

24. Vimos na Seção 26-11 que o potencial no interior de um condutor é o mesmo que o de sua superfície. (a) E no caso de um condutor de formato irregular, com uma cavidade irregular no seu interior? (b) E no caso da cavidade ter uma pequena "brecha" ligando-a com o exterior? (c) E no caso de a cavidade estar fechada, mas possuir uma carga puntiforme suspensa no seu interior? Para cada situação, discuta o potencial dentro do material condutor e em diferentes pontos dentro da cavidade.

25. Uma casca esférica condutora isolada tem uma carga negativa Q que acontecerá se um objeto metálico, com carga positiva, for colocado em contato com o interior da casca? Discuta os três casos em que o módulo da carga positiva, comparado ao da negativa, é (a) menor, (b) igual e (c) maior?

EXERCÍCIOS E PROBLEMAS

Seção 26-2 O Potencial Elétrico

1E. A diferença de potencial elétrico entre a terra e uma nuvem numa determinada tempestade é $1,2 \times 10^9$ V. Qual é o módulo da variação da energia potencial elétrica (em múltiplos de elétron-volt) de um elétron que se move entre esses pontos?

2E. Uma bateria de carro de 12 V pode enviar uma carga total de 84 A·h (ampère-horas) através de um circuito, de um terminal ao outro. (a) Quantos coulombs de carga isso representa? (b) Se toda essa carga for submetida a uma diferença de potencial de 12 V, que energia estará envolvida?

3P. Em um relâmpago típico, a diferença de potencial entre uma nuvem e a terra é de $1,0 \times 10^9$ V e a quantidade de carga transferida é de 30 C. (a) Qual é a variação de energia da carga transferida? (b) Se toda a energia liberada pudesse ser usada para acelerar um carro de 1.000 kg a partir do repouso, qual seria sua velocidade escalar final? (c) Que quantidade de gelo, a 0°C, derreteria se toda a energia liberada pudesse ser usada para tal fim? O calor de fusão do gelo é $3,3 \times 10^5$ J/kg.

Seção 26-4 Cálculo do Potencial a Partir do Campo

4E. Duas linhas infinitas de carga estão paralelas ao eixo z. Uma, de carga por unidade de comprimento $+\lambda$, está a uma distância a à direita desse eixo. A outra, de carga por unidade de comprimento $-\lambda$, está a uma distância a à esquerda do eixo (as linhas e o eixo z estão no mesmo plano). Esboce algumas das superfícies equipotenciais decorrentes do arranjo.

5E. Quando um elétron se move de A até B ao longo da linha de campo elétrico mostrada na Fig. 26-24, o campo elétrico realiza um trabalho de $3,94 \times 10^{-19}$ J sobre ele. Quais são as diferenças de potencial elétrico (a) $V_B - V_A$, (b) $V_C - V_A$ e (c) $V_C - V_B$?

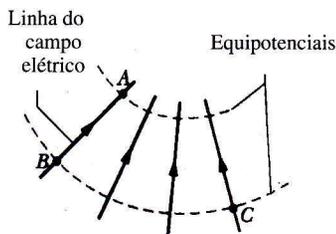


Fig. 26-24 Exercício 5.

6E. A Fig. 26-25 mostra, uma chapa não-condutora, infinita, com densidade superficial de carga positiva σ sobre um lado. (a) Qual é o trabalho realizado pelo campo elétrico da chapa, quando uma pequena carga teste positiva q_0 é deslocada de uma posição inicial sobre a chapa até uma posição final localizada a distância perpendicular z da chapa? (b)

Use a Eq. 26-11 e o resultado de (a) para mostrar que o potencial elétrico de uma chapa infinita de carga pode ser escrita como

$$V = V_0 - (\sigma/2\epsilon_0)z,$$

onde V_0 é o potencial na superfície da chapa.

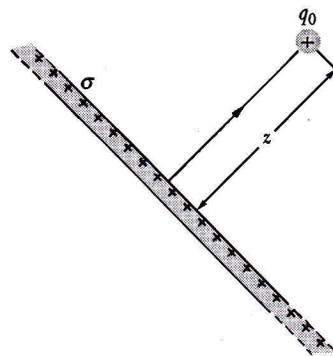


Fig. 26-25 Exercício 6.

7E. Na experiência da gota de óleo, de Millikan, (ver a Seção 24-8) mantém-se um campo elétrico uniforme de $1,92 \times 10^5$ N/C na região entre duas placas separadas de 1,5 cm. Determine a diferença de potencial entre as placas.

8E. Duas grandes placas condutoras, paralelas entre si e afastadas por uma distância de 12 cm, têm cargas iguais e de sinais opostos nas faces que se defrontam. Um elétron colocado em qualquer lugar entre as placas experimenta uma força eletrostática de $3,9 \times 10^{-15}$ N. (a) Determine o campo elétrico na posição do elétron. (b) Qual é a diferença de potencial entre as placas?

9E. Uma chapa não-condutora infinita tem uma densidade superficial de carga $\sigma = 0,10 \mu\text{C}/\text{m}^2$ sobre um lado. Qual é a distância entre as superfícies equipotenciais cujos potenciais diferem de 50 V?

10P. Na Fig. 26-26, três longas linhas paralelas de carga, com as densidades lineares indicadas, estendem-se perpendicularmente ao plano da

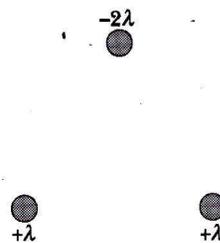


Fig. 26-26 Problema 10.

página. Esboce algumas linhas de campo elétrico e as seções transversais no plano da página de algumas superfícies equipotenciais.

11P. O campo elétrico dentro de uma esfera não-condutora de raio R , com carga espalhada com uniformidade por todo o seu volume, está radialmente direcionado e tem módulo dado por

$$E(r) = \frac{qr}{4\pi\epsilon_0 R^3}.$$

Nesta expressão, q (positiva ou negativa) é a carga total da esfera e r é a distância ao centro da esfera. (a) Tomando $V = 0$ no centro da esfera, determine o potencial $V(r)$ dentro da esfera. (b). Qual é a diferença de potencial elétrico entre um ponto da superfície e o centro da esfera? (c) Sendo q positivo, qual desses dois pontos tem maior potencial?

