explique o que acontece com as esferas do Problema 42 se uma delas é descarregada (ligando, por exemplo, momentaneamente a esfera à terra). (b) Determine a nova distância de equilíbrio x , usando os valores dados de L e m e o valor calculado de $|q|$.

44 A que distância devem ser colocados dois prótons para que o módulo da força eletrostática que um exerce sobre o outro seja igual à força gravitacional a que um dos prótons está submetido na superfície terrestre?

45 Quantos megacoulombs de carga elétrica positiva existem em 1,00 mol de hidrogênio (H_2) neutro?

46 Na Fig. 21-39, quatro partículas são mantidas fixas no eixo x , separadas por uma distância $d = 2,00$ cm. As cargas das partículas são $q_1 = +2e$, $q_2 = -e$, $q_3 = +e$ e $q_4 = +4e$, onde $e = 1,60 \times 10^{-19}$ C. Em termos dos vetores unitários, determine a força eletrostática a que está submetida (a) a partícula 1; (b) a partícula 2.

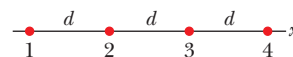


Figura 21-39 Problema 46.

47 Cargas pontuais de $+6,0 \mu\text{C}$ e $-4,0 \mu\text{C}$ são mantidas fixas no eixo x nos pontos $x = 8,0$ m e $x = 16$ m, respectivamente. Que carga deve ser colocada no ponto $x = 24$ m para que a força eletrostática total sobre uma carga colocada na origem seja nula?

48 Na Fig. 21-40, três esferas condutoras iguais são dispostas de modo a formar um triângulo equilátero de lado $d = 20,0$ cm. Os raios das esferas são muito menores que d e as cargas das esferas são $q_A = -2,00$ nC, $q_B = -4,00$ nC e $q_C = +8,00$ nC. (a) Qual é o módulo da força eletrostática entre as esferas A e C? Em seguida,

é executado o seguinte procedimento: A e B são ligadas por um fio fino, que depois é removido; B é ligada à terra pelo fio, que depois é removido; B e C são ligadas pelo fio, que depois é removido. Determine o novo valor (b) do módulo da força eletrostática entre as esferas A e C ; (c) do módulo da força eletrostática entre as esferas B e C .

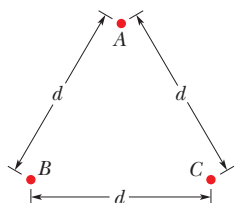


Figura 21-40 Problema 48.

49 Um nêutron é composto por um quark “up”, com uma carga de $+2e/3$, e dois quarks “down”, cada um com uma carga de $-e/3$. Se os dois quarks “down” estão separados por uma distância de $2,6 \mu 10^{-15} \text{ m}$ no interior do nêutron, qual é o módulo da força eletrostática entre eles?

50 A Fig. 21-41 mostra uma barra longa, não condutora, de massa desprezível, de comprimento L , articulada no centro e equilibrada por um bloco de peso P situado a uma distância x da extremidade esquerda. Nas extremidades direita e esquerda da barra existem pequenas esferas condutoras de carga positiva q e $2q$, respectivamente. A uma distância vertical h abaixo das esferas existem esferas fixas de carga positiva Q . (a) Determine a distância x para que a barra fique equilibrada na horizontal. (b) Qual deve ser o valor de h para que a barra não exerça nenhuma força vertical sobre o apoio quando está equilibrada na horizontal?

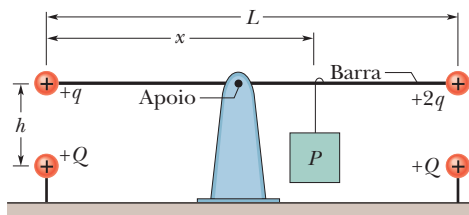


Figura 21-41 Problema 50.

51 Uma barra não condutora carregada, com um comprimento de $2,00 \text{ m}$ e uma seção reta de $4,00 \text{ cm}^2$, está no semieixo x positivo com uma das extremidades na origem. A densidade volumétrica de carga ρ é a carga por unidade de volume em coulombs por metro cúbico. Determine quantos elétrons em excesso existem na barra (a) se ρ é uniforme, com um valor de $-4,00 \mu\text{C}/\text{m}^3$; (b) se o valor de ρ é dado pela equação $\rho = bx^2$, em que $b = -2,00 \mu\text{C}/\text{m}^5$.

52 Uma partícula de carga Q é mantida fixa na origem de um sistema de coordenadas xy . No instante $t = 0$, uma partícula ($m = 0,800 \text{ g}$, $q = +4,00 \mu\text{C}$) está situada no eixo x , no ponto $x = 20,0 \text{ cm}$, e se move com uma velocidade de $50,0 \text{ m/s}$ no sentido positivo do eixo y . Para que valor de Q a partícula executa um movimento circular uniforme? (Despreze o efeito da força gravitacional sobre a partícula.)

53 Qual seria o módulo da força eletrostática entre duas cargas pontuais de $1,00 \text{ C}$ separadas por uma distância de (a) $1,00 \text{ m}$ e (b) $1,00 \text{ km}$ se essas cargas pontuais pudessem existir (o que não é verdade) e fosse possível montar um sistema desse tipo?

54 Uma carga de $6,0 \mu\text{C}$ é dividida em duas partes, que são mantidas a uma distância de $3,00 \text{ mm}$. Qual é o maior valor possível da força eletrostática entre as duas partes?

55 Da carga Q que está presente em uma pequena esfera, uma fração α é transferida para uma segunda esfera. As esferas podem ser tratadas como partículas. (a) Para que valor de α o módulo da força eletrostática F entre as duas esferas é o maior possível? Determine (b) o menor e (c) o maior valor de α para o qual F é igual a metade do valor máximo.

56 Se um gato se esfrega repetidamente nas calças de algodão do dono em um dia seco, a transferência de carga do pelo do gato para o tecido de algodão pode deixar o dono com um excesso de carga de $-2,00 \mu\text{C}$. (a) Quantos elétrons são transferidos para o dono?

O dono decide lavar as mãos, mas quando aproxima os dedos da torneira, acontece uma descarga elétrica. (b) Nessa descarga, elétrons são transferidos da torneira para o dono do gato ou vice-versa? (c) Pouco antes de acontecer a descarga, são induzidas cargas positivas ou negativas na torneira? (d) Se o gato tivesse se aproximado da torneira, a transferência de elétrons seria em que sentido? (e) Se você for acariciar um gato em um dia seco, deve tornar cuidado para não aproximar os dedos do focinho do animal, caso contrário poderá ocorrer uma descarga elétrica suficiente para assustá-lo. Levando em conta o fato de que o pelo de gato é um material não condutor, explique como isso pode acontecer.

57 Sabemos que a carga negativa do elétron e a carga positiva do próton têm o mesmo valor absoluto. Suponha, porém, que houvesse uma diferença de $0,00010\%$ entre as duas cargas. Nesse caso, qual seria a força de repulsão entre duas moedas de cobre situadas a $1,0 \text{ m}$ de distância? Suponha que cada moeda contenha 3×10^{22} átomos de cobre. (Sugestão: um átomo de cobre contém 29 prótons e 29 elétrons.) O que é possível concluir a partir deste resultado?

58 Na Fig. 21-25, a partícula 1, com uma carga de $-80,0 \mu\text{C}$, e a partícula 2, com uma carga de $+40 \mu\text{C}$, são mantidas fixas no eixo x , separadas por uma distância $L = 20,0 \text{ cm}$. Em termos dos vetores unitários, determine a força eletrostática total a que é submetida uma partícula 3, de carga $q_3 = 20,0 \mu\text{C}$, se a partícula 3 é colocada (a) no ponto $x = 40,0 \text{ cm}$; (b) no ponto $x = 80,0 \text{ cm}$. Determine também (c) a coordenada x ; (d) a coordenada y da partícula 3 para que a força eletrostática total a que é submetida seja nula.

59 Qual é a carga total, em coulombs, de $75,0 \text{ kg}$ de elétrons?

60 Na Fig. 21-42, seis partículas carregadas cercam a partícula 7 a uma distância de $d = 1,0 \text{ cm}$ ou $2d$, como mostra a figura. As cargas são $q_1 = +2e$, $q_2 = +4e$, $q_3 = +e$, $q_4 = +4e$, $q_5 = +2e$, $q_6 = +8e$ e $q_7 = +6e$, com $e = 1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$. Qual é o módulo da força eletrostática a que está submetida a partícula 7?

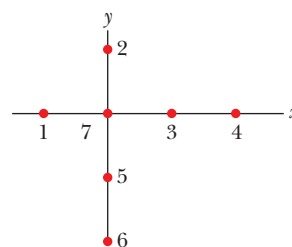


Figura 21-42 Problema 60.

••8 Na Fig. 22-31, as quatro partículas são mantidas fixas e têm cargas $q_1 = q_2 = +5e$, $q_3 = +3e$ e $q_4 = -12e$. A distância $d = 5,0 \mu\text{m}$. Qual é o módulo do campo elétrico no ponto P ?

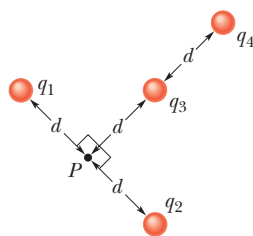


Figura 22-31 Problema 8.

••9 A Fig. 22-32 mostra duas partículas carregadas mantidas fixas no eixo x : $-q = -3,20 \times 10^{-19} \text{ C}$, no ponto $x = -3,00 \text{ m}$, e $q = 3,20 \times 10^{-19} \text{ C}$, no ponto $x = +3,00 \text{ m}$. Determine (a) o módulo e (b) a orientação (em relação ao semieixo x positivo) do campo elétrico no ponto P , para o qual $y = 4,00 \text{ m}$.

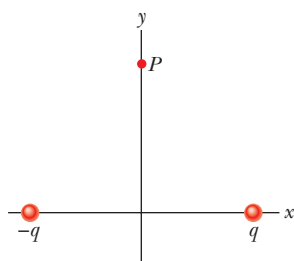


Figura 22-32 Problema 9.

••10 A Fig. 22-33a mostra duas partículas carregadas mantidas fixas no eixo x a uma distância L uma da outra. A razão q_1/q_2 entre os valores absolutos das cargas das duas partículas é 4,00. A Fig. 22-33b mostra a componente x , $E_{\text{tot},x}$ do campo elétrico no eixo x , à direita da partícula 2, em função de x . **A escala do eixo x é definida por $x_s = 30,0 \text{ cm}$.** (a) Para que valor de $x > 0$ o valor de $E_{\text{tot},x}$ é máximo? (b) Se a carga da partícula 2 é $-q_2 = -3e$, qual é o valor do campo máximo?

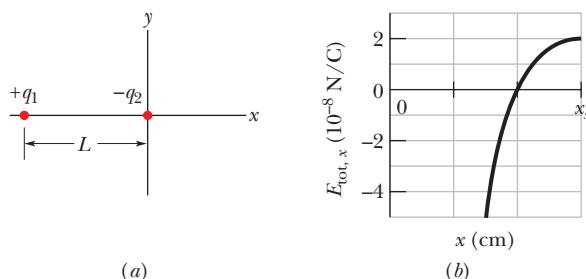


Figura 22-33 Problema 10.

••11 Duas partículas são mantidas fixas sobre o eixo x : a partícula 1, de carga $q_1 = 2,1 \times 10^{-8} \text{ C}$, no ponto $x = 20 \text{ cm}$, e a partícula 2, de carga $q_2 = -4,00q_1$, no ponto $x = 70 \text{ cm}$. Em que ponto do eixo x o campo elétrico total é nulo?

••12 A Fig. 22-34 mostra um arranjo irregular de elétrons (e) e prótons (p) em um arco de circunferência de raio $r = 2,00 \text{ cm}$, com ângulos $\theta_1 = 30,0^\circ$, $\theta_2 = 50,0^\circ$, $\theta_3 = 30,0^\circ$ e $\theta_4 = 20,0^\circ$. Determine (a) o módulo e (b) a orientação (em relação ao semieixo x positivo) do campo elétrico no centro do arco.

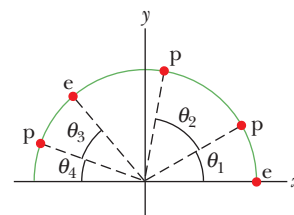


Figura 22-34 Problema 12.

