

Carga e Campo Elétrico

21.2 Um raio ocorre quando existe fluxo de cargas elétricas (principalmente elétrons) entre o solo e uma nuvem de tempestade. A taxa máxima do fluxo de cargas elétricas em um raio é aproximadamente igual a 20000 C/s; essa descarga dura cerca de 100 μ s. Qual é a quantidade de carga que flui entre a terra e a nuvem nesse intervalo de tempo? Quantos elétrons fluíram durante esse intervalo?

21.8 Duas pequenas esferas de alumínio, cada qual com massa igual a 0,0250 kg, estão separadas por uma distância de 80,0 cm. (a) Quantos elétrons estão presentes em cada esfera? (O número atômico do alumínio é 13 e sua massa atômica é 26,982 g/mol.) (b) Quantos elétrons devem ser removidos de uma esfera e adicionados na outra para que o módulo da força de atração entre elas seja igual a $1,00 \times 10^4$ N (aproximadamente igual ao peso de uma tonelada)? Suponha que as esferas possam ser tratadas como cargas puntiformes. (c) A que fração da carga total de cada esfera essa quantidade corresponde?

21.32 Campo elétrico da Terra. A Terra possui uma carga elétrica líquida que produz um campo elétrico orientado para o centro da Terra com módulo de 150 N/C em pontos próximos de sua superfície. (a) Qual seria o módulo e o sinal da carga líquida que uma pessoa de 60,0 kg deveria possuir para que seu peso fosse igual e contrário à força produzida pelo campo elétrico da Terra? (b) Qual deveria ser a força de repulsão entre duas pessoas que tivessem a carga calculada no item (a) quando a distância entre elas fosse igual a 100 m? O uso do campo elétrico da Terra poderia fornecer algum método factível para voar? Por quê?

21.43 Duas cargas puntiformes q são colocadas sobre o eixo Ox , uma no ponto $x = a$ e outra no ponto $x = -a$. (a) Determine o módulo, a direção e o sentido do campo elétrico no ponto $x = 0$. (b) Deduza uma expressão para o campo elétrico em qualquer ponto sobre o eixo Ox . Use seu resultado para fazer um gráfico do campo elétrico em função de x para valores de x compreendidos entre $-4a$ e $4a$.

21.53 Uma carga elétrica positiva é distribuída sobre o eixo Oy , sendo λ a carga por unidade de comprimento. (a) Considere o caso para o qual a carga seja distribuída somente entre os pontos $y = a$ e $y = -a$. Para os pontos sobre o eixo $+Ox$, faça um gráfico do componente x do campo elétrico em função de x para valores de x compreendidos entre $x = a/2$ e $x = 4a$. (b) Agora, suponha que a carga seja distribuída sobre todos os pontos do eixo Oy com a mesma carga por unidade de comprimento λ . Usando o mesmo gráfico obtido na parte (a), faça outra curva para o componente x do campo elétrico em função de x para valores de x compreendidos entre $x = a/2$ e $x = 4a$. Identifique os gráficos com as respectivas situações.

21.62 A) Figura 21.41 mostra algumas linhas de campo elétrico produzidas por três cargas puntiformes localizadas ao longo de um eixo vertical. Todas as três cargas possuem o mesmo módulo. (a) Quais são os sinais de cada uma das três cargas? Explique seu raciocínio. (b) Em que ponto(s) o módulo do campo elétrico atinge seu valor mínimo? Explique como os campos produzidos pelas cargas individuais se combinam para fornecer o campo elétrico resultante nesse(s) ponto(s).

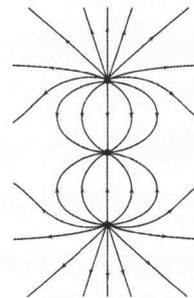


Figura 21.41 Exercício 21.62.

21.90 Uma carga positiva Q é distribuída uniformemente sobre a parte positiva do eixo Oy desde $y = 0$ até $y = a$. Uma carga puntiforme negativa $-q$ está sobre a parte positiva do eixo Ox , a uma distância x da origem (Figura 21.48). (a) Determine os componentes x e y do campo elétrico produzido pela distribuição de cargas Q nos pontos da parte positiva do eixo Ox . (b) Encontre os componentes x e y da força que a distribuição de cargas Q exerce sobre a carga q . (c) Mostre que para os pontos $x \gg a$, $F_x \cong -Qq/4\pi\epsilon_0 x^2$ e $F_y \cong +Qqa/8\pi\epsilon_0 x^3$. Explique a razão desse resultado.