12P. Um contador Geiger possui um cilindro metálico com 2,00 cm de diâmetro e ao longo do eixo está estendido um fio de $1,3 \times 10^{-4}$ cm de diâmetro. Se a diferença de potencial entre eles for de 850 V, qual será o campo elétrico na superfície (a) do fio e (b) do cilindro? (Sugestão: Use o resultado do Problema 26, Cap. 25.)

13P*. Uma carga q está uniformemente distribuída através de um volume esférico de raio R . (a) Fazendo $V = 0$ no infinito, mostre que o potencial a uma distância r do centro, onde $r < R$, é dado por

$$V = \frac{q(3R^2 - r^2)}{8\pi\epsilon_0 R^3}.$$

(Sugestão: Ver o Exemplo 25-7) (b) Por que este resultado difere daquele do item (a) do Problema 11? (c) Qual é a diferença de potencial entre um ponto da superfície e o centro da esfera? (d) Por que esse resultado não difere daquele do item (b) do Problema 11?

14P*. Uma casca esférica espessa de carga Q e densidade volumétrica de carga uniforme ρ , está limitada pelos raios r_1 e r_2 , onde $r_2 > r_1$. Com $V = 0$ no infinito, determine o potencial elétrico V em função da distância r ao centro da distribuição, considerando as regiões (a) $r > r_2$, (b) $r_2 > r > r_1$ e (c) $r < r_1$. (d) Estas soluções concordam em $r = r_2$ e $r = r_1$? (Sugestão: Ver o Exemplo 25-7.)

Seção 26-5 Potencial Criado por uma Carga Puntiforme

15E. Considere uma carga puntiforme $q = +1,0 \mu\text{C}$ e dois pontos A e B que distam, respectivamente, 2,0 m e 1,0 m da carga. (a) Tomando tais pontos diametralmente opostos, como mostra a Fig. 26-27a, qual é a diferença de potencial $V_A - V_B$? (b) Repita o item (a) considerando os pontos A e B localizados como mostra a Fig. 26-27b.

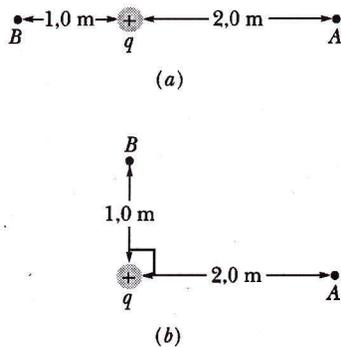


Fig. 26-27 Exercício 15.

16E. Considere uma carga puntiforme $q = 1,5 \times 10^{-8} \text{C}$, e tome $V = 0$ no infinito. (a) Quais são a forma e as dimensões de uma superfície

equipotencial que tem um potencial de 30 V graças somente a q ? (b) Estão igualmente espaçadas as superfícies cujos potenciais diferem de uma quantidade constante, digamos, 1,0 V?

17E. A que potencial uma carga de $1,5 \times 10^{-8} \text{C}$ elevaria uma esfera condutora isolada, de raio igual a 16,0 cm?

18E. Enquanto uma nave espacial se move através do gás ionizado e diluído da ionosfera da Terra, seu potencial sofre uma variação típica de $-1,0 \text{V}$, durante uma rotação. Supondo que a nave seja uma esfera de raio igual a 10 m, estime a quantidade de carga que ela coleta.

19E. Uma grande quantidade do material que compõe os anéis de Saturno (veja a Fig. 26-28) está na forma de minúsculos grãos de poeira, cujos raios são da ordem de 10^{-6}m . Tais grãos estão localizados numa região contendo um gás ionizado e diluído, e adquirem elétrons em excesso. Como uma aproximação, suponha que um grão seja esférico, com um raio $R = 1,0 \times 10^{-6} \text{m}$. Quantos elétrons em excesso ele teria de adquirir para que o potencial em sua superfície atingisse -400V (tomando $V = 0$ no infinito)?

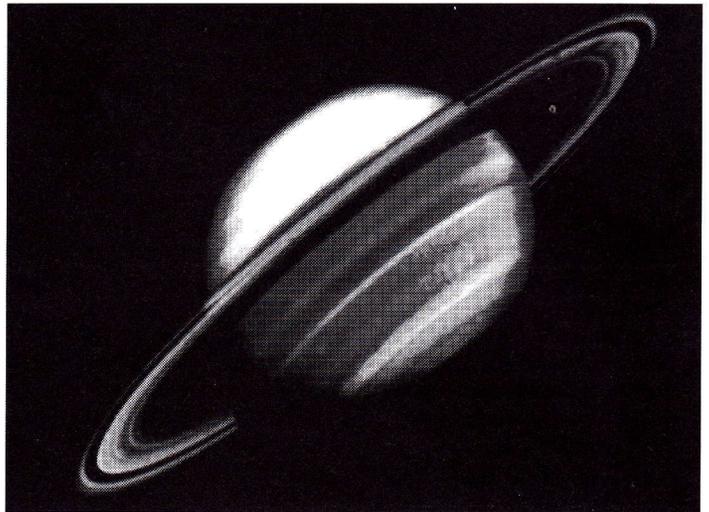


Fig. 26-28 Exercício 19.

20E. Para a situação da Fig. 26-29, esboce qualitativamente (a) as linhas do campo elétrico e (b) as seções transversais das superfícies equipotenciais no plano da figura.

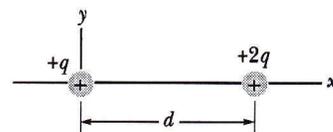


Fig. 26-29 Exercício 20 e Problema 31.

21E. Repita o Exercício 20 para a situação da Fig. 26-30.

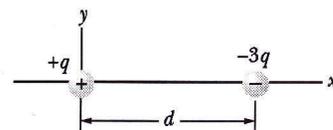


Fig. 26-30 Exercícios 21 e 28.