••13 A Fig. 22-35 mostra um próton (p) no eixo central de um disco com uma densidade uniforme de cargas devido a um excesso de elétrons. Três dos elétrons são mostrados na figura: o elétron e_c , no centro do disco, e os elétrons e_s , em extremidades opostas do disco, a uma distância R do centro. O próton se encontra inicialmente a uma distância $z = R = 2,00 \text{ cm}$ do disco. Com o próton nessa posição, determine o módulo (a) do campo elétrico \vec{E}_c produzido pelo elétron e_c e (b) do campo elétrico total $\vec{E}_{s,\text{tot}}$ produzido pelos elétrons e_s . O próton é transferido para o ponto $z = R/10,0$. Determine os novos valores (c) do módulo de \vec{E}_c e (d) do módulo de $\vec{E}_{s,\text{tot}}$. (e) Os resultados dos itens (a) e (c) mostram que o módulo de \vec{E}_c aumenta quando o próton se aproxima do disco. Por que, nas mesmas condições, o módulo de $\vec{E}_{s,\text{tot}}$ diminui, como mostram os resultados dos itens (b) e (d)?

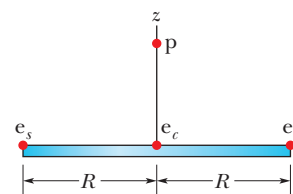


Figura 22-35 Problema 13.

••14 Na Fig. 22-36, a partícula 1, de carga $q_1 = -5,00q$, e a partícula 2, de carga $q_2 = +2,00q$, são mantidas fixas no eixo x . (a) Em que ponto do eixo, em termos da distância L , o campo elétrico total é nulo? (b) Faça um esboço das linhas de campo elétrico.

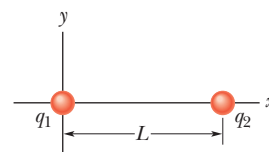


Figura 22-36 Problema 14.

••15 Na Fig. 22-37, as três partículas são mantidas fixas no lugar e têm cargas $q_1 = q_2 = +e$ e $q_3 = +2e$. A distância $a = 6,00 \mu\text{m}$. Determine (a) o módulo e (b) a direção do campo elétrico no ponto P .

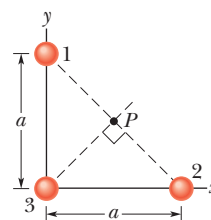


Figura 22-37 Problema 15.

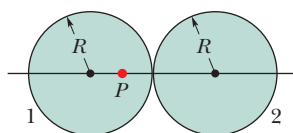


Figura 23-54 Problema 54.

•••55 Uma distribuição de cargas não uniforme, mas com simetria esférica, produz um campo elétrico de módulo $E = Kr^4$, onde K é uma constante e r é a distância do centro da esfera. O campo aponta para longe do centro da esfera. Qual é a distribuição volumétrica de cargas ρ ?


Problemas Adicionais

56 O campo elétrico em uma certa região do espaço é dado por $\vec{E} = (x + 2)\hat{i}$ N/C, com x em metros. Considere uma superfície gaussiana cilíndrica, de raio 20 cm, coaxial com o eixo x . Uma das bases do cilindro está em $x = 0$. (a) Determine o valor absoluto do fluxo elétrico através da outra base do cilindro, situada em $x = 2,0$ m. (b) Determine a carga no interior do cilindro.

57 Uma esfera metálica de espessura insignificante possui um raio de 25,0 cm e uma carga de $2,00 \times 10^{-7}$ C. Determine o valor de E (a) no interior da esfera; (b) junto à superfície da esfera; (c) a 3,00 m de distância do centro da esfera.

58 Uma placa infinita de espessura insignificante, situada no plano xy , possui uma densidade superficial de cargas uniforme $\rho = 8,0$ nC/m². Determine o fluxo elétrico através de uma esfera gaussiana com centro na origem e 5,0 cm de raio.

59 Uma placa infinita que ocupa o espaço entre os planos $x = -5,0$ cm e $x = +5,0$ cm tem uma densidade volumétrica de cargas uniforme $\rho = 1,2$ nC/m³. Determine o módulo do campo elétrico (a) no plano $x = 4,0$ cm; (b) no plano $x = 6,0$ cm.

60  *O mistério do chocolate em pó.* Explosões provocadas por descargas elétricas (centelhas) constituem um sério perigo nas indústrias que lidam com pós muito finos. Uma dessas explosões aconteceu em uma fábrica de biscoitos na década de 1970. Os operários costumavam esvaziar os sacos de chocolate em pó que chegavam à fábrica em uma bandeja, da qual o material era transportado através de canos de plástico até o silo onde era armazenado. No meio desse percurso, duas condições para que uma explosão ocorresse foram satisfeitas: (1) o módulo do campo elétrico ultrapassou $3,0 \times 10^6$ N/C, produzindo uma ruptura dielétrica do ar; (2) a energia da centelha resultante ultrapassou 150 mJ, fazendo com que o pó explodisse. Vamos discutir a primeira condição.

Suponha que um pó carregado *negativamente* esteja passando por um cano cilíndrico de plástico de raio $R = 5,0$ cm e que as cargas associadas ao pó estejam distribuídas uniformemente com uma densidade volumétrica ρ . (a) Usando a lei de Gauss, escreva uma expressão para o módulo do campo elétrico \vec{E} no interior do cano em função da distância r do eixo do cano. (b) O valor de E aumenta ou diminui quando r aumenta? (c) O campo \vec{E} aponta para o eixo do cilindro ou para longe do eixo? (d) Para $\rho = 1,1 \times 10^{-3}$ C/m³ (um valor típico), determine o valor máximo de E e a que distância do eixo do cano esse campo máximo ocorre. (e) O campo pode produzir uma centelha? Onde? (Esta história continua no Problema 70 do Capítulo 24.)

61 Uma casca esférica metálica de raio a e espessura insignificante possui uma carga q_a . Uma segunda casca, concêntrica com a primeira, possui um raio $b > a$ e uma carga q_b . Determine o campo elétrico em pontos situados a uma distância r do centro das cascas (a) para $r < a$; (b) para $a < r < b$; (c) para $r > b$. (d) Discuta o mé-

todo que você usaria para determinar o modo como as cargas estão distribuídas nas superfícies internas e externas das cascas.

62 Uma carga pontual $q = 1,0 \times 10^{-7}$ C é colocada no centro de uma cavidade esférica com 3,0 cm de raio aberta em um bloco de metal. Use a lei de Gauss para determinar o campo elétrico (a) a 1,5 cm de distância do centro da cavidade; (b) no interior do bloco de metal.

63 Um próton de velocidade $v = 3,00 \times 10^5$ m/s **gira em torno** de uma esfera carregada em **uma órbita** de raio $r = 1,00$ cm. Qual é a carga da esfera?

64 A Eq. 23-11 ($E = \sigma/\epsilon_0$) pode ser usada para calcular o campo elétrico em pontos situados nas vizinhanças de uma esfera condutora carregada. Aplique a equação a uma esfera condutora de raio $r = R/2,00$? (b) Qual é a razão entre o módulo do campo elétrico no ponto $r = R/2,00$ e o campo elétrico na superfície da esfera?

65 Uma carga Q está distribuída uniformemente em uma esfera de raio R . (a) Que fração da carga está contida em uma esfera de raio $r = R/2,00$? (b) Qual é a razão entre o módulo do campo elétrico no ponto $r = R/2,00$ e o campo elétrico na superfície da esfera?

66 Uma esfera carregada de raio R possui uma densidade de cargas negativas uniforme, exceto por um túnel estreito que atravessa totalmente a esfera, passando pelo centro. Um próton pode ser colocado em qualquer ponto do túnel ou de um prolongamento do túnel. Seja F_R o módulo da força eletrostática a que é submetido o próton quando se encontra na superfície da esfera. Determine, em termos de R , a que distância da superfície está o ponto no qual o módulo da força é $0,50F_R$ quando o próton se encontra (a) em um prolongamento do túnel; (b) dentro do túnel.

67 O campo elétrico no ponto P , a uma pequena distância da superfície externa de uma casca esférica metálica com 10 cm de raio interno e 20 cm de raio externo, tem um módulo de 450 N/C e aponta para longe do centro. Quando uma carga pontual desconhecida Q é colocada no centro da casca, o sentido do campo permanece o mesmo e o módulo diminui para 180 N/C. (a) Determine a carga da casca. (b) Determine o valor da carga Q . Depois que a carga Q é colocada, determine a densidade superficial de cargas (c) na superfície interna da casca; (d) na superfície externa da casca.

68 O fluxo de campo elétrico em cada face de um dado tem um valor absoluto, em unidades de 10^3 N · m²/C, igual ao número N de pontos da face ($1 \leq N \leq 6$). O fluxo é para dentro se N for ímpar e para fora se N for par. Qual é a carga no interior do dado?

69 A Fig. 23-55 mostra uma vista de perfil de três placas não condutoras de grande extensão com uma densidade uniforme de cargas. As densidades superficiais de cargas são $\sigma_1 = +2,00$ $\mu\text{C}/\text{m}^2$, $\sigma_2 = +4,00$ $\mu\text{C}/\text{m}^2$ e $\sigma_3 = -5,00$ $\mu\text{C}/\text{m}^2$; $L = 1,50$ cm. Qual é o campo elétrico no ponto P em termos dos vetores unitários?

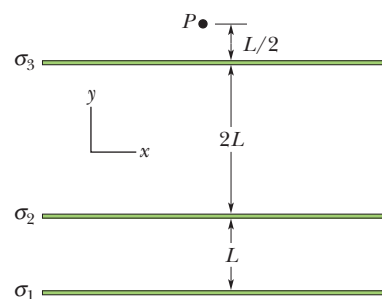


Figura 23-55 Problema 69.

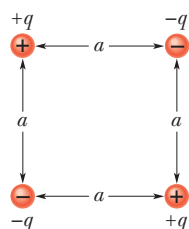


Figura 24-47 Problema 43.

••44 Na Fig. 24-48, sete partículas carregadas são mantidas fixas no lugar para formar um quadrado com 4,0 cm de lado. Qual é o trabalho necessário para deslocar para o centro do quadrado uma partícula de carga $+6e$ inicialmente em repouso a uma distância infinita?

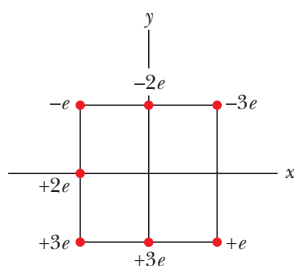


Figura 24-48 Problema 44.

••45 Uma partícula de carga q é mantida fixa no ponto P e uma segunda partícula de massa m , com a mesma carga q , é mantida inicialmente a uma distância r_1 de P . A segunda partícula é liberada. Determine a velocidade da segunda partícula quando se encontra a uma distância r_2 do ponto P . Suponha que $q = 3,1 \mu\text{C}$, $m = 20 \text{ mg}$, $r_1 = 0,90 \text{ mm}$ e $r_2 = 2,5 \text{ mm}$.

••46 Uma carga de $-9,0 \text{ nC}$ está distribuída uniformemente em um anel fino de plástico situado no plano yz , com o centro do anel na origem. Uma carga pontual de $-6,0 \text{ pC}$ está situada no ponto $x = 3,0 \text{ m}$ do eixo x . Se o raio do anel é $1,5 \text{ m}$, qual deve ser o trabalho realizado por uma força externa sobre a carga pontual para deslocá-la até a origem?

••47 Qual é a *velocidade de escape* de um elétron inicialmente em repouso na superfície de uma esfera com $1,0 \text{ cm}$ de raio e uma carga uniformemente distribuída de $1,6 \times 10^{-15} \text{ C}$? Em outras palavras, que velocidade inicial um elétron deve ter para chegar a uma distância infinita da esfera com energia cinética zero?

••48 Uma casca fina, esférica, condutora de raio R é montada em um suporte isolado e carregada até atingir um potencial de -125 V . Em seguida, um elétron é disparado na direção do centro da casca a partir do ponto P , situado a uma distância r do centro da casca ($r \gg R$). Qual deve ser a velocidade inicial v_0 do elétron para que chegue a uma distância insignificante da casca antes de parar e inverter o movimento?

••49 Dois elétrons são mantidos fixos, separados por uma distância de $2,0 \text{ cm}$. Outro elétron é arremessado a partir do infinito e para no ponto médio entre os dois elétrons. Determine a velocidade inicial do terceiro elétron.

