

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. O 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)  $V_C - V_B$ ?

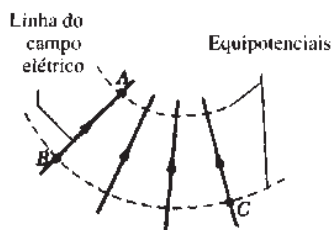


Fig. 26-24 Exercício 5.

6E. A Fig. 26-25 mostra, uma chapa não-condutora, infinita, com densidade superficial de carga positiva  $\sigma$  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.

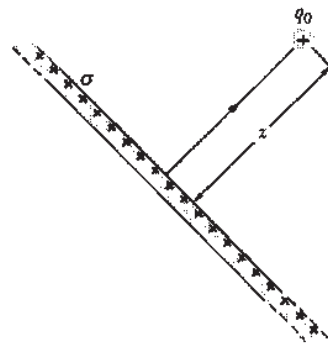


Fig. 26-25 Exercício 6.

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  $\rho$ , 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 Pontiforme

**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.

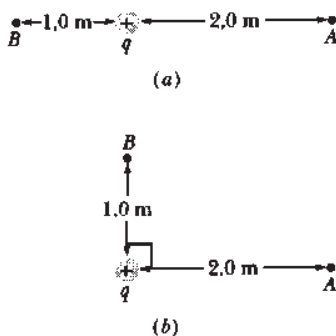


Fig. 26-27 Exercício 15.

**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  $10^{-6} \text{ m}$ . 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  $-400 \text{ V}$  (tomando  $V = 0$  no infinito)?

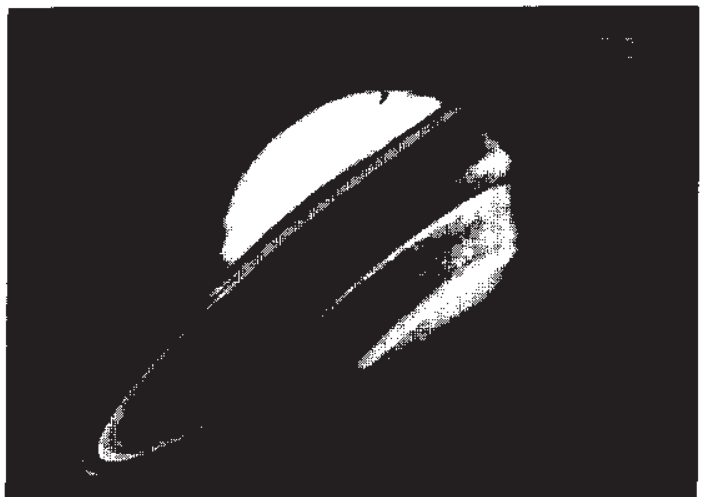


Fig. 26-28 Exercício 19.

**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  $200 \text{ V}$  (com  $V = 0$  no infinito)?

**24P.** Frequentemente podemos observar um campo elétrico de aproximadamente  $100 \text{ V/m}$ , 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  $30 \text{ pC}$  tem um potencial de  $500 \text{ V}$  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  $100 \text{ keV}$  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  $10 \text{ mCi}$  ( $= 10 \text{ milicuries} = 3,70 \times 10^6$  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  $1.000 \text{ V}$ ? (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  $\text{NH}_3$  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  $5 \text{ V}$  também é um círculo?

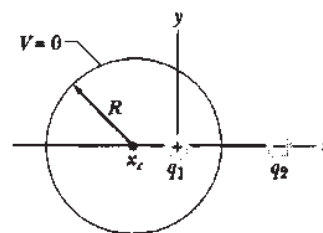


Fig. 26-31 Problema 32.

**33P.** Para a configuração de carga da Fig. 26-32, mostre que  $V(r)$  para 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.)

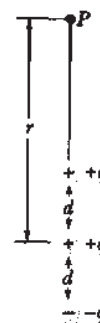


Fig. 26-32 Problema 33.

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

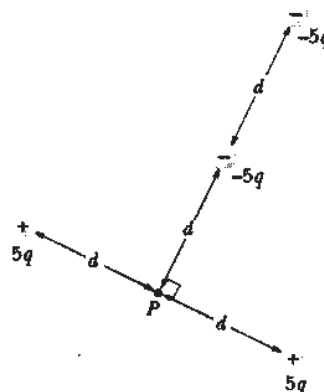


Fig. 26-33 Problema 34.

**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?

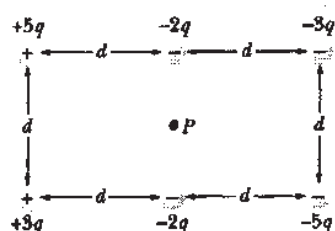


Fig. 26-34 Problema 35.

### 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  $\lambda$ . 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  $\lambda$  para a densidade linear de carga uniforme. Qual é o potencial elétrico no ponto  $P$  na Fig. 26-35b?

