Física III

O Campo Elétrico

Prof. VICTOR M. MIRANDA

Objetivos de Aprendizagem

Ao estudar este capítulo você aprenderá:

- O conceito de campo elétrico.

- Como usar o conceito de linhas de campo elétrico para visualizar e interpretar os campos elétricos.

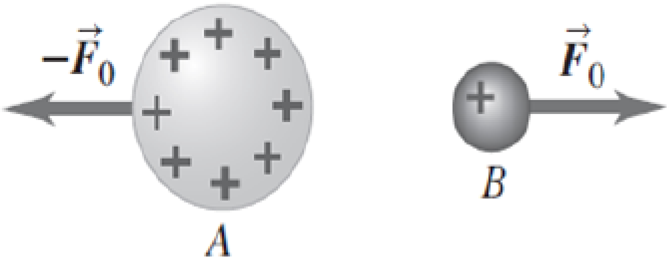
- Como calcular o campo elétrico para cargas puntiformes e para diversas distribuições de cargas.

Campo Elétrico

- Quando ocorre uma interação no vácuo entre duas partículas que possuem cargas elétricas, como é possível uma delas perceber a existência (força) da outra ?

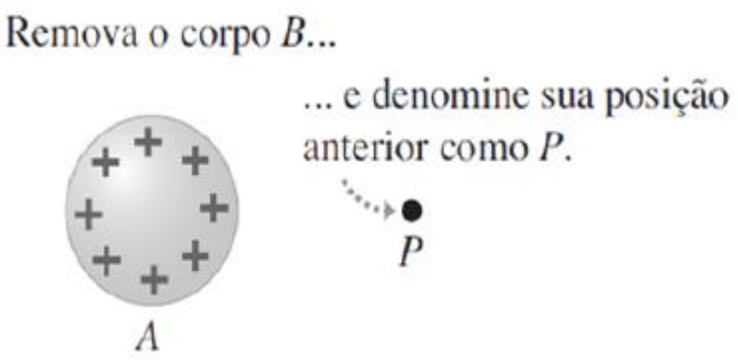
- O que existe no espaço entre elas para que a interação seja comunicada de uma carga para a outra ?

- O corpo A, em virtude da carga elétrica que possui, de algum modo *modifica o espaço ao redor dele*.
- O corpo A, em virtude da carga elétrica que possui, sente no ponto onde ela está, *como o espaço foi modificado pela outra carga* B.

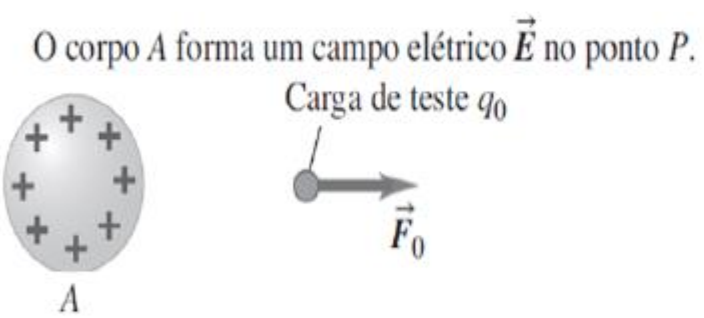


Campo Elétrico

Para responder estas perguntas, vamos definir o conceito de campo elétrico.



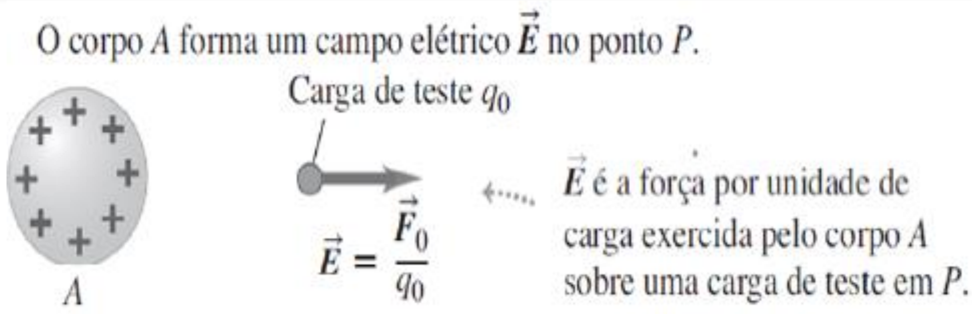
A carga A produz um **campo elétrico** no ponto P (e em todos os outros pontos de sua vizinhança).



Este campo está presente no ponto P mesmo quando não existe nenhuma carga em P.

Quando uma carga q_0 (carga puntiforme de prova ou de teste) é colocada no ponto P, ela sofre a ação da força elétrica.

Campo Elétrico sobre uma Carga Puntiforme



Esta força é exercida sobre a carga q_0 pelo campo elétrico, no ponto P, produzido pelo corpo A.

De modo análogo, podemos dizer que a carga puntiforme q_0 produz em torno dela um campo elétrico e que esse campo exerce sobre o corpo A uma força elétrica $-\vec{F}_0$.

A força elétrica sobre um corpo carregado é exercida pelo campo elétrico produzido por outros corpos carregados.

Uma única carga produz um campo elétrico no espaço de suas vizinhanças, porém esse campo não pode exercer força sobre a carga que o criou.

$$\boxed{\vec{E} = \frac{\vec{F}_0}{q_o}} \quad SI: [N/C]$$

(Campo elétrico **sobre uma** carga puntiforme)