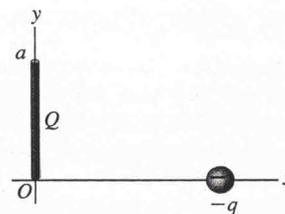


Figura 21.48 Problema 21.90.

21.96 Uma carga positiva Q é distribuída uniformemente ao longo de uma semicircunferência de raio a (Figura 21.49). Obtenha o campo elétrico (módulo, direção e sentido) no centro de curvatura P .

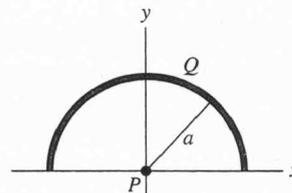


Figura 21.49 Problema 21.96.

21.107 Duas barras delgadas de comprimento L estão sobre o eixo Ox , uma delas entre os pontos $x = a/2$ e $x = a/2 + L$ e a outra entre os pontos $x = -a/2$ e $x = -a/2 - L$. Cada barra possui uma carga Q distribuída uniformemente ao longo de seu comprimento. (a) Calcule o campo elétrico produzido pela segunda barra nos pontos situados ao longo da parte positiva do eixo Ox . (b) Mostre que o módulo da força que uma barra exerce sobre a outra é dado por

$$F = \frac{Q^2}{4\pi\epsilon_0 L^2} \ln \left[\frac{(a+L)^2}{a(a+2L)} \right]$$

(c) Mostre que, quando $a \gg L$, o módulo dessa força se reduz a $F = Q^2/4\pi\epsilon_0 a^2$. (Sugestão: use o desenvolvimento em série $\ln(1+z) = z - z^2/2 + z^3/3 - \dots$, válido para $|z| \ll 1$. Faça todos os desenvolvimentos até pelo menos o termo L^2/a^2 .) Interprete esse resultado.

Lei de Gauss

22.1 Uma folha de papel plana, com área igual a $0,250 \text{ m}^2$, é orientada de tal modo que a normal ao plano forma um ângulo de 60° com a direção de um campo elétrico uniforme, de módulo igual a 14 N/C . (a) Calcule o módulo do fluxo elétrico através da folha. (b) A resposta do item (a) depende da forma geométrica da folha? Por quê? (c) Para que ângulo ϕ , entre a normal ao plano e a direção do campo elétrico, o módulo do fluxo elétrico através da folha se torna (i) máximo? (ii) mínimo? Explique seu raciocínio.

22.4 Um cubo possui uma aresta de comprimento $L = 0,300 \text{ m}$. Ele é colocado com um vértice na origem, como indica a Figura 22.32. O campo elétrico não é uniforme, mas é dado por $\vec{E} = (-5,0 \text{ N/C} \cdot \text{m})x\hat{i} + (3,0 \text{ N/C} \cdot \text{m})z\hat{k}$. (a) Qual é o fluxo elétrico através de cada uma das seis faces do cubo S_1, S_2, S_3, S_4, S_5 e S_6 ? (b) Determine o fluxo elétrico total no interior do cubo.

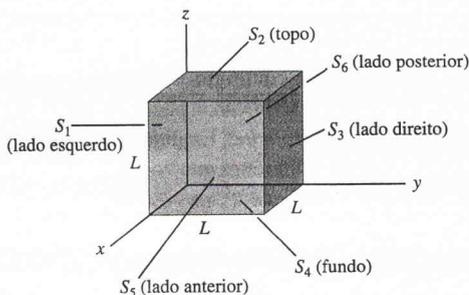


Figura 22.32 Exercícios 22.4 e 22.6; Problema 22.32.

22.8 As três pequenas esferas indicadas na Figura 22.33 possuem cargas $q_1 = 4,0 \text{ nC}$, $q_2 = -7,80 \text{ nC}$ e $q_3 = 2,40 \text{ nC}$. Determine o fluxo elétrico total através de cada uma das superfícies fechadas cujas seções retas são indicadas na figura: (a) S_1 ; (b) S_2 ; (c) S_3 ; (d) S_4 ; (e) S_5 . (f) As respostas dos itens de (a) até (e) dependem de como a carga está distribuída em cada esfera pequena? Por quê?

