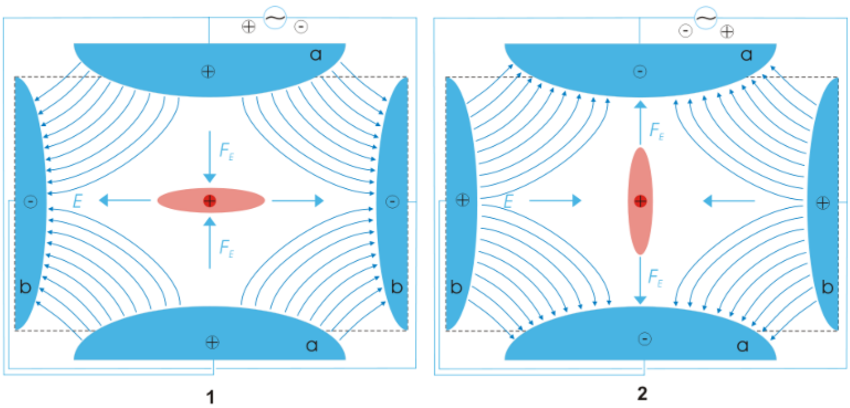
7. Potencial eletrostático



Em 1989 Wolfgang Paul recebeu o prémio Nobel da física pela sua invenção da **armadilha de iões** que permite isolar um ião. Com essa invenção tornou-se possível estudar um átomo isolado, e pôr a física quântica á prova, já que nas experiências anteriores estavam sempre presentes muitos átomos. O princípio de funcionamento da armadilha de iões é muito simples. Usa-se um potencial de quadrupolo, nomeadamente, um sistema em que em dois lados opostos de um quadrado há dois condutores com potenciais positivos e nos outros dois lados há condutores com potenciais negativos, criando-se assim um ponto de sela no centro do quadrado.

Os iões têm carga positiva e são empurrados para o centro pelos condutores com potencial positivo, e para fora do centro pelos condutores com potencial negativo. O potencial dos condutores é sucessivamente invertido, o que faz com que após algum tempo unicamente o ião que se encontra no centro permaneça nesse ponto de equilíbrio.

7.1. Potencial e campo elétrico

A diferença de potencial entre dois pontos separados por um pequeno percurso $\mathrm{d}\vec{r}$ é:

$$\boxed{\mathrm{d}V = -\vec{E}\cdot\mathrm{d}\vec{r}} \tag{7.1}$$

esta definição implica que o potencial decresce mais rapidamente na direção do campo elétrico e mantém-se constante na direção perpendicular ao campo. Em cada ponto onde o campo não é nulo, existe uma única direção em que o potencial permanece constante; o campo elétrico é perpendicular a essa direção, e aponta no sentido em que V diminui (figura 7.1). As cargas positivas deslocam-se no sentido em que o potencial decresce, e a as cargas negativas deslocam-se no sentido em que o potencial aumenta.

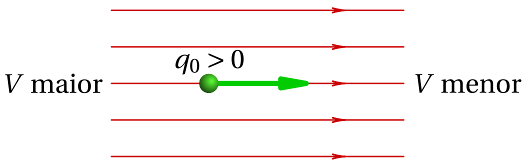


Figura 7.1.: O campo elétrico aponta na direção e sentido em que o potencial diminui mais rapidamente.

Se E_s for a componente do campo na direção do deslocamento vetorial $\mathrm{d}\vec{r}$ e $\mathrm{d}s$ for o módulo desse deslocamento, a equação 7.1 pode ser escrita

$$\mathrm{d}V = -E_s\,\mathrm{d}s \tag{7.2}$$

Como tal, a componente do campo elétrico na direção e sentido de um vetor qualquer $\mathrm{d}\vec{r}$ é:

$$\boxed{E_s = -\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}s}} \tag{7.3}$$

onde $\mathrm{d}V$ é calculado na direção do vetor $\mathrm{d}\vec{r}$. A derivada na expressão anterior é designada **derivada direccional** da função V, na direção definida por $\mathrm{d}\vec{r}$.

Em particular, se a direção escolhida for no sentido de um dos 3 eixos cartesianos, E_s será a componente do campo na direção desse eixo, e a derivada direccional será a derivada parcial em relação à variável associada ao eixo:

$$E_x = -\frac{\partial V}{\partial x} \qquad E_y = -\frac{\partial V}{\partial y} \qquad E_z = -\frac{\partial V}{\partial z} \tag{7.4}$$

Para calcular o potencial num ponto, costuma arbitrar-se que o potencial seja nulo no infinito. Assim, o potencial num ponto P obtém-se a partir do integral

$$\boxed{V = -\int_{\infty}^{\mathrm{P}} \vec{E} \cdot \mathrm{d}\vec{r}} \tag{7.5}$$

