



## **Eletrostática**

### **Mario da Rosa João**

### **Objetivos**

Ao final deste texto, você deve ser capaz de:

- compreender os processos de eletrização;
- conhecer as cargas elétricas; os campos elétricos e o potencial elétrico associados às cargas.

### **Iniciando o estudo**

Este estudo permite o entendimento dos conceitos introdutórios ao aprendizado de eletrostática, abordando o seu aspecto histórico com inserções de curiosidades ao longo do texto, apresentando os processos de eletrização, os tipos de eletrização e, por fim, os conceitos da Lei de Coulomb.

### **1 Histórico**

A eletricidade é algo que sempre despertou a curiosidade e o interesse das pessoas desde a Antiguidade, não é verdade? Entender os diversos fenômenos que aconteciam naquela época se tornou alvo de pesquisa de diversos estudiosos e cientistas ao longo da história da humanidade.

As primeiras observações que se tem registro se reportam ao sábio grego Tales de Mileto.

Ele percebeu que um pedaço de lã em atrito com uma substância

resinosa denominada âmbar, a substância adquire a propriedade de atrair corpos leves, como fios de palha ou pequenas penas.

Um dos experimentos mais conhecidos e lembrados por grande parte das pessoas se refere ao fato idealizado por Benjamin Franklin, quando empinou uma pipa de seda com ponta de metal, em meio a uma tempestade, com a finalidade de confirmar a sua teoria sobre a natureza elétrica do raio.

Inúmeras teorias e modelos atômicos existiram para explicar como a matéria que existe na natureza é constituída, e a partir disso também poder explicar os fenômenos relacionados à eletricidade.

O modelo atômico que nos permite compreender a constituição da matéria foi concebido pelo físico dinamarquês Niels Henrik David Bohr. De acordo com esse modelo, a matéria é constituída de átomos e cada átomo por sua vez é constituído por três tipos fundamentais de partículas: os prótons, os elétrons e os nêutrons.

O átomo, que em grego significa indivisível, é constituído essencialmente de duas partes: núcleo e eletrosfera.

A eletrosfera corresponde à região onde os elétrons orbitam, em altíssima velocidade, e o núcleo corresponde à região onde se localizam os prótons e nêutrons.

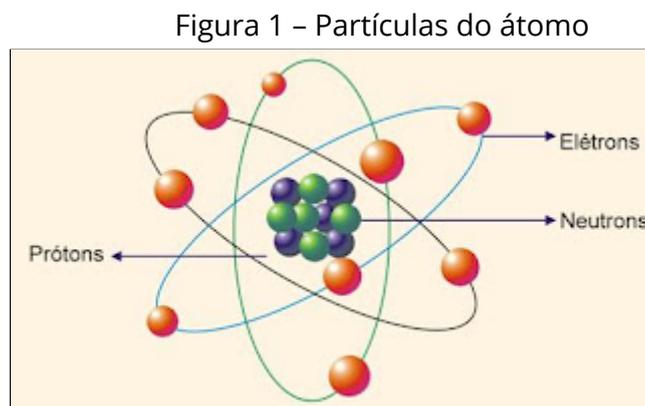
Para esses elementos que constituem o átomo se convencionou que os prótons têm carga elétrica positiva, os elétrons carga elétrica negativa e os nêutrons, por sua vez, não têm carga elétrica. No estado natural, a

**VOCÊ SABIA?**

**Que a máquina fotocopadora é um exemplo prático da aplicação dos princípios de eletrostática?**

Isso mesmo! O mecanismo completo dessa máquina é complexo e sofisticado. Entretanto, seus componentes básicos são simples e se constituem de um cilindro rotativo revestido de material fotosensível (selênio ou óxido de zinco), um sistema ótico para refletir a imagem a ser reproduzida sobre o cilindro, uma lâmpada e um pó preto chamado toner.

quantidade de prótons e elétrons é a mesma, o que torna o átomo eletricamente neutro, pois possui a mesma quantidade de cargas negativas e positivas, como você pode verificar na Figura 1.



Fonte: Sn (2021).

