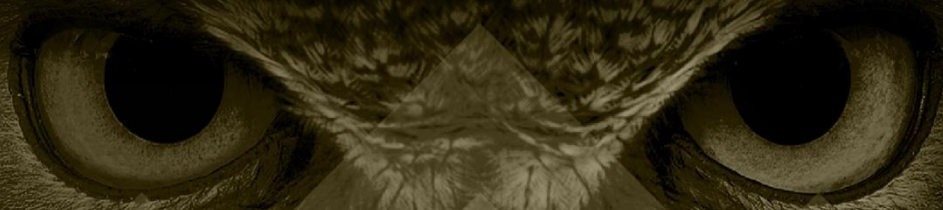


***CURSO INTENSIVO 2022***



**Física**

**ITA - 2022**

**Potencial elétrico e energia potencial  
eletrostática**

**Prof. Toni Burgatto**



# Sumário

<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>4</b>
<b>1. UMA BREVE REVISÃO DA MECÂNICA</b>	<b>5</b>
1.1. Trabalho de uma força	5
1.2. Trabalho da força peso	5
1.3. Trabalho da força elástica	7
1.4 Energia	8
1.4.1. Energia potencial gravitacional	8
1.4.2. Energia potencial elástica ( <i>Eelas</i> )	9
1.4.3. Energia cinética	9
1.4.4. Teorema da energia cinética	9
1.4.5. Cálculo da energia mecânica	10
1.4.6. Sistema mecânico conservativo	10
1.4.7. Sistemas mecânicos não-conservativos	11
1.5. Quantidade de movimento	12
1.5.1. Sistema isolado	13
<b>2. POTENCIAL ELÉTRICO</b>	<b>13</b>
2.1. O Trabalho no campo elétrico uniforme	13
2.2. A energia potencial no campo eletrostático	15
2.3. O Potencial elétrico	15
2.4. Determinação do trabalho em função da diferença de potencial (DDP)	16
2.5. Determinação do potencial elétrico caso geral	17
2.6. Cálculo do campo elétrico a partir do potencial	18
2.7. O Potencial elétrico de carga elétrica puntiforme	19
2.8. Potencial elétrico gerado por várias cargas puntiformes	20
2.9. As propriedades do potencial elétrico	22
2.10. Superfícies equipotenciais	23
2.10.1. As propriedades das superfícies equipotenciais	25
2.11. Espontaneidade e trabalho	29
<b>3. ENERGIA POTENCIAL ELETROSTÁTICA</b>	<b>30</b>
<b>4. POTENCIAL ELÉTRICO DE CONDUTOR CARREGADO E EM EQUILÍBRIO ELETROSTÁTICO</b>	<b>33</b>
4.1. Potencial de um condutor esférico	33

<b>4.2. O potencial da Terra</b>	<b>34</b>
<b>4.3. Aplicação do uso de Potenciais para Condutores em Equilíbrio Eletrostático</b>	<b>36</b>
<b>4.4. Aplicação do potencial elétrico na indução total</b>	<b>38</b>
<b>5. MÉTODO DAS IMAGENS</b>	<b>40</b>
<b>6. LISTA DE EXERCÍCIOS</b>	<b>42</b>
<b>7. GABARITO SEM COMENTÁRIOS</b>	<b>50</b>
<b>8. LISTA DE EXERCÍCIOS COMENTADA</b>	<b>51</b>
<b>9. CONSIDERAÇÕES FINAIS DA AULA</b>	<b>73</b>
<b>10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>73</b>
<b>11. VERSÃO DE AULA</b>	<b>74</b>

## Introdução

Nesta aula, faremos uma breve revisão da mecânica, quanto aos conceitos de trabalho e energia, quantidade de movimento e sua conservação. Todos esses temas serão bem abordados mais adiante nas suas respectivas aulas.

Além da revisão na mecânica, abordaremos o conceito de potencial elétrico, energia potencial elétrica e o potencial elétrico aplicado na resolução de problemas de corpos em equilíbrio eletrostático.

Caso tenha alguma dúvida entre em contato conosco através do fórum de dúvidas do Estratégia ou se preferir:



# 1. Uma breve revisão da mecânica

Antes de iniciarmos nossa aula de Potencial Elétrico, vamos fazer uma breve revisão de alguns conceitos da Mecânica que ainda não foram vistos, mas serão detalhados futuramente. O entendimento dessas definições é fundamental para melhor compreender o significado de potencial elétrico.

## 1.1. Trabalho de uma força

Define-se trabalho de uma força ao longo de um deslocamento  $\vec{d}$  como sendo o produto escalar de  $\vec{F}$  com  $\vec{d}$ , ou matematicamente:

$$\tau = \vec{F} \cdot \vec{d} = F \cdot d \cdot \cos\alpha$$

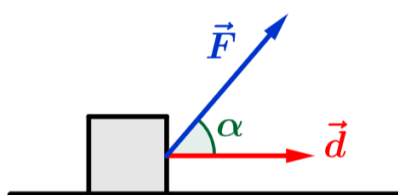


Figura 1: Definição de trabalho de uma força.

Note que o trabalho é definido a partir de um produto escalar, logo ele é uma grandeza escalar. Sua unidade no SI é o joule ( $J$ ) e existem duas possibilidades quanto ao sinal do trabalho:

- $\tau > 0$ : dizemos que é um trabalho motor.
- $\tau < 0$ : dizemos que é um trabalho resistente.

Para o caso da força variável ao longo de um deslocamento de A para B, devemos calcular o trabalho em cada elemento de deslocamento e somar todos eles no intervalo desejado. Matematicamente, temos que:

$$\tau_{A \rightarrow B} = \int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{l}$$

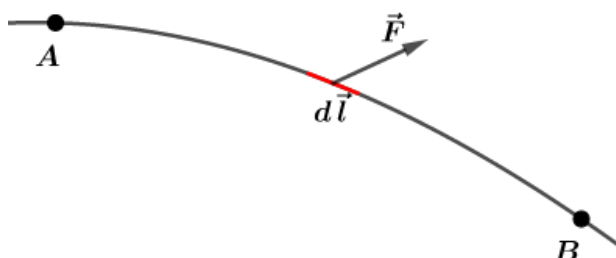


Figura 2: Definição de trabalho de uma força utilizando Cálculo.

## 1.2. Trabalho da força peso

Uma partícula indo de A para B, está sobre a influência de diversas forças inclusive da força peso, de tal forma que seu deslocamento é  $\vec{d}$ .

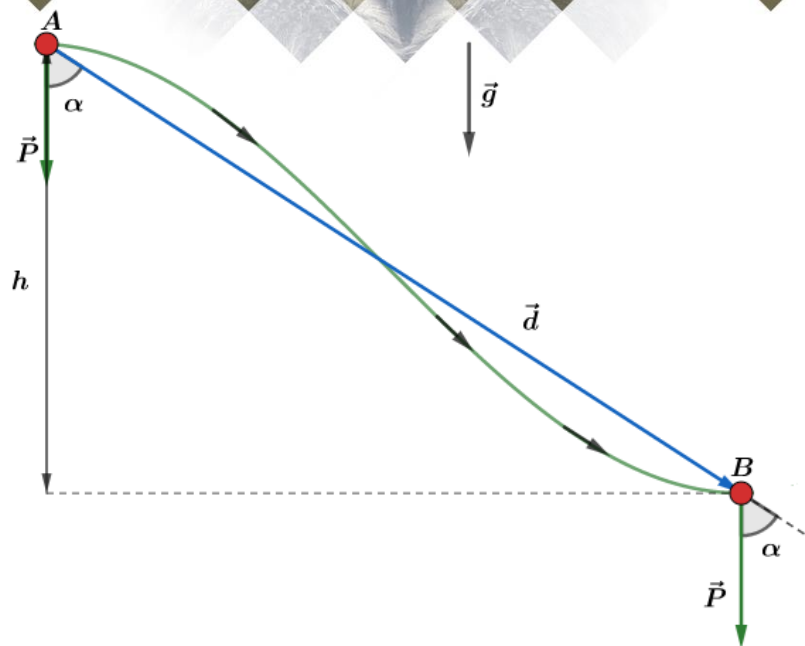


Figura 3: Corpo descendo sob ação de diversas forças, inclusive a força peso.

Considerando que a gravidade ( $\vec{g}$ ) seja constante, ou seja, a força peso não varia no intervalo estudado. Podemos calcular o trabalho da força peso como sendo:

$$(\tau_{\vec{P}})_{A \rightarrow B} = \vec{P} \cdot \vec{d} = |\vec{P}| \cdot |\vec{d}| \cdot \cos \alpha$$

Entretanto, pela geometria da figura 1, temos que:

$$|\vec{d}| \cdot \cos \alpha = h$$

Em que  $h$  é a diferença de níveis dos pontos A e B, podendo ser expresso pela diferença de níveis, isto é:

$$h = h_A - h_B$$

Com isso, reescrevemos a expressão do trabalho da força peso do nível A para o nível B da seguinte forma:

$$\boxed{(\tau_{\vec{P}})_{A \rightarrow B} = P \cdot h = m \cdot g \cdot h}$$

Se quiséssemos levar a carga de B para A, o trabalho da força peso seria dado por:

$$(\tau'_{\vec{P}})_{A \rightarrow B} = P \cdot d \cdot \cos(180^\circ - \alpha) = -P \cdot d \cdot \cos \alpha$$

Ou ainda:

$$\boxed{(\tau'_{\vec{P}})_{A \rightarrow B} = -m \cdot g \cdot h}$$

Notamos então que:



O trabalho da força peso é **positivo** na **descida** e **negativo** na **subida**.

Dizemos que uma força é conservativa quando o trabalho por ela realizado ao longo de um percurso fechado é nulo. Ou ainda, o trabalho de uma força conservativa não depende da trajetória.

Podemos ver o caráter conservativo da força peso analisando o seguinte caso:

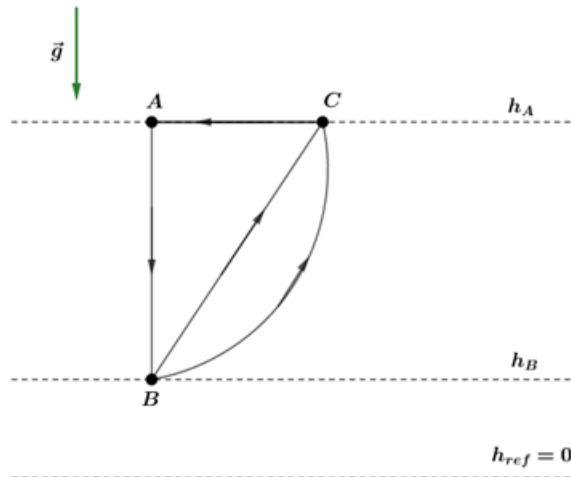


Figura 4: Trabalho da força peso.

Calculando o trabalho da força peso no percurso fechado ABCA, temos que:

$$\tau_{\vec{p}} = (\tau_{\vec{p}})_{A \rightarrow B} + (\tau_{\vec{p}})_{B \rightarrow C} + (\tau_{\vec{p}})_{C \rightarrow A}$$

$$\tau_{\vec{p}} = m \cdot g \cdot (h_A - h_B) + m \cdot g \cdot (h_B - h_A) + m \cdot g \cdot (h_A - h_A) = 0$$

Se tivéssemos tomado outro caminho o resultado seria o mesmo, evidenciando o caráter conservativo da força peso.

Dessa forma, como a força peso é uma **força conservativa**, podemos associar a cada ponto do campo gravitacional (no nosso caso campo gravitacional terrestre) uma grandeza escalar auxiliar chamada potencial gravitacional ( $V_g$ ), de tal forma que quando  $\vec{g}$  for uniforme, temos:

$$V_g = g \cdot h$$

A unidade de  $V_g$  é o  $J/kg$ . Sendo assim, podemos reescrever o trabalho da força peso em função dos potenciais:

$$(\tau_{\vec{p}})_{A \rightarrow B} = m \cdot (g \cdot h_A - g \cdot h_B) \Rightarrow (\tau_{\vec{p}})_{A \rightarrow B} = m(V_A - V_B)$$

Convenciona-se que o potencial gravitacional no infinito é nulo, isto é,  $(V_g)_{\infty} = 0$ .

### 1.3. Trabalho da força elástica

Como vimos na aula 04, a força elástica é dada pela Lei de Hooke:

$$F = k \cdot x$$

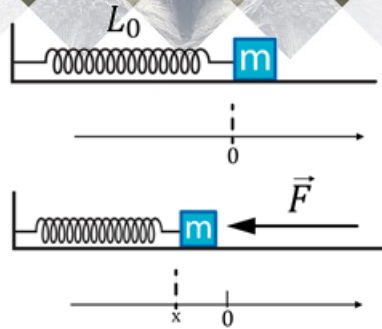


Figura 5: Exemplo de aplicação da lei de Hooke em uma mola sendo comprimida

Quando fazemos o gráfico da força elástica em função da deformação, temos:

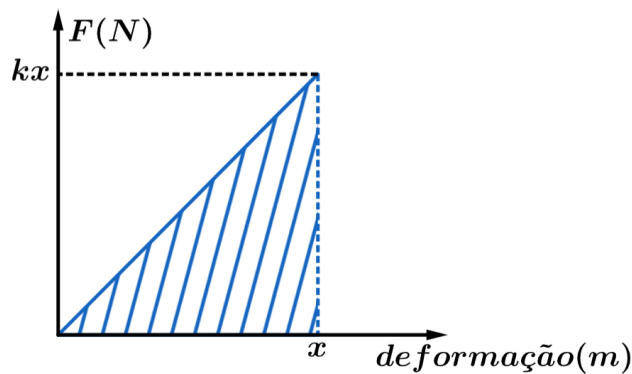


Figura 6: Gráfico da força em função da deformação.

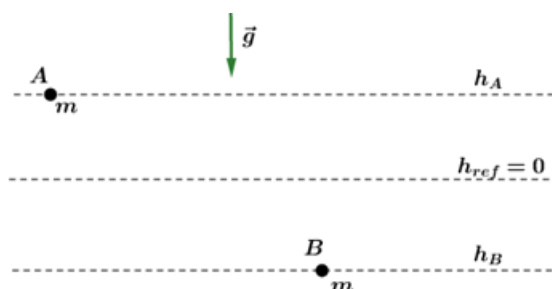
$$\left| \tau_{\vec{F}_{elast}} \right| \stackrel{N}{=} \text{área} \Rightarrow \tau_{\vec{F}_{elast}} = \pm \frac{kx^2}{2}$$

## 1.4 Energia

Energia é a capacidade que um corpo tem de realizar trabalho. Vamos relembrar as diversas formas como a energia é manifesta na natureza: energia luminosa, energia química, energia elétrica, energia eólica, energia térmica, energia acústica, energia nuclear e energia mecânica. Nesse momento, vamos relembrar os conceitos de energia mecânica.

### 1.4.1. Energia potencial gravitacional

É a energia potencial associada a um campo gravitacional. Ela depende da intensidade do peso de um corpo no local onde se encontra, já que o campo gravitacional é função da posição do corpo e da altura do corpo em relação a um plano de referência.





O trabalho da força peso de A para B pode ser dado por:

$$(\tau_{\vec{P}})_{A \rightarrow B} = (-\Delta E_{\vec{P}})_{A \rightarrow B}$$

Este conceito é válido para forças conservativas: o trabalho da força é igual a menos a variação da energia potencial.

### 1.4.2. Energia potencial elástica ( $E_{elas}$ )

É a energia que é armazenada em sistemas elásticos deformados, por exemplo, uma mola comprimida. Podemos calcular a energia elástica pela expressão:

$$E_{elas} = \frac{k(\Delta x)^2}{2}$$

### 1.4.3. Energia cinética

É a energia associada ao estado de movimento de um corpo. Se um objeto de massa  $m$  possui uma velocidade  $v$  ( $v$  muito menor que a velocidade da luz), a energia cinética desse corpo é dada por:

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2$$

Observação: trata-se de uma grandeza escalar relativa, já que a velocidade de um corpo depende do referencial adotado. Dessa forma, uma partícula pode ter energia cinética nula em um referencial e não-nula em outro. Para não confundir, sempre buscaremos referenciais inerciais para a resolução dos nossos problemas.

### 1.4.4. Teorema da energia cinética

Considere um corpo sofrendo a ação de diversas forças durante seu deslocamento:

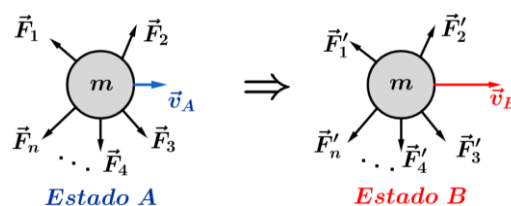


Figura 7: Corpo sofrendo a ação de diversas forças em dois momentos diferentes.

A força resultante no corpo é dada pela soma vetorial das forças e pela 2ª Lei de Newton podemos calcular o módulo da força e, utilizando a definição do trabalho de uma força qualquer, chegamos ao teorema da energia cinética:

$$(\tau_{\vec{F}_R})_{A \rightarrow B} = \Delta(E_c)_{A \rightarrow B}$$

Este resultado mostra o trabalho da força resultante é igual à variação da energia cinética por ela produzida. Podemos ainda reescrever o teorema e enxergar da seguinte forma:

$$(\tau_{\vec{F}_R})_{A \rightarrow B} = \Delta(E_c)_{A \rightarrow B} \Rightarrow (\tau_{\vec{F}_R})_{A \rightarrow B} = (E_c)_B - (E_c)_A$$

$$(E_c)_B = (E_c)_A + (\tau_{\vec{F}_R})_{A \rightarrow B}$$

A energia cinética de um corpo no estado B é igual a energia cinética do estado A mais o trabalho realizado pela força resultante para ir de A até B.

### 1.4.5. Cálculo da energia mecânica

A energia mecânica de um corpo é dada pela soma da energia cinética à energia potencial:

$$E_{Mec} = E_c + E_p$$

A energia potencial ( $E_p$ ) pode ser a elástica ( $E_{\vec{F}_{elas}}$ ), a gravitacional ( $E_{\vec{F}_g}$ ) ou as duas, dependendo do sistema mecânica que estamos estudando. Exemplo:

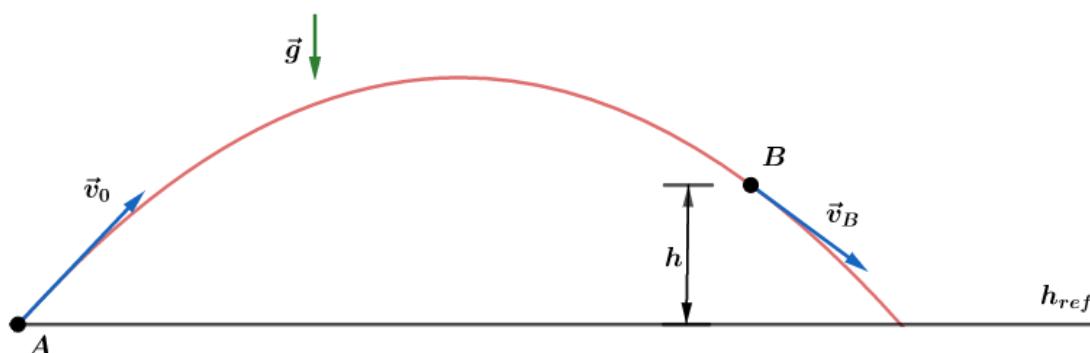


Figura 8: Lançamento oblíquo de um corpo.

Desprezando a resistência do ar, podemos escrever a energia mecânica em cada momento:

$$(E_M)_A = (E_c)_A + (E_p)_A \Rightarrow (E_M)_A = \frac{1}{2} m \cdot v_0^2 + 0 \Rightarrow (E_M)_A = \frac{1}{2} m \cdot v_0^2$$

Em B existe energia potencial gravitacional, além da energia cinética:

$$(E_M)_B = (E_c)_B + (E_p)_B \Rightarrow (E_M)_B = \frac{1}{2} m \cdot v_B^2 + m \cdot g \cdot h$$

### 1.4.6. Sistema mecânico conservativo

Dizemos que um **sistema mecânico** é **conservativo** quando todos os trabalhos são realizados exclusivamente por **forças conservativas**.

As forças conservativas são assim chamadas, pois os trabalhos realizados contra elas são armazenados ("conservados") como energia potencial. São **conservativas** as forças elásticas, as forças gravitacionais e as **forças elétricas**.

Um dos grandes princípios da Mecânica Clássica é o da conservação da energia mecânica, que diz:

Em um sistema mecânico conservativo, a energia mecânica se conserva.

Matematicamente, em um sistema conservativo, temos que:

$$E_{\text{Mecânica}} = E_{\text{cinética}} + E_{\text{potencial}} = \text{constante}$$

Ou ainda:

$$\text{sistema conservativo} \Rightarrow \Delta E_{\text{Mecânica}} = 0$$

Por exemplo, um corpo caindo em queda livre próximo a superfície da Terra. Como temos um sistema conservativo nesse exemplo, a energia mecânica total do sistema deve permanecer constante. Inicialmente, quando objeto está na sua altura máxima (adotando o solo como referencial de energia potencial nula), apenas existe a energia potencial gravitacional.

Quando o objeto é solto, ele começa a perder energia potencial gravitacional e ganha energia cinética, isto é, vai perdendo altura e ganhando velocidade. Até que o corpo atinge o solo e nesse momento possui energia cinética máxima e energia potencial gravitacional mínima. Graficamente, temos que:

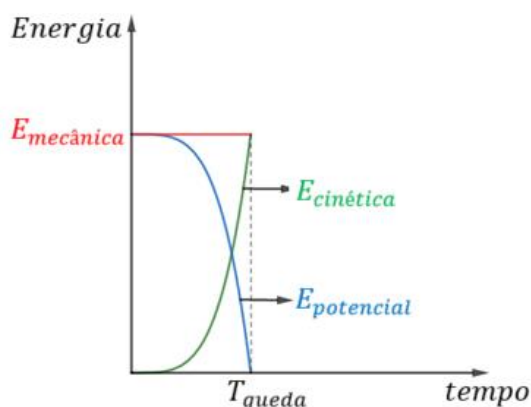


Figura 9: Gráfico da energia mecânica em um sistema mecânico conservativo.

Este princípio de conservação vai além de sistemas mecânicos. O Princípio da Conservação da Energia propõe que:

A energia em um sistema não se perde e não se cria, ela apenas se transforma nas suas mais variadas modalidades. Sempre que uma certa forma de energia aumenta, outra forma de energia diminui em mesma quantidade, de forma que a energia total do sistema seja a mesma.

### 1.4.7. Sistemas mecânicos não-conservativos

Forças não-conservativas são aquelas nas quais o trabalho depende da trajetória, isto é, não é função exclusiva das posições inicial e final do corpo. Um exemplo de força não conservativa é o atrito.

O atrito pode aparecer em um escorregamento de um corpo, na resistência viscosa de um fluido. Em todos estes casos, as forças de atrito são não-conservativas e contribuem para a dissipação da energia mecânica, que converte em maior parte em energia térmica.

Isso é justificado pelo fato de o trabalho das forças não-conservativas contribuírem com a energia cinética, mas não sendo capaz de compensar o armazenamento na energia potencial, já que essas forças não têm energia potencial associada.

Este fato pode ser traduzido matematicamente pelo teorema das forças não-conservativas. Para sistemas não-conservativos, temos que:

$$\tau_{fnc} = E_{M_{final}} - E_{M_{inicial}}$$

Lembrando que tratando-se de forças não conservativas, devemos notar se o trabalho é motor ( $\tau > 0$ ) ou é resistente ( $\tau < 0$ ).

## 1.5. Quantidade de movimento

Por definição, a quantidade de movimento de um corpo num instante com velocidade  $\vec{v}$ , é dada por:

$$\vec{Q} = m \cdot \vec{v}$$

Sua unidade de medida é:

$$u(Q) = u(m) \cdot u(v) \Rightarrow u(Q) = kg \cdot \frac{m}{s}$$

Observações:

- 1) Trata-se de uma grandeza instantânea, pois a definição envolve a velocidade vetorial instantânea do corpo.
- 2) Como a massa é um escalar positivo,  $\vec{Q}$  e  $\vec{v}$  possuem a mesma direção e sentido, orientando-se no sentido do movimento.

Se derivarmos a quantidade de movimento do centro de massa em relação ao tempo, chegaremos a um resultado interessante:

$$\left( \frac{d(\vec{Q})}{dt} \right)_{cm} = \frac{dm}{dt} \cdot \vec{v} + m \cdot \frac{d\vec{v}}{dt}$$

Se a massa do corpo é constante,  $\frac{dm}{dt} = 0$  e como  $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$ , então:

$$\left( \frac{d(\vec{Q})}{dt} \right)_{cm} = m \cdot \vec{a} \Rightarrow \left( \frac{d(\vec{Q})}{dt} \right)_{cm} = \vec{F}_{res}$$

Se  $\vec{F}_{res} = \vec{0}$ , então  $\vec{Q}_{cm}$  é constante.