••50 Na Fig. 24-49, determine o trabalho necessário para deslocar uma partícula de carga $Q = +16e$, inicialmente em repouso, ao longo da reta tracejada, do infinito até o ponto indicado, nas proximidades de duas partículas fixas de cargas $q_1 = +4e$ e $q_2 = -q_1/2$. Suponha que $d = 1,40 \text{ cm}$, $\theta_1 = 43^\circ$ e $\theta_2 = 60^\circ$.

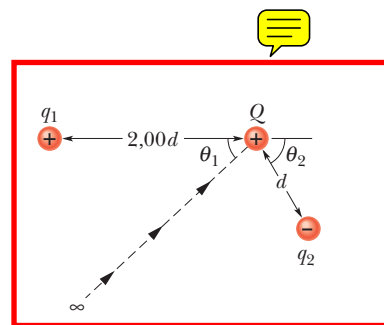


Figura 24-49 Problema 50.

••51 No retângulo da Fig. 24-50, os comprimentos dos lados são $5,0 \text{ cm}$ e 15 cm , $q_1 = -5,0 \mu\text{C}$ e $q_2 = +2,0 \mu\text{C}$. Com $V = 0$ no infinito, determine o potencial elétrico (a) no vértice A ; (b) no vértice B . (c) Determine o trabalho necessário para deslocar uma carga $q_3 = +3,0 \mu\text{C}$ de B para A ao longo da diagonal do retângulo. (d) Esse trabalho faz a energia potencial elétrica do sistema de três partículas aumentar ou diminuir? O trabalho é maior, menor ou igual se a carga q_3 é deslocada ao longo de uma trajetória (e) no interior do retângulo, mas que não coincide com a diagonal; (f) do lado de fora do retângulo?

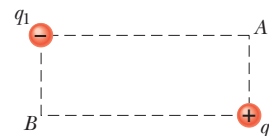


Figura 24-50 Problema 51.

••52 A Fig. 24-51a mostra um elétron que se move ao longo do eixo de um dipolo elétrico em direção ao lado negativo do dipolo. O dipolo é mantido fixo no lugar. O elétron estava inicialmente a uma distância muito grande do dipolo, com uma energia cinética de 100 eV . A Fig. 24-51b mostra a energia cinética K do elétron em função da distância r em relação ao centro do dipolo. A escala do eixo horizontal é definida por $r_s = 0,10 \text{ m}$. Qual é o módulo do momento do dipolo?

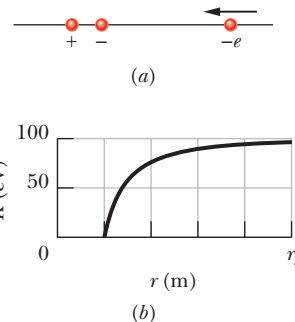


Figura 24-51 Problema 52.

••53 Duas pequenas esferas metálicas A e B , de massas $m_A = 5,00 \text{ g}$ e $m_B = 10,0 \text{ g}$, possuem a mesma carga positiva $q = 5,00 \mu\text{C}$. As esferas estão ligadas por um fio não condutor de massa insignificante e comprimento $d = 1,00 \text{ m}$ que é muito maior que os raios das esferas. (a) Qual é a energia potencial elétrica do sistema? (b) Suponha que o fio seja cortado. Qual é a aceleração de cada esfera nesse instante? (c) Qual é a velocidade de cada esfera muito tempo depois de o fio ter sido cortado?

••54 Um pósitron (carga $+e$, massa igual à do elétron) está se movendo com uma velocidade de $1,0 \times 10^7 \text{ m/s}$ no sentido positivo

configuração possui menor energia que a primeira? (b) Para esse valor de N , considere um dos elétrons do anel, e_0 . Quantos outros elétrons do anel estão mais próximos de e_0 que o elétron central?

Seção 24-12 Potencial de um Condutor Carregado

•62 A esfera 1, de raio R_1 , possui uma carga positiva q . A esfera 2, de raio $2,00R_1$, está muito afastada da esfera 1 e inicialmente descarregada. Quando as esferas são ligadas por um fio suficientemente fino para que a carga que contém possa ser desprezada, (a) o potencial V_1 da esfera 1 se torna maior, menor ou igual ao potencial V_2 da esfera 2? (b) Que fração da carga q permanece na esfera 1? (c) Que fração da carga q é transferida para a esfera 2? (d) Qual é a razão σ_1/σ_2 entre as densidades superficiais de carga das duas esferas?

•63 Os centros de duas esferas metálicas, ambas com 3,0 cm de raio, estão separados por uma distância de 2,0 m. A esfera 1 possui uma carga de $+1,0 \times 10^{-8}$ C e a esfera 2 uma carga de $-3,0 \times 10^{-8}$ C. Suponha que a distância entre as esferas seja suficiente para que se possa supor que a carga das esferas está uniformemente distribuída (ou seja, suponha que as esferas não se afetam mutuamente). Com $V = 0$ no infinito, determine (a) o potencial no ponto a meio caminho entre os centros das esferas; (b) o potencial na superfície da esfera 1; (c) o potencial na superfície da esfera 2.

•64 Um esfera oca de metal possui um potencial de +400 V em relação à terra (definida como $V = 0$) e uma carga de 5×10^{-9} C. Determine o potencial elétrico no centro da esfera.

•65 Qual é a carga em excesso de uma esfera condutora de raio $r = 0,15$ m se o potencial da esfera é 1500 V e $V = 0$ no infinito?


••66 Duas cascas condutoras concêntricas têm raios $R_1 = 0,500$ m e $R_2 = 1,00$ m, cargas uniformes $q_1 = +2,00 \mu\text{C}$ e $q_2 = +1,00 \mu\text{C}$ e espessura insignificante. Determine o módulo do campo elétrico E a uma distância do centro de curvatura das cascas (a) $r = 4,00$; (b) $r = 0,700$ m; (c) $r = 0,200$ m. Com $V = 0$ no infinito, determine V para (d) $r = 4,00$ m; (e) $r = 1,00$ m; (f) $r = 0,700$ m; (g) $r = 0,500$ m; (h) $r = 0,200$ m; (i) $r = 0$. (j) Plote $E(r)$ e $V(r)$.

••67 Uma esfera metálica de 15 cm de raio possui uma carga de $3,0 \times 10^{-8}$ C. (a) Qual é o campo elétrico na superfície da esfera? (b) Se $V = 0$ no infinito, qual é o potencial elétrico na superfície da esfera? (c) A que distância da superfície da esfera o potencial é 500 V menor que na superfície da esfera?

Problemas Adicionais

68 As cargas e coordenadas de duas cargas pontuais situadas no plano xy são $q_1 = +3,00 \times 10^{-6}$ C, $x = +3,50$ cm, $y = +0,500$ cm e $q_2 = -4,00 \times 10^{-6}$ C, $x = -2,00$ cm, $y = +1,50$ cm. Qual é o trabalho necessário para colocar as cargas nas posições especificadas, supondo que a distância inicial entre elas é infinita?

69 Um cilindro condutor longo tem 2,0 cm de raio. O campo elétrico na superfície do cilindro é 160 N/C, orientado radialmente para longe do eixo. Sejam A , B e C pontos situados, respectivamente, a 1,0 cm, 2,0 cm e 5,0 cm de distância do eixo do cilindro. Determine (a) o módulo do campo elétrico no ponto C ; (b) a diferença de potencial $V_B - V_C$; (c) a diferença de potencial $V_A - V_B$.

70  *O mistério do chocolate em pó.* Esta história começa no Problema 60 do Capítulo 23. (a) A partir da resposta do item (a) do citado problema, determine uma expressão para o potencial elétrico em função da distância r a partir do eixo do cano. (O potencial é zero na parede do cano, que está ligado à terra.) (b) Para uma densidade volumétrica de cargas típica, $\rho = -1,1 \times 10^{-3}$ C/m³, qual

é a diferença de potencial elétrico entre o eixo do cano e a parede interna? (A história continua no Problema 60 do Capítulo 25.)

71 A partir de Eq. 24-30, escreva uma expressão para o campo elétrico produzido por um dipolo em um ponto do eixo do dipolo.

72 O módulo E de um certo campo elétrico varia com a distância r segundo a equação $E = A/r^4$, onde A é uma constante em volts-metros cúbicos. Em termos de A , qual é o valor absoluto da diferença de potencial elétrico entre os pontos $r = 2,00$ m e $r = 3,00$ m?

73 (a) Se uma esfera condutora com 10 cm de raio tem uma carga de $4,0 \mu\text{C}$ e $V = 0$ no infinito, qual é o potencial na superfície da esfera? (b) Esta situação é possível, dado que o ar em torno da esfera sofre ruptura dielétrica quando o campo ultrapassa 3,0 MV/m?

74 Três partículas, de cargas $q_1 = +10 \mu\text{C}$, $q_2 = -20 \mu\text{C}$ e $q_3 = +30 \mu\text{C}$, são posicionadas nos vértices de um triângulo isósceles, como mostra a Fig. 24-57. Se $a = 10$ cm e $b = 6,0$ cm, determine qual deve ser o trabalho realizado por um agente externo (a) para trocar as posições de q_1 e q_3 ; (b) para trocar as posições de q_1 e q_2 .

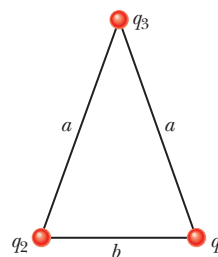


Figura 24-57 Problema 74.

75 Um campo elétrico de aproximadamente 100 V/m é frequentemente observado nas vizinhanças da superfície terrestre. Se esse campo existisse na Terra inteira, qual seria o potencial elétrico de um ponto na superfície? (Considere $V = 0$ no infinito.)

76 Uma esfera gaussiana de 4,00 cm de raio envolve uma esfera de 1,00 cm de raio que contém uma distribuição uniforme de cargas. As duas esferas são concêntricas e o fluxo elétrico através da superfície da esfera gaussiana é $+5,60 \times 10^4$ N · m²/C. Qual é o potencial elétrico a 12,0 cm do centro das esferas?

77 Em uma experiência de Millikan com gotas de óleo (Seção 22-8), um campo elétrico uniforme de $1,92 \times 10^5$ N/C é mantido na região entre duas placas separadas por uma distância de 1,50 cm. Calcule a diferença de potencial entre as placas.

78 A Fig. 24-58 mostra três arcos de circunferência não condutores de raio $R = 8,50$ cm. As cargas dos arcos são $q_1 = 4,52$ pC, $q_2 = -2,00q_1$ e $q_3 = +3,00q_1$. Com $V = 0$ no infinito, qual é o potencial elétrico dos arcos no centro de curvatura comum?

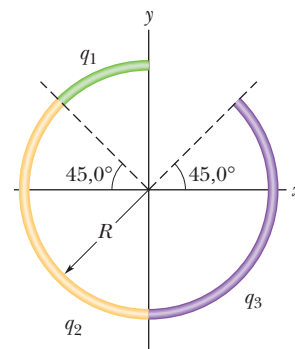


Figura 24-58 Problema 78.

Tabela 26-1

Resistividade de Alguns Materiais à Temperatura Ambiente (20°C)

Material	Resistividade, ρ ($\Omega \cdot \text{m}$)	Coefficiente de Temperatura da Resistividade, α (K^{-1})
<i>Metais Típicos</i>		
Prata	$1,62 \times 10^{-8}$	$4,1 \times 10^{-3}$
Cobre	$1,69 \times 10^{-8}$	$4,3 \times 10^{-3}$
Ouro	$2,35 \times 10^{-8}$	$4,0 \times 10^{-3}$
Alumínio	$2,75 \times 10^{-8}$	$4,4 \times 10^{-3}$
Manganin ^a	$4,82 \times 10^{-8}$	$0,002 \times 10^{-3}$
Tungstênio	$5,25 \times 10^{-8}$	$4,5 \times 10^{-3}$
Ferro	$9,68 \times 10^{-8}$	$6,5 \times 10^{-3}$
Platina	$10,6 \times 10^{-8}$	$3,9 \times 10^{-3}$
<i>Semicondutores Típicos</i>		
Silício puro	$2,5 \times 10^3$	-70×10^{-3}
Silício ^b tipo <i>n</i>	$8,7 \times 10^{-4}$	
Silício ^c tipo <i>p</i>	$2,8 \times 10^{-3}$	
<i>Isolantes Típicos</i>		
Vidro	$10^{10} - 10^{14}$	
Quartzo fundido	$\sim 10^{16}$	

^aUma liga especial com um baixo valor de α .^bSilício dopado com 10^{23} átomos/ m^{-3} de fósforo.^cSilício dopado com 10^{23} átomos/ m^{-3} de alumínio.

