

Unidade 11: Electrostática

Índice contidos

1. INTERACCIÓN ELECTROSTÁTICA

2. LEI DE COULOMB

3. CAMPO ELÉCTRICO

- 3.1. Intensidade do campo eléctrico
- 3.2. Enerxía potencial eléctrica

4. POTENCIAL ELÉCTRICO. DIFERENZA DE POTENCIAL

1. INTERACCIÓN ELECTROSTÁTICA

Na Unidade 9 vimos que a masa é unha propiedade intrínseca da materia e que non varía, independentemente do lugar onde a midamos. O seu valor é a suma de todas as masas elementais que a compoñen, é dicir a suma das masas de todas as súas moléculas ou, afondando máis, a suma das masas das partículas elementais que compoñen os seus átomos. Todas elas contribúen, sumando, na masa total do corpo, xa que todas as masas son positivas.

A carga eléctrica é tamén unha propiedade intrínseca da materia; todos os protóns teñen a mesma cantidade de carga positiva, todos os electróns teñen tamén a mesma cantidade de carga, e do mesmo valor absoluto que a dos protóns, pero negativa e, por último, os neutróns non teñen carga.

Un átomo, en estado neutro, ten o mesmo número de protóns que de electróns, polo tanto a suma de todas as súas cargas eléctricas é nula xa que hai igual número de cargas positivas que de negativas e ámbalas dúas teñen o mesmo valor absoluto. Debido a isto, os corpos que observamos habitualmente están en equilibrio eléctrico e non presentan unha carga eléctrica neta.

Unha vez coñecida a orixe da carga eléctrica, podemos definir a electrostática como a parte da electricidade que estuda as cargas eléctricas e as súas interaccións en estado de repouso.

Os antigos gregos xa coñecían o fenómeno da electrización; conseguían electrizar algúns corpos, como o ámbar, ao fregalos con la ou sinxelamente co cabelo. Esta electrización maniféstase pola forza de atracción que exerce o corpo electrizado sobre outros de pequena masa cando se lles achega suficientemente.

Electrizar un corpo é facer que este teña unha carga eléctrica neta, xa sexa positiva ou negativa. Para conseguilo **hai que facer que o corpo colla electróns doutro ou que os solte**; se os colle, queda cargado negativamente, e se os solta, positivamente. Por que non solta ou colle protóns? Os protóns forman parte do núcleo atómico, e están tan fortemente confinados nel que soamente poden desprenderse por unha reacción nuclear coa conseguinte ruptura do núcleo. Así pois, o vehículo de transmisión ou intercambio de cargas eléctricas é sempre o electrón.

Existen métodos para facer que pasen electróns dun corpo a outro. O máis sinxelo, que acabamos de comentar, é fregar uns corpos con tendencia a coller electróns, como o ámbar ou o plástico, con outros, como a la ou o pelo, que os soltan con facilidade. É o que chamamos **electrización por contacto**. Pódese comprobar, dun xeito similar