As 3 componentes cartesianas do campo não podem ser 3 funções arbitrárias da posição, já que, a partir das equações 7.4 conclui-se que

$$\frac{\partial E_x}{\partial y} = \frac{\partial E_y}{\partial x} \qquad \frac{\partial E_x}{\partial z} = \frac{\partial E_z}{\partial x} \qquad \frac{\partial E_y}{\partial z} = \frac{\partial E_z}{\partial y} \tag{7.6}$$

que são as condições necessárias e suficientes para garantir que o campo é conservativo. A matriz jacobiana do campo, em função da posição, é:

$$\begin{bmatrix} \dfrac{\partial E_x}{\partial x} & \dfrac{\partial E_x}{\partial y} & \dfrac{\partial E_x}{\partial z} \\ \dfrac{\partial E_y}{\partial x} & \dfrac{\partial E_y}{\partial y} & \dfrac{\partial E_y}{\partial z} \\ \dfrac{\partial E_z}{\partial x} & \dfrac{\partial E_z}{\partial y} & \dfrac{\partial E_z}{\partial z} \end{bmatrix} \tag{7.7}$$

e devido às condições 7.6, essa matriz é simétrica, pelo que só tem valores próprios reais. Como consequência, os pontos de equilíbrio do campo elétrico podem ser pontos de sela ou nós, mas não centros ou focos. No espaço de fase (x, y, z, v_x, v_y, v_z), como o sistema é conservativo, os pontos de equilíbrio podem ser pontos de sela ou centros.

Exemplo 7.1
O campo elétrico numa região do espaço é dado pela expressão (unidades SI)

$$\vec{E} = 4\,x\,y\,\hat{\imath} + (2\,x^2 + 8\,y\,z^3)\,\hat{\jmath} + 12\,y^2\,z^2\,\hat{k}$$

(*a*) Demonstre que o campo $\vec{E}$ é conservativo. (*b*) Calcule o potencial eletrostático (defina $V = 0$ na origem).

Resolução. (*a*) Para demonstrar que o campo é conservativo, basta calcular as derivadas parciais cruzadas das três componentes do campo e conferir que são iguais:

$$
\begin{aligned}
\frac{\partial E_x}{\partial y} &= 4\,x = \frac{\partial E_y}{\partial x}\\
\frac{\partial E_x}{\partial z} &= 0 = \frac{\partial E_z}{\partial x}\\
\frac{\partial E_y}{\partial z} &= 24\,y\,z^2 = \frac{\partial E_z}{\partial y}
\end{aligned}
$$

(b) O valor do potencial no ponto (x, y, z) é simétrico do valor do integral de linha do campo, desde a origem (onde se arbitra que $V = 0$) até esse ponto. Como o campo é conservativo, o integral pode ser calculado ao longo de qualquer percurso e o resultado é sempre o mesmo. Escolhe-se um percurso formado pelos três segmentos de reta que unem os pontos (0, 0, 0), (x, 0, 0), (x, y, 0) e (x, y, z):

$$
\begin{aligned}
V(x,y,z) &= -\int_0^x E_x(x,0,0)\,\mathrm{d}x - \int_0^y E_y(x,y,0)\,\mathrm{d}y - \int_0^z E_z(x,y,z)\,\mathrm{d}z\\
&= -\int_0^x 0\,\mathrm{d}x - 2\,x^2\int_0^y \mathrm{d}y - 12\,y^2\int_0^z z^2\,\mathrm{d}z\\
&= -2\,y\,x^2 - 4\,y^2\,z^3
\end{aligned}
$$

7.2. Potencial devido a cargas pontuais

Em duas dimensões, o campo elétrico produzido por um sistema de n cargas pontuais q_1, q_2, ..., q_n, é dado pela equação 6.3 do capítulo anterior. O potencial é a função de x e y com derivadas parciais iguais às duas componentes do campo. Como tal, o potencial é:

$$V = \sum_{i=1}^{n} \frac{k\,q_i}{\sqrt{(x-x_i)^2+(y-y_i)^2}} \tag{7.8}$$

onde x_i e y_i são as coordenadas da posição da partícula i.

Esta expressão generalizada a 3 dimensões é:

$$V = \sum_{i=1}^{n} \frac{k\,q_i}{\sqrt{(x-x_i)^2+(y-y_i)^2+(z-z_i)^2}} \tag{7.9}$$

em que as coordenadas (x_i, y_i, z_i) correspondem à posição $\vec{r}_i$ da partícula número i com carga q_i. O denominador na equação 6.3 é a distância $|\vec{r} - \vec{r}_i|$ da carga q_i ao ponto onde está a ser calculado o potencial.

Exemplo 7.2
Uma carga pontual de +1 nC encontra-se na origem, e uma segunda carga de +4 nC encontra-se no ponto $x = 30$ cm, $y = 0$. Encontre a expressão para o potencial no plano Oxy e represente graficamente essa função de duas variáveis.

