



# Teoria e construção de um gerador eletrostático simples

## Theory and construction of a simple electrostatic generator

Roberto Hessel<sup>1</sup>, Makoto Yoshida<sup>1</sup>, Alexandre Mesquita<sup>\*1</sup>, Agnaldo A. Freschi<sup>2</sup>

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

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

Recebido em 23 de novembro de 2023. Revisado em 21 de março de 2024. Aceito em 24 de abril de 2024.

Quando se deseja obter uma diferença de potencial de algumas dezenas de milhares de volts, pode-se utilizar geradores eletrostáticos. Neste trabalho, descrevemos como construímos um gerador eletrostático simples, cujo princípio de funcionamento se baseia na eletrização por fricção (atrito). Além disso, descrevemos também como estimar os valores esperados tanto para a tensão produzida como para a corrente elétrica gerada por esse gerador.

**Palavras-chave:** Eletrostática, gerador eletrostático, corrente elétrica, alta tensão.

In order to obtain a potential difference of tens of thousands of volts, electrostatic generators can be used. In this work, we describe how to make a simple electrostatic generator, whose working principle is based on electrification by friction. Moreover, we also describe how to estimate the expected values for both the produced voltage and the generated electric current by this generator.

**Keywords:** Electrostatics, electrostatic generator, electric current, high voltage.

## 1. Introdução

Costuma-se atribuir a invenção do primeiro gerador eletrostático, por volta de 1663, a Otto van Guericke. Seu aparelho produzia eletricidade pelo contato da mão com uma esfera girante de enxofre, embora ele jamais tenha se referido ao seu invento como um gerador eletrostático, pois seu objetivo era outro [1–3]. Segundo Peduzzi [4], embora seu invento “*tenha gerado eletricidade em quantidades suficientes para realização de novos e importantes experimentos, o globo rotativo de enxofre era para Guericke uma réplica da Terra e não uma máquina eletrostática*”. Em 1706, a ideia foi retomada pelo físico inglês Francis Hauksbee, que substituiu a bola de enxofre por uma esfera de vidro [2, 3, 5]. Quando a esfera era friccionada com a mão ou com um tecido de lã, enquanto era girada por meio de uma manivela, acumulava mais carga do que aquela conseguida com a bola de enxofre [5, 6]. Mais tarde, melhorias foram introduzidas, substituindo a esfera, ora por um cilindro, ora por um disco, ambos de vidro, e a mão do operador por uma almofada de couro [3].

Nas décadas seguintes, geradores como o de Hauksbee, ou semelhantes, passaram a ser comercializados e até mesmo adotados pela maioria dos pesquisadores interessados em estudar os fenômenos eletrostáticos. Isso contribuiu para que, no século XVIII, as investigações relacionadas com eletricidade estática se acelerassem [2].

Atualmente, o gerador eletrostático mais conhecido, funcionando às custas da eletrização por atrito, é a versão (não profissional) utilizada para demonstrações didáticas e baseada no gerador construído pelo engenheiro-pesquisador Robert J. van de Graaff, em 1931, que estava interessado em pesquisas no campo da Física Moderna [1, 2].

Mas existem, também, geradores eletrostáticos, cujo funcionamento está baseado no princípio da indução eletrostática, que havia sido descoberta por Stephan Gray em 1729 [2]. Esses geradores, em geral, são mais eficientes que aqueles que operam às custas da eletrização por atrito. O protótipo de tais máquinas é o eletróforo de Volta, criado por Alessandro Volta em 1775 [7, 8]. Por sua vez, o gerador desse tipo mais conhecido é o gerador construído por James Wimshurst em 1882, e ainda hoje utilizado para demonstrações em laboratórios didáticos ou museus de ciências [1, 2]. Detalhes de construção de alguns geradores simples operando às custas da indução eletrostática podem ser encontrados no livro *Eletrostatics* do Prof. A. D Moore [1].