22E. (a) Sabendo-se que uma esfera condutora isolada de 10 cm de raio tem uma carga de $4,0 \mu\text{C}$ e, considerando-se $V = 0$ no infinito, qual é o potencial sobre a superfície da esfera? (b) Tal situação, pode realmente ocorrer, dado que o ar em torno da esfera sofre ruptura elétrica quando o campo excede a $3,0 \text{ MV/m}$?

23P. Quais são (a) a carga e (b) a densidade de carga sobre a superfície de uma esfera condutora de raio $0,15 \text{ m}$, cujo potencial é de 200 V (com $V = 0$ no infinito)?

24P. Frequentemente podemos observar um campo elétrico de aproximadamente 100 V/m , próximo à superfície da Terra. Se este fosse o valor do campo sobre toda a superfície, qual seria o potencial elétrico de um ponto sobre a superfície? (Faça $V = 0$ no infinito.)

25P. Suponha que a carga negativa de uma moeda, de um centavo, de cobre, fosse levada para uma distância muito grande da Terra — talvez uma galáxia distante — e que a carga positiva fosse uniformemente distribuída sobre a superfície da Terra. De quanto variaria o potencial elétrico na superfície da Terra? (Veja o Exemplo 23-3.)

26P. Uma gota esférica de água transportando uma carga de 30 pC tem um potencial de 500 V em sua superfície (com $V = 0$ no infinito). (a) Qual é o raio da gota? (b) Se duas gotas iguais a esta, com a mesma carga e o mesmo raio, se juntarem para constituir uma única gota esférica, qual será o potencial na superfície da nova gota?

27P. Uma esfera de cobre, de raio igual a $1,0 \text{ cm}$, possui um revestimento muito fino de níquel em sua superfície. Alguns átomos de níquel são radioativos, cada átomo emitindo um elétron quando ele decai. A metade destes elétrons entra na esfera de cobre, cada um deles depositando 100 keV de energia na esfera. A outra metade dos elétrons escapa, cada um levando para longe uma carga $-e$. O revestimento de níquel tem uma atividade de 10 mCi ($= 10 \text{ milicuries} = 3,70 \times 10^8$ decaimentos radioativos por segundo). A esfera está suspensa por um longo fio não-condutor e isolada de sua vizinhança. (a) Quanto tempo levará para que o potencial da esfera aumente de 1.000 V ? (b) Quanto tempo levará para que a temperatura da esfera aumente de $5,0^\circ\text{C}$? A capacidade calorífica da esfera é de $14,3 \text{ J}^\circ\text{C}$.

Seção 26-7 Potencial Criado por um Dipolo Elétrico

28E. Na Fig. 26-30, considerando $V = 0$ no infinito, localize (em termos de d) um ponto sobre o eixo x (que não esteja no infinito) onde o potencial devido às duas cargas seja nulo.

29E. Duas cargas isoladas de módulos Q_1 e Q_2 estão separadas por uma distância d . Num ponto intermediário $d/4$ de Q_1 , o campo elétrico resultante é zero. Fazendo $V = 0$ no infinito, localize um ponto (que não seja no infinito) onde o potencial em virtude delas seja zero.

30E. A molécula de amônia NH_3 tem um momento de dipolo elétrico permanente igual a $1,47\text{D}$, onde $\text{D} = \text{unidade debye} = 3,34 \times 10^{-30} \text{ C}\cdot\text{m}$. Calcular o potencial elétrico devido à molécula de amônia, num ponto distante $52,0 \text{ nm}$ ao longo do eixo do dipolo. (Faça $V = 0$ no infinito.)

31P. Na Fig. 26-29, considerando $V = 0$ no infinito, localize os pontos (outros que não estejam no infinito), (a) onde $V = 0$ e (b) onde $\mathbf{E} = 0$. Considere somente pontos sobre o eixo x , e seja $d = 1,0 \text{ m}$.

32P. Uma carga puntiforme $q_1 = +6,0e$ está fixa na origem de um sistema de coordenadas retangulares, e uma segunda carga puntiforme $q_2 = -10e$ está fixa em $x = 8,6 \text{ nm}$, $y = 0$. O lugar geométrico de todos os pontos, no plano xy com $V = 0$, é um círculo centrado sobre o eixo x , como mostra a Fig. 26-31. Determine (a) a posição x_c do centro do círculo e (b) o raio R do círculo. (c) A seção transversal no plano xy da superfície equipotencial de 5 V também é um círculo?

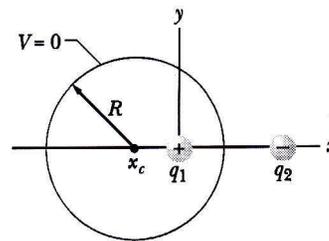


Fig. 26-31 Problema 32.

33P. Para a configuração de carga da Fig. 26-32, mostre que $V(r)$ em pontos sobre o eixo vertical, supondo $r \gg d$, é dado por

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r} \left(1 + \frac{2d}{r} \right).$$

(Sugestão: A configuração de carga pode ser vista como a soma de uma carga isolada e um dipolo.)

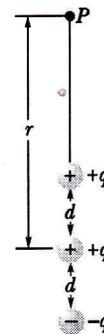


Fig. 26-32 Problema 33.

34P. Na Fig. 26-33, qual é o potencial resultante no ponto P devido a quatro cargas puntiformes, tomando-se $V = 0$ no infinito?

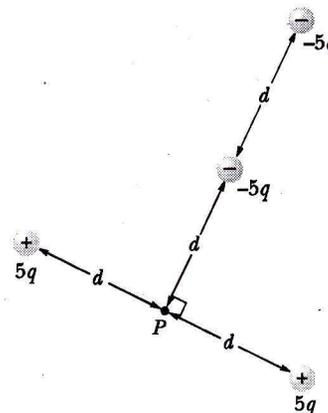


Fig. 26-33 Problema 34.

35P. Na Fig. 26-34, o ponto P está no centro do retângulo. Com $V = 0$ no infinito, qual é o potencial resultante em P por causa das seis cargas puntiformes?

