

## **Lista de Exercícios**

Data da entrega: 22 de dezembro de 2011

Resnick, 8ª. Edição

Questões:

7; 9; 13; 19; 21; 29; 31; 37; 49; 59; 61

9 As energias potenciais associadas a quatro orientações de um dipolo elétrico em relação a um campo elétrico são (1)  $-5U_0$ ; (2)  $-7U_0$ ; (3)  $3U_0$ ; (4)  $5U_0$ , onde  $U_0$  é uma constante positiva. Ordene as orientações de acordo (a) com o ângulo entre o momento dipolar  $\vec{p}$  e o campo elétrico  $\vec{E}$ ; (b) com o módulo do torque exercido pelo campo sobre o dipolo, em ordem decrescente.

10 (a) No Teste 4, se o dipolo gira da orientação 1 para a orientação 2 o trabalho realizado pelo campo sobre o dipolo é positivo, negativo ou nulo? (b) Se o dipolo gira da orientação 1 para a orientação 4 o trabalho realizado pelo campo é maior, menor ou igual ao trabalho do item (a)?

11 A Fig. 22-29 mostra dois discos e um anel plano, todos com a mesma carga uniforme  $Q$ . Ordene os objetos de acordo com o

módulo elétrico criado no ponto  $P$  (situado à mesma distância vertical), em ordem decrescente.

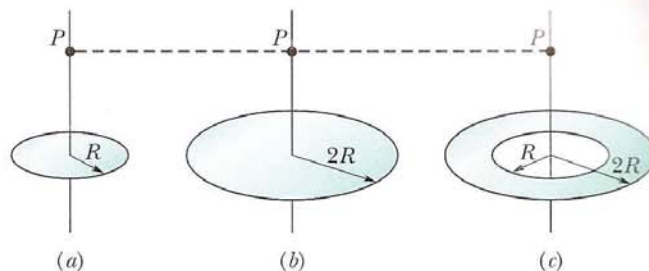


FIG. 22-29 Pergunta 11.

## PROBLEMAS

• • • • • O número de pontos indica o grau de dificuldade do problema

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

### seção 22-3 Linhas de Campo Elétrico

•1 Na Fig. 22-30 as linhas de campo elétrico do lado esquerdo têm uma separação duas vezes maior que as linhas do lado direito. (a) Se o módulo do campo elétrico no ponto  $A$  é  $40 \text{ N/C}$ , qual é o módulo da força a que é submetido um próton no ponto  $A$ ? (b) Qual é o módulo do campo elétrico no ponto  $B$ ?

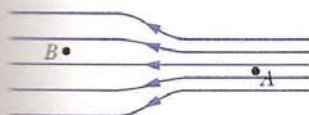


FIG. 22-30 Problema 1.

•2 Faça um esboço das linhas de campo elétrico entre duas cascas esféricas condutoras concêntricas e do lado de fora da casca de maior raio, supondo que existe uma carga positiva uniforme  $q_1$  na casca de menor raio e uma carga negativa uniforme  $-q_2$  na casca de maior raio. Considere os casos  $q_1 > q_2$ ,  $q_1 = q_2$  e  $q_1 < q_2$ .

### seção 22-4 Campo Elétrico Produzido por uma Carga Pontual

•3 Qual é o módulo de uma carga pontual cujo campo elétrico a  $50 \text{ cm}$  de distância tem um módulo de  $2,0 \text{ N/C}$ ?

•4 Qual é o módulo de uma carga pontual capaz de criar um campo elétrico de  $1,00 \text{ N/C}$  em um ponto a  $1,00 \text{ m}$  de distância?

•5 O núcleo de um átomo de plutônio 239 contém 94 prótons. Suponha que o núcleo é uma esfera com  $6,64 \text{ fm}$  de raio e que a carga dos prótons está distribuída uniformemente nessa esfera. Determine (a) o módulo e (b) o sentido (para dentro ou para fora) do campo elétrico produzido pelos prótons na superfície do núcleo.

•6 Duas partículas são mantidas fixas sobre o eixo  $x$ : a partícula 1, de carga  $-2,00 \times 10^{-7} \text{ C}$ , no ponto  $x = 6,00 \text{ cm}$ , e a partícula 2, de carga  $+2,00 \times 10^{-7} \text{ C}$ , no ponto  $x = 21,0 \text{ cm}$ . Qual é o campo elétrico total a meio caminho entre as partículas, em termos dos vetores unitários?

••7 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?

••8 Na Fig. 22-31 a partícula 1, de carga  $q_1 = -5,00q$ , e a partícula 2, de carga  $q_2 = +2,00q$ , são mantidas fixas sobre o 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.

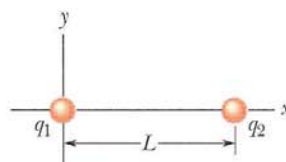


FIG. 22-31 Problema 8.

••9 Na Fig. 22-32 as quatro partículas formam um quadrado de lado  $a = 5,00 \text{ cm}$  e têm cargas  $q_1 = +10,0 \text{ nC}$ ,  $q_2 = -20,0 \text{ nC}$ ,  $q_3 = +20,0 \text{ nC}$  e  $q_4 = -10,0 \text{ nC}$ . Qual é o campo elétrico no centro do quadrado, em termos dos vetores unitários?

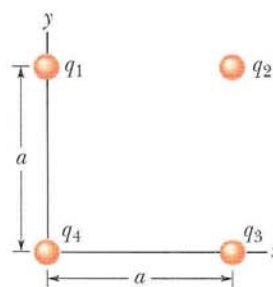


FIG. 22-32 Problema 9.

••10 Na Fig. 22-33 as quatro partículas são mantidas fixas e têm cargas  $q_1 = q_2 = +5e$ ,  $q_3 = +5e$  e  $q_4 = -12e$ . A distância  $d = 5,0 \mu\text{m}$ . Qual é o módulo do campo elétrico no ponto  $P$ ?

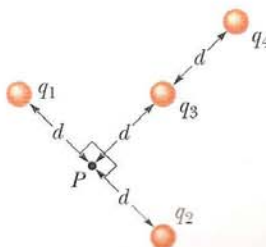


FIG. 22-33 Problema 10.

••11 A Fig. 22-34 mostra duas partículas carregadas mantidas fixas sobre o eixo  $x$ :  $-q = -3,20 \times 10^{-19}$  C, no ponto  $x = -3,00$  m, e  $q = 3,20 \times 10^{-19}$  C, no ponto  $x = +3,00$  m. Determine (a) o módulo e (b) a orientação (em relação ao semi-eixo  $x$  positivo) do campo elétrico no ponto  $P$ , para o qual  $y = 4,00$  m.