### 1.5.1. Sistema isolado

Um sistema mecânico é dito isolado quando a resultante das forças externas que agem nele é nula. Em tais sistemas, apenas agem forças internas.

Agora podemos enunciar um dos principais Princípios de Conservação da Mecânica Clássica: O Princípio da conservação da quantidade de movimento garante que em um mecânico isolado, a quantidade de movimento total é conservada:

$$\Delta \vec{Q} = \vec{0} \text{ ou } \vec{Q}_{final} = \vec{Q}_{inicial}$$

## 2. Potencial elétrico

Já vimos os conceitos de força elétrica e campo elétrico, definições de grandezas vetoriais. Neste momento, vamos introduzir o conceito de potencial elétrico, semelhante ao que foi feito na nossa revisão da mecânica. Tudo para que fique o mais claro possível o conceito de potencial elétrico. Para isso, vamos estudar o trabalho da força elétrica no campo elétrico uniforme.

### 2.1. O Trabalho no campo elétrico uniforme

Seja  $E$  a intensidade de um campo elétrico uniforme. Inicialmente, vamos tomar dois pontos quaisquer  $A$  e  $B$ , numa mesma linha de força, separados pela distância  $d$ .

Devido ao fato de a força ser constante, já que o campo elétrico é uniforme ( $E = cte$ ), o trabalho da força elétrica  $\vec{F}_{ele}$  nesse deslocamento é dado por:

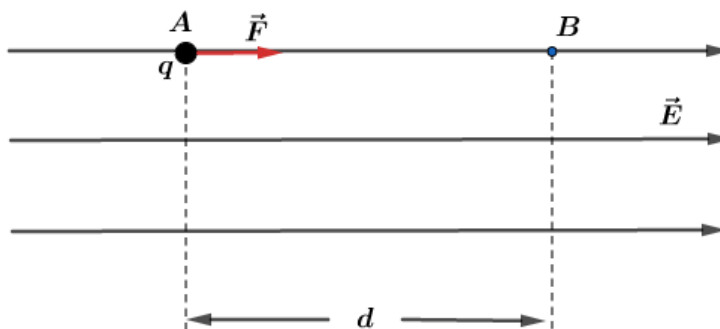


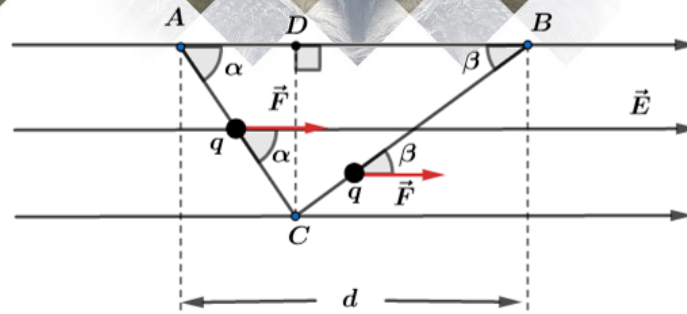
Figura 10: Carga se locomovendo ao longo de um campo elétrico uniforme.

$$\left( \tau_{\vec{F}_{ele}} \right)_{A \rightarrow B} = F \cdot d$$

Mas, como  $F = q \cdot E$ , temos:

$$\left( \tau_{\vec{F}_{ele}} \right)_{A \rightarrow B} = q \cdot E \cdot d$$

Agora, vamos tomar um terceiro ponto  $C$ , que pertence a outra linha de força, como mostra a figura abaixo:



Quando a carga  $q$  desloca-se de  $A$  para  $C$  e, depois, de  $C$  para  $B$ , temos os seguintes trabalhos em cada trecho:

$$\left(\tau_{\vec{F}_{ele}}\right)_{A \rightarrow C} = F \cdot \overline{AC} \cdot \cos(\alpha) \quad \text{e} \quad \left(\tau_{\vec{F}_{ele}}\right)_{C \rightarrow B} = F \cdot \overline{CB} \cdot \cos(\beta)$$

O trabalho total no deslocamento  $ACB$  é a soma dos trabalhos:

$$\begin{aligned} \left(\tau_{\vec{F}_{ele}}\right)_{A \rightarrow C \rightarrow B} &= \left(\tau_{\vec{F}_{ele}}\right)_{A \rightarrow C} + \left(\tau_{\vec{F}_{ele}}\right)_{C \rightarrow B} \\ \left(\tau_{\vec{F}_{ele}}\right)_{A \rightarrow C \rightarrow B} &= F \cdot \overline{AC} \cdot \cos(\alpha) + F \cdot \overline{CB} \cdot \cos(\beta) = F(\overline{AC} \cdot \cos(\alpha) + \overline{CB} \cdot \cos(\beta)) \end{aligned}$$

Pela geometria do problema, vemos que:

$$\overline{AC} \cos(\alpha) = \overline{AD} \quad \text{e} \quad \overline{CB} \cos(\beta) = \overline{DB} \Rightarrow \overline{AD} + \overline{DB} = \overline{AB}$$

Portanto:

$$\overline{AC} \cdot \cos(\alpha) + \overline{CB} \cdot \cos(\beta) = \overline{AB} = d \therefore \boxed{\left(\tau_{\vec{F}_{ele}}\right)_{A \rightarrow C \rightarrow B} = F \cdot d}$$

Dessa forma, o trabalho da força elétrica tomando o deslocamento  $ACB$  é o mesmo que o trabalho no deslocamento  $AB$ .

$$\boxed{\left(\tau_{\vec{F}_{ele}}\right)_{A \rightarrow C \rightarrow B} = F \cdot d = \left(\tau_{\vec{F}_{ele}}\right)_{A \rightarrow B}}$$

Este resultado pode ser generalizado, pois para qualquer trajetória que tomássemos entre  $A$  e  $B$ , o trabalho da força elétrica seria dado por:

$$\left(\tau_{\vec{F}_{ele}}\right)_{A \rightarrow B} = F \cdot d = q \cdot E \cdot d$$

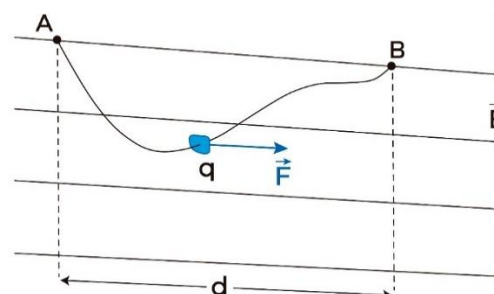


Figura 11: Carga elétrica se movendo em uma região onde o campo elétrico é uniforme.



Desse resultado, concluímos que o trabalho da força elétrica independe da trajetória, apenas da carga elétrica e da posição dos pontos  $A$  e  $B$  na região do campo elétrico. Ainda que mostremos esse fato para uma situação particular (trabalho realizado no campo elétrico uniforme), podemos generalizar esse resultado da seguinte forma:

.....  
O trabalho realizado por uma força elétrica para ir de  $A$  até  $B$  não depende da trajetória.  
.....

Como vimos, forças conservativas possuem como propriedade o fato do trabalho por ela realizado não depender da trajetória. Por isso, dizemos que a força elétrica é uma força conservativa.

Se o campo não for eletrostático, ele não será conservativo, mas isso é um assunto que foge do nosso escopo de curso. Sempre consideraremos campos eletrostáticos, aqueles gerados por cargas elétricas em repouso.

## 2.2. A energia potencial no campo eletrostático

Sempre que trabalhamos com campo de força conservativo, associamos os conceitos de energia potencial e de potencial. Aplicamos essa ideia na mecânica, quando estudamos a formulação da energia potencial associada ao campo gravitacional, já que se trata de um campo de forças conservativo.

Analogamente, faremos um tratamento semelhante, pois o campo eletrostático também é conservativo. Para isso, considere uma carga elétrica positiva puntiforme solta com velocidade nula num ponto  $A$  em uma região que existe um campo eletrostático qualquer.

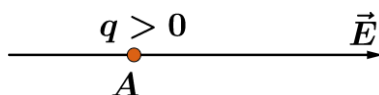


Figura 12: Carga elétrica positiva com velocidade nula em uma região do campo elétrico  $\vec{E}$ .

Nessas condições, a força elétrica tende a deslocar a carga na própria orientação do campo, promovendo um trabalho positivo. Dessa forma, a partícula ganha energia cinética. Diante disso, podemos dizer que a partícula possuía uma certa energia que se transformou em energia cinética. Essa outra forma de energia chamamos de energia potencial elétrica.

Assim como na mecânica, quando fomos definir a energia potencial, foi necessário atribuir um referencial para que pudéssemos determinar a energia potencial. Na elétrica não é diferente.

Define-se energia potencial de uma carga elétrica puntiforme  $q$ , em um dado ponto  $A$ , como o trabalho que a força elétrica realiza quando é levada do ponto  $A$  até o ponto de referência  $R$ . Em outras palavras:

$$(E_{pot})_A = \tau_{A \rightarrow R}$$

## 2.3. O Potencial elétrico

Definimos potencial elétrico associado ao ponto  $A$ , denotado por  $V_A$ , a razão entre a energia potencial elétrica da carga em  $A$  ( $(E_{pot})_A$ ) e o valor da carga ( $q$ ), ou seja:

$$V_A = \frac{(E_{pot})_A}{q}$$

Observações:

- 1) Essa razão já é bem determinada em cada ponto do campo elétrico e independe do valor de  $q$ , isto é, independe da carga que abandonamos no campo eletrostático apenas para estudarmos o problema. Nesse momento, parece um pouco contraditório, já que estamos vendo a carga  $q$  no denominador de  $V_A$ . Este fato ficará mais claro logo a frente.
- 2) Definimos o potencial elétrico em  $A$  como o quociente de duas grandezas escalares, notoriamente, o potencial também será um **escalar**.
- 3) Sua unidade no SI é o volt, indicado pela letra  $V$ .

Assim, temos que:

$$\frac{1 J}{1 C} = 1 J/C = 1 V$$

A unidade volt é dada em homenagem ao físico italiano Alessandro Volta (1745-1827).

## 2.4. Determinação do trabalho em função da diferença de potencial (DDP)

Dada uma carga elétrica  $q$  que se desloca de  $A$  para  $B$ , em uma região onde existe um campo elétrico qualquer. Como o campo é conservativo, vimos anteriormente que o trabalho não depende da trajetória. Dessa forma, podemos escrever que:

$$\tau_{A \rightarrow B} = \tau_{A \rightarrow R} + \tau_{R \rightarrow B}$$

Da mesma maneira que vimos na mecânica, quando o campo é conservativo, podemos escrever que:

$$\tau_{R \rightarrow B} = -\tau_{B \rightarrow R}$$

Assim, reescrevemos nossa equação do trabalho de  $A$  até  $B$ .

$$\tau_{A \rightarrow B} = \tau_{A \rightarrow R} - \tau_{B \rightarrow R}$$

Por outro lado, a definição de energia potencial nos permite escrever que:

$$\tau_{A \rightarrow R} = (E_{pot})_A \text{ e } \tau_{B \rightarrow R} = (E_{pot})_B$$

Portanto, o trabalho da força elétrica para a carga ir de  $A$  até  $B$  é dado pela diferença das energias potenciais de cada ponto:

$$\tau_{A \rightarrow B} = (E_{pot})_A - (E_{pot})_B$$

Em outras palavras, o trabalho ( $\tau_{A \rightarrow B}$ ) é a diferença da energia potencial inicial e a energia potencial final.

Agora, podemos usar a definição de potencial elétrico de um ponto e escrever o trabalho em função da diferença de potenciais:

$$V_A = \frac{(E_{pot})_A}{q} \Rightarrow (E_{pot})_A = q \cdot V_A \text{ e } V_B = \frac{(E_{pot})_B}{q} \Rightarrow (E_{pot})_B = q \cdot V_B$$

Sendo assim, chegamos que:

$$\tau_{A \rightarrow B} = q \cdot V_A - q \cdot V_B \Rightarrow \boxed{\tau_{A \rightarrow B} = q \cdot (V_A - V_B)}$$

Diante desse resultado, concluímos que o trabalho é igual ao produto da carga elétrica deslocada pela diferença de potencial (d.d.p.)  $V_A - V_B$  entre os pontos inicial e final. Note que novamente o trabalho independe da trajetória realizada pela carga e não depende da existência de outras forças que podem ou não agirem sobre a partícula.

Para o caso de um **campo elétrico uniforme**, vimos anteriormente no item 2.1 desse capítulo que o trabalho era calculado da seguinte forma:

$$\tau_{A \rightarrow B} = q \cdot E \cdot d$$

Onde  $d$  é a distância de  $A$  até  $B$ , em uma mesma linha de força. Portanto, chegamos a seguinte relação entre o **campo elétrico uniforme** e os **potenciais**:

$$q \cdot E \cdot d = q \cdot (V_A - V_B) \Rightarrow \boxed{E \cdot d = V_A - V_B}$$

Com base nessa última expressão, temos a unidade oficial de campo elétrico justificada no SI como sendo:

$$E = \frac{(V_A - V_B)}{d}$$

Se tomarmos  $d = 1 \text{ m}$  e  $V_A - V_B = 1 \text{ V}$ , concluímos que:  $\boxed{E = 1 \text{ V/m}}$ . A partir de agora usaremos  $\text{V/m}$  como unidade do campo elétrico.

## 2.5. Determinação do potencial elétrico caso geral

Como vimos, o potencial elétrico em um ponto  $A$  é dado por:

$$V_A = \frac{(E_{pot})_A}{q}$$

Mas,  $(E_{pot})_A = \tau_{A \rightarrow R} = -\tau_{R \rightarrow A}$ , logo:

$$V_A = \frac{-\tau_{R \rightarrow A}}{q}$$

Sendo assim, precisamos definir um referencial que irá facilitar nossa vida no cálculo do potencial. Adota-se como ponto de referência o infinito e dizemos que o potencial no infinito é nulo:  $\boxed{V_{\infty} = 0}$ .

Além disso, o trabalho realizado pela força elétrica pode ser dado pela definição de trabalho de uma força, trazendo a carga do infinito (nosso referencial) até o ponto  $A$ :

$$\tau_{\infty \rightarrow A} = \int_{\infty}^A q \cdot \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

Portanto, o potencial é dado por:

$$V_A = - \frac{\left( \int_{\infty}^A q \cdot \vec{E} \cdot d\vec{l} \right)}{q} \Rightarrow \boxed{V_A = - \int_{\infty}^A \vec{E} \cdot d\vec{l}}$$

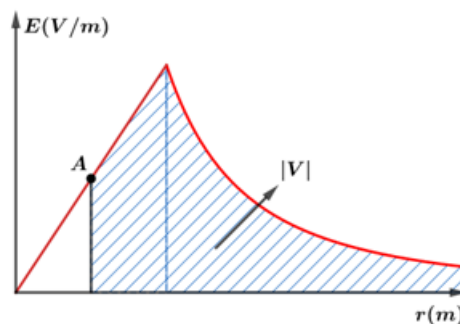


Figura 13: Gráfico auxiliar do campo elétrico em função da distância para o cálculo do potencial.

## 2.6. Cálculo do campo elétrico a partir do potencial

Se conhecemos o potencial, podemos utilizá-lo para determinar o campo elétrico. Para isso, vamos considerar um pequeno deslocamento  $d\vec{l}$  em um campo elétrico qualquer  $\vec{E}$ . Dado que:

$$V_A = - \int_{\infty}^A \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

A variação do potencial nesse deslocamento pode ser expressa como:

$$dV = -\vec{E} \cdot d\vec{l} = E \cdot \cos\theta \cdot dl = E_t \cdot dl$$

Se tomarmos  $E_t = E \cdot \cos\theta$  como a componente de  $\vec{E}$  na direção de  $d\vec{l}$ , teremos que:

$$dV = -E_t \cdot dl$$

Pulando as formalidades matemáticas, o campo pode expresso por:

$$\boxed{E_t = - \frac{dV}{dl}}$$

Observe que:

$$dV = -\vec{E} \cdot d\vec{l}$$

Se o deslocamento  $d\vec{l}$  for perpendicular ao campo  $\vec{E}$ ,  $dV$  é nulo. Assim, o maior aumento em  $V$  só ocorrerá quando  $d\vec{l}$  estiver na mesma direção de  $\vec{E}$ . Dessa forma, as linhas do campo elétrico são orientadas na direção da maior taxa de decréscimo da função potencial.

De forma análoga, para distribuições de cargas com simetria esférica, como por exemplo uma carga puntiforme, o potencial é função apenas da distância radial  $r$ . Deslocamentos perpendiculares à direção radial não provocam qualquer variação em  $V(r)$ , já que o campo elétrico é radial.

Para um dado deslocamento radial  $d\vec{r} = d\vec{l} = dr \cdot \hat{r}$ . Dessa maneira, temos que:

$$dV(r) = -\vec{E} \cdot d\vec{l} = -\vec{E} \cdot dr \cdot \hat{r} = -E_t \cdot dr \therefore \boxed{E_t = -\frac{dV(r)}{dr}}$$

Geralmente, calcular o potencial é sempre mais fácil, já que ele é uma função escalar e o campo elétrico é uma função vetorial. Observe que para calcular o campo elétrico, é necessário conhecer o potencial não apenas em um ponto, mas conhecer  $V$  em uma região do espaço, saber como é a função  $V(x)$ .

## 2.7. O Potencial elétrico de carga elétrica puntiforme

Considere uma carga  $Q$ , fixa em um certo ponto do espaço, gerando um campo elétrico à sua volta. Seja a carga  $q$  trazida do infinito até um ponto  $P$ . Vimos que o trabalho para trazer a carga  $q$  do infinito até o ponto  $P$  pode ser calculado por:

$$\tau_{\infty \rightarrow P} = q(V_{\infty} - V_P)$$

Como  $V_{\infty} = 0$ , temos:

$$V_P = -\frac{\tau_{\infty \rightarrow P}}{q} = -\int_{\infty}^P \vec{E} \cdot d\vec{r}$$

Sabemos que o campo elétrico de uma carga puntiforme é radial e o módulo dado por:

$$E = \frac{KQ}{r^2}$$

Portanto, podemos determinar o potencial por:

$$V_P = -\int_{\infty}^P \vec{E} \cdot d\vec{r} = -\int_{\infty}^P K \cdot Q \cdot r^{-2} \cdot dr = \left[ \frac{KQ}{r} \right]_{\infty}^P = \frac{KQ}{r}$$

Isto é, o potencial elétrico de uma carga puntiforme  $Q$  em um ponto  $P$  que dista  $r$  da carga fonte é dado por:

$$\boxed{V_P(r) = \frac{KQ}{r}}$$

Observações:

- 1)  $V_P(r)$  é uma grandeza escalar.
- 2) O potencial é função de ponto, já que se trata de uma grandeza associada a cada um dos pontos da região do campo elétrico.
- 3)  $V_P(r)$  não depende de eventual carga elétrica que esteja em  $P$ .
- 4)  $V_P(r)$  depende da carga fonte  $Q$ , geradora do campo elétrico no ponto  $P$ .
- 5) O valor de  $V_P(r)$  gerado pela carga puntiforme  $Q$  possui o mesmo sinal que a carga:

$$\begin{cases} Q > 0 \Rightarrow V > 0 \\ Q < 0 \Rightarrow V < 0 \end{cases}$$

Se plotarmos o gráfico do potencial elétrico em função da distância, obteremos um arco de hipérbole equilátera:

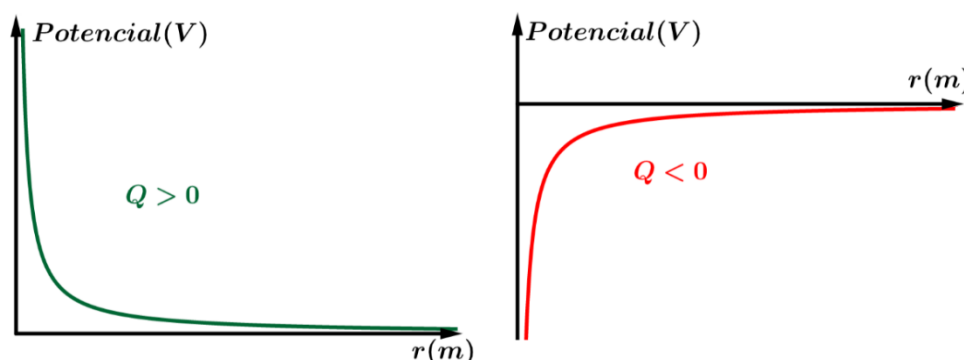


Figura 14: Gráfico do potencial elétrico gerado por uma carga puntiforme em função da distância, para os dois possíveis valores de  $Q$ .

## 2.8. Potencial elétrico gerado por várias cargas puntiformes

Sejam  $n$  cargas elétricas gerando um campo elétrico em um dado ponto  $P$  do espaço. Cada uma das cargas gera um potencial em  $P$  dado por:

$$V_1 = K \frac{Q_1}{r_1}, V_2 = K \frac{Q_2}{r_2}, \dots, V_i = K \frac{Q_i}{r_i}, \dots, V_n = K \frac{Q_n}{r_n}$$

Pelo Princípio da Superposição, temos que o potencial elétrico resultante é dado pela soma algébrica dos potenciais parciais:

$$V_{res} = V_1 + V_2 + \dots + V_n \Rightarrow V_{res} = K \frac{Q_1}{r_1} + K \frac{Q_2}{r_2} + \dots + K \frac{Q_n}{r_n}$$

$$V_{res} = K \left( \frac{Q_1}{r_1} + \frac{Q_2}{r_2} + \dots + \frac{Q_n}{r_n} \right) \text{ ou } V_{res} = K \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{r_i}$$

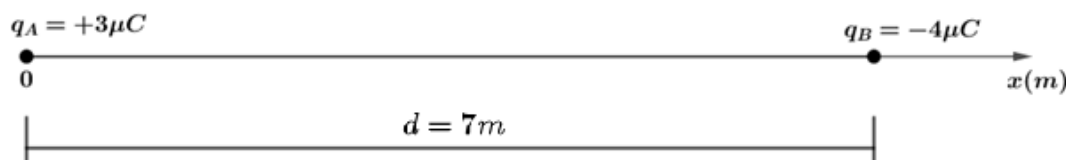


ESCLARECENDO!



1)

Considere duas cargas elétricas puntiformes fixas em  $A$  e  $B$  sobre um segmento orientado  $x$ , como na figura:



Determine as abscissas onde o potencial é nulo.

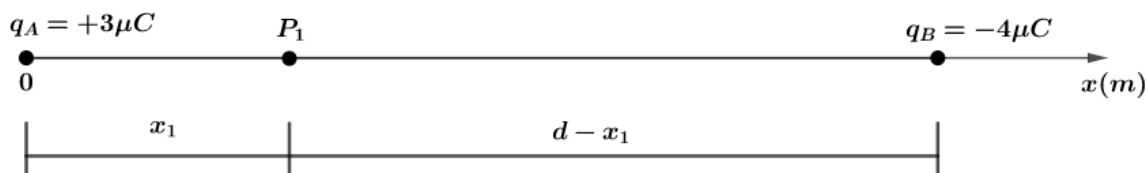
**Comentários:**

Podemos escrever os potenciais para cada carga da seguinte forma:

$$V_A = K \frac{Q_A}{r_A} \text{ e } V_B = K \frac{Q_B}{r_B}$$

$$V_A = K \cdot \frac{3\mu C}{r_A} \text{ e } V_B = K \cdot \frac{(-4\mu C)}{r_B}$$

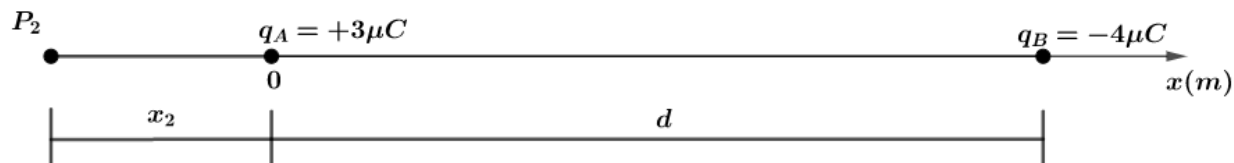
Repare que em módulo, o numerador de  $V_B > V_A$ , portanto, devem existir pontos próximos de  $Q_A$ , onde a distância  $r_A$  é menor, para que  $V_A + V_B = 0$ . Vamos supor um ponto  $P_1$  a direita de  $A$  onde o potencial é nulo, então:



Para que o potencial elétrico no ponto  $P_1$  seja nulo, temos:

$$V_{P_1} = 0 \Rightarrow K \cdot \frac{3\mu C}{x_1} + K \frac{(-4\mu C)}{d - x_1} = 0 \Rightarrow \frac{3}{x_1} = \frac{4}{d - x_1} \Rightarrow x_1 = \frac{3d}{7} = \frac{3}{7} \cdot 7 = 3m$$

Agora, vamos procurar um ponto  $P_2$  a esquerda de  $A$ , onde o potencial elétrico também é nulo:



Então, para que o potencial elétrico no ponto  $P_2$  seja nulo, devemos ter:

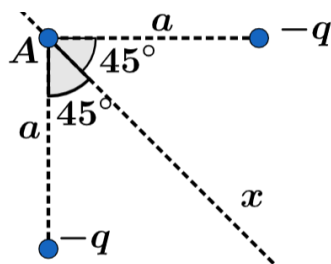
$$V_{P_2} = 0 \Rightarrow K \cdot \frac{3\mu C}{|x_2|} + K \frac{(-4\mu C)}{d + |x_2|} = 0 \Rightarrow 3d + 3|x_2| = 4|x_2| \Rightarrow |x_2| = 3d = 21m$$

Como a abscissa  $x_2$  está à esquerda da origem do segmento orientado, sabemos  $x_2 < 0$ . Portanto:

$$x_2 = -21m$$

2)

Duas cargas  $-q$  distam  $a$  do ponto  $A$ , como indicado na figura.