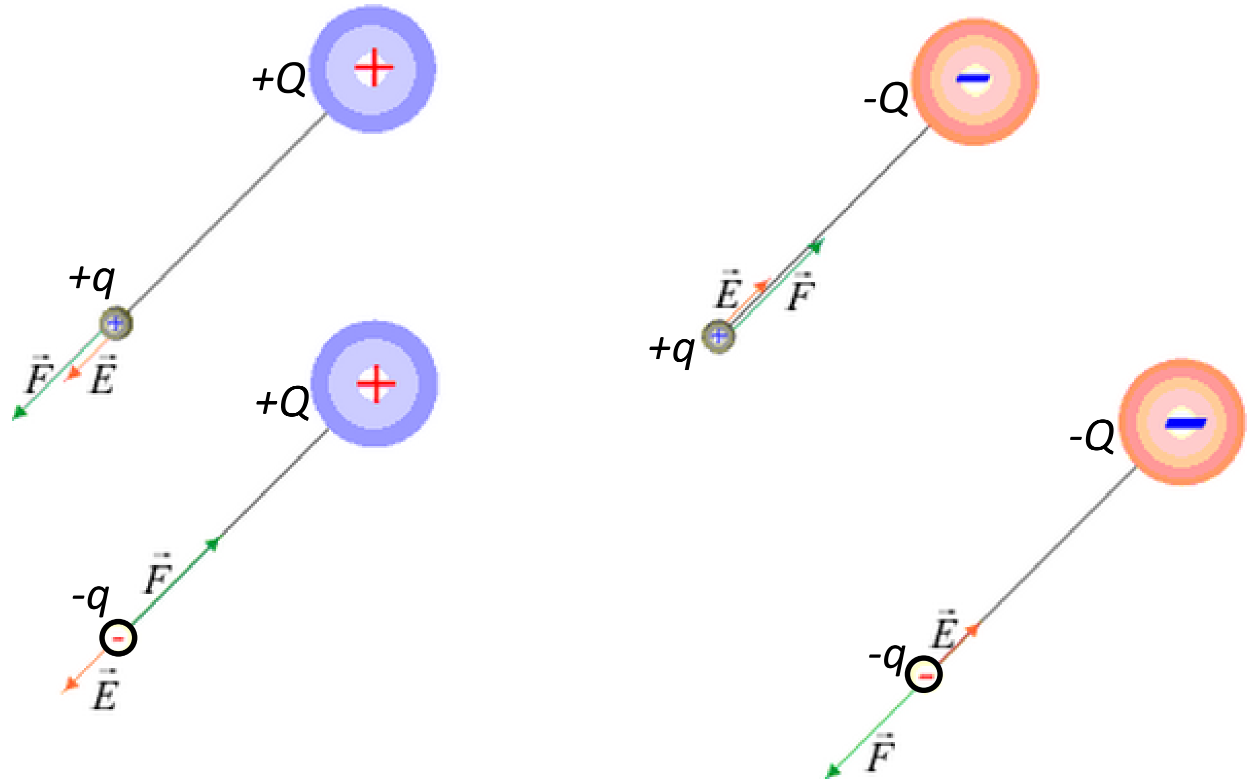
Para um campo elétrico conhecido:

$$\vec{F}_0 = q_o\vec{E}$$

(Força $\vec{F}_0$ que atua **sobre uma carga puntiforme q_o** provocada pelo campo elétrico $\vec{E}$)

Campo Elétrico sobre uma Carga Puntiforme

O campo elétrico pode ter pelo menos quatro orientações diferentes de seu vetor devido aos sinais de interação entre as cargas, quando o campo é gerado por apenas uma carga, estes são:



Campo elétrico produzido por Q, porém atua em *q*

Quando a carga de prova tem sinal negativo (q<0), os vetores força e campo elétrico têm mesma direção, mas sentidos opostos, e quando a carga de prova tem sinal positivo (q>0), ambos os vetores têm mesma direção e sentido

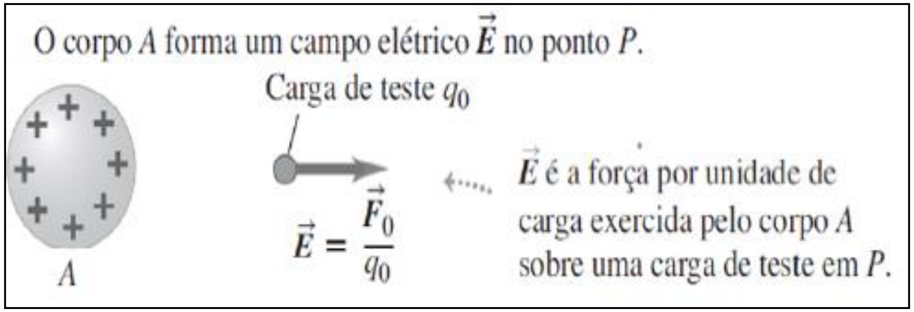
Já quando a carga geradora do campo tem sinal positivo (Q>0), o vetor campo elétrico tem sentido de afastamento das cargas e quando tem sinal negativo (Q<0), tem sentido de aproximação, sendo que isto não varia com a mudança do sinal das cargas de provas.

Campo Elétrico sobre uma Carga Puntiforme

PERGUNTA: O campo da elétrico gerado pela carga de teste q_0 não afetaria as outras cargas, como o corpo A, ou seja, produzir um deslocamento das cargas desse corpo?

Sim! Principalmente se o corpo A é um condutor carregado (alta mobilidade eletrônica, ou seja, na qual a carga pode se mover com facilidade)!

Desse modo, o campo elétrico em torno de A quando q_0 está presente pode ser diferente do campo quando q_0 está ausente.



Contudo, quando q_0 for muito pequena, a redistribuição de cargas sobre o corpo A será também muito pequena.
Portanto, para que não haja influência da carga de prova sobre a distribuição de cargas (efeito desprezível) , a carga q_0 deve ser a menor possível.

$$\vec{E} = \lim_{q_0 \to 0} \frac{\vec{F}_0}{q_0}$$

Para efeitos de cálculos práticos, não usaremos esse processo de passagem ao limite.

Campo Elétrico e Campo Gravitacional

Embora o conceito de campo elétrico possa ser novo para você, a ideia básica – de que um corpo produz um campo no espaço em torno dele e um segundo corpo sofre a ação desse campo – já é conhecida.

Compare a expressão anterior com a seguinte expressão que relaciona a interação gravitacional entre a Terra e um corpo com certa massa:

$$\vec{g} = \frac{\vec{F}_g}{m_0}$$

A Terra produz um campo gravitacional $\vec{g}$ *no espaço em torno dela e o campo gravitacional produz uma força* $\vec{F}_g$ *sobre um corpo de massa* m_0.

Campo Vetorial

Quando o corpo de prova carregado possui um *tamanho suficientemente grande* (*não puntiforme*), o campo elétrico pode variar em módulo e direção em pontos diferentes ao longo do corpo e a determinação da força elétrica resultante que atua sobre o corpo pode tornar-se complicada.

Uma vez que o campo elétrico é capaz de variar de um ponto para outro, ele não é dado por uma única grandeza vetorial, mas por um *conjunto de grandezas vetoriais*, cada uma das quais associada com um ponto desse espaço.
Esse é um exemplo de um **campo vetorial.**

Quando usamos um sistema de coordenadas retangulares (*xyz*), cada componente do vetor $\vec{E}$ geralmente é uma função das coordenadas (*x,y,z*) do ponto.
Podemos representar os componentes escalares desse vetor por $E_x(x,y,z)$, $E_y(x,y,z)$ e $E_z(x,y,z)$.

Exemplo: *Campo elétrico uniforme* → módulo e a direção do campo elétrico (e, portanto, de seus componentes) são constantes.

Campo Elétrico produzido por uma Carga Puntiforme

Para determinarmos o campo elétrico produzido por uma carga puntiforme *q*, colocamos uma carga de prova q_0 em um ponto a uma distância *r* de *q*.

