



Reprodução do eletroscópio de folha de ouro e do eletróforo de Volta de baixo custo para o ensino da eletrostática

Roberto Hessel¹, Makoto Yoshida¹, Alexandre Mesquita¹ , Agnaldo A. Freschi²

¹Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, SP, Brasil.

²Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas, Universidade Federal do ABC, Santo André, SP, Brasil.

Palavras-chave

eletrostática
eletróforo
eletroscópio

Resumo

Investigações sobre eletricidade estática conduziram não só a um melhor entendimento da natureza da eletricidade como também ao desenvolvimento de instrumentos que contribuíram para que as pesquisas e aplicações da eletrostática avançassem. Neste trabalho, mostramos que, com o uso de materiais facilmente encontrados em lojas do comércio em geral, alguns desses instrumentos, como o eletróforo de Volta e o eletroscópio de folha de ouro, podem ser reproduzidos com facilidade em laboratórios didáticos, tanto por professores quanto por alunos. Além disso, propusemos uma forma de como os experimentos ou demonstrações realizados com esses instrumentos podem ser conduzidos de modo a contribuir para uma melhor compreensão dos fenômenos eletrostáticos.

1. Introdução

O fato de o âmbar atrair pequenos objetos quando atritado já era conhecido pelos antigos gregos talvez até mesmo em épocas mais remotas, uma vez que povos pré-históricos utilizavam o âmbar na confecção de adornos. Segundo alguns escritores modernos, Tales de Mileto (640?-546 a.C.), em 600 a.C., teria observado e discutido tanto a propriedade apresentada pelo âmbar quando atritado como a ação da magnetita, que é um ímã natural, embora não se conheça nenhum documento escrito por ele e nem mesmo seja certo que tenha deixado algo por escrito [1]. Entretanto, o avanço das pesquisas, tanto na área da eletricidade como do magnetismo, deve-se a William Gilbert

(1544-1603), que escreveu o tratado *De Magnete*, publicado em 1600 [2]. Nesse tratado, ele dedica um capítulo ao efeito do âmbar e estabelece uma linha clara entre esse efeito e o magnetismo. Além disso, inventou o primeiro instrumento elétrico, o *versorium*, que utilizou para ampliar a lista de materiais que apresentavam o mesmo comportamento do âmbar quando atritados [3-7].

No início do século XVIII, alguns fatos sobre a natureza da eletricidade começaram a ser estabelecidos. Em 1729, Stephen Gray (1666-1736), ao estudar as propriedades da eletricidade produzida por atrito, mostrou que a propriedade de atração de um corpo eletrizado poderia ser transferida para outro corpo, e isso não só o

Autor de correspondência. E-mail: alexandre.mesquita@unesp.br.

Este é um artigo de acesso livre sob licença Creative Commons



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>

Copyright © 2024, Copyright by Sociedade Brasileira de Física. Printed in Brazil.

levou a descobrir a diferença entre condutores e não condutores (isolantes) como a indução eletrostática. Por volta de 1734, Charles François de Cisternay Du Fay (1698-1739) concluiu que deveriam existir duas espécies de eletricidade: a eletricidade vítrea e a resinosa [3, 5, 8, 9].

A partir de meados do século XVIII, experiências como as realizadas por Gray e Du Fay sugeriam que a eletricidade tinha características de substância que existia no interior dos objetos, ou seja, não se tratava de uma propriedade da matéria, como transparência ou dureza, mas sim de uma substância material. Depois disso, algumas hipóteses [3, 10] sobre a natureza da eletricidade começaram a ser sugeridas. No entanto, a natureza tanto da eletricidade vítrea como da eletricidade resinosa só começou a ser mais bem compreendida no final do século XIX, com a descoberta do elétron por Joseph John Thomson (1856-1940) e, posteriormente, no início do século XX, com as pesquisas de Ernest Rutherford (1871-1937) e Niels Bohr (1885-1962) sobre a estrutura atômica [5, 9, 11, 12]. Na visão moderna, a eletricidade vítrea (carga positiva) concentra-se no núcleo do átomo, enquanto a resinosa (carga negativa) ocupa uma região aproximadamente esférica em torno do núcleo. No átomo neutro, ou seja, não ionizado, a quantidade de cargas negativas (elétrons) e a quantidade de cargas positivas (prótons) são iguais, de modo que a carga elétrica total do átomo é nula. As experiências mostram que a carga é não só quantizada, como também conservada. Ser quantizada significa dizer que ela aparece somente como um múltiplo inteiro de uma unidade fundamental (e) e indivisível [13]. A carga $e = 1,6 \times 10^{-19}$ C é numericamente igual à carga negativa do elétron, bem como à carga positiva do próton, que é uma das partículas fundamentais no núcleo atômico. Por conservação da carga, entende-se que a carga total em um sistema isolado deve permanecer constante. Esse fato e mais experiências, como as realizadas por Gray e Du Fay, sugerem que durante o processo de eletrização de um corpo eletricamente neutro a carga não é criada, mas simplesmente transferida de um corpo para outro. Quando friccionamos um bastão de vidro com seda, verifica-se que ele se torna carregado positivamente e a seda, negativamente. Isso pode ser explicado supondo-se que houve transferência de partículas positivas da seda para o bastão ou, talvez, transferência de partículas negativas do bastão para a seda. Nos dois casos, a seda deve tornar-se eletricamente negativa e o vidro, positivo [13]. No entanto, qual das partículas realmente migra de um material para o outro? Hoje sabemos que

Experiências realizadas por Gray e Du Fay em meados do séc. XVIII mostraram que, durante o processo de eletrização de um corpo eletricamente neutro, a carga não é criada, mas simplesmente transferida de um corpo para outro

A mobilidade dos elétrons nos condutores explica a indução eletrostática, enquanto nos isolantes, a polarização dos átomos permite a atração de objetos eletrizados

são as partículas negativas (elétrons) que são transferidas da superfície do vidro para a seda. A razão para isso é que as partículas positivas (prótons) estão presas no núcleo do átomo e, portanto, não têm liberdade de migrar de um corpo para outro. Já os elétrons mais afastados do núcleo (elétrons de valência) estão fracamente ligados a ele e podem, portanto, migrar de um corpo para o outro quando ocorre o contato íntimo entre eles durante o processo de eletrização por atrito. No caso do vidro atritado com a seda, são os elétrons dos átomos superficiais do vidro que migram para a seda, enquanto, no caso do âmbar atritado com pele, são os elétrons dos átomos superficiais da pele que migram para o âmbar. Como resultado, o vidro torna-se positivo e o âmbar, negativo, enquanto a seda torna-se negativa e a pele, positiva. Na

eletrização por atrito, portanto, ocorre simplesmente a separação das duas espécies de carga.

