

Material teórico – Módulo Eletrostática I

Corpos Condutores e Eletrização

Terceiro Ano do Ensino Médio

Autor: Vinicius Henning

Revisor: Lucas Lima



1. Cargas Elétricas

1.1 Introdução

Fenômenos eletromagnéticos estão presentes nas nossas vidas de inúmeras maneiras. Desde aspectos do nosso cotidiano, que passam despercebidos de tão corriqueiros que são, como acender a luz, até o recebimento de ligações em nossos celulares e conexões via internet. Mas não param por aí: o ser humano como o conhecemos também funciona através de impulsos eletromagnéticos. Por exemplo, podemos erguer objetos, vencendo a atração gravitacional, por estímulos elétricos que provocam a contração dos músculos que, por sua vez, permitem-nos realizar tais tarefas. Podemos ir ainda mais além: a contração do coração, permitindo assim a circulação sanguínea no nosso corpo, tem origem eletromagnética. Por processos químicos, o coração adquire uma diferença de potencial elétrico (veremos como definir esta grandeza em nosso curso), que é responsável pela passagem de uma corrente elétrica que faz o coração contrair, bombeando sangue para todo o nosso corpo.

Para começarmos a entender um pouco sobre efeitos eletromagnéticos, precisamos primeiro entender o constituinte elementar da teoria eletromagnética: a carga elétrica. Para tal, contaremos parte da história da eletricidade, começando nos gregos. Discutiremos alguns experimentos que deram origem à compreensão do que hoje conhecemos como cargas elétricas positivas e negativas, e chegaremos até os tempos mais modernos, onde discutiremos a estrutura atômica que será a base para definirmos a carga elétrica fundamental. Na sequência, começaremos o estudo da eletrostática, que é o estudo de fenômenos elétricos quando as cargas estão em repouso. Mais pra frente, estudaremos introdutoriamente a eletrodinâmica, a qual estuda cargas em movimento, dando origem a correntes elétricas e outros fenômenos interessantes.

1.2 A estrutura atômica

A ideia sobre os átomos vem desde a Grécia antiga. Um dos primeiros filósofos a ficar famoso por defender a ideia atomista da matéria foi Demócrito (460 a.C. até 370 a.C.). Os atomistas defendiam a ideia de que a matéria seria composta por átomos (a = não, tomo = divisão), e a composição dessas partículas indivisíveis deveria gerar tudo que nos cerca.

Uma visão mais moderna do que seria o átomo é de que esse não é indivisível, mas sim formado por um núcleo contendo prótons (partículas portadoras de carga positiva q_p) e nêutrons (que não possuem carga). As cargas negativas do átomo ficam distribuídas em volta do núcleo, e os constituintes elementares dessa carga negativa são os elétrons, possuindo carga q_e . Muitas vezes, esse conjunto de elétrons que orbitam o átomo é chamado nuvem eletrônica por razões que são estudadas em física quântica. Hoje em dia, principalmente pelos avanços da física nos últimos

séculos, sabemos que os átomos são neutros e que a carga do elétron é igual, em módulo, à carga do próton, isto é, $q_e = -q_p$. Assim, devido ao fato de o átomo ser neutro, o número de prótons é igual ao número de elétrons em um átomo. Essa modelagem, de um núcleo contendo prótons e nêutrons, com os elétrons orbitando o núcleo, é conhecida como modelo planetário do átomo, e será adotada por nós ao longo do curso. Uma representação pictórica para esse processo está disponível na Fig. (1).

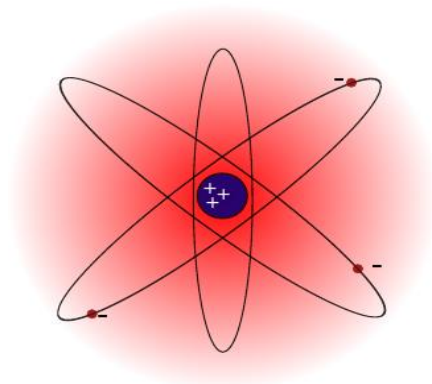


Fig. (1): A representação de um átomo com três prótons no seu núcleo. O núcleo é representado pela esfera azul no centro do átomo. A nuvem vermelha representa a nuvem eletrônica, designando a região na qual os três elétrons estão orbitando. Note que, como o átomo é neutro, o número de prótons e de elétrons é igual.