Resolução. A constante de Coulomb pode ser escrita como:

$$k = 9 \times 10^9 \, \frac{\text{V} \cdot \text{m}}{\text{C}} = 900 \, \frac{\text{V} \cdot \text{cm}}{\text{nC}}$$

Na equação 7.9 substitui-se $k = 900$, as posições das cargas em cm, os valores das cargas em nC e $z = 0$, para obter a expressão do potencial no plano Oxy, em volts:

$$V(x, y) = \frac{900}{\sqrt{x^2 + y^2}} + \frac{3600}{\sqrt{(x - 30)^2 + y^2}}$$

Para representar o gráfico dessa função, usam-se os seguintes comandos no *Maxima*:

```
(%i1) V: 900/(x^2+y^2)^(1/2) + 3600/((x-30)^2+y^2)^(1/2)$
(%i2) plot3d (V,[x,-10,40],[y,-25,25],[z,0,2000],[legend,false],
        [grid,80,80])$
```

A figura 7.2 mostra o resultado.

A opção [z, 0, 2000] foi usada para limitar o valor máximo de V a ser apresentado, já que nos pontos onde se encontram as cargas pontuais positivas o potencial aumenta até infinito.

7.3. Superfícies equipotenciais

Outra forma conveniente de representar um potencial como o da figura 7.2, é por meio das**equipotenciais**, que são as curvas de nível, ou seja, as curvas

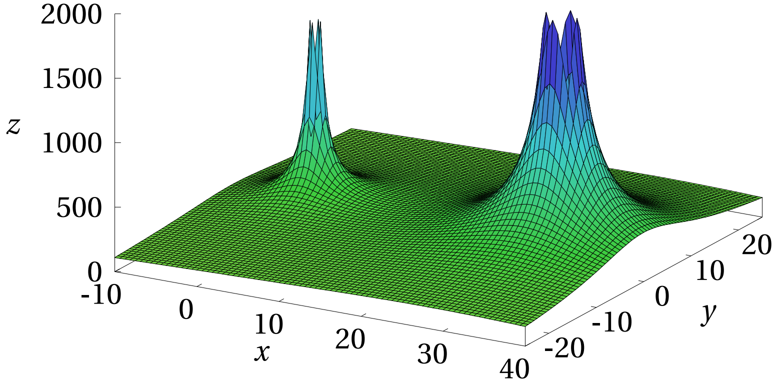


Figura 7.2.: Potencial de duas cargas de +1 nC e +4 nC, no plano Oxy.

em que em todos os pontos o potencial tem o mesmo valor. No gráfico da figura 7.2 as equipotenciais são a interseção da superfície com diferentes planos paralelos ao plano Oxy.

O programa ploteq do *Maxima* permite obter as curvas equipotenciais correspondentes a um potencial que depende de duas variáveis. Por exemplo, para obter as equipotenciais do potencial já definido em `%i1`, basta usar o seguinte comando:

```
(%i3) ploteq (V, [x,-10,40], [y,-25,25], [curves,"blue"])$
```

A opção curves não é obrigatória e foi usada simplesmente para que as curvas equipotenciais apareçam em azul, e não na cor vermelha por omissão, que tem sido usada para as linhas de campo. Algumas curvas equipotenciais foram traçadas clicando em pontos do gráfico. A seguir entrou-se no menu de configuração, apagou-se o conteúdo do campo `curves` e escreveu-se `red` no campo `fieldlines` para que a seguir, cada vez que se clicar num ponto do gráfico, seja traçada uma linha de campo elétrico (a vermelho). O gráfico obtido mostra-se na figura 7.3.

As figuras 7.2 e 7.3 são duas representações diferentes do mesmo potencial, no plano Oxy, produzido por duas cargas pontuais. O potencial dessas duas cargas realmente depende de 3 variáveis, x, y e z e, por isso, as equipotenciais são realmente superfícies no espaço a três dimensões e as curvas apresentadas na figura 7.3 são a intersecção dessas superfícies com o plano Oxy.

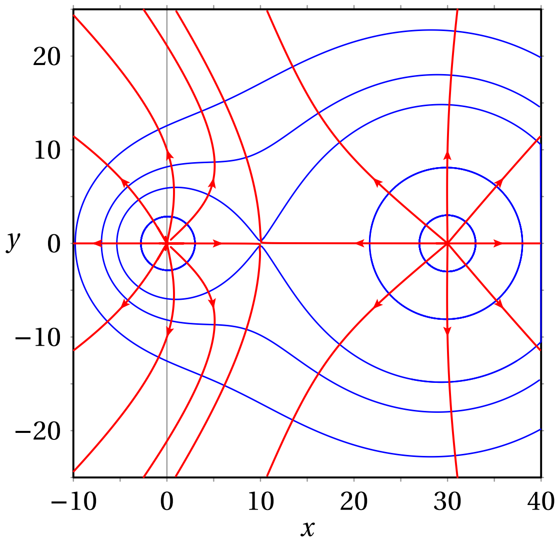


Figura 7.3.: Superfícies equipotenciais e linhas de campo de duas cargas pontuais de +1 nC e +4 nC.