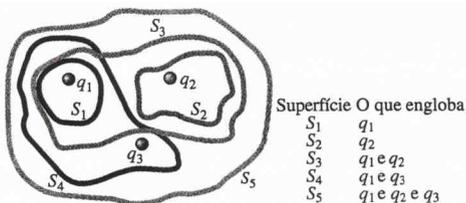


Figura 22.33 Exercício 22.8.

22.16 Uma esfera metálica sólida sem buracos, com raio igual a $0,450 \text{ m}$, possui uma carga líquida de $0,250 \text{ nC}$. Encontre o módulo do campo elétrico (a) em um ponto situado fora da esfera, a uma distância de $0,100 \text{ m}$ de sua superfície; (b) em um ponto interno, a uma distância de $0,100 \text{ m}$ abaixo da superfície.

22.35 O campo elétrico \vec{E}_1 em uma das faces de um paralelepípedo é uniforme em todos os pontos dessa face e aponta perpendicularmente para fora da face. Na face oposta, o campo elétrico \vec{E}_2 também é uniforme em todos os pontos e aponta perpendicularmente para dentro da face (Figura 22.36). As duas faces mencionadas possuem uma inclinação de 30° em relação à horizontal, enquanto \vec{E}_1 e \vec{E}_2 são, ambos, horizontais; o módulo de \vec{E}_1 é igual a $2,50 \times 10^4 \text{ N/C}$ e o módulo de \vec{E}_2 é igual a $7,0 \times 10^4 \text{ N/C}$. (a) Supondo que nenhuma outra linha de campo atravessasse as superfícies do paralelepípedo, determine a carga líquida contida em seu interior. (b) O campo elétrico existente é produzido somente pelas cargas no interior do paralelepípedo ou pode ser produzido também por cargas existentes fora dele? Como se pode ter certeza disso?

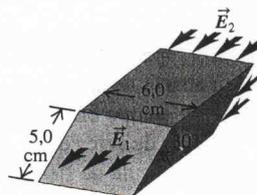


Figura 22.36 Problema 22.35.

22.45 Esferas ocas concêntricas. Uma pequena esfera oca condutora, com raio interno a e raio externo b , é concêntrica com uma grande esfera oca condutora, com raio interno c e raio externo d (Figura 22.39). A carga total sobre a esfera oca interna é igual a $+2q$ e a carga total sobre a esfera oca externa é igual a $+4q$. (a) Determine o módulo, a direção e o sentido do campo elétrico em função da distância r ao centro comum para as regiões (i) $r < a$; (ii) $a < r < b$; (iii) $b < r < c$; (iv) $c < r < d$; (v) $r > d$. Mostre seus resultados em um gráfico do componente radial de \vec{E} em função da distância r . (b) Qual é carga total sobre (i) a superfície interna da esfera oca pequena; (ii) a superfície externa da esfera oca pequena; (iii) a superfície interna da esfera oca grande; (iv) a superfície externa da esfera oca grande?

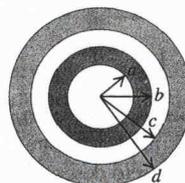


Figura 22.39 Problema 22.45.

Potencial Elétrico

22.48 Uma esfera condutora sólida de raio R possui uma carga positiva Q . A esfera está no interior de uma esfera oca isolante e concêntrica com raio interno R e raio externo $2R$. A esfera isolante possui uma densidade de carga uniforme ρ . (a) Calcule o valor de ρ para que a carga total do sistema seja igual a zero. (b) Usando o valor de ρ encontrado na parte (a), determine o módulo, a direção e o sentido do campo elétrico em cada uma das regiões $0 < r < R$, $R < r < 2R$, e $r > 2R$. Mostre seus resultados em um gráfico do componente radial de \vec{E} em função da distância r . (c) Sabemos que, geralmente, o campo elétrico é descontínuo somente através de uma fronteira onde existe uma fina camada de cargas. Explique como seu resultado da parte (b) confirma essa regra.