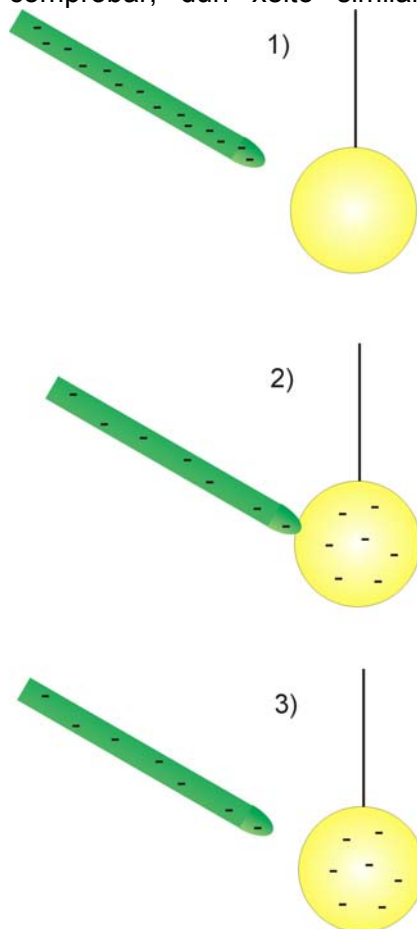


Figura 2. Electrización por contacto

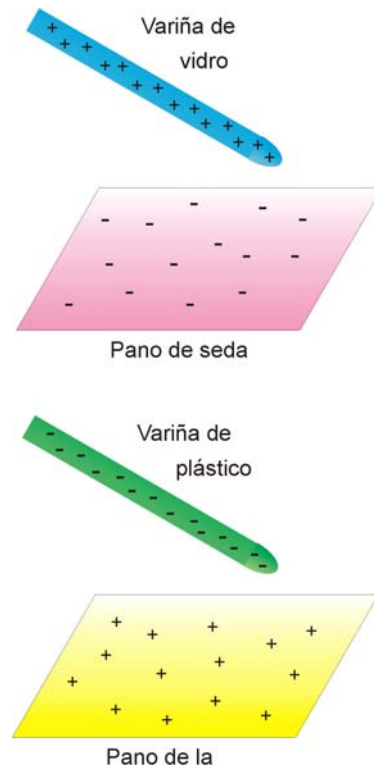


Figura 1. Electrización por fricción

Pero... dende o principio do curso ata agora, entre as forzas que actúan a distancia, só coñecemos e analizamos forzas de atracción, ¿non se manifestan na natureza, tamén forzas de repulsión? A resposta é si e imos comprobalo cun sinxelo pero ilustrativo experimento:

Cortamos unha tira de papel de aluminio duns tres milímetros de ancho por uns oito centímetros de longo e dobrámola pola metade. A continuación introducimos o extremo polo que están unidas as dúas metades entre as páxinas dun libro deixando libres os dous extremos que quedaron soltos. Feito isto, fregamos un bolígrafo de plástico cunha peza de la ou co pelo e achegámolo ás dúas puntas, observaremos que estas se abren coma se quixeran "morder" ao bolígrafo.

Vexamos por que acontece isto: ao fregar o bolígrafo cárgase negativamente e ao achegalo ao papel de aluminio, os electróns deste desprázanse no sentido de afastarse do bolígrafo, polo cal os dous extremos

libres quedan cargados positivamente e se repelen entre si, pero, á súa vez, son atraídos polo bolígrafo realizando un desprazamento que dá lugar ao curioso efecto.

Acabamos de ver que no papel de aluminio se desprazaron cargas debido á presenza do bolígrafo. Analogamente, cando achegamos un corpo cargado electricamente a outro que non o está, xérase un desprazamento de cargas neste último por indución electrostática. Se a continuación conectamos á terra a zona que contén exceso de electróns, parte destes pasarán a ela e o corpo quedará cargado positivamente. Este método denomínase **electrización por indución**.

A cantidade de carga que pode ter un corpo é sempre múltiplo da do electrón xa que esta é a mínima cantidade de carga que pode pasar dun corpo a outro. Así pois, a unidade natural ou elemental de carga eléctrica é a carga do electrón.

A **unidade de carga eléctrica** no Sistema Internacional é o **culombio**, que é a carga eléctrica dun corpo que perdeu $6,25 \cdot 10^{18}$ electróns dende o seu estado neutro. O culombio defínese en función da intensidade de corrente eléctrica, como veremos na seguinte Unidade.

Habitualmente utilizamos as unidades do Sistema Internacional, por iso, é interesante coñecer a carga do electrón (e) expresada en culombios:

$$e = -1/6,25 \cdot 10^{18} = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

Como podemos ver, a carga do electrón é moitísimo menor que o culombio; era de esperar. Non obstante, o culombio é unha unidade moi grande polo que habitualmente empréganse submúltiplos deste como o microculombio:

$$1 \mu\text{C} = 10^{-6} \text{ C}$$

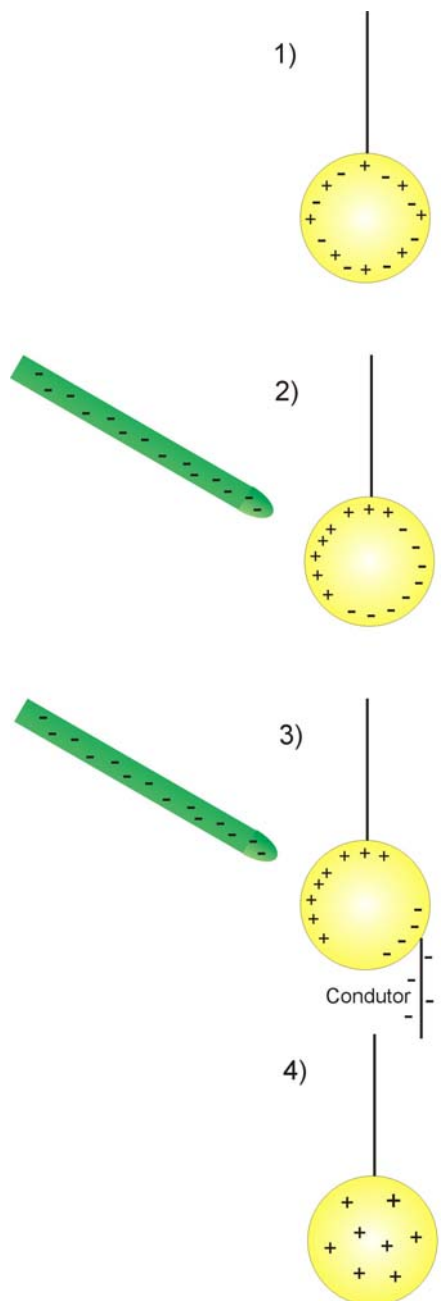


Figura 3. Electrización por indución

2. LEI DE COULOMB

Sabemos que as cargas eléctricas se atraen ou se repelen, pero... cal é o valor desta forza?, en que dirección e sentido actúa? Foi Charles Auguste Coulomb quen no século XVIII, de modo experimental, chegou a coñecer o modo de actuar desta forza e deu a súa expresión matemática:

A forza de atracción ou repulsión entre dous corpos cargados é proporcional ao produto das cargas e inversamente proporcional ao cadrado da distancia que as separa. Actúa na dirección da recta que as une, sendo de atracción se as cargas son de signo contrario e de repulsión se son do mesmo signo. Segundo isto:

$$F = k \cdot \frac{q \cdot q'}{r^2}$$

Esta expresión determina o módulo da forza, pero esta é unha magnitude vectorial polo que a expresión correcta será:

$$\vec{F} = k \cdot \frac{q \cdot q'}{r^2} \cdot \vec{u}_r$$

onde \vec{u}_r é un vector unitario na dirección da recta que une as dúas cargas e o seu sentido é o de achegar unha carga á outra, se son de signo contrario, e o de afastalas se son do mesmo signo.

O valor da constante é $k = \frac{1}{4\pi\epsilon}$ onde ϵ é a permitividade, ou constante dieléctrica, do medio no que se atopen as cargas. Se o medio é o aire o valor de ϵ é aproximadamente igual a ϵ_0 , a permitividade do baleiro: $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2$. Polo tanto, no aire ou baleiro, $k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}$

Cando se consideran máis de dúas cargas, aplícase o principio de superposición, segundo o cal a forza sobre calquera carga é a suma vectorial das forzas debidas a cada unha das demais, isto equivale a admitir que a interacción eléctrica entre dúas cargas non depende da presenza doutras cargas.

Exemplo

Unha boliña de miolo de sabugueiro de 1 g de masa, ten unha carga de 0,1 μC e está situada sobre a superficie dunha mesa. Enriba dela, a unha distancia de 2 cm situamos unha esfera a carga da cal podemos controlar. Que carga teríamos que subministrar a esta para que a bóla se erga?

Solución:

Para que a bóla se erga, debe ser atraída pola esfera cunha forza igual ao seu peso, polo cal:

$$F = m \cdot g = 1 \cdot 10^{-3} \text{ Kg} \cdot 9,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} = 9,8 \cdot 10^{-3} \text{ N}$$

Segundo a lei de Coulomb: $F = k \cdot \frac{q \cdot q'}{r^2}$; despexando “q” que é o valor que

buscamos, $q = \frac{F \cdot r^2}{k \cdot q'}$, teremos:

$$q = \frac{9,8 \cdot 10^{-3} \text{ N} \cdot (2 \cdot 10^{-2})^2 \text{ m}^2}{9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2 \cdot 10^{-7} \text{ C}} = 4,36 \cdot 10^{-9} \text{ C}$$

3. CAMPO ELÉCTRICO

Se temos un corpo cargado nunha posición fixa e achegamos a este outro corpo que tamén teña carga, atoparase sometido a unha forza de atracción ou de repulsión segundo sexa o signo da súa carga. Isto é debido a que toda carga crea ao seu arredor un campo eléctrico onde se manifesta a acción da devandita carga. En xeral podemos dicir que un **campo eléctrico é unha rexión do espazo na que se poñen de manifesto fenómenos de atracción ou de repulsión sobre cargas eléctricas.**