De acordo com a Lei de Coulomb, o módulo da força que age sobre q_0 é dada por:

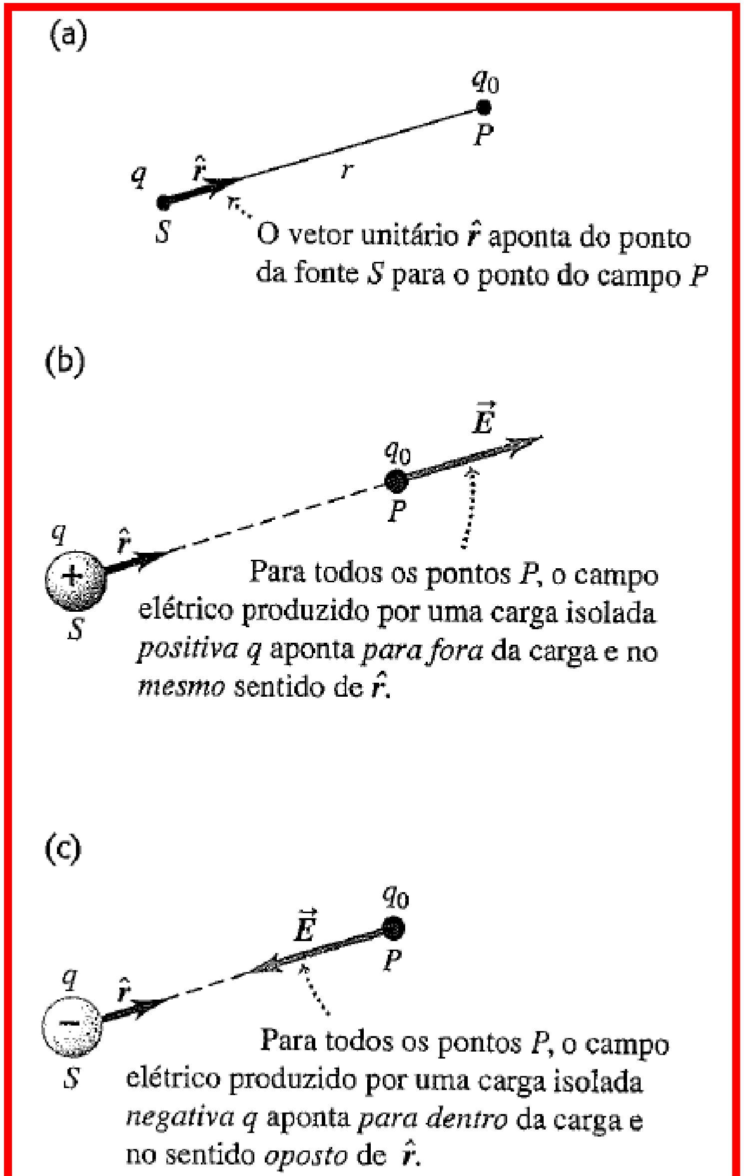
$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{q\,q_0}{r^2}$$

Mas sabemos que o módulo do campo elétrico no ponto P é dado por:

$$E = \frac{F}{q_0} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{q\,q_0}{q_0\,r^2}$$

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o}\frac{q}{r^2}\hat{r}$$

(Campo elétrico $\vec{E}$ **produzido por** uma carga puntiforme *q*)



Exemplo: Campo Elétrico de uma Carga Puntiforme

VETOR DO CAMPO ELÉTRICO DE UMA CARGA PUNTIFORME

Uma carga puntiforme $q = -8{,}0$ nC está localizada na origem. Determine o vetor do campo elétrico para o ponto do campo $x = 1{,}2$ m, $y = -1{,}6$ m.

EXECUTAR: a distância da carga no ponto da fonte S (que neste caso está na origem O) para o ponto do campo P é

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} = \sqrt{(1{,}2\ \text{m})^2 + (-1{,}6\ \text{m})^2} = 2{,}0\ \text{m}$$

O vetor unitário $\hat{r}$ está orientado do ponto da fonte para o ponto do campo. Ele equivale ao deslocamento do $\vec{r}$ desde o ponto da fonte até o ponto do campo (na Figura 21.19, foi deslocado para o lado, para não ocultar os demais vetores), dividido por seu módulo r:

$$\hat{r} = \frac{\vec{r}}{r} = \frac{x\hat{\imath} + y\hat{\jmath}}{r}$$

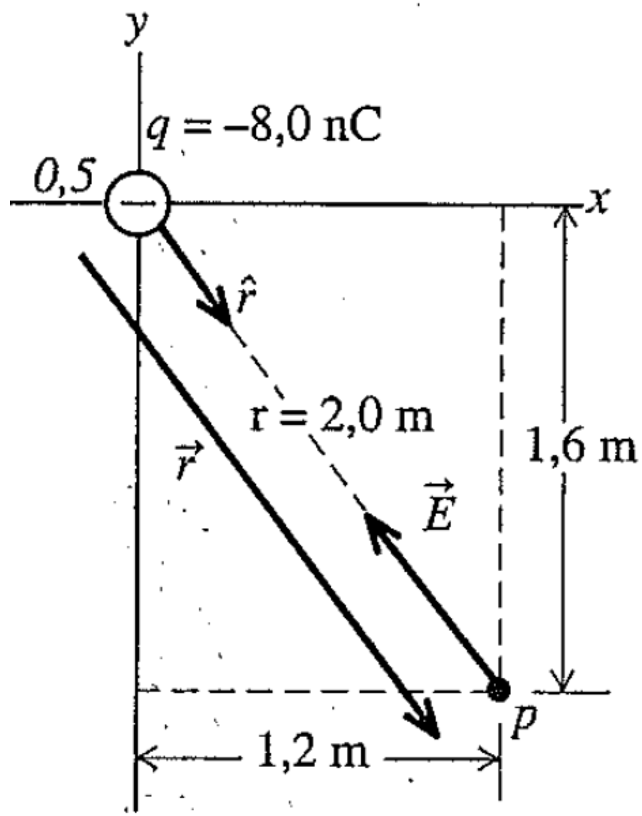
$$= \frac{(1{,}2\ \text{m})\hat{\imath} + (-1{,}6\ \text{m})\hat{\imath}}{2{,}0\ \text{m}} = 0{,}60\hat{\imath} - 0{,}80\hat{\jmath}$$