De forma simplificada, confira a seguir como podemos resumir seu funcionamento (WOLSKI, 2007, p. 7):

- A. o cilindro rotativo é inicialmente eletrizado. Em seguida, o sistema ótico reflete sobre o cilindro, já em rotação, a imagem a ser fotocopiada. Sobre o cilindro, portanto, são refletidas luz e sombras. Onde a luz incide, as cargas do cilindro são eliminadas (fotossensibilidade). No restante, ou seja, nas sombras, as cargas permanecem;
- B. Em seguida, o cilindro passa rotacionando sobre o toner, atraindo-o nas partes onde as cargas persistem. Uma folha eletricamente carregada passa então sobre o cilindro, atraindo o toner e, conseqüentemente, a imagem reproduzida;
- C. Para fixar definitivamente o toner na folha, esta é exposta a um aquecimento rápido. Está pronta a cópia!

Então, gostou de conhecer o funcionamento da máquina fotocopadora? Agora se prepare, pois entraremos no mundo dos processos de eletrização. Vamos juntos!

## 2 Processos de eletrização

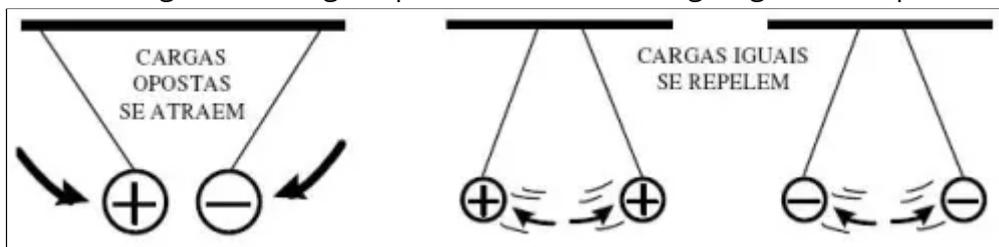
Quanto ao seu comportamento elétrico, os corpos podem ser classificados em eletricamente **neutros** (quando possuem o mesmo número de prótons e elétrons), **carregados negativamente** (quando o número de elétrons é maior que o número de prótons) e **carregados positivamente** (quando o número de prótons é maior que o número de elétrons).

Para que um corpo que está neutro fique eletricamente carregado positivamente ou negativamente, ele precisa passar por um processo de eletrização. Os processos de eletrização são:

- eletrização por atrito;
- eletrização por contato; e
- eletrização por indução.

Após a eletrização dos corpos, estes estão sujeitos ao princípio básico da eletrostática enunciado pela Lei de Du Fay, cuja afirmação é: **cargas elétricas de mesmo sinal se repelem e cargas elétricas de sinais opostos se atraem.** Corpos eletricamente neutros são atraídos por corpos carregados com carga de qualquer sinal. Confira a figura a seguir!

Figura 2 – Cargas opostas se atraem, cargas iguais se repelem



Fonte: Andrade (2014).