Segundo a visão atomística da eletricidade, a ligação entre um elétron de valência e o núcleo de um átomo de um material isolante é relativamente fraca, mas o suficiente para impedir que se liberte espontaneamente do átomo, de modo que esse elétron não está livre para vagar pelo material. E, da mesma maneira, quando um elétron migra de um outro material para o isolante, também fica preso a um átomo e não pode movimentar-se facilmente de um local para outro. Consequentemente, elétrons transferidos para um isolante permanecem na região onde ocorreu a eletrização. Nos condutores, por outro lado, acontece o contrário, pois, em um bom condutor, a ligação entre elétrons de valência e o núcleo do átomo correspondente é bem mais fraca que no caso anterior e, portanto, podem libertar-se do núcleo sem grande esforço e mover-se livremente de um local para outro, de modo que elétrons transferidos para um condutor podem, em princípio, espalhar-se rapidamente por todo o material.

A mobilidade acentuada dos elétrons nos condutores sólidos, particularmente nos metálicos, permite explicar também a indução eletrostática, descoberta por Gray por volta de 1729 [14]. Em um grau menor, o processo de separação por indução eletrostática também ocorre em um material isolante. Quando, por exemplo, um bastão eletrizado positivamente aproxima-se de um isolante neutro sem tocá-lo, os elétrons presos ao núcleo de um átomo do material são ligeiramente deslocados e sua distribuição em torno do núcleo torna-se assimétrica. Com isso, o centro de massa da nuvem de elétrons deixa de coincidir com o centro de massa dos prótons e diz-se que o átomo tornou-se polarizado. O conjunto dos átomos polarizados no isolante é equiva-

lente a um acúmulo de cargas positivas na superfície da parte mais afastada do bastão eletrizado positivamente e a um acúmulo de cargas negativas na superfície da parte mais próxima do bastão [15]. Esse fato permite compreender a razão pela qual um objeto eletrizado é capaz de atrair pequenos objetos isolantes não eletrizados, como já haviam observado os gregos [13].

Os avanços relacionados com a eletricidade estática, particularmente ocorridos no século XVIII, não se limitaram às contribuições de Gray e Du Fay. Os geradores eletrostáticos que operavam por fricção e a garrafa de Leyden, um capacitor inventado em 1745, tornaram-se instrumentos valiosos nas mãos de inúmeros pesquisadores [2, 4, 5, 9, 16]. O eletróforo de Alessandro Volta (1745-1827) e o eletroscópio de folha de ouro foram desenvolvidos na segunda metade do século XVIII e, nessa mesma época, descobriu-se também a eletricidade animal [3, 5, 9].

Um dos objetivos deste trabalho é mostrar que, graças aos materiais disponíveis atualmente, alguns desses instrumentos, como o eletróforo de Volta e o eletroscópio de folha de ouro, podem ser reproduzidos tanto pelo professor interessado como por alunos incentivados a construir seus próprios aparelhos. Mas não só isso. A intenção é também oferecer recursos e sugestões ao professor que lhe permitam realizar demonstrações que possam conduzir a uma melhor compreensão dos fenômenos elétricos. Nesse sentido, é desejável que elas sejam realizadas concomitantemente com o desenvolvimento da teoria necessária para entender os diversos fenômenos observados [17, 18].

2. O eletróforo de Volta

2.1. Construção e funcionamento

O eletróforo de Volta é um gerador eletrostático rudimentar montado por Volta em 1775 [18]. Para montá-lo, basta dispor de um disco isolante (base) e um disco metálico com cabo isolante e diâmetro ligeiramente menor que o primeiro. O disco metálico é colocado sobre a base isolante, como mostra a Fig. 1.

Suponhamos que a base esteja eletrizada negativamente. Nesse caso, as cargas do disco metálico vão se separar por indução eletrostática, ficando as cargas positivas na base do disco e as negativas, em igual quantidade, na sua face superior. Se, em seguida, o disco for posto em contato com a terra (isto é, se o operador tocá-lo com a mão, por exemplo), a carga negativa escoar para ela. Desfazendo o contato com a terra e suspendendo o disco pelo cabo isolante, teremos um disco eletrizado positivamente, cuja carga pode ser transferida para outros condutores. Esse processo pode

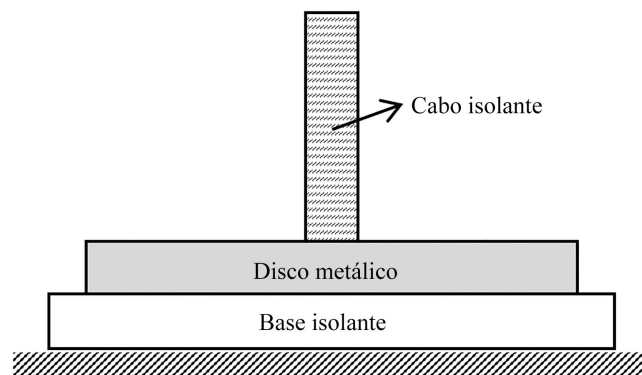


Figura 1 - Representação esquemática do eletróforo de Volta.

ser repetido sucessivamente, uma vez que não há redução significativa da carga na base isolante durante a operação de carregamento. Vale mencionar que, quando o disco é colocado sobre a base isolante, pouca carga é transferida da base para o disco, pois as superfícies em contato, embora pareçam lisas, são rugosas e, por isso, só haverá contato entre elas em poucos pontos. No entanto, se quisermos evitar o contato direto entre a base e o disco, podemos introduzir espaçadores isolantes entre os dois.