- a) A que distância de  $A$ , sobre a reta  $Ax$ , devemos colocar uma carga  $+q$  para que o potencial eletrostático em  $A$  seja nulo?
- b) É este o único ponto do plano da figura em que a carga  $+q$  pode ser colocada para anular o potencial em  $A$ ? Justifique a resposta.

**Comentários:**

- a) O potencial elétrico gerado pelas cargas  $-q$  em  $A$  são dados por:

$$V_1 = K \frac{(-q)}{a} \text{ e } V_2 = K \frac{(-q)}{a} \Rightarrow V_1 + V_2 = -2K \frac{q}{a}$$

Assim, devemos colocar uma carga  $+q$  a uma distância  $d$  igual a:

$$V_A = 0 \Rightarrow K \frac{q}{d} - 2K \frac{q}{a} = 0 \Rightarrow \boxed{d = \frac{a}{2}}$$

- b) Quando fomos encontrar a distância  $d$  sobre a reta  $Ax$  onde o potencial é nulo, nós não restringimos apenas para pontos na reta  $Ax$ . Apenas colocamos a carga  $+q$  a uma distância  $d$ , pois dessa forma garantimos que o potencial em  $A$  será nulo.

Dessa forma, basta que a carga  $+q$  esteja a uma distância  $d$  do ponto  $A$  que o potencial em  $A$  será nulo. Em outras palavras, qualquer ponto da circunferência, com centro em  $A$  e raio  $d = \frac{a}{2}$ , fará com que a carga  $+q$  anule o potencial elétrico em  $A$ .

Portanto, o ponto encontrado no item a) não é único. O lugar geométrico dos pontos onde podemos colocar a carga  $+q$  para zerar o potencial em  $A$  é uma circunferência centrada em  $A$  e raio  $d = \frac{a}{2}$ .

## 2.9. As propriedades do potencial elétrico

### Propriedade 1)

As linhas de força do campo elétrico orientam-se do maior para o menor potencial.

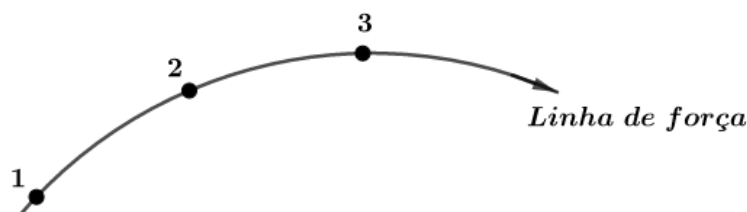


Figura 15: Linha de força de um campo elétrico qualquer.

Se desejarmos levar uma carga elétrica positiva  $q > 0$  de 1 para 2, sabemos que o trabalho realizado pela força elétrica é positivo, pois a força elétrica tem a mesma direção do deslocamento:

$$\tau_{1 \rightarrow 2} = q \cdot (V_1 - V_2)$$

Como  $\tau_{1 \rightarrow 2} > 0$  e  $q > 0$ , então  $V_1 - V_2 > 0$ , logo:  $V_1 > V_2$ . Tal fato é evidenciado claramente quando analisamos o potencial elétrico de uma carga puntiforme  $Q > 0$  que gera um campo elétrico:

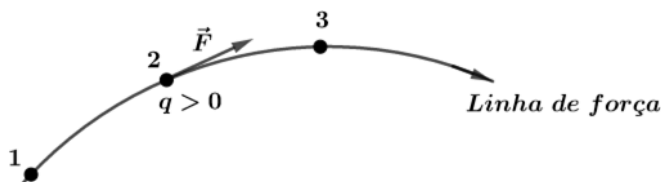


Figura 16: Direção da força elétrica em uma carga positiva em uma linha de força.

Em cada ponto, sabemos que o potencial elétrico é dado por:

$$V = K \frac{Q}{r}$$

Se pegarmos dois pontos ( $P_1$  e  $P_2$ ), onde as distâncias à carga  $Q$  são  $d_1$  e  $d_2$ , com  $d_1 < d_2$ , os potenciais serão:

$$V_1 = K \frac{Q}{d_1} \text{ e } V_2 = K \frac{Q}{d_2}$$

Dado que  $d_1 < d_2$  e  $Q > 0$ , portanto  $V_1 > V_2$ .

## Propriedade 2)

As linhas de força de um campo elétrico não podem sair e retornar ao mesmo ponto, isto é, as linhas de campo gerado por uma carga elétrica em repouso não podem ser linhas fechadas.

Podemos verificar essa propriedade utilizando a propriedade 1. Vamos provar por absurdo. Imagine que exista uma linha de força fechada num campo eletrostático, ou seja, gerado por cargas elétricas em repouso. Se tomarmos um ponto  $P$  e percorrer no sentido da linha de força, de acordo com a propriedade 1, os potenciais seriam cada vez menor que os anteriores.

Desse modo, quando retornamos ao ponto  $P$  (a linha de força é fechada), o potencial em  $P$  seria menor que o inicial. Claramente, chegamos a um absurdo. Como o campo é eletrostático, ele é invariável no tempo para aquele ponto, portanto, o potencial deveria ser o mesmo.

## 2.10. Superfícies equipotenciais

Chamamos de superfícies equipotenciais o lugar geométrico dos pontos que apresentam um mesmo potencial elétrico.

Exemplo: seja a carga puntiforme  $q > 0$ , em repouso, criando um campo elétrico, onde as linhas de força são representadas na figura abaixo:

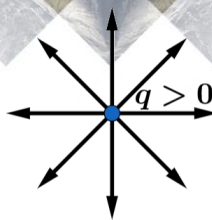


Figura 17: Campo elétrico de uma carga positiva tem direção radial, "saindo" da carga.

Dado que o potencial de uma carga puntiforme é dado por:

$$V = K \frac{q}{r}$$

Quando ponto do espaço a uma distância  $r_1$  bem definida terá o mesmo potencial. Em outras palavras, criamos uma superfície esférica de centro em  $q$  e raio  $r_1$ . Nessa superfície, teremos o mesmo potencial em todos os pontos.

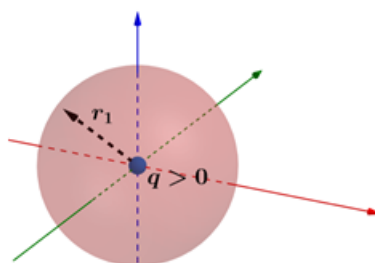


Figura 18: Superfície esférica equipotencial a uma distância  $r_1$ .

Quando variamos a distância  $r$  em relação à carga  $q$ , estamos criando várias superfícies esféricas equipotenciais. Dizemos que geramos uma família de superfícies equipotenciais.

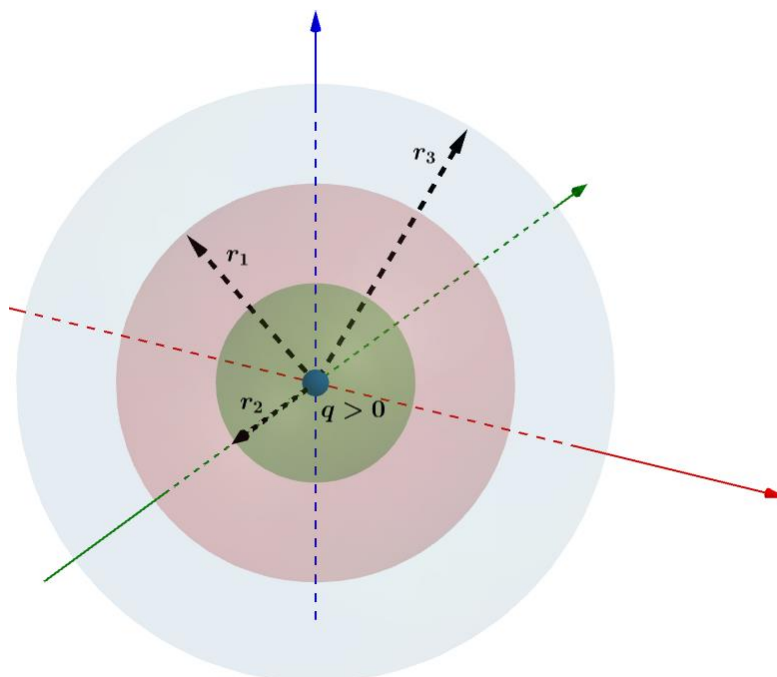


Figura 19: Família de superfícies equipotenciais.

### 2.10.1. As propriedades das superfícies equipotenciais

#### Propriedade 1)

Em uma superfície equipotencial, o trabalho da força elétrica ao longo de um deslocamento é nulo.

Podemos verificar essa propriedade através da equação do trabalho da força elétrica:

$$\tau_{A \rightarrow B} = q \cdot (V_A - V_B)$$

Como estamos em uma superfície equipotencial, temos que  $V_A = V_B$ , portanto:

$$\tau_{A \rightarrow B} = 0$$

#### Propriedade 2)

As superfícies equipotenciais são ortogonais ao vetor  $\vec{E}$ .

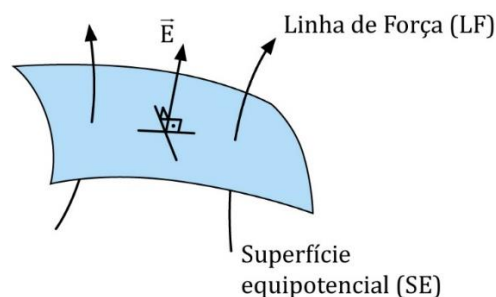


Figura 20: Superfície equipotencial ortogonal ao vetor  $\vec{E}$ .

Também podemos verificar essa propriedade por redução ao absurdo. Vamos supor que existe um  $\vec{E}_1$  que não seja ortogonal à superfície equipotencial. Dessa forma, ele admitiria uma componente tangencial na superfície equipotencial.

Então, quando uma carga elétrica se deslocar nessa superfície, haverá trabalho elétrico realizado não-nulo. Tal fato é um absurdo, pois contraria a propriedade 1.

Exemplos de aplicações de superfícies equipotenciais perpendiculares as linhas de campo:

#### 1) Campo elétrico uniforme:

Nesse caso, sabemos que as linhas de força constituem um feixe de retas paralelas e, portanto, as superfícies equipotenciais são planos perpendiculares as retas.

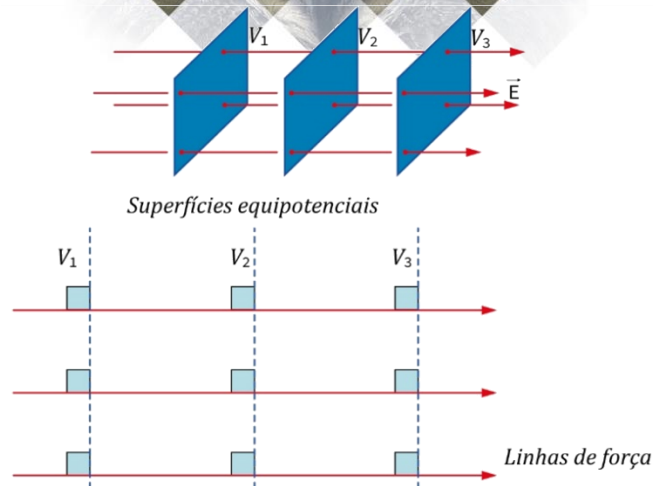


Figura 21: Linhas de campo perpendiculares às superfícies equipotenciais.

## 2) Campo gerado por carga puntiforme:

Como visto, as linhas de força nesse caso são radiais para fora ( $q > 0$ ), portanto, as superfícies equipotenciais são superfícies esféricas centradas na carga geradora do campo.

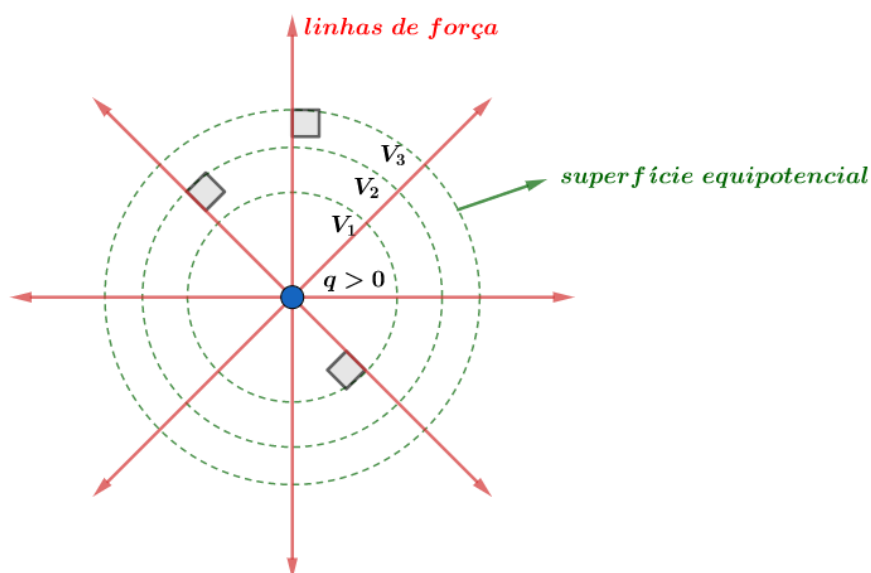


Figura 22: Superfícies equipotenciais geradas por uma carga puntiforme positiva.

## 3) Dipolo elétrico:

Considere um conjunto formado por duas cargas elétricas de valores simétricos ( $+q$  e  $-q$ ), formando um dipolo elétrico.

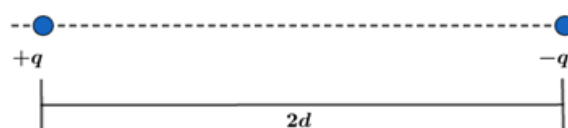


Figura 23: Dipolo elétrico a uma distância  $2d$ .

Se tomarmos qualquer ponto do espaço que equidista das cargas  $+q$  e  $-q$ , ou seja,  $d_{+q} = d_{-q} = r$ , teremos um potencial nulo, pois:



$$V_{+q} = K \frac{q}{r} \text{ e } V_{-q} = -K \frac{q}{r} \Rightarrow \boxed{V_{+q} + V_{-q} = 0}$$

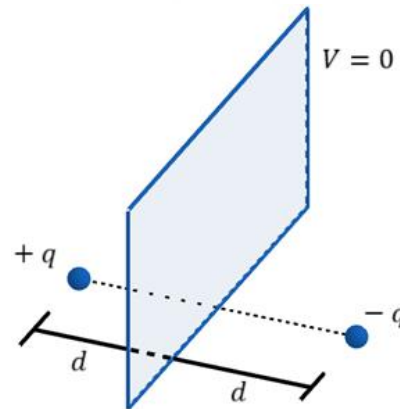


Figura 24: Plano onde o potencial elétrico das cargas é nulo.

Sabendo que as superfícies equipotenciais são ortogonais às linhas de campo, temos a seguinte representação das equipotenciais para o dipolo elétrico.

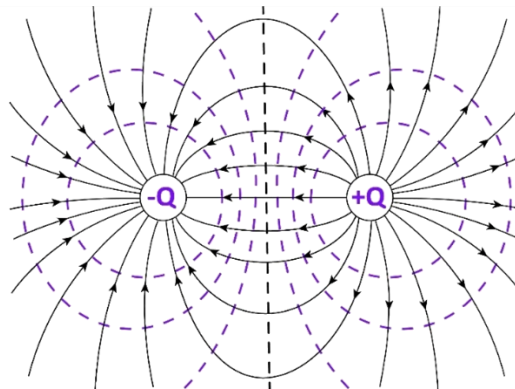


Figura 25: Representação das equipotenciais e linhas de campo para o dipolo elétrico.

O potencial gerado pelas cargas, quando deslocamos ao longo da reta que une as cargas, temos que:

$$V(x) = V_1 + V_2 = \frac{Kq}{x} - \frac{Kq}{2d - x}$$

Se plotarmos o gráfico do potencial elétrico entre as cargas em função da distância, teríamos o seguinte gráfico:

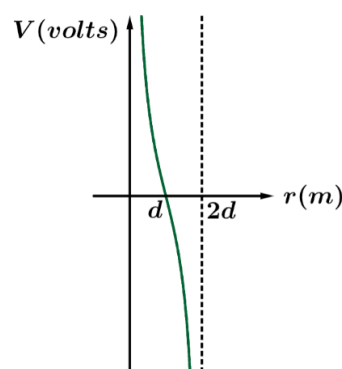
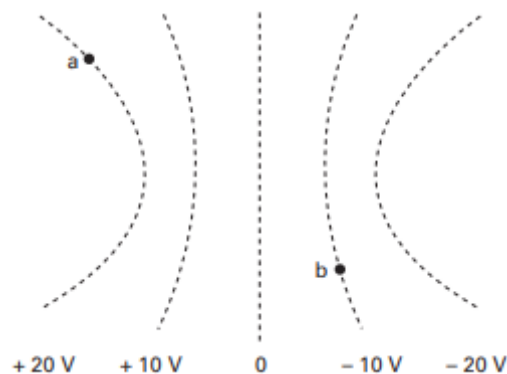


Figura 26: Potencial elétrico em função da distância para o dipolo elétrico.



3)

A figura representa algumas superfícies equipotenciais de um campo eletrostático e os valores dos potenciais correspondentes.

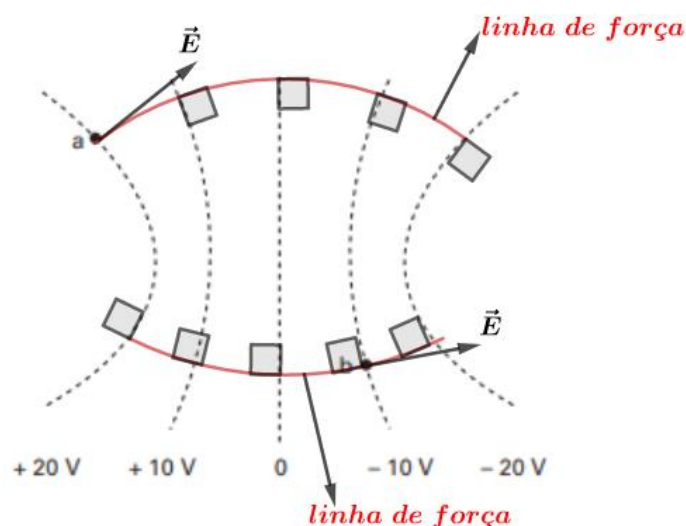


a) Copie a figura, representando o vetor campo elétrico nos pontos a e b.

b) Qual é o trabalho realizado pela força elétrica para levar uma carga  $q$ , de  $2 \times 10^{-6} C$ , do ponto a ao ponto b?

**Comentários:**

a) Sabemos que em cada ponto da superfície equipotencial, o vetor campo elétrico é perpendicular ao plano tangente à superfície no ponto. Além disso, como visto em teoria orientamos o campo no sentido decrescentes dos potenciais. Logo, a representação é dada por:



b) O trabalho realizado pela carga elétrica  $q = 2 \times 10^{-6} C$ , conhecendo os potenciais nos pontos desejado é dado por:

$$\tau_{a \rightarrow b} = q \cdot (V_a - V_b) = 2 \times 10^{-6} C \cdot (20 - (-10)) = 6 \times 10^{-5} J$$

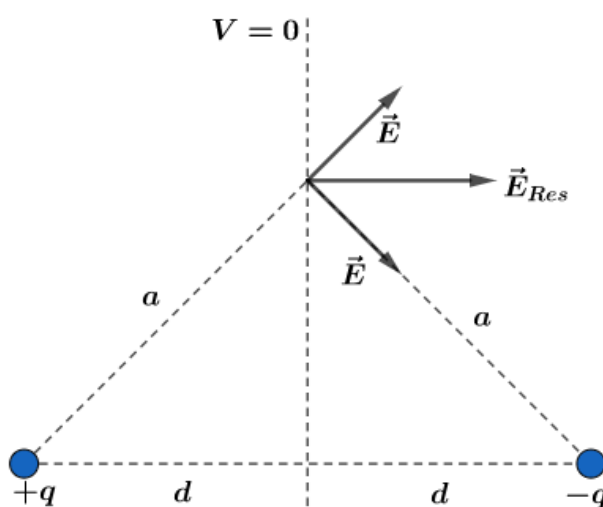
4)

Qualquer que seja a situação física envolvendo campo elétrico e potencial elétrico, podemos afirmar que:

- a) quando o campo elétrico for nulo num ponto, o potencial necessariamente também o será;
- b) quando o campo elétrico for diferente de zero num ponto, o potencial necessariamente também o será;
- c) quando o campo elétrico for constante numa região, o potencial necessariamente também o será;
- d) quando o campo elétrico for nulo numa região, o potencial será necessariamente constante nessa região.

**Comentários:**

- a) Incorreta. Se o campo elétrico é nulo, quer dizer que o potencial é constante, basta lembrarmos que  $E = -\frac{dV}{dr}$ . O potencial é constante, mas não necessariamente nulo.
- b) Incorreta. Basta pegarmos o exemplo do dipolo elétrico:



- c) Incorreta. Basta lembrarmos do campo elétrico uniforme. O campo é invariante, mas os potenciais são cada vez menores à medida que caminhamos no sentido das linhas de campo.
- d) Correta. Essa alternativa corrige o texto escrito na alternativa a. Quando o campo é nulo, o potencial é constante podendo ser nulo ou não.

## 2.11. Espontaneidade e trabalho

Vamos analisar o trabalho e a espontaneidade para os dois tipos de cargas:

**1)  $q > 0$ :**

Podemos calcular o trabalho realizado pela força elétrica para ir de  $A$  até  $B$  da seguinte forma:

$$\tau_{A \rightarrow B} = q \cdot (V_A - V_B)$$

Se  $q > 0$ , ao abandonarmos uma carga em  $A$  e as linhas de força se orientam de  $A$  para  $B$ , então nosso  $\tau_{A \rightarrow B} > 0$ . Portanto,  $V_A - V_B > 0$ , isto é,  $V_A > V_B$ .

Podemos dizer que:

.....  
Cargas positivas tendem espontaneamente potenciais menores  
.....

Se analisarmos em relação a energia potencial elétrica, lembramos que:

$$\tau_{A \rightarrow B} = (E_{pot})_A - (E_{pot})_B > 0$$

Portanto:

$$(E_{pot})_A > (E_{pot})_B$$

Podemos afirmar que:

.....  
Cargas positivas procuram minimizar a sua energia potencial.  
.....

Para onde vai essa energia, já que a energia apenas se transforma? Dado que o campo eletrostático é conservativo, essa energia foi transformada em energia cinética. Assim, a carga sempre terá módulo crescente e seu movimento espontâneo é acelerado.

**2)  $q < 0$ :**

Se  $q < 0$  e  $\tau_{A \rightarrow B} > 0$ , então  $V_A < V_B$ . Em outras palavras:

.....  
Cargas elétricas negativas espontaneamente procuram potencial maiores.  
.....