Para representar esquematicamente os campos eléctricos empréganse as liñas de campo, tamén chamadas **liñas de forza**. Cada liña de forza **indica a dirección e sentido da forza á que estaría sometida unha carga positiva que se situase sobre ela**; polo tanto, saen das cargas positivas e entran nas negativas. As liñas de forza tamén indican a dirección e sentido do movemento dunha carga positiva que se deixase libre nese punto. Para unha carga illada son radiais e o seu sentido é cara ao exterior da carga se esta é positiva e cara ao interior se é negativa. Na seguinte figura podemos observar as liñas de forza dos campos creados por unha carga positiva, unha negativa e un dipolo, respectivamente.

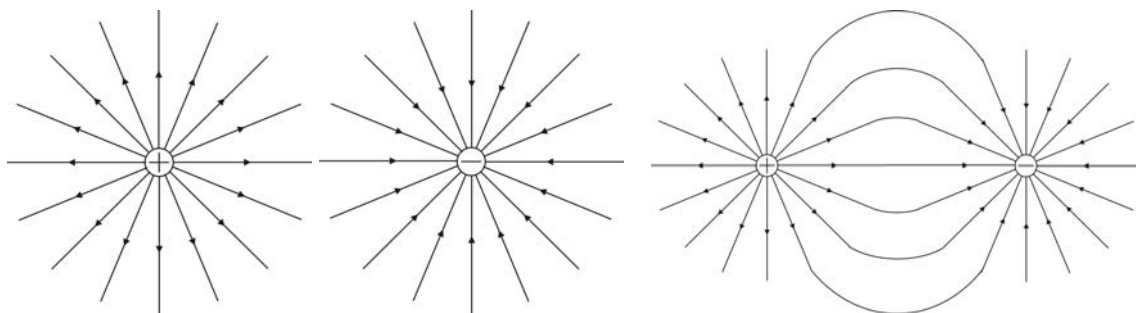


Figura 4: Liñas de forza

3.1. Intensidade do campo eléctrico

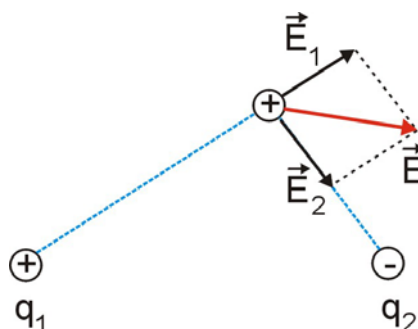
A **intensidade de campo eléctrico nun punto é a forza exercida sobre unha unidade de carga positiva situada nese punto**. É unha magnitude vectorial, dado que é a forza por unidade de carga e represéntase por \vec{E} , sendo o seu valor: $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q'}$, onde “q'” é a carga situada no punto.

Se consideramos unha carga puntual illada “ q ”, o valor da intensidade do campo que crea nun punto calquera será: $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q'} = k \cdot \frac{q \cdot q'}{q' \cdot r^2} \cdot \vec{u}_r \Rightarrow \vec{E} = k \cdot \frac{q}{r^2} \cdot \vec{u}_r$

A intensidade de campo eléctrico exprésase en N/C (newton/culombio).

Cando o campo é creado por dúas ou máis cargas, aplícase o principio de superposición polo cal o campo resultante nun punto calquera é un vector que vén dado pola suma vectorial dos campos creados por cada unha das cargas. A intensidade de campo nun punto calquera é un vector tanxente á liña de forza que pasa por ese punto.

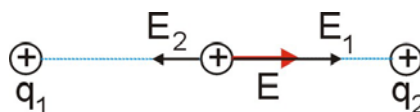
Figura 5: Principio de superposición



Exemplos

1.- Dúas cargas eléctricas de $5 \mu\text{C}$ e $2 \mu\text{C}$, respectivamente, atópanse situadas a unha distancia de 8 cm. Achar a intensidade do campo eléctrico no centro da liña que as une.