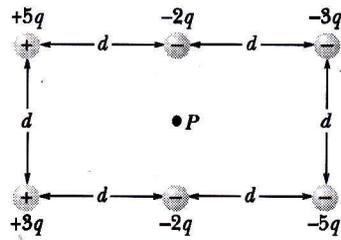


Fig. 26-34 Problema 35.

Ordene as três situações de acordo com o módulo do campo elétrico que é criado em P , do maior para o menor.

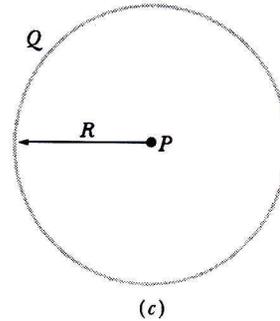
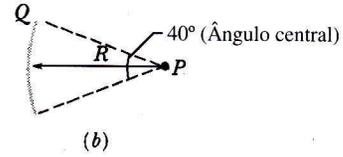
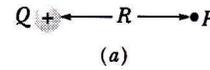


Fig. 26-37 Problema 38.

Seção 26-8 Potencial Criado por uma Distribuição Contínua de Carga

36E (a) A Fig. 26-35a, mostra uma barra fina de plástico com carga positiva, de comprimento L e densidade linear de carga uniforme λ . Fazendo $V = 0$ no infinito e considerando a Fig. 26-13 e a Eq. 26-28, determine o potencial elétrico no ponto P sem fazer cálculo. (b) A Fig. 26-35b mostra uma barra idêntica, exceto que ela está dividida ao meio e a metade direita está com carga negativa; as metades direita e esquerda têm o mesmo módulo λ para a densidade linear de carga uniforme. Qual é o potencial elétrico no ponto P na Fig. 26-35b?

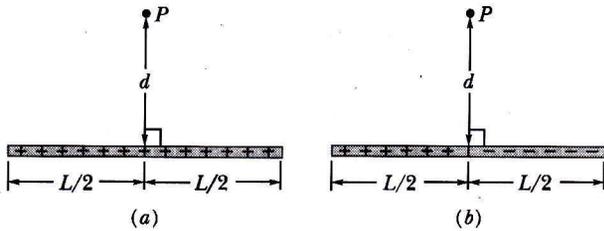


Fig. 26-35 Exercício 36.

39P. Uma barra fina de plástico, circular, de raio R , tem uma carga positiva $+Q$ uniformemente distribuída ao longo de um quarto de sua circunferência e uma carga negativa de $-6Q$ uniformemente distribuída ao longo do remanescente da circunferência (Fig. 26-38). Com $V = 0$ no infinito, qual é o potencial elétrico (a) no centro C do círculo e (b) no ponto P , que está sobre o eixo do círculo a uma distância z de seu centro?

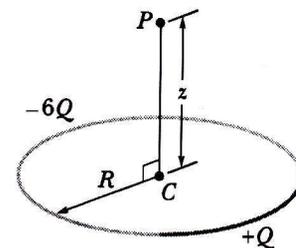


Fig. 26-38 Problema 39.

37E. (a) Na Fig. 26-36, uma barra fina de plástico tendo uma carga $-Q$ uniformemente distribuída, foi curvada num arco de círculo de raio R e ângulo central de 120° . Com $V = 0$ no infinito, qual é o potencial elétrico em P , o centro de curvatura da barra?

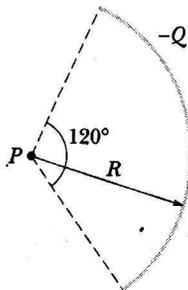


Fig. 26-36 Exercício 37.

38P. (a) Na Fig. 26-37a, qual é o potencial no ponto P devido à carga Q a uma distância R de P ? Faça $V = 0$ no infinito. (b) Na Fig. 26-37b, a mesma carga Q foi espalhada sobre um arco de círculo de raio R e ângulo central 40° . Qual é o potencial no ponto P , o centro de curvatura do arco? (c) Na Fig. 26-37c, a mesma carga Q foi espalhada sobre um círculo de raio R . Qual é o potencial no ponto P , o centro do círculo? (d)

40P. Um disco de plástico é carregado sobre um lado com uma densidade superficial de carga σ e, a seguir, três quadrantes do disco são retirados. O quadrante que resta, é mostrado na Fig. 26-39. Com $V = 0$ no

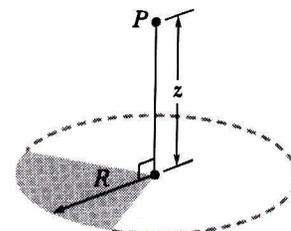


Fig. 26-39 Problema 40.

infinito, qual é o potencial criado por esse quadrante no ponto P , que está sobre o eixo central do disco original a uma distância z do centro original?

41P. Qual é o potencial no ponto P na Fig. 26-40, a uma distância d da extremidade direita de uma barra fina de plástico de comprimento L e carga total $-Q$? A carga está distribuída uniformemente e $V = 0$ no infinito.

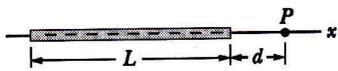


Fig. 26-40 Problema 41.

Seção 26-9 Cálculo do Campo a Partir do Potencial

42E. Duas grandes placas metálicas, paralelas entre si e separadas por uma distância de 1,5 cm, possuem cargas iguais e de sinais opostos sobre as faces que se defrontam. Tome o potencial da placa negativa como zero. Se o potencial a meia distância entre as placas for igual a +5,0 V, qual será o campo elétrico na região entre as placas?

43E. Numa certa situação, o potencial elétrico varia ao longo do eixo x conforme se mostra no gráfico da Fig. 26-41. Para cada um dos intervalos ab , bc , cd , de , ef , fg , e gh , determine o componente x do campo elétrico e, a seguir, faça o gráfico de E_x versus x . (Ignore o comportamento nas extremidades dos intervalos.)