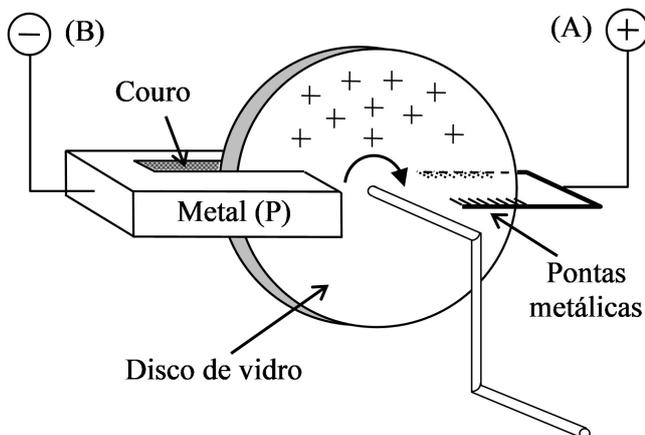
Neste trabalho, descrevemos detalhadamente o gerador eletrostático que montamos a partir de materiais facilmente encontrados no comércio a um custo de aproximadamente R\$ 100,00. Vale mencionar que para a construção do gerador usamos também materiais descartados tidos como sucatas, como chapas de madeira, acrílico, canos de PVC etc. Para estimar o valor esperado da corrente gerada pelo gerador, utilizamos apenas conceitos básicos da eletrostática e matemática elementar, de modo que um estudante, mesmo de ensino médio, com

\*Endereço de correspondência: alexandre.mesquita@unesp.br

algum conhecimento de física básica e interesse não deve encontrar maiores dificuldades para ler o texto.

## 2. Funcionamento de um Gerador Eletrostático Simples Operando por Fricção

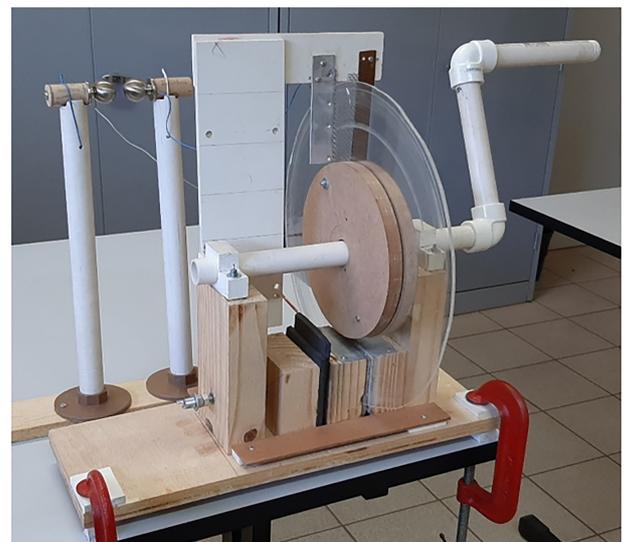
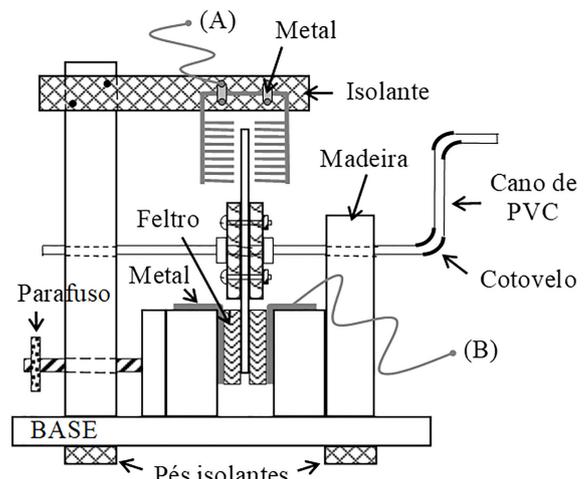
A Figure 1 mostra, esquematicamente, um gerador eletrostático simples, que produz continuamente por meio da eletrização por atrito uma diferença de potencial de alguns milhares de volts entre os terminais A e B. O disco de vidro, representado na figura, gira com o auxílio de uma manivela. A peça P metálica, no formato de um U que fica comprimindo o disco, é revestida internamente com couro (ou tecido de lã). Em atrito com o couro, o disco, ao girar, eletriza-se positivamente, enquanto o couro eletriza-se negativamente. A carga negativa no couro escoar para a esfera metálica B através de uma haste também metálica. A esfera A, por sua vez, está conectada a um conjunto de pontas metálicas, que se encontram próximas da superfície do disco, como mostrado na figura. Ao passar na frente dessas pontas, a carga positiva no disco induz nelas cargas negativas e, como consequência, surge em torno delas um campo elétrico tão intenso, que é capaz de ionizar o ar entre as pontas e o disco (poder das pontas) [9]. Os íons negativos, atraídos pelo disco, neutralizam sua carga positiva e os positivos, atraídos pelas pontas, neutralizam sua carga negativa. Enquanto o disco estiver girando, a carga negativa neutralizada nas pontas é repostada continuamente pela esfera metálica A, que vai acumulando carga positiva, enquanto a esfera B vai acumulando carga negativa. Cria-se, assim, uma diferença de potencial entre os terminais (polos) A e B. Se a A e B estiverem próximos, depois de certo número de revoluções do disco, saltará uma faísca entre eles.