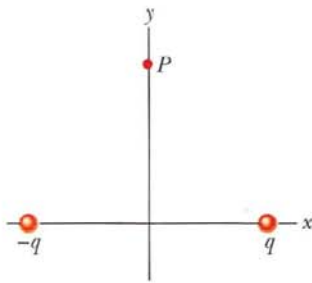


FIG. 22-34 Problema 11.

••12 A Fig. 22-35a mostra duas partículas carregadas mantidas fixas sobre o 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. 22-35b 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  $x_s = 30,0$  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 desse campo máximo?

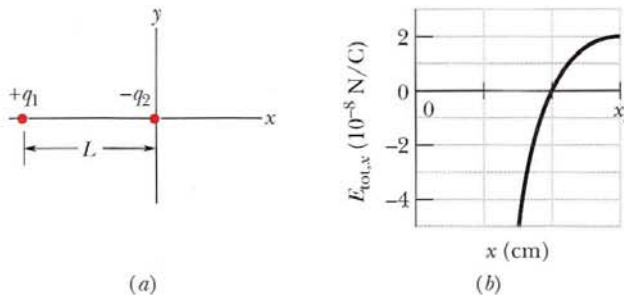


FIG. 22-35 Problema 12.

••13 Na Fig. 22-36 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  $P$ .

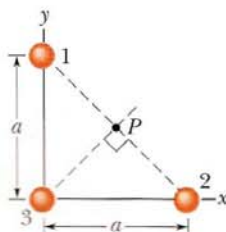


FIG. 22-36 Problema 13.

••14 A Fig. 22-37 mostra um arranjo irregular de elétrons ( $e$ ) e prótons ( $p$ ) sobre um arco de circunferência de raio  $r = 2,00$  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 semi-eixo  $x$  positivo) do campo elétrico no centro do arco.

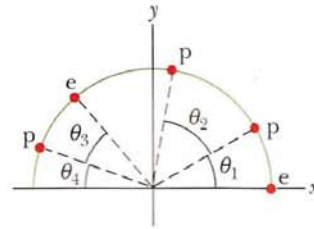


FIG. 22-37 Problema 14.

••15 A Fig. 22-38 mostra um próton ( $p$ ) sobre o eixo central de um disco com uma densidade uniforme de cargas devido a um excesso de elétrons. Três desses 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  $z = R = 2,00$  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)?

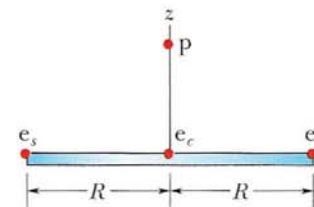


FIG. 22-38 Problema 15.

•••16 A Fig. 22-39 mostra um anel de plástico de raio  $R = 50,0$  cm. Duas pequenas contas coloridas estão sobre o anel: a conta 1, de carga  $+2,00$   $\mu\text{C}$ , que é mantida fixa na extremidade esquerda, e a conta 2, de carga  $+6,00$   $\mu\text{C}$ , que pode ser deslocada ao longo do anel. As duas contas produzem, juntas, um campo elétrico de módulo  $E$  no centro do anel. Determine (a) um valor positivo e (b) um valor negativo do ângulo  $\theta$  para que  $E = 2,00 \times 10^5$  N/C.

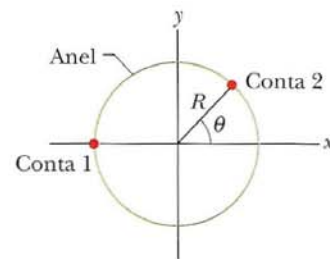


FIG. 22-39 Problema 16.

•••17 Duas contas carregadas estão sobre o anel da Fig. 22-40a, que possui um raio  $R = 60,0$  cm. A conta 2, que não aparece na figura, é mantida fixa. A conta 1 está inicialmente sobre o eixo  $x$ , na posição  $\theta = 0^\circ$ , mas é deslocada para a extremidade oposta do anel, ou seja, para a posição  $\theta = 180^\circ$ , passando pelo primeiro e segundo quadrantes do sistema de coordenadas  $xy$ . A Fig. 22-40b mostra a componente  $x$  do campo elétrico produzido na origem pelas duas contas em função de  $\theta$ , e a Fig. 22-40c mostra a componente  $y$  do campo. As escalas dos eixos verticais são definidas por  $E_{xs} = 5,0 \times 10^4$  N/C e  $E_{ys} = -9,0 \times 10^4$  N/C. (a) Qual é o ângulo  $\theta$  da conta 2? Determine as cargas (b) da conta 1 e (c) da conta 2.



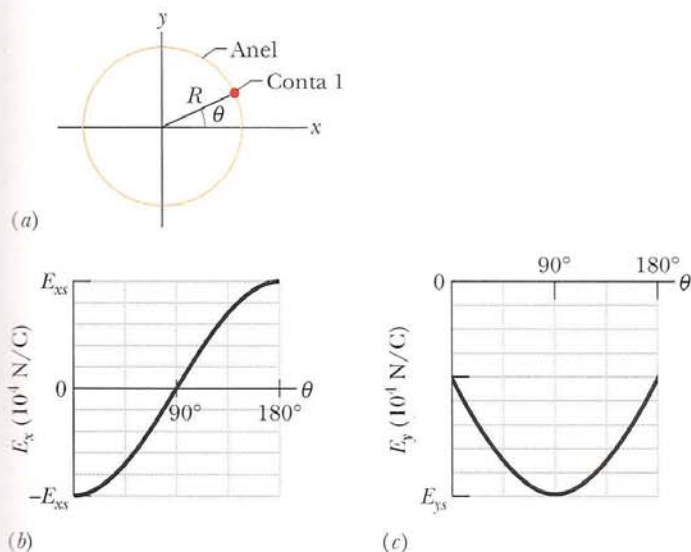


FIG. 22-40 Problema 17.

### seção 22-5 Campo Elétrico Produzido por um Dipolo Elétrico

••18 As Eqs. 22-8 e 22-9 fornecem o valor aproximado do módulo do campo elétrico de um dipolo elétrico em pontos sobre o eixo do dipolo. Considere um ponto  $P$  sobre este eixo a uma distância  $z = 5,00d$  do centro do dipolo, onde  $d$  é a distância entre as partículas que formam o dipolo. Seja  $E_{\text{apr}}$  o valor aproximado do módulo do campo no ponto  $P$ , dado pelas Eqs. 22-8 e 22-9, e  $E_{\text{ver}}$  o valor verdadeiro do campo. Determine a razão  $E_{\text{apr}}/E_{\text{ver}}$ .