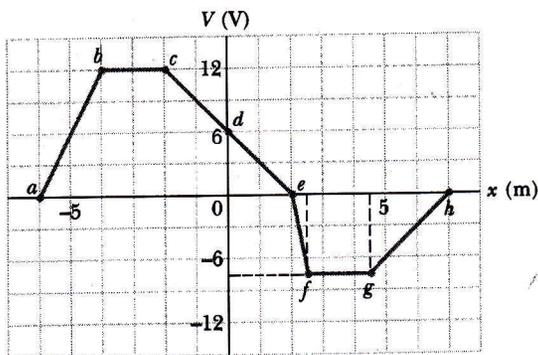


Fig. 26-41 Exercício 43.

44E. Partindo da Eq. 26-23, determine o campo elétrico devido a um dipolo num ponto P sobre o eixo do dipolo.

45E. Mostramos, na Seção 26-8, que o potencial num ponto sobre o eixo central de um disco carregado é dado por

$$V = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} (\sqrt{z^2 + R^2} - z).$$

Use a Eq. 26-34 e a simetria para mostrar que E para tal ponto é dado por

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \left(1 - \frac{z}{\sqrt{R^2 + z^2}} \right).$$

46E. O potencial elétrico V no espaço entre as placas de um particular, e agora obsoleto, tubo de vácuo é dado por $V = 1.500 x^2$, onde V está em volts quando x , a distância a partir de uma das placas, está em metros. Calcule o módulo, a direção e o sentido do campo elétrico em $x = 1,3$ cm.

47E. O Exercício 45 do Cap. 25 trata do cálculo de Rutherford do campo elétrico a uma distância r do centro de um átomo e no seu interior. Rutherford também deu o potencial elétrico como

$$V = \frac{Ze}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r} - \frac{3}{2R} + \frac{r^2}{2R^3} \right).$$

(a) Mostre como a expressão para o campo elétrico dada no Exercício 45 do Cap. 25 pode ser obtida da expressão acima para V . (b) Por que essa expressão para V não tende para zero quando $r \rightarrow \infty$?

48P. (a) Mostre que o potencial elétrico num ponto sobre o eixo de um anel de carga de raio R , calculado diretamente da Eq. 26-25, é

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{\sqrt{z^2 + R^2}}.$$

(b) A partir desse resultado, deduza uma expressão para E em pontos axiais; compare seu resultado com o cálculo de E feito na Seção 24-5.

49P. A barra fina com carga positiva da Fig. 26-42 tem uma densidade linear de carga uniforme λ e se encontra ao longo de um eixo x como é mostrado. (a) Com $V = 0$ no infinito, determine o potencial devido à barra no ponto P sobre o eixo x . (b) Use o resultado do item (a) para calcular o componente do campo elétrico em P ao longo do eixo x . (c) Use a simetria para determinar o componente do campo elétrico em P numa direção perpendicular ao eixo x .



Fig. 26-42 Problema 49.

50P. Na Fig. 26-43, uma barra fina com carga positiva, de comprimento L , que está ao longo do eixo x com uma extremidade na origem ($x = 0$), tem uma densidade linear de carga dada por $\lambda = kx$, onde k é uma constante. (a) Fazendo $V = 0$ no infinito, determine V no ponto P sobre o eixo y . (b) Determine o componente vertical E_y da intensidade do campo elétrico em P a partir do resultado da parte (a) e também por integração dos campos diferenciais em razão dos elementos de carga diferenciais. (c) Por que o componente horizontal E_x do campo elétrico em P , não pode ser obtido, usando-se o resultado da parte (a)?

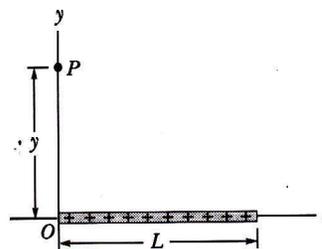


Fig. 26-43 Problema 50.

Seção 26-10 Energia Potencial Elétrica de um Sistema de Cargas Puntiformes

51E. (a) Deduza uma expressão para $V_A - V_B$, a diferença de potencial entre os pontos A e B na Fig. 26-44. (b) O resultado obtido se reduz aos valores esperados quando $d = 0$? Quando $a = 0$? Quando $q = 0$?

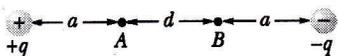


Fig. 26-44 Exercício 51.

52E. Duas cargas $q = +2,0 \mu\text{C}$ estão fixas no espaço e separadas pela distância $d = 2,0 \text{ cm}$, como mostra a Fig. 26-45. (a) Com $V = 0$ no infinito, qual é o potencial elétrico em C? (b) Uma terceira carga $q = +2,0 \mu\text{C}$ é trazida do infinito até o ponto C. Quanto trabalho foi realizado? (c) Qual é a energia potencial U da configuração das três cargas quando a terceira delas está no lugar?

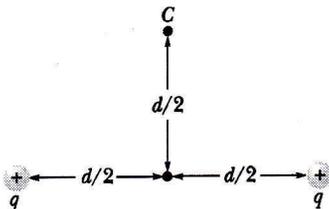


Fig. 26-45 Exercício 52.

53E. As cargas e as coordenadas de duas cargas puntiformes localizadas no plano xy são: $q_1 = +3,0 \times 10^{-6} \text{ C}$, $x = 3,5 \text{ cm}$, $y = +0,50 \text{ cm}$; e $q_2 = -4,0 \times 10^{-6} \text{ C}$, $x = -2,0 \text{ cm}$, $y = +1,5 \text{ cm}$. Que trabalho deve ser realizado para colocar essas cargas nas posições dadas, começando de uma separação infinita?

54E. Uma década antes de Einstein ter publicado sua teoria da relatividade, J.J. Thomson sugeriu que o elétron podia ser constituído de partes pequenas e que sua massa decorria da interação elétrica entre as partes. Sugeriu também que a energia era igual a mc^2 . Faça uma estimativa grosseira da massa do elétron, do seguinte modo: suponha que o elétron é composto de três partes idênticas que são trazidas do infinito e colocadas nos vértices de um triângulo equilátero, cujos lados são iguais ao raio clássico do elétron, $2,82 \times 10^{-15} \text{ m}$. (a) Determine a energia potencial elétrica desse arranjo. (b) Divida por c^2 e compare o seu resultado com a massa adotada para o elétron ($9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$). (O resultado melhora se mais partes forem consideradas.)