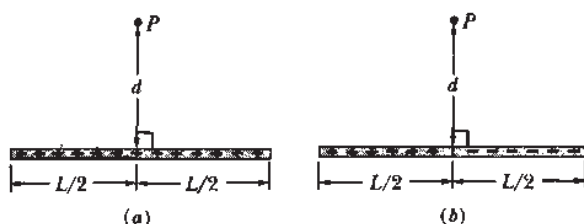


Fig. 26-35 Exercício 36.

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  $120^\circ$ . Com  $V = 0$  no infinito, qual é o potencial elétrico em  $P$ , o centro de curvatura da barra?

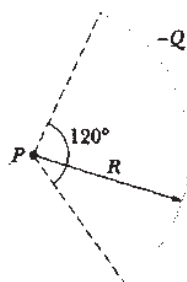


Fig. 26-36 Exercício 37.

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  $40^\circ$ . 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)

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

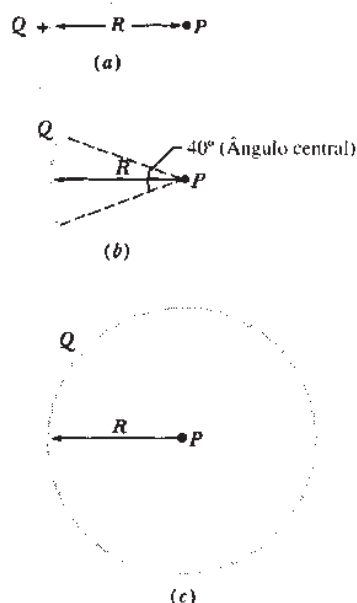


Fig. 26-37 Problema 38.

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?

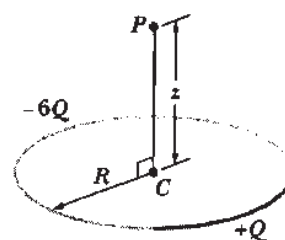


Fig. 26-38 Problema 39.

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

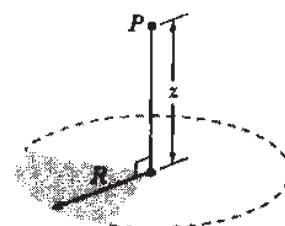


Fig. 26-39 Problema 40.

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.

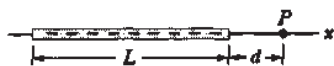


Fig. 26-40 Problema 41.

### 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.)

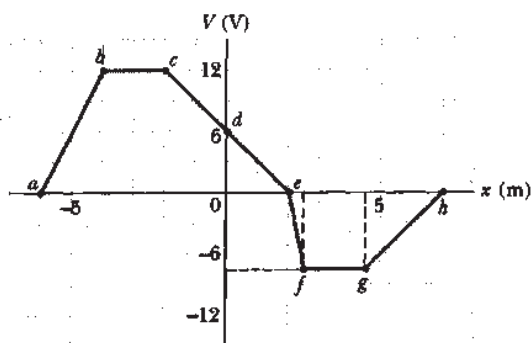


Fig. 26-41 Exercício 43.

**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 capacitor, 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 24-6.

**49P.** A barra fina com carga positiva da Fig. 26-42 tem uma densidade linear de carga uniforme  $\lambda$  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)?

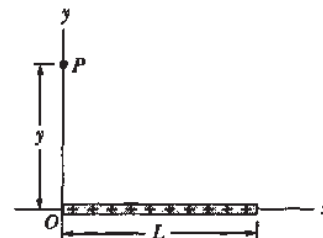


Fig. 26-43 Problema 50.

### Seção 26-10 Energia Potencial Elétrica de um Sistema de Cargas Pontiformes

**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  $q = 0$ ?



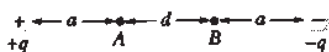


Fig. 26-44 Exercício 51.

**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?

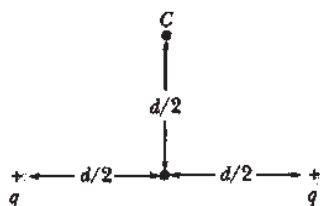


Fig. 26-45 Exercício 52.

**53E.** As cargas e as coordenadas de duas cargas pontiformes 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.

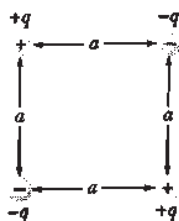


Fig. 26-46 Exercício 56

**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  $15 \text{ cm}$ ,  $q_1 = -5,0 \mu\text{C}$  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?

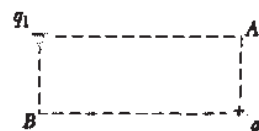


Fig. 26-47 Problema 59.

**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  $q = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$ .

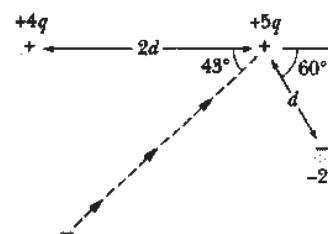


Fig. 26-48 Problema 60.

**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 (isto 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 pontiforme de  $-6,0 \text{ pC}$  está localizada sobre o eixo  $x$  em  $x$