As bases isolantes dos primeiros eletróforos eram feitas de materiais como enxofre, ebonite (borracha vulcanizada) ou algum tipo de resina. Nós, por outro lado, temos utilizado com sucesso retalhos de forro de PVC, discos de isopor para pizza e placas de acrílico. Uma das vantagens de usar o disco de isopor é que, depois de eletrizado por atrito, ele permanece carregado por um longo tempo, quando comparado com placas de isopor eletrizadas. O PVC branco (ou o disco de isopor), atritado com flanela ou toalha de papel, carrega-se negativamente, enquanto o acrílico, atritado da mesma maneira, carrega-se positivamente. O disco metálico pode ser obtido retirando-se o fundo de uma lata ou usando formas de alumínio para pizza, que, assim como os discos de isopor, estão disponíveis em vários tamanhos. Por experiência própria, a parte mais delicada de um eletróforo é o cabo isolante. Quando optamos por uma forma grande de alumínio para pizza, uma possibilidade é colar (com cola líquida instantânea, por exemplo) diretamente na forma, como mostra a Fig. 2a, um adaptador de PVC branco com flange de 1/2 polegada, à venda em depósitos de material hidráulico. Com discos menores, uma opção são as rolhas de plástico usadas no lugar das rolhas de cortiça para tampar garrafas de vinho. Elas podem ser coladas umas às outras, dependendo do comprimento desejado, e diretamente no disco metálico, usando cola líquida instantânea. Nesse caso, para retirar o disco de cima da base, o operador deve segurar no clipe indicado na Fig. 2b, porque a película que reveste a rolha

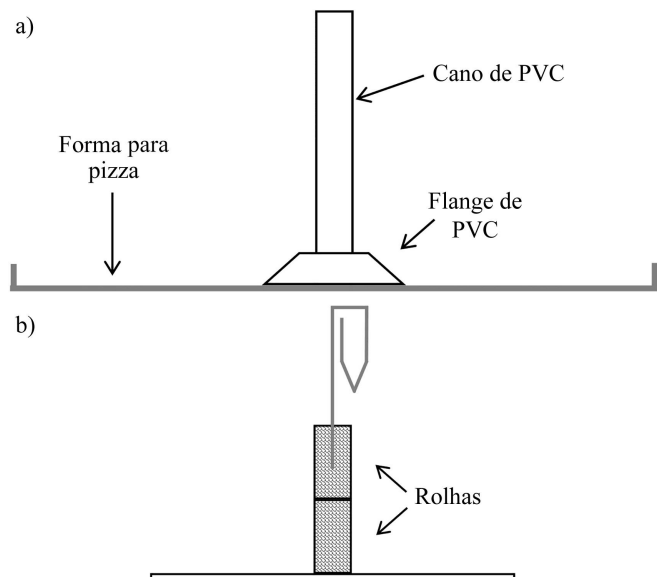


Figura 2 - a) Forma para pizza grande, de alumínio, com cabo isolante feito a partir de um adaptador de PVC com flange; b) Fundo metálico de uma lata com cabo isolante feito a partir de duas rolhas de plástico.

nem sempre apresenta um isolamento tão bom quanto o núcleo da rolha.

2.2. Checando o funcionamento do eletróforo

As várias etapas do processo de carregamento do eletróforo podem ser visualizadas com o auxílio de uma tira de folha de ouro [19], como mostra a Fig. 3.

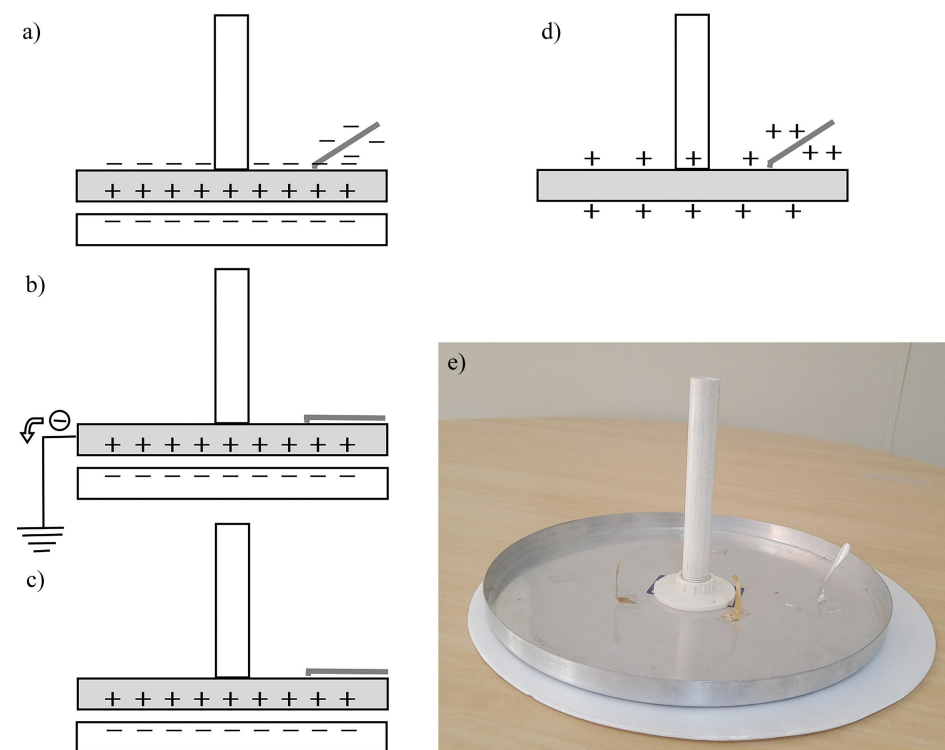


Figura 4 - As etapas no processo de carregamento do eletróforo. Foto (e) corresponde ao diagrama (a) e a foto (f) ao diagrama (d).