Cálculo da Resistência a partir da Resistividade

Vamos chamar atenção mais uma vez para uma importante diferença:



A resistência é uma propriedade de um dispositivo; a resistividade é uma propriedade de um material.

Quando conhecemos a resistividade de um material, como o cobre, por exemplo, não é difícil calcular a resistência de um fio feito desse material. Seja A a área da seção reta, L o comprimento e V a diferença de potencial entre as extremidades do fio (Fig. 26-9). Se as linhas de corrente que representam a densidade de corrente são uniformes ao longo de toda a seção reta, o campo elétrico e a densidade de corrente são iguais em todos os pontos do fio e, de acordo com as Eqs. 24-42 e 26-5, têm os valores

$$E = V/L \quad \text{e} \quad J = i/A. \quad (26-14)$$

Nesse caso, podemos combinar as Eqs. 26-10 e 26-14 para obter

$$\rho = \frac{E}{J} = \frac{V/L}{i/A}. \quad (26-15)$$

Como V/i é a resistência R , a Eq. 26-15 pode ser escrita na forma

$$R = \rho \frac{L}{A}. \quad (26-16)$$

A Eq. 26-16 se aplica apenas a condutores isotrópicos homogêneos de seção reta uniforme, com a diferença de potencial aplicada como na Fig. 26-8b.

As grandezas macroscópicas V , i e R são de grande interesse quando estamos realizando medidas elétricas em condutores específicos. São essas as grandezas que

A corrente está relacionada à diferença de potencial.

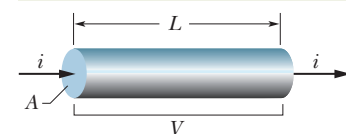


Figura 26-9 Uma diferença de potencial V é aplicada às extremidades de um fio de comprimento L e seção reta A , estabelecendo uma corrente i .

26-5 Lei de Ohm

Como vimos na Seção 26-4, o resistor é um condutor com um valor específico de resistência. A resistência de um resistor não depende do valor absoluto e do sentido (*polaridade*) da diferença de potencial aplicada. Outros dispositivos, porém, podem ter uma resistência que varia de acordo com a diferença de potencial aplicada.

A Fig. 26-11a mostra como as propriedades elétricas dos dispositivos podem ser investigadas. Uma diferença de potencial V é aplicada aos terminais do dispositivo que está sendo testado e a corrente resultante i é medida em função de V . A polaridade de V é tomada arbitrariamente como positiva quando o terminal da esquerda do dispositivo possui um potencial maior que o terminal da direita. O sentido da corrente (da esquerda para a direita) é tomado arbitrariamente como positivo. Nesse caso, a polaridade oposta de V (com o terminal da direita com um potencial maior) e a corrente resultante são tomadas como negativas.

A Fig. 26-11b mostra o gráfico de i em função de V para um certo dispositivo. Como o gráfico é uma linha reta que passa pela origem, a razão i/V (que corresponde à inclinação da reta) é a mesma para qualquer valor de V . Isso significa que a resistência $R = V/i$ do dispositivo é independente do valor absoluto e da polaridade da diferença de potencial aplicada V .

A Fig. 26-11c mostra o gráfico de i em função de V para outro dispositivo. Nesse caso, só existe corrente quando a polaridade de V é positiva e a diferença de potencial aplicada é maior que 1,5 V. Além disso, no trecho do gráfico em que existe corrente, a razão entre i e V não é constante, mas depende do valor da diferença de tensão aplicada V .

Em casos como esses, fazemos uma distinção entre os dispositivos que obedecem à lei de Ohm e os que não obedecem à lei de Ohm.



A lei de Ohm é a afirmação de que a corrente que atravessa um dispositivo é *sempre* diretamente proporcional à diferença de potencial aplicada ao dispositivo.

(Hoje sabemos que essa afirmação é correta apenas em certas situações; entretanto, por motivos históricos, continua a ser chamada de “lei”.) O dispositivo da Fig. 26-11b, que é um resistor de $1000\ \Omega$, obedece à lei de Ohm. O dispositivo da Fig. 26-11c, que é um diodo semiconductor, não obedece à lei de Ohm.



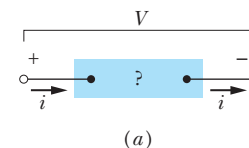
Um dispositivo obedece à lei de Ohm se a resistência do dispositivo não depende do valor absoluto nem da polaridade da diferença de potencial aplicada.

É frequente ouvir-se a afirmação de que $V = iR$ é uma expressão matemática da lei de Ohm. Isso não é verdade! A equação é usada para definir o conceito de resistência e se aplica a todos os dispositivos que conduzem corrente elétrica, mesmo aos que não obedecem à lei de Ohm. Se medimos a diferença de potencial V entre os terminais de qualquer dispositivo e a corrente i que atravessa o dispositivo ao ser submetido a essa diferença de potencial, podemos calcular a resistência do dispositivo *para esse valor de* V como $R = V/i$, mesmo que se trate de um dispositivo, como um diodo semiconductor, que não obedece à lei de Ohm. A essência da lei de Ohm, por outro lado, está no fato de que o gráfico de i em função de V é linear, ou seja, de que R não depende de V .

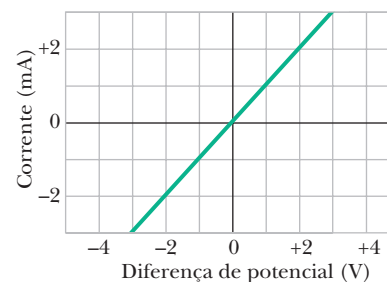
Podemos expressar a lei de Ohm de modo mais geral se nos concentrarmos nos *materiais* e não nos *dispositivos*. Nesse caso, a relação relevante passa a ser a Eq. 26-11 ($\vec{E} = \rho \vec{J}$) em vez de $V = iR$.



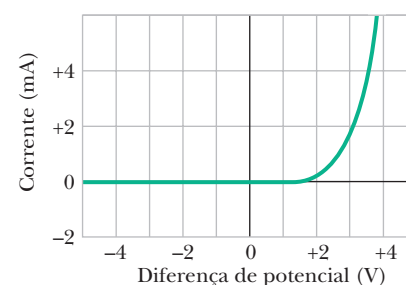
Um material obedece à lei de Ohm **se a resistividade** do material não depende do módulo nem da direção do campo elétrico aplicado.



(a)



(b)



(c)

Figura 26-11 (a) Uma diferença de potencial V é aplicada aos terminais de um dispositivo, estabelecendo uma corrente i . (b) Gráfico da corrente i em função da diferença de potencial aplicada V quando o dispositivo é um resistor de $1000\ \Omega$. (c) O mesmo tipo de gráfico quando o dispositivo é um diodo semiconductor.

térmica nos dois resistores. As curvas 1 e 2 da Fig. 26-33b mostram a energia térmica E_t produzida pelos dois resistores em função do tempo t . A escala vertical é definida por $E_{t,s} = 40,0$ mJ e a escala horizontal é definida por $t_s = 5,00$ s. Qual é a potência da bateria?

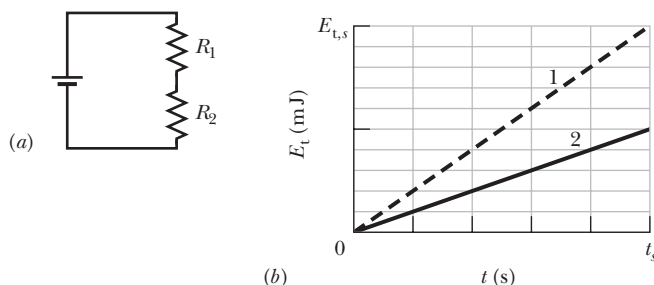


Figura 26-33 Problema 50.

••51 O fio C e o fio D são feitos de materiais diferentes e têm comprimentos $L_C = L_D = 1,0$ m. A resistividade e o diâmetro do fio C são $2,0 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$ e $1,00$ mm e a resistividade e o diâmetro do fio D são $1,0 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$ e $0,50$ mm. Os fios são unidos da forma mostrada na Fig. 26-34 e submetidos a uma corrente de $2,0$ A. Determine a diferença de potencial elétrico (a) entre os pontos 1 e 2; (b) entre os pontos 2 e 3. Determine a potência dissipada (c) entre os pontos 1 e 2; (d) entre os pontos 2 e 3.

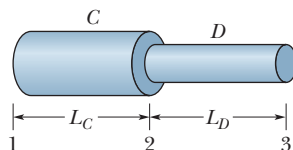


Figura 26-34 Problema 51.

••52 O módulo da densidade de corrente em um fio circular com $3,00$ mm de raio é dado por $J = (2,75 \times 10^{10} \text{ A/m}^4)r^2$, onde r é a distância radial. O potencial aplicado às extremidades do fio é $60,0$ V. Qual é a energia convertida em energia térmica em $1,00$ h?

••53 Uma diferença de potencial de 120 V é aplicada a um aquecedor de ambiente de 500 W. (a) Qual é a resistência do elemento de aquecimento? (b) Qual é o número de elétrons por segundo que passam pelo elemento de aquecimento?

•••54 A Fig. 26-35a mostra uma barra de material resistivo. A resistência por unidade de comprimento da barra aumenta no sentido positivo do eixo x . Em qualquer posição x ao longo da barra, a resistência dR de um elemento de largura dx é dada por $dR = 5,00x \, dx$, onde dR está em ohms e x em metros. A Fig. 26-35b mostra um desses elementos de resistência. O trecho da barra entre $x = 0$ e $x = L$ é cortado e ligado aos terminais de uma bateria com uma diferença de potencial $V = 5,0$ V (Fig. 26-35c). Qual deve ser o valor de L para que a potência dissipada pelo trecho cortado seja 200 W?

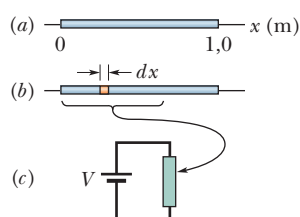


Figura 26-35 Problema 54.

Problemas Adicionais

55 Um aquecedor de Nichrome dissipa 500 W quando a diferença de potencial aplicada é 110 V e a temperatura do fio é 800°C . Qual será a potência dissipada se a temperatura do fio for mantida em 200°C por imersão em um banho de óleo? A diferença de potencial é a mesma nos dois casos e o valor de α para o Nichrome a 800°C é $4,0 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$.

56 Uma diferença de potencial de $1,20$ V é aplicada a $33,0$ m de um fio de cobre calibre 18 (diâmetro: $0,0400$ polegada). Calcule (a) a corrente; (b) o módulo da densidade de corrente no interior do fio; (c) o módulo do campo elétrico no interior do fio; (d) a potência dissipada no fio.

57 Um dispositivo de $18,0$ W funciona com uma diferença de potencial de $9,00$ V. Qual é a carga que atravessa o dispositivo em $4,00$ h?

58 Uma barra de alumínio de seção reta quadrada tem $1,3$ m de comprimento e $5,2$ mm de lado. (a) Qual é a resistência entre as extremidades da barra? (b) Qual deve ser o diâmetro de uma barra cilíndrica de cobre com $1,3$ m de comprimento para que a resistência seja a mesma que a da barra de alumínio?

59 Uma barra de metal cilíndrica tem $1,60$ m de comprimento e $5,50$ mm de diâmetro. A resistência entre as duas extremidades (a 20°C) é $1,09 \times 10^{-3} \Omega$. (a) Qual é o material do fio? (b) Um disco circular, com $2,00$ cm de diâmetro e $1,00$ mm de espessura, é fabricado com o mesmo material. Qual é a resistência entre as faces do disco, supondo que cada face é uma superfície equipotencial?

60 O mistério do chocolate em pó. Esta história começou no Problema 60 do Capítulo 23 e continuou nos Capítulos 24 e 25. O pó de chocolate foi transportado para o silo em um cano de raio R , com velocidade v e densidade uniforme de cargas ρ . (a) Determine uma expressão para a corrente i (o fluxo das cargas elétricas associadas ao pó) em uma seção reta do cano. (b) Calcule o valor de i para as condições da fábrica: raio do cano $R = 5,0$ cm, velocidade $v = 2,0$ m/s e densidade de cargas $\rho = 1,1 \times 10^{-3} \text{ C/m}^3$.