### 3 Eletrização por atrito

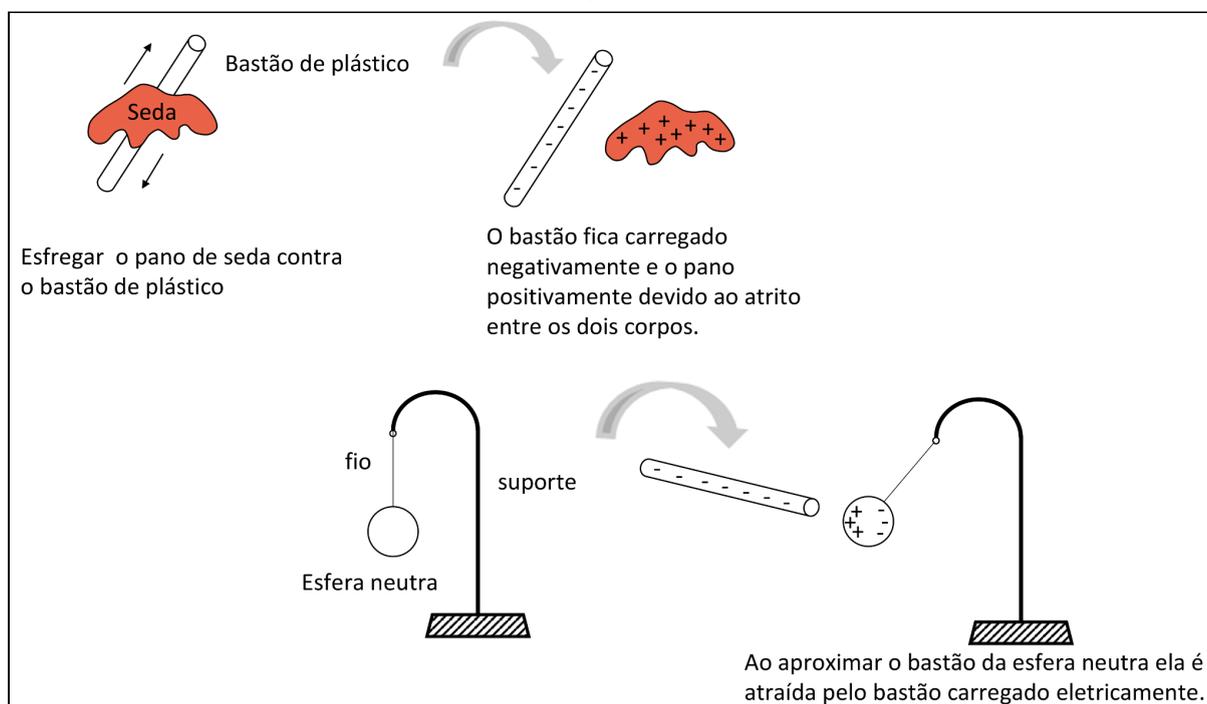
Uma das formas de se eletrizar um corpo é atritar ele com outro de característica diferente. Claro que não são quaisquer corpos que podem ser atritados e dessa forma adquirem carga elétrica.

Um exemplo muito simples do processo de eletrização por atrito corresponde ao fato ocorrido quando você esfrega uma régua plástica no cabelo, e após, para evidenciar a existência de carga elétrica, aproxima a régua de pequenos pedacinhos de papel picado que são atraídos pela régua. Quando atritamos a régua no cabelo, um dos corpos ganha elétrons, ficando carregado negativamente, enquanto o outro perde elétrons, ficando carregado positivamente.

É importante salientar que ao final do processo de eletrização por atrito, os corpos adquirem cargas elétricas de mesmo módulo (quantidade), porém de sinais contrários.

Veja na figura a seguir uma situação em que ocorre a eletrização por atrito entre uma canaleta plástica e um pedaço de feltro, cuja evidência da existência de cargas elétricas na canaleta se dá pelo fato dela atrair uma esfera de isopor em um **eletroscópio de pêndulo**.

Figura 3 – Eletrização por atrito entre uma canaleta plástica e um pedaço de feltro



Fonte: do Autor.

#### 4 Eletrização por contato

Quando dispomos de dois corpos condutores, um neutro e outro previamente eletrizado, e colocamos esses dois corpos em contato, pode ocorrer passagem de elétrons de um para outro, fazendo com que o corpo neutro se eletrize.

No caso em que eletrizamos uma régua plástica por atrito com um tecido e a aproximamos de pequenos pedacinhos de papel (inicialmente neutros), esses papéis são inicialmente atraídos pela régua, que está eletrizada. Ao entrarem em contato com a régua, os pedacinhos de papel também irão adquirir carga elétrica, cedida pela régua. Após alguns instantes, esses pedacinhos de papel serão repelidos pela régua, estando eletrizados agora por

meio do processo de eletrização por contato.

## 5 Eletrização por indução

Podemos eletrizar um condutor neutro simplesmente aproximando dele um corpo eletricamente carregado, sem que haja contato entre eles.

Quando aproximamos um bastão eletrizado de um corpo neutro, as cargas negativas do bastão eletrizado repelem os elétrons livres do corpo neutro para posições mais distantes possíveis. Assim, o corpo neutro fica com falta de elétrons numa extremidade e excesso de elétrons na outra. Esse fenômeno de separação de cargas num condutor, provocado pela aproximação de um corpo eletrizado, é denominado indução eletrostática.