Logo, o vetor do campo elétrico é dado por

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{q}{r^2}\hat{r}$$

$$= (9{,}0 \times 10^9\ \text{N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2)\frac{(-8{,}0 \times 10^{-9}\ \text{C})}{(2{,}0\ \text{m})^2}(0{,}60\hat{\imath} - 0{,}80\hat{\jmath})$$

$$= (-11\ \text{N/C})\hat{\imath} + (14\ \text{N/C})\hat{\jmath}$$



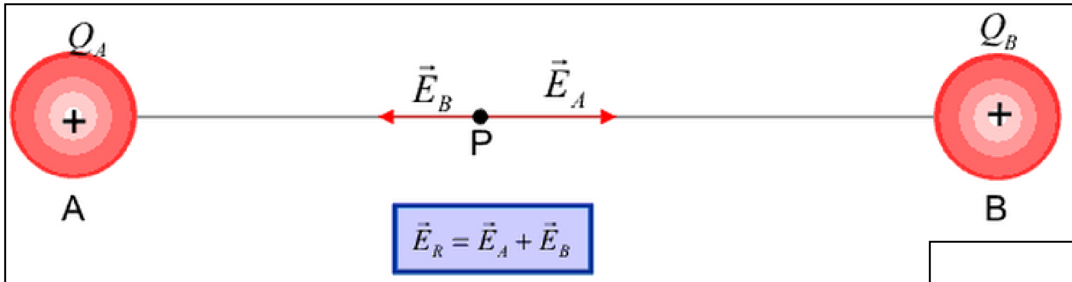
esquematização do problema.

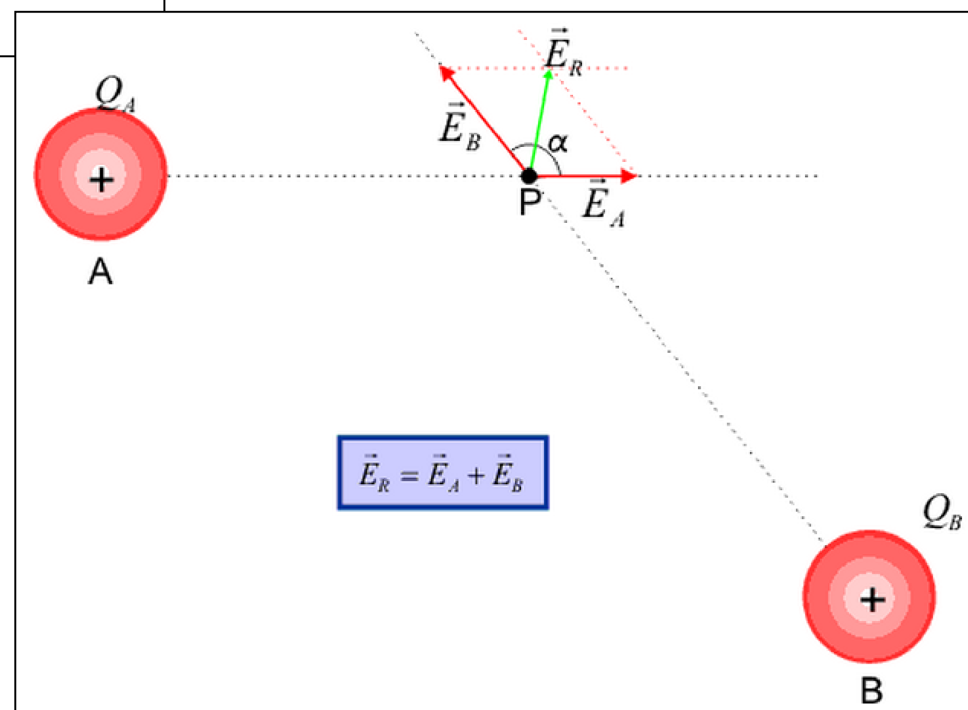
Princípio da Superposição

Campo elétrico gerado por mais do que uma partícula eletrizada.

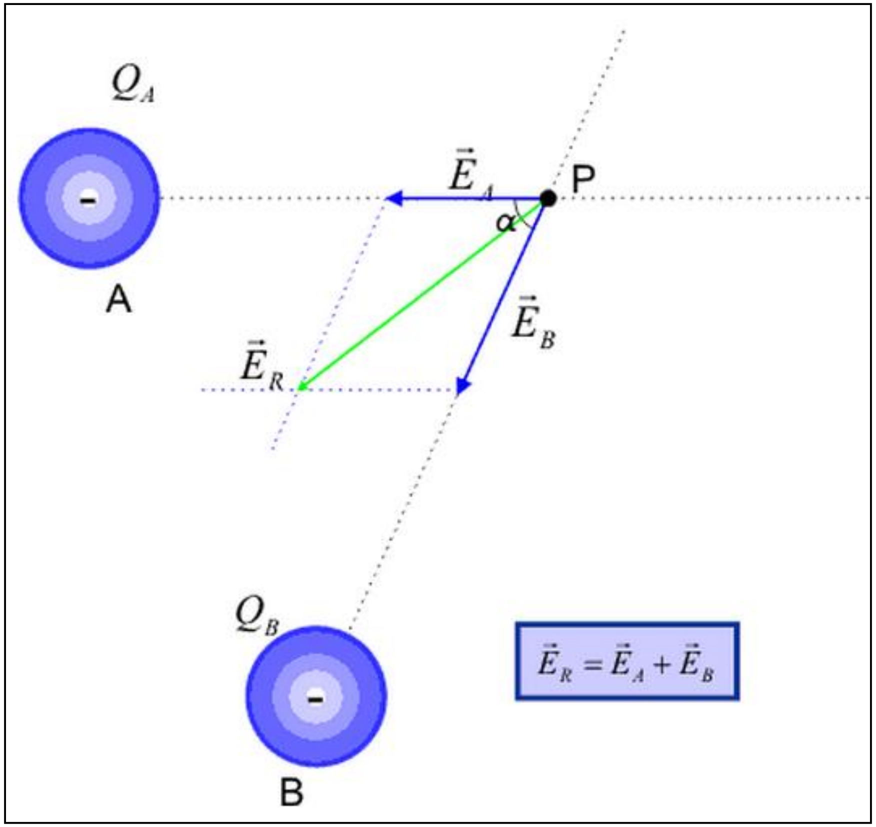
Quando duas ou mais cargas estão próximas o suficiente para que os campos gerados por cada uma se interfiram, é possível determinar um campo elétrico resultante em um ponto desta região.