Se o pó sofresse uma variação de potencial elétrico V , a energia do pó poderia ser transferida para uma centelha a uma taxa $P = iV$. (c) Poderia haver essa transferência no interior do cano devido à diferença de potencial radial discutida no Problema 70 do Capítulo 24?

Quando o pó saiu do cano e entrou no silo, o potencial elétrico do pó mudou. O valor absoluto dessa variação foi pelo menos igual à diferença de potencial radial no interior do cano (calculada no Problema 70 do Capítulo 24). (d) Tomando esse valor para a diferença de potencial e usando a corrente calculada no item (b) do presente problema, determine a taxa com a qual a energia pode ter sido transferida do pó para uma centelha quando o pó deixou o cano. (e) Se uma centelha ocorreu no momento em que o pó deixou o tubo e durou $0,20$ s (uma estimativa razoável), qual foi a energia transferida para a centelha?

Lembre-se de que, como foi visto no Problema 60 do Capítulo 23, é necessária uma transferência de energia de no mínimo 150 mJ para provocar uma explosão. (f) Onde ocorreu provavelmente a explosão: na nuvem de pó da bandeja (Problema 60 do Capítulo 25), no interior do cano ou na entrada do silo?

61 Um feixe de partículas alfa ($q = +2e$) com uma energia cinética de 20 MeV corresponde a uma corrente de $0,25 \mu\text{A}$. (a) Se o feixe incide perpendicularmente em uma superfície plana, quantas partículas alfa atingem a superfície em $3,0$ s? (b) Quantas partículas

alfa existem em um comprimento de 20 cm do feixe? (c) Qual é a diferença de potencial necessária para acelerar as partículas alfa, a partir do repouso, para que adquiram uma energia de 20 MeV?

62 Um resistor com uma diferença de potencial de 200 V dissipa uma potência de 3000 W. Qual é a resistência do resistor?

63 Um elemento de aquecimento de 2,0 kW de uma secadora tem 80 cm de comprimento. Se 10 cm do elemento são removidos, qual é a potência dissipada pelo novo elemento para uma diferença de potencial de 120 V?

64 Um resistor cilíndrico com 5,0 mm de raio e 2,0 cm de comprimento é feito de um material cuja resistividade é $3,5 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{m}$. Determine (a) o módulo da densidade de corrente; (b) a diferença de potencial para que a potência dissipada no resistor seja 1,0 W.

65 Uma diferença de potencial V é aplicada a um fio de seção reta A , comprimento L e resistividade ρ . Estamos interessados em mudar a diferença de potencial aplicada e esticar o fio para que a potência dissipada seja multiplicada por 30,0 e a corrente seja multiplicada por 4,00. Supondo que a densidade do fio não muda, determine (a) a razão entre o novo comprimento $e L$; (b) a razão entre a nova seção $e A$.

66 Os faróis de um carro em movimento consomem 10 A do alternador de 12 V, que é acionado pelo motor. Suponha que o alternador tenha uma eficiência de 80% (a potência elétrica de saída é 80% da potência mecânica de entrada) e calcule o número de horsepower que o motor precisa fornecer para manter os faróis acesos.

67 Um aquecedor de 500 W foi projetado para funcionar com uma diferença de potencial de 115 V. (a) Qual é a queda percentual da potência dissipada se a diferença de potencial aplicada diminui para 110 V? Suponha que a resistência permanece a mesma. (b) Se a variação da resistência com a temperatura for levada em consideração, a queda de potência será maior ou menor que o valor calculado no item (a)?

68 Os enrolamentos de cobre de um motor têm uma resistência de 50Ω a 20°C quando o motor está frio. Depois de o motor trabalhar durante várias horas, a resistência aumenta para 58Ω . Qual é a nova temperatura dos enrolamentos? Suponha que as dimensões dos enrolamentos não variam. (*Sugestão:* use a Tabela 26-1.)

69 Qual é a energia consumida em 2,00 h por uma resistência elétrica de 400Ω quando a diferença de potencial aplicada à resistência é 90,0 V?

70 Uma lagarta de 4,0 cm de comprimento rasteja no mesmo sentido que a deriva de elétrons em um fio de cobre de 5,2 mm de diâmetro que conduz uma corrente uniforme de 12 A. (a) Qual é a diferença de potencial entre as extremidades da lagarta? (b) A cauda da lagarta é positiva ou negativa em relação à cabeça? (c) Quanto tempo a lagarta leva para rastejar 1,0 cm com a mesma velocidade que a velocidade de deriva dos elétrons no fio? (O número de portadores de carga por unidade de volume é $8,49 \times 10^{28} \text{ m}^{-3}$.)

71 (a) Para que temperatura a resistência de um fio de cobre é o dobro da resistência a $20,0^\circ\text{C}$? (Use $20,0^\circ\text{C}$ como ponto de referência na Eq. 26-17; compare a resposta com a Fig. 26-10.) (b) A “temperatura para o dobro da resistência” é a mesma para todos os fios de cobre, independentemente da forma e do tamanho?

72 Um trilho de aço tem uma seção reta de $56,0 \text{ cm}^2$. Qual é a resistência de 10,0 km de trilhos? A resistividade do aço é $3,00 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$.

73 Uma bobina de fio de Nichrome é imersa em um líquido. (Nichrome é uma liga de níquel, cromo e ferro muito usada em elementos de aquecimento.) Quando a diferença de potencial entre as extremidades da bobina é 12 V e a corrente na bobina é 5,2 A, o líquido evapora à taxa de 21 mg/s. Determine o calor de vaporização do líquido. (*Sugestão:* veja a Seção 18-8.)

74 A densidade de corrente em um fio é $2,0 \times 10^6 \text{ A/m}^2$, o comprimento do fio é 5,0 m e a densidade de elétrons de condução é $8,49 \times 10^{28} \text{ m}^{-3}$. Quanto tempo um elétron leva (em média) para atravessar o fio de um extremo a outro?

75 Um tubo de raios X funciona com uma corrente de 7,00 mA e uma diferença de potencial de 80,0 kV. Qual é a potência do tubo em watts?

76 Uma corrente é estabelecida em um tubo de descarga de gás quando uma diferença de potencial suficientemente elevada é aplicada a dois eletrodos situados no interior do tubo. O gás se ioniza; elétrons se movem na direção do eletrodo positivo e íons positivos monoionizados se movem na direção do terminal negativo. (a) Qual é a corrente em um tubo de descarga de hidrogênio no qual $3,1 \times 10^{18}$ elétrons e $1,1 \times 10^{18}$ prótons atravessam uma seção reta do tubo por segundo? (b) O sentido da densidade de corrente \vec{J} é do eletrodo positivo para o eletrodo negativo ou do eletrodo negativo para o eletrodo positivo?

••37 Na Fig. 27-48, $R_1 = 2,00 \, \Omega$, $R_2 = 5,00 \, \Omega$ e a fonte é ideal. Qual é o valor de R_3 que maximiza a potência dissipada na resistência 3?

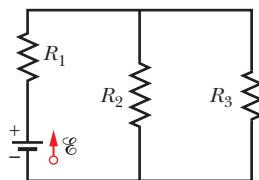


Figura 27-48 Problemas 37 e 98.

••38 A Fig. 27-49 mostra uma parte de um circuito. As resistências são $R_1 = 2,0 \, \Omega$, $R_2 = 4,0 \, \Omega$ e $R_3 = 6,0 \, \Omega$ e a corrente indicada é $i = 6,0 \, \text{A}$. A diferença de potencial entre os pontos A e B que ligam o conjunto ao resto do circuito é $V_A - V_B = 78 \, \text{V}$. (a) O elemento representado como “?” está absorvendo energia do circuito ou cedendo energia ao circuito? (b) Qual é a potência absorvida ou fornecida pelo elemento desconhecido?

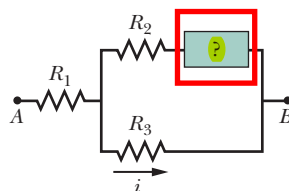


Figura 27-49 Problema 38.

••39 Na Fig. 27-50, duas fontes de força eletromotriz $\mathcal{E} = 12,0 \, \text{V}$ e resistência interna $r = 0,300 \, \Omega$ são ligadas em paralelo com uma resistência R . (a) Para que valor de R a potência dissipada no resistor é máxima? (b) Qual é o valor da potência máxima?

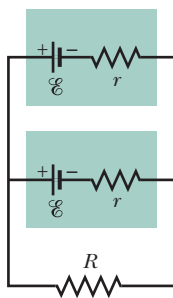


Figura 27-50 Problemas 39 e 40.

••40 Duas fontes iguais de força eletromotriz $\mathcal{E} = 12,0 \, \text{V}$ e resistência interna $r = 0,200 \, \Omega$ podem ser ligadas a uma resistência R em paralelo (Fig. 27-50) ou em série (Fig. 27-51). Se $R = 2,00r$, qual é a corrente i na resistência R (a) no caso da ligação em paralelo; (b) no caso da ligação em série? (c) Em que tipo de ligação a corrente i é maior? Se $R = r/2,00$, qual é a corrente na resistência R (d) no caso da ligação em paralelo; (e) no caso da ligação em série? (f) Em que tipo de ligação a corrente i é maior?

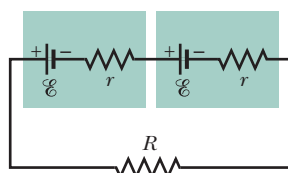


Figura 27-51 Problema 40.

••41 Na Fig. 27-41, $\mathcal{E}_1 = 3,00 \, \text{V}$, $\mathcal{E}_2 = 1,00 \, \text{V}$, $R_1 = 4,00 \, \Omega$, $R_2 = 2,00 \, \Omega$, $R_3 = 5,00 \, \Omega$ e as duas fontes são ideais. Determine a potência dissipada (a) em R_1 ; (b) em R_2 ; (c) em R_3 . Determine a potência (d) da fonte 1; (e) da fonte 2.

••42 Na Fig. 27-52, um conjunto de n resistores em paralelo é ligado em série a um resistor e a uma fonte ideal. Todos os resistores têm a mesma resistência. Se um outro resistor de mesmo valor fosse ligado em paralelo com o conjunto, a corrente na fonte sofreria uma variação de 1,25%. Qual é o valor de n ?

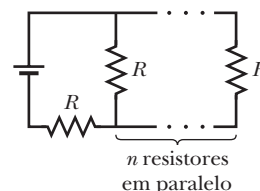


Figura 27-52 Problema 42.

••43 O leitor dispõe de um suprimento de resistores de $10 \, \Omega$, capazes de dissipar apenas $1,0 \, \text{W}$ sem serem inutilizados. Qual é o número mínimo desses resistores que é preciso combinar em série ou em paralelo para obter uma resistência de $10 \, \Omega$ capaz de dissipar $5,0 \, \text{W}$?

••44 Na Fig. 27-53, $R_1 = 100 \, \Omega$, $R_2 = R_3 = 50,0 \, \Omega$, $R_4 = 75,0 \, \Omega$ e a força eletromotriz da fonte ideal é $\mathcal{E} = 6,00 \, \text{V}$. (a) Determine a resistência equivalente. Determine a corrente (b) na resistência 1; (c) na resistência 2; (d) na resistência 3; (e) na resistência 4.

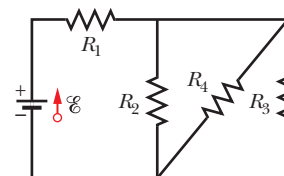


Figura 27-53 Problemas 44 e 48.

••45 Na Fig. 27-54, as resistências são $R_1 = 1,0 \, \Omega$ e $R_2 = 2,0 \, \Omega$ e as forças eletromotrices das fontes ideais são $\mathcal{E}_1 = 2,0 \, \text{V}$, $\mathcal{E}_2 = 4,0 \, \text{V}$ e $\mathcal{E}_3 = 4,0 \, \text{V}$. Determine (a) o valor absoluto e (b) o sentido (para cima ou para baixo) da corrente na fonte 1; (c) o valor absoluto e (d) o sentido da corrente na fonte 2; (e) o valor absoluto e (f) o sentido da corrente na fonte 3; (g) a diferença de potencial $V_a - V_b$.

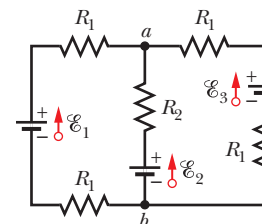


Figura 27-54 Problema 45.