Em qualquer direção ao longo de uma superfície equipotencial, em três dimensões, o produto escalar $\vec{E} \cdot \mathrm{d}\vec{r}$ é nulo, já que $\mathrm{d}V = 0$. Isso implica que o campo elétrico é perpendicular às superfícies equipotenciais (figura 7.4).

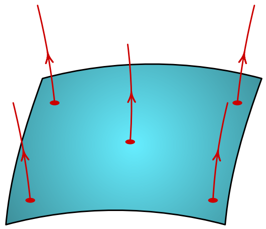


Figura 7.4.: Superfície equipotencial, e linhas de campo, perpendiculares à superfície.

7.4. Pontos críticos do potencial

As linhas de campo elétrico apontam na direção e sentido em que o potencial diminui mais rapidamente. Como tal, num ponto onde o potencial é um máximo local, existem linhas a apontar para fora desse ponto (nó repulsivo); o fluxo numa superfície fechada à volta desse ponto é positivo. Isto implica que na região onde o potencial é máximo deve existir carga positiva.

Num ponto onde o potencial tem um mínimo local, as linhas de campo apontam na direção desse ponto (nó atrativo) e o fluxo numa superfície fechada à volta dele será negativo. Como tal, deve haver carga negativa nesse ponto.

Os máximos e mínimos do potencial podem ser pontos onde o potencial se aproxima de $+\infty$ ou $-\infty$, no caso de cargas pontuais, ou pontos de equilíbrio, onde as derivadas do potencial são todas nulas. Existe um terceiro tipo de ponto crítico, **ponto de sela**, em que o potencial é máximo segundo algumas direções e mínimo segundo outras. Assim sendo, existem direções por onde entram nesse ponto linhas de campo elétrico e outras direções por onde há linhas de campo a sair desse ponto. O fluxo numa superfície fechada à volta do ponto deve ser nulo e, assim, o campo é nulo nesse ponto. Os pontos de sela são pontos de equilíbrio instável.

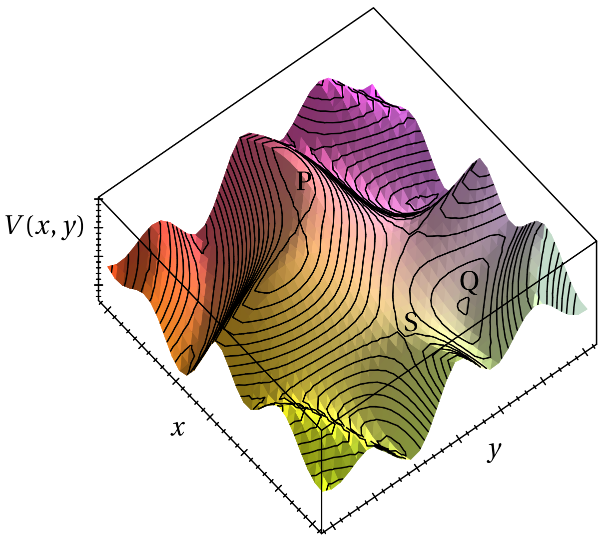


Figura 7.5.: Potencial no plano $(x,\ y)$ com vários pontos críticos.

Como nos pontos onde o potencial é máximo ou mínimo há linhas de campo a sair ou a entrar em todas as direções, esses pontos encontram-se no interior de superfícies equipotenciais fechadas, umas dentro das outras, aproximando-se do ponto mínimo ou máximo. Nos pontos de sela uma superfície equipotencial cruza-se com si própria. No exemplo da figura 7.3 há um ponto de sela, onde uma curva equipotencial se cruza com si própria, e existem duas linhas de campo a terminar nesse ponto e outras duas a partir dele. Nesse ponto de sela o campo elétrico é nulo.

A figura 7.5 mostra outro exemplo de um potencial mais complicado, em função de x e y, com vários pontos de sela, máximos e mínimos locais. No ponto P há um máximo local, no ponto Q há um mínimo local e o ponto S é ponto de sela.

7.5. Potencial e energia eletrostática

Se uma partícula com carga q se desloca entre dois pontos com uma diferença de potencial ΔV a variação da sua energia potencial eletrostática é:

$$\Delta U_e = q\,\Delta V \tag{7.10}$$

Como o campo elétrico é conservativo, a energia mecânica conserva-se e a variação de energia potencial implica uma variação de energia cinética.

Quando se trata de partículas elementares com cargas da ordem de grandeza da carga elementar, é habitual utilizar uma unidade de energia designada de **eletrão-volt** (eV), que corresponde à energia adquirida por um eletrão que se desloca para uma região onde o potencial aumenta de 1 V. Assim, passando para o sistema internacional:

$$1\,\text{eV} = 1.6\times10^{-19}\,\text{C}\times1\,\text{V} = 1.6\times10^{-19}\,\text{J} \tag{7.11}$$

7.6. Potencial nos condutores

Dentro de um condutor isolado o campo elétrico é nulo. Se assim não fosse, existiria movimento das cargas livres, criando-se um campo interno que contrariava o campo externo; o movimento das cargas livres só pára quando o campo total é nulo. Num metal, o tempo que demoram as cargas livres a redistribuírem-se até o campo interno ficar nulo é muito reduzido, da ordem dos 10^{-19} s.