••19 A Fig. 22-41 mostra um dipolo elétrico. Determine (a) o módulo e (b) a orientação (em relação ao semi-eixo  $x$  positivo) do campo elétrico produzido pelo dipolo em um ponto  $P$  situado a uma distância  $r \gg d$ .

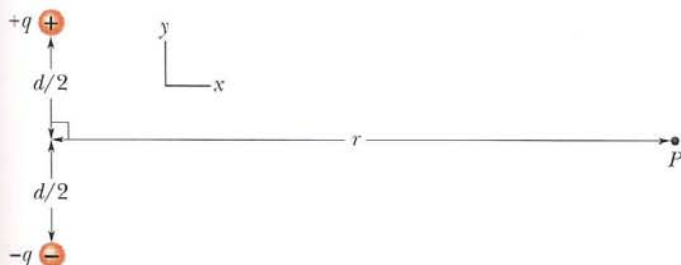


FIG. 22-41 Problema 19.

••20 O campo elétrico de um dipolo elétrico em pontos sobre o eixo do dipolo é dado aproximadamente pelas Eqs. 22-8 e 22-9. Se é feita uma expansão binomial da Eq. 22-7, qual é o termo seguinte da expressão do campo elétrico do dipolo em pontos sobre o eixo do dipolo? Em outras palavras, qual é o valor de  $E_1$  na expressão

$$E = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{qd}{z^3} + E_1?$$

•••21 **Quadrupolo elétrico.** A Fig. 22-42 mostra um quadrupolo elétrico, formado por dois dipolos de mesmo módulo e sentidos opostos. Mostre que o valor de  $E$  em um ponto  $P$  sobre o eixo do quadrupolo situado a uma distância  $z$  do centro (supondo  $z \gg d$ ) é dado por

$$E = \frac{3Q}{4\pi\epsilon_0 z^4},$$

onde  $Q (= 2qd^2)$  é chamado de *momento quadrupolar da distribuição de cargas*.

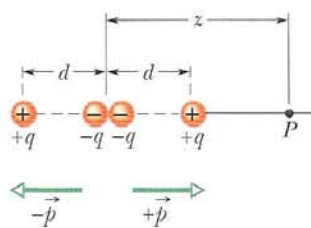


FIG. 22-42 Problema 21.

### seção 22-6 Campo Elétrico Produzido por uma Linha de Cargas

•22 **Densidade, densidade, densidade.** (a) Uma carga de  $-300e$  está distribuída uniformemente em um arco de circunferência de  $4,00$  cm de raio, que subtende um ângulo de  $40^\circ$ . Qual é a densidade linear de cargas do arco? (b) Uma carga de  $-300e$  está distribuída uniformemente em uma das superfícies de um disco circular de  $2,00$  cm de raio. Qual é a densidade superficial de cargas da superfície? (c) Uma carga de  $-300e$  está distribuída uniformemente na superfície de uma esfera de  $2,00$  cm de raio. Qual é a densidade superficial de cargas da superfície? (d) Uma carga de  $-300e$  está distribuída uniformemente em uma esfera de  $2,00$  cm de raio. Qual é a densidade volumétrica de cargas da esfera?

•23 A Fig. 22-43 mostra dois anéis não-condutores paralelos, com os centros sobre a mesma reta perpendicular aos planos dos anéis. O anel 1, de raio  $R$ , possui uma carga uniforme  $q_1$ ; o anel 2, também de raio  $R$ , possui uma carga uniforme  $q_2$ . Os anéis estão separados por uma distância  $d = 3,00R$ . O campo elétrico no ponto  $P$  situado na reta que passa pelos centros dos anéis, a uma distância  $R$  do anel 1, é zero. Determine a razão  $q_1/q_2$ .

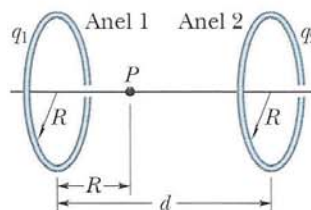


FIG. 22-43 Problema 23.

••24 Na Fig. 22-44 uma barra fina de vidro forma uma semicircunferência de raio  $r = 5,00$  cm. Uma carga  $+q = 4,50$  pC está distribuída uniformemente na metade superior da barra, e uma carga  $-q = -4,50$  pC está distribuída uniformemente na metade inferior. Determine (a) o módulo e (b) a orientação (em relação ao semi-eixo  $x$  positivo) do campo elétrico  $\vec{E}$  no ponto  $P$ , situado no centro do semicírculo.

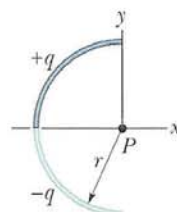


FIG. 22-44 Problema 24.

••25 Na Fig. 22-45 duas barras curvas de plástico, uma de carga  $+q$  e outra de carga  $-q$ , formam uma circunferência de raio  $R = 8,50$  cm no plano  $xy$ . O eixo  $x$  passa pelos dois pontos de ligação entre os arcos, e a carga está distribuída uniformemente nos dois arcos. Se  $q = 15,0$  pC, determine (a) o módulo e (b) a orientação

(em relação ao semi-eixo  $x$  positivo) do campo elétrico  $\vec{E}$  no ponto  $P$ , situado no centro da circunferência.

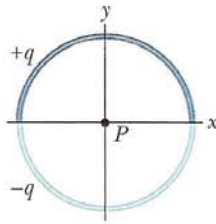


FIG. 22-45 Problema 25.

••26 Um anel de raio  $R = 2,40$  cm de raio contém uma distribuição uniforme de cargas, e o módulo do campo elétrico  $E$  resultante é medido ao longo do eixo central do anel (perpendicular ao plano do anel). A que distância do centro do anel o campo  $E$  é máximo?

••27 Na Fig. 22-46, uma barra não-condutora de comprimento  $L = 8,15$  cm tem uma carga  $-q = -4,23$  fC uniformemente distribuída. (a) Qual é a densidade linear de cargas da barra? Determine (b) o módulo e (c) a direção (em relação ao semi-eixo  $x$  positivo) do campo elétrico produzido no ponto  $P$ , situado no eixo  $x$ , a uma distância  $a = 12,0$  cm da extremidade da barra. Determine o módulo do campo elétrico produzido em um ponto situado no eixo  $x$ , a uma distância  $a = 50$  m do centro da barra, (d) pela barra e (e) por uma partícula de carga  $-q = -4,23$  fC colocada no lugar anteriormente ocupado pelo centro da barra.

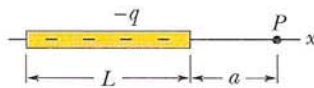


FIG. 22-46 Problema 27.