1.3 Breve história da descoberta de dois tipos de carga

Uma história que ficou muito famosa, apesar de não termos certeza sobre a sua veracidade, é a história de que quando os gregos iam para as festas e ficavam entediados, eles esfregavam suas joias de âmbar (do grego *elektron*), um tipo de resina fóssil, e procuravam sapos pela festa para tocá-los com as joias recém-esfregadas. Ao encostar as joias nos sapos, eles saíam pulando desesperados. As pessoas achavam isso muito engraçado, porém elas ainda não entendiam o que acontecia com as joias nem o que acontecia com os sapos. Somente em meados do século XVIII é que efeitos elétricos começaram a ser mais bem compreendidos. Primeiramente, se percebeu que existiam dois tipos de cargas elétricas distintas. Para tanto, considere o seguinte experimento: pegue dois bastões de âmbar e atrite-os, separadamente, com panos feitos de lã. Após isso, aproxime os dois bastões de âmbar e verificará que eles se repelem. O mesmo resultado verifica-se ao substituímos os bastões de vidro por bastões de lã. Em contrapartida, se pegarmos um bastão de vidro e o atritarmos com um pano de lã e, separadamente, atritarmos um bastão de âmbar com um outro pano de lã, e após tudo, se aproximarmos os bastões, veremos que eles se atraem!

Pela interpretação de Benjamin Franklin, os corpos seriam compostos pela matéria ordinária e por uma matéria elétrica (na época imaginou-se que pudesse ser um tipo de fluido).

Assim, um corpo ficaria positivamente eletrizado se ganhasse cargas elétricas, e ficaria negativamente eletrizado se perdesse cargas elétricas. Baseado nas experiências da época, convencionou-se que, ao esfregar um bastão de vidro num tecido de lã, o bastão ficaria positivamente carregado (caso I). Se esfregarmos o bastão de âmbar (resina) na lã, o bastão ficaria negativamente carregado (caso II). Hoje em dia sabemos que o que ocorre é uma transferência de elétrons do bastão de vidro para a lã (caso I) e uma transferência de elétrons da lã para o bastão de âmbar (caso II). Pela definição feita, convencionamos que os elétrons compõem as cargas negativas da matéria, enquanto os prótons compõem as cargas positivas.

Até agora sabemos que, pela convenção adotada, os elétrons possuem cargas negativas, enquanto os prótons possuem cargas positivas. Além disso, sabemos que a carga do próton, q_p , é igual à carga do elétron, q_e , em valor absoluto. Posteriormente, descobriu-se que a carga do elétron é a menor quantidade de carga que se pode encontrar livre na natureza. Assim, o valor da carga do elétron é chamado de carga elementar, representado pela letra e . A unidade de carga elétrica é o *coulomb* e é representada pela letra C . Então, temos o seguinte:

$$q_p = -q_e = 1,6 \cdot 10^{-19} C$$

1.4 Corpos positivos, negativos e neutros

Classificamos os corpos de acordo com a seguinte nomenclatura:

- **Corpo neutro** - visto que os elétrons e prótons possuem cargas iguais em módulo, mas com sinais contrários, um corpo com números iguais de prótons e elétrons possui uma carga líquida total igual a zero. Algumas pessoas às vezes referem-se a corpos neutros como sendo corpos descarregados. Todavia, isso não significa que o corpo seja desprovido de cargas, isso apenas significa que as cargas positivas e negativas estejam em números iguais, ocorrendo um cancelamento par a par.
- **Corpo carregado (eletrizado) positivamente** - um corpo é dito carregado positivamente quando possui um excesso de cargas positivas. Isto é, quando cargas positivas foram adicionadas ao corpo, ou quando cargas negativas/elétrons foram retiradas desse corpo.
- **Corpo carregado (eletrizado) negativamente** - em contrapartida ao que definimos acima, um corpo está carregado negativamente quando o mesmo possui um excesso de cargas negativas ou uma falta de cargas positivas.