Como o campo elétrico é nulo dentro do condutor isolado, não existem linhas de campo elétrico, e o potencial em todos os pontos dentro do condutor é o mesmo. O fluxo em qualquer parte dentro do condutor também é nulo e, assim, de acordo com a lei de Gauss, não pode existir carga em nenhum ponto dentro do condutor. Toda a carga elétrica se acumula na superfície do condutor.

A própria superfície do condutor é uma superfície equipotencial, já que todos os pontos do condutor têm o mesmo potencial e as linhas de campo elétrico fora do condutor são então perpendiculares à sua superfície.

Um exemplo de condutor isolado é um automóvel. A carroçaria metálica é um condutor e os pneus de borracha são isoladores. A superfície da carroçaria é uma superfície equipotencial e a Terra, que também é condutora, é outra superfície equipotencial. Se não existir nenhuma carga elétrica no automóvel, o campo elétrico da atmosfera, que é vertical e para baixo, induzirá cargas negativas na parte superior da carroçaria, e cargas positivas na parte inferior. Algumas linhas de campo terminarão na parte superior da carroçaria, perpendiculares a ela, e outras linhas de campo começarão na parte inferior, também perpendiculares a ela, tal como mostra a figura 7.6. No chão, que tem menor potencial do que o automóvel, as linhas de campo terminam todas na direção vertical.

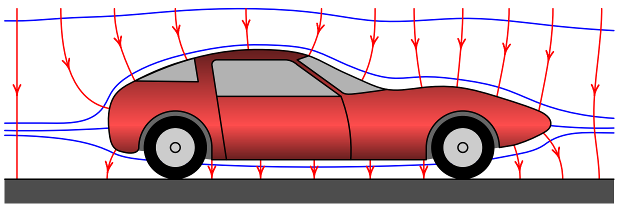


Figura 7.6.: Linhas do campo elétrico da atmosfera e equipotenciais, num automóvel com carga nula.

Se o automóvel estiver carregado, por exemplo, com carga positiva como na figura 7.7, o potencial nele tem um valor máximo local. A superfície da carroçaria é superfície equipotencial e há outras superfícies equipotenciais à sua volta, com valor menor. Há linhas de campo a começar em todos os pontos da superfície da carroçaria, perpendiculares a ela.

A distribuição de cargas na superfície de um condutor isolado não pode ser uniforme. Por exemplo, no caso do automóvel da figura 7.7, com carga positiva distribuída na sua superfície, admitamos que a carga superficial σ fosse igual em toda a superfície. A lei de Gaus implica que o módulo do campo em cada ponto da superfície é igual a $4\pi k\sigma$; como estamos a

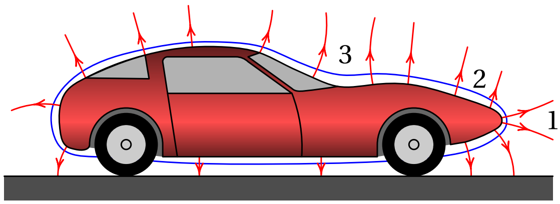


Figura 7.7.: Superfícies equipotenciais e linhas de campo de um automóvel com carga positiva.

admitir que a carga superficial σ é constante, então o módulo do campo, E, seria igual em todas as partes da superfície, em particular nas regiões 1, 2 e 3 indicadas na figura 7.7.

A figura 7.8 mostra as linhas de campo nessas três regiões; na região 1, onde o condutor é convexo, as linhas de campo afastam-se entre si, ou seja, o campo elétrico diminui em função da distância s desde a superfície. Na região 2, onde o condutor é plano, as linhas de campo são paralelas na vizinhança da superfície, o que implica que o campo permanece constante para s próxima de zero, mas as linhas acabam por se afastar entre si, fazendo com que E comece a diminuir em função de s. Na região 3, onde o condutor é côncavo, as linhas de campo inicialmente aproximam-se entre si, antes de começar a se afastar; isso implica que E aumenta em função de s até um valor máximo, e logo começa a diminuir. O gráfico no lado direito da figura 7.8) mostra como seria E, em função de s, nessas 3 regiões.