**Figura 1:** Esquema de uma máquina eletrostática que gera uma diferença de potencial à custa da fricção de um disco de vidro com uma almofada de couro.

## 3. Detalhes de Construção de um Gerador Eletrostático Simples Operando por Fricção

Com os materiais disponíveis atualmente, é relativamente fácil construir uma máquina como a descrita acima. A Figure 2 representa, esquematicamente, o gerador que montamos, substituindo o disco de vidro da Figure 1 por um disco de acrílico, de 4 mm de espessura e 35 cm de diâmetro, e a almofada de couro por pedaços de feltro com uma face colante (feltro utilizado para revestir pés de cadeiras e mesas). O disco de acrílico é ensanduichado entre dois discos de uma chapa de fibras de madeira de média densidade (MDF) de 19 cm de diâmetro e fixado num eixo com manivela construído com cano de PVC de  $\frac{3}{4}$  de polegada. A parte do disco próxima da base é intercalada entre dois blocos de



**Figura 2:** Representação esquemática de uma máquina eletrostática simples que gera uma diferença de potencial de milhares de volts à custa da fricção de um disco de acrílico com uma almofada de feltro. A foto ilustra a máquina ligada aos puxadores metálicos da Figure 3.

madeira. Numa das faces de cada um desses blocos, colamos (usando cola de contato) uma chapa metálica no formato de um L, e sobre cada uma delas fixamos o feltro colante, como mostra a Figure 2. As duas peças metálicas estão conectadas por um fio não mostrado na figura.

A pressão exercida sobre o disco pelos blocos revestidos com feltro pode ser ajustada por meio do parafuso mostrado na figura. Na parte superior da máquina, duas fileiras de pontas metálicas (tiras de tela metálica) fixadas em lâminas também metálicas são posicionadas de modo que fiquem bem próximas do disco. Se a base da máquina for de madeira, ela pode ser isolada da Terra através de pés isolantes (PVC ou Teflon).

O acrílico atritado com feltro eletriza-se positivamente de modo que, quando o disco gira, o terminal B indicado na figura acumula carga negativa e o terminal A carga positiva, como discutido no item anterior. Surge, portanto, uma diferença de potencial entre os terminais A e B do gerador. O modelo deste gerador foi inspirado numa máquina descrita na página 25 da ref. [9], Fig. 24.

#### 4. Diferença de Potencial e Corrente Fornecidas Pelo Gerador

Um fato que desperta bastante atenção são as faíscas que surgem entre as duas esferas metálicas mostradas na Figure 3, quando o campo elétrico entre elas atinge um valor suficientemente alto para romper a camada de ar que as separa.