••46 Na Fig. 27-55a, o resistor 3 é um resistor variável e a força eletromotriz da fonte ideal é $\mathcal{E} = 12 \, \text{V}$. A Fig. 27-55b mostra a corrente i na fonte em função de R_3 . A escala horizontal é definida por $R_{3s} = 20 \, \Omega$. A curva tem uma assíntota de $2,0 \, \text{mA}$ para $R_3 \rightarrow \infty$. Determine (a) a resistência R_1 ; (b) a resistência R_2 .

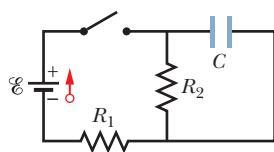


Figura 27-66 Problemas 65 e 99.

••66 A Fig. 27-67 mostra dois circuitos com um capacitor carregado que pode ser descarregado através de um resistor quando uma chave é fechada. Na Fig. 27-67a, $R_1 = 20,0 \, \Omega$ e $C_1 = 5,00 \, \mu\text{F}$. Na Fig. 27-67b, $R_2 = 10,0 \, \Omega$ e $C_2 = 8,00 \, \mu\text{F}$. A razão entre as cargas iniciais dos dois capacitores é $q_{02}/q_{01} = 1,50$. No instante $t = 0$, as duas chaves são fechadas. Em que instante t os dois capacitores possuem a mesma carga?

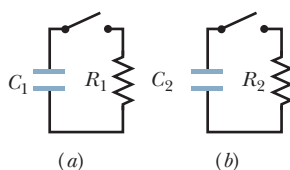


Figura 27-67 Problema 66.

••67 A diferença de potencial entre as placas de um capacitor de $2,0 \, \mu\text{F}$ com fuga (o que significa que há uma passagem de carga de uma placa para a outra) diminui para um quarto do valor inicial em $2,0 \, \text{s}$. Qual é a resistência equivalente entre as placas do capacitor?

••68 Um capacitor de $1,0 \, \mu\text{F}$ com uma energia inicial armazenada de $0,50 \, \text{J}$ é descarregado através de um resistor de $1,0 \, \text{M}\Omega$. (a) Qual é a carga inicial do capacitor? (b) Qual é a corrente no resistor quando a descarga começa? Escreva expressões que permitam calcular, em função do tempo t , (c) a diferença de potencial V_C no capacitor, (d) a diferença de potencial V_R no resistor e (e) a potência P_R dissipada pelo resistor.

•••69 Um resistor de $3,00 \, \text{M}\Omega$ e um capacitor de $1,00 \, \mu\text{F}$ são ligados em série com uma fonte ideal de força eletromotriz $\mathcal{E} = 4,00 \, \text{V}$. Depois de transcorrido $1,00 \, \text{s}$, determine (a) a taxa de aumento da carga do capacitor; (b) a taxa de armazenamento de energia no capacitor; (c) a taxa de dissipação de energia no resistor; (d) a taxa de fornecimento de energia pela fonte.

Problemas Adicionais

70 Cada uma das seis fontes reais da Fig. 27-68 possui uma força eletromotriz de $20 \, \text{V}$ e uma resistência de $4,0 \, \Omega$. (a) Qual é a corrente na resistência (externa) $R = 4,0 \, \Omega$? (b) Qual é a diferença de potencial entre os terminais de uma das fontes? (c) Qual é a potência fornecida por uma das fontes? (d) Qual é a potência dissipada na resistência interna de uma das fontes?

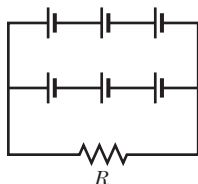


Figura 27-68 Problema 70.

71 Na Fig. 27-69, $R_1 = 20,0 \, \Omega$, $R_2 = 10,0 \, \Omega$ e a força eletromotriz da fonte ideal é $\mathcal{E} = 120 \, \text{V}$. Determine a corrente no ponto a (a) com apenas a chave S_1 fechada; (b) com apenas as chaves S_1 e S_2 fechadas; (c) com as três chaves fechadas.

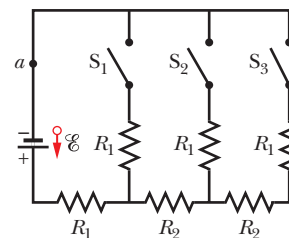


Figura 27-69 Problema 71.

72 Na Fig. 27-70, a força eletromotriz da fonte ideal é $\mathcal{E} = 30,0 \, \text{V}$ e as resistências são $R_1 = R_2 = 14 \, \Omega$, $R_3 = R_4 = R_5 = 6,0 \, \Omega$, $R_6 = 2,0 \, \Omega$ e $R_7 = 1,5 \, \Omega$. Determine (a) i_2 ; (b) i_4 ; (c) i_1 ; (d) i_3 ; (e) i_5 .

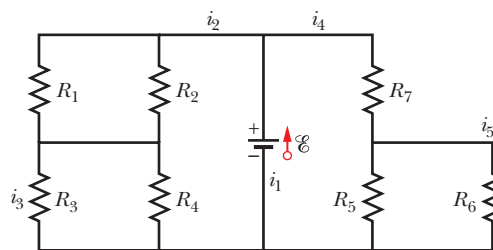


Figura 27-70 Problema 72.

73 Os fios A e B , ambos com $40,0 \, \text{m}$ de comprimento e $2,60 \, \text{mm}$ de diâmetro, são ligados em série. Uma diferença de potencial de $60,0 \, \text{V}$ é aplicada às extremidades do fio composto. As resistências são $R_A = 0,127 \, \Omega$ e $R_B = 0,729 \, \Omega$. Para o fio A , determine (a) o módulo J da densidade de corrente e (b) a diferença de potencial V . (c) De que material é feito o fio A (veja a Tabela 26-1)? Para o fio B , determine (d) J e (e) V . (f) De que material é feito o fio B ?

74 Determine (a) o valor absoluto e (b) o sentido (para cima ou para baixo) da corrente i na Fig. 27-71, onde todas as resistências são de $4,0 \, \Omega$ e todas as fontes são ideais e têm uma força eletromotriz de $10 \, \text{V}$. (Sugestão: este problema pode ser resolvido de cabeça.)

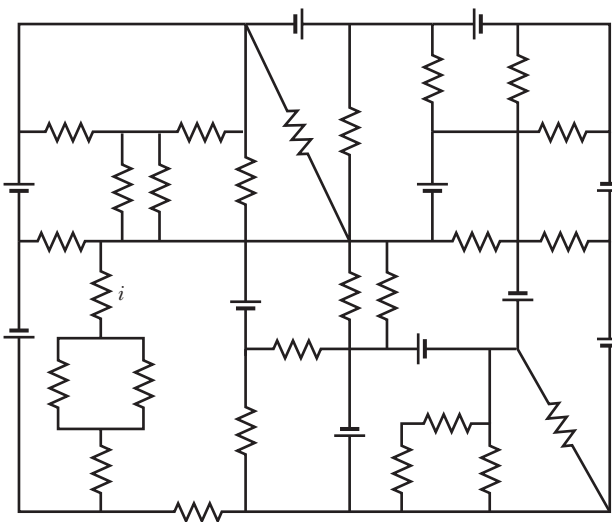


Figura 27-71 Problema 74.

75 Suponha que, enquanto você está sentado em uma cadeira, a separação de cargas entre sua roupa e a cadeira faça com que seu corpo fique a um potencial de $200 \, \text{V}$, com uma capacitância de $150 \, \text{pF}$ entre você e a cadeira. Quando você se levanta, o aumento da distância entre seu corpo e a cadeira faz a capacitância diminuir

sofrerem um desvio de 180° e passarem por uma fenda com 1,00 mm de largura e 1,00 cm de altura, são recolhidos em um reservatório. (a) Qual é o módulo do campo magnético (perpendicular) do separador? Se o aparelho é usado para separar 100 mg de material por hora, calcule (b) a corrente dos íons selecionados pelo aparelho e (c) a energia térmica produzida no reservatório em 1,00 h.

••28 Uma partícula descreve um movimento circular uniforme com $26,1 \mu\text{m}$ de raio em um campo magnético uniforme. O módulo da força magnética experimentada pela partícula é $1,60 \times 10^{-17}$ N. Qual é a energia cinética da partícula?

••29 Um elétron descreve uma trajetória helicoidal em um campo magnético uniforme de módulo 0,300 T. O passo da hélice é $6,00 \mu\text{m}$ e o módulo da força magnética experimentada pelo elétron é $2,00 \times 10^{-15}$ N. Qual é a velocidade do elétron?

••30 Na Fig. 28-39, um elétron com uma energia cinética inicial de 4,0 keV penetra na região 1 no instante $t = 0$. Nessa região existe um campo magnético uniforme dirigido para dentro do papel, de módulo 0,010 T. O elétron descreve uma semicircunferência e deixa a região 1, dirigindo-se para a região 2, situada a 25,0 cm de distância da região 1. Existe uma diferença de potencial $\Delta V = 2000$ V entre as duas regiões, com uma polaridade tal que a velocidade do elétron aumenta no percurso entre a região 1 e a região 2. Na região 2 existe um campo magnético uniforme dirigido para fora do papel, de módulo 0,020 T. O elétron descreve uma semicircunferência e deixa a região 2. Determine o instante t em que isso acontece.

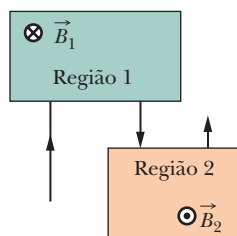


Figura 28-39 Problema 30.

••31 Uma certa partícula subatômica decai em um elétron e um pósitron. Suponha que, no instante do decaimento, a partícula está em repouso em um campo magnético uniforme \vec{B} de módulo 3,53 mT e que as trajetórias do elétron e do pósitron resultantes do decaimento estão em um plano perpendicular a \vec{B} . Quanto tempo após o decaimento o elétron e o pósitron se chocam?

••32 Uma fonte injeta um elétron de velocidade $v = 1,5 \times 10^7$ m/s em uma região onde existe um campo magnético uniforme de módulo $B = 1,0 \times 10^{-3}$ T. A velocidade do elétron faz um ângulo $\theta = 10^\circ$ com a direção do campo magnético. Determine a distância d entre o ponto de injeção e o ponto em que o elétron cruza novamente a linha de campo que passa pelo ponto de injeção.

••33 Um pósitron com uma energia cinética de 2,00 keV penetra em uma região onde existe um campo magnético uniforme \vec{B} de módulo 0,100 T. O vetor velocidade da partícula faz um ângulo de $89,0^\circ$ com \vec{B} . Determine (a) o período do movimento; (b) o passo p ; (c) o raio r da trajetória helicoidal.

••34 Um elétron descreve uma trajetória helicoidal na presença de um campo magnético uniforme dado por $\vec{B} = (20\hat{i} - 50\hat{j} - 30\hat{k})$ mT. No instante $t = 0$, a velocidade do elétron é dada por $\vec{v} = (20\hat{i} - 30\hat{j} + 50\hat{k})$ m/s. (a) Qual é o ângulo ϕ entre \vec{v} e \vec{B} ? A velocidade do elétron varia com o tempo. (b) A velocidade escalar varia com o tempo? (c) O ângulo ϕ varia com o tempo? (d) Qual é o raio da trajetória?

Seção 28-7 Ciclotrons e Síncrotrons

••35 Um próton circula em um ciclotron depois de partir aproximadamente do repouso no centro do aparelho. Toda vez que passa pelo espaço entre os dês, a diferença de potencial entre os dês é 200 V. (a) Qual é o aumento da energia cinética cada vez que o próton passa no espaço entre os dês? (b) Qual é a energia cinética do próton depois de passar 100 vezes pelo espaço entre os dês? Seja r_{100} o raio da trajetória circular do próton no momento em que completa as 100 passagens e entra em um dê e seja r_{101} o raio após a passagem seguinte. (c) Qual é o aumento percentual do raio de r_{100} para r_{101} , ou seja, qual é o valor de

$$\text{aumento percentual} = \frac{r_{101} - r_{100}}{r_{100}} 100\%?$$

••36 Um ciclotron no qual o raio dos dês é 53,0 cm é operado a uma frequência de 12,0 MHz para acelerar prótons. (a) Qual deve ser o módulo B do campo magnético para que haja ressonância? (b) Para esse valor do campo, qual é a energia cinética dos prótons que saem do ciclotron? Suponha que o campo seja mudado para 1,57 T. (c) Qual deve ser a nova frequência do oscilador para que haja ressonância? (d) Para esse valor da frequência, qual é a energia cinética dos prótons que saem do ciclotron?