••28 A Fig. 22-47 mostra dois anéis concêntricos, de raios  $R$  e  $R' = 3,00R$ , que estão no mesmo plano. O ponto  $P$  está no eixo central  $z$ , a uma distância  $D = 2,00R$  do centro dos anéis. O anel menor possui uma carga uniformemente distribuída  $+Q$ . Em termos de  $Q$ , qual deve ser a carga uniformemente distribuída no anel maior para que o campo elétrico no ponto  $P$  seja nulo?

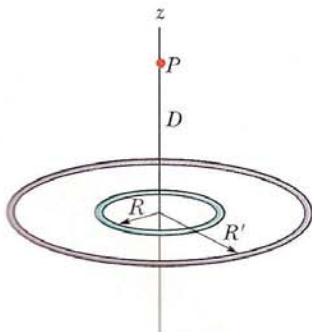


FIG. 22-47 Problema 28.

••29 A Fig. 22-48 mostra três arcos de circunferência cujo centro está na origem de um sistema de coordenadas. Em cada arco a carga uniformemente distribuída é dada em termos de  $Q = 2,00$   $\mu$ C. Os raios são dados em termos de  $R = 10,0$  cm. Determine (a) o módulo e (b) a orientação (em relação ao semi-eixo  $x$  positivo) do campo elétrico na origem.

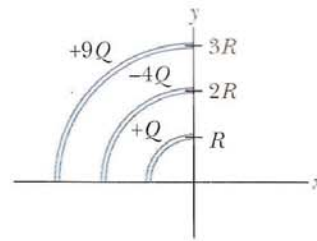


FIG. 22-48 Problema 29.

••30 Uma barra fina não-condutora, com uma distribuição uniforme de carga positiva  $Q$ , tem a forma de um círculo de raio  $R$  (Fig. 22-49). O eixo central do anel é o eixo  $z$ , com a origem no centro do anel. Determine o módulo do campo elétrico (a) no ponto  $z = 0$  e (b) no ponto  $z = \infty$ . (c) Em termos de  $R$ , para que valor positivo de  $z$  o módulo do campo é máximo? (d) Se  $R = 2,00$  cm e  $Q = 4,00$   $\mu$ C, qual é o valor máximo do campo?

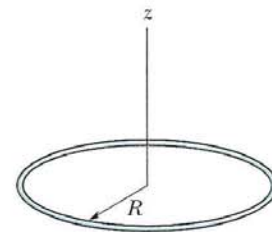


FIG. 22-49 Problema 30.

••31 A Fig. 22-50a mostra uma barra não-condutora com uma carga  $+Q$  distribuída uniformemente. A barra forma um semicírculo de raio  $R$  e produz um campo elétrico de módulo  $E$  no centro de curvatura  $P$ . Se a barra é substituída por uma carga pontual situada a uma distância  $R$  do ponto  $P$  (Fig. 22-50b), qual é a razão entre o novo valor de  $E$  e o antigo valor?

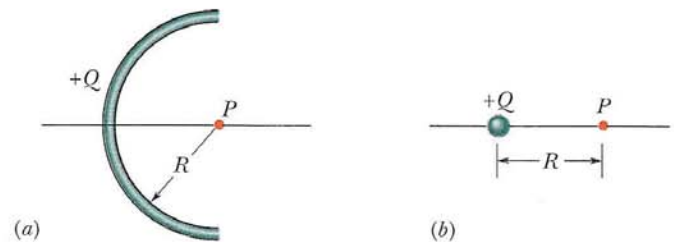


FIG. 22-50 Problema 31.

•••32 Na Fig. 22-51, uma carga positiva  $q = 7,81$  pC está distribuída uniformemente em uma barra fina, não-condutora, de comprimento  $L = 14,5$  cm. Determine (a) o módulo e (b) a orientação (em relação ao semi-eixo  $x$  positivo) do campo elétrico produzido no ponto  $P$ , situado sobre a mediatriz da barra, a uma distância  $R = 6,00$  cm da barra.

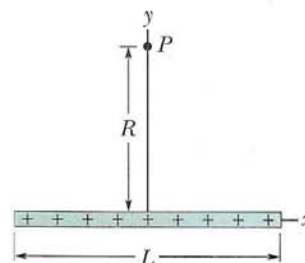


FIG. 22-51 Problema 32.



\*\*\*33 Na Fig. 22-52, uma barra não-condutora “semi-infinita” (ou seja, infinita apenas em um sentido) possui uma densidade linear de cargas uniforme  $\lambda$ . Mostre que o campo elétrico  $\vec{E}_P$  no ponto  $P$  faz um ângulo de  $45^\circ$  com a barra e que esse resultado não depende da distância  $R$ . (Sugestão: Calcule separadamente as componentes de  $\vec{E}_P$  nas direções paralela e perpendicular à barra.)

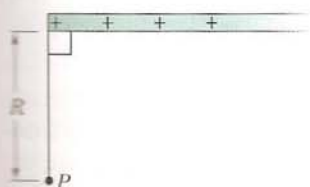


FIG. 22-52 Problema 33.

### seção 22-7 Campo Elétrico Produzido por um Disco Carregado

•34 Um disco de 2,5 cm de raio possui uma densidade superficial de cargas de  $5,3 \mu\text{C}/\text{m}^2$  na superfície superior. Qual é o módulo do campo elétrico produzido pelo disco em um ponto sobre o eixo central a uma distância  $z = 12 \text{ cm}$  do centro do disco?

•35 A que distância ao longo do eixo de um disco de plástico uniformemente carregado de 0,600 m de raio o módulo do campo elétrico é igual à metade do módulo do campo no centro do disco?

•36 A Fig. 22-53a mostra um disco circular uniformemente carregado. O eixo central  $z$  é perpendicular ao plano do disco, e sua origem está no plano do disco. A Fig. 22-53b mostra o módulo do campo elétrico sobre o eixo  $z$  em função do valor de  $z$ , em termos do valor máximo  $E_m$  do módulo do campo elétrico. A escala do eixo  $z$  é definida por  $z_s = 8,0 \text{ cm}$ . Qual é o raio do disco?

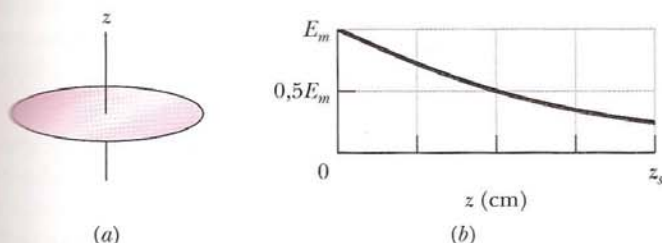


FIG. 22-53 Problema 36.