Para essa demonstração, usamos dois puxadores metálicos “tipo bola” de 25 mm de diâmetro, fixados em suportes isolantes e conectados aos terminais do gerador (no plano de fundo da foto da Figure 2). Em dias relativamente secos, temos observado a geração contínua de faíscas já nas primeiras voltas do disco, quando a separação entre as esferas é de cerca de 10 mm. Isso indica, segundo tabela apresentada por Moore (ref. [1], pág. 203), que a diferença de potencial entre os terminais A e B é cerca de 30 kV. A existência de uma diferença de potencial de alguns milhares de volts

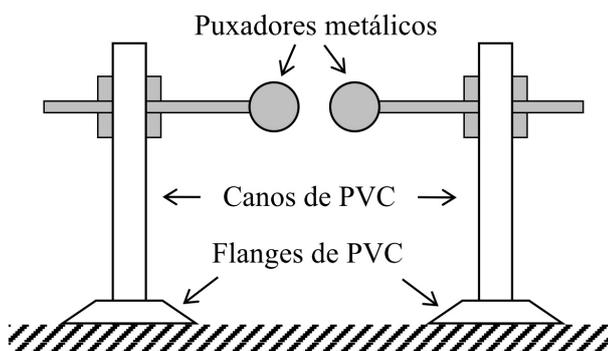


Figura 3: Puxadores metálicos tipo bola montados de forma que se possa observar centelhas entre eles quando ligados aos terminais (polos) do gerador eletrostático.

fornecida por esse gerador também pode ser verificada, utilizando lâmpadas de néon, que emitem luz quando submetidas à uma tensão em torno de 65 V. Um teste realizado com um conjunto de 40 lâmpadas em série (a quantidade disponível), conectado diretamente aos terminais do gerador, mostrou que as lâmpadas brilhavam normalmente, o que indica que a tensão gerada estava, no mínimo, em torno de  $40 \times 65$  volts = 2600 volts, ou seja, da ordem de milhares de volts. Outra alternativa é avaliar o potencial elétrico em relação à Terra de um dos polos do gerador. Para isso, basta segurar com a mão um dos terminais da associação em série (aterrando-o), enquanto aproximamos o outro terminal de um dos polos do gerador. Observa-se, então, que o conjunto de lâmpadas emitirá luz mesmo antes do terminal da associação encostar no polo.

Uma questão interessante e bastante didática, do nosso ponto de vista, diz respeito à estimativa da corrente elétrica fornecida pelo gerador, quando posto em funcionamento. Essa corrente pode ser estimada a partir da carga  $Q$  positiva depositada na parte do disco que passa pelas pontas metálicas num intervalo de tempo  $t$  e neutralizada pela carga negativa transferida para o disco através das pontas [10].

Suponhamos que a carga  $Q$  na área  $S$  hachurada da Figure 4 leve um intervalo de tempo  $t$  para passar pelas pontas metálicas. A carga  $Q$  é igual à densidade superficial de carga ( $\sigma$ ) multiplicada pela área ( $S$ ),  $Q = \sigma S$ , e a corrente conduzida pelo disco é dada por  $i = 2\sigma S/t$ , supondo que a área  $S$  na face oposta do disco também está eletrizada com carga  $Q$ . No entanto, para que o gerador forneça essa corrente, a carga  $Q$  deve ser neutralizada pela carga negativa transferida para o disco através das pontas metálicas, o que acontece quando o campo elétrico entre o disco e as pontas assume, dependendo da umidade do ar, um valor máximo ( $E_{\max}$ ) entre 10 kV/cm e 30 kV/cm [1, 11, 12], que está associado à máxima densidade superficial de carga ( $\sigma_{\max}$ ). De modo