Esquematzamos os três casos na Fig. (2) a seguir

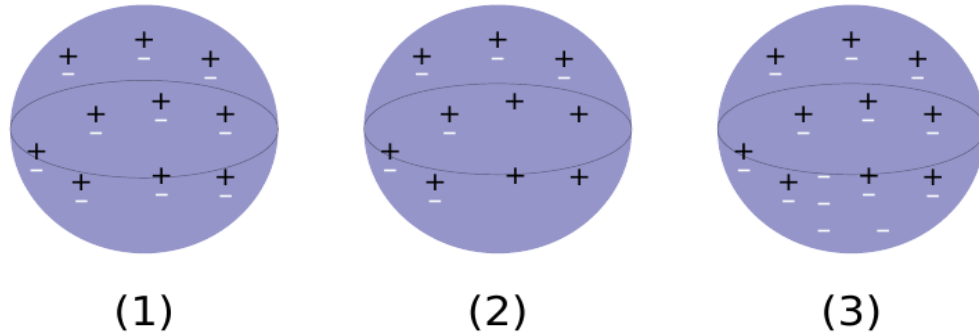


Fig. (2): No caso (1) temos uma esfera hipotética com 10 cargas positivas e 10 cargas negativas. Temos um cancelamento par a par e, conseqüentemente, o corpo é neutro. Nos casos (2) e (3), todavia, esse cancelamento par a par não é possível, visto que vão faltar cargas para ocorrer o cancelamento, assim os corpos são ditos carregados. No caso (2) quatro elétrons foram removidos, fazendo com que o corpo tenha quatro cargas positivas a mais e esteja, portanto, positivamente carregado, exatamente o oposto do que ocorre em (3).

Todo corpo possui um número inteiro de portadores de cargas, sendo eles os prótons e elétrons. Então, a carga de um corpo é sempre um múltiplo da carga elementar e . Logo, se um corpo possui carga total q , o número de portadores de carga em excesso nesse corpo é dado por

$$n = \frac{|q|}{e};$$

isto é, se dividirmos o valor absoluto da carga total de um corpo pela carga elementar e , saberemos quantos portadores de carga estão em excesso naquele corpo. Além disso, note que se $q > 0$, temos um excesso de portadores de carga positiva prótons no nosso corpo e, se $q < 0$, temos um excesso de carga negativa (elétrons) no nosso corpo.

1.5 Material adicional para a seção 1

1) **A Paixão da Física do final do arco-íris à fronteira do tempo - Uma viagem pelos prodígios da física** - de Walter Lewin e Warren Goldstein. Ótimo livro de divulgação científica que trata de uma forma bem lúdica fenômenos físicos.

<https://www.youtube.com/watch?v=zH8EiGKtB> -

Recomendamos tanto o vídeo quanto o canal. Nesse vídeo é mostrado como o filamento de água que sai de uma torneira é curvado a partir de interação elétrica.

https://www.ifsc.usp.br/cibelle/arquivos/T_0150_1.pdf – Este link cobre um pouco da história e evolução da teoria eletromagnética ao longo dos anos, contando um pouco dos experimentos e como as pessoas percebiam os fenômenos eletromagnéticos naquela época.

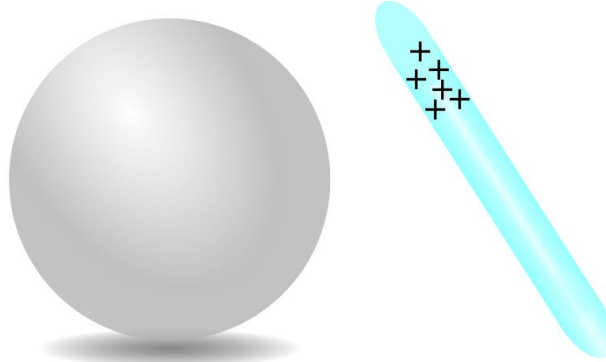
2. Condutores e isolantes

Existe uma vasta gama de materiais na natureza que, a depender de como as cargas elétricas movem-se nesses corpos, recebem diferentes nomes. Neste curso, nós vamos considerar apenas dois tipos de materiais: os condutores e os isolantes (dielétricos).

Pela nossa descrição sobre o modelo atômico, na introdução sobre eletromagnetismo, nós vimos que os átomos possuem números iguais de prótons e elétrons. Todavia, certos materiais (ou seja, corpos compostos por átomos, que, por sua vez, são compostos por prótons e elétrons), têm a seguinte propriedade: alguns elétrons podem se “soltar” do átomo e se mover livremente pelo corpo. Essa é a definição de um material condutor. Por outro lado, o completo oposto disso seria se os elétrons ficassem confinados aos átomos a que pertencem, isto é: **não** temos elétrons livres circulando pelo corpo. Esta é a definição de um corpo isolante, ou um corpo dielétrico. Assim, podemos definir:

- **Condutor:** um corpo é dito condutor quando parte dos seus elétrons são livres para se mover ao longo do mesmo.
- **Dielétrico:** um corpo é dito ser dielétrico, ou isolante, quando o mesmo não possui elétrons livres e, portanto, não possui cargas livres (pois os núcleos atômicos não se movem pelo material).