Solución:



Onde queremos calcular a intensidade de campo eléctrico, representamos unha carga positiva. A intensidade de campo será a suma vectorial das intensidades dos campos creados por cada unha das cargas que, como vemos na figura, teñen a mesma dirección e sentido contrario:

$$\vec{E}_1 = k \cdot \frac{q_1}{r_1^2} \vec{i} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{5 \cdot 10^{-6}}{(4 \cdot 10^{-2})^2} \vec{i} = \frac{9 \cdot 5}{16} \cdot \frac{10^3}{10^{-4}} \vec{i} = 2,81 \cdot 10^7 \vec{i} \text{ N/C}$$

$$\vec{E}_2 = k \cdot \frac{q_2}{r_2^2} (-\vec{i}) = -9 \cdot 10^9 \cdot \frac{2 \cdot 10^{-6}}{(4 \cdot 10^{-2})^2} \vec{i} = -\frac{9 \cdot 2}{16} \cdot \frac{10^3}{10^{-4}} \vec{i} = -1,13 \cdot 10^7 \vec{i} \text{ N/C}$$

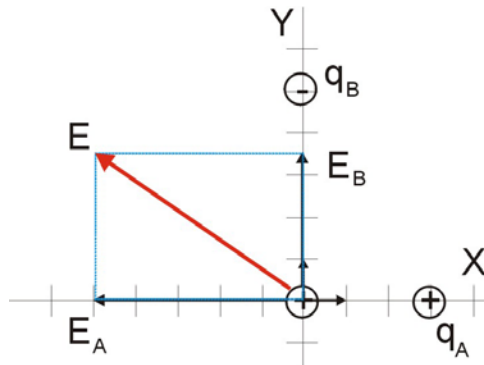
$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 = 2,81 \cdot 10^7 \vec{i} - 1,13 \cdot 10^7 \vec{i} = 1,68 \cdot 10^7 \vec{i} \text{ N/C}$$

Tamén se podería facer calculando os módulos e logo achando a resultante, que sería a resta dos módulos por ser os vectores de sentido contrario.

2.- Unha carga, q_A , de $2 \mu\text{C}$ atópase no punto de coordenadas (3, 0) e outra, q_B , de $-4 \mu\text{C}$ está no punto (0,5). Acha a intensidade do campo eléctrico creado por estas dúas cargas na orixe de coordenadas. (As coordenadas están en m).

Solución:

Representamos a posición das cargas e calculamos o valor do campo creado por cada unha delas na orixe de coordenadas, onde poñemos unha carga positiva:



$$\vec{E} = k \cdot \frac{q}{r^2} \cdot \vec{u}_r$$

$$\vec{E}_A = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{2 \cdot 10^{-6}}{3^2} \cdot (-\vec{i}) = -\frac{9 \cdot 2}{9} \cdot 10^3 \vec{i} = -2 \cdot 10^3 \vec{i} \text{ N/C}$$

$$\vec{E}_B = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{4 \cdot 10^{-6}}{5^2} \cdot \vec{j} = \frac{9 \cdot 4}{25} \cdot 10^3 \vec{j} = 1,44 \cdot 10^3 \vec{j} \text{ N/C}$$

O campo eléctrico total será: $\vec{E} = \vec{E}_A + \vec{E}_B = -2 \cdot 10^3 \vec{i} + 1,44 \cdot 10^3 \vec{j} \text{ N/C}$

Poderías resolver o exercicio calculando os módulos da cada vector e logo o módulo da resultante mediante o teorema de Pitágoras. A representación gráfica é imprescindible para resolver estes exercicios.

3.2. Enerxía potencial eléctrica

Imaxinemos unha carga testemuña “q”, situada a unha distancia r_0 doutra carga fixa “q” e que se afasta desta ata un punto “r” moi próximo, de maneira que poidamos considerar constante o valor do campo eléctrico creado pola carga “q”. Neste movemento, a forza que o campo exerce sobre a carga testemuña realiza un traballo:

$$W = F(r - r_0)$$

Acabamos de ver que a intensidade de campo $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q'} \Rightarrow \vec{F} = q' \cdot \vec{E}$. Substituíndo este valor da forza na expresión do traballo: $W = q' \cdot E (r - r_0)$

Este traballo invértese en aumentar ou diminuír a enerxía potencial da carga testemuña, segundo que as dúas cargas sexan ou non do mesmo signo: $W = E_p - E_{p_0}$