55E. No modelo quark das partículas fundamentais, um próton é composto de três quarks: dois quarks "up", cada um deles tendo carga de $+2e/3$, e um quark "down", tendo carga $-e/3$. Suponha que os três quarks estejam equidistantes um do outro. Considere que a distância seja $1,32 \times 10^{-15} \text{ m}$ e calcule (a) a energia potencial do subsistema formado pelos dois quarks "up" e (b) a energia potencial elétrica total do sistema formado pelas três partículas.

56E. Deduza uma expressão para o trabalho necessário para formarmos a configuração das quatro cargas da Fig. 26-46, supondo que as cargas estão, de início, infinitamente afastadas.

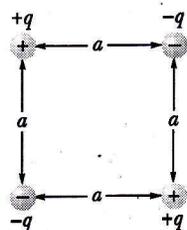


Fig. 26-46 Exercício 56

57E. Qual é a energia potencial elétrica da configuração de carga da Fig. 26-9a? Use os valores numéricos do Exemplo 26-4.

58P. Três cargas, cada uma de $+0,12 \text{ C}$, são colocadas nos vértices de um triângulo equilátero de $1,7 \text{ m}$ de lado. Fornecendo-se energia a uma taxa de $0,83 \text{ kW}$, quantos dias seriam necessários para se deslocar uma das cargas até o ponto médio do segmento de reta que une as outras duas cargas?

59P. No retângulo da Fig. 26-47, os lados têm comprimentos de $5,0 \text{ cm}$ e 15 cm , $q_1 = -5,0 \mu\text{C}$ e $q_2 = +2,0 \mu\text{C}$. Com $V = 0$ no infinito, quais são os potenciais elétricos (a) no vértice A e (b) no vértice B? (c) Que trabalho é necessário para mover uma terceira carga $q_3 = +3,0 \mu\text{C}$ do ponto B até o ponto A ao longo da diagonal do retângulo? (d) Este trabalho aumenta ou diminui a energia elétrica do sistema das três cargas? Ele é maior, menor ou igual ao trabalho necessário para movermos q_3 ao longo de uma trajetória que está (e) dentro do retângulo mas não sobre uma diagonal e (f) fora do retângulo?

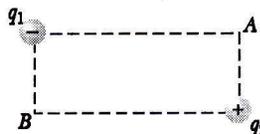


Fig. 26-47 Problema 59.

60P. Na Fig. 26-48, que trabalho é necessário para trazer a carga de $+5q$ a partir do infinito, ao longo da linha tracejada e colocá-la, como é mostrado, próxima das duas cargas fixas $+4q$ e $-2q$? Considere $d = 1,40 \text{ cm}$ e $q = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$.

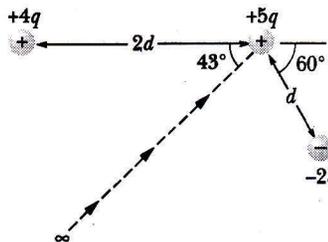


Fig. 26-48 Problema 60.

61P. Uma partícula de carga positiva Q está fixa no ponto P. Uma segunda partícula de massa m e carga negativa $-q$ se move com velocidade escalar constante num círculo de raio r_1 , centrado em P. Obtenha uma expressão para o trabalho W que deve ser realizado por um agente externo sobre a segunda partícula para aumentar o raio do círculo do movimento para r_2 .

62P. Calcule: (a) o potencial elétrico criado pelo núcleo de um átomo de hidrogênio na distância média de circulação do elétron ($r = 5,29 \times 10^{-11} \text{ m}$), (b) a energia potencial elétrica do átomo, quando o elétron está nesse raio e (c) a energia cinética do elétron, supondo que ele se mova numa órbita circular com esse raio e centrada no núcleo. (d) Quanta energia é necessária para ionizar o átomo de hidrogênio (isso é, afastar o elétron do núcleo de modo que a separação seja efetivamente infinita)? Expresse todas as energias em elétron-volts.

63P. Uma carga de $-9,0 \text{ nC}$ está uniformemente distribuída ao redor de um anel de raio $1,5 \text{ m}$ que está no plano yz com seu centro na origem. Uma carga puntiforme de $-6,0 \text{ pC}$ está localizada sobre o eixo x em x

= 3,0 m. Calcule o trabalho realizado para deslocar a carga puntiforme até a origem.

64P. Uma partícula de carga q é mantida fixa num ponto P e uma segunda partícula de massa m e de carga igual, q , está inicialmente em repouso a uma distância r_1 de P . A segunda partícula é, então, liberada. Determine sua velocidade escalar quando ela está a uma distância r_2 de P . Considere $q = 3,1 \mu\text{C}$, $m = 20 \text{ mg}$, $r_1 = 0,90 \text{ mm}$ e $r_2 = 2,5 \text{ mm}$.

65P. Duas pequenas esferas metálicas A e B de massas $m_A = 5,00 \text{ g}$ e $m_B = 10,0 \text{ g}$ têm cargas positivas iguais, $q = 5,0 \mu\text{C}$. As esferas são ligadas por um fio não-condutor, de massa desprezível e comprimento $d = 1,0 \text{ m}$, que é muito maior que os raios das esferas. (a) Qual é a energia potencial elétrica do sistema? (b) Suponha que se corte o fio. Neste instante, qual é a aceleração de cada esfera? (c) Muito tempo depois de se ter cortado o fio, qual é a velocidade escalar de cada esfera?

66P. Duas superfícies condutoras planas, carregadas, paralelas entre si, estão separadas por uma distância $d = 1,00 \text{ cm}$. A diferença de potencial entre elas é $\Delta V = 625 \text{ V}$. Um elétron é projetado diretamente de uma superfície para a outra. Qual deve ser a velocidade escalar inicial do elétron para que ele atinja o repouso junto à segunda superfície?