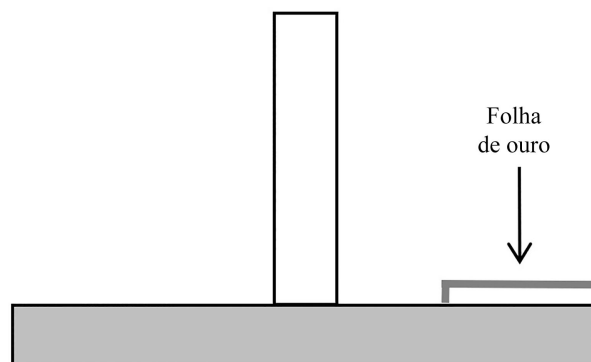
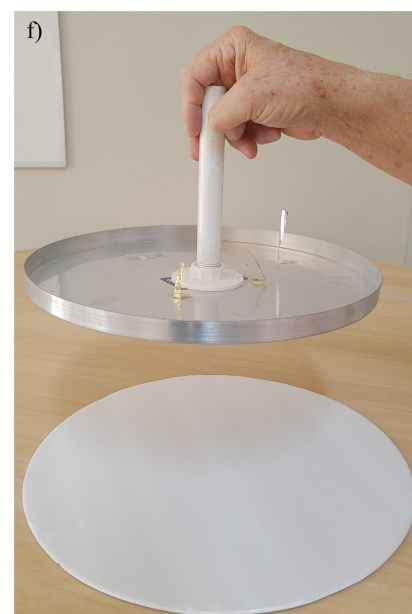


Figura 3 - Disco metálico do eletróforo com uma folha de ouro fixada na superfície.

As folhas de ouro, extremamente finas e disponíveis em casas de materiais para artesanato, são conhecidas comercialmente como “Folhas Imitação Ouro”. A Fig. 4 mostra o que acontece com a tira de folha de ouro durante o processo de carregamento do eletróforo, descrito no item 2.1. O aluno deve se convencer de que, no caso das Figs. 4b e 4c, a tira não reage, porque não há carga em excesso na parte superior do disco metálico.

2.3. Usando a lâmpada de néon para detectar polaridade e como “voltímetro rudimentar”

A lâmpada de néon é uma lâmpada miniaturizada de descarga em gás que emite luz alaranjada. Ela consiste em uma pequena ampola de vidro com cerca de



2 cm de altura, que contém principalmente gás néon em baixa pressão e dois eletrodos (Fig. 5). Em geral, para emitir luz, ou seja, para que ocorra a ruptura do gás, essas lâmpadas devem ser submetidas a uma tensão m torno de 65 V. Quando alimentadas por uma tensão alternada, ambos os eletrodos irão brilhar. No entanto, se a tensão for contínua, apenas o eletrodo polarizado negativamente irá brilhar, de modo que a lâmpada de néon também pode ser utilizada como detector de polaridade [2, 20]. Suponhamos, por exemplo, que o operador segure com a mão um dos terminais da lâmpada e encoste o outro no disco metálico da Fig. 4a. Nesse caso, o eletrodo em contato com o disco é que irá brilhar, indicando que o sinal da carga na face superior do disco era realmente negativo, como previsto (isso mostra também que a base estava polarizada negativamente). Se, por outro lado, o operador encostar um dos terminais no disco da Fig. 4d, o eletrodo preso a sua mão é que irá brilhar, indicando que aquele em contato com o disco foi polarizado positivamente.

Esse método para detectar polaridade funciona bem quando se deseja identificar o sinal da carga em um condutor carregado, como o disco metálico da Fig. 4. Isso ocorre porque o fluxo momentâneo de carga fornecido pelo disco ao se descarregar através da lâmpada é suficiente para fazê-la brilhar. O mesmo não aconteceria se encostássemos um dos terminais da lâmpada na base isolante eletrizada da Fig. 4. Entretanto, se a umidade do ar estiver excepcionalmente baixa e a sala escura, o operador poderá observar um brilho tênue em um dos eletrodos da lâmpada, deslizando um de seus terminais sobre a base isolante.

A lâmpada de néon também pode ser utilizada para avaliar o potencial de superfície no disco metálico da Fig. 4. Essa é uma questão importante, porque muitos estudantes não têm ideia da ordem de grandeza desse potencial (quando questionamos nossos alunos sobre isso, as respostas variam desde alguns volts até no máximo uma ou duas centenas de volts).

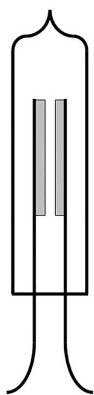


Figura 5 - Lâmpada de néon.

Para tratar dessa questão, é conveniente usar um eletróforo construído com uma forma grande de alumínio para pizza e um disco de isopor também grande. Inicialmente, o aluno deve se convencer de que o valor desse potencial deve ser no mínimo igual a 65 V, uma vez que a lâmpada de néon serviu tanto para identificar a polaridade na face superior do disco na Fig. 4a

Um eletroscópio é um dos primeiros instrumentos usados para detectar a presença de carga elétrica em um corpo, ou seja, identificar se um corpo está eletrizado

como a polaridade do disco na Fig. 4d. Para verificar se esse valor pode ser maior, o teste de polaridade deve ser repetido, usando-se várias lâmpadas em série montadas em uma barra de bornes. Seguindo essa ideia, repetimos o teste feito anteriormente com 5, 10 e depois 16 lâmpadas em série. As lâmpadas brilharam normalmente. Isso mostrou que o potencial tanto na face superior do disco da Fig. 4a como no disco da Fig. 4d era no mínimo 1000 V. Esse valor pode ainda ser estendido se repetirmos o teste utilizando mais lâmpadas, mas já é suficiente para mostrar que o potencial nos casos descritos acima é no mínimo da ordem de 10^3 V.

3. O eletroscópio

Um eletroscópio pode ser definido como qualquer instrumento ou dispositivo capaz de revelar se um corpo está eletrizado ou não. De acordo com essa definição, o *versorium*, descrito por Gilbert em sua obra de 1600, que consistia em uma agulha montada em um pivô (lembrando uma bússola) [4], pode ser considerado um tipo de eletroscópio. Gilbert utilizou-o para pesquisar a existência de materiais que apresentassem comportamento idêntico ao do âmbar quando atritados. Na primeira metade do séc. XVIII, vários outros modelos foram utilizados e, no final desse mesmo século, surgiu um instrumento muito sensível: o “eletroscópio de folha de ouro”, inventado por Abraham Bennet (1749-1799) e descrito por ele em uma publicação de 1787 [18, 21].