1. Na seção anterior, nós contamos um pouco sobre a história da eletricidade. Mencionamos a história dos gregos, onde eles esfregavam suas joias de âmbar na roupa e tocavam os sapos. Vamos analisar um exemplo parecido. Suponha que nós esfregamos um bastão de vidro, arrancando elétrons (cargas negativas). O bastão de vidro fica carregado positivamente, isto é, possui mais cargas positivas do que negativas na Figura (3). Nós discutimos também que cargas opostas atraem-se, e cargas iguais repelem-se. Levando em consideração que um condutor tem cargas livres, ou seja, sabendo que elas podem se mover livremente na superfície do condutor, ao se aproximar uma esfera condutora neutra de um bastão de vidro carregado, o que acontecerá com as cargas livres positivas e negativas da esfera condutora? Discutiremos isso na próxima seção.



*Fig. (3): A representação de uma esfera condutora **neutra** e um bastão de vidro carregado positivamente. Sabendo-se que, mesmo sendo neutra, a esfera condutora possui cargas livres, o que acontece com as cargas **positivas** e **negativas** na esfera condutora ao aproximarmos um bastão de vidro carregado positivamente?*

3. Métodos de eletrização

Quando nós discutimos o exemplo acima do bastão de vidro carregado, ou no exemplo dos gregos que esfregavam as joias de âmbar nas roupas e tocavam os sapos, ambos são processos de eletrização. Processos de eletrização são processos pelos quais objetos ganham ou perdem cargas. Você pode ter reparado quando discutimos a introdução de fenômenos eletromagnéticos: nós sempre damos preferência a falar sobre o ganho e a perda de elétrons (em vez do ganho e perda de prótons). O ponto-chave aqui é que arrancar prótons do núcleo atômico é muito difícil! Então, na vasta maioria dos casos, o que ocorre é: quando um corpo está carregado positivamente, ele perdeu elétrons. Quando esse está carregado negativamente, significa que ele ganhou elétrons. Discutiremos a seguir diferentes tipos de eletrização.

3.1 Eletrização por atrito

A eletrização por atrito é uma das maneiras mais simples de se passar elétrons de um corpo para o outro. Ao esfregar dois corpos diferentes (por exemplo, um bastão de vidro num pedaço de lã), pode ocorrer a transferência de elétrons de um corpo para o outro. No exemplo do bastão de vidro, o vidro doa elétrons para o pedaço de lã. Como o bastão de vidro **perde elétrons**, esse fica **positivamente carregado**, enquanto a lã fica com um **excesso de elétrons** e fica **negativamente carregada**. Além disso, é interessante ressaltar que, como cargas elétricas não podem sumir, todos os elétrons que o bastão de vidro perde são, necessariamente, transferidos para a lã. Isto é, supondo que o vidro e a lã estejam neutros, inicialmente, se o vidro perde n elétrons, ele fica carregado positivamente com carga total $Q_{\text{vidro}} = ne$. Assim, necessariamente a carga da lã é dada por

$$Q_{\text{lã}} = -Q_{\text{vidro}} = -ne$$

3.2 Eletrização por contato

Uma eletrização é dita por contato quando dois corpos encostam-se e ocorre uma transferência de elétrons de um corpo para o outro. Note que, para que ocorra essa transferência de elétrons ao simples toque entre dois corpos, é necessário que ambos os corpos permitam o movimento livre dos elétrons. Por tal motivo, dizemos que ambos os corpos, para sofrerem eletrização por contato, precisam ser condutores.

Efeitos de tamanho e formato dos objetos podem gerar complicações desnecessárias para uma discussão introdutória de fenômenos eletromagnéticos, então para nos livrarmos desse tipo de preocupação vamos assumir que ambos os corpos são pontuais, isto é, possuem dimensões desprezíveis.