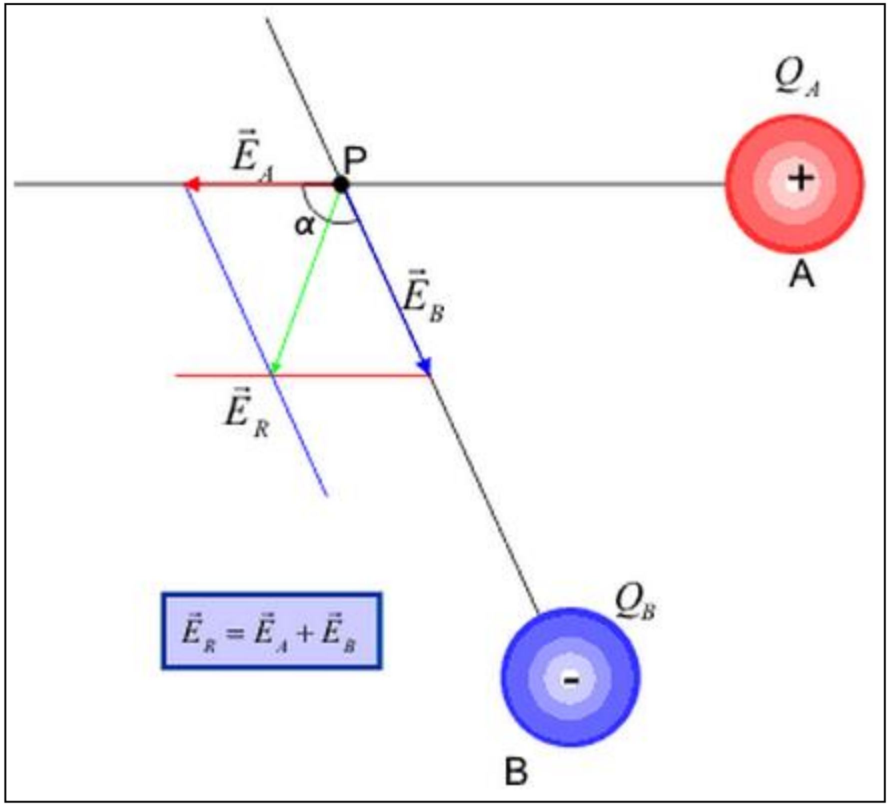
Para isto, analisa-se isoladamente a influência de cada um dos campos gerados sobre um determinado ponto.



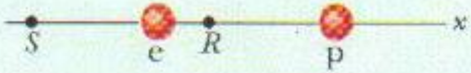


Princípio da Superposição



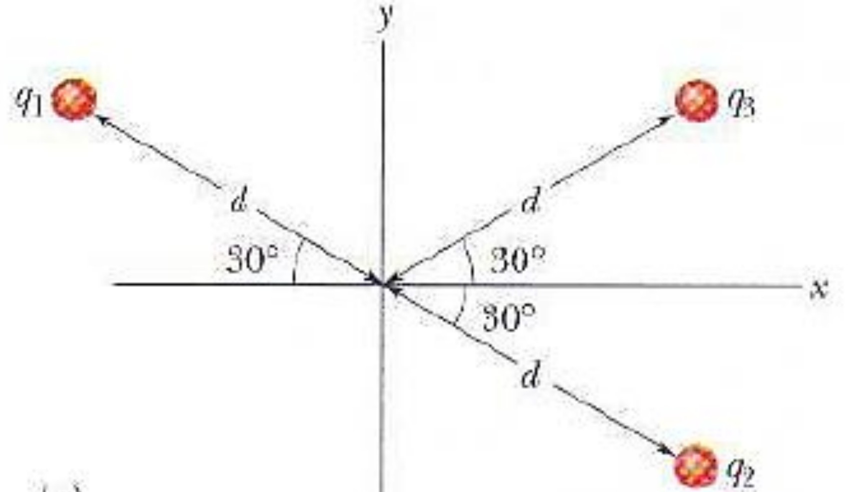


TESTE 1 A figura mostra um próton p e um elétron e sobre o eixo x. Qual é o sentido do campo elétrico produzido pelo elétron (a) no ponto S; (b) no ponto R? Qual é o sentido do campo elétrico total produzido pelas duas partículas (c) no ponto R; (d) no ponto S?



Exemplo: Princípio da Superposição

A Fig. 22-7*a* mostra três partículas de cargas $q_1 = +2Q$, $q_2 = -2Q$ e $q_3 = -4Q$, todas situadas a uma distância d da origem. Determine o campo elétrico total $\vec{E}$ produzido na origem pelas três partículas.



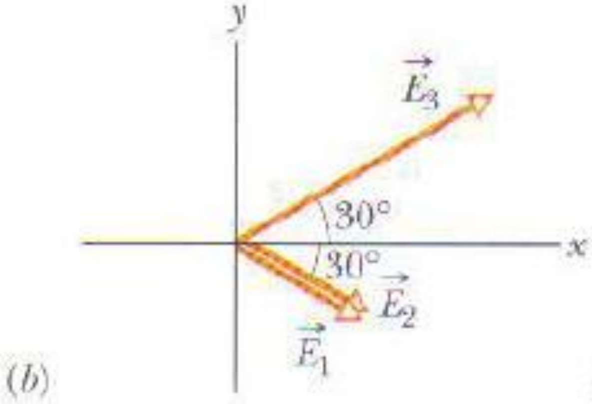
(*a*)

$$E_1 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{2Q}{d^2}.$$

$$E_2 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{2Q}{d^2} \quad \text{e} \quad E_3 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{4Q}{d^2}.$$

$$E_1 + E_2 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{2Q}{d^2} + \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{2Q}{d^2} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{4Q}{d^2},$$

$$\boxed{E = 2E_{3x} = 2E_3\cos 30^\circ = (2)\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{4Q}{d^2}(0{,}866) = \frac{6{,}93Q}{4\pi\varepsilon_0 d^2}.}$$



(*b*)

Campo Elétrico *vs* Campo Gravitacional

Podemos fazer uma analogia entre o campo gravitacional e o campo elétrico.