22.56 Pode ocorrer equilíbrio estável quando forças elétricas atuam sem nenhuma outra força? No Capítulo 21, fornecemos diversos exemplos para o cálculo de uma força elétrica exercida sobre uma carga puntiforme por outras cargas puntiformes existentes em suas vizinhanças. (a) Considere uma carga puntiforme positiva $+q$. Forneça um exemplo de como colocar duas outras cargas puntiformes escolhidas por você, de modo que a força elétrica resultante exercida sobre a carga $+q$ seja igual a zero. (b) Se a força elétrica sobre a carga $+q$ é igual a zero, essa carga está em equilíbrio. Dizemos que o equilíbrio é estável quando, ao deslocarmos ligeiramente a carga em qualquer direção a partir da posição de equilíbrio, a força elétrica resultante empurra a carga de volta à sua posição de equilíbrio. Para que isso ocorra, qual deve ser a direção do campo elétrico \vec{E} produzido pelas outras cargas puntiformes existentes nas vizinhanças da carga em equilíbrio $+q$? (c) Suponha que a carga $+q$ seja removida para uma distância muito grande das outras cargas; e imagine uma pequena superfície gaussiana centralizada no ponto onde a carga $+q$ estava em equilíbrio. Aplicando a lei de Gauss para essa superfície, mostre que é impossível obter a condição de equilíbrio estável mencionada no item (b), supondo que existam apenas as forças elétricas atuando sobre a partícula. Em outras palavras, uma carga $+q$ não pode atingir um equilíbrio estável quando sobre ela atuam forças exclusivamente eletrostáticas. Esse resultado é conhecido como *teorema de Earnshaw*. (d) Os itens de (a) até (c) referem-se ao equilíbrio estável de uma carga puntiforme positiva $+q$. Prove o teorema de Earnshaw para uma carga puntiforme negativa $-q$.

22.57 Uma distribuição de cargas esfericamente simétricas, porém não uniformes, possui uma densidade $\rho(r)$ dada por:

$$\rho(r) = \rho_0(1 - r/R) \quad \text{para } r \leq R$$

$$\rho(r) = 0 \quad \text{para } r \geq R$$

em que $\rho_0 = 3Q/\pi R^3$ é uma constante positiva. (a) Mostre que a carga total contida na distribuição é igual a Q . (b) Demonstre que o campo elétrico na região $r \geq R$ é idêntico ao campo elétrico produzido por uma carga puntiforme Q , situada em $r = 0$. (c) Obtenha uma expressão para o campo elétrico na região $r \leq R$. (d) Faça um gráfico do módulo do campo elétrico E em função da distância r . (e) Encontre o ponto r para o qual o campo elétrico atinge seu valor máximo e calcule o valor desse campo elétrico máximo.

23.22 Duas cargas puntiformes positivas, cada uma com módulo q , são fixadas sobre o eixo Oy nos pontos $y = a$ e $y = -a$. Considere zero o potencial a uma distância infinita das cargas. (a) Faça um diagrama para mostrar as posições das cargas. (b) Qual é o potencial V_0 na origem? (c) Mostre que o potencial em qualquer ponto sobre o eixo Ox é dado por

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2q}{\sqrt{a^2 + x^2}}$$

(d) Faça um gráfico do potencial sobre o eixo Ox em função de x de $x = -4a$ até $x = +4a$. (e) Qual é o potencial quando $x \gg a$? Explique como esse resultado é obtido.

23.33 Um anel fino uniformemente carregado possui raio de 15,0 cm e carga total igual a $+24,0$ nC. Um elétron é colocado no eixo do anel a uma distância de 30,0 cm de seu centro, sendo obrigado a permanecer vinculado a esse eixo. A seguir, o elétron é liberado a partir do repouso. (a) Descreva o movimento subsequente do elétron. (b) Calcule a velocidade escalar do elétron quando ele atinge o centro do anel.

23.39 Duas placas metálicas paralelas grandes possuem densidade de cargas com mesmo módulo, mas sinais contrários (Figura 23.32). Suponha que elas estejam próximas o suficiente para serem tratadas como placas infinitas ideais. Considerando zero o potencial na superfície esquerda da placa negativa, faça um gráfico do potencial em função de x . Inclua todas as regiões da esquerda das placas até a direita das placas.

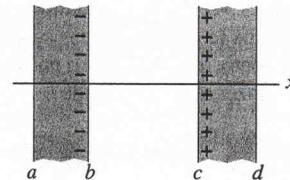


Figura 23.32 Exercício 23.39.