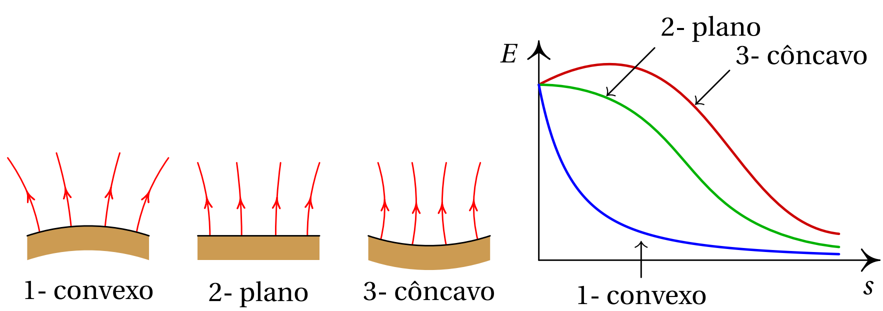


Figura 7.8.: Módulo do campo elétrico em função da distância s a partir da superfície do condutor, em 3 regiões de um condutor, admitindo que a carga superficial é constante.

O potencial em cada uma das 3 regiões do condutor seria a área sobre cada uma das três curvas no gráfico da figura 7.8 (integral do campo elétrico desde a superfície, $s = 0$, até infinito). Como tal, o potencial na região 3, onde o condutor é côncavo, seria maior do que na região 2, onde o condutor é plano, e ainda maior do que na região 1, onde o condutor é convexo.

Mas como o potencial nas três regiões tem de ser igual, conclui-se que o campo na superfície e, portanto, a carga superficial, não pode ser igual nas três regiões. A carga superficial tem de ser maior na região convexa, menor na região plana, e ainda menor na região côncava. Desta forma obtém-se o mesmo valor para o integral do campo elétrico nas 3 regiões, como se mostra na figura 7.9.

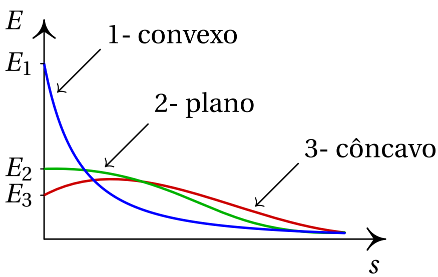


Figura 7.9.: Gráfico do módulo do campo elétrico em 3 partes diferentes da superfície de um automóvel com carga.

Nas regiões convexas, quanto menor for o raio da curvatura, maior será a carga superficial, e nas regiões côncavas quanto maior for o raio de curvatura, maior será a carga superficial. A carga acumula-se mais nas pontas da superfície do condutor. Esse efeito é o princípio de funcionamento do pára-raios; os raios são atraídos para a ponta do pára-raios, onde há uma maior acumulação de cargas e, portanto, campo elétrico mais forte.

7.6.1. Potencial de uma esfera condutora

Numa esfera condutora, as cargas distribuem-se uniformemente na superfície. No capítulo sobre o campo elétrico viu-se que esse tipo de distribuição de carga produz campo nulo no interior da esfera e no exterior, campo é idêntico ao que existiria se toda a carga estivesse concentrada no centro da esfera. Como tal, a expressão do potencial fora da esfera é a mesma do que para uma carga pontual Q:

$$V = \frac{kQ}{r} \qquad \text{(se: } r \geq R\text{)} \tag{7.12}$$

em que Q é a carga total da esfera, e R o seu raio.

O campo nulo no interior da esfera implica potencial constante. Como o potencial é função contínua da posição, o potencial no interior da esfera, será igual ao potencial na sua superfície, nomeadamente

$$V = \frac{kQ}{R} \qquad \text{(se: } r \leq R\text{)} \tag{7.13}$$

Dentro da esfera ($r \leq R$) o campo é nulo e o potencial é constante. Fora da esfera, o potencial decresce na proporção inversa da distância ao centro (ver figura 7.10).

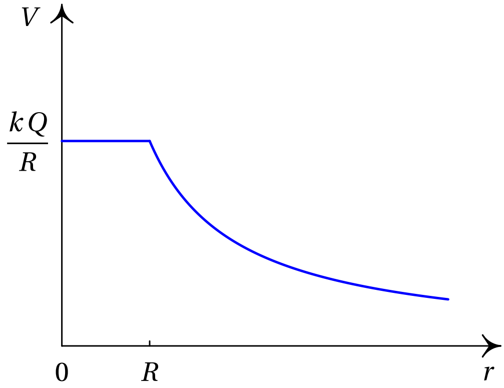


Figura 7.10.: Potencial numa esfera condutora carregada.

Perguntas

1. O potencial produzido por um sistema de duas cargas pontuais, Q e q, é nulo num ponto P (arbitrando potencial nulo a uma distância infinita das cargas). Isso implica que:

A. A força sobre uma carga de prova no ponto P é nula.

B. Q e q têm o mesmo sinal.

C. O campo elétrico é nulo no ponto P.

D. O trabalho total necessário para trazer as cargas Q e q até às suas posições é nulo.

E. O trabalho necessário para trazer uma carga desde o infinito até o ponto P é nulo.

2. Uma carga de 4 μC encontra-se dentro de um campo elétrico com módulo igual a 4×10^5 N/C. Qual é o trabalho necessário para deslocar essa carga uma distância de 20 cm numa direção a 60° com o campo elétrico?