Considere dois corpos A e B , com cargas Q_A e Q_B , respectivamente. Após se tocarem, a carga em cada um dos corpos é dada por

$$Q_A'' = Q_B'' = \frac{Q_A + Q_B}{2},$$

onde as aspas indicam as cargas após o contato.

A maneira de entender esse resultado para cargas pontuais é relativamente simples. Vamos analisar um caso em detalhe para entendermos bem o que acontece. Vamos supor duas esferas A e B , com cargas $Q_A = 0$ e $Q_B = Q > 0$, respectivamente, como mostra a figura abaixo

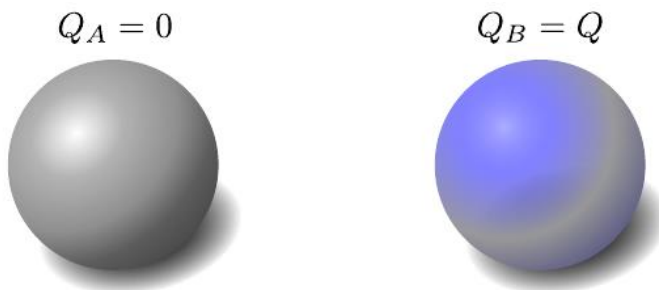


Fig. (4): Representação das duas esferas antes de entrarem em contato.

A esfera B possui carga positiva, ou seja, em algum momento perdeu elétrons por algum processo de eletrização. Ao aproximarmos as duas esferas, os elétrons livres da esfera A interagem com a carga positiva se aproximando; assim, como os elétrons possuem cargas negativas, eles são atraídos em direção à esfera B . Ao tocarmos as duas esferas, ocorre um fluxo de elétrons da esfera A para a esfera B . Assim, a esfera A , que antes era neutra, agora perdeu elétrons, então ela está positiva. E a esfera B , que antes tinha um excesso de cargas positivas Q , agora está “menos

positiva”, já que ganhou elétrons. Isto é, parte dos elétrons que foram perdidos anteriormente pela esfera B, foram agora recuperados. Enquanto houver um desbalanço entre as cargas de A e B, continuará havendo um fluxo de elétrons para a esfera com carga mais positiva, até que as cargas tornem-se iguais. Então, no final do processo, ambas as esferas deverão ter a mesma quantidade de elétrons em excesso, e, portanto, a mesma carga. Como a carga inicial era Q , então ambas as esferas terminarão com carga $\frac{Q}{2}$.

3.3 Eletrização por indução

A eletrização por indução é um pouco mais complicada que a eletrização por atrito e por contato. Todavia, pelos exemplos já discutidos, temos todos os conceitos necessários para compreender esse tipo de eletrização. Se considerarmos o exemplo da esfera condutora neutra e o bastão de vidro carregado positivamente, discutido na seção 2, podemos inferir que os elétrons da esfera condutora serão atraídos em direção ao bastão positivamente carregado. Logo, a esfera terá um acúmulo de cargas negativas do lado mais próximo do bastão (excesso de elétrons) e um acúmulo de cargas negativas no lado mais afastado do bastão (ausência de elétrons). Dizemos então que a esfera está **polarizada**.

Agora, imagine que nós tenhamos um objeto neutralizador. O neutralizador possui as seguintes propriedades: ele possui uma quantidade praticamente infinita de cargas positivas e negativas. Além disso, consideremos nossa esfera condutora neutra que está polarizada devido à presença do bastão de vidro. Como nossa esfera possui um acúmulo de cargas positivas no lado esquerdo, se conectarmos o neutralizador, esse cederá cargas negativas para a esfera até neutralizar esse lado da esfera (lembrem-se: cargas opostas atraem-se). Posteriormente, ao desconectarmos o neutralizador da esfera, a esfera agora tem um acúmulo de cargas negativas, se comparada com a situação inicial. O processo descrito acima é mostrado na Fig. 5.

Um possível objeto “neutralizador” nada mais é que o nosso planeta. Como a Terra possui uma quantidade infinita de elétrons (para efeitos práticos) e a esfera possui um acúmulo de cargas positivas numa das extremidades, se conectarmos essa extremidade à Terra, teremos um escoamento de elétrons da Terra para a esfera que neutraliza o excesso de carga positiva da esfera. Posteriormente, ao desconectarmos a esfera da Terra, a esfera possuirá um acúmulo de cargas negativas. Note que tudo começa porque nós induzimos uma polarização na esfera. Assim, tal método é chamado de eletrização por indução. Além disso, essa conexão com a Terra é chamada conexão terra (às vezes falamos que nós aterrmos o objeto).