### 3. Energia potencial eletrostática

Vimos que uma carga puntiforme  $q_A$ , em um ponto A, o potencial no ponto B a uma distância  $r_{A,B}$  é dado por:

$$V_B = K \frac{q_A}{r_{A,B}}$$

Se desejamos trazer uma carga puntiforme  $q_B$  em repouso no infinito para o repouso no ponto B, é necessário realizar um trabalho calculado por:

$$\tau_{\infty \rightarrow B} = q_B(V_{\infty} - V_B) = -q_B \cdot V_B$$

O trabalho realizado pela força elétrica é menos o trabalho realizado pelo operador para trazer a carga do infinito e colocar no ponto B em repouso. Então:

$$\tau_B = q_B \cdot V_B = K \frac{q_A \cdot q_B}{r_{A,B}}$$

Se desejarmos trazer uma terceira carga  $q_C$ , semelhante ao processo feito pela carga  $q_B$ , temos que o trabalho para trazer a carga será:

$$\tau_C = q_C \cdot V_C$$

Mas o potencial em C é definido pelas cargas  $q_A$  e  $q_B$ :

$$V_C = K \frac{q_A}{r_{A,C}} + K \frac{q_B}{r_{B,C}}$$

Portanto:

$$\tau_C = K \frac{q_A \cdot q_C}{r_{A,C}} + K \frac{q_B \cdot q_C}{r_{B,C}}$$

Assim, o trabalho total para definir a configuração das três cargas conforme fizemos é dado pela soma dos trabalhos e isso corresponde a energia potencial eletrostática  $E_T$  do sistema de três cargas puntiformes:

$$E_T = K \frac{q_A \cdot q_B}{r_{A,B}} + K \frac{q_A \cdot q_C}{r_{A,C}} + K \frac{q_B \cdot q_C}{r_{B,C}}$$

Note que o trabalho não depende da ordem com que trazemos as cargas do infinito para suas respectivas posições finais. De um modo geral:

.....  
A energia potencial eletrostática de um sistema de cargas elétricas puntiformes é igual ao trabalho para trazer as cargas do infinito para suas respectivas posições finais.  
.....

Podemos manipular algebricamente a equação de  $E_T$  da seguinte forma:

$$E_T = K \frac{q_A \cdot q_B}{r_{A,B}} + K \frac{q_A \cdot q_C}{r_{A,C}} + K \frac{q_B \cdot q_C}{r_{B,C}}$$

$$E_T = \frac{1}{2} \left[ K \frac{q_A \cdot q_B}{r_{A,B}} + K \frac{q_A \cdot q_C}{r_{A,C}} + K \frac{q_B \cdot q_C}{r_{B,C}} + K \frac{q_A \cdot q_B}{r_{A,B}} + K \frac{q_A \cdot q_C}{r_{A,C}} + K \frac{q_B \cdot q_C}{r_{B,C}} \right]$$

$$E_T = \frac{1}{2} \left[ q_A \left( K \frac{q_B}{r_{A,B}} + K \frac{q_C}{r_{A,C}} \right) + q_B \left( K \frac{q_C}{r_{B,C}} + K \frac{q_A}{r_{A,B}} \right) + q_C \left( K \frac{q_A}{r_{A,C}} + K \frac{q_B}{r_{B,C}} \right) \right]$$

$$E_T = \frac{1}{2} [q_A \cdot V_A + q_B \cdot V_B + q_C \cdot V_C]$$

Este resultado mostra que para o caso de  $n$  cargas, a energia potencial eletrostática é dada por:

$$E_T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n q_i \cdot V_i$$

ESCLARECENDO!



### 5) (E. Naval)

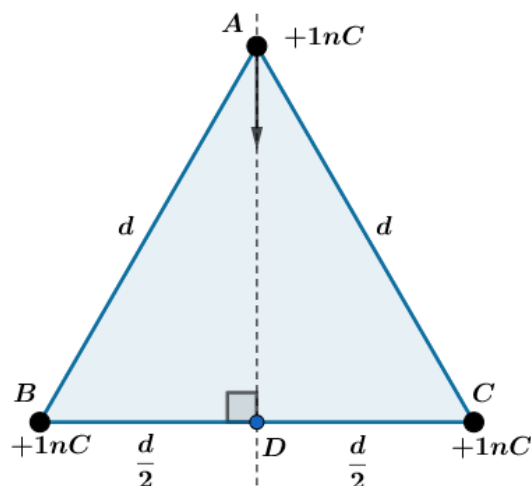
$A$ ,  $B$  e  $C$  são os vértices de um triângulo equilátero de 3 metros de lado e  $D$  é o ponto médio do lado  $BC$ . Em cada um dos vértices  $B$  e  $C$  há uma carga elétrica puntiforme, positiva, fixa, de 1,0 nanocoulomb ( $1 \text{ nano} = 10^{-9}$ ). Uma terceira carga, puntiforme, positiva, de 1,0 nanocoulomb é lançada, com energia cinética de 10 nanojoules, do vértice  $A$  em direção ao ponto  $D$ . Considerando que a constante eletrostática do meio (vácuo) seja  $9 \times 10^9 \text{ uSI}$  e que as únicas forças atuantes na carga móvel sejam as

decorrentes da interação elétrica com as duas cargas fixas mencionadas, a energia cinética da carga móvel, em nanojoules, ao passar pelo ponto  $D$  é:

- a) 0                      b) 4                      c) 6                      d) 8                      e) 16

**Comentários:**

Vamos construir uma figura que representa a disposição física das cargas:



Novamente, devido ao fato de as forças atuantes serem apenas da interação elétrica, podemos utilizar o teorema da energia cinética:

$$\tau_{F_{res}} = \Delta E_c$$

$$\tau_{F_{ele}} = (E_c)_D - (E_c)_A$$

$$q \cdot (V_A - V_D) = (E_c)_D - (E_c)_A$$

Calculamos os potenciais em  $A$  e em  $D$  pela expressão:

$$V_A = K_0 \frac{q_B}{d} + K_0 \frac{q_C}{d} = \frac{9 \times 10^9 \cdot 2 \times 10^{-9}}{3} = 6 \text{ V}$$

$$V_D = K_0 \frac{q_B}{\frac{d}{2}} + K_0 \frac{q_C}{\frac{d}{2}} = 2 \left( K_0 \frac{q_B}{d} + K_0 \frac{q_C}{d} \right) = 2V_A = 12 \text{ V}$$

Logo, a energia cinética no ponto  $D$ , em nanojoules ( $nJ$ ), é de:

$$(E_c)_D = q \cdot (V_A - V_D) + (E_c)_A$$

$$(E_c)_D = 1 \times 10^{-9}(6 - 12) + 10 \times 10^{-9} = 4 \times 10^{-9} = 4 \text{ nJ}$$

**Gabarito: B**





## 4. Potencial elétrico de condutor carregado e em equilíbrio eletrostático

Devido ao fato de não haver movimento de cargas no condutor em equilíbrio eletrostático, podemos afirmar que não existe diferença de potencial em quaisquer dois pontos. De outra forma, dizemos que o potencial elétrico é o mesmo em todos os seus pontos internos ou da superfície.

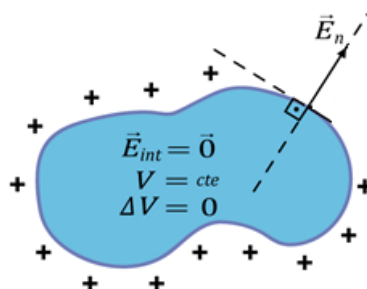


Figura 27: Propriedades de um condutor em equilíbrio eletrostático.

Além disso, quando todos os pontos da superfície do condutor possuem o mesmo potencial, dizemos que ela é uma superfície equipotencial e, conforme vimos, o campo elétrico é ortogonal a equipotencial.

### 4.1. Potencial de um condutor esférico

Vimos anteriormente que o campo elétrico de um condutor esférico para regiões externas, isto é, pontos fora da esfera, tudo se passa como se o campo fosse gerado por uma carga puntiforme colocada no centro da esfera. Dessa forma, para pontos exteriores da esfera ocorrerá o mesmo para o potencial, ou seja:

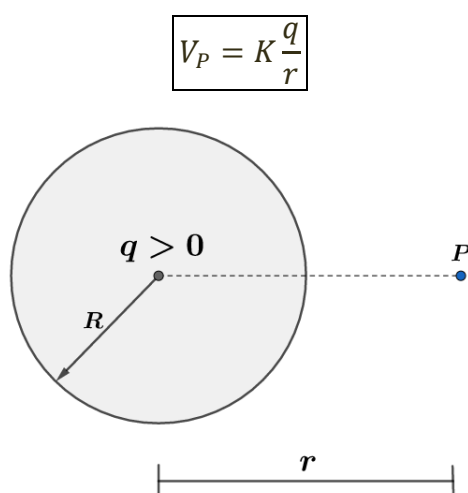


Figura 28: Potencial elétrico de um condutor esférico em função da distância ao centro dela.

Pode-se demonstrar que para pontos na superfície do condutor, o potencial é dado por:

$$V_{superfície} = K \frac{q}{R}$$

Como vimos agora a pouco, o potencial é o mesmo em qualquer ponto da esfera, portanto:

$$V_{esf} = V_{superfície} = K \frac{q}{R}$$

Assim, temos os seguintes gráficos para os potenciais das esferas condutoras em função da distância:

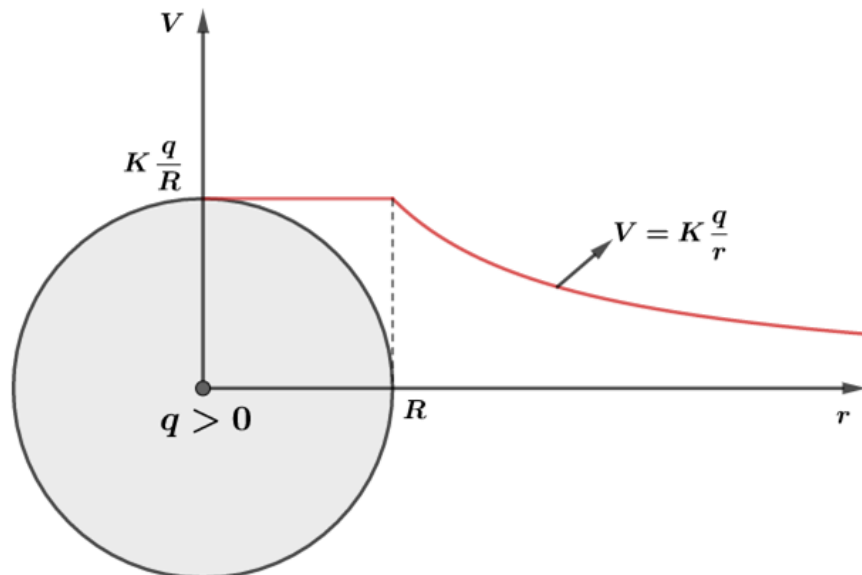


Figura 29: Potencial elétrico de um condutor esférico carregado com carga elétrica positiva em função da distância.

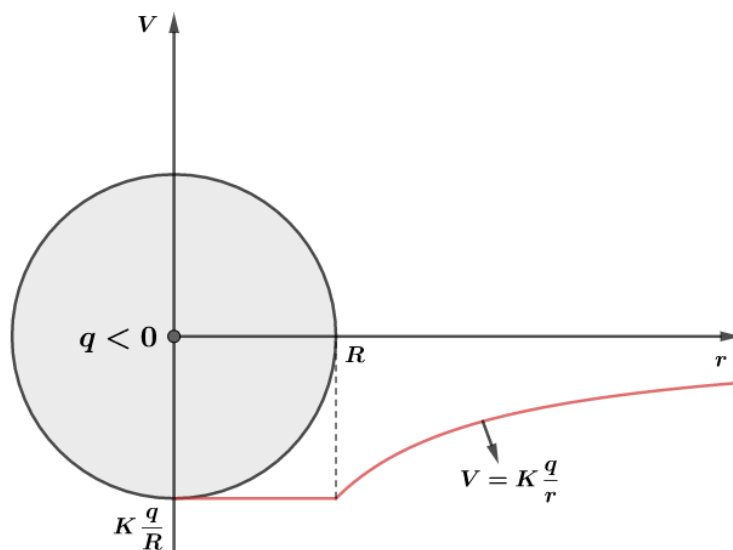


Figura 30: Potencial elétrico de um condutor esférico carregado com carga elétrica negativa em função da distância.

Embora tenhamos tirados conclusões para um condutor carregado, isolado e em equilíbrio eletrostático, podemos tomar como válidas para cargas uniformemente distribuídas em uma superfície esférica qualquer, ainda que a superfície externa seja de um material isolante.

## 4.2. O potencial da Terra

A Terra pode ser considerada um grande condutor esférico negativamente eletrizada com carga próxima de  $-580\,000\text{ C}$ . Como seu raio é em torno de  $6400\text{ km}$ , se considerada isolada no universo, o potencial elétrico da Terra é próximo de:

$$V_{Terra} = 9 \times \frac{10^9(-580 \times 10^3)}{6400 \times 10^3} \cong -8 \times 10^8 \text{ V}$$

Valor este calculado tomando como referencial o infinito. Contudo, outros corpos celestes vizinhos influenciam no potencial elétrico resultante na Terra. Com isso, os efeitos nas cargas elétricas devido a fatores humanos são praticamente desprezíveis sobre o potencial da Terra.

Dessa forma, podemos considerar a Terra com um potencial invariável e, assim, comporta-se como um referencial de potencial para o homem. Por exemplo, em um laboratório, se dissermos que um corpo tem potencial de +5000 V em relação à Terra, estamos falando que ele tem 5000 V a mais que a Terra.

Quando ligamos à Terra um condutor carregado negativamente, notamos que haverá fluxo de elétrons do condutor para a Terra, até o momento em que se anule a carga elétrica do corpo. Como visto anteriormente, os elétrons procuram, espontaneamente, potenciais maiores.

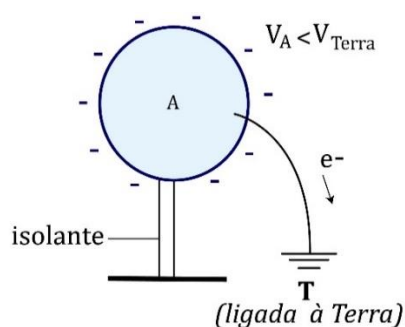


Figura 31: Carga negativa ligada à Terra.

No momento em que o condutor se neutralizar, seu potencial será o mesmo que o da Terra.

Em contrapartida, quando ligamos à Terra um condutor carregado positivamente, notamos que haverá fluxo de elétrons da Terra para o condutor, até o momento em que se anule a carga elétrica do corpo. Novamente, os elétrons (cargas negativas) procuram, espontaneamente, potenciais maiores.

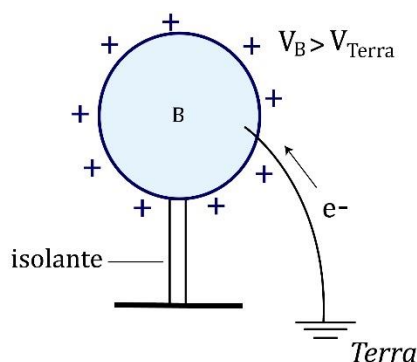


Figura 32: Carga positiva ligada à Terra.

Da mesma forma, quando o condutor se neutralizar, seu potencial será o mesmo que o da Terra.

Sendo assim, é muito importante para o homem usar ligações à Terra para descarregar os corpos. Utilizamos esse artifício para descarregar corpos que foram atingidos por raios, por exemplo. Em vias de regra, sempre que ligamos um corpo metálico à Terra, asseguramos que o seu potencial elétrico se anule.

### 4.3. Aplicação do uso de Potenciais para Condutores em Equilíbrio Eletrostático

Vamos considerar dois corpos  $A$  e  $B$  isolados, eletrizados com cargas  $Q_A$  e  $Q_B$ , com os potenciais  $V_A$  e  $V_B$ , bem distantes uma da outra.  $A$   $Q'_A, V_{eq}$   $B$   $Q'_B, V_{eq}$   $Q'_{fio}, V_{eq}$  fio



Figura 33: Corpos com formatos quaisquer com suas respectivas cargas e potenciais elétricos.

Se considerarmos  $V_A > V_B$ , e conectarmos os dois corpos, por causa da diferença de potencial, haverá um fluxo de elétrons de  $B$  para  $A$  (elétrons, que são cargas negativas, procuram potenciais maiores).

Dessa forma, o corpo  $B$  vai perdendo seus elétrons e sua carga está aumentando, logo seu potencial está aumentando. Em contrapartida, ao receber elétrons, o corpo  $A$  tem sua carga diminuída e, portanto, seu potencial está diminuindo.

Essa movimentação de cargas ocorre até que ambos tenham o mesmo potencial  $V_{eq}$ .

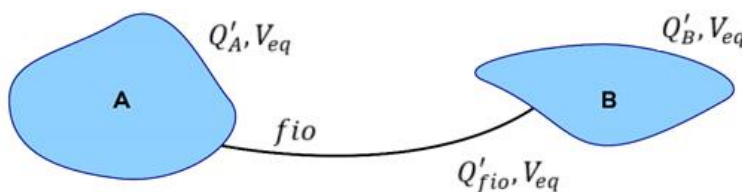


Figura 34: Contato elétrico entre as duas cargas.

De acordo com o Princípio da Conservação das Cargas, podemos escrever que:

$$Q_A + Q_B = Q'_A + Q'_B + Q_{fio}$$

Quando utilizamos um fio muito fino, a quantidade de cargas armazenadas nele é praticamente nula (estudaremos o conceito de capacitância mais para frente), isto é,  $Q_{fio} \cong 0$  e chegamos que:

$$Q_A + Q_B = Q'_A + Q'_B$$

Vamos particularizar nosso estudo para o caso de condutores esféricos. Sejam  $A$  e  $B$  dois condutores esféricos de raios  $r_A$  e  $r_B$ . Se ambos estão inicialmente carregados com cargas  $Q_A$  e  $Q_B$ , respectivamente, quando colocados em contato por um fio muito fino, podemos determinar o potencial equivalente e as cargas finais de cada corpo da seguinte forma:

$$V_A = K \frac{Q_A}{r_A} \text{ e } V_B = K \frac{Q_B}{r_B}$$

Pelo Princípio da Conservação das Cargas, temos que:

$$Q_A + Q_B = Q'_A + Q'_B \Rightarrow Q_A + Q_B = \frac{V_{eq} \cdot r_A}{K} + \frac{V_{eq} \cdot r_B}{K} \therefore V_{eq} = K \left( \frac{Q_A + Q_B}{r_A + r_B} \right)$$

Ou ainda em função dos potenciais  $V_A$  e  $V_B$ :

$$Q_A + Q_B = Q'_A + Q'_B \Rightarrow \frac{V_A \cdot r_A}{K} + \frac{V_B \cdot r_B}{K} = \frac{V_{eq} \cdot r_A}{K} + \frac{V_{eq} \cdot r_B}{K} \therefore V_{eq} = \frac{V_A \cdot r_A + V_B \cdot r_B}{r_A + r_B}$$

Notamos que o potencial no equilíbrio eletrostático é a média ponderada dos potenciais, tendo como peso os raios dos condutores esféricos. As novas cargas são dadas em função das iniciais da seguinte forma:

$$Q'_A = \frac{V_{eq} \cdot r_A}{K} = \frac{K \left( \frac{Q_A + Q_B}{r_A + r_B} \right) r_A}{K} \therefore Q'_A = r_A \left( \frac{Q_A + Q_B}{r_A + r_B} \right)$$

Analogamente, a carga final de  $B$  será:

$$Q'_B = r_B \left( \frac{Q_A + Q_B}{r_A + r_B} \right)$$

Observe que se considerarmos  $\left( \frac{Q_A + Q_B}{r_A + r_B} \right) = c$ , podemos dizer que as cargas são proporcionais aos seus raios. Caso tenhamos  $n$  esferas, teremos que:

$$V_{eq} = \frac{V_1 r_1 + V_2 r_2 + \dots + V_n r_n}{r_1 + r_2 + \dots + r_n} \text{ e } Q'_i = r_i \left( \frac{Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n}{r_1 + r_2 + \dots + r_n} \right)$$

ESCLARECENDO!



## 6) (IME – RJ)

Uma esfera de plástico, maciça, é eletrizada, ficando com uma densidade de carga superficial igual a  $+0,05 \text{ C/m}^2$ . Em consequência, se uma carga puntiforme  $q = +1 \mu\text{C}$  fosse colocada exteriormente a 3 metros do centro da esfera, sofreria repulsão de intensidade  $F = 0,02\pi \text{ newtons}$ . A esfera é descarregada e cai livremente de uma altura de 750 m, adquirindo, ao fim da queda, uma energia cinética de  $0,009 \pi \text{ joules}$ . Sabendo que  $g = 10 \text{ m/s}^2$ , calcule a massa específica do plástico da esfera.

### Comentários:

Dado que a densidade superficial da esfera é dada por:

$$\sigma = \frac{Q}{4\pi R^2}$$

A carga é expressa por:

$$Q = 4\pi R^2 \cdot \sigma$$

A força entre a carga e a esfera é dada por:

$$F = K \frac{Qq}{d^2}$$

Com isso, podemos calcular o raio da esfera:

$$0,02\pi = 9 \times 10^9 \frac{(4\pi R^2 \cdot 0,05)(1 \times 10^{-6})}{3^2} \Rightarrow \boxed{R = 10^{-2}m}$$

Na segunda parte do problema, quando a esfera é descarregada e cai livremente, temos um novo problema de energia. Quando a esfera está caindo, ela está transformando energia potencial gravitacional em energia cinética. Considerando a conservação da energia mecânica, já que não foi mencionado nenhuma força dissipativa, temos que:

$$E_p = E_c \Rightarrow mgh = 0,009\pi \Rightarrow m = \frac{0,009\pi}{10.750} \text{ kg}$$

Vamos deixar as contas para o final. Portanto, a massa específica da esfera de plástico é de:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{\frac{0,009\pi}{10.750}}{\frac{4}{3}\pi R^3} \therefore \boxed{\rho = 0,9 \text{ kg/m}^3}$$

#### 4.4. Aplicação do potencial elétrico na indução total

A indução total ocorre quando todas as linhas de força que partem de um corpo carregado chegam a um outro corpo. Como exemplo, temos dois corpos carregados na qual um deles envolve completamente o outro, como visto abaixo:

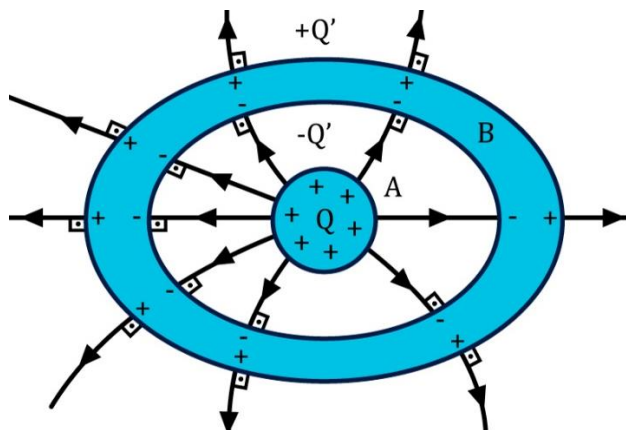


Figura 35: Indução total.

Como já vimos anteriormente, a carga do corpo interno provocará a separação das cargas da casca condutora, de tal forma que a superfície interna terá carga  $-Q_{ind}$  e na externa uma carga  $+Q_{ind}$ , mas sabemos que:

$$\boxed{Q = +Q_{ind} = -(-Q_{ind})}$$

Vamos estudar o potencial em função da distância para o seguinte sistema:



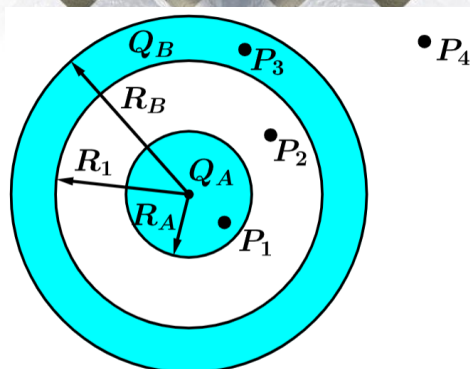


Figura 36: Cálculo do potencial em função da distância de uma carga dentro de uma casca esférica.

Considere uma esfera  $A$  tem carga  $Q_A$  e uma casca esférica  $B$  tem carga  $Q_B$ . De acordo com a indução total, a superfície interna da casca  $B$  terá carga  $-Q_A$  e a superfície externa carga  $Q_A + Q_B$ , pois sabemos que a carga total da casca  $B$  deve permanecer  $Q_B$ .

Vamos determinar o potencial nos seguintes pontos  $P_1, P_2, P_3$  e  $P_4$ , utilizando o Princípio da Superposição, vamos adotar três esferas tais que:

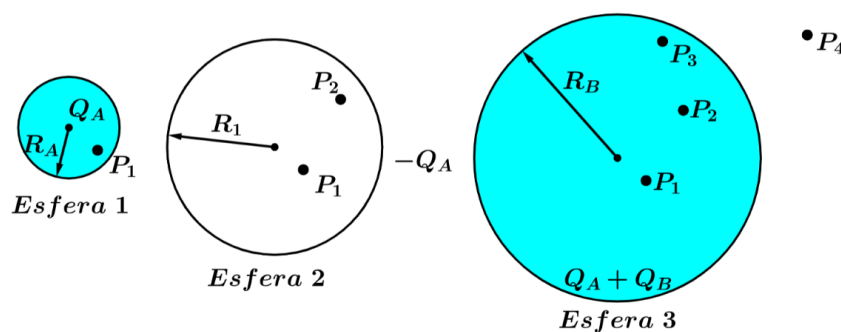


Figura 37: Princípio da superposição para determinação do potencial em função da distância.