••37 Estime a distância total percorrida por um dêuteron em um ciclotron com um raio de 53 cm e uma frequência de operação de 12 MHz durante todo o processo de aceleração. Suponha que a diferença de potencial entre os dês é 80 kV.

••38 Em um certo ciclotron, um próton descreve uma circunferência com 0,500 m de raio. O módulo do campo magnético é 1,20 T. (a) Qual é a frequência do oscilador? (b) Qual é energia cinética do próton em elétrons-volts?

Seção 28-8 Força Magnética em um Fio Percorrido por Corrente

••39 Uma linha de transmissão horizontal é percorrida por uma corrente de 5000 A no sentido sul-norte. O campo magnético da Terra ($60,0 \mu\text{T}$) tem a direção norte e faz um ângulo de $70,0^\circ$ com a horizontal. Determine (a) o módulo e (b) a direção da força magnética exercida pelo campo magnético da Terra sobre 100 m da linha.

••40 Um fio de 1,80 m de comprimento é percorrido por uma corrente de 13,0 A e faz um ângulo de $35,0^\circ$ com um campo magnético uniforme de módulo $B = 1,50$ T. Calcule a força magnética exercida pelo campo sobre o fio.

••41 Um fio com 13,0 g de massa e $L = 62,0$ cm de comprimento está suspenso por um par de contatos flexíveis na presença de um campo magnético uniforme de módulo 0,440 T (Fig. 28-40). Determine (a) o valor absoluto e (b) o sentido (para a direita ou para a esquerda) da corrente necessária para remover a tensão dos contatos.

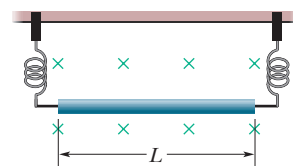


Figura 28-40 Problema 41.

••42 O fio dobrado da Fig. 28-41 está submetido a um campo magnético uniforme. Cada trecho retilíneo tem 2,0 m de comprimento e faz um ângulo $\theta = 60^\circ$ com o eixo x . O fio é percorrido por uma

••52 Na Fig. 28-46, uma bobina retangular percorrida por corrente está no plano de um campo magnético uniforme de módulo 0,040 T. A bobina é formada por uma única espira de fio flexível enrolado em um suporte flexível que permite mudar as dimensões do retângulo. (O comprimento total do fio permanece inalterado.) Quando o comprimento x de um dos lados do retângulo varia de aproximadamente zero para o valor máximo de aproximadamente 4,0 cm, o módulo τ do torque passa por um valor máximo de $4,80 \times 10^{-8} \text{ N} \cdot \text{m}$. Qual é a corrente na bobina?

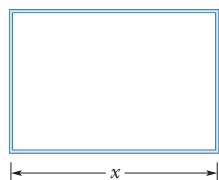


Figura 28-46 Problema 52.

••53 Prove que a relação $\tau = NiAB \sin \theta$ não é válida apenas para a espira retangular da Fig. 28-19, mas também para uma espira fechada com qualquer forma geométrica. (Sugestão: substitua a espira de forma arbitrária por um conjunto de espiras longas, finas, aproximadamente retangulares, muito próximas umas das outras, que sejam quase equivalentes à espira de forma arbitrária no que diz respeito à distribuição de corrente.)

Seção 28-10 O Momento Magnético Dipolar

•54 Um dipolo magnético com um momento dipolar de módulo 0,020 J/T é liberado a partir do repouso em um campo magnético uniforme de módulo 52 mT e gira livremente sob a ação da força magnética. Quando o dipolo está passando pela orientação na qual o momento dipolar está alinhado com o campo magnético, sua energia cinética é 0,80 mJ. (a) Qual é o ângulo inicial entre o momento dipolar e o campo magnético? (b) Qual é o ângulo quando o dipolo volta a entrar (momentaneamente) em repouso?

•55 Duas espiras circulares concêntricas, de raios $r_1 = 20,0 \text{ cm}$ e $r_2 = 30,0 \text{ cm}$, estão situadas no plano xy ; ambas são percorridas por uma corrente de 7,00 A no sentido horário (Fig. 28-47). (a) Determine o módulo do momento dipolar magnético do sistema. (b) Repita o cálculo supondo que a corrente da espira menor mudou de sentido.

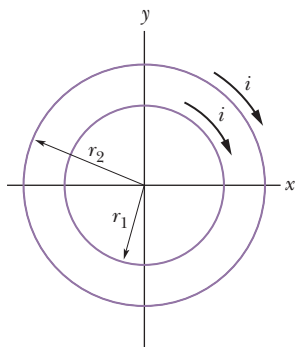


Figura 28-47 Problema 55.

•56 Uma bobina circular de 15,0 cm de raio conduz uma corrente de 2,60 A. A normal ao plano da bobina faz um ângulo de $41,0^\circ$ com um campo magnético uniforme de módulo 12,0 T. (a) Calcule o módulo do momento dipolar magnético da bobina. (b) Qual é o módulo do torque que age sobre a bobina?

•57 Uma bobina circular de 160 espiras tem um raio de 1,90 cm. (a) Calcule a corrente que resulta em um momento dipolar magnético de módulo $2,30 \text{ A} \cdot \text{m}^2$. (b) Determine o valor máximo do torque a que a bobina é submetida quando, sendo percorrida por essa corrente, é colocada na presença de um campo magnético uniforme de módulo 35,0 mT.

•58 O módulo do momento dipolar magnético da Terra é $8,00 \times 10^{22} \text{ J/T}$. Suponha que esse momento seja produzido por cargas que circulam na parte externa do núcleo da Terra. Se o raio da trajetória dessas cargas é 3500 km, calcule a corrente associada.

•59 Uma bobina que conduz uma corrente de 5,0 A tem a forma de um triângulo retângulo cujos lados medem 30, 40 e 50 cm. A bobina é submetida a um campo magnético uniforme de módulo 80 mT paralelo à corrente no lado de 50 cm da bobina. Determine o módulo (a) do momento dipolar magnético da bobina; (b) do torque sobre a bobina.

••60 A Fig. 28-48 mostra uma espira ABCDEFA percorrida por uma corrente $i = 5,00 \text{ A}$. Os lados da espira são paralelos aos eixos coordenados, com $AB = 20,0 \text{ cm}$, $BC = 30,0 \text{ cm}$ e $FA = 10,0 \text{ cm}$. Em termos dos vetores unitários, qual é o momento dipolar magnético da espira? (Sugestão: imagine correntes iguais e opostas no segmento AD e calcule o momento produzido por duas espiras retangulares, ABCDA e ADEFA.)

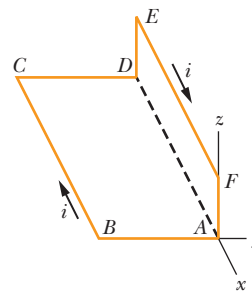


Figura 28-48 Problema 60.

••61 A bobina da Fig. 28-49 conduz uma corrente $i = 2,00 \text{ A}$ no sentido indicado, é paralela ao plano xz , possui 3,00 espiras, tem uma área de $4,00 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ e está submetida a um campo magnético uniforme $\vec{B} = (2,00\hat{i} - 3,00\hat{j} - 4,00\hat{k}) \text{ mT}$. Determine (a) a energia potencial magnética do sistema bobina–campo magnético; (b) o torque magnético (em termos dos vetores unitários) a que está sujeita a bobina.

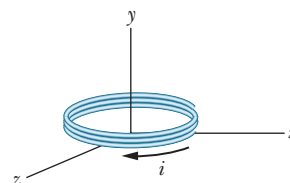


Figura 28-49 Problema 61.

••62 Na Fig. 28-50a, duas espiras concêntricas, situadas no mesmo plano, são percorridas por correntes em sentidos contrários. A corrente i_1 na bobina 1 é fixa e a corrente i_2 na bobina 2 é variável. A Fig. 28-50b mostra o momento magnético total do sistema em função de i_2 . A escala do eixo vertical é definida por $\mu_{\text{tot},y} = 2,0 \times 10^{-5} \text{ A} \cdot \text{m}^2$ e a escala do eixo horizontal é definida por $i_{2s} = 10,0 \text{ mA}$. Se o sentido da corrente na bobina 2 for invertido, qual será o módulo do momento magnético total do sistema para $i_2 = 7,0 \text{ mA}$?

O círculo no sinal de integral indica que a integração do produto escalar $\vec{B} \cdot d\vec{s}$ deve ser realizada para uma curva *fechada*, conhecida como *amperiana*. A corrente i_{env} é a corrente *total* envolvida pela curva fechada.

Para compreender melhor o significado do produto escalar $\vec{B} \cdot d\vec{s}$ e sua integral, vamos aplicar a lei de Ampère à situação geral da Fig. 29-11. A figura mostra as seções retas de três fios longos, perpendiculares ao plano do papel, percorridos por correntes i_1 , i_2 e i_3 . Uma amperiana arbitrária traçada no plano do papel envolve duas das correntes, mas não a terceira. O sentido anti-horário indicado na amperiana mostra o sentido arbitrariamente escolhido para realizar a integração da Eq. 29-14.

Para aplicar a lei de Ampère, dividimos mentalmente a amperiana em elementos de comprimento $d\vec{s}$, que são tangentes à curva e apontam no sentido de integração. Suponha que no local do elemento $d\vec{s}$ que aparece na Fig. 29-11 o campo magnético total devido às correntes nos três fios seja \vec{B} . Como os fios são perpendiculares ao plano do papel, sabemos que o campo magnético em $d\vec{s}$ devido a cada uma das correntes está no plano da Fig. 29-11; assim, o campo magnético total também está nesse plano. Entretanto, não conhecemos a orientação de \vec{B} no plano. Na Fig. 29-11, \vec{B} foi desenhado arbitrariamente fazendo um ângulo θ com a direção de $d\vec{s}$.

O produto escalar $\vec{B} \cdot d\vec{s}$ do lado esquerdo da Eq. 29-14 é igual a $B \cos \theta ds$. Assim, a lei de Ampère pode ser escrita na forma

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \oint B \cos \theta ds = \mu_0 i_{\text{env}}. \quad (29-15)$$

Assim, podemos interpretar o produto escalar $\vec{B} \cdot d\vec{s}$ como o produto de um comprimento elementar ds da amperiana pela componente do campo $B \cos \theta$ tangente à amperiana neste ponto. Nesse caso, a integral pode ser interpretada como a soma desses produtos para toda a amperiana.

Para executar a integração, não precisamos conhecer o sentido de \vec{B} em todos os pontos da amperiana; em vez disso, atribuímos arbitrariamente um sentido para \vec{B} que coincida com o sentido de integração, como na Fig. 29-11, e usamos a seguinte regra da mão direita para atribuir um sinal positivo ou negativo às correntes que contribuem para a corrente total envolvida pela amperiana, i_{env} :



Envolva a amperiana com a mão direita, com os dedos apontando no sentido da integração. Uma corrente no sentido do polegar estendido recebe sinal positivo; uma corrente no sentido oposto recebe sinal negativo.

Finalmente, resolvemos a Eq. 29-15 para obter o módulo de \vec{B} . Se B é positivo, isso significa que o sentido escolhido para \vec{B} está correto; se B é negativo, ignoramos o sinal e tomamos \vec{B} com o sentido oposto.

Na Fig. 29-12, aplicamos a regra da mão direita da lei de Ampère à situação da Fig. 29-11. Tomando o sentido de integração como o sentido anti-horário, a corrente total envolvida pela amperiana é

$$i_{\text{env}} = i_1 - i_2.$$

(A corrente i_3 está do lado de fora da amperiana.) Assim, de acordo com a Eq. 29-15, temos:

$$\oint B \cos \theta ds = \mu_0 (i_1 - i_2). \quad (29-16)$$

O leitor pode estar se perguntando como é possível excluir a corrente i_3 do lado direito da Eq. 29-16, já que ela contribui para o módulo B do campo magnético do lado esquerdo da equação. A resposta é que as contribuições da corrente i_3 para o campo magnético se cancelam quando a integração da Eq. 29-16 é realizada para uma curva fechada, o que não acontece no caso das correntes que estão no interior da curva.

Apenas as correntes envolvidas pela amperiana aparecem na lei de Ampère.