Esse processo de conexão terra é muito utilizado como mecanismo para tentar salvar nossos aparelhos eletrônicos quando temos uma descarga elétrica (um fluxo de elétrons) muito intensa, como, por exemplo, os raios que ocorrem numa tempestade.

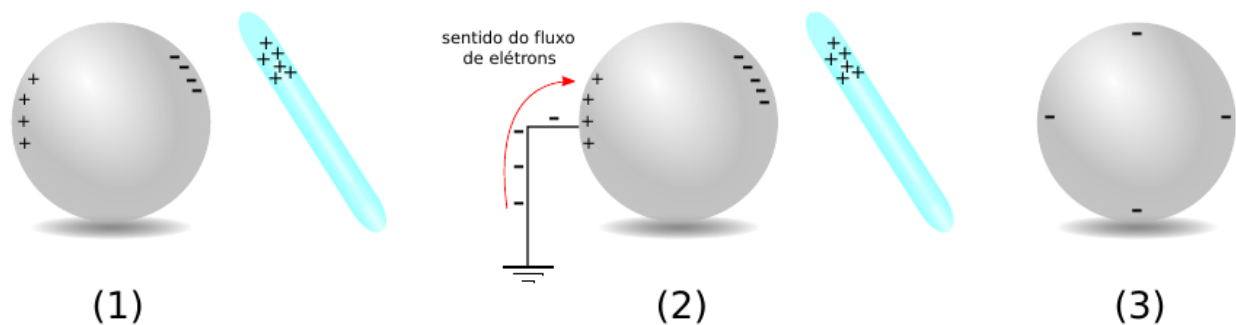


Fig. (5): Representação do processo de eletrização por indução. Em (1) temos o processo de indução eletrostática, onde a esfera condutora neutra tem seus elétrons atraídos pelo bastão positivamente carregado, gerando um acúmulo de cargas positivas (falta de elétrons) no lado esquerdo. Em (2) fazemos a conexão terra com na esfera (aterramos a esfera). Assim, a Terra sonda um acúmulo de cargas positivas e ocorre um fluxo de elétrons para a esfera. Ao desconectarmos a esfera e afastarmos o bastão positivamente carregado, agora a esfera está carregada negativamente (excesso de elétrons), como mostrado na imagem (3).

Entendido em detalhe o processo de indução eletromagnética, vamos fazer um exercício juntos, discutindo o eletroscópio. Colocaremos as perguntas a serem respondidas em **negrito** e encorajamos você a tentar responder sem ler a resposta logo abaixo. No final, indicaremos um *link* para um vídeo no youtube que mostra como fazer um eletroscópio em casa, e toda a constatação pode ser feita experimentalmente!!

Exemplo - O eletroscópio

O eletroscópio é um objeto muito simples que pode medir se um corpo está eletricamente carregado ou não. O eletroscópio está ilustrado na Fig. (6) e ele é constituído por um recipiente (geralmente algum pote de vidro) e uma rolha. No topo, temos uma esfera condutora que é conectada a dois filamentos/folhas condutoras por um fio também condutor. A utilidade da rolha no experimento é impedir o fluxo de cargas através da “tampa” do recipiente. Assim, qualquer dinâmica dos elétrons estará confinada ao sistema composto pela esfera, filamento condutor e folhas metálicas.

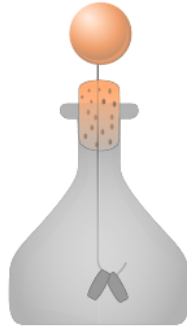


Fig. (6): Ilustração de um eletroscópio de folhas;

Na Fig. (7) mostramos o que ocorre com o uso do eletroscópio. Para analisarmos um problema um pouco diferente, vamos discutir o processo com um bastão negativamente carregado. Primeiramente:

i) Como deixamos o bastão negativamente carregado? Que processo de eletrização poderia ser utilizado? Como ocorre a transferência de cargas?

Resposta: *Uma maneira de deixar o bastão negativamente carregado seria via uma eletrização por atrito. Por exemplo, podemos pegar um bastão de PVC e esfregar com um pedaço de lã. O bastão ficará negativamente carregado, e a lã positivamente carregada. Como o bastão está **negativamente** carregado, isso significa que ocorreu uma transferência de elétrons da lã (que agora possui mais cargas positivas do que negativas).*

ii) O que ocorre quando aproximamos o bastão negativamente carregado de uma esfera condutora? Como ocorre a dinâmica das cargas positivas e negativas?