Nesse processo de indução eletrostática ocorre apenas uma separação entre algumas cargas positivas e negativas do corpo, de modo que se afastarmos o corpo eletricamente carregado, o corpo induzido voltará à sua condição inicial de neutralidade.

## 6 Carga elétrica elementar e Lei de Coulomb

Nas seções anteriores você viu que um átomo está eletricamente equilibrado quando possui o mesmo número de prótons e elétrons e caso isso não ocorra ele estará desequilibrado, possuindo cargas positivas ou negativas, certo?

Mas como será que podemos saber a quantidade de cargas positivas ou negativas que esse corpo possui?

Fácil! Tanto os elétrons quanto os prótons possuem o mesmo valor de carga elétrica em módulo (numericamente iguais e diferentes apenas em seu sinal), sendo esse valor conhecido como carga elétrica elementar, confira.

$$e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \quad e \rightarrow \text{carga elétrica do elétron}$$
$$p = +1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \quad p \rightarrow \text{carga elétrica do próton}$$

A quantidade de carga elétrica de um corpo depende exatamente da diferença entre o número de elétrons e de prótons nesse corpo, e pode ser determinada por meio da seguinte equação:

$$q = n \cdot e$$

Sendo:

$q \rightarrow$  carga elétrica do corpo em coulomb (C);  
 $n \rightarrow$  número de cargas em excesso no corpo;  
 $e \rightarrow$  carga elementar em módulo ( $1,6 \cdot 10^{-19}$  C).

### Exemplo

Determine a carga elétrica adquirida por um corpo que após o processo de eletrização por atrito perdeu  $5 \times 10^8$  elétrons.

Observamos nesse exemplo que o sinal da carga elétrica no resultado é positivo, pois o corpo perdeu elétrons e dessa forma ficou com maior número

de prótons, que possuem carga elétrica positiva.

## 7 Lei de Coulomb

Já vimos, pela Lei de Du Fay, que corpos eletrizados com cargas de mesmo sinal se repelem e corpos eletrizados com cargas de sinal diferente se atraem. Quando esses corpos se repelem ou se atraem, exercem entre si uma força.

A Lei de Coulomb, verificada experimentalmente pelo cientista francês Charles Augustin Coulomb, permite expressar quantitativamente as forças de atração e repulsão entre cargas elétricas por meio da equação:

$$F = K \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{d^2}$$

Sendo:

$F$  → força que atua entre cargas, em Newton (N)  
 $q_1, q_2$  → cargas envolvidas, em Coulomb (C)  
 $d$  → distância entre as cargas, em metros (m)  
 $K$  → constante eletrostática do meio ( $\text{Nm}^2/\text{C}^2$ )  
Para o vácuo:  $K = K_0 = 9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$

A intensidade da força elétrica da interação entre duas cargas puntiformes é diretamente proporcional ao produto dos módulos das cargas e inversamente proporcional ao quadrado da distância que as separa.

Comumente no estudo de eletricidade utilizamos grandezas físicas que podem ser representadas por números com ordem de grandeza muito elevada ou muito reduzida. Dessa forma, para evitarmos a escrita de um número muito

grande ou muito pequeno, fazemos a utilização da notação científica que, para determinados valores, pode ser substituída por prefixos pré-determinados pelo Sistema Internacional de Unidades, como podemos verificar na tabela a seguir:

Tabela 1 – Prefixos, Símbolos e fator multiplicador pré-determinados pelo Sistema Internacional de Unidades

Prefixo SI	Símbolo	Fator multiplicador
Giga	G	$10^9 = 1000\ 000\ 000$
Mega	M	$10^6 = 1000\ 000$
Quilo	k	$10^3 = 1000$
Mili	m	$10^{-3} = 0,001$
Micro	$\mu$	$10^{-6} = 0,000\ 001$
Nano	n	$10^{-9} = 0,000\ 000\ 001$
Pico	p	$10^{-12} = 0,000\ 000\ 000\ 001$

Fonte: do Autor.