Detalhes de construção e utilização de eletroscópios mais simples, como o pêndulo eletrostático e aqueles feitos com papel de seda, encontram-se tanto no livro *Experiências de ciências para o Ensino Fundamental* do professor Alberto Gaspar [22] como no livro *Os fundamentos experimentais e históricos da eletricidade*, do professor André K.T. Assis [4]. Informações adicionais sobre a origem e a evolução dos eletroscópios e sua importância, tanto para o ensino da eletrostática como para a compreensão dos fenômenos elétricos, podem ser encontradas no artigo de Medeiros [18] intitulado *As origens históricas do eletroscópio*, e também na dissertação de mestrado de Márcio A.S. dos Santos, intitulada *O eletroscópio de folhas de alumínio como instrumento de ensino dos conceitos de eletrostática*, defendida na Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) em 2016, disponível na internet.

3.1. Eletroscópio de folha de ouro

Ao longo de nossa carreira docente, temos incentivado e orientado nossos alunos a montar os mais diversos modelos de eletroscópios, utilizando folha de alumínio, papel de seda, linha de costura de algodão e fitas metálicas usadas na confecção de fantasias, entre

outros materiais. No momento, estamos dando preferência à construção de eletroscópios de folha de ouro. Isso porque essas folhas, extremamente finas e já mencionadas no item 2.2, são agora facilmente encontradas, tanto em casas de materiais para artesanato como no mercado livre, a um preço relativamente baixo (um pacote com 25 folhas de 16 cm por 16 cm custa em torno de 7 dólares, ou aproximadamente 40 reais no câmbio atual).

Devido a sua fragilidade, a folha de ouro, depois de montada em um suporte adequado, deve ser protegida principalmente contra correntes de ar. Por essa razão, para montar o eletroscópio, escolhemos uma embalagem cilíndrica de 17 cm de altura por 10 cm de diâmetro, com tampa isolante de plástico incolor, fundo metálico e corpo cilíndrico feito de papelão, de preferência com parte interna metalizada. O fato de o envoltório ser de papelão facilita a abertura de janelas laterais diametralmente opostas, utilizando um estilete. Para proteger a folha do vento e permitir sua visualização através das janelas, o corpo da embalagem pode ser envolvido em uma folha de acetato (material transparente e flexível encontrado em papelarias). Além disso, uma embalagem como essa desempenha também o papel de gaiola de Faraday, protegendo a folha de ouro contra campos elétricos externos indesejáveis.

A folha de ouro é fixada com fita adesiva em uma tira metálica, presa na extremidade inferior de um parafuso, como mostra a Fig. 6. Esse parafuso atravessa o centro da tampa plástica da embalagem e é introduzido em um disco metálico com borda arredondada ou em um puxador metálico, como o mostrado na figura (esse puxador é um dos modelos disponíveis; existem também os esféricos, tipo bola, mas são mais caros). Se a intenção é construir um eletroscópio maior para demonstrações em sala de aula, pode-se optar, em vez do puxador, pelo engate utilizado para fixar pequenas carretas na traseira de automóveis ou caminhonetes [21].

O eletroscópio de folha de ouro pode permanecer carregado por um tempo maior (em torno de uma hora), mesmo em dias relativamente úmidos, se introduzirmos entre o puxador e a tampa isolante uma bucha esculpida em uma rolha de plástico, como a descrita no item 2.1, ou uma bucha confeccionada com Teflon (Fig. 7).

Para manusear as folhas de ouro, que vêm separadas por folhas de papel de seda na embalagem, é aconselhável passar talco nas mãos e usar máscara. O procedimento utilizado para cortar uma tira de folha de ouro no tamanho desejado consiste em: 1) inserir uma folha de ouro entre duas folhas de papel de seda, formando um sanduíche; 2) pressionar uma régua sobre a linha imaginária que separa a tira a ser cortada do restante da folha (Fig. 8); e, finalmente, 3) usar a régua como guia e passar um estilete ou uma lâmina de barbear nova sobre essa linha. Seguindo esses passos, a

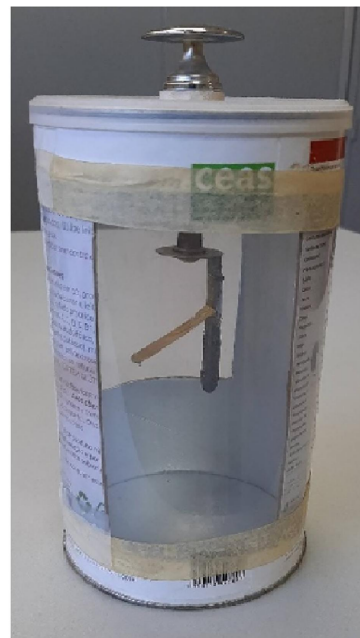
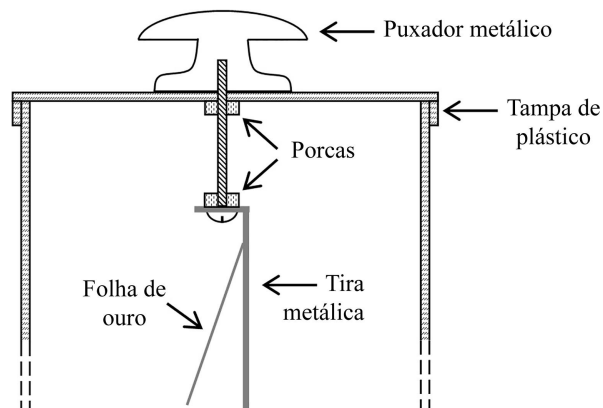


Figura 6 - Eletroscópio de folha de ouro.

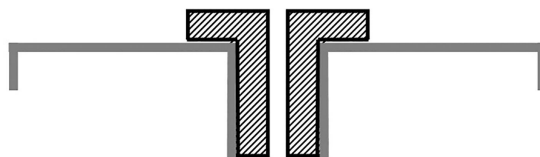


Figura 7 - Tampa isolante do eletroscópio com uma bucha esculpida numa rolha de plástico para reforçar a isolação.

tira de ouro estará pronta para ser fixada na tira metálica mostrada na Fig. 6.