Igualando as dúas expresións: $E_p - E_{p_0} = q' \cdot E (r - r_0) = q' \cdot E \cdot r - q' \cdot E \cdot r_0$

Desta expresión deducimos que a **enerxía potencial** que ten a carga “q” nun punto do campo eléctrico creado pola carga “q” é:

$$E_p = q' \cdot E \cdot r = q' \cdot k \frac{q}{r^2} \cdot r \Rightarrow E_p = k \frac{q \cdot q'}{r}$$

4. POTENCIAL ELÉCTRICO. DIFERENZA DE POTENCIAL

O **potencial eléctrico nun punto** dun campo eléctrico é unha magnitude escalar que se define como **a enerxía potencial por unidade de carga positiva situada nese punto**.

$$V = \frac{E_p}{q'}$$

A unidade de potencial eléctrico no SI é o voltio que é o potencial que ten que existir nun punto dun campo eléctrico para que unha carga dun culombio situada nese punto teña a enerxía dun xulio.

Se na expresión que define o potencial, substituímos o valor da enerxía potencial que obtivemos no apartado anterior, obtemos que o potencial creado por unha carga puntual, Q , a unha distancia r dela, vén dado por:

$$V = \frac{E_p}{q'} = k \frac{q \cdot q'}{r \cdot q'} \Rightarrow V = k \cdot \frac{q}{r}$$

Como podemos observar, o valor do potencial nun punto do campo eléctrico creado por unha carga puntual, depende do valor da carga e é inversamente proporcional á distancia existente entre o punto e a carga, do que se deduce que o potencial vai diminuindo a medida que aumenta a distancia á carga e por esta razón adoita tomarse a orixe de potencial (potencial cero) no infinito que é onde unicamente chegaría a ser nulo.

Segundo o que acabamos de ver, todos os puntos que se atopen a mesma distancia da carga terán o mesmo potencial. As superficies en que todos os puntos das mesmas se atopan ao mesmo potencial denomínanse **superficies equipotenciais**. Por todo o anterior, no caso dunha carga puntual, as superficies equipotenciais son esferas concéntricas con centro na carga.

Vimos ao principio deste apartado que ao mover unha carga dentro dun campo eléctrico se realiza un traballo, o valor do cal é igual á variación de enerxía potencial da carga. Supoñamos que unha carga " q " se atopa nun punto " A " onde hai un potencial eléctrico " V_A " e desprazámola ata outro punto " B " de potencial " V_B ". O traballo que haberá que realizar será: $W_{AB} = E_{PA} - E_{PB} = q \cdot V_A - q \cdot V_B = q(V_A - V_B)$

Desta expresión dedúcese inmediatamente que o traballo necesario para desprazar unha carga entre dous puntos dunha superficie equipotencial é nulo, xa que $V_A = V_B$ polo que $V_A - V_B = 0$ e, polo tanto, $W_{AB} = 0$

Unha unidade de enerxía utilizada frecuentemente é o electronvoltio (eV) que é equivalente ao traballo que se realiza para mover a carga dun electrón entre dous puntos nos que a diferenza de potencial entre eles é dun voltio. O seu valor en xulios será: $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 1 \text{ V} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

Exemplo

Unha carga de $2\ \mu\text{C}$ atópase na orixe de coordenadas. Achar: a) O potencial nos puntos A e B de coordenadas (3,0) e (0,2) respectivamente. b) O traballo necesario para levar unha carga de $0,5\ \mu\text{C}$ dende o punto A ata o punto B. (As coordenadas están en m)

Solución:

O potencial no punto A será: $V_A = k \cdot q / r_A = 9 \cdot 10^9 \cdot 2 \cdot 10^{-6} / 3 = 6\ 000\ \text{V}$

No punto B: $V_B = k \cdot q / r_B = 9 \cdot 10^9 \cdot 2 \cdot 10^{-6} / 2 = 9\ 000\ \text{V}$

O traballo realizado para levar a carga de A a B será:

$$W_{AB} = q'(V_A - V_B) = 0,5 \cdot 10^{-6} (6\ 000 - 9\ 000) = -1,5 \cdot 10^{-3}\ \text{J}$$

Que o traballo sexa negativo significa que non é un proceso espontáneo, é dicir, para mover a carga teríamos que facer un traballo contra o campo. Se o traballo fose positivo, non teríamos que facer traballo: a acción do campo desprazaría a carga espontaneamente.