23.43 (a) Mostre que V para uma casca esférica de raio R , com carga q uniformemente distribuída pela sua superfície, é o mesmo que V para um condutor maciço com raio R e carga q . (b) Você atrita um balão inflado sobre o carpete, fazendo-o adquirir um potencial que é 1560 V inferior ao seu potencial antes de se tornar carregado. Caso a carga seja uniformemente distribuída pela superfície do balão e caso o raio do balão seja igual a 15 cm, qual é a carga líquida sobre o balão? (c) Sabendo dessa diferença de potencial de 1200 V do balão em relação a você, você acha que o balão representa perigo? Explique.

23.48 O potencial produzido por uma carga puntiforme Q localizada na origem é dado por

$$V = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}$$

- (a) Calcule os componentes E_x , E_y e E_z usando a Equação (23.19).
 (b) Mostre que o resultado do item (a) está de acordo com a Equação (21.7) para o campo elétrico de uma carga puntiforme.

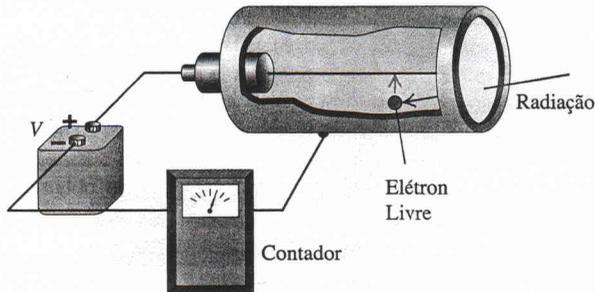


Figura 23.37 Problema 23.62.

23.62 Um contador Geiger detecta radiações tais como partículas alfa, usando o fato de que uma radiação ioniza o ar ao longo de sua trajetória. Ao longo do eixo de um cilindro metálico oco existe um fio fino, que está isolado do cilindro (Figura 23.37). Uma grande diferença de potencial é aplicada entre o fio e o cilindro externo, mantendo-se o fio em um potencial mais elevado; isso produz um forte campo elétrico orientado radialmente para fora do fio. Quando uma radiação ionizante entra no dispositivo, ocorre ionização de algumas moléculas de ar. Os elétrons livres produzidos são acelerados no sentido do fio pelo campo elétrico e, quando eles se aproximam do fio, ionizam muitas outras moléculas de ar. Logo, um pulso de corrente elétrica é gerado e pode ser detectado por um circuito eletrônico apropriado e convertido num clique audível. Suponha que o raio do fio central seja igual a 145 microns e o raio do cilindro oco seja de 1,8 cm. Qual deve ser a diferença de potencial entre o fio e o cilindro para que se produza um campo elétrico igual a 20.000 V/m a uma distância de 1,2 cm do fio? O fio e o cilindro são muito compridos e efeitos de borda podem ser desprezados.

23.79 Uma carga elétrica total Q é uniformemente distribuída ao longo de uma barra fina, de comprimento a . Considere o potencial igual a zero no infinito. Calcule o potencial nos seguintes pontos (veja a Figura 23.40): (a) no ponto P , a uma distância x à direita da barra; (b) no ponto R , a uma distância y acima da extremidade direita da barra. (c) Como se reduzem os resultados da parte (a) e da parte (b) quando x ou y se tornam muito maiores do que a ?

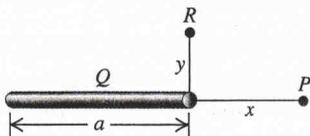


Figura 23.40 Problema 23.79.

23.90 Uma casca cilíndrica isolante, com raio R e comprimento L (como o tubo de papelão de um rolo de papel higiênico), possui uma carga Q uniformemente distribuída sobre sua superfície. (a) Calcule o potencial elétrico em todos os pontos ao longo do eixo do cilindro. Faça a origem do sistema de coordenadas coincidir com o centro do tubo cilíndrico e considere igual a zero o potencial no infinito. (b) Mostre que, quando $L \ll R$, o potencial da parte (a) se reduz ao potencial de um anel carregado com raio R (veja o Exemplo 23.11 na Seção 23.3). (c) Use o resultado da parte (a) para determinar o campo elétrico em todos os pontos ao longo do eixo do cilindro.