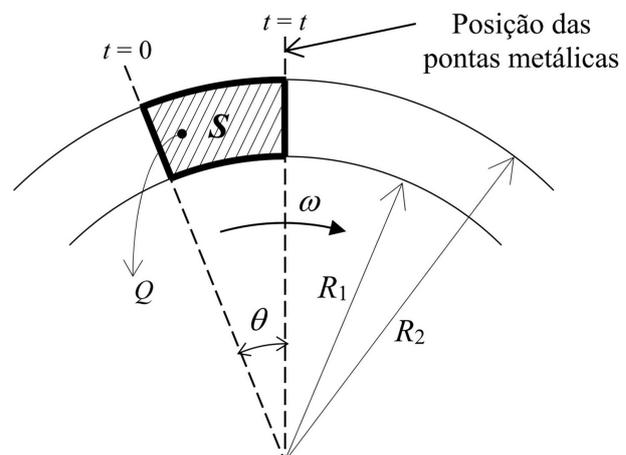


Figura 4: Esquema utilizado para estimar a corrente fornecida pelo gerador eletrostático descrito neste trabalho.

que a expressão anterior para corrente deve ser reescrita como

$$i = \frac{2\sigma_{\max}S}{t}. \quad (1)$$

O campo elétrico imediatamente acima de um plano finito eletrizado com densidade superficial de carga  $\sigma$  é dado por  $E = \sigma/2\epsilon_0$ , com  $\epsilon_0$  a permissividade do espaço livre [13]. Mas a distribuição ocorre nas duas faces do disco, de modo que em pontos próximos tanto de uma face como da outra  $E = 2 \times \sigma/2\epsilon_0 = \sigma/\epsilon_0$ . Disto decorre que  $\sigma_{\max} = \epsilon_0 E_{\max}$ . Como, além disso,  $S = (R_2^2 - R_1^2)\theta/2$ , resulta, usando a Eq. (1),

$$\begin{aligned} i &= \frac{2\sigma_{\max}S}{t} = \frac{\epsilon_0 E_{\max}(R_2^2 - R_1^2)\theta}{t} \\ &= \epsilon_0 E_{\max}(R_2^2 - R_1^2)\omega_{\max} \\ &= 2\pi\epsilon_0 E_{\max}(R_2^2 - R_1^2)f_{\max}, \end{aligned} \quad (2)$$

onde  $\theta/t = \omega_{\max} = 2\pi f_{\max}$  é a velocidade angular máxima do disco e  $f_{\max}$  sua frequência máxima de rotação. A experiência tem mostrado que a corrente tem um limite, ou seja, ela não cresce indefinidamente com a frequência. Por essa razão, escrevemos  $f_{\max}$  na equação acima. A explicação para uma corrente limitada pode estar associada ao fato de que a densidade superficial de carga depositada no disco também é limitada. Em nosso gerador, a máxima corrente medida ocorre para uma frequência em torno de 1 Hz. Sabendo que  $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$  F/m,  $D_1 = 2R_1 = 0,19$  m,  $D_2 = 2R_2 = 0,35$  m, e que  $E_{\max}$  varia entre 10 kV/cm e 30 kV/cm e supondo ainda  $f_{\max} \approx 1$  Hz, resulta, da Eq. (2), que a corrente pode variar entre 1,  $2\mu\text{A}$  e 3,  $6\mu\text{A}$ . A corrente medida com um micro-amperímetro analógico conectado diretamente nos terminais do gerador num dia normal ficou em torno de  $2\mu\text{A}$ , valor que está dentro da faixa acima. Como, para usar corretamente o micro-amperímetro analógico, é preciso observar a polaridade de suas entradas, essa medida serve também para mostrar que o terminal A do gerador descrito é realmente positivo, como foi dito anteriormente.

