



Construção de um gerador eletrostático gotejante: chuva elétrica de Kelvin

Neste trabalho construímos um gerador eletrostático no qual a alta tensão é gerada pela queda de gotas de água que estão carregadas eletricamente, sendo armazenadas em recipientes isolados eletricamente da terra. Através de uma construção simples e de baixo custo, vários conceitos relacionados à eletrostática podem ser discutidos em diferentes níveis de ensino.

Este instrumento foi construído originalmente por William Thomson (1824-1907), também conhecido por Lord Kelvin, com sua descrição publicada em 1867 [1]. Kelvin sempre teve um grande interesse em eletrostática e no ensino de física. Suas contribuições significativas ao desenvolvimento da física, da indústria e na introdução do laboratório didático em universidades britânicas foram bem analisadas por Studart [2] e Lloyd [3]. A Revista Brasileira de Ensino de Física, em seu v. 29, n. 4 (2007) apresentou uma seção especialmente dedicada a Lord Kelvin no centenário de sua morte.

Experiências de eletrostática em geral proporcionam efeitos visuais interessantes. O gerador eletrostático gotejante descrito aqui é chamado algumas vezes de chuva elétrica de Kelvin [4-6]. Além do efeito visual, ele traz consigo uma grande quantidade de detalhes, desde a sua construção até seu funcionamento, transformando-o em uma interessante ferramenta didática sobre eletrostática. Conseguimos abordar com esta construção conceitos como condutores e isolantes, indução eletrostática e campo elétrico, dentre outros.

A chuva elétrica é capaz de produzir altas tensões através da queda de gotas

de água que são carregadas eletricamente durante o funcionamento da experiência, sendo armazenadas em recipientes isolados eletricamente, a fim de que a carga elétrica acumulada não se perca para a Terra. Na Fig. 1 encontramos um esquema geral da montagem. O aparelho consiste em dois reservatórios de água na parte

superior, que vão gotejar ao longo da experiência. Abaixo de cada gotejador existe um anel metálico que fica carregado eletricamente, um deles com carga positiva e o outro com carga negativa. Cada anel funciona como indutor de

cargas nas gotas. Nesta experiência ocorrem altas voltagens entre a água e o solo, da ordem de milhares de volts. Nestes casos a água se comporta como um condutor de eletricidade. Para entender o

Experiências de eletrostática em geral proporcionam efeitos visuais interessantes, e o gerador eletrostático gotejante ainda traz consigo uma grande quantidade de detalhes, transformando-o em uma interessante ferramenta didática sobre eletrostática



Figura 1. Foto do instrumento.

J. Camillo¹ e A.K.T. Assis²

Instituto de Física Gleb Wataghin, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil

¹E-mail: julianocamillo@gmail.com

²E-mail: assis@ifi.unicamp.br

Construímos um gerador eletrostático gotejante de Kelvin que funciona através de uma queda de gotas de água eletrizadas. Ele chega a gerar descargas elétricas causadas por diferenças de potencial da ordem de milhares de volts. Este instrumento é razoavelmente simples e barato de ser construído. Com ele podem ser explorados em sala de aula diversos aspectos relacionados com a eletrostática.

funcionamento do gerador, vamos supor que temos apenas um anel indutor e um único gotejador acima dele. Se o anel estiver carregado negativamente, isto vai induzir uma separação de cargas em todo o recipiente de água. O volume de água mais próxima ao indutor ficará eletrizado com uma carga oposta a do indutor (neste exemplo, a parte inferior da água próxima ao gotejador ficará carregada positivamente). A parte superior do volume de água próxima da superfície livre do fluido ficará carregada negativamente caso o recipiente esteja isolado, ou será neutralizada se o recipiente estiver aterrado, como é o caso de nossa montagem. Quando o volume inferior da água começar a gotejar, cada gota estará então eletrizada com uma carga oposta à carga do indutor (neste exemplo cada gota terá uma carga resultante positiva).

Vamos agora supor que temos dois anéis indutores, um carregado positivamente e o outro negativamente. A parte inferior do volume de água próxima do primeiro indutor estará carregada negativamente, enquanto a parte inferior do volume de água próxima do segundo indutor estará carregada positivamente. Quando começa o gotejamento, as gotas que vão passar pelo anel indutor positivo estarão negativamente carregadas, enquanto as que passam pelo indutor negativo estarão positivamente carregadas. As gotas caem devido à gravidade, passando pelos centros dos anéis carregados sem perderem suas cargas. As gotas são recolhidas por dois reservatórios inferiores que estão isolados eletricamente do solo, chamados de coletores. O coletor que está abaixo do anel positivo vai armazenar cargas negativas, enquanto o coletor que está abaixo do anel negativo vai armazenar cargas positivas. Conectamos com um fio condutor o coletor da esquerda com o indutor da direita, e com um outro fio condutor conectamos o coletor da direita com o indutor da esquerda. Conseguimos assim uma montagem auto-sustentável, na qual as cargas armazenadas em um coletor também servem para alimentar os indutores opostos. A alta tensão entre os dois reservatórios que coletam as gotas carregadas é capaz de produzir faíscas elétricas entre as duas esferas ligadas aos reservatórios