Capacitância

24.15 Na Figura 24.25, cada capacitor possui $C = 4,0 \mu\text{F}$ e $V_{ab} = +28,0 \text{ V}$. Calcule (a) a carga de cada capacitor; (b) a diferença de potencial através de cada capacitor; (c) a diferença de potencial entre os pontos a e d .

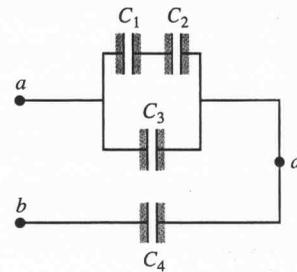


Figura 24.25 Exercício 24.15.

24.28 Um capacitor de capacitância C é carregado até uma diferença de potencial V_0 . Os terminais do capacitor carregado são, a seguir, conectados aos terminais de outro capacitor descarregado, com capacitância igual a $C/2$. Calcule (a) a carga original do sistema; (b) a diferença de potencial final através de cada capacitor; (c) a energia final do sistema; (d) a diminuição da energia quando os capacitores são conectados. (e) Para onde foi a energia 'perdida' pelo sistema?

24.29 Um capacitor com placas paralelas no vácuo, com área A e distância x entre as placas, possui cargas $+Q$ e $-Q$ em suas placas. O capacitor é desconectado da fonte de carga, de modo que a carga de cada placa permanece fixa. (a) Qual é a energia total armazenada no capacitor? (b) As placas são afastadas até atingirem uma distância adicional dx . Qual é a variação da energia acumulada? (c) Se F for o módulo da força de atração entre as placas, então a variação de energia acumulada deve ser igual ao trabalho $dW = Fdx$ realizado para afastar as placas. Encontre uma expressão para F . (d) Explique por que F não é igual a QE , em que E é o módulo do campo elétrico entre as placas.

24.50 Um capacitor com placas paralelas no ar é constituído por duas placas quadradas, com um mesmo lado de 16 cm e separadas por uma distância igual a 4,7 mm. Ele é conectado a uma bateria de 12 V. (a) Qual é a capacitância? (b) Qual é a carga de cada placa? (c) Qual é o campo elétrico entre as placas? (d) Qual é a energia armazenada no capacitor? (e) Supondo que a bateria seja desligada e, a seguir, as placas sejam puxadas até que a distância entre as placas passe para 9,4 mm, quais seriam as respostas dos itens (a), (b), (c) e (d)?

24.51 Suponha que a bateria do Problema 24.50 permaneça ligada enquanto você afasta as placas. Quais seriam as respostas dos itens (a), (b), (c) e (d) depois do afastamento das placas?

Capacitância (dielétricos)

24.39 Duas placas paralelas possuem cargas iguais e opostas. Quando existe vácuo entre as placas, o módulo do campo elétrico é $E = 3,20 \times 10^5 \text{ V/m}$. Quando o espaço entre as placas é preenchido por um dielétrico, o campo elétrico possui módulo $E = 2,50 \times 10^5 \text{ V/m}$. (a) Qual é a densidade de carga em cada superfície do dielétrico? (b) Qual é o valor da constante dielétrica?

24.71 Um capacitor com placas paralelas possui o espaço entre as placas preenchido com duas camadas de dielétricos, uma com uma constante dielétrica K_1 e a outra com a constante K_2 (veja a Figura 24.37). Cada camada possui espessura $d/2$, em que d é a distância entre as placas. Mostre que a capacitância é dada por

$$C = \frac{2\epsilon_0 A}{d} \left(\frac{K_1 K_2}{K_1 + K_2} \right)$$

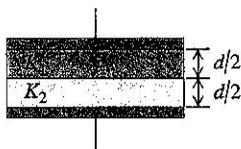


Figura 24.37 Problema 24.71.

24.72 Um capacitor com placas paralelas possui o espaço entre as placas preenchido com duas camadas de dielétricos, uma com uma constante dielétrica K_1 e a outra com a constante K_2 (veja a Figura 24.38). Cada camada possui espessura igual à distância d entre as placas e cada camada preenche o espaço entre as placas. Mostre que a capacitância é dada por

$$C = \frac{\epsilon_0 A (K_1 + K_2)}{2d}$$

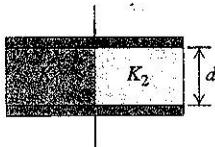


Figura 24.38 Problema 24.72.