•37 Um engenheiro foi encarregado de projetar um dispositivo no qual um disco uniformemente carregado de raio  $R$  produz um campo elétrico. O módulo do campo é mais importante em um ponto  $P$  sobre o eixo do disco, a uma distância  $2,00R$  do plano do disco (Fig. 22-54a). Para economizar material decidiu-se substituir o disco por um anel com o mesmo raio externo  $R$  e um raio interno  $R/2,00$  (Fig. 22-54b). O anel tem a mesma densidade superficial de cargas que o disco original. Qual é a razão entre o novo campo no ponto  $P$  e o campo antigo?

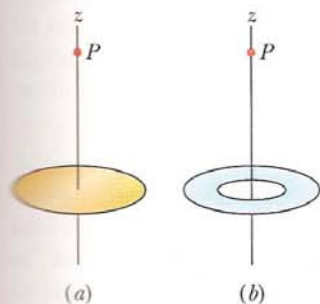


FIG. 22-54 Problema 37.

•38 Um disco circular de plástico de raio  $R = 2,00 \text{ cm}$  tem uma carga uniformemente distribuída  $Q = +(2,00 \times 10^6)e$  na superfície. Qual é a carga, em coulombs, de um anel circular de  $30 \mu\text{m}$  de largura e raio médio  $r = 0,50 \text{ cm}$  extraído do disco?

### seção 22-8 Uma Carga Pontual em um Campo Elétrico

•39 Um elétron é liberado a partir do repouso em um campo elétrico uniforme de módulo  $2,00 \times 10^4 \text{ N/C}$ . Determine a aceleração do elétron. (Ignore os efeitos da gravitação.)

•40 Um elétron adquire uma aceleração para leste de  $1,80 \times 10^9 \text{ m/s}^2$  na presença de um campo elétrico. Determine (a) o módulo e (b) a orientação do campo elétrico.

•41 Um elétron está sobre o eixo de um dipolo elétrico, a 25 nm de distância do centro do dipolo. Qual é o módulo da força eletrostática a que está submetido o elétron se o momento do dipolo é  $3,6 \times 10^{-29} \text{ C}\cdot\text{m}$ ? Suponha que a distância entre as cargas do dipolo é muito menor que 25 nm.

•42 Uma partícula alfa (núcleo de um átomo de hélio) tem uma massa de  $6,64 \times 10^{-27} \text{ kg}$  e uma carga de  $+2e$ . Determine (a) o módulo e (b) a direção de um campo elétrico capaz de equilibrar o peso da partícula.

•43 Um grupo de nuvens carregadas produz um campo elétrico no ar perto da superfície da Terra. Na presença desse campo uma partícula com uma carga de  $-2,0 \times 10^{-9} \text{ C}$  é submetida a uma força eletrostática para baixo de  $3,0 \times 10^{-6} \text{ N}$ . (a) Qual é o módulo do campo elétrico? Determine (b) o módulo e (c) a orientação da força eletrostática  $\vec{F}_{el}$  exercida pelo campo sobre um próton. (d) Qual é o módulo da força gravitacional  $\vec{F}_g$  a que está sujeito o próton? (e) Qual é a razão  $\vec{F}_{el}/\vec{F}_g$  neste caso?

•44 O ar úmido se torna um condutor (as moléculas se ionizam) quando é submetido a um campo elétrico maior que  $3,0 \times 10^6 \text{ N/C}$ . Para esse valor de campo, determine o módulo da força eletrostática a que é submetido (a) um elétron e (b) uma molécula da qual foi removido um elétron.

•45 Feixes de prótons de alta energia podem ser produzidos por “canhões” que usam campos elétricos para acelerar os prótons. (a) Qual é a aceleração experimentada por um próton em um campo elétrico de  $2,00 \times 10^4 \text{ N/C}$ ? (b) Na presença desse campo, qual é a velocidade adquirida pelo próton depois de percorrer uma distância de  $1,00 \text{ cm}$ ?

•46 Um elétron com uma velocidade de  $5,00 \times 10^8 \text{ cm/s}$  entra em uma região em que existe um campo elétrico uniforme de  $1,00 \times 10^3 \text{ N/C}$  e se move paralelamente ao campo, sendo desacelerado por este. Determine (a) a distância percorrida pelo elétron até inverter seu movimento; (b) o tempo necessário para que o elétron inverta seu movimento. (c) Se a região em que existe o campo tem  $8,00 \text{ mm}$  de largura (uma distância insuficiente para que o elétron inverta seu movimento), que fração da energia cinética inicial do elétron é perdida na região?

•47 No experimento de Millikan, uma gota de óleo com um raio de  $1,64 \mu\text{m}$  e uma massa específica de  $0,851 \text{ g/cm}^3$  permanece imóvel na câmara C (Fig. 22-14) quando um campo vertical de  $1,92 \times 10^5 \text{ N/C}$  é aplicado. Determine a carga da gota em termos de  $e$ .

•48 Em um certo instante, as componentes da velocidade de um elétron que se move entre duas placas paralelas carregadas são  $v_x = 1,5 \times 10^5 \text{ m/s}$  e  $v_y = 3,0 \times 10^3 \text{ m/s}$ . O campo elétrico entre as placas é dado por  $\vec{E} = (120 \text{ N/C})\hat{j}$ . Em termos dos vetores unitários, determine (a) a aceleração do elétron; (b) a velocidade do elétron no instante em que sua coordenada  $x$  varia de  $2,0 \text{ cm}$ .



••49 Há um campo elétrico uniforme em uma região entre duas placas com cargas elétricas opostas. Um elétron é liberado a partir do repouso da superfície da placa negativamente carregada e atinge a superfície da outra placa, a 2,0 cm de distância, em  $1,5 \times 10^{-8}$  s. (a) Qual é a velocidade do elétron ao atingir a segunda placa? (b) Qual é o módulo do campo elétrico  $\vec{E}$ ?

••50 Na Fig. 22-55 um elétron é lançado com uma velocidade inicial  $v_0 = 2,00 \times 10^6$  m/s a um ângulo  $\theta_0 = 40,0^\circ$  com o eixo  $x$  em uma região na qual existe um campo elétrico uniforme  $\vec{E} = (5,00 \text{ N/C})\hat{j}$ . Uma tela para detectar elétrons é instalada paralelamente ao eixo  $y$ , a uma distância  $x = 3,00$  m do ponto de lançamento do elétron. Em termos dos vetores unitários, qual é a velocidade do elétron ao atingir a tela?