67P. (a) Um próton de energia cinética $4,80 \text{ MeV}$ se move exatamente na direção de um núcleo de chumbo. Supondo que o próton não penetre no núcleo e considerando apenas interações eletrostáticas, calcular a menor distância entre os centros do próton e do núcleo no instante que o próton atingir momentaneamente o repouso. (b) Se o próton fosse substituído por uma partícula alfa (dois prótons e dois nêutrons) com a mesma energia cinética inicial, qual seria a menor distância entre os centros da partícula alfa e do núcleo, em comparação com a obtida no item (a)?

68P. Uma partícula de massa m , carga positiva q e energia cinética inicial K é projetada (a partir do infinito) na direção de um núcleo pesado de carga Q que está fixo. Supondo que a partícula se aproxime frontalmente, a que distância estará ela do núcleo, no instante em que atingir momentaneamente o repouso?

69P. Uma fina casca esférica, condutora, de raio R , está montada sobre um suporte isolante e carregada a um potencial $-V$. Um elétron é lançado de um ponto P a uma distância r do centro da casca esférica ($r \gg R$), com uma velocidade escalar inicial v_0 , dirigida radialmente para o centro. Qual deve ser o valor de v_0 para que o elétron consiga chegar até a casca, antes de inverter o sentido do movimento?

70P. Dois elétrons estão fixos a uma distância de $2,0 \text{ cm}$ um do outro. Um outro elétron é lançado do infinito e atinge o repouso à meia distância entre os dois. Qual é a velocidade escalar inicial desse elétron?

71P. Considere um elétron sobre uma esfera uniformemente carregada de raio $1,0 \text{ cm}$ e carga total de $1,6 \times 10^{-15} \text{ C}$. Qual é a sua velocidade de escape, isso é, que velocidade inicial ele deve ter para alcançar uma distância infinita da esfera e ter, assim, energia cinética zero? (Definimos a velocidade de escape semelhantemente ao que foi feito, no Cap. 15, no caso do escape da força gravitacional; no caso presente, estamos desprezando tal força.)

72P. Um elétron é lançado com velocidade escalar inicial de $3,2 \times 10^5 \text{ m/s}$ exatamente na direção de um próton que está fixo. Se o elétron estiver inicialmente a uma grande distância do próton, a que distância do próton sua velocidade escalar será o dobro da inicial?

Seção 26-11 Um Condutor Isolado

73E. Uma esfera metálica oca possui uma carga de $5,0 \times 10^{-9} \text{ C}$ e seu potencial, em relação à terra, é de $+400 \text{ V}$. Determine o potencial elétrico no centro da esfera.

74E. Uma casca esférica fina, condutora, de raio externo 20 cm , tem uma carga de $+3,0 \mu\text{C}$. Esboce: (a) o módulo do campo elétrico E (b) o potencial V , em função da distância r ao centro da casca. (Faça $V = 0$ no infinito.)

75E. Qual é a carga sobre uma esfera condutora de raio $r = 0,15 \text{ m}$, sabendo-se que o seu potencial é 1.500 V e que $V = 0$ no infinito?

76E. Considere duas esferas condutoras, 1 e 2, separadas por uma distância muito grande, a segunda tendo o dobro do diâmetro da primeira. Inicialmente, a esfera menor tem uma carga positiva q e a esfera maior está sem carga. Ligamos as esferas por um fio fino. (a) Qual é a relação entre os potenciais finais V_1 e V_2 das esferas? (b) Determine as cargas finais q_1 e q_2 das esferas em termos de q . (c) Qual é a razão entre as densidades superficiais de carga, finais, das esferas 1 e 2?

77P. O objeto metálico mostrado na Fig. 26-49 é uma figura de revolução em torno do eixo horizontal. Supondo que esteja com carga negativa, esboce algumas superfícies equipotenciais e as linhas do campo elétrico. Use argumentos físicos em vez da análise matemática.

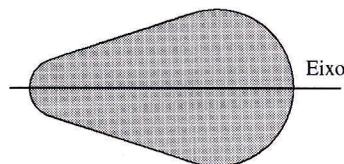


Fig. 26-49 Problema 77.

78P. (a) Se a Terra tivesse uma densidade superficial de carga líquida de $1,0 \text{ elétron/m}^2$ (uma suposição bastante artificial), qual seria o potencial da Terra? (Faça $V = 0$ no infinito.) (b) Qual seria o campo elétrico devido à Terra, imediatamente fora de sua superfície?

79P. Duas esferas metálicas, cada uma de raio $3,0 \text{ cm}$, estão separadas, centro a centro, por uma distância de $2,0 \text{ m}$. A carga de uma delas é de $+1,0 \times 10^{-8} \text{ C}$ e a da outra é de $-3,0 \times 10^{-8} \text{ C}$. Suponha que a separação entre as esferas seja suficientemente grande, comparada com os seus tamanhos, de modo que a carga sobre cada uma delas possa ser considerada uniformemente distribuída (as esferas estão eletricamente isoladas uma da outra). Com $V = 0$ no infinito, calcule (a) o potencial num ponto situado à meia distância entre seus centros e (b) o potencial de cada esfera.

80P. Uma esfera metálica carregada, de raio 15 cm , tem uma carga líquida de $3,0 \times 10^{-8} \text{ C}$. (a) Qual é o campo elétrico na superfície da esfera? (b) Com $V = 0$ no infinito, qual é o potencial elétrico na superfície da esfera? (c) A que distância da superfície da esfera o potencial elétrico decresce de 500 V ?

81P. Duas esferas condutoras concêntricas, finas e isoladas, de raios R_1 e R_2 , possuem cargas q_1 e q_2 . Com $V = 0$ no infinito, deduza expressões para $E(r)$ e $V(r)$, onde r é a distância ao centro das esferas. Faça os gráficos de $E(r)$ e $V(r)$ desde $r = 0$ até $r = 4,0 \text{ m}$ para $R_1 = 0,50 \text{ m}$, $R_2 = 1,0 \text{ m}$, $q_1 = +2,0 \mu\text{C}$ e $q_2 = +1,0 \mu\text{C}$.