### Exemplo

Duas cargas,  $q_1=10\ \mu\text{C}$  e  $q_2=5\ \mu\text{C}$ , estão separadas pela distância de 20 cm no vácuo. Determine a intensidade da força que atua entre elas.

$$\begin{aligned}q_1 &= 10\ \mu\text{C} \\q_2 &= 5\ \mu\text{C} \\d &= 0,20\ \text{m} \\ \text{vácuo} &\rightarrow K_0 = 9 \cdot 10^9\ \text{Nm}^2/\text{C}^2\end{aligned}$$

$$F = K \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{d^2}$$

$$F = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{10 \cdot 10^{-6} \cdot 5 \cdot 10^{-6}}{0,2^2}$$

$$F = 11,25\ \text{N}$$

## 8 Campo elétrico

Observe novamente a Figura 3 – Eletrização por atrito e atração em eletroscópio de pêndulo. Depois responda: como a esfera de isopor é capaz de perceber que a canaleta está eletrizada e, portanto, dessa forma ser atraída por ela?

Para responder a tal pergunta recorreremos ao conceito de campo elétrico.

**Campo elétrico** é uma região dentro da qual uma carga elétrica qualquer fica sujeita a uma força.

Se você reproduzir essa experiência poderá observar que para atrair a esfera de isopor é necessário aproximar a canaleta a uma distância mínima. Se a distância que for mantida a canaleta for maior que essa distância mínima, o efeito do campo elétrico sobre a esfera é desprezível quando comparado a outras forças, como o peso, por exemplo, e dessa forma não observamos nenhum efeito nela. Porém observaremos que quanto mais próximos mantermos a canaleta da esfera, mais intensamente esta última será atraída.

Dessa forma podemos concluir que a força com que a esfera é atraída é devido à existência de cargas elétricas na canaleta plástica, validando assim o conceito de campo elétrico.

Um campo elétrico, do ponto de vista matemático, é definido pela relação entre a força que atua sobre uma carga de teste, que por convenção é positiva, e o valor da carga, expressa pela equação:

$$E = \frac{F}{q}$$

Sendo:

- $E$  → intensidade do campo elétrico em um ponto do espaço em volt/metro ou newton/coulomb (V/m ou N/C);
- $F$  → força que age em uma carga de teste, positiva por convenção, colocada no ponto em newton (N);
- $q$  → carga de teste em coulomb (C).

### Exemplo

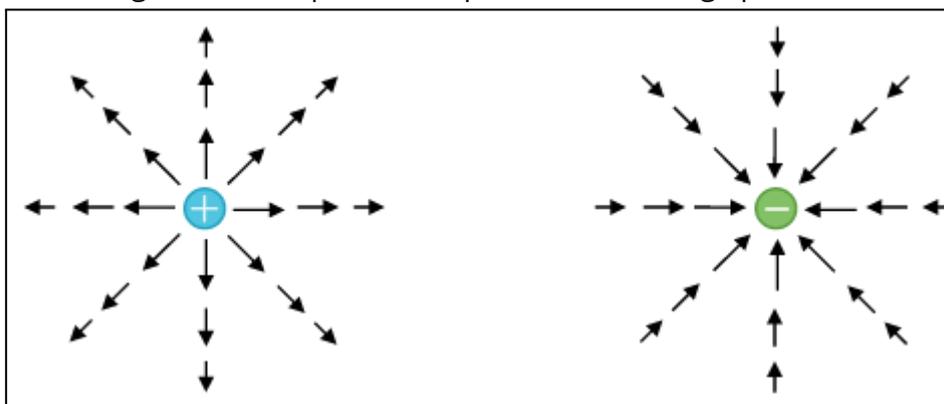
Calcule a força que age em uma carga de  $1 \mu\text{C}$  colocada em um ponto do espaço, em que o campo elétrico equivale a  $600 \text{ V/m}$ .

$$E = \frac{F}{q} \rightarrow F = E \cdot q \rightarrow F = 1.10^{-6} \cdot 600 \rightarrow$$
$$F = 600 \cdot 10^{-6} \rightarrow F = 600 \mu\text{N}$$

## 9 Direção do vetor campo elétrico e linhas de força

Quando dispomos de apenas uma carga elétrica pontual, o campo elétrico originado por essa carga é **radial** em torno dela, de forma que se a carga for positiva, o campo estará se afastando da carga (divergente), e se a carga for negativa, o campo estará se aproximando da carga (convergente), conforme você pode verificar na figura a seguir.