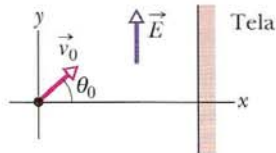


FIG. 22-55 Problema 50.

••51 Duas grandes placas de cobre, mantidas a 5,0 cm de distância uma da outra, são usadas para criar um campo elétrico uniforme, como mostra a Fig. 22-56. Um elétron é liberado da placa negativa ao mesmo tempo em que um próton é liberado da placa positiva. Desprezando a interação entre as partículas, determine a que distância da placa positiva as partículas passam uma pela outra. (Por que não é necessário conhecer o valor do campo elétrico para resolver o problema?)

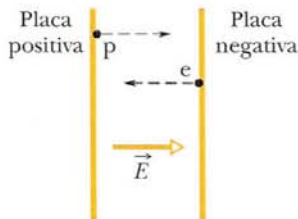


FIG. 22-56 Problema 51.

••52 Na Fig. 22-57 um elétron (e) é liberado a partir do repouso no eixo central de um disco uniformemente carregado de raio  $R$ . A densidade superficial de cargas do disco é  $+4,00 \mu\text{C}/\text{m}^2$ . Determine o módulo da aceleração inicial do elétron se ele for liberado a uma distância (a)  $R$ , (b)  $R/100$ , (c)  $R/1000$  do centro do disco. (d) Por que o módulo da aceleração quase não varia com a distância entre a carga e o disco?

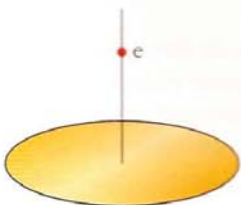


FIG. 22-57 Problema 52.

••53 Um bloco de 10,0 g com uma carga de  $+8,00 \times 10^{-5}$  C é submetido a um campo elétrico  $\vec{E} = (3000\hat{i} - 600\hat{j})$  N/C. Determine (a) o módulo e (b) a orientação (em relação ao semi-

eixo  $x$  positivo) da força eletrostática que age sobre o bloco. Se o bloco é liberado na origem, a partir do repouso, no instante  $t = 0$ , determine (c) a coordenada  $x$  e (d) a coordenada  $y$  do bloco no instante  $t = 3,00$  s.

••54 Um elétron penetra em uma região em que existe um campo elétrico uniforme com uma velocidade inicial de 40 km/s e se move paralelamente ao campo elétrico, cujo módulo é  $E = 50$  N/C. (a) Qual é a velocidade do elétron 1,5 ns depois de entrar na região? (b) Que distância o elétron percorre nesse intervalo de 1,5 ns?

••55 Suponha que uma abelha pode ser aproximada por uma esfera de 1,000 cm de diâmetro com uma carga de  $+45,0$  pC distribuída uniformemente na superfície. Suponha também que um grão de pólen com  $40,0 \mu\text{m}$  de diâmetro é mantido eletricamente na superfície da esfera porque a carga da abelha induz uma carga de  $-1,00$  pC no lado mais próximo da esfera e uma carga de  $+1,00$  pC no lado mais distante. (a) Qual é o módulo da força eletrostática resultante que a abelha exerce sobre o grão de pólen? Suponha que a abelha transporte o grão de pólen até uma distância de 1,000 mm da ponta do estigma de uma flor e que a ponta é uma partícula de carga  $-45$  pC. (b) Qual é o módulo da força eletrostática resultante que o estigma exerce sobre o grão? (c) O grão permanece no corpo da abelha ou salta para o estigma?

### seção 22-9 Um Dipolo em um Campo Elétrico

•56 Um dipolo elétrico formado por cargas de  $+2e$  e  $-2e$  separadas por uma distância de  $0,78$  nm é submetido a um campo elétrico de  $3,4 \times 10^6$  N/C. Calcule o módulo do torque exercido pelo campo elétrico sobre o dipolo se o momento do dipolo está (a) paralelo; (b) perpendicular; (c) antiparalelo ao campo elétrico.

•57 Um dipolo elétrico formado por cargas de  $+1,50$  nC e  $-1,50$  nC separadas por uma distância de  $6,20 \mu\text{m}$  é submetido a um campo elétrico de  $1100$  N/C. Determine (a) o módulo do momento dipolar elétrico e (b) a diferença entre as energias potenciais quando o dipolo está orientado paralelamente e antiparalelamente a  $\vec{E}$ .

••58 Um certo dipolo elétrico é submetido a um campo elétrico uniforme  $\vec{E}$  de módulo  $40$  N/C. A Fig. 22-58 mostra o módulo  $\tau$  do torque exercido sobre o dipolo em função do ângulo  $\theta$  entre o campo  $\vec{E}$  e o momento dipolar  $\vec{p}$ . A escala do eixo vertical é definida por  $\tau_s = 100 \times 10^{-28}$  N·m. Qual é o módulo de  $\vec{p}$ ?

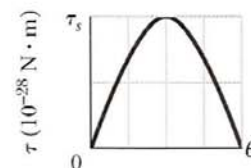


FIG. 22-58 Problema 58.

••59 Escreva uma expressão para a frequência de oscilação de um dipolo elétrico de momento dipolar  $\vec{p}$  e momento de inércia  $I$  para pequenas amplitudes de oscilação em torno da posição de equilíbrio na presença de um campo elétrico uniforme de módulo  $E$ .

••60 Um certo dipolo elétrico é submetido a um campo elétrico uniforme  $\vec{E}$  cujo módulo é  $20$  N/C. A Fig. 22-59 mostra a energia potencial  $U$  do dipolo em função do ângulo  $\theta$  entre  $\vec{E}$  e o momento do dipolo  $\vec{p}$ . A escala do eixo vertical é definida por  $U_s = 100 \times 10^{-28}$  J. Qual é o módulo de  $\vec{p}$ ?



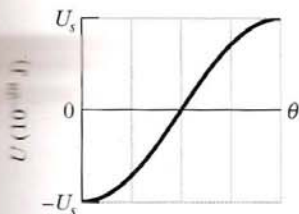


FIG. 22-59 Problema 60.

**61** Qual é o trabalho necessário para fazer girar de  $180^\circ$  um dipolo elétrico em um campo elétrico uniforme de módulo  $E = 46,0 \text{ N/C}$  se  $p = 3,02 \times 10^{-25} \text{ C} \cdot \text{m}$  e o ângulo inicial é  $64^\circ$ ?