O ponto  $P_1$  é interior as três esferas, portanto, o potencial nele é a soma dos potenciais constantes nas três esferas adotadas:

$$V_{P_1}(r \leq R_A) = V_{esfera1} + V_{esfera2} + V_{esfera3}$$

$$V_{P_1}(r \leq R_A) = K \frac{Q_A}{R_A} + \left( -K \frac{Q_A}{R_1} \right) + \left( K \frac{Q_A + Q_B}{R_B} \right)$$

$$\boxed{V_{P_1} = K \left( Q_A \frac{(R_1 - R_A)}{R_1 R_A} \right) + \left( K \frac{Q_A + Q_B}{R_B} \right)}$$

Como esperado, o potencial no interior do condutor  $A$  é constante. O ponto  $P_2$  é externo a esfera 1 e interior as outras, logo:

$$V_{P_2}(R_A \leq r \leq R_1) = K \frac{Q_A}{r} - K \frac{Q_A}{R_1} + K \frac{(Q_A + Q_B)}{R_2}$$

$$\boxed{V_{P_2} = K \frac{Q_A}{r} - K \frac{Q_A}{R_1} + K \frac{(Q_A + Q_B)}{R_B}}$$

O ponto  $P_3$  é externo a esfera 1 e a esfera 2, então:

$$V_{P_3}(R_1 \leq r \leq R_B) = K \frac{Q_A}{r} - K \frac{Q_A}{r} + K \frac{(Q_A + Q_B)}{R_B} \therefore V_{P_3} = K \frac{(Q_A + Q_B)}{R_B}$$

No ponto  $P_4$ , ponto fora do conjunto, o potencial é expresso por:

$$V_{P_4}(r \geq R_B) = K \frac{Q_A}{r} - K \frac{Q_A}{r} + K \frac{(Q_A + Q_B)}{r} \therefore V_{P_4} = K \frac{(Q_A + Q_B)}{r}$$

Graficamente, podemos expressar o potencial em função da distância:

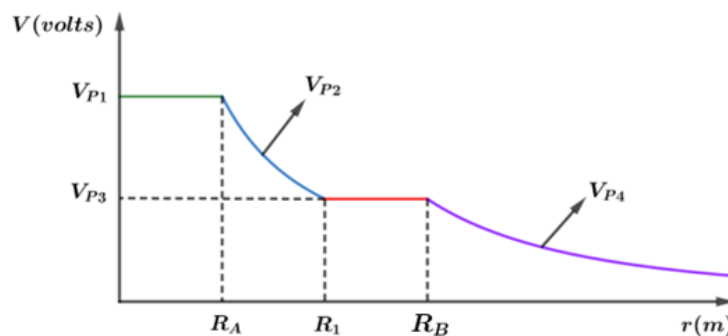


Figura 38: Gráfico do potencial em função da distância.

Vale a pena lembrar que o campo elétrico na direção radial é dado por  $E = -\frac{dV}{dr}$  e a descontinuidade na superfície do condutor.



## 5. Método das imagens

Vamos imaginar o seguinte problema: suponha uma carga  $q$  a uma distância  $d$  de um plano condutor aterrado.

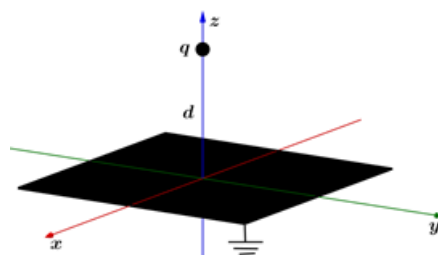
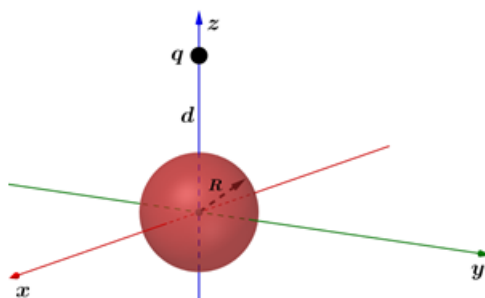


Figura 39: Interação entre uma carga e um plano condutor aterrado.

A pergunta que surge é: qual o potencial na região acima do plano? Obviamente, não é apenas  $Kq/r$ , pois há carga induzida no plano condutor e não sabemos quanta carga é induzida, nem como ela está distribuída. Outra situação análoga é a interação entre uma carga e uma esfera condutora.



Para atacar esse tipo de problema, vamos relembrar um problema simples: duas cargas  $+q$  e  $-q$ .

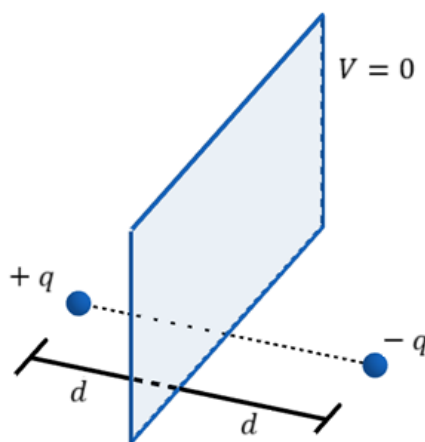


Figura 40: Plano mediador onde o potencial elétrico é nulo.

Note que para o potencial nulo, temos que:

$$V_{plano} = \frac{Kq}{x_1} + \frac{K(-q)}{x_2} \Rightarrow V_{plano} = Kq \left( \frac{1}{x_1} - \frac{1}{x_2} \right)$$

Se o potencial do plano for nulo, podemos dizer que a distância  $x_1 = x_2$ , ou seja, qualquer ponto cuja distância entre a carga  $+q$  e o ponto for igual a distância entre a carga  $-q$  e o mesmo ponto, sabemos que o potencial é nulo. O lugar geométrico que contém esses pontos é o plano mediador. Assim, qualquer ponto deste plano terá potencial elétrico nulo.

Além disso, se eu pegasse qualquer configuração com uma carga  $+Q$  simétrica a uma carga  $-Q$ , em relação ao plano mediador, o potencial elétrico seria nulo no plano.

Agora, vamos aplicar essa ideia no problema da carga  $+q$  próxima ao plano metálico aterrado. Como o plano metálico está aterrado, podemos dizer que o potencial elétrico do plano é nulo. Então, podemos imaginar que existe uma carga simetricamente oposta à carga  $+q$ , mas de sinal contrário ( $-q$ ), de tal forma que o plano mediador funcione como um espelho e essa carga  $-q$  é a carga imagem que gera um potencial nulo no plano mediador.

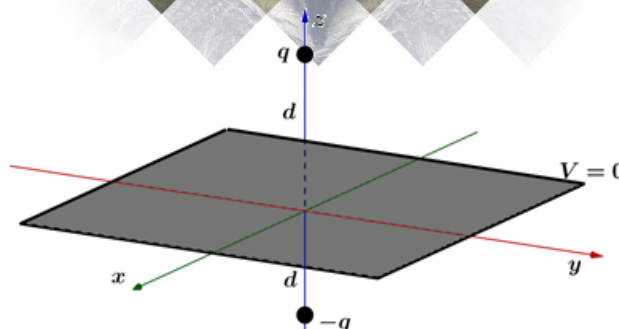


Figura 41: Carga imagem  $-q$  definindo um plano (o plano mediador) que possui potencial nulo.

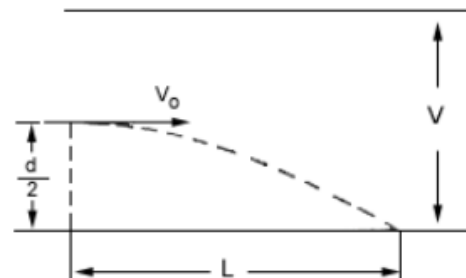
Assim, o grande ponto é analisar onde estão situadas as cargas-imagens para que a condição de potencial nulo possa ser satisfeita.



## 6. Lista de Exercícios

### 1. (ITA 1983)

Entre duas placas planas e paralelas, existe um campo elétrico uniforme. Devido a uma diferença de potencial  $V$  aplicada entre elas. Um feixe de elétrons é lançado entre as placas com velocidade inicial  $v_0$ . A massa do elétron é  $m$  e  $q$  é o módulo de sua carga elétrica.  $L$  é a distância horizontal que o elétron percorre para atingir uma das placas e  $d$  é a distância entre as placas.

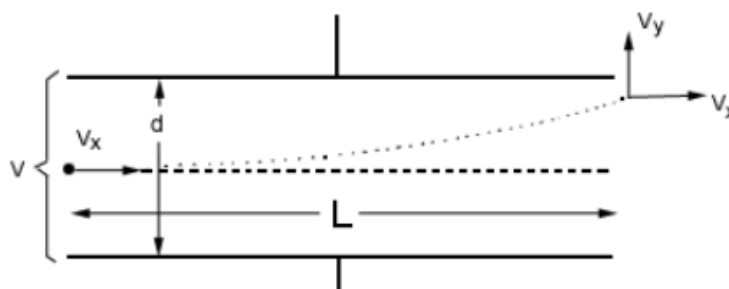


Dados:  $v_0$ ,  $L$ ,  $d$  e  $V$ , a razão entre o módulo da carga e a massa do elétron  $\frac{q}{m}$  é dada por:

- a)  $\frac{Vd}{Lv_0}$       b)  $\frac{2L^2v_0}{Vd}$       c)  $\frac{V^2L}{d^2v_0}$       d)  $\frac{d^2v_0^2}{VL^2}$       e)  $\frac{VL}{d^2v_0^2}$

### 2. (ITA-1971)

Um elétron de massa  $m$  e carga  $-q$  penetra com velocidade  $v_x = \text{constante}$  entre as placas de um capacitor plano. Neste há uma diferença de potencial  $V$  orientada de modo a fazer o elétron subir.



Deduz a expressão da componente  $v_y$  da velocidade que o elétron possui ao deixar o capacitor e assinala-a entre as opções abaixo. Despreze a atração gravitacional sobre o elétron.

- a)  $v_y = \frac{qVL}{mdv_x}$       b)  $v_y = \frac{q mL}{Vdv_x}$       c)  $v_y = v_x$



d)  $v_y = \frac{L}{d} \cdot v_x$

e) nenhuma das opções é correta.

### 3. (ITA-1969)

Três superfícies planas circulares isoladas possuem cargas distribuídas conforme indica a figura:



Pode-se afirmar que:

- a) O campo elétrico na região compreendida entre a e b é nulo.
- b) O campo elétrico apresenta valores mínimos na região entre b e c.
- c) No centro geométrico de b, o campo elétrico é equivalente àquele determinado pelas cargas de a e c.
- d) Entre c e b o sentido do campo elétrico é de c para b.
- e) Nenhuma das afirmações anteriores é correta.

### 4. (ITA – 81)

Uma partícula de massa  $m$  e outra de massa  $2m$  tem cargas elétricas  $q$  de mesmo módulo, mas de sinais opostos. Estando inicialmente separadas de uma distância  $R$ , são soltas a partir do repouso. Nestas condições, quando a distância entre as partículas for  $R/2$ , desprezando a ação gravitacional terrestre, se  $K = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ , pode-se afirmar que:

- a) Ambas terão a mesma velocidade  $v = q \left( \frac{K}{3mR} \right)^{1/2}$ .
- b) Ambas terão a mesma velocidade  $v = q \left( \frac{K}{mR} \right)^{1/2}$ .
- c) Ambas terão a mesma velocidade  $v = 2q \left( \frac{k}{3mR} \right)^{1/2}$ .
- d) uma terá velocidade  $v = q \left( \frac{K}{mR} \right)^{1/2}$  e a outra terá velocidade de  $v = 2q \left( \frac{K}{3mR} \right)^{1/2}$ .
- e) uma terá velocidade  $v = q \left( \frac{K}{3mR} \right)^{1/2}$  e a outra terá velocidade de  $v = 2q \left( \frac{K}{3mR} \right)^{1/2}$ .

### 5. (ITA-1985)

Uma esfera condutora de raio  $0,50 \text{ cm}$  é elevada a um potencial de  $10,0V$ . Uma segunda esfera, bem afastada da primeira, tem raio  $1,00 \text{ cm}$  e está ao potencial  $15,0V$ . Elas são ligadas por um fio de capacitância desprezível. Sabendo-se que o meio no qual a experiência é realizada é homogêneo e isotrópico, podemos afirmar que os potenciais finais das esferas serão:

- a)  $12,5V$  e  $12,5V$ .
- b)  $8,33V$  para a primeira e  $16,7V$  para a segunda.
- c)  $16,7V$  para a primeira e  $8,33V$  para a segunda.
- d)  $13,3V$  e  $13,3V$ .
- e) Zero para a primeira e  $25,0V$  para a segunda.

### 6. (ITA-1986)



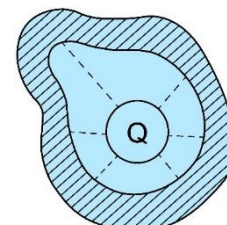
Duas esferas metálicas,  $A$  e  $B$ , de raios  $R$  e  $3R$ , respectivamente, são postas em contato. Inicialmente  $A$  possui carga elétrica positiva  $+2Q$  e  $B$ , carga  $-Q$ . Após atingir o equilíbrio eletrostático, as novas cargas de  $A$  e  $B$  passam a ser, respectivamente:

- a)  $Q/2, Q/2$ .                      b)  $3Q/4, Q/4$ .                      c)  $3Q/2, Q/2$ .  
d)  $Q/4, 3Q/4$ .                      e)  $4Q/3, -Q/3$ .

## 7. (ITA-1987)

A figura representa um condutor oco e um condutor de forma esférica dentro da cavidade do primeiro, ambos em equilíbrio eletrostático. Sabe-se que o condutor interno tem carga  $+Q$ .

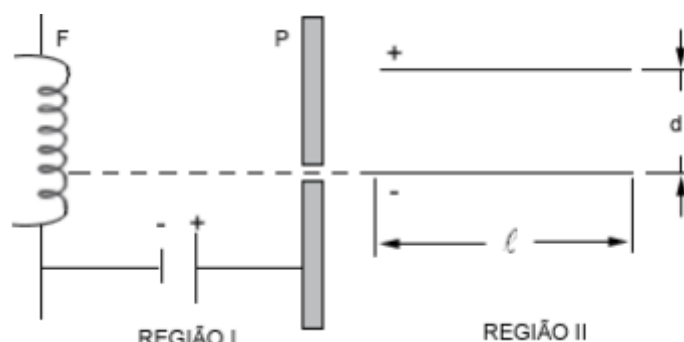
Pode-se afirmar que:



- a) Não há campo elétrico dentro da cavidade.
- b) As linhas de força dentro da cavidade são retas radiais em relação à esfera, como na figura.
- c) A carga da superfície interna do condutor oco é  $-Q$  e as linhas de força são perpendiculares a essa superfície.
- d) A carga da superfície interna do condutor oco é  $-Q$  e as linhas de força são tangenciais a essa superfície.
- e) Não haverá diferença de potencial entre os dois condutores se a carga do condutor oco também for igual a  $Q$ .

## 8. (ITA-1987)

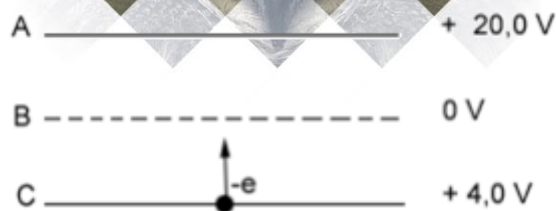
Numa experiência de laboratório, elétrons são emitidos por um filamento metálico  $F$ , com velocidade inicial praticamente nula. Eles são acelerados através da região  $I$  por uma diferença de potencial de  $25 \times 10^3 \text{ V}$ , aplicada entre  $F$  e a placa perfurada  $P$ . Eles emergem do furo da placa com velocidade horizontal e penetram na região  $II$ , onde são obrigados a atravessar o campo elétrico uniforme de um capacitor cujas placas têm comprimento  $l = 5,0 \text{ cm}$  e estão separadas por uma distância  $d = 0,50 \text{ cm}$ , conforme a figura. Qual é o máximo valor da tensão  $V_2$  entre as placas do capacitor que ainda permite que algum elétron atinja a região  $III$  onde não há campo elétrico?



**9. (ITA-1988)**

A, B e C são superfícies que se acham, respectivamente, a potenciais +20V, 0V e + 4,0V. Um elétron é projetado a partir da superfície C no sentido ascendente com uma energia cinética inicial de 9,0 eV. (Um elétron-volt é a energia adquirida por um elétron quando submetido a uma diferença de potencial de um volt). A superfície B é porosa e permite a passagem de elétrons. Podemos afirmar que:





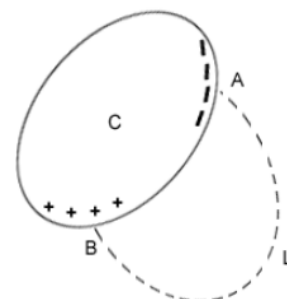
- Na região entre C e B o elétron será acelerado pelo campo elétrico até atingir a superfície B com energia cinética de 33,0 eV. Uma vez na região entre B e A, será desacelerado, atingindo a superfície A com energia cinética de 13,0 eV.
- Entre as placas C e B o elétron será acelerado atingindo a placa B com energia cinética igual a 13,0 eV, mas não atinge a placa A.
- Entre C e B o elétron será desacelerado pelo campo elétrico aí existente e não atingirá a superfície B.
- Na região entre C e B o elétron será desacelerado, mas atingirá a superfície B com energia cinética de 5,0 eV. Ao atravessar B, uma vez na região entre B e A será acelerado, até atingir a superfície A com uma energia cinética de 25,0 eV.
- Entre as placas C e B o elétron será desacelerado, atingindo a superfície B com energia cinética de 5,0 eV. Uma vez na região entre B e A, será desacelerado, até atingir a superfície A com energia cinética de 15,0 eV.

#### 10. (ITA-1988)

Na figura, C é um condutor em equilíbrio eletrostático, que se encontra próximo de outros objetos eletricamente carregados. Considere a curva tracejada L que une os pontos A e B da superfície do condutor.

Podemos afirmar que:

- A curva L não pode representar uma linha de força do campo elétrico.
- A curva L pode representar uma linha de força, sendo que o ponto B está a um potencial mais baixo que o ponto A.
- A curva L pode representar uma linha de força, sendo que o ponto B está a um potencial mais alto que o ponto A.
- A curva L pode representar uma linha de força, desde que L seja ortogonal à superfície do condutor nos pontos A e B.
- A curva L pode representar uma linha de força, desde que a carga total do condutor seja nula.



#### 11. (ITA-1990)

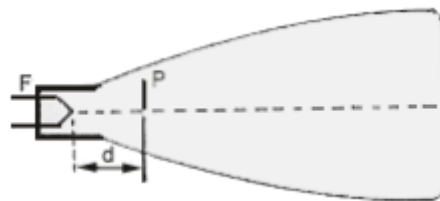
Um condutor esférico oco, isolado, de raio  $R$ , tem no seu interior uma pequena esfera de raio  $r < R$ . O sistema está inicialmente neutro. Eletriza-se a pequena esfera com carga positiva. Uma vez atingido o equilíbrio eletrostático, pode-se afirmar que:

- A carga elétrica na superfície externa do condutor é nula.
- A carga elétrica na superfície interna do condutor é nula.
- O campo elétrico no interior do condutor é nulo.
- O campo elétrico no exterior do condutor é nulo.

e) Todas as afirmativas acima estão erradas.

## 12. (ITA-1990)

Num tubo de raios catódicos tem-se um filamento F que libera elétrons quando aquecido, e uma placa aceleradora P que é mantida a um potencial mais alto que o filamento. O filamento fica a uma distância  $d$  da placa. A placa tem, ainda, um orifício que permite a passagem dos elétrons que vão se chocar com uma tela que fica fluorescente quando os mesmos a atingem.



Nestas condições:

- a) Se aumentarmos a distância  $d$  entre o filamento e a placa, a energia cinética com que os elétrons chegam à placa aumenta.
- b) O aumento da distância  $d$  faz com que a energia cinética dos elétrons diminua.
- c) A energia cinética dos elétrons não depende da distância entre o filamento e a placa, mas só da diferença de potencial  $U$  entre o filamento e a placa aceleradora.
- d) A energia cinética dos elétrons só depende da temperatura do filamento.
- e) Nenhuma das alternativas anteriores é verdadeira.

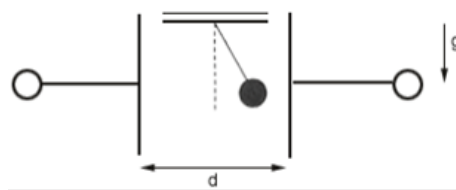
## 13. (ITA-1993)

Entre as armaduras de um capacitor plano com placas horizontais, existe uma diferença de potencial  $V$ . A separação entre as armaduras é  $d$ . Coloca-se uma pequena carga  $Q > 0$ , de massa  $m$  entre as armaduras e esta fica em equilíbrio. A aceleração da gravidade é  $g$ . Qual é o valor da carga  $Q$ ?

- a)  $Q = mgd^{-1}/V$ .
- b)  $Q = Vd/m$ .
- c)  $Q = mgd/V$ .
- d)  $Q = Vgd/m$ .
- e)  $Q = gd/Vm$ .

## 14. (ITA-2001)

Uma esfera de massa  $m$  e carga  $q$  está suspensa por um fio frágil e inextensível, feito de um material eletricamente isolante. A esfera se encontra entre as placas paralelas de um capacitor plano, como mostra a figura. A distância entre as placas é  $d$ , a diferença de potencial entre as mesmas é  $V$  e o esforço máximo que o fio pode suportar é igual ao quádruplo do peso da esfera.



Para que a esfera permaneça imóvel, em equilíbrio estável, é necessário que:

- a)  $\left(\frac{qV}{d}\right)^2 \leq 15 mg$
- b)  $\left(\frac{qV}{d}\right)^2 \leq 4 (mg)^2$
- c)  $\left(\frac{qV}{d}\right)^2 \leq 15 (mg)^2$
- d)  $\left(\frac{qV}{d}\right)^2 \geq 15 mg$
- e)  $\left(\frac{qV}{d}\right)^2 \leq 16 (mg)^2$

## 15. (ITA-2002)

Uma esfera metálica isolada, de raio  $R_1 = 10,0 \text{ cm}$  é carregada no vácuo até atingir o potencial  $U = 9,0V$ . Em seguida, ela é posta em contato com outra esfera metálica isolada, de raio  $R_2 = 5,0 \text{ cm}$ , inicialmente neutra. Após atingir o equilíbrio eletrostático, qual das alternativas melhor descreve a situação física? É dado que  $\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9,0 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$ .

- a) A esfera maior terá uma carga de  $0,66 \cdot 10^{-10} \text{ C}$ .

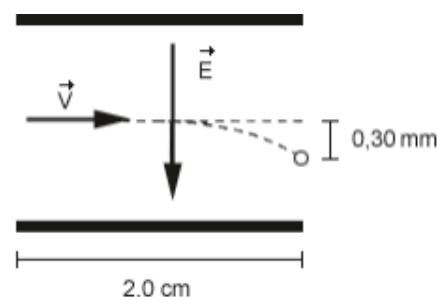
- b) A esfera maior terá um potencial de 4,5V.
- c) A esfera menor terá uma carga de  $0,66 \cdot 10^{-10} \text{ C}$ .
- d) A esfera menor terá um potencial de 4,5V.
- e) A carga total é igualmente dividida entre as duas esferas.

**16. (ITA-2005)**

Em uma impressora a jato de tinta, gotas de certo tamanho ejetadas de um pulverizador em movimento, passam por uma unidade eletrostática onde perdem alguns elétrons, adquirindo uma carga  $q$ , e, a seguir, deslocam-se no espaço entre placas planas paralelas eletricamente carregadas, pouco antes da impressão. Considere gotas de raio  $10 \mu\text{m}$  lançadas com velocidade de módulo  $v = 20 \text{ m/s}$  entre as placas de comprimento igual a  $2,0 \text{ cm}$ , no interior das quais existe um campo elétrico uniforme de módulo  $E = 8,0 \times 10^4 \text{ N/C}$ , como mostra a figura.

Considerando que a densidade da gota seja  $1000 \text{ kg/m}^3$  e sabendo-se que a mesma sofre um desvio de  $0,30 \text{ mm}$  ao atingir o final do percurso, o módulo de sua carga elétrica é de:

- a)  $2,0 \cdot 10^{-14} \text{ C}$ .
- b)  $3,1 \cdot 10^{-14} \text{ C}$ .
- c)  $6,3 \cdot 10^{-14} \text{ C}$ .
- d)  $3,1 \cdot 10^{-11} \text{ C}$ .
- e)  $1,1 \cdot 10^{-10} \text{ C}$ .