Carga e Campo Elétrico

21.2 $Q = 2,00 \text{ C}$ e $n_e = 1,25 \times 10^{19}$

21.8 (a) $n_e = 7,25 \times 10^{24}$ elétrons (b) $|q| = 8,43 \times 10^{-4} \text{ C}$ (c) $n'_e/n_e = 7,27 \times 10^{-10}$

21.32 (a) $q = -3,9 \text{ C}$ (b) $F = 1,4 \times 10^7 \text{ N}$, a força repulsiva é enorme e este não é um modo factível para voar.

21.43 (a) 0 (b) $E_x = -2kq(x^2 + a^2)/(x^2 - a^2)^2$ para $x < -a$; $E_x = -4kqax/(x^2 - a^2)^2$ para $x < |a|$ e $E_x = -2kq(x^2 + a^2)/(x^2 - a^2)^2$ para $x > a$

21.53 (a) $\vec{E} = \frac{2k\lambda}{x\sqrt{x^2/a^2 + 1}}\vec{i}$ (b) $\vec{E} = \frac{2k\lambda}{x}\vec{i}$

21.62 (a) A carga de cima e a de baixo são positivas e a do meio negativa (b) Trace através da carga do meio uma reta perpendicular à reta que contém as três cargas. Sobre esta reta perpendicular o campo resultante das duas cargas positivas só tem componente horizontal. Os dois mínimos ocorrem nos pontos da reta perpendicular onde o campo da carga do meio (negativa) cancela o campo resultante das cargas positivas.

21.90 (a) $E_x = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 x} \frac{1}{\sqrt{x^2 + a^2}}$ $E_y = -\frac{Q}{4\pi\epsilon_0 a} \left(\frac{1}{x} - \frac{1}{\sqrt{x^2 + a^2}} \right)$ (b) $\vec{F} = q_0\vec{E}$

21.96 $\vec{E} = -\frac{2kQ}{\pi a^2}\vec{j}$

21.107 (a) $E_x = \frac{2kQ}{L} \left(\frac{1}{2x+a} - \frac{1}{2L+2x+a} \right)$

Lei de Gauss

22.1 (a) $1,75 \text{ (N/C)} \cdot \text{m}^2$ (b) Não (c) (i) 0° ; (ii) 90°

22.4 (a) $\Phi_{S_1} = \Phi_{S_3} = \Phi_{S_4} = \Phi_{S_6} = 0$ $\Phi_{S_2} = 0,081 \text{ (N/C)} \cdot \text{m}^2$ $\Phi_{S_5} = -0,135 \text{ (N/C)} \cdot \text{m}^2$
 (b) Fluxo total $\Phi = -0,054 \text{ (N/C)} \cdot \text{m}^2$; carga dentro da superfície $Q = -4,78 \times 10^{-13} \text{ C}$

22.8 (a) $\Phi_{S_1} = 452 \text{ (N/C)} \cdot \text{m}^2$ (b) $\Phi_{S_2} = -881 \text{ (N/C)} \cdot \text{m}^2$ (c) $\Phi_{S_3} = -429 \text{ (N/C)} \cdot \text{m}^2$ (d) $\Phi_{S_4} = 723 \text{ (N/C)} \cdot \text{m}^2$ (e) $\Phi_{S_5} = -158 \text{ (N/C)} \cdot \text{m}^2$ (f) Para a lei de Gauss o que é relevante é a carga total e não como ela está distribuída dentro da superfície.

22.16 (a) $E = 7,44 \text{ N/C}$ (b) $E = 0$

22.35 (a) $Q = -5,98 \times 10^{-10} \text{ C}$ (b) As linhas do campo elétrico estático que atravessam o paralelepípedo devem terminar em cargas fora do paralelepípedo.

22.45 (a) (i) 0; (ii) 0; (iii) $q/(2\pi\epsilon_0 r^2)$ radialmente para fora; (iv) 0; (v) $3q/(2\pi\epsilon_0 r^2)$ radialmente para fora (b) (i) 0; (ii) $2q$; (iii) $-2q$; (iv) $6q$

22.48 (a) $\rho = -\frac{3Q}{28\pi R^3}$ (b) Para $r < R$ e $r > 2R$, $E = 0$. Para $R < r < 2R$, $E = \frac{2Q}{7\pi\epsilon_0 r^2} - \frac{Qr}{28\pi\epsilon_0 R^3}$.