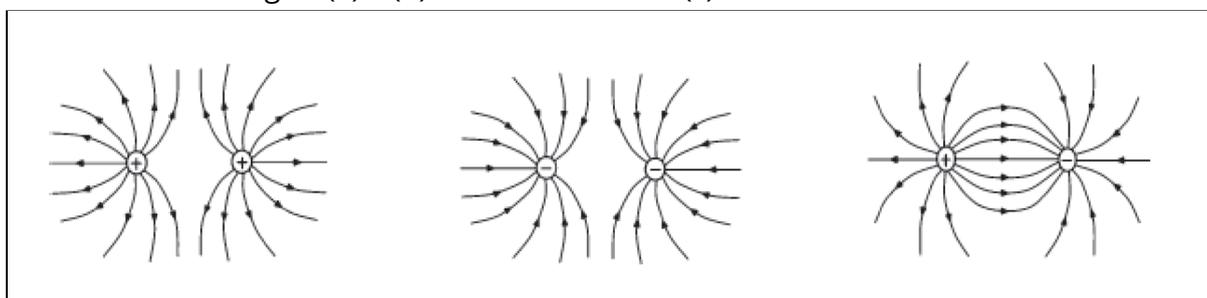
Figura 4 – Campo elétrico perto de uma carga pontual isolada



Fonte: McAllister (2020).

Quando temos duas ou mais cargas pontuais em uma mesma região a configuração das linhas de campo elétrico se dá de acordo com a figura a seguir.

Figura 5 – Deformação das linhas de campo elétrico devido a aproximação de cargas: (a) e (b) de mesmo sinal e (c) de sinais contrários



Fonte: Silva (2018).

Já vimos que para calcularmos o campo elétrico dividimos o valor da força de origem elétrica que surge sobre uma carga de prova. Se fizermos a substituição da força pela equação da Lei de Coulomb, obteremos:

$$E = \frac{F}{q} \rightarrow E = \frac{k \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{d^2}}{q_1} \rightarrow E = k \cdot \frac{q}{d^2}$$

Sendo:

- E → intensidade do campo elétrico em um ponto do espaço em volt/metro ou newton/coulomb (V/m ou N/C);
  - q → carga de teste em coulomb (C);
  - d → distância da carga ao ponto considerado em metros (m);
  - K → constante eletrostática do meio (Nm<sup>2</sup>/C<sup>2</sup>).
- Para o vácuo:  $K = K_0 = 9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$ .

### Exemplo

Determine o campo elétrico a 30 cm de uma carga puntiforme de 200nC no vácuo.

$$E = k \cdot \frac{q}{d^2} \rightarrow E = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{200 \cdot 10^{-9}}{(30 \cdot 10^{-2})^2} \rightarrow E = 2 \cdot 10^4 \text{ V/m}$$

## 10 Potencial elétrico

O potencial elétrico é uma grandeza escalar que está associada ao campo elétrico, e que, portanto, é também gerado por cargas elétricas, podendo assumir valores positivos e negativos.

$$V = K \cdot \frac{q}{d}$$

Sendo:

V → potencial elétrico em volt (V);  
q → carga elétrica em coulomb (C);  
d → distância da carga ao ponto considerado em metros (m);  
K → constante eletrostática do meio (Nm<sup>2</sup>/C<sup>2</sup>).  
Para o vácuo: K = K<sub>0</sub> = 9 . 10<sup>9</sup> Nm<sup>2</sup>/C<sup>2</sup>.

Podemos relacionar o campo elétrico e o potencial elétrico da seguinte maneira:

$$E = K \cdot \frac{q}{d^2} \rightarrow E \cdot d = K \cdot \frac{q}{d}$$

mas,

$$V = K \cdot \frac{q}{d}, \text{ assim } \rightarrow V = E \cdot d$$

Vale ressaltar que essa equação apenas pode ser aplicada a um campo elétrico uniforme para a determinação da diferença de potencial ao longo de uma linha de força.