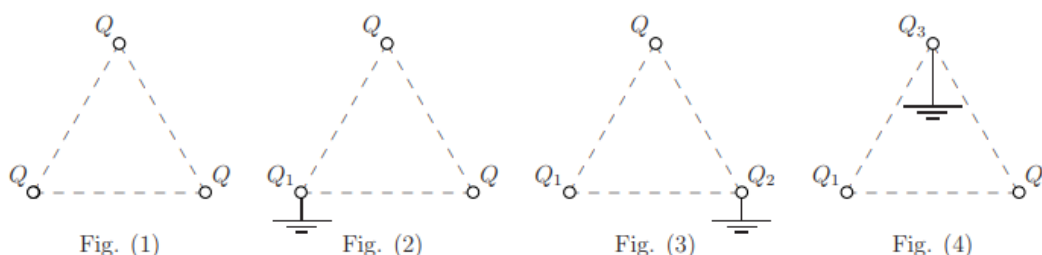
**17. (ITA-2009)**

Uma carga  $q$  distribui-se uniformemente na superfície de uma esfera condutora, isolada, de raio  $R$ . Assinale a opção que apresenta a magnitude do campo elétrico e o potencial elétrico num ponto situado a uma distância  $r = R/3$  do centro da esfera.

- a)  $E = 0 \text{ V/m}$  e  $U = 0 \text{ V}$
- b)  $E = 0 \text{ V/m}$  e  $U = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{R}$
- c)  $E = 0 \text{ V/m}$  e  $U = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{3q}{R}$
- d)  $E = 0 \text{ V/m}$  e  $U = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{qr}{R^2}$
- e)  $E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{qr}{R^3}$  e  $U = 0 \text{ V}$

**18. (ITA-2009)**

Três esferas condutoras, de raio  $a$  e carga  $Q$ , ocupam os vértices de um triângulo equilátero de lado  $b \gg a$ , conforme mostra a figura (1). Considere as figuras (2), (3) e (4), em que, respectivamente, cada uma das esferas se liga e desliga da Terra, uma de cada vez. Determine, nas situações (2), (3) e (4), a carga das esferas  $Q_1$ ,  $Q_2$  e  $Q_3$ , respectivamente, em função de  $a$ ,  $b$  e  $Q$ .



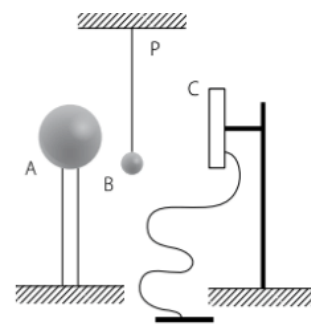
**19. (ITA-2010)**

Considere as cargas elétricas  $q_1 = 1\text{ C}$ , situada em  $x = -2\text{ m}$ , e  $q_2 = -2\text{ C}$ , situada em  $x = -8\text{ m}$ . Então, o lugar geométrico dos pontos de potencial nulo é

- uma esfera que corta o eixo  $x$  nos pontos  $x = -4\text{ m}$  e  $x = 4\text{ m}$ .
- uma esfera que corta o eixo  $x$  nos pontos  $x = -16\text{ m}$  e  $x = 16\text{ m}$ .
- um elipsoide que corta o eixo  $x$  nos pontos  $x = -4\text{ m}$  e  $x = 16\text{ m}$ .
- um hiperboloide que corta o eixo  $x$  no ponto  $x = -4\text{ m}$ .
- um plano perpendicular ao eixo  $x$  que o corta no ponto  $x = -4\text{ m}$ .

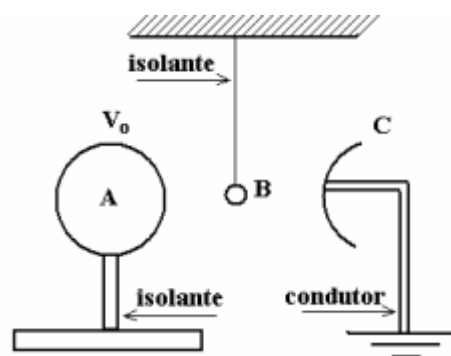
## 20. (IME – 79)

A figura mostra, esquematicamente, uma campainha eletrostática A e B são condutores esféricos, com diâmetros de  $20\text{ cm}$  e  $4\text{ cm}$ , respectivamente. B é suspenso de P por um fio isolante. A placa metálica C é ligada à Terra. A esfera A, carregada inicialmente a um potencial de  $50\text{ kv}$ , atrai B que, após o contato, é repelida e se choca com a placa C, descarregando-se. A operação se repete enquanto o potencial de A for superior a  $25\text{ kV}$ . Determine o número de vezes que B baterá em A.



## 21. (ITA – 2008)

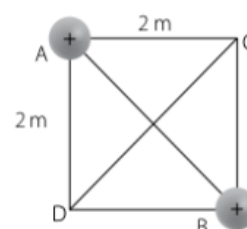
Considere um condutor esférico A de  $20\text{ cm}$  de diâmetro colocado sobre um pedestal fixo e isolante. Uma esfera condutora B de  $0,5\text{ mm}$  de diâmetro, do mesmo material da esfera A, é suspensa por um fio fixo e isolante. Em posição oposta à esfera A, é colocada uma campainha C ligada à terra, conforme mostra a figura. O condutor A é, então, carregado a um potencial eletrostático  $V_0$ , de forma a atrair a esfera B. As duas esferas entram em contato devido à indução eletrostática e, após a transferência de carga, a esfera B é repelida, chocando-se com a campainha C, onde a carga adquirida é escoada para a terra. Após 20 contatos com a campainha, verifica-se que o potencial da esfera A é de  $10\,000\text{ V}$ . Determine o potencial inicial da esfera A. Considere  $(1 + x)^n \cong 1 + nx$  se  $|x| < 1$



## 22.

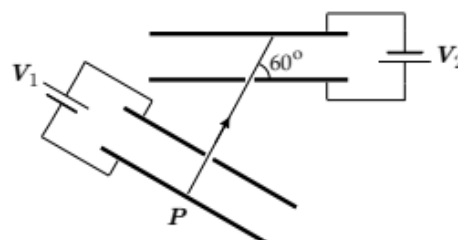
Na figura a seguir, temos um quadrado de lado  $2\text{ m}$ . Nos vértices A e B estão fixas duas cargas puntiformes idênticas  $+Q$ .

Determine a mínima energia potencial adquirida por uma carga  $+Q$ , puntiforme, colocada dentro do quadrado.



## 23. (ITA – 2020)

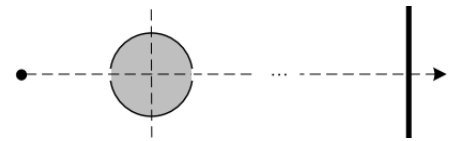
Um capacitor 1 de placas paralelas está submetido a uma d.d.p.  $V_1 = 12\text{ V}$ , e um capacitor 2, idêntico ao primeiro, a uma d.d.p.  $V_2$ . Um elétron em repouso parte do ponto P, atravessa um orifício no primeiro capacitor e adentra o segundo através de outro orifício, a  $60^\circ$  em relação à placa, conforme indica a figura. Desconsiderando a ação da gravidade, determine a d.d.p.  $V_2$  para que o elétron tangencie a placa superior do capacitor 2.





## 24. (IME – 2020)

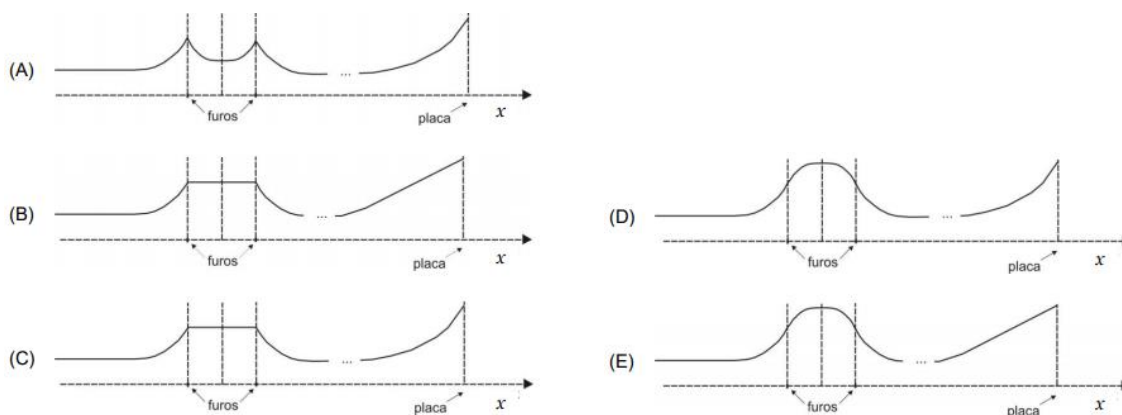
Uma partícula com carga positiva viaja em velocidade constante até aproximar-se de uma esfera oca com carga negativa uniformemente distribuída em sua casca. Ao encontrar a esfera, a partícula entra em seu interior por um pequeno furo, passa pelo centro e deixa a esfera por um segundo furo, prosseguindo o movimento. Bem distante da esfera, a partícula se aproxima de uma placa metálica plana de grande dimensão, com carga negativa uniformemente distribuída pela placa, conforme esquema da figura.



Observações:

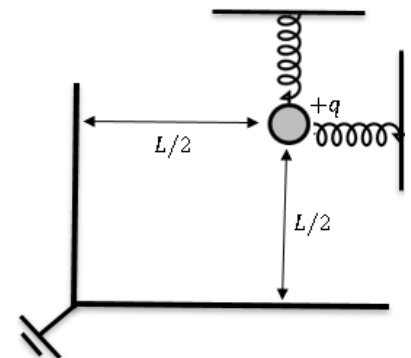
- a carga da partícula não redistribui a carga da casca esférica e nem da placa plana; e
- a distribuição das cargas da casca esférica e da placa plana não interferem entre si.

O gráfico que melhor exprime a velocidade da partícula em função de sua posição é:



## 25. (Simulado ITA 2ª fase)

Uma carga elétrica  $+q$  de massa  $m$  está em frente a uma associação de dois planos metálicos aterrados. O ângulo entre os planos é de  $90^\circ$ . A carga está presa por duas molas de mesma constante elástica. A mola vertical se mantém na vertical e a mola horizontal se mantém na horizontal. A permissividade elétrica do meio vale  $\epsilon_0$ . Determine a razão entre as elongações nas molas.



PRESTE MAIS  
ATENÇÃO!



## 7. Gabarito sem Comentários

1. D
2. A
3. C
4. E
5. D
6. D
7. C
8.  $V_2 = 1000 \text{ V}$
9. D
10. A
11. E
12. C
13. C
14. C
15. A
16. B
17. B
18.  $Q_1 = -\frac{2Qa}{b}$ ,  $Q_2 = \frac{Q \cdot a}{b} \left( \frac{2a}{b} - 1 \right)$  e  $Q_3 = \frac{Qa^2}{b^2} \left( 3 - \frac{2a}{b} \right)$
19. A
20. 4 vezes
21.  $V_0 = 10500 \text{ V}$
22.  $KQ^2$
23. 9 V
24. Sem alternativa
25.  $\frac{x}{y} = \frac{2q^2(2-\sqrt{2})}{16mg\pi\epsilon_0 L^2 - q^2(4-\sqrt{2})}$



ESCLARECENDO!



## 8. Lista de Exercícios Comentada

### 1. (ITA 1983)

Entre duas placas planas e paralelas, existe um campo elétrico uniforme. Devido a uma diferença de potencial  $V$  aplicada entre elas. Um feixe de elétrons é lançado entre as placas com velocidade inicial  $v_0$ . A massa do elétron é  $m$  e  $q$  é o módulo de sua carga elétrica.  $L$  é a distância horizontal que o elétron percorre para atingir uma das placas e  $d$  é a distância entre as placas.

Dados:  $v_0$ ,  $L$ ,  $d$  e  $V$ , a razão entre o módulo da carga e a massa do elétron  $\frac{q}{m}$  é dada por:

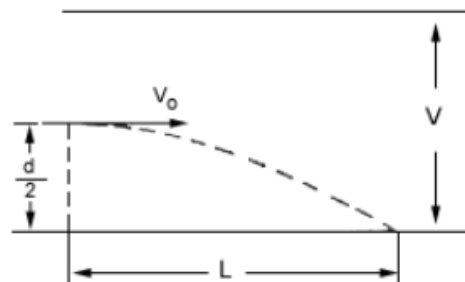
a)  $\frac{Vd}{Lv_0}$

b)  $\frac{2L^2v_0}{Vd}$

c)  $\frac{V^2L}{d^2v_0}$

d)  $\frac{d^2v_0^2}{VL^2}$

e)  $\frac{VL}{d^2v_0^2}$



#### Comentários:

O movimento do elétron é semelhante a um lançamento horizontal, de velocidade  $v_0$  e campo de aceleração vertical dado por:

$$g_{apa} = \frac{E_{ele}q}{m} = \frac{Vq}{md}$$

Lembrando da equação da parábola de um lançamento horizontal:

$$y(x) = -\frac{gx^2}{2v_0^2} \Rightarrow \frac{d}{2} = \frac{g_{apa}x^2}{2v_0^2} \Rightarrow \frac{q}{m} = \frac{d^2v_0^2}{L^2V}$$

#### Gabarito: D

### 2. (ITA-1971)

Um elétron de massa  $m$  e carga  $-q$  penetra com velocidade  $v_x = \text{constante}$  entre as placas de um capacitor plano. Neste há uma diferença de potencial  $V$  orientada de modo a fazer o elétron subir.

Deduza a expressão da componente  $v_y$  da velocidade que o elétron possui ao deixar o capacitor e assinale-a entre as opções abaixo. Despreze a atração gravitacional sobre o elétron.

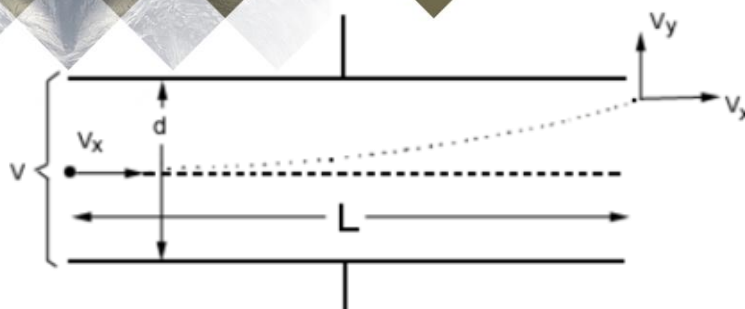
a)  $v_y = \frac{qVL}{mdv_x}$

b)  $v_y = \frac{q mL}{Vdv_x}$

c)  $v_y = v_x$

d)  $v_y = \frac{L}{d} \cdot v_x$

e) nenhuma das opções é correta.



### Comentários:

Aplicando  $F = ma$  ao elétron, na direção vertical, temos:

$$a = \frac{Eq}{m} = \frac{Vq}{md}$$

Como se trata de um movimento com aceleração constante, podemos escrever:

$$v_y = v_0 + at \Rightarrow v_y = \frac{Vqt_f}{md} \quad (eq.1)$$

O movimento horizontal tem velocidade constante, logo:

$$v_x = \frac{L}{t_f} \Rightarrow t_f = \frac{L}{v_x}$$

Substituindo (2) em (1), obtemos:

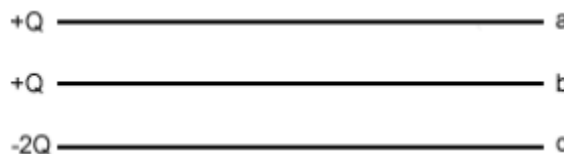
$$v_y = \frac{VqL}{mdv_x}$$

### Gabarito: A

#### 3. (ITA-1969)

Três superfícies planas circulares isoladas possuem cargas distribuídas conforme indica a figura:

Pode-se afirmar que:



a) O campo elétrico na região compreendida entre a e b é nulo.

b) O campo elétrico apresenta valores mínimos na região entre b e c.

c) No centro geométrico de b, o campo elétrico é equivalente àquele determinado pelas cargas de a e c.

d) Entre c e b o sentido do campo elétrico é de c para b.

e) Nenhuma das afirmações anteriores é correta.

### Comentários:

**a) Incorreto.** Como as placas são finitas temos o chamado efeito de bordas, de modo que as linhas de campo saindo das placas não são perpendiculares e, portanto, não se cancelam. Além disso, temos o campo gerado pela placa C, que contribui para que o campo elétrico resultante na região não seja nulo.

**b) Incorreto.** O campo tem intensidade crescente de c para b, logo não pode ter um mínimo naquele intervalo.

**c) Correto.** Considere uma porção arbitrária de b. Essa porção possuirá uma outra, simétrica em relação ao centro da superfície, de modo que o campo resultante desse par de cargas, no centro, é nulo. A superfície é composta por pares como o descrito acima, logo gera campo resultante nulo no centro.

**d) Incorreto.** Cargas negativas geram campos que apontam em sua direção e positivas, o oposto.

### Gabarito: C

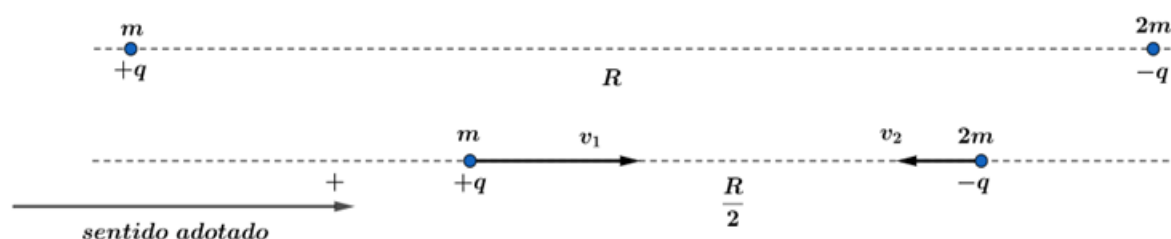
#### 4. (ITA – 81)

Uma partícula de massa  $m$  e outra de massa  $2m$  tem cargas elétricas  $q$  de mesmo módulo, mas de sinais opostos. Estando inicialmente separadas de uma distância  $R$ , são soltas a partir do repouso. Nestas condições, quando a distância entre as partículas for  $R/2$ , desprezando a ação gravitacional terrestre, se  $K = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ , pode-se afirmar que:

- a) Ambas terão a mesma velocidade  $v = q \left( \frac{K}{3mR} \right)^{1/2}$ .
- b) Ambas terão a mesma velocidade  $v = q \left( \frac{K}{mR} \right)^{1/2}$ .
- c) Ambas terão a mesma velocidade  $v = 2q \left( \frac{K}{3mR} \right)^{1/2}$ .
- d) uma terá velocidade  $v = q \left( \frac{K}{mR} \right)^{1/2}$  e a outra terá velocidade de  $v = 2q \left( \frac{K}{3mR} \right)^{1/2}$ .
- e) uma terá velocidade  $v = q \left( \frac{K}{3mR} \right)^{1/2}$  e a outra terá velocidade de  $v = 2q \left( \frac{K}{3mR} \right)^{1/2}$ .

#### Comentários:

Vamos fazer um desenho representativo do nosso sistema:



O sistema é isolado, já que não existe forças externas atuando nele e a força elétrica de atração as cargas é interna, podemos dizer que a quantidade de movimento do sistema se conserva, logo:

$$\vec{Q}_{antes} = \vec{Q}_{depois}$$

$$m \cdot 0 + m \cdot 0 = m \cdot v_1 - 2m \cdot v_2 \Rightarrow \boxed{v_1 = 2v_2} \text{ eq 1}$$

Dado que o sistema é conservativo, temos que a energia mecânica se conserva, portanto:

$$(E_M)_{antes} = (E_M)_{depois}$$

$$\frac{Kq(-q)}{R} = \frac{1}{2}mv_1^2 + \frac{1}{2}2mv_2^2 + \frac{Kq(-q)}{\frac{R}{2}} \text{ eq 2}$$

Substituindo 1 em 2 e manipulando algebricamente, temos que:

$$\frac{Kq^2}{R} = 3mv_2^2 \Rightarrow v_2 = q \sqrt{\frac{K}{3mR}} \therefore v_1 = 2v_2 = 2q \sqrt{\frac{K}{3mR}}$$

**Gabarito: E**

### 5. (ITA-1985)

Uma esfera condutora de raio  $0,50 \text{ cm}$  é elevada a um potencial de  $10,0V$ . Uma segunda esfera, bem afastada da primeira, tem raio  $1,00 \text{ cm}$  e está ao potencial  $15,0V$ . Elas são ligadas por um fio de capacitância desprezível. Sabendo-se que o meio no qual a experiência é realizada é homogêneo e isotrópico, podemos afirmar que os potenciais finais das esferas serão:

- a)  $12,5V$  e  $12,5V$ .
- b)  $8,33V$  para a primeira e  $16,7V$  para a segunda.
- c)  $16,7V$  para a primeira e  $8,33V$  para a segunda.
- d)  $13,3V$  e  $13,3V$ .
- e) Zero para a primeira e  $25,0V$  para a segunda.

**Comentários:**

Calculando a carga na primeira esfera:

$$V_1 = \frac{kQ_1}{r_1} \Rightarrow Q_1 = \frac{r_1 V_1}{k} \quad (\text{eq. 1}) (r_1 = 0,5 \text{ cm})$$

Do mesmo modo:

$$Q_2 = \frac{r_2 V_2}{k} \quad (\text{eq. 2}) (r_2 = 1 \text{ cm})$$

Quando as duas são ligadas a carga se distribui de modo que as duas esferas possuam o mesmo potencial:

$$V_f = \frac{kQ'_1}{r_1} = \frac{kQ'_2}{r_2} \Rightarrow Q'_1 = \frac{r_1 V_f}{k} \quad (\text{eq. 3}) \text{ e } Q'_2 = \frac{r_2 V_f}{k} \quad (\text{eq. 4})$$

A carga total do sistema se mantém constante:

$$Q = Q_1 + Q_2 = Q'_1 + Q'_2 \quad (\text{eq. 5})$$

Substituindo (1), (2), (3) e (4) em (5), obtemos:

$$\frac{r_1 V_1}{k} + \frac{r_2 V_2}{k} = \frac{r_1 V_f}{k} + \frac{r_2 V_f}{k} \Rightarrow V_f = \frac{r_1 V_1 + r_2 V_2}{r_1 + r_2}$$

$$V_f = \frac{0,5 \cdot 10 + 1 \cdot 1,5}{1,5} = \frac{20}{1,5} = 13,3 \text{ V}$$

**Gabarito: D**

## 6. (ITA-1986)

Duas esferas metálicas,  $A$  e  $B$ , de raios  $R$  e  $3R$ , respectivamente, são postas em contato. Inicialmente  $A$  possui carga elétrica positiva  $+2Q$  e  $B$ , carga  $-Q$ . Após atingir o equilíbrio eletrostático, as novas cargas de  $A$  e  $B$  passam a ser, respectivamente:

- a)  $Q/2, Q/2$ .                      b)  $3Q/4, Q/4$ .                      c)  $3Q/2, Q/2$ .  
d)  $Q/4, 3Q/4$ .                      e)  $4Q/3$  e  $-Q/3$ .

**Comentários:**

Quando as duas são postas em contato a carga se distribui de modo que as duas esferas possuam o mesmo potencial:

$$V_f = \frac{kQ'_A}{r_A} = \frac{kQ'_B}{r_B} \Rightarrow Q'_B = \frac{r_B}{r_A} Q'_A = 3Q'_A \quad (eq.1)$$

A carga total do sistema se mantém constante:

$$Q_{tot} = 2Q + (-Q) = Q'_A + Q'_B \quad (eq.2)$$

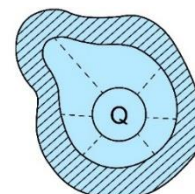
Substituindo (1) em (2), obtemos:

$$Q = Q'_A + 3Q'_A \Rightarrow Q'_A = \frac{Q}{4} \therefore Q'_B = 3Q'_A = \frac{3Q}{4}$$

**Gabarito: D**

## 7. (ITA-1987)

A figura representa um condutor oco e um condutor de forma esférica dentro da cavidade do primeiro, ambos em equilíbrio eletrostático. Sabe-se que o condutor interno tem carga  $+Q$ .



Pode-se afirmar que:

- a) Não há campo elétrico dentro da cavidade.
- b) As linhas de força dentro da cavidade são retas radiais em relação à esfera, como na figura.
- c) A carga da superfície interna do condutor oco é  $-Q$  e as linhas de força são perpendiculares a essa superfície.
- d) A carga da superfície interna do condutor oco é  $-Q$  e as linhas de força são tangenciais a essa superfície.

e) Não haverá diferença de potencial entre os dois condutores se a carga do condutor oco também for igual a  $Q$ .