Resposta: *Como estamos aproximando um corpo negativamente carregado da esfera condutora, temos um acúmulo de cargas positivas na parte mais próxima do bastão. As cargas negativas ficam no lado mais distante da esfera, visto que cargas de mesmo sinal repelem-se, e cargas de sinais contrários atraem-se. Todavia, sabemos que a dinâmica de cargas é inteiramente devida aos elétrons. Assim, o acúmulo de cargas positivas na parte superior da esfera (mais próxima ao bastão) ocorre por que os elétrons foram para o outro lado da esfera, como mostrado na imagem (1) na Fig. (7).*

iii) Sabendo que a esfera está conectada à um fio condutor e duas folhas metálicas na outra extremidade, o que ocorre com os elétrons que foram para a parte inferior da esfera, devido à presença do bastão negativamente carregado? Além disso, supondo que as duas folhas metálicas estejam neutras, o que ocorre com elas?

Resposta: A ideia é semelhante quando aterramos a esfera condutora. Os elétrons são afetados pela presença da carga negativa do bastão e afastam-se o máximo possível. Assim, devido à presença do fio condutor, os elétrons movem-se da esfera para as duas folhas metálicas, localizadas na outra extremidade do fio condutor. Todavia, como as duas folhas metálicas estavam neutras, agora ambas estão negativamente carregadas. Como sabemos, cargas de mesmo sinal repelem-se. Assim, as folhas metálicas tendem a se afastar uma da outra.

iv) Convidamos você a fazer um exercício parecido com esse, mas agora com um bastão positivamente carregado. Note que a resultado final (o afastamento das folhas metálicas) é o mesmo. Se aproximarmos um bastão neutro, a dinâmica dos elétrons não ocorre e, conseqüentemente, as folhas metálicas não se afastam. Então o eletroscópio pode medir se o bastão está carregado ou não, mas não diferencia cargas positivas e negativas.

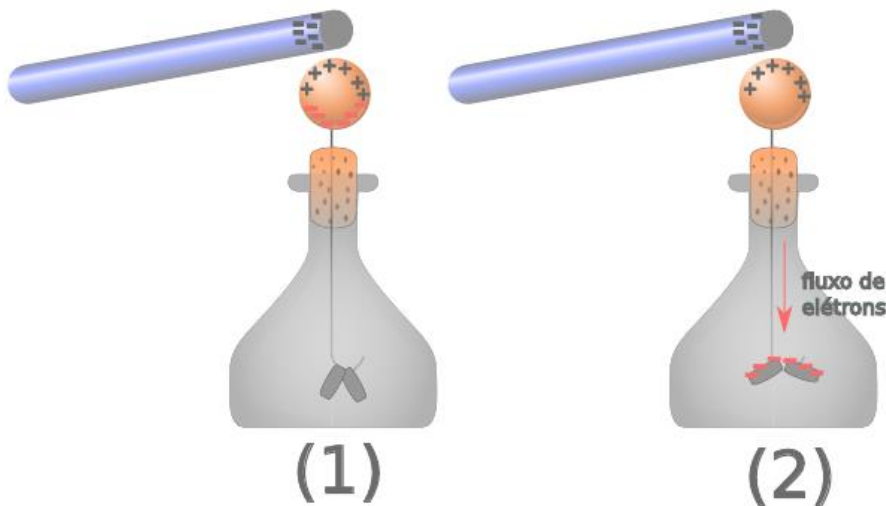


Fig. (7): Uma ilustração do que aconteceria com os elétrons num eletroscópio se aproximarmos um bastão negativamente carregado. Na imagem (1) temos a dinâmica considerando apenas o bastão e a esfera do eletroscópio. Na imagem (2) temos a dinâmica dos elétrons considerando a existência de um fio condutor e folhas metálicas na extremidade oposta à esfera.

Recomendação:

Para aqueles que se interessaram, o eletroscópio de folhas é muito simples de ser feito, e uma experiência pode ser realizada com objetos que temos em casa. Neste vídeo eles mostram o eletroscópio funcionando e como fazer.

<https://www.youtube.com/watch?v=nHsiIwsL86Y>