### Problemas Adicionais

**62** Em um de seus experimentos, Millikan observou que as cargas a seguir, entre outras, eram observadas na mesma gota em diferentes ocasiões:

$6,563 \times 10^{-19} \text{ C}$	$13,13 \times 10^{-19} \text{ C}$	$19,71 \times 10^{-19} \text{ C}$
$8,204 \times 10^{-19} \text{ C}$	$16,48 \times 10^{-19} \text{ C}$	$22,89 \times 10^{-19} \text{ C}$
$11,50 \times 10^{-19} \text{ C}$	$18,08 \times 10^{-19} \text{ C}$	$26,13 \times 10^{-19} \text{ C}$

Que valor da carga elementar  $e$  pode ser calculado a partir desses dados?

**63** Na Fig. 22-60a uma partícula de carga  $+Q$  produz um campo elétrico de módulo  $E_{\text{part}}$  no ponto  $P$ , a uma distância  $R$  da partícula. Na Fig. 22-60b a mesma carga está distribuída uniformemente em um arco de circunferência de raio  $R$ , que subtende um ângulo  $\theta$ . A carga do arco produz um campo elétrico de módulo  $E_{\text{arco}}$  no centro de curvatura  $P$ . Para que valor de  $\theta$  temos  $E_{\text{arco}} = 0,500 E_{\text{part}}$ ? (Sugestão: Use uma solução gráfica.)

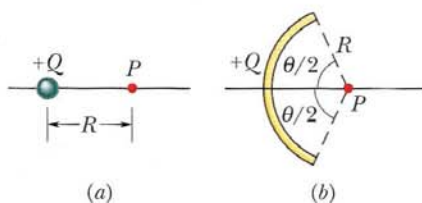


FIG. 22-60 Problema 63.

**64** Na Fig. 22-61 oito partículas formam um quadrado onde  $d = 2,0 \text{ cm}$ . As cargas são  $q_1 = +3e$ ,  $q_2 = +e$ ,  $q_3 = -5e$ ,  $q_4 = -2e$ ,  $q_5 = +3e$ ,  $q_6 = +e$ ,  $q_7 = -5e$  e  $q_8 = +e$ . Em termos dos vetores unitários, qual é o campo elétrico produzido pelas partículas no centro do quadrado?

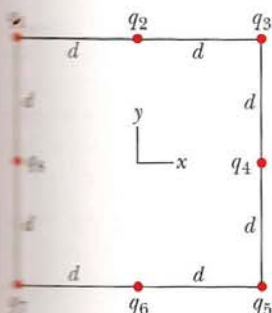


FIG. 22-61 Problema 64.

**65** Duas partículas, ambas com uma carga de valor absoluto  $12 \text{ nC}$ , ocupam dois vértices de um triângulo equilátero com  $2,0 \text{ m}$  de lado. Determine o módulo do campo elétrico no terceiro vértice

(a) se as duas cargas forem positivas e (b) se uma das cargas for positiva e a outra for negativa.

**66** Três partículas com a mesma carga positiva  $Q$  formam um triângulo equilátero de lado  $d$ . Qual é o módulo do campo elétrico produzido pelas partículas no ponto médio de um dos lados?

**67** Uma partícula de carga  $-q_1$  é mantida fixa na origem do eixo  $x$ . (a) Em que ponto do eixo  $x$  deve ser colocada uma partícula de carga  $-4q_1$  para que o campo elétrico seja zero no ponto  $x = 2,0 \text{ mm}$ ? (b) Se uma partícula de carga  $+4q_1$  é colocada no ponto determinado no item (a), qual é a orientação (em relação ao semi-eixo  $x$  positivo) do campo elétrico no ponto  $x = 2,00 \text{ mm}$ ?

**68** Um próton e um elétron ocupam dois vértices de um triângulo equilátero de lado  $2,0 \times 10^{-6} \text{ m}$ . Qual é o módulo do campo elétrico no terceiro vértice do triângulo?

**69** Na Fig. 22-62 a partícula 1 (de carga  $+1,00 \mu\text{C}$ ), a partícula 2 (de carga  $+1,00 \mu\text{C}$ ) e a partícula 3 (de carga  $Q$ ) formam um triângulo equilátero de lado  $a$ . Para que valor de  $Q$  (sinal e valor) o campo elétrico no centro do triângulo é nulo?

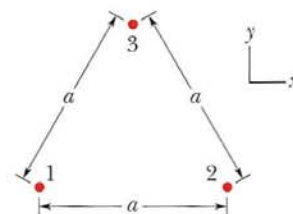


FIG. 22-62 Problemas 69 e 82.

**70** (a) Qual deve ser a carga total  $q$  (em excesso) do disco da Fig. 22-13 para que o campo elétrico no centro da superfície do disco seja  $3,0 \times 10^6 \text{ N/C}$ , o valor de  $E$  para o qual o ar se torna um condutor e emite centelhas? Tome o raio do disco como sendo  $2,5 \text{ cm}$  e use os dados para o ar da Tabela 22-1. (b) Suponha que os átomos da superfície têm uma seção reta efetiva de  $0,015 \text{ nm}^2$ . Quantos átomos são necessários para preencher superfície do disco? (c) A carga calculada em (a) é a soma das cargas dos átomos da superfície que possuem um elétron em excesso. Qual deve ser a fração desses elétrons?

**71** Uma gota d'água esférica com  $1,20 \mu\text{m}$  de diâmetro está suspensa no ar devido a um campo elétrico atmosférico vertical cujo módulo é  $E = 462 \text{ N/C}$ . (a) Qual é o peso da gota? (b) Quantos elétrons em excesso possui a gota?

**72** Na Fig. 22-63 um dipolo elétrico gira de uma orientação inicial  $i$  ( $\theta_i = 20,0^\circ$ ) para uma orientação final  $f$  ( $\theta_f = 20,0^\circ$ ) na presença de um campo elétrico externo uniforme  $\vec{E}$ . O momento do dipolo é  $1,60 \times 10^{-27} \text{ C} \cdot \text{m}$ ; o módulo do campo é  $3,00 \times 10^6 \text{ N/C}$ . Qual é a variação da energia potencial do dipolo?

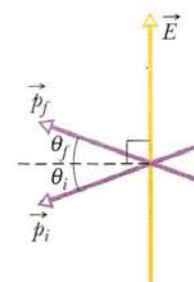


FIG. 22-63 Problema 72.



**73** Uma carga de 20 nC está uniformemente distribuída ao longo de uma barra retilínea de 4,0 m de comprimento que é encurvada para formar um arco de circunferência com 2,0 m de raio. Qual é o módulo do campo elétrico no centro de curvatura do arco?

**74** (a) Qual é o módulo da aceleração de um elétron submetido a um campo elétrico uniforme de  $1,40 \times 10^6$  N/C? (b) Quanto tempo o elétron leva, partindo do repouso, para atingir um décimo da velocidade da luz? (c) Que distância o elétron percorre nesse período de tempo?