Força Gravitacional

$$\vec{F}_G = G\frac{Mm}{r^2}\hat{r}$$

No caso da Terra, ou seja uma distribuição fixa de massa, teremos:

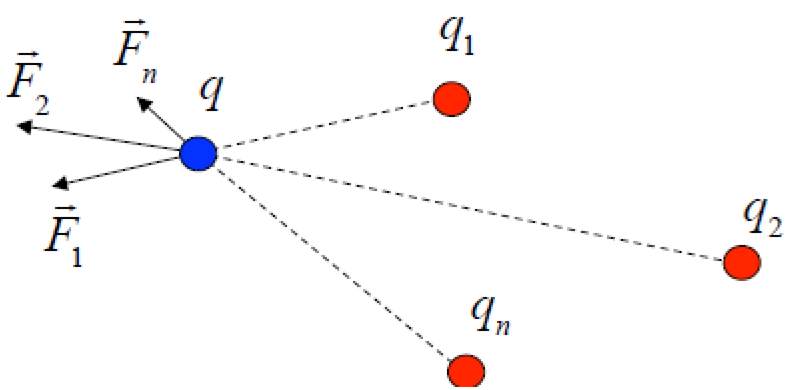
$$\vec{F}_G = \vec{P} = m\left(\frac{GM_{\text{Terra}}}{R^2_{\text{Terra}}}\hat{r}\right) = m\vec{g}$$

Força Eletrostática

$$\vec{F}_E = k\frac{Qq}{r^2}\hat{r}$$

Numa distribuição fixa de cargas (veja figura abaixo)

$$\vec{F}_E = q\left(\sum_{i=1}^{4} k\frac{q_i}{r_i}\hat{r}_i\right) = q\vec{E}$$



Campo Gravitacional $\vec{g}$

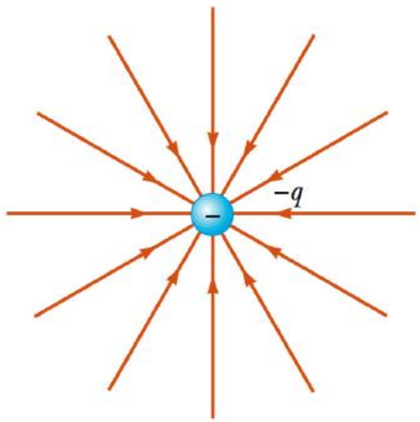
Campo Elétrico $\vec{E}$

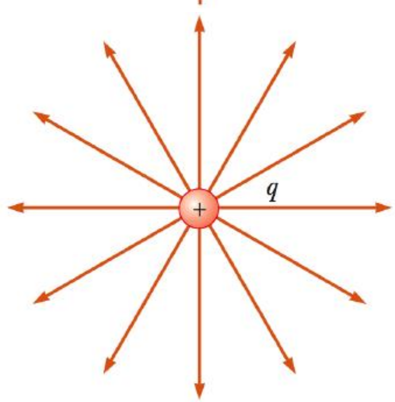
Linhas de Força

O conceito de campo elétrico pode parecer um pouco abstrato/ilúsório porque não se pode vê-lo diretamente.

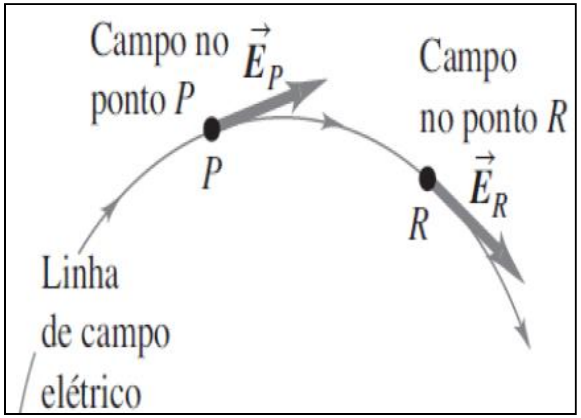
As ***linhas de força*** são linhas imaginárias a partir das quais pode-se visualizar a configuração do campo elétrico de uma dada distribuição de cargas no espaço. Elas são traçadas de forma que:

a) A tangente a cada ponto da linha fornece a direção e o sentido do campo elétrico;





b) O número de linhas por unidade de área de uma superfície perpendicular à direção das linhas, ou seja, o espaçamento entre as linhas, é proporcional ao módulo do campo;

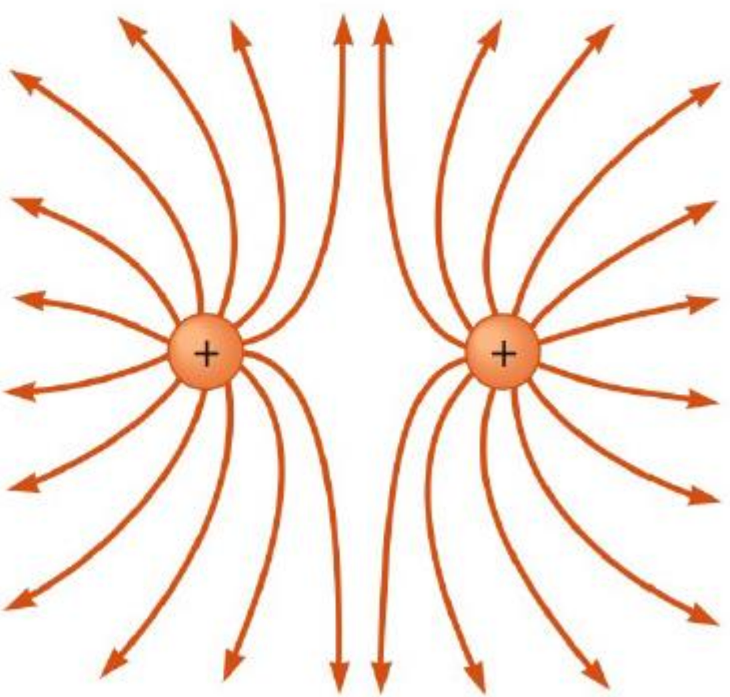


c) As linhas saem das cargas positivas e chegam nas cargas negativas.

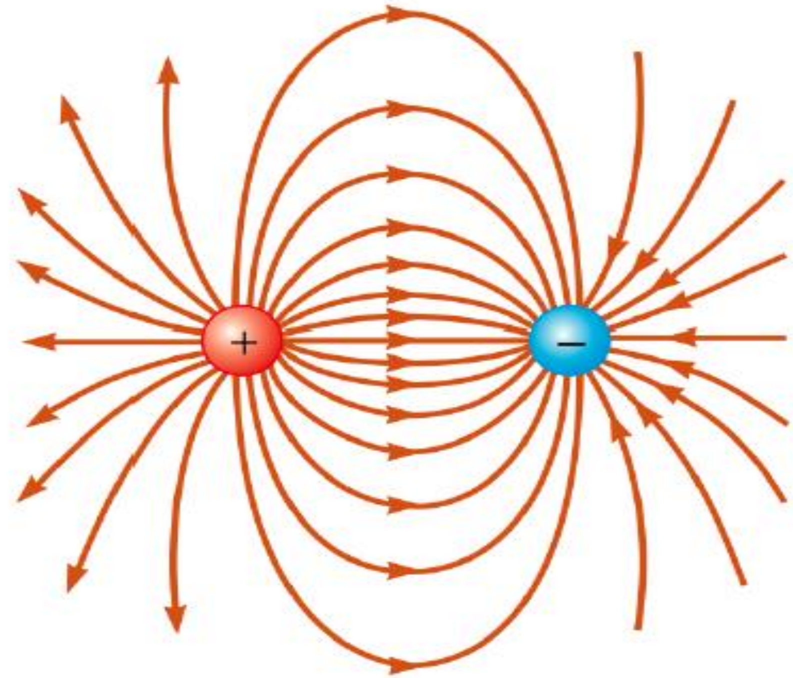
Duas linhas de campo nunca se cruzam.