A. 0.28 J

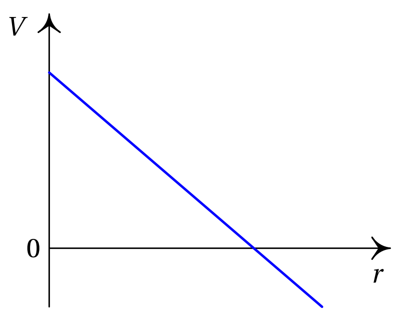
B. 160 mJ

C. 0.68 J

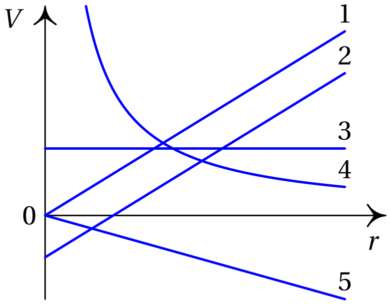
D. 28 J

E. 16 J

3. O potencial elétrico de um sistema, em função da distância ao longo de uma direção dada é representado pelo gráfico:

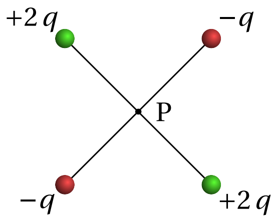


Qual das cinco funções no gráfico a seguir representa melhor a componente do campo ao longo da mesma direção?



A. 4
B. 1
C. 2
D. 3
E. 5

4. Quatro cargas pontuais, com valores $+2\,q$ e $-q$, encontram-se nos vértices de um quadrado, como mostra a figura. O que é possível afirmar acerca do potencial (V) e do módulo do campo (E) no centro do quadrado (P)?



A. $E \neq 0,\ V > 0$
B. $E = 0,\ V = 0$
C. $E = 0,\ V > 0$
D. $E \neq 0,\ V < 0$
E. $E \neq 0,\ V \neq 0$

5. Perto de uma carga pontual existe um ponto onde o potencial elétrico produzido pela carga é 3 V (arbitrando potencial nulo no infinito) e o módulo do campo elétrico da carga é 200 N/C. Calcule a distância desde a carga até ao ponto.

A. 3 m
B. 3 cm
C. 1.5 cm
D. 0.67 cm
E. 6.7 cm

Problemas

1. O potencial no plano Oxy é

$$V(x,y) = \frac{1250}{\sqrt{(x-1)^2+(y-1)^2}} + 50\,x$$

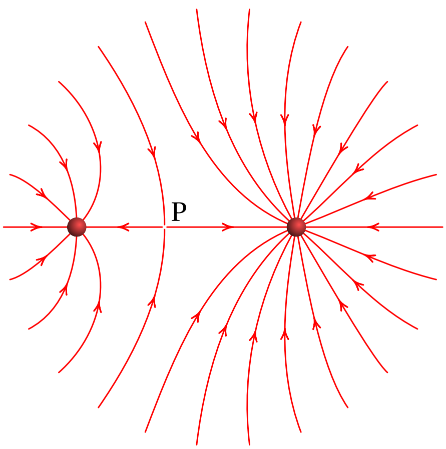
Encontre a expressão do campo elétrico em função de x e y. Usando Maxima, represente as superfícies equipotenciais e as linhas de campo. Existe algum ponto onde o campo é nulo? A que tipo de sistema corresponde esse potencial?

2. Existe campo elétrico uniforme, com módulo de 15 kN/C, entre duas placas paralelas separadas de 2.0 cm. Determine a diferença de potencial entre as placas.

3. O potencial elétrico a uma certa distância de uma carga pontual é 600 V (arbitrando potencial nulo no infinito) e o valor do campo elétrico é 200 N/C. Calcule a distância e o valor da carga.

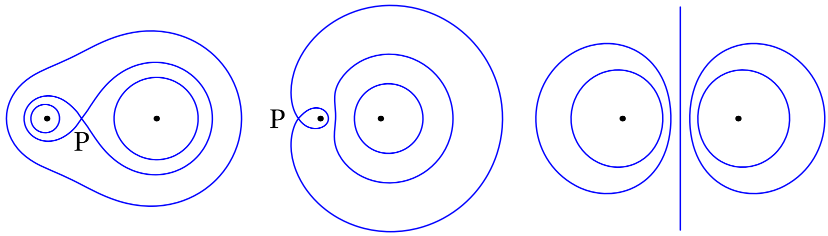
4. Duas superfícies condutoras esféricas e concêntricas têm raios de 5 cm e 7 cm. A superfície menor tem uma carga total de 3 nC e a carga total na superfície maior é de −2 nC. Calcule a diferença de potencial entre as duas superfícies.