**Comentários:**

a) **Incorreto.** Usando a Lei de Gauss:

$$\sum_{\Omega} \vec{E} \cdot \Delta \vec{s} = \frac{q_{\text{interna}}}{\epsilon_0}$$

Usando qualquer gaussiana  $\Omega$  cobrindo  $Q$  e contida na cavidade do condutor oco, chegamos em:

$$\sum_{\Omega(Q)} \vec{E} \cdot \Delta \vec{s} = \frac{Q}{\epsilon_0} > 0 \Rightarrow \vec{E} \neq 0$$

b) **Incorreto.** As linhas de força devem chegar perpendiculares à superfície interna do condutor.

c) **Correto.** O campo dentro do condutor em equilíbrio é nulo, assim, usando a Lei de Gauss com qualquer gaussiana  $\Omega$  que esteja inteiramente no seu interior resulta em:

$$\sum_{\Omega} \vec{E} \cdot \Delta \vec{s} = \frac{q_{\text{interna}}}{\epsilon_0}$$

$$0 = +Q + q_{\text{condutor,int}} \Rightarrow q_{\text{condutor,int}} = -Q$$

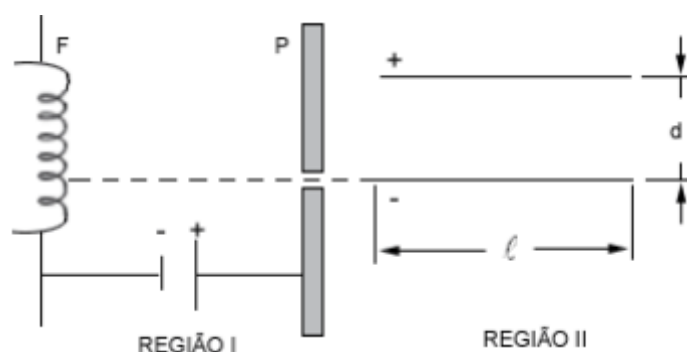
d) **Incorreto.** As linhas são perpendiculares.

e) **Incorreto.** Note que o argumento usado em a) independe da carga total do condutor, logo haverá campo entre a carga no centro e a superfície interna do condutor, o que garante uma diferença de potencial não nula.

**Gabarito: C**

**8. (ITA-1987)**

Numa experiência de laboratório, elétrons são emitidos por um filamento metálico  $F$ , com velocidade inicial praticamente nula. Eles são acelerados através da região  $I$  por uma diferença de potencial de  $25 \times 10^3 \text{ V}$ , aplicada entre  $F$  e a placa perfurada  $P$ . Eles emergem do furo da placa com velocidade horizontal e penetram na região  $II$ , onde são obrigados a atravessar o campo elétrico uniforme de um capacitor cujas placas têm comprimento  $l = 5,0 \text{ cm}$  e estão separadas por uma distância  $d = 0,50 \text{ cm}$ , conforme a figura. Qual é o máximo valor da tensão  $V_2$  entre as placas do capacitor que ainda permite que algum elétron atinja a região  $III$  onde não há campo elétrico?





### Comentários:

Note que estamos tratando de um movimento análogo a um lançamento horizontal, com campo gravitacional  $a_y$  e eixo  $y$  invertido. A equação da parábola para tal movimento é dada por:

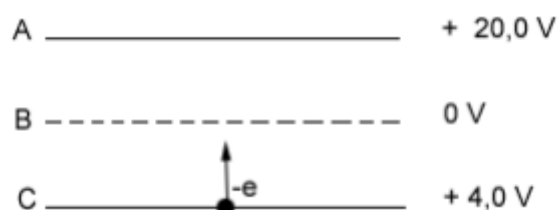
$$y(x) = \frac{g_{ap} x^2}{2v_x^2} \Rightarrow d = \frac{\left(\frac{V_{II} q}{md}\right) l^2}{2 \left(\frac{2V_I q}{m}\right)}$$

$$V_{II} = 4V_I \left(\frac{d}{l}\right)^2 = 4 \cdot 25 \cdot 10^3 \left(\frac{1}{10}\right)^2 = 1000 \text{ V}$$

**Gabarito:  $V_2 = 1000 \text{ V}$**

### 9. (ITA-1988)

A, B e C são superfícies que se acham, respectivamente, a potenciais +20V, 0V e +4,0V. Um elétron é projetado a partir da superfície C no sentido ascendente com uma energia cinética inicial de 9,0 eV. (Um elétron-volt é a energia adquirida por um elétron quando submetido a uma diferença de potencial de um volt). A superfície B é porosa e permite a passagem de elétrons. Podemos afirmar que:



- Na região entre C e B o elétron será acelerado pelo campo elétrico até atingir a superfície B com energia cinética de 33,0 eV. Uma vez na região entre B e A, será desacelerado, atingindo a superfície A com energia cinética de 13,0 eV.
- Entre as placas C e B o elétron será acelerado atingindo a placa B com energia cinética igual a 13,0 eV, mas não atinge a placa A.
- Entre C e B o elétron será desacelerado pelo campo elétrico aí existente e não atingirá a superfície B.
- Na região entre C e B o elétron será desacelerado, mas atingirá a superfície B com energia cinética de 5,0 eV. Ao atravessar B, uma vez na região entre B e A será acelerado, até atingir a superfície A com uma energia cinética de 25,0 eV.
- Entre as placas C e B o elétron será desacelerado, atingindo a superfície B com energia cinética de 5,0 eV. Uma vez na região entre B e A, será desacelerado, até atingir a superfície A com energia cinética de 15,0 eV.

### Comentários:

Utilizando o teorema da energia cinética, podemos determinar a energia cinética na superfície B:

$$(T_{F_{ele}})_{C \rightarrow B} = (-e) \cdot (V_C - V_B) = \Delta E_c = (E_c)_B - (E_c)_C$$

$$(-e)(4 - 0) = (E_c)_B - 9 \text{ eV}$$

$$(E_c)_B = 5 \text{ eV}$$

Novamente, pelo teorema da energia cinética, temos que a energia cinética com que o elétron chegará na placa é de:

$$(\tau_{F_{ele}})_{B \rightarrow A} = (-e) \cdot (V_B - V_A) = \Delta E_c = (E_c)_A - (E_c)_B$$

$$(-e) \cdot (0 - 20) = (E_c)_A - 5 \text{ eV}$$

$$(E_c)_A = 25 \text{ eV}$$

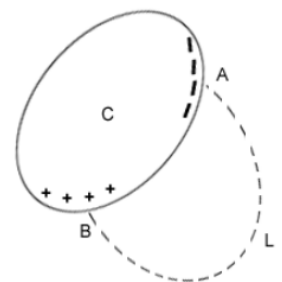
**Gabarito: D**

### 10. (ITA-1988)

Na figura, C é um condutor em equilíbrio eletrostático, que se encontra próximo de outros objetos eletricamente carregados. Considere a curva tracejada L que une os pontos A e B da superfície do condutor.

Podemos afirmar que:

- a) A curva L não pode representar uma linha de força do campo elétrico.
- b) A curva L pode representar uma linha de força, sendo que o ponto B está a um potencial mais baixo que o ponto A.
- c) A curva L pode representar uma linha de força, sendo que o ponto B está a um potencial mais alto que o ponto A.
- d) A curva L pode representar uma linha de força, desde que L seja ortogonal à superfície do condutor nos pontos A e B.
- e) A curva L pode representar uma linha de força, desde que a carga total do condutor seja nula.



**Comentários:**

Um condutor em equilíbrio eletrostático apresenta o mesmo potencial em toda sua extensão. Assuma, por absurdo, que existe uma linha de força ligando dois pontos, A e B, desse condutor. Considere uma região bem pequena dessa linha, de comprimento  $\Delta l$ , de modo que podemos considerar a direção do campo constante nesse trecho:

$$\Delta V = -E \Delta l$$

A linha como um todo pode ser considerar uma soma de trechos, logo:

$$\sum \Delta V = -E \sum \Delta l = -El \neq 0$$

O que é um absurdo, pois não existe diferença de potencial entre os pontos do condutor.

**Gabarito: A**

### 11. (ITA-1990)

Um condutor esférico oco, isolado, de raio R, tem no seu interior uma pequena esfera de raio  $r < R$ . O sistema está inicialmente neutro. Eletriza-se a pequena esfera com carga positiva. Uma vez atingido o equilíbrio eletrostático, pode-se afirmar que:

- a) A carga elétrica na superfície externa do condutor é nula.
- b) A carga elétrica na superfície interna do condutor é nula.
- c) O campo elétrico no interior do condutor é nulo.
- d) O campo elétrico no exterior do condutor é nulo.
- e) Todas as afirmativas acima estão erradas.

**Comentários:**

a) **Incorreto.** Veja b).

b) **Incorreto.** O campo dentro do condutor em equilíbrio é nulo, assim, usando a Lei de Gauss com qualquer gaussiana  $\Omega$  que esteja inteiramente no seu interior resulta em:

$$\sum_{\Omega} \vec{E} \cdot \Delta \vec{S} = \frac{q_{\text{interna}}}{\epsilon_0}$$

$$0 = +Q + q_{\text{condutor,int}} \Rightarrow q_{\text{condutor,int}} = -Q$$

Como o condutor externo é neutro, temos:

$$q_{\text{condutor,int}} + q_{\text{condutor,ext}} = 0 \Rightarrow q_{\text{condutor,ext}} = Q$$

Logo, não é nula a carga na superfície interna, nem na superfície externa, como mostrada a indução, utilizando a Lei de Gauss.

c) **Incorreto.** Usando a Lei de Gauss:

$$\sum_{\Omega} \vec{E} \cdot \Delta \vec{S} = \frac{q_{\text{interna}}}{\epsilon_0}$$

Usando qualquer gaussiana  $\Omega$  cobrindo  $Q$  e contida na cavidade do condutor oco, chegamos em:

$$\sum_{\Omega(Q)} \vec{E} \cdot \Delta \vec{S} = \frac{Q}{\epsilon_0} > 0 \Rightarrow \vec{E} \neq 0$$

Notamos que na região entre a casca esférica e a esfera menor, existe um campo elétrico não-nulo. O ITA fez uma pegadinha nesse item.

d) **Incorreto.** Usando a Lei de Gauss:

$$\sum_{\Omega} \vec{E} \cdot \Delta \vec{S} = q_{\text{interna}}$$

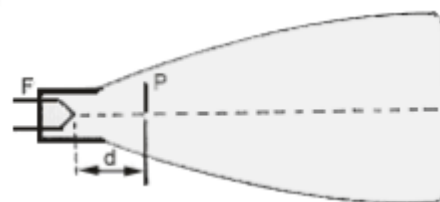
Usando qualquer gaussiana  $\Omega$  cobrindo o condutor oco, chegamos em:

$$\sum_{\Omega(Q)} \vec{E} \cdot \Delta \vec{S} = Q + q_{\text{condutor,int}} + q_{\text{condutor,ext}} = Q > 0 \Rightarrow \vec{E} \neq 0$$

**Gabarito: E**

## 12. (ITA-1990)

Num tubo de raios catódicos tem-se um filamento F que libera elétrons quando aquecido, e uma placa aceleradora P que é mantida a um potencial mais alto que o filamento. O filamento fica a uma distância  $d$  da placa. A placa tem, ainda, um orifício que permite a passagem dos elétrons que vão se chocar com uma tela que fica fluorescente quando os mesmos a atingem.



Nestas condições:

- a) Se aumentarmos a distância  $d$  entre o filamento e a placa, a energia cinética com que os elétrons chegam à placa aumenta.
- b) O aumento da distância  $d$  faz com que a energia cinética dos elétrons diminua.
- c) A energia cinética dos elétrons não depende da distância entre o filamento e a placa, mas só da diferença de potencial  $U$  entre o filamento e a placa aceleradora.
- d) A energia cinética dos elétrons só depende da temperatura do filamento.
- e) Nenhuma das alternativas anteriores é verdadeira.

**Comentários:**

Como a única força que atua nos elétrons é a força elétrica e ela é conservativa, podemos usar o teorema da energia cinética nesse caso:

$$\tau_{F_{ele}} = \Delta E_c$$

Onde o trabalho da força elétrica pode ser dado por:

$$\tau_{F_{ele}} = q(V_F - V_P)$$

Portanto:

$$q(V_F - V_P) = \frac{1}{2}mv_{final}^2 - \frac{1}{2}mv_{inicial}^2$$

O enunciado deixa claro que o potencial da placa P é maior que o potencial do filamento, como esperado, os elétrons (cargas negativas) procuram, espontaneamente, potenciais maiores.

- a) **Incorreto.** Como vimos, a velocidade final dos elétrons ao chegar na placa não depende da distância  $d$ .
- b) **Incorreto.** Novamente, a distância  $d$  não interfere na variação da energia cinética dos elétrons.
- c) **Correto.** Como mostramos a variação da energia cinética dos elétrons é função exclusiva da diferença de potencial das placas:

$$\frac{1}{2}mv_{final}^2 - \frac{1}{2}mv_{inicial}^2 = q(V_F - V_P)$$

- d) **Incorreto.** Conforme vimos no item c.

e) **Incorreto.** O item c está correto.

**Gabarito: C**

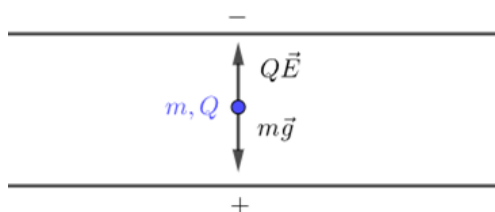
**13. (ITA-1993)**

Entre as armaduras de um capacitor plano com placas horizontais, existe uma diferença de potencial  $V$ . A separação entre as armaduras é  $d$ . Coloca-se uma pequena carga  $Q > 0$ , de massa  $m$  entre as armaduras e esta fica em equilíbrio. A aceleração da gravidade é  $g$ . Qual é o valor da carga  $Q$ ?

- a)  $Q = mgd^{-1}/V$ .                      b)  $Q = Vd/m$ .                      c)  $Q = mgd/V$ .  
d)  $Q = Vgd/m$ .                      e)  $Q = gd/Vm$ .

**Comentários:**

Nessa configuração temos um campo uniforme e perpendicular às placas do capacitor. Equilibrando as forças agindo na carga:

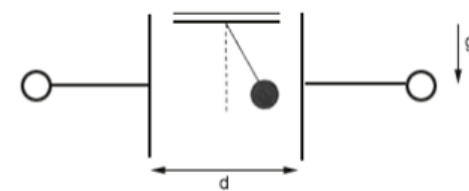


$$F_{ele} = \text{Peso} \Rightarrow Eq = mg \Rightarrow \boxed{Q = \frac{mgd}{V}}$$

**Gabarito: C**

**14. (ITA-2001)**

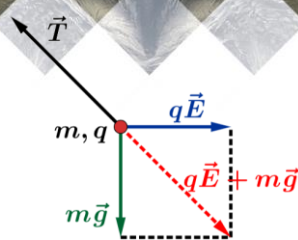
Uma esfera de massa  $m$  e carga  $q$  está suspensa por um fio frágil e inextensível, feito de um material eletricamente isolante. A esfera se encontra entre as placas paralelas de um capacitor plano, como mostra a figura. A distância entre as placas é  $d$ , a diferença de potencial entre as mesmas é  $V$  e o esforço máximo que o fio pode suportar é igual ao quádruplo do peso da esfera. Para que a esfera permaneça imóvel, em equilíbrio estável, é necessário que:



- a)  $\left(\frac{qV}{d}\right)^2 \leq 15 mg$                       b)  $\left(\frac{qV}{d}\right)^2 \leq 4 (mg)^2$                       c)  $\left(\frac{qV}{d}\right)^2 \leq 15 (mg)^2$   
d)  $\left(\frac{qV}{d}\right)^2 \geq 15 mg$                       e)  $\left(\frac{qV}{d}\right)^2 \leq 16 (mg)^2$

**Comentários:**

Considere o esquema de forças agindo sobre a carga:



Pelo equilíbrio, temos:

$$\vec{T} = q\vec{E} + m\vec{g} \Rightarrow T^2 = (mg)^2 + (qE)^2$$

Lembrando que esforço máximo é tal que  $T \leq 4mg$ , então:

$$(qE)^2 \leq 15(mg)^2 \Rightarrow \left(\frac{qV}{d}\right)^2 \leq 15(mg)^2$$

**Gabarito: C**

### 15. (ITA-2002)

Uma esfera metálica isolada, de raio  $R_1 = 10,0 \text{ cm}$  é carregada no vácuo até atingir o potencial  $U = 9,0V$ . Em seguida, ela é posta em contato com outra esfera metálica isolada, de raio  $R_2 = 5,0 \text{ cm}$ , inicialmente neutra. Após atingir o equilíbrio eletrostático, qual das alternativas melhor descreve a situação física? É dado que  $\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9,0 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$ .

- a) A esfera maior terá uma carga de  $0,66 \cdot 10^{-10} \text{ C}$ .
- b) A esfera maior terá um potencial de  $4,5V$ .
- c) A esfera menor terá uma carga de  $0,66 \cdot 10^{-10} \text{ C}$ .
- d) A esfera menor terá um potencial de  $4,5V$ .
- e) A carga total é igualmente dividida entre as duas esferas.

**Comentários:**

Calculando a carga na primeira esfera:

$$V_1 = \frac{kQ_1}{R_1} \Rightarrow Q_1 = \frac{R_1 V_1}{k} \quad (\text{eq. 1}) (R_1 = 10 \text{ cm})$$

Quando as duas são ligadas a carga se distribui de modo que as duas esferas possuam o mesmo potencial:

$$V_f = \frac{kQ'_1}{R_1} = \frac{kQ'_2}{R_2} \Rightarrow Q'_1 = \frac{R_1 V_f}{k} \quad (\text{eq. 2}) \text{ e } Q'_2 = \frac{R_2 V_f}{k} \quad (\text{eq. 3})$$

Pelo Princípio da Conservação das Cargas, temos:

$$Q = Q_1 = Q'_1 + Q'_2 \quad (\text{eq. 4})$$

Substituindo (1), (2), (3) em (4), obtemos:



$$\frac{R_1 U}{k} = \frac{R_1 V_f}{k} + \frac{R_2 V_f}{k} \Rightarrow V_f = \frac{R_1 U}{R_1 + R_2} \Rightarrow V_f = \frac{2}{3} 9 = 6 \text{ V} \quad (eq.5)$$

Substituindo (5) em (2) e (3), obtemos:

$$Q_1 = 0,66 \cdot 10^{-10} \text{ C} \quad (\text{gabarito})$$

$$Q_2 = 0,33 \cdot 10^{-10} \text{ C}$$

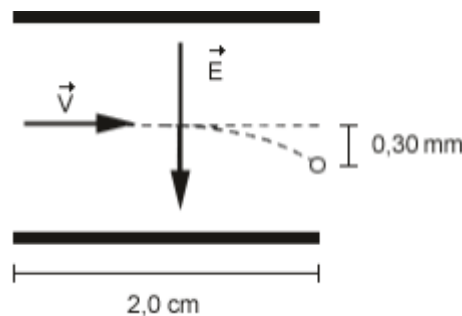
### Gabarito: A

#### 16. (ITA-2005)

Em uma impressora a jato de tinta, gotas de certo tamanho ejetadas de um pulverizador em movimento, passam por uma unidade eletrostática onde perdem alguns elétrons, adquirindo uma carga  $q$ , e, a seguir, deslocam-se no espaço entre placas planas paralelas eletricamente carregadas, pouco antes da impressão. Considere gotas de raio  $10 \mu\text{m}$  lançadas com velocidade de módulo  $v = 20 \text{ m/s}$  entre as placas de comprimento igual a  $2,0 \text{ cm}$ , no interior das quais existe um campo elétrico uniforme de módulo  $E = 8,0 \times 10^4 \text{ N/C}$ , como mostra a figura.

Considerando que a densidade da gota seja  $1000 \text{ kg/m}^3$  e sabendo-se que a mesma sofre um desvio de  $0,30 \text{ mm}$  ao atingir o final do percurso, o módulo de sua carga elétrica é de:

- a)  $2,0 \cdot 10^{-14} \text{ C}$ .
- b)  $3,1 \cdot 10^{-14} \text{ C}$ .
- c)  $6,3 \cdot 10^{-14} \text{ C}$ .
- d)  $3,1 \cdot 10^{-11} \text{ C}$ .
- e)  $1,1 \cdot 10^{-10} \text{ C}$ .



#### Comentário:

Aplicando  $F = ma$  à gota, temos:

$$a_y = \frac{Eq}{m} \quad (1) (\text{para baixo})$$

O movimento é análogo a um lançamento horizontal com campo gravitacional igual a (1). A equação da parábola para lançamentos horizontais é dada por:

$$y(x) = y_0 - \frac{gx^2}{2v_0^2} \Rightarrow \Delta y = -\frac{g_{\text{apa}} x^2}{2v^2} \Rightarrow h_{\text{final}} = \frac{\left(\frac{Eq}{m}\right) l_{\text{placa}}^2}{2v^2}$$

$$q = \frac{2h_{\text{final}} v^2 m}{E l_{\text{placa}}^2} = \frac{2h_{\text{final}} v^2 (\rho_{\text{gota}} \cdot \frac{4}{3} \pi r_{\text{gota}}^3)}{E l_{\text{placa}}^2}$$

$$\boxed{q = \pi \cdot 10^{-14} \text{ C}}$$

### Gabarito: B

#### 17. (ITA-2009)

#### Potencial elétrico e energia potencial eletrostática

Uma carga  $q$  distribui-se uniformemente na superfície de uma esfera condutora, isolada, de raio  $R$ . Assinale a opção que apresenta a magnitude do campo elétrico e o potencial elétrico num ponto situado a uma distância  $r = R/3$  do centro da esfera.

- a)  $E = 0 \text{ V/m}$  e  $U = 0 \text{ V}$       b)  $E = 0 \text{ V/m}$  e  $U = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q}{R}$   
 c)  $E = 0 \text{ V/m}$  e  $U = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{3q}{R}$       d)  $E = 0 \text{ V/m}$  e  $U = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{qr}{R^2}$   
 e)  $E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{qr}{R^3}$  e  $U = 0 \text{ V}$

**Comentários:**

Usando a Lei de Gauss com qualquer gaussiana esférica de raio menor que  $R$ , temos:

$$\sum_{\Omega(r)} \vec{E} \cdot \Delta \vec{s} = \frac{q_{\text{interna}}}{\epsilon_0} = 0$$

Pela simetria do problema teremos um campo radial, que é constante em variações angulares, ou seja,  $E = E(r)$ . Logo o produto escalar acima se torna:

$$\sum_{\Omega(r)} E(r) \cdot \Delta s = E(r) \cdot S(\Omega(r)) = 0 \Rightarrow E(r) = 0, \forall r < R$$

Como não há linhas de campo entre um ponto de raio  $r$  e o centro do condutor, o potencial desses é o mesmo. Calculando o potencial no centro do condutor esférico: (todas as cargas têm a mesma distância ao centro)

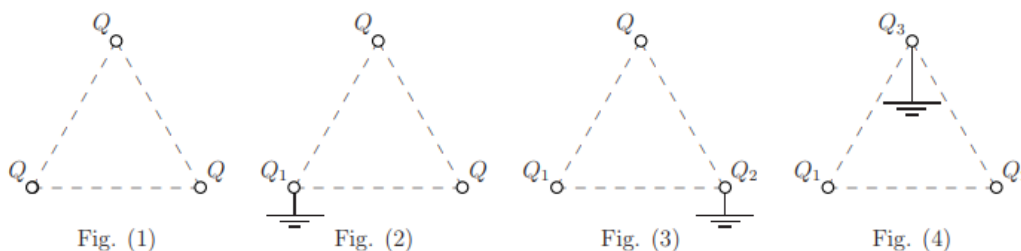
$$V_{\text{cond}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{R} = V(r)$$

Resultado já esperado, uma vez que o campo no interior de um condutor maciço é constante e o campo elétrico é nulo.

**Gabarito: B**

**18. (ITA-2009)**

Três esferas condutoras, de raio  $a$  e carga  $Q$ , ocupam os vértices de um triângulo equilátero de lado  $b \gg a$ , conforme mostra a figura (1). Considere as figuras (2), (3) e (4), em que, respectivamente, cada uma das esferas se liga e desliga da Terra, uma de cada vez. Determine, nas situações (2), (3) e (4), a carga das esferas  $Q_1$ ,  $Q_2$  e  $Q_3$ , respectivamente, em função de  $a$ ,  $b$  e  $Q$ .