http://www.youtube.com/watch?v=7vnmL853784

Linhas de Força

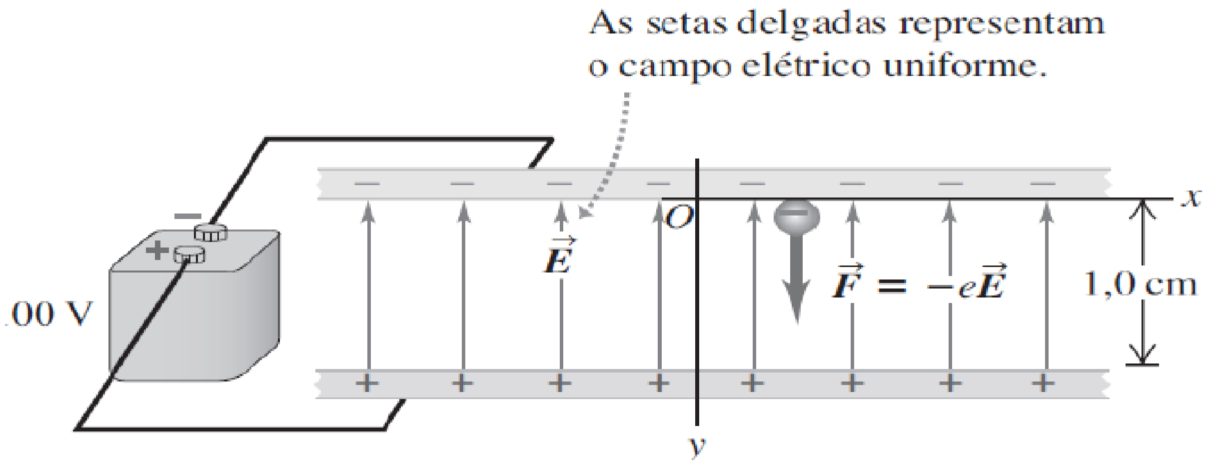


Duas Cargas Iguais



Dipolo Elétrico

Campo Elétrico Uniforme



Em um campo elétrico uniforme as linhas de campo são retas, paralelas, e as distâncias entre as linhas são constantes.

Exemplo: Campo de um Dipolo Elétrico

CAMPO DE UM DIPOLO ELÉTRICO A distância entre duas cargas puntiformes $q_1 = +12$ nC e $q_2 = -12$ nC é igual a 0,10 m (Figura 21.23). Denomina-se *dipolo elétrico* um conjunto de duas cargas iguais, porém de sinais contrários. (Essa combinação ocorre com freqüência na natureza. Por exemplo, na Figura 21.8b e 21.8c, cada molécula no isolante neutro constitui um dipolo elétrico. Estudaremos dipolos elétricos com mais detalhes na Seção 21.7.) Determine o campo elétrico produzido por q_1, o campo elétrico produzido por q_2 e o campo elétrico resultante (a) no ponto a; (b) no ponto b; e (c) no ponto c.

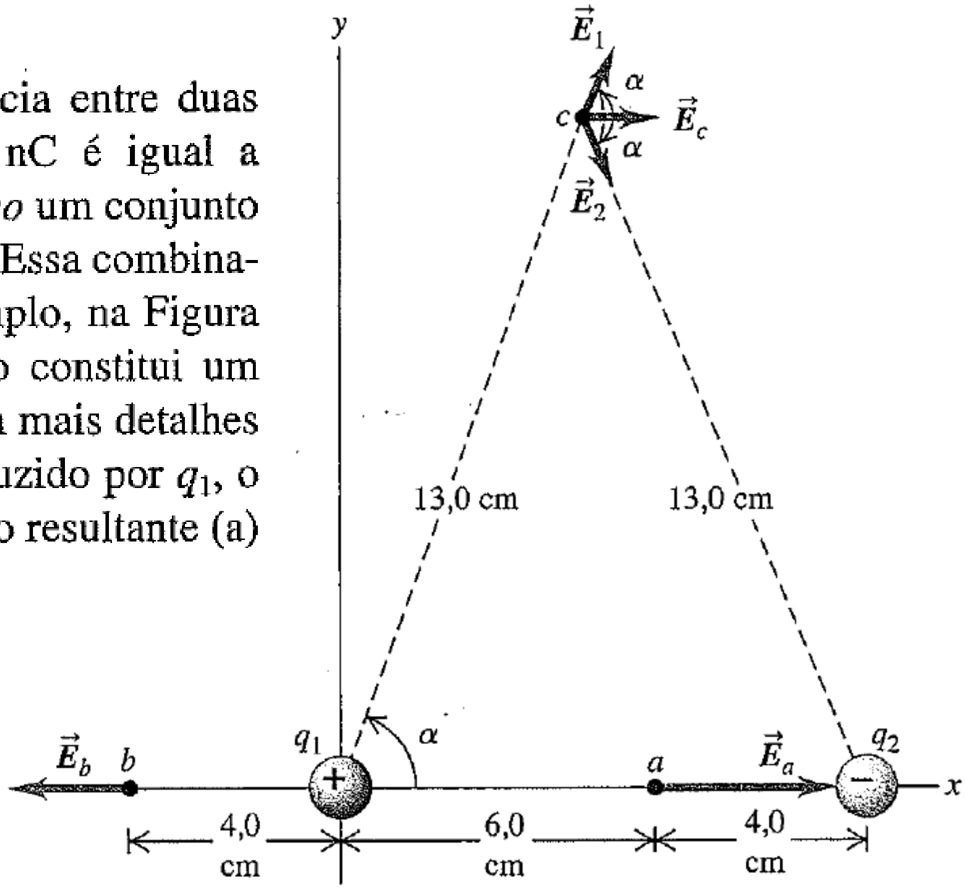


Figura 21.23 Campo elétrico nos pontos a, b e c, produzido por duas cargas q_1 e q_2, que formam um dipolo elétrico.