## 5. Conclusões

Neste artigo, fornecemos detalhes da construção de um gerador eletrostático simples e de baixo custo, cujo funcionamento se baseia na eletrização por atrito. Para montá-lo, utilizamos materiais tais como madeira, chapa de fibras de madeira de média densidade (MDF), acrílico, tela metálica, cano e conexões de PVC e feltro com uma face colante, que é próprio para revestir pés de cadeiras e mesas (contamos, também, com a colaboração de uma marcenaria, que nos doou retalhos e confeccionou os discos de madeira). Acreditamos que a escolha desses materiais torna mais fácil a tarefa daqueles que desejarem reproduzir o aparelho.

O gerador descrito é semelhante àqueles que estavam disponíveis no século XVIII, como se pode constatar

examinando as fotos que aparecem nas referências [3] e [5]. No entanto, a diferença fundamental é a substituição do disco de vidro, comumente usado naquela época, por um disco de acrílico e as almofadas de couro (ou tecido de lã) pelo feltro com uma face colante. Outra opção é utilizar discos de isopor para pizza colados em ambas as faces de um disco de madeira (MDF). Mas, nesse caso, o disco deve girar num único plano, pois, se oscilar lateralmente mesmo que minimamente, as pontas metálicas da Figure 2, que ficam muito próximas do disco, vão danificá-lo. Como não conseguimos evitar esse tipo de problema com o disco de isopor, optamos pelo disco de acrílico.

Finalizando, deduzimos uma expressão para estimar o valor esperado para a corrente fornecida pelo gerador a partir da definição de corrente e da relação existente entre o campo elétrico  $E$  imediatamente acima de um plano finito eletrizado uniformemente e a densidade superficial  $\sigma$  de carga elétrica. Esses princípios físicos também podem ser utilizados para estimar a corrente fornecida por um gerador van de Graaff, como mostra o problema citado na referência [10], e constituem do nosso ponto de vista, numa interessante aplicação prática, e também didática, desses princípios.

## 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, a 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. Finalmente, agradecemos também aos funcionários do Departamento pelo apoio técnico.

## Referências

- [1] A.D. Moore, *Electrostatics* (Doubleday & Company Inc., Nova York, 1968).
- [2] J.F.M. Rocha, em: *Origens e Evolução das Idéias da Física*, editado por J.F.M. Rocha (EDUFBA, Salvador, 2002).
- [3] W. Hackmann, *Cahiers de Science et Vie* **26**, 29 (1995).
- [4] L.O.Q. Peduzzi, *Do âmbar e da pedra de Hércules à descoberta de Oersted*, disponível em: [https://be37fb0e-ff6f-47d2-bea9-9e97e816116d.filesusr.com/ugd/7d71af\\_39ae649ce45d43918d029e071ef08aa4.pdf](https://be37fb0e-ff6f-47d2-bea9-9e97e816116d.filesusr.com/ugd/7d71af_39ae649ce45d43918d029e071ef08aa4.pdf).
- [5] I. Benguigui, *Cahiers de Science et Vie* **26**, 24 (1995).
- [6] I. Asimov, *Cronologia das Ciências e das Descobertas* (Editora Civilização Brasileira, Rio de Janeiro, 1993).
- [7] E. Perucca, *Física General y Experimental, Tomo II* (Editorial Labor, Barcelona-Madri, 1953), 2 ed.
- [8] A. Medeiros, *Rev. Bras. Ens. Fis.* **24**, 353 (2002).

- [9] E. Grimsehl, em: *A Textbook of Physics, v. III: Electricity and Magnetism*, editado por R. Tomaschek (Blackie & Son Ltd, Londres, 1993).
- [10] S. Kozel, E. Rashba e S. Slavatinskii, *Collected Problems in Physics* (Mir Publishers Moscow, Moscou, 1986).
- [11] A. Gaspar, *Experiências de Ciências para o Ensino Fundamental* (Editora Ática, São Paulo, 2003).
- [12] J.R. Reitz e F. Milford, *Foundations of Electromagnetic Theory* (Addison-Wesley Publishing Company, Massachusetts, 1967).
- [13] J. Goldemberg, *Física Geral e Experimental* (Companhia Editora Nacional, São Paulo, 1973), v. 2.