**Comentários:**

Em (2) o condutor ligado à Terra deve ter potencial nulo, logo:

$$V_1 = \frac{kQ_1}{a} + \frac{kQ}{b} + \frac{kQ}{b} = 0 \Rightarrow Q_1 = \frac{2aQ}{b}$$

Em (3) o condutor ligado à Terra deve ter potencial nulo, assim:

$$V_2 = \frac{kQ_2}{a} + \frac{kQ_1}{b} + \frac{kQ}{b} = 0 \Rightarrow Q_2 = -\frac{aQ}{b} \left(1 - \frac{2a}{b}\right)$$

Do mesmo modo, em (4) o condutor ligado à Terra deve ter potencial nulo:

$$V_3 = \frac{kQ_3}{a} + \frac{kQ_2}{b} + \frac{kQ_1}{b} = 0 \Rightarrow Q_3 = \frac{Qa^2}{b^2} \left(3 - \frac{2a}{b}\right)$$

**Gabarito:**  $Q_1 = -\frac{2Qa}{b}$ ,  $Q_2 = \frac{Q \cdot a}{b} \left(\frac{2a}{b} - 1\right)$  e  $Q_3 = \frac{Qa^2}{b^2} \left(3 - \frac{2a}{b}\right)$

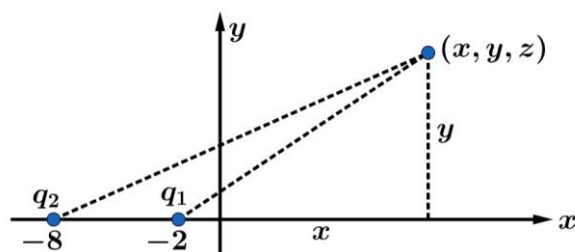
### 19. (ITA-2010)

Considere as cargas elétricas  $q_1 = 1 \text{ C}$ , situada em  $x = -2 \text{ m}$ , e  $q_2 = -2 \text{ C}$ , situada em  $x = -8 \text{ m}$ . Então, o lugar geométrico dos pontos de potencial nulo é

- uma esfera que corta o eixo  $x$  nos pontos  $x = -4 \text{ m}$  e  $x = 4 \text{ m}$ .
- uma esfera que corta o eixo  $x$  nos pontos  $x = -16 \text{ m}$  e  $x = 16 \text{ m}$ .
- um elipsoide que corta o eixo  $x$  nos pontos  $x = -4 \text{ m}$  e  $x = 16 \text{ m}$ .
- um hiperboloide que corta o eixo  $x$  no ponto  $x = -4 \text{ m}$ .
- um plano perpendicular ao eixo  $x$  que o corta no ponto  $x = -4 \text{ m}$ .

#### Comentários:

Calculando o potencial de um ponto arbitrário  $(x, y, z)$  (considere o eixo  $z$  saindo do plano da folha):



$$V(x, y) = \frac{kq_1}{\sqrt{(2+x)^2 + y^2 + z^2}} + \frac{kq_2}{\sqrt{(8+x)^2 + y^2 + z^2}} = 0$$

$$\sqrt{(8+x)^2 + y^2 + z^2} = 2\sqrt{(2+x)^2 + y^2 + z^2}$$

$$(8+x)^2 + y^2 + z^2 = 4[(2+x)^2 + y^2 + z^2]$$

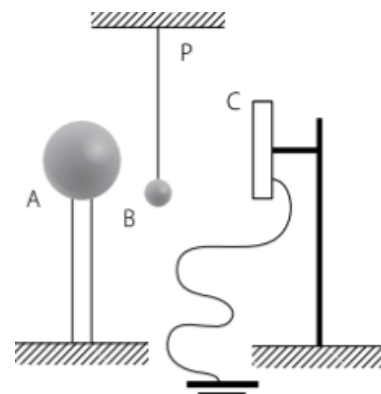
$$3x^2 + 3y^2 + 3z^2 = 48 \Rightarrow \boxed{x^2 + y^2 + z^2 = 16}$$

A equação representa uma esfera centrada em  $(0,0,0)$  de raio 4, cortando o eixo  $x$  em 4 e  $-4$ .

**Gabarito: A**

**20. (IME – 79)**

A figura mostra, esquematicamente, uma campainha eletrostática A e B são condutores esféricos, com diâmetros de 20cm e 4 cm, respectivamente. B é suspenso de P por um fio isolante. A placa metálica C é ligada à Terra. A esfera A, carregada inicialmente a um potencial de 50kV, atrai B que, após o contato, é repelida e se choca com a placa C, descarregando-se. A operação se repete enquanto o potencial de A for superior a 25 kV. Determine o número de vezes que B baterá em A.



**Comentários:**

Calculando a carga inicial de A:

$$V_A = \frac{kQ_A}{R_A} \quad (eq. 1) \Rightarrow Q_A = \frac{V_A R_A}{k} \quad (eq. 2)$$

Quando A e B entram em contato, seus potenciais se igualam:

$$V = \frac{kQ'_A}{R_A} = \frac{kQ'_B}{R_B} \quad (eq. 3) \Rightarrow \frac{Q'_A}{R_A} = \frac{Q'_B}{R_B} \quad (eq. 4)$$

Por conservação de carga, temos:

$$Q'_A + Q'_B = Q_A$$

Usando (4):

$$Q'_A + \frac{R_B}{R_A} Q'_A = Q_A \Rightarrow Q'_A = \left( \frac{R_A}{R_A + R_B} \right) Q_A$$

Note que a carga  $Q_A$  pode ser trata como a carga inicial antes de qualquer colisão (não necessariamente a primeira) e  $Q'_A$  a carga após a colisão, logo cada colisão multiplica a carga de A pelo fator mostrado. Assim, após  $n$  colisões a carga de A será:

$$Q_A(n) = \left( \frac{R_A}{R_A + R_B} \right)^n Q_A$$

Queremos a colisão que deixará A com um potencial menor que 25 kV:

$$V < 25 \text{ kV}$$

$$\frac{kQ_A(n)}{R_A} < 25 \Rightarrow \frac{kQ_A}{R_A} \left( \frac{R_A}{R_A + R_B} \right)^n < 25$$

Por (1), temos:

$$V_A \left( \frac{R_A}{R_A + R_B} \right)^n < 25 \Rightarrow \left( \frac{20}{24} \right)^n < \frac{1}{2} \Rightarrow n \geq 4$$

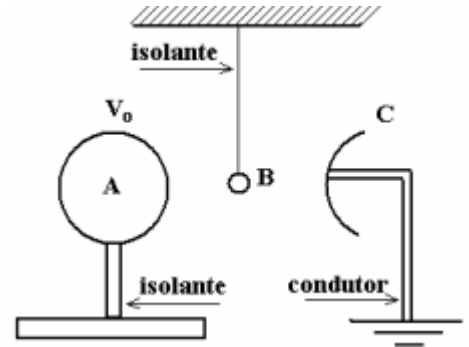
Após a primeira colisão que satisfaz a desigualdade não haverá outras, logo:

$$n = 4 \text{ colisões}$$

### Gabarito: 4 vezes

#### 21. (ITA – 2008)

Considere um condutor esférico A de 20cm de diâmetro colocado sobre um pedestal fixo e isolante. Uma esfera condutora B de 0,5mm de diâmetro, do mesmo material da esfera A, é suspensa por um fio fixo e isolante. Em posição oposta à esfera A, é colocada uma campainha C ligada à terra, conforme mostra a figura. O condutor A é, então, carregado a um potencial eletrostático  $V_0$ , de forma a atrair a esfera B. As duas esferas entram em contacto devido à indução eletrostática e, após a transferência de carga, a esfera B é repelida, chocando-se com a campainha C, onde a carga adquirida é escoada para a terra. Após 20 contatos com a campainha, verifica-se que o potencial da esfera A é de 10 000 V. Determine o potencial inicial da esfera A. Considere  $(1 + x)^n \cong 1 + nx$  se  $|x| < 1$



#### Comentários:

Calculando a carga inicial de A:

$$V_0 = \frac{kQ_A}{R_A} \quad (eq. 1) \Rightarrow Q_A = \frac{V_0 R_A}{k} \quad (eq. 2)$$

Quando A e B entram em contato, seus potenciais se igualam:

$$V = \frac{kQ'_A}{R_A} = \frac{kQ'_B}{R_B} \quad (eq. 3) \Rightarrow \frac{Q'_A}{R_A} = \frac{Q'_B}{R_B} \quad (eq. 4)$$

Por conservação de carga, temos:

$$Q'_A + Q'_B = Q_A$$

Usando (4):

$$Q'_A + \frac{R_B}{R_A} Q'_A = Q_A \Rightarrow Q'_A = \left( \frac{R_A}{R_A + R_B} \right) Q_A$$

Note que a carga  $Q_A$  pode ser tratada como a carga inicial antes de qualquer colisão (não necessariamente a primeira) e  $Q'_A$  a carga após a colisão, logo cada colisão multiplica a carga de A pelo fator mostrado. Assim, após  $n$  colisões a carga de A será:

$$Q_A(n) = \left( \frac{R_A}{R_A + R_B} \right)^n Q_A$$

Assim, o potencial após a  $n$ -ésima colisão é dado por:

$$V_A(n) = \frac{kQ_A(n)}{R_A} = \frac{kQ_A}{R_A} \left( \frac{R_A}{R_A + R_B} \right)^n$$

Usando (1), temos:

$$V_A(n) = V_0 \left( \frac{R_A}{R_A + R_B} \right)^n \Rightarrow V_0 = V_A(n) \left( 1 + \frac{R_B}{R_A} \right)^n$$

Como  $R_B \ll R_A$ , podemos fazer a aproximação fornecida no enunciado: ( $n = 20$ )

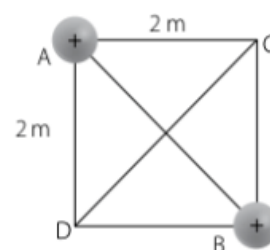
$$V_0 = 10000 \left( 1 + \frac{20 \cdot 0,5}{200} \right) = 10500 \text{ V}$$

**Gabarito:  $V_0 = 10500 \text{ V}$**

**22.**

Na figura a seguir, temos um quadrado de lado 2 m. Nos vértices A e B estão fixas duas cargas puntiformes idênticas  $+Q$ .

Determine a mínima energia potencial adquirida por uma carga  $+Q$ , puntiforme, colocada dentro do quadrado.



**Comentários:**

Seja  $r_1$  a distância de  $Q$  a  $A$  e  $r_2$  a distância de  $Q$  a  $B$ . Desse modo, a energia potencial adquirida pela carga deve ser:

$$U(Q) = kQ^2 \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)$$

Como  $\frac{1}{r_1} > 0$  e  $\frac{1}{r_2} > 0$  podemos usar a desigualdade das médias:

$$M.A. \geq M.G. \Rightarrow \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \geq \frac{2}{\sqrt{r_1 r_2}}$$

Onde o mínimo ocorre quando  $\frac{1}{r_1} = \frac{1}{r_2}$ , ou seja, quando:

$$r_1 = r_2 = r \Rightarrow [U(Q)]_{min} = \frac{2kQ^2}{r}$$

Obviamente o menor potencial será alcançado no maior  $r$ , isto é,  $r = 2 \text{ m}$ , logo:

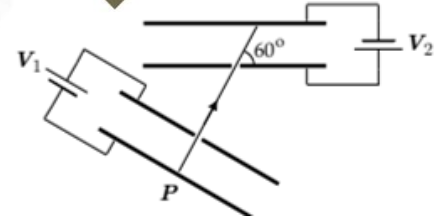
$$\boxed{[U(Q)]_{min, r=2m} = kQ^2}$$

**Gabarito:  $kQ^2$**

**23. (ITA – 2020)**



Um capacitor 1 de placas paralelas está submetido a uma d.d.p.  $V_1 = 12 \text{ V}$ , e um capacitor 2, idêntico ao primeiro, a uma d.d.p.  $V_2$ . Um elétron em repouso parte do ponto  $P$ , atravessa um orifício no primeiro capacitor e adentra o segundo através de outro orifício, a  $60^\circ$  em relação à placa, conforme indica a figura. Desconsiderando a ação da gravidade, determine a d.d.p.  $V_2$  para que o elétron tangencie a placa superior do capacitor 2.



### Comentários:

Pelo teorema da energia cinética, podemos determinar a velocidade do corpo ao sair da região definida pelo capacitor 1:

$$\tau_{fel} = \Delta E_C \Rightarrow q \cdot V_1 = \frac{m \cdot v_e^2}{2} - 0 \Rightarrow q \cdot V_1 = \frac{m \cdot v_e^2}{2} \text{ (eq. 1)}$$

Como ele considera desprezível a ação da gravidade, então o corpo chega com  $v_e$  na nova região definida pelo capacitor 2, mas com o ângulo de  $60^\circ$ . Assim, podemos decompor a velocidade nas direções normal e tangencial as placas do capacitor 2. Note que na direção tangencial não há forças atuando, portanto, não há variação da velocidade nesta direção. Por outro lado, temos a ação de uma força elétrica freando o elétron, devido a orientação do campo, definida pela diferença de potencial aplicada nas placas.

Portanto, podemos novamente aplicar o teorema da energia cinética:

$$\tau_{Fel} = \Delta E_C \Rightarrow -q \cdot V_2 = \frac{m \cdot v_{y_{final}}^2}{2} + \frac{m \cdot v_{x_{final}}^2}{2} - \left( \frac{m \cdot v_{y_{inicial}}^2}{2} + \frac{m \cdot v_{x_{inicial}}^2}{2} \right)$$

Com:

$$\frac{m \cdot v_{x_{final}}^2}{2} = \frac{m \cdot v_{x_{inicial}}^2}{2}$$

Então:

$$-q \cdot V_2 = \frac{m \cdot v_{y_{final}}^2}{2} - \frac{m \cdot v_{y_{inicial}}^2}{2}$$

Para que ele tangencie a placa superior do capacitor 2, temos que  $v_{y_{final}} = 0$ :

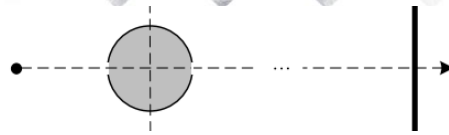
$$-q \cdot V_2 = -\frac{m \cdot v_{y_{inicial}}^2}{2} \Rightarrow q \cdot V_2 = \frac{m \cdot (v_e \cdot \sin^2(60^\circ))^2}{2} \Rightarrow q \cdot V_2 = \frac{m \cdot v_e^2}{2} \cdot \sin^2(60^\circ)$$

Pela equação 1, temos:

$$q \cdot V_2 = \frac{m \cdot v_e^2}{2} \cdot \sin^2(60^\circ) \Rightarrow q \cdot V_2 = q \cdot V_1 \cdot \left( \frac{\sqrt{3}}{2} \right)^2 \Rightarrow V_2 = \frac{3}{4} \overset{12 \text{ V}}{\vec{V}_1} \therefore \boxed{V_2 = 9 \text{ V}}$$

**Gabarito: 9 V**

## 24. (IME – 2020)

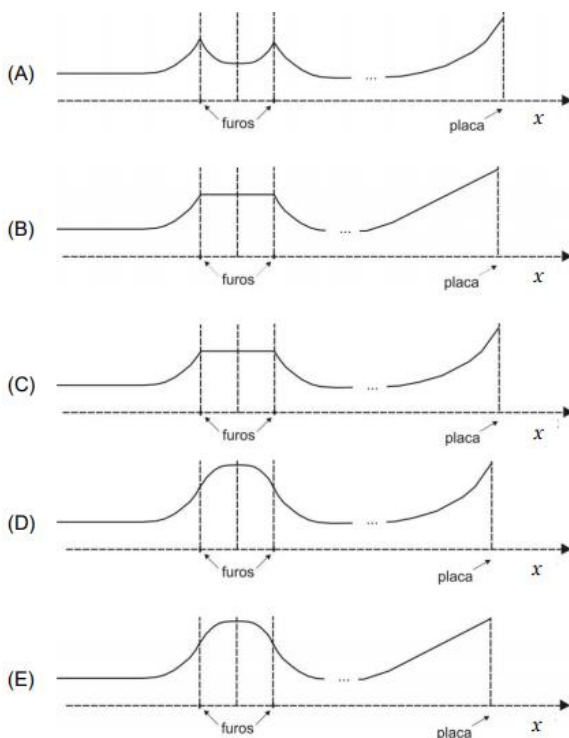


Uma partícula com carga positiva viaja em velocidade constante até aproximar-se de uma esfera oca com carga negativa uniformemente distribuída em sua casca. Ao encontrar a esfera, a partícula entra em seu interior por um pequeno furo, passa pelo centro e deixa a esfera por um segundo furo, prosseguindo o movimento. Bem distante da esfera, a partícula se aproxima de uma placa metálica plana de grande dimensão, com carga negativa uniformemente distribuída pela placa, conforme esquema da figura.

Observações:

- a carga da partícula não redistribui a carga da casca esférica e nem da placa plana; e
- a distribuição das cargas da casca esférica e da placa plana não interferem entre si.

O gráfico que melhor exprime a velocidade da partícula em função de sua posição é:

**Comentários:**

Nesta questão o aluno deveria lembrar dos conceitos de blindagem eletrostática. Não era necessário a análise numérica do problema. Para o primeiro trecho, enquanto a partícula está fora do alcance de atuação da esfera (e por consequência da placa), sua velocidade não varia. Ao aproximar-se suficientemente da esfera de carga negativa, a partícula é atraída pela esfera e adquire uma aceleração não nula.

Portanto, o primeiro trecho está representado corretamente em todas as alternativas.

A etapa seguinte é o efeito da casca esférica sobre a partícula enquanto essa caminha no interior da casca esférica. Aqui, é importante lembrar que ocorre o fenômeno de blindagem eletrostática (visto

que nas observações despreza-se a redistribuição de carga da casca por efeito da partícula). Por conta do fenômeno da blindagem eletrostática, o campo elétrico no interior da casca esférica é nulo, logo, a variação de velocidade em seu interior também é nula.

Assim, o segundo trecho está corretamente indicado somente nas alternativas B e C.

O terceiro trecho é após a saída da casca esférica. A desaceleração é simétrica à aceleração anterior à entrada, ou seja, considera-se somente o efeito da esfera. Devido à distância até a placa, seu efeito é desprezível. Dessa forma, as alternativas B e C permanecem ambas corretas.

Para o trecho final a análise é mais complicada e foge do escopo da prova, no entanto, será feita aqui. Ao afastar-se suficientemente da esfera, considera-se somente o efeito da placa plana. Como a placa é dita “de grandes dimensões”, considera-se que ela atua como uma placa infinita. Assim, o campo é dado por:

$$E = \frac{\sigma}{2 \cdot \epsilon}$$

Este campo é constante, assim, a aceleração em função do tempo é constante e a velocidade varia linearmente com o tempo. Entretanto, o gráfico a ser analisado é da velocidade em função da distância. Portanto, por Torricelli:

$$v^2 = v_0^2 + 2 \cdot a \cdot x$$

Tem-se  $v^2$  em função de  $x$ . Para analisar o comportamento da figura, é necessário encontrar-se  $\frac{dv}{dx}$ . Utilizando-se de Torricelli:

$$\frac{d(v^2)}{dx} = \frac{d(v^2)}{dv} \cdot \frac{dv}{dx} = 2 \cdot v \cdot \frac{dv}{dx}$$

Mas:

$$\frac{d(v^2)}{dx} = 2 \cdot a$$

Assim:

$$2 \cdot a = 2 \cdot v \cdot \frac{dv}{dx} \Rightarrow \frac{dv}{dx} = \frac{a}{v}$$

A aceleração é constante, entretanto, a velocidade aumenta conforme o passar do tempo. Dessa forma, a derivada da velocidade em relação a  $x$  é decrescente. Portanto, o gráfico obtido no último trecho deveria apresentar uma concavidade para baixo, e não se tem esta opção dentre as alternativas.

### Observações:

É interessante notar que, caso fosse ignorado a observação acerca da não capacidade de redistribuição de cargas, poderia tratar-se a placa com uso do conceito de carga imagem. Nesse caso:

$$E = \frac{k \cdot q}{l - x}$$

Assim, a força seria dada por:

$$F = q \cdot E = m \cdot a \Rightarrow m \cdot \frac{dv}{dt} = \frac{k \cdot q^2}{l - x}$$

Mas:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{dv}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} = \frac{dv}{dx} \cdot v$$

Substituindo:

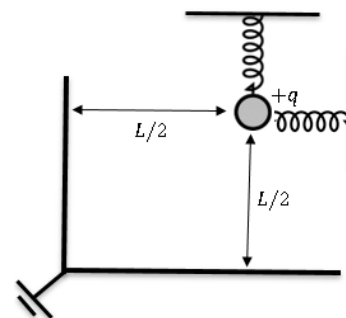
$$m \cdot v \cdot \frac{dv}{dx} = \frac{k \cdot q^2}{l - x} \Rightarrow \frac{dv}{dx} = \frac{k \cdot q^2}{m} \cdot \frac{1}{v} \cdot \frac{1}{l - x}$$

O termo  $\frac{k \cdot q^2}{m}$  é constante. A velocidade é crescente, entretanto não se sabe até que valor, entretanto,  $(l - x)$  tende a 0. Portanto, considera-se que  $v \cdot (l - x)$  tende a 0 (conceito de limites). Ou seja, a derivada tenderia a infinito. Nesse caso, a figura iria se aproximar mais da alternativa C.

**Gabarito: Sem alternativa**

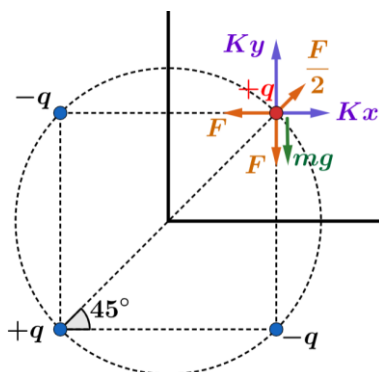
## 25. (Simulado ITA 2ª fase)

Uma carga elétrica  $+q$  de massa  $m$  está em frente a uma associação de dois de planos metálicos aterrados. O ângulo entre os planos é de  $90^\circ$ . A carga está presa por duas molas de mesma constante elástica. A mola vertical se mantém na vertical e a mola horizontal se mantém na horizontal. A permissividade elétrica do meio vale  $\epsilon_0$ . Determine a razão entre as elongações nas molas.



**Comentários:**

Devemos utilizar o conceito de carga imagem. A associação dos planos aterrados fornecerá 3 cargas imagens.



Do equilíbrio de forças, temos:

- Vertical:

$$mg + F = \frac{F}{2} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} + K \cdot y \Rightarrow y = \frac{4mg - F(4 - \sqrt{2})}{4K}$$

- Horizontal:

$$F = K \cdot x + F \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \Rightarrow x = \frac{F(2 - \sqrt{2})}{2K}$$

A força eletrostática  $F$  é dada por:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q^2}{L^2}$$

Assim:

$$\frac{x}{y} = \frac{\frac{\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q^2}{L^2} (2 - \sqrt{2})}{2K}}{\frac{4mg - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q^2}{L^2} (4 - \sqrt{2})}{4K}} \Rightarrow \boxed{\frac{x}{y} = \frac{2q^2(2 - \sqrt{2})}{16mg\pi\epsilon_0 L^2 - q^2(4 - \sqrt{2})}}$$

**Gabarito:**  $\frac{x}{y} = \frac{2q^2(2 - \sqrt{2})}{16mg\pi\epsilon_0 L^2 - q^2(4 - \sqrt{2})}$

## 9. Considerações Finais da Aula

Chegamos ao final da nossa aula. Relembramos conceitos estudados no ensino fundamental e aprofundamos o nosso conhecimento em alguns assuntos. Nessa aula, vimos uma breve revisão de assuntos da Mecânica e fechamos nosso estudo de potencial elétrico.

Na próxima aula, fecharemos o estudo de eletrostática, finalizando com capacitância e uma breve revisão da mecânica e um estudo completo acerca dos capacitores. Estude com calma e muita concentração. Essa parte da Física é bem difícil e bem abstrata.

Quaisquer dúvidas, críticas ou sugestões entre em contato pelo fórum de dúvidas do Estratégia ou se preferir:



## 10. Referências Bibliográficas

- [1] Calçada, Caio Sérgio. Física Clássica volume 5. 2. Ed. Saraiva Didáticos, 2012. 576p.
- [2] Bukhovtsev, B.B. Krivtchenkov, V.D. Miakishev, G.Ya. Saraeva, I. M. Problemas Seleccionados de Física Elementar. 1 ed. MIR, 1977.518p.
- [3] Newton, Gualter, Helou. Tópicos de Física volume 3. 11ª ed. Saraiva, 1993. 303p.

[4] Toledo, Nicolau, Ramalho. Os Fundamentos da Física volume 3. 9ª ed. Moderna. 490p.

[5] Resnick, Halliday, Jearl Walker. Fundamentos de Física volume 3. 10ª ed. LTC. 365p.

[6] Paul A. Tipler, Gene Mosca. Física para Cientistas e Engenheiros volume 2. 5ª ed. LTC, 2006. 499 f.

## 11. Versão de Aula

Versão de Aula	Data da última atualização
1.0	30/06/2021