3.2. Eletrização por contato

O processo mais simples para se eletrizar um corpo, como descrito na maioria dos livros, é por atrito. Quando se fala em atrito, vêm à memória termos como força de atrito e calor gerado pelo atrito. Mas seria essa forma de eletrização uma consequência direta desses fatores? Após discutir essa questão com seus alunos, é preciso que o professor destaque que, na realidade, a

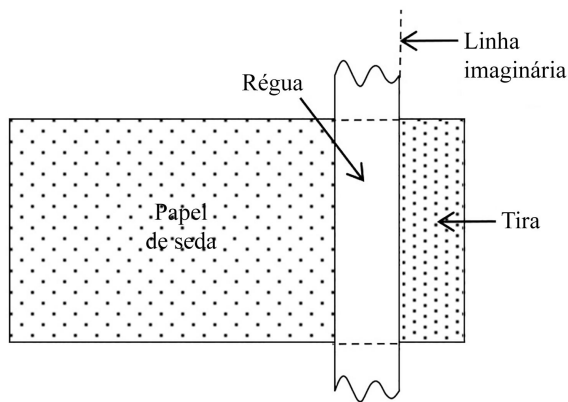


Figura 8 - Montagem utilizada para cortar uma tira de folha de ouro.

eletrização por atrito é consequência do contato íntimo e extenso que se estabelece entre dois corpos quando atritados um contra o outro. (Por essa razão, Moore [2] sugere utilizar a expressão “eletrização por contato” em lugar da expressão “eletrização por atrito” ou “triboeletricidade”). Se os corpos forem de materiais diferentes, o contato íntimo pode fazer com que os átomos superficiais de um deles (doador) cedam elétrons para o outro (receptor). Isso pode ser verificado por meio de uma lâmina de PVC, retirada de um pedaço de forro de PVC branco, e um eletroscópio de folha de ouro. Se martelarmos uma das extremidades da lâmina sobre uma base metálica, verificamos que a lâmina se eletriza negativamente. Isso significa que elétrons da base metálica foram transferidos para a lâmina.

Uma alternativa para mostrar que o metal cedeu elétrons para o isolante é deslizar um pedaço de forro de PVC sobre a cabeça metálica do eletroscópio de folha de ouro. Verifica-se, então, que o eletroscópio fica carregado. Mas com qual carga? Aproximando-se do eletroscópio uma barra de acrílico eletrizada positivamente, observa-se que a divergência da folha de ouro aumenta. Isso mostra que o eletroscópio estava eletrizado positivamente. Se, em seguida, aproximarmos do eletroscópio o pedaço de PVC, a divergência da folha diminui, o que comprova que o pedaço de PVC se eletrizou negativamente.

3.3. Condutores, isolantes e a indução eletrostática

As experiências descritas na seção 27-8 da Ref. [13] para mostrar a diferença entre condutores e não condutores (isolantes), que lembram aquelas realizadas por Stephen Gray em 1729 [14], podem ser reproduzidas utilizando-se objetos simples, como parafusos com cabeça arredondada, cano de PVC, copo descartável de plástico e pêndulo eletrostático. Com dois desses parafusos (de 10 cm) unidos por uma porca, formamos um bastão metálico com extremidades arredondadas (Fig. 9a), e com um pedaço de 20 cm de cano de PVC de

½ polegada, com as extremidades revestidas com ponteiros de borracha, formamos um bastão isolante (Fig. 9b).

Para construir o pêndulo eletrostático, usamos um pedaço de fio de nylon, de cerca de 30 cm, retirado de uma meia feminina, e um pequeno disco de folha de alumínio [22]. Com esse conjunto de objetos, podemos mostrar a diferença entre condutores e isolantes. Para isso, colocamos o bastão metálico sobre um copo plástico, de modo que uma de suas extremidades toque o pequeno disco metálico do pêndulo eletrostático (Fig. 10). Em seguida, esfregamos na outra extremidade do bastão um canudinho de refresco previamente carregado. Observamos então que o disco metálico é repelido pelo bastão e que a repulsão continua mesmo quando afastamos o canudinho. O mesmo acontece quando iniciamos o experimento com o disco metálico tocando qualquer outra parte do bastão. Substituindo o bastão metálico pelo bastão de PVC (previamente lavado com

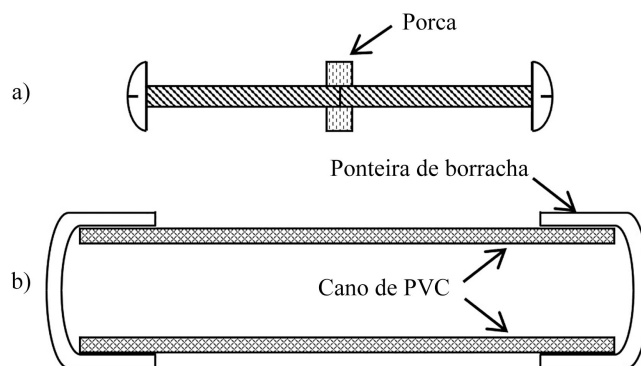


Figura 9 - a) Bastão metálico com bordas arredondadas, b) Bastão isolante de PVC com ponteiros de borracha nas extremidades.

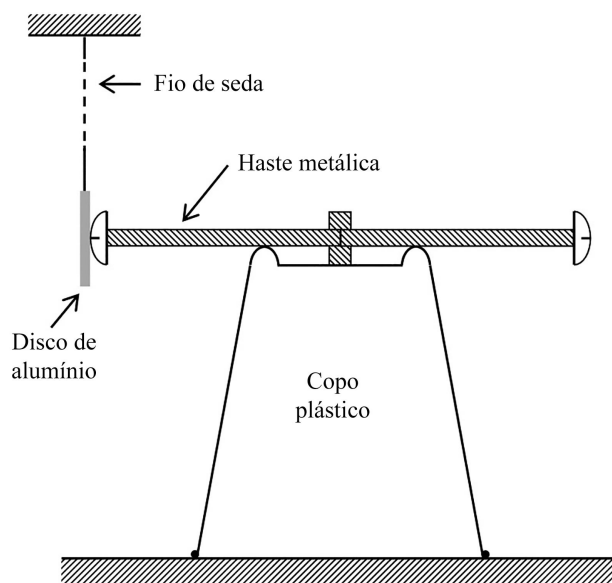


Figura 10 - Montagem utilizada para mostrar a diferença entre condutores e isolantes.

detergente para eliminar impurezas superficiais que possam comprometer seu isolamento) e repetindo o procedimento anterior, observamos que o disco metálico permanece imóvel.