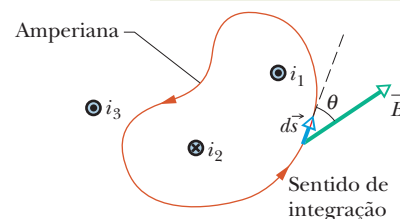


Figura 29-11 Aplicação da lei de Ampère a uma amperiana arbitrária que envolve dois fios retílineos longos, mas não um terceiro. Observe o sentido das correntes.

É assim que se **escolhem** os sinais das correntes para aplicar a lei de Ampère.

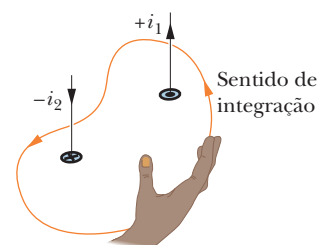


Figura 29-12 Uso da regra da mão direita da lei de Ampère para determinar os sinais das correntes envolvidas por uma amperiana. A situação é a da Fig. 29-11.

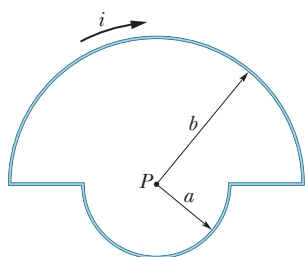


Figura 29-74 Problema 62.

••63 Na Fig. 29-75, 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 ($bcbfgb$, $abgha$ e $cdefc$), determine o momento magnético total do circuito em termos dos vetores unitários. (b) Determine o módulo do campo magnético total no ponto de coordenadas (0; 5,0 m; 0).

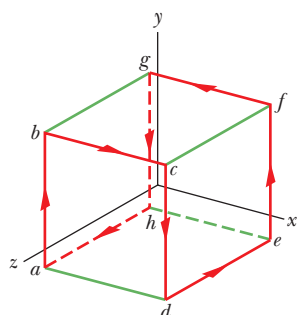


Figura 29-75 Problema 63.

Problemas Adicionais

64 Na Fig. 29-76, 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 .

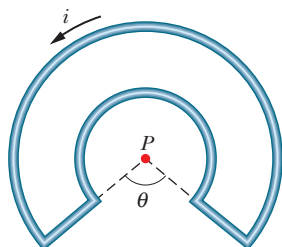


Figura 29-76 Problema 64.

65 Um fio cilíndrico com 8,00 mm de raio conduz uma corrente de 25,0 A, uniformemente distribuída ao longo da reta. A que distância do eixo central existem pontos no interior do fio onde 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) Em termos dos vetores unitários, qual é o campo magnético \vec{B} na origem? (b) Para que valor de y o campo \vec{B} é zero? (c) Se a corrente no fio 1 é invertida, para que valor de y o campo \vec{B} é 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 está se movendo (a) em direção ao fio; (b) paralelamente ao fio no sentido da corrente; (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 positivo do eixo z . Os pontos de interseção dos fios com o plano xy formam um triângulo equilátero com 10 cm de lado, como mostra a Fig. 29-77. 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 .

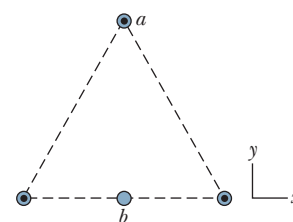


Figura 29-77 Problema 69.

70 A Fig. 29-78 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?

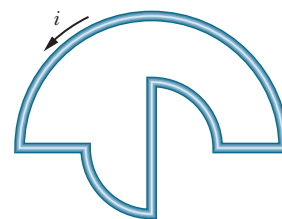


Figura 29-78 Problema 70.

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. Para essa corrente, qual é o módulo do campo magnético na superfície do fio?

72 Um fio longo vertical conduz uma corrente desconhecida. Um cilindro oco, longo, de espessura desprezível, coaxial com o fio, conduz uma corrente de 30 mA, dirigida para cima. A superfície do cilindro tem um raio de 3,0 mm. Se o módulo do campo magnético em um ponto situado a 5,0 mm de distância do fio é $1,0 \mu\text{T}$, determine (a) o valor e (b) o sentido da corrente no fio.

73 A Fig. 29-79 mostra uma seção reta de um condutor cilíndrico longo de raio $a = 4,00$ cm que contém um furo 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 $d = 0$.

registra, por um breve instante, uma corrente na espira da esquerda. Quando a chave é aberta, o instrumento também registra uma corrente, no sentido oposto. Observamos uma corrente induzida (e, portanto, uma força eletromotriz induzida) quando a corrente na espira da direita está variando (aumentando ou diminuindo), mas não quando é constante (com a chave permanentemente aberta ou permanentemente fechada).

A força eletromotriz induzida e a corrente induzida nesses experimentos são aparentemente causadas pela variação de alguma coisa, mas qual é essa “coisa”? Faraday encontrou a resposta.

30-3 A Lei de Indução de Faraday

Faraday descobriu que uma força eletromotriz e uma corrente podem ser induzidas em uma espira, como em nossos dois experimentos, fazendo variar a *quantidade de campo magnético* que atravessa a espira. Percebeu ainda que a “quantidade de campo magnético” pode ser visualizada em termos das linhas de campo magnético que atravessam a espira. A **lei de indução de Faraday**, quando aplicada a nossos experimentos, diz o seguinte:



Uma força eletromotriz é induzida na espira da esquerda das Figs. 30-1 e 30-2 quando o número de linhas de campo magnético que atravessam a espira varia.

O número de linhas de campo que atravessam a espira não importa; os valores da força eletromotriz e da corrente induzida são determinados pela *taxa de variação* desse número.

Em nosso primeiro experimento (Fig. 30-1), as linhas de campo magnético se espalham a partir do polo norte do ímã. Assim, quando aproximamos o polo norte do ímã da espira, o número de linhas de campo que atravessam a espira aumenta. Esse aumento aparentemente faz com que os elétrons de condução se movam (ou seja, produz uma corrente induzida) e fornece a energia necessária para esse movimento (ou seja, produz uma força eletromotriz induzida). Quando o ímã para de se mover, o número de linhas de campo que atravessam a espira deixa de variar e a corrente induzida e a força eletromotriz induzida desaparecem.

Em nosso segundo experimento (Fig. 30-2), quando a chave está aberta (a corrente é zero), não existem linhas de campo. Quando a chave é fechada, passa a existir uma corrente na bobina da direita. A corrente produz um campo magnético nas vizinhanças da espira da direita que também passa pela espira da esquerda. Enquanto a corrente está aumentando, o campo também está aumentando e o número de linhas de campo que atravessam a espira da esquerda aumenta. Como no primeiro experimento, é esse aumento do número de linhas de campo que aparentemente induz uma corrente e uma força eletromotriz na espira da esquerda. Quando a corrente na espira da direita atinge o valor final, constante, o número de linhas de campo que atravessam a espira da esquerda deixa de variar e a corrente induzida e a força eletromotriz induzida desaparecem.

Um Tratamento Quantitativo

Para aplicar a lei de Faraday a problemas específicos, precisamos saber calcular a *quantidade de campo magnético* que atravessa uma espira. No Capítulo 23, em uma situação semelhante, precisávamos calcular a quantidade de campo elétrico que atravessa uma superfície. Para isso, definimos um *fluxo elétrico* $\Phi_E = \int \vec{E} \cdot d\vec{A}$. Vamos agora definir um *fluxo magnético*. Suponha que uma espira que envolve uma área A seja submetida a um campo magnético \vec{B} . Nesse caso, o **fluxo magnético** que atravessa a espira é dado por

$$\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (\text{fluxo magnético através da área } A). \quad (30-1)$$



Figura 30-2 Um amperímetro revela a existência de uma corrente no circuito da esquerda quando a chave S é fechada (fazendo circular uma corrente no circuito da direita) e quando a **chave S** é aberta (fazendo com que a corrente no circuito da direita seja interrompida), mesmo que a posição relativa das espiras não mude durante o processo.

Tabela 31-2

Relações de Fase e Amplitude para Correntes e Tensões Alternadas

Elemento	Símbolo	Resistência ou Reatância	Fase da Corrente	Relação de (ou Ângulo) ϕ	Amplitudes
Resistor	R	R	Em fase com v_R	$0^\circ (= 0 \text{ rad})$	$V_R = I_R R$
Capacitor	C	$X_C = 1/\omega_d C$	Adiantada de $90^\circ (= \pi/2 \text{ rad})$ em relação a v_C	$-90^\circ (= -\pi/2 \text{ rad})$	$V_C = I_C X_C$
Indutor	L	$X_L = \omega_d L$	Atrasada de $90^\circ (= \pi/2 \text{ rad})$ em relação a v_L	$+90^\circ (= +\pi/2 \text{ rad})$	$V_L = I_L X_L$

Exemplo

Carga indutiva pura: diferença de potencial e corrente

Na Fig. 31-12, a indutância L é 230 mH e o gerador produz uma força eletromotriz de amplitude $\mathcal{E}_m = 36,0 \text{ V}$ e frequência $f_d = 60,0 \text{ Hz}$.

(a) Qual é a diferença de potencial $v_L(t)$ entre os terminais do indutor e qual é a amplitude V_L de $v_L(t)$?

IDEIA-CHAVE

Em um circuito com uma carga puramente indutiva, a diferença de potencial $v_L(t)$ entre os terminais do indutor é sempre igual à diferença de potencial $\mathcal{E}(t)$ entre os terminais do gerador.

Cálculos Neste caso, $v_L(t) = \mathcal{E}(t)$ e $V_L = \mathcal{E}_m$. Como \mathcal{E}_m é conhecida, podemos escrever

$$V_L = \mathcal{E}_m = 36,0 \text{ V.} \quad (\text{Resposta})$$

Para determinar $v_L(t)$, usamos a Eq. 31-28 para escrever

$$v_L(t) = \mathcal{E}(t) = \mathcal{E}_m \sin \omega_d t. \quad (31-53)$$

e, em seguida, fazemos $\mathcal{E}_m = 36,0 \text{ V}$ e $\omega_d = 2\pi f_d = 120\pi$ na Eq. 31-53 para obter

$$v_L = (36,0 \text{ V}) \sin(120\pi t). \quad (\text{Resposta})$$

(b) Qual é a corrente $i_L(t)$ no circuito e qual é a amplitude I_L de $i_L(t)$?

IDEIA-CHAVE

Em um circuito de CA com uma carga indutiva pura, a corrente alternada $i_L(t)$ no indutor está atrasada 90° em

relação à diferença de potencial alternada $v_L(t)$ entre os terminais do indutor, ou seja, a constante de fase ϕ para a corrente é 90° ou $\pi/2 \text{ rad}$. (Usando o artifício mnemônico da Tática 1, este circuito é “positivamente um circuito *ELI*”, o que nos diz que a força eletromotriz \mathcal{E} está adiantada relação à corrente I e que o ângulo de fase ϕ é positivo.)

Cálculos Como o ângulo de fase ϕ da corrente é $+90^\circ$ ou $+\pi/2 \text{ rad}$, podemos escrever a Eq. 31-29 na forma

$$i_L = I_L \sin(\omega_d t - \phi) = I_L \sin(\omega_d t - \pi/2). \quad (31-54)$$

Para calcular a amplitude I_L da corrente no indutor usando a Eq. 31-52 ($V_L = I_L X_L$), precisamos conhecer a reatância indutiva X_L . De acordo com a Eq. 31-49 ($X_L = \omega_d L$), onde $\omega_d = 2\pi f_d$, podemos escrever

$$\begin{aligned} X_L &= 2\pi f_d L = (2\pi)(60,0 \text{ Hz})(230 \times 10^{-3} \text{ H}) \\ &= 86,7 \Omega. \end{aligned}$$

Nesse caso, de acordo com a Eq. 31-52, temos:

$$I_L = \frac{V_L}{X_L} = \frac{36,0 \text{ V}}{86,7 \Omega} = 0,415 \text{ A.} \quad (\text{Resposta})$$

Substituindo este valor e $\omega_d = 2\pi f_d = 120\pi$ na Eq. 31-54, obtemos:

$$i_L = (0,415 \text{ A}) \sin(120\pi t - \pi/2). \quad (\text{Resposta})$$

31-9 O Circuito *RLC* Série

Agora estamos em condições de analisar o caso em que a força eletromotriz alternada da Eq. 31-28,

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_m \sin \omega_d t \quad (\text{fem aplicada}), \quad (31-55)$$

é aplicada ao circuito *RLC* da Fig. 31-7. Como R , L e C estão em série, a mesma corrente

$$i = I \sin(\omega_d t - \phi) \quad (31-56)$$

atravessa os três componentes. Estamos interessados em determinar a amplitude I