Exemplo: Campo de um Dipolo Elétrico

EXECUTAR: (a) no ponto a, o campo $\vec{E}_1$ produzido pela carga positiva q_1 e o campo $\vec{E}_2$ produzido pela carga negativa q_2 estão ambos orientados da esquerda para a direita. Os módulos de $\vec{E}_1$ e de $\vec{E}_2$ são dados por

$$E_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{|q_1|}{r^2} = (9{,}0 \times 10^9\ \mathrm{N \cdot m^2/C^2})\frac{12 \times 10^{-9}\ \mathrm{C}}{(0{,}060\ \mathrm{m})^2}$$
$$= 3{,}0 \times 10^4\ \mathrm{N/C}$$
$$E_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{|q_2|}{r^2} = (9{,}0 \times 10^9\ \mathrm{N \cdot m^2/C^2})\frac{12 \times 10^{-9}\ \mathrm{C}}{(0{,}040\ \mathrm{m})^2}$$
$$= 6{,}8 \times 10^4\ \mathrm{N/C}$$

Os componentes de $\vec{E}_1$ e de $\vec{E}_2$ são dados por

$$E_{1x} = 3{,}0 \times 10^4\ \mathrm{N/C} \qquad E_{1y} = 0$$
$$E_{2x} = 6{,}8 \times 10^4\ \mathrm{N/C} \qquad E_{2y} = 0$$

Portanto, no ponto a, o campo elétrico total $\vec{E}_a = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$ possui os componentes

$$(E_a)_x = E_{1x} + E_{2x} = (3{,}0 + 6{,}8) \times 10^4\ \mathrm{N/C}$$
$$(E_a)_y = E_{1y} + E_{2y} = 0$$

No ponto a, o módulo do campo elétrico total é $0{,}8 \times 10^4$ N/C, e o vetor campo é orientado da esquerda para a direita; portanto,

$$\vec{E}_a = (9{,}8 \times 10^4\ \mathrm{N/C})\,\hat{\imath}$$

(b) No ponto b, o campo $\vec{E}_1$ produzido por q_1 é orientado da direita para a esquerda, enquanto no campo $\vec{E}_2$ produzido por q_2 é orientado da esquerda para a direita. Os módulos de $\vec{E}_1$ e de $\vec{E}_2$ são dados por

$$E_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{|q_1|}{r^2} = (9{,}0 \times 10^9\ \mathrm{N \cdot m^2/C^2})\frac{12 \times 10^{-9}\ \mathrm{C}}{(0{,}040\ \mathrm{m})^2}$$
$$= 6{,}8 \times 10^4\ \mathrm{N/C}$$
$$E_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{|q_2|}{r^2} = (9{,}0 \times 10^9\ \mathrm{N \cdot m^2/C^2})\frac{12 \times 10^{-9}\ \mathrm{C}}{(0{,}140\ \mathrm{m})^2}$$
$$= 0{,}55 \times 10^4\ \mathrm{N/C}$$

Os componentes de $\vec{E}_1$, $\vec{E}_2$ e do campo total $\vec{E}_b$ no ponto b são dados por

$$E_{1x} = -6{,}8 \times 10^4\ \mathrm{N/C} \qquad E_{1y} = 0$$
$$E_{2x} = 0{,}55 \times 10^4\ \mathrm{N/C} \qquad E_{2y} = 0$$
$$(E_b)_x = E_{1x} + E_{2x} = (-6{,}8 + 0{,}55) \times 10^4\ \mathrm{N/C}$$
$$(E_b)_y = E_{1y} + E_{2y} = 0$$

Ou seja, no ponto b, o módulo do campo elétrico total é $6{,}2 \times 10^4$ N/C, e o vetor do campo é orientado da direita para a esquerda; portanto,

$$\vec{E}_b = (-\,6{,}2 \times 10^4\ \mathrm{N/C})\,\hat{\imath}$$

Exemplo: Campo de um Dipolo Elétrico

(c) No ponto c, o campo $\vec{E}_1$ possui módulo igual ao do campo $\vec{E}_2$, visto que as duas cargas possuem o mesmo módulo; e a distância entre elas e o ponto considerado é a mesma:

$$E_1 = E_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{|q|}{r^2} = (9{,}0 \times 10^9\ \mathrm{N \cdot m^2/C^2})\frac{12 \times 10^{-9}\ \mathrm{C}}{(0{,}130\ \mathrm{m})^2}$$
$$= 6{,}39 \times 10^3\ \mathrm{N/C}$$

Na Figura 21.23, mostramos as direções e os sentidos de $\vec{E}_1$ e de $\vec{E}_2$. Os componentes x desses vetores são os mesmos:

$$E_{1x} = E_{2x} = E_1 \cos\alpha = (6{,}39 \times 10^3\ \mathrm{N/C})\left(\frac{5}{13}\right)$$
$$= 2{,}46 \times 10^3\ \mathrm{N/C}$$

Por simetria, vemos que o componente y E_{1y} é igual e contrário ao componente E_{2y} e, portanto, a resultante é igual a zero nessa direção. Logo, os componentes do campo total $\vec{E}_c$ são dados por

$$(E_c)_x = E_{1x} + E_{2x} = 2(2{,}46 \times 10^3\ \mathrm{N/C}) = 4{,}9 \times 10^3\ \mathrm{N/C}$$
$$(E_c)_y = E_{1y} + E_{2y} = 0$$

Ou seja, no ponto c, o módulo do campo elétrico total é $4{,}9 \times 10^3$ N/C, e o vetor do campo é orientado da esquerda para a direita; portanto,

$$\vec{E}_c = (4{,}9 \times 10^3\ \mathrm{N/C})\,\hat{\imath}$$

Exercícios Adicionais

21.31 A distância entre duas cargas puntiformes é de 25,0 cm (Figura 21.37). Determine o campo elétrico líquido que essas cargas produzem (a) no ponto *A* e (b) no ponto *B*. (c) Quais seriam o módulo, a direção e o sentido da força elétrica que esse conjunto de cargas produziria sobre um próton no ponto *A*?

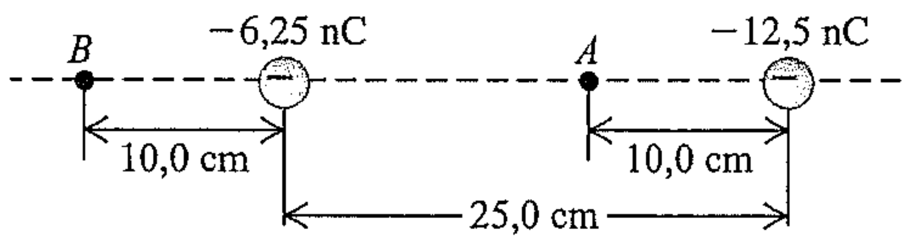


Figura 21.37 Exercício 21.31.

Respostas:

a) E = 8,74 10^3 N/C, para a direita
b) E = 6,54 10^3 N/C, para a direita
c) F = 1,4 10^{--15} N, para a direita

Dúvidas ??

BONS ESTUDOS !!!

Prof. Victor M. Miranda