A diferença de comportamento entre o bastão metálico e o de plástico, exibida durante o experimento descrito, pode ser explicada admitindo-se que no metal algumas partículas elétricas têm liberdade de movimento, enquanto no plástico não têm essa liberdade. De fato, quando aproximamos do disco metálico carregado o canudinho eletrizado negativamente, observamos que o disco se afasta (o canudinho de refresco, quando atritado com papel higiênico, carrega-se negativamente). Isso mostra que, ao esfregarmos o canudinho previamente carregado no bastão metálico, tanto o disco quanto o bastão ficam carregados negativamente e que partículas negativas cedidas pelo canudinho se distribuem entre o bastão e o disco. No caso do bastão de plástico, inicialmente neutro, a transferência de partículas e a consequente eletrização acontecem somente na parte do bastão que está em contato direto com o canudinho, enquanto a parte restante permanece neutra, o que explica a imobilidade do disco metálico encostado no bastão.

A primeira parte do experimento mostrou que as partículas negativas cedidas pelo canudinho tinham liberdade para se espalhar por todo o bastão metálico, o qual transferiu parte delas para o disco metálico. No entanto, as partículas negativas do próprio bastão teriam a mesma liberdade? A resposta é afirmativa, pois quando esfregamos na extremidade direita do bastão metálico mostrado na Fig. 10 uma barra de acrílico eletrizada positivamente, o disco também se afasta e tanto ele quanto o bastão metálico ficam eletrizados positivamente, sinal de que partículas negativas do bastão metálico foram transferidas para a barra de acrílico. A conclusão, portanto, é que, no metal, as partículas negativas, que dele fazem parte ou as que nele estão em excesso, têm liberdade para se movimentar.

Tendo demonstrado que no metal as partículas negativas têm liberdade de movimento, podemos utilizar a montagem esquematizada na Fig. 10 para discutir a indução eletrostática. De fato, se na Fig. 10 aproximarmos o canudinho de refresco carregado da extremidade direita do bastão metálico (em vez de esfregá-lo), observaremos que o disco metálico do pêndulo será repelido pelo bastão. Quando o canudinho é afastado para longe do bastão, o disco volta para sua posição original. Isso significa que, num primeiro momento, as partículas negativas com liberdade de movimento no bastão são repelidas para sua extremidade esquerda pelo canudinho, que, portanto, ficou negativa, enquanto a região abandonada por elas torna-se positiva; quando afastamos o canudinho, a distribuição de cargas volta ao estado inicial. No entanto, se mantivermos o canudinho nas proximidades do bastão e este for aterrado por um breve instante, observaremos que o

disco metálico volta a ficar encostado no bastão, indicando que as cargas negativas escoaram para a terra. Afastando-se, em seguida, o canudinho, as cargas positivas redistribuem-se pelo bastão e o disco volta a ser repelido. Para comprovar que tanto a carga do bastão quanto a do disco é positiva, basta constatar que ocorrerá uma atração quando o canudinho carregado negativamente for aproximado do disco. Uma alternativa para discutir a indução eletrostática é reproduzir os experimentos sobre o tema descritos em [13] usando dois bastões metálicos, cada um colocado sobre um copo plástico.

3.4. Um aparente paradoxo

A Fig. 11 mostra os passos necessários para, por exemplo, carregar positivamente um eletroscópio por indução.

Aproximando-se um corpo eletrizado negativamente (indutor) do eletroscópio inicialmente descarregado, a folha de ouro do mesmo diverge. Mantendo-se o indutor na sua posição e ligando-se o eletroscópio à terra, a divergência desaparece, sinal de que as cargas negativas escoaram para a terra (Fig. 11b). Desfazendo-se a ligação com a terra e, em seguida, afastando-se o indutor, a carga positiva redistribui-se pelo eletroscópio e a folha de ouro torna a divergir (Fig. 11c).

A maioria dos alunos não costuma questionar essa explicação, mas alguns argumentam: se, inicialmente, as cargas negativas foram repelidas pelo indutor para a folha de ouro do eletroscópio, como agora, com a ligação à terra, elas conseguem vencer a repulsão e escoar para a terra [19]? Essa questão também intrigava estudiosos mais antigos. Esse aparente paradoxo só pôde ser compreendido depois que o conceito de potencial elétrico foi estabelecido [23]. Na Fig. 11a, o eletroscópio está imerso em uma região de potencial negativo, devido à presença do indutor carregado negativa-

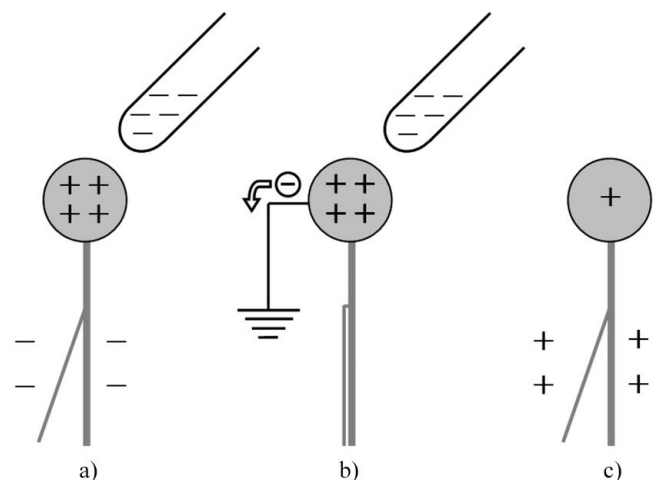


Figura 11 - Os passos para se carregar um eletroscópio por indução.

mente. Ao ligarmos o eletroscópio à terra, os elétrons escoam para ela, porque tendem a se deslocar do potencial menor para o maior, que no caso é o potencial da terra. Isso é consistente com o fato de que, com o aterramento, o eletroscópio e a terra formam um único condutor e, então, por indução, as cargas positivas acumulam-se na extremidade mais próxima do indutor carregado negativamente e as negativas, necessariamente na extremidade mais afastada (Fig. 12).