22.57 (c) $E(r) = -\frac{Qr}{4\pi\epsilon_0 R^3} \left(4 - \frac{3r}{R} \right)$, $r \leq R$ (e) $E = \frac{Q}{3\pi\epsilon_0 R^2}$ em $r = \frac{2R}{3}$

Potencial Elétrico

23.22 (b) $V_0 = \frac{2q}{4\pi\epsilon_0 a}$ (e) para $x \gg a$, $V = \frac{2q}{4\pi\epsilon_0 x}$

23.33 (a) Oscilatório, mas não é um MHS (b) $v = 1,67 \times 10^7$ m/s.

23.43 (b) $q = -20$ nC (c) Não, a carga no balão é muito pequena.

23.48 (a) $E_x = \frac{kQx}{r^3}$, $E_y = \frac{kQy}{r^3}$, $E_z = \frac{kQz}{r^3}$ (b) $\vec{E} = \frac{kQ}{r^2} \hat{r}$

23.62 1157 V

23.79 (a) $V = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 a} \ln\left(\frac{x+a}{x}\right)$ (b) $V = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 a} \ln\left(\frac{a + \sqrt{a^2 + y^2}}{y}\right)$ (c) Item (a) $V \rightarrow$

$\frac{Q}{4\pi\epsilon_0 x}$ e item (b) $V \rightarrow \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 y}$, potenciais de cargas puntiformes.

23.90 (a) $V = \frac{kQ}{L} \ln\left(\frac{\sqrt{(L/2-x)^2 + R^2} + L/2 - x}{\sqrt{(L/2+x)^2 + R^2} - L/2 - x}\right)$ (b) $V = \frac{kQ}{\sqrt{x^2 + R^2}}$ (potencial de um

anel) (c) $E_x = \frac{kQ\left(\sqrt{(L/2-x)^2 + R^2} - \sqrt{(L/2+x)^2 + R^2}\right)}{\sqrt{(L/2-x)^2 + R^2}\sqrt{(L/2+x)^2 + R^2}}$

Capacitância

24.15 (a) $C_{eq} = 2,4 \mu F$ $Q_{total} = 6,72 \times 10^{-5} C$ $Q_1 = Q_2 = 2,24 \times 10^{-5} C$ $Q_3 = 4,48 \times 10^{-5} C$ $Q_4 = 6,72 \times 10^{-5} C$ (b) $V_1 = 5,6 V$ $V_2 = 5,6 V$ $V_3 = 11,2 V$ $V_4 = 16,8 V$ (c) $V_{ad} = 11,2 V$

24.28 (a) $Q = CV_0$ (b) $V = 2V_0/3$ (c) $U = CV_0^2/3$ (d) A diferença de energia ($U = CV_0^2/6$) foi dissipada em calor e radiação eletromagnética.

24.29 (a) $U = \frac{Q^2 x}{2\epsilon_0 A}$ (b) $dU = \frac{Q^2 dx}{2\epsilon_0 A}$ (c) $F = \frac{Q^2}{2\epsilon_0 A}$ (d) Para calcular a força de uma placa sobre a outra, devemos usar o campo de uma placa e não o campo total.

24.50 (a) $C = 4,8 \times 10^{-11} F$ (b) $Q = 0,58 \times 10^{-9} C$ (c) $E = 2550 V/m$ (d) $U = 3,46 \times 10^{-9} J$ (e) $C = 2,41 \times 10^{-11} F$ $Q = 0,58 \times 10^{-9} C$ $E = 2550 V/m$ $U = 6,91 \times 10^{-9} J$

24.51 (a) $C = 2,4 \times 10^{-11} F$ (b) $Q = 2,9 \times 10^{-10} C$ (c) $E = 1,3 \times 10^3 V/m$ (d) $U = 1,7 \times 10^{-9} J$

24.39 (a) $6,20 \times 10^{-7} C/m^2$ (b) 1,28

24.71 $C = \frac{2\epsilon_0 A}{d} \left(\frac{K_1 K_2}{K_1 + K_2} \right)$

24.72 $C = \frac{\epsilon_0 A}{2d} (K_1 + K_2)$