Seção 26-12 O Acelerador de Van de Graaff

82E. (a) Que quantidade de carga é necessária para elevar uma esfera metálica isolada, de $1,0 \text{ m}$ de raio, ao potencial de $1,0 \text{ MV}$? (Faça $V = 0$ no infinito.) (b) Repita o item (a) para uma esfera de $1,0 \text{ cm}$ de raio. (c) Qual é a razão para o uso de uma esfera maior no acelerador eletrostático, quando o mesmo potencial pode ser obtido com menor quantidade de carga usando-se uma esfera menor?

83E. Suponha que a diferença de potencial entre a casca interna de um acelerador de Van de Graaff e o ponto em que as cargas são borrifadas na correia móvel seja de 3,40 MV. Se a correia transportar carga para a casca na taxa de 2,80 mC/s, qual deverá ser a potência mínima necessária para acionar a correia?

84E. Uma partícula alfa (que consiste em dois prótons e dois nêutrons) é acelerada, num acelerador de Van de Graaff, através de uma diferença de potencial de 1,0 MV. (a) Que energia cinética ela adquire? (b) Que energia cinética adquiriria um próton nas mesmas circunstâncias? (c) Qual das duas partículas atinge maior velocidade, partindo do repouso?

85P. (a) Mostre que a diferença de potencial entre a esfera pequena e a esfera grande na Fig. 26-22 é

$$V_r - V_R = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R} \right).$$

Observe que a diferença de potencial é independente da carga Q sobre a esfera externa. (b) Suponha que q seja positiva. Mostre que, se as esferas forem ligadas por um fio fino, a carga q irá deslocar-se totalmente para a esfera externa, não importando qual carga Q esteja presente sobre a esfera externa.

86P. A parte de alta voltagem de um acelerador eletrostático é uma casca esférica metálica, com carga, e potencial $V = +9,0$ MV. (a) O gás que preenche essa máquina sofre ruptura elétrica num campo $E = 100$ MV/m. Para evitar tal ruptura, que restrição deve ser feita sobre o raio r da casca? (b) Uma longa correia de borracha transporta carga para a casca a $300 \mu\text{C/s}$, o potencial da casca permanecendo constante em face do escoamento. Qual é a potência mínima necessária para transportar a carga? (c) A correia tem uma largura $w = 0,50$ m e se move com velocidade escalar $v = 30$ m/s. Qual é a densidade superficial de carga sobre a correia?

PROBLEMAS ADICIONAIS

87. Na Fig. 26-50, dois pares de telas metálicas estão paralelas entre si. Uma diferença de potencial ΔV é estabelecida entre cada par de telas, deixando a tela interna no potencial mais alto, como se mostra. Em cada par, a separação a entre as telas é muito menor que a distância d entre os pares. (a) Faça o gráfico do potencial elétrico indo da esquerda para a direita. (b) Para $\Delta V = 100$ V, qual é a energia mínima que um próton deve ter para mover-se da esquerda para a direita? (c) O que aconteceria a um elétron que se aproximasse das telas vindo da esquerda?

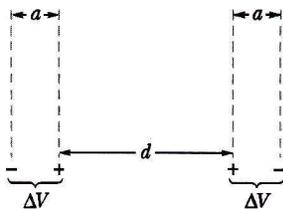


Fig. 26-50 Problema 87.

88. Considere uma distribuição de carga esfericamente simétrica, de raio r , contendo uma carga total $Q(r)$. Mostre que o potencial elétrico em virtude de tal distribuição de carga, com $V = 0$ no infinito é

$$V(r) = \int_r^\infty \frac{Q(r)}{4\pi\epsilon_0 r^2} dr.$$

89. Duas cargas iguais $+q$ estão fixas nas extremidades de uma linha de comprimento $2a$. Uma carga $+Q$, de massa m , é colocada no centro da linha e pode mover-se livremente. (a) Mostre que o movimento de Q é instável para pequenos deslocamentos perpendiculares à linha, e estável para pequenos deslocamentos ao longo da linha. (b) Se a carga Q for deslocada, ao longo da linha, por uma distância $x < a$, qual será o potencial elétrico no local de Q , devido às duas cargas $+q$? (c) Aplique a expansão binomial à expressão desse potencial e retenha somente o termo de mais baixa ordem em x . A seguir, determine o módulo da força eletrostática que atua sobre Q na posição x . (d) Se a carga Q for abandonada nesta posição x , qual será a frequência angular da oscilação resultante de Q em torno do centro da linha.

90. Quando uma carga $+q$ é colocada a uma distância d em frente de um plano condutor infinito, neutro e isolado, uma carga induzida se acumula sobre a superfície do plano condutor. O campo elétrico criado pela carga superficial induzida e pela carga $+q$, pode ser calculado por meio do engenhoso método das *imagens elétricas*, graças a Lord Kelvin: a distribuição superficial de carga desconhecida é substituída por uma distribuição de carga mais simples que, junto com a carga $+q$, torna o plano condutor uma superfície equipotencial. (a) Mostre que uma carga $-q$ colocada a uma distância d atrás do plano na Fig. 26-51, dá esse resultado. (b) Determine o módulo da força eletrostática sobre a carga $+q$ exercida pelo plano condutor.

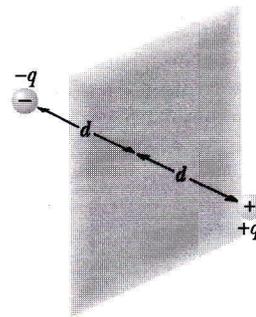


Fig. 26-51 Problema 90.

91. Uma carga total Q está distribuída por duas esferas metálicas, de raios pequenos, R_1 e R_2 , que estão ligadas por um longo fio fino de comprimento L (Fig. 26-52). Determine (a) a carga sobre cada esfera e (b) a tensão no fio.

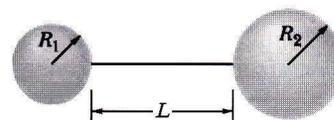


Fig. 26-52 Problema 91.