### Exemplo

Determine o módulo e o sinal da carga que gera um potencial de -300V a uma distância de 10 cm, no vácuo. Determine também a intensidade de campo elétrico nesse ponto.

$$V = K \cdot \frac{q}{d} \rightarrow q = \frac{V \cdot d}{K} \rightarrow q = \frac{-300 \cdot 10 \cdot 10^{-2}}{9 \cdot 10^9} \rightarrow q = -3,33 \cdot 10^{-9} \text{ C}$$
$$V = E \cdot d \rightarrow E = \frac{V}{d} \rightarrow E = \frac{-300}{10 \cdot 10^{-2}} \rightarrow E = -3 \cdot 10^3 \text{ V/m}$$

## 11 Diferença de potencial

Como uma carga gera um potencial  $V_1$  em um ponto distante  $d_1$ , e um potencial  $V_2$  em um ponto distante  $d_2$ , então existe entre esses dois pontos uma diferença de potencial  $V_1 - V_2$ .

A diferença de potencial (ddp) entre dois corpos (ou dois pontos de um circuito elétrico) é também chamada de **tensão elétrica**.

Dependendo do valor da tensão elétrica, ela poderá ser reescrita utilizando-se prefixos do SI de acordo com a tabela a seguir:

Tabela 2 – Prefixos, Símbolos e valor pré-determinados pelo Sistema Internacional de Unidades

		<b>Símbolos</b>	<b>Valor e relação à unidade</b>
Múltiplos	quilovolt	kv	$10^3 \text{ V}$ ou $1000 \text{ V}$
	milivolt	mV	$10^{-3} \text{ V}$ ou $0,001 \text{ V}$
Submúltiplos	microvolt	$\mu\text{V}$	$10^{-6} \text{ V}$ ou $0,000001 \text{ V}$
	nanovolt	nV	$10^{-9} \text{ V}$ ou $0,000000001 \text{ V}$
	picovolt	pV	$10^{-12} \text{ V}$ ou $0,000000000000 \text{ V}$

Fonte: do Autor.

Comparando a um sistema hidráulico, diz-se que a tensão elétrica pode ser comparada ao desnível existente entre a caixa d'água e a torneira de onde a

água sairá: quanto mais alta a caixa em relação à torneira, mais alta será a pressão que fará para sair. Pode-se dizer que a água é bombeada pela ação da gravidade, assim como os elétrons são bombeados pelo gerador (PARIZZI, 2003, p. 28).

### Exemplo

Calcule a diferença de potencial entre dois pontos situados, respectivamente, a 25 e 30 cm de uma carga puntiforme de 40 nC.

$$V_1 = K \cdot \frac{q_1}{d_1} \rightarrow V_1 = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 40 \cdot 10^{-9}}{25 \cdot 10^{-2}} \rightarrow V_1 = 1440 \text{ V}$$

$$V_2 = K \cdot \frac{q_2}{d_2} \rightarrow V_2 = \frac{9 \cdot 10^9 \cdot 40 \cdot 10^{-9}}{30 \cdot 10^{-2}} \rightarrow V_2 = 1200 \text{ V}$$

$$V_{12} = V_1 - V_2 \rightarrow V_{12} = 1440 - 1200 \rightarrow V_{12} = 240 \text{ V}$$

### Concluindo este estudo

Neste estudo, você teve a oportunidade de consolidar seu conhecimento sobre eletrostática, estudando os diversos comportamentos das cargas elétricas e seus fenômenos, além das interações atrativas e repulsivas.

### Referências

ANDRADE, Ana Carolina Santos. **Cargas Elétricas**. 2014. Disponível em: <https://fisicaeletromagnetismo.wordpress.com/2014/02/10/cargas-eletricas/>. Acesso em: 10 ago. 2021

MCALLISTER, Willy. **Campo elétrico**. 2020. Disponível em:  
<https://pt.khanacademy.org/science/electrical-engineering/ee-electrostatics/ee-electric-force-and-electric-field/a/ee-electric-field>. Acesso em: 12 ago. 2021.

**Química Básica**. Disponível em:  
<http://profaerica-ciencias.blogspot.com/2016/02/introducao-quimica-basica.html>. Acesso em: 10 ago. 2021.

SILVA FILHO, Matheus Teodoro da. **Fundamentos da Eletricidade**. Rio de Janeiro, Editora LTC, 2018.