**75** O mostrador de um relógio possui cargas negativas pontuais  $-q, -2q, -3q, \dots, -12q$  mantidas fixas nas posições dos números correspondentes. Os ponteiros do relógio não afetam o campo produzido pelas cargas pontuais. A que horas o ponteiro das horas aponta na mesma direção que o vetor campo elétrico no centro do mostrador? (Sugestão: Leve em conta a simetria das cargas.)

**76** O movimento de um elétron se limita ao eixo central de um anel de raio  $R$  da Fig. 22-10, com  $z \ll R$ . Mostre que a força eletrostática a que o elétron é submetido faz com que a partícula oscile em torno do centro do anel com uma frequência angular dada por

$$\omega = \sqrt{\frac{eq}{4\pi\epsilon_0 m R^3}},$$

onde  $q$  é a carga do anel e  $m$  é a massa do elétron.

**77** Existe na atmosfera um campo elétrico  $\vec{E}$ , dirigido verticalmente para baixo, cujo módulo é da ordem de 150 N/C. Estamos interessados em fazer “flutuar” nesse campo uma esfera de enxofre com 4,4 N de peso carregando-a eletricamente. (a) Qual deve ser a carga da esfera (sinal e valor absoluto)? (b) Por que esse experimento não pode ser realizado na prática?

**78** Calcule o momento dipolar elétrico de um elétron e um próton separados por uma distância de 4,30 nm.

**79** O campo elétrico no plano  $xy$  produzido por uma partícula positivamente carregada é  $7,2(4,0\hat{i} + 3,0\hat{j})$  N/C no ponto (3,0; 3,0) cm e  $100\hat{i}$  N/C no ponto (2,0; 0) cm. Determine (a) a coordenada  $x$  e (b) a coordenada  $y$  da partícula. (c) Determine a carga da partícula.

**80** Uma barra circular tem um raio de curvatura  $R = 9,00$  cm, uma carga uniformemente distribuída  $Q = 6,25$  pC e subtende um ângulo  $\theta = 2,40$  rad. Qual é o módulo do campo elétrico no centro de curvatura?

**81** Um dipolo elétrico de momento dipolar

$$\vec{p} = (3,00\hat{i} + 4,00\hat{j})(1,24 \times 10^{-30} \text{ C} \cdot \text{m})$$

é submetido a um campo elétrico  $\vec{E} = (4000 \text{ N/C})\hat{i}$ . (a) Qual é a energia potencial do dipolo elétrico? (b) Qual é o torque que age sobre o dipolo? (c) Se um agente externo faz girar o dipolo até que o momento dipolar seja

$$\vec{p} = (-4,00\hat{i} + 3,00\hat{j})(1,24 \times 10^{-30} \text{ C} \cdot \text{m}),$$

qual é o trabalho realizado pelo agente externo?

**82** Na Fig. 22-62 a partícula 1 (de carga +2,00 pC), a partícula 2 (de carga -2,00 pC) e a partícula 3 (de carga +5,00 pC) formam um triângulo equilátero de lado  $a = 9,50$  cm. (a) Determine a orientação (em relação ao semi-eixo  $x$  positivo) da força  $\vec{F}_3$  a que a partícula 3 é submetida pelas outras partículas fazendo um

esboço das linhas de força associadas às outras partículas. (b) Calcule o módulo da força  $\vec{F}_3$ .

**83** Uma corda com uma densidade linear uniforme de cargas de 9,0 nC/m é estendida ao longo do eixo  $x$  de  $x = 0$  até  $x = 3,0$  m. Determine o módulo do campo elétrico no ponto  $x = 4,0$  m do eixo  $x$ .

**84** Duas partículas com a mesma carga positiva  $q$  são mantidas fixas sobre o eixo  $y$ , uma em  $y = d$  e a outra em  $y = -d$ . (a) Escreva uma expressão para o módulo  $E$  do campo elétrico em pontos sobre o eixo  $x$  dados por  $x = \alpha d$ . (b) Plote  $E$  em função de  $\alpha$  no intervalo  $0 < \alpha < 4$ . A partir do gráfico, determine os valores de  $\alpha$  para os quais (c) o valor de  $E$  é máximo e (d) o valor de  $E$  é metade do valor máximo.

**85** Na Fig. 22-64, a partícula 1, de carga  $q_1 = 1,00$  pC, e a partícula 2, de carga  $q_2 = -2,00$  pC, são mantidas fixas, separadas por uma distância  $d = 5,00$  cm. Determine, em termos dos vetores unitários, o campo elétrico (a) no ponto A; (b) no ponto B; (c) no ponto C. (d) Faça um esboço das linhas de campo elétrico.

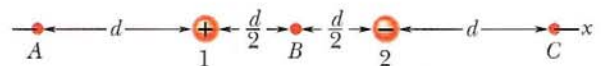


FIG. 22-64 Problema 85.

**86** Na Fig. 22-65 um campo elétrico uniforme vertical  $\vec{E}$  de módulo  $2,00 \times 10^3$  N/C foi estabelecido entre duas placas horizontais carregando positivamente a placa de baixo e negativamente a placa de cima. As placas têm um comprimento  $L = 10,0$  cm e estão separadas por uma distância  $d = 2,00$  cm. Um elétron é lançado no espaço entre as placas a partir da extremidade esquerda da placa de baixo. A velocidade inicial  $\vec{v}_0$  faz um ângulo  $\theta = 45,0^\circ$  com a placa de baixo e tem um módulo de  $6,00 \times 10^6$  m/s. (a) O elétron irá se chocar com uma das placas? (b) Se a resposta for afirmativa, com qual das placas o elétron irá se chocar e a que distância horizontal da extremidade esquerda das placas?

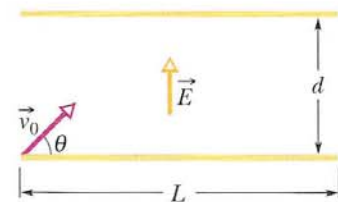


FIG. 22-65 Problema 86.

**87** Para os dados do Problema 62, suponha que a carga  $q$  da gota é dada por  $q = ne$ , onde  $n$  é um número inteiro e  $e$  é a carga elementar. (a) Determine o valor de  $n$  para cada valor experimental de  $q$ . (b) Faça uma regressão linear dos valores de  $q$  em função de  $n$  e use o resultado para determinar o valor de  $e$ .

**88** Suponha que na Fig. 22-8 as duas cargas são positivas. Mostre que para  $z \gg d$  o campo  $E$  no ponto  $P$  da figura é dado por

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2q}{z^2}.$$