4. Conclusões

Iniciamos este artigo destacando o papel desempenhado, durante os 300 anos que antecederam o início do século XX, por alguns dos personagens que contribuíram para esclarecer, em parte, a natureza da eletricidade. Algumas das pesquisas desenvolvidas por esses personagens conduziram à invenção de instrumentos que não só incentivaram mas também facilitaram as investigações relacionadas com a eletricidade estática.

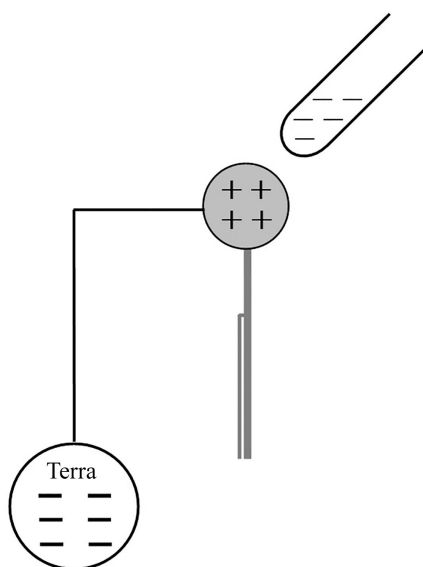


Figura 12 - Distribuição de cargas ao aterrar um eletroscópio numa das etapas para carregá-lo por indução.

Na sequência, mostramos que, com os materiais atualmente disponíveis, alguns desses instrumentos, como o eletróforo de Volta e o eletroscópio de folha de ouro, podem ser reproduzidos com relativa facilidade. Não nos limitamos, contudo, aos detalhes de construção. No caso do eletróforo, por exemplo, aproveitamos para mostrar como determinar tanto o sinal da carga num disco metálico carregado, utilizando uma lâmpada de néon, como avaliar o potencial na superfície do disco por meio de um conjunto de lâmpadas de néon em série, que faz o papel de um “voltímetro rudimentar”.

No item sobre condutores e isolantes, mostramos como os resultados das experiências descritas reforçam a ideia de que as partículas com liberdade de movimento nos condutores metálicos são as partículas negativas (elétrons). Além disso, são também abordados alguns fatos pouco explorados sobre a eletrização por atrito. Nossa preocupação, portanto, não foi apenas com os detalhes de construção de aparelhos que possam causar impacto quando exibidos durante uma aula, mas sim com a maneira como o professor pode explorar o material apresentado para enriquecer suas aulas. Acreditamos que o professor interessado em reproduzir os aparelhos descritos não encontrará grandes dificuldades, tendo em vista a disponibilidade dos materiais que utilizamos para construí-los.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio financeiro. Agradecemos também à professora Lygia Walmsley, do Departamento de Física da Unesp - Rio Claro, que nos incentivou a iniciar este trabalho, e aos professores René A. M. Alfaro e Luiz A. Barreiro pelas sugestões. Por fim, agradecemos também aos funcionários do Departamento pelo apoio técnico.

Recebido em: 26 de Setembro de 2023

Aceito em: 21 de Junho de 2024

Referências

- [1] D. Roller, D.H.D. Roller, *Am. J. Phys.* **21**, 343 (1953).
- [2] A.D. Moore, *Electrostatics* (Doubleday & Company Inc., New York, 1968).
- [3] G. Holton, D.H.D. Roller, *Foundations of Modern Physical Science* (Addison-Wesley Publishing Company Inc., Massachusetts, 1965).
- [4] A.K.T. Assis, *Os Fundamentos Experimentais e Históricos da Eletricidade* (Editora Livraria da Física, São Paulo, 2011).
- [5] J.F.M. Rocha (org.), *Origens e Evolução das Idéias da Física* (EDUFBA, Salvador, 2002), p. 188-201.
- [6] M.H. Shamos (ed.), *Great Experiments in Physics* (Dover Publications Inc., New York, 1987).
- [7] L. Motz, J.H. Weaver, *The Story of Physics* (Plenum Press, New York, 1989).
- [8] I. Asimov, *Cronologia das Ciências e das Descobertas* (Editora Civilização Brasileira, Rio de Janeiro, 1993).
- [9] J. Osada, *Evolução das Idéias da Física* (Edgard Blucher, Editora da Universidade de São Paulo, 1972), p. 26-36.
- [10] L.O.Q. Peduzzi, *Do Âmbar e da Pedra de Héacles à Descoberta de Oersted* (Departamento de Física, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018), p. 30-35.
- [11] J.H. Jeans, *Electricity and Magnetism* (Cambridge at the University Press, London, 1941), 4th ed.
- [12] F.J. Blatt, *Principles of Physics* (Allyn and Bacon, Boston, 1989), 3rd ed., section 18.2.

- [13] Physical Science Study Committee (org.), *Física* (Editora Universidade de Brasília, Brasília, 1967), parte IV.
- [14] S.L.B. Boss, A.K.T. Assis, J.J. Caluzi, *Stephen Gray e a Descoberta dos Condutores e Isolantes* (Cultura Acadêmica Editora, São Paulo, 2012).
- [15] D. Halliday, R. Resnick, *Física* (Ao Livro Técnico S.A., Rio de Janeiro, 1966), parte II, seção 30-4.
- [16] G. Gamow, *Biografia da Física* (Zahar Editores, Rio de Janeiro, 1963).
- [17] A.B. Arons, *Teaching Introductory Physics* (John Wiley & Sons, Inc., New York, 1997), p. 172.
- [18] A. Medeiros, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **24**, 353 (2002).
- [19] J.B. Muir, I. MacInnes, *The School Science Review* **62**, 122 (1980).
- [20] J. Lincoln, *Phys. Teach.* **55**, 440 (2017).
- [21] J. Stewart, S. Skinner, G. Stewart, *Phys. Teach.* **51**, 520 (2013).
- [22] A. Gaspar, *Experiências de Ciências para o Ensino Fundamental* (Editora Ática, São Paulo, 2003), 1a ed., p. 222-243.
- [23] T.N.O. Folmer-Johnson, *Elementos de Eletricidade* (Livraria Nobel S.A., São Paulo, 1961), p. 92.