5. A figura representa as linhas de campo elétrico devido a duas cargas pontuais separadas de 7 cm. A razão entre os valores das duas cargas é 4/9. (*a*) Calcule a distância do ponto P às partículas. (*b*) Sabendo que a carga da partícula no lado direito é de −8 nC, calcule o potencial no ponto P (admita $V = 0$ no infinito).



6. As três figuras seguintes representam as superfícies equipotenciais de três sistemas de duas cargas pontuais q_1 e q_2. Em todos os casos $q_1 = 3$ nC e a distância entre as duas cargas é 6 cm. Nas figuras (a) e (b), a distância desde o ponto P até a carga q_1 é igual a 2 cm. Determine o valor de q_2 nos três casos.

(a) (b) (c)

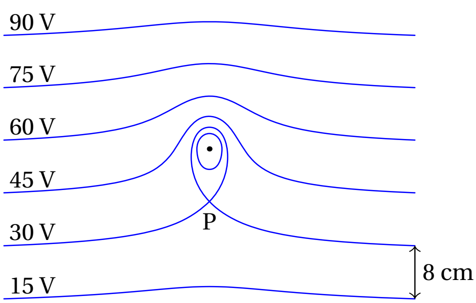


7. O potencial no plano Oxy é (unidades SI):

$$V = \frac{2\,x}{(x^2+y^2)^{3/2}} + \frac{3}{(x^2+y^2)^{1/2}}$$

Calcule o campo elétrico em qualquer ponto do plano Oxy. Usando o Maxima, represente as superfícies equipotenciais e as linhas de campo. Existe algum ponto de campo elétrico nulo?

8. A figura mostra as superfícies equipotenciais devidas a uma carga pontual e a um campo elétrico uniforme $\vec{E}_{\text{ext}}$. A grandes distâncias da carga pontual, as superfícies são planos paralelos e a distancia entre dois planos com diferença de potencial de 15 V é de 8 cm. (a) Calcule o módulo e a direção do campo externo $\vec{E}_{\text{ext}}$. (b) Diga se a carga pontual é positiva ou negativa e justifique a sua resposta. (c) Qual a direção da força sobre a carga pontual? (d) Se a distância entre a carga pontual e o ponto P é 9 cm, determine o valor da carga pontual.



Respostas

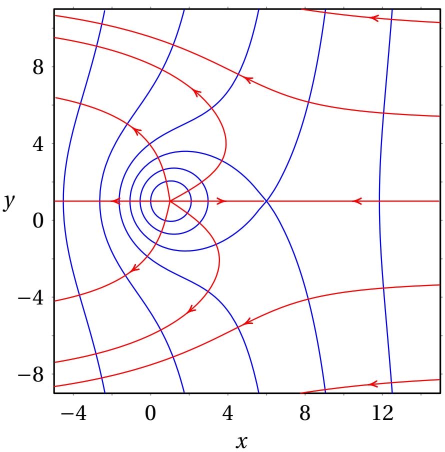
Perguntas: **1.** E. **2.** B. **3.** D. **4.** C. **5.** C.

Problemas

1. $$E_x = \frac{1250\,(x-1)}{\left[(x-1)^2+(y-1)^2\right]^{3/2}} - 50$$

$$E_y = \frac{1250\,(y-1)}{\left[(x-1)^2+(y-1)^2\right]^{3/2}}$$

O campo é nulo no ponto (6, 1). Trata-se do potencial de uma carga pontual positiva, no ponto (1, 1), dentro de um campo externo uniforme $\vec{E} = -50\,\hat{\imath}$.



2. 0.3 kV.

3. 3 m, 200 nC

4. 154.3 V

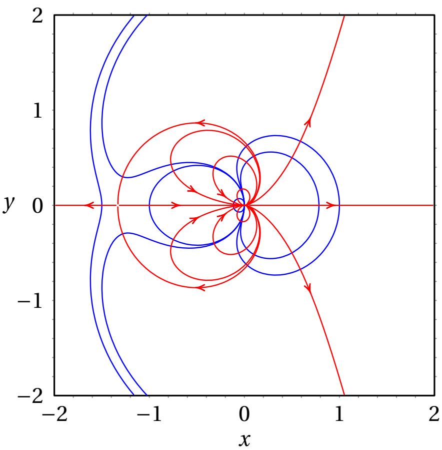
5. (*a*) 4.2 cm e 2.8 cm. (*b*) −2857 V

6. (*a*) 12 nC (*b*) −48 nC (*c*) −3 nC

7. $$E_x = \frac{3\,x^3 + 3\,x\,y^2 + 4\,x^2 - 2\,y^2}{(x^2+y^2)^{5/2}}$$

$$E_y = \frac{3\,y\,(x^2+y^2+2\,x)}{(x^2+y^2)^{5/2}}$$

O campo é nulo no ponto (x, y) = (-4/3, 0)



8. (*a*) 187.5 V/m, para baixo (*b*) negativa (*c*) para cima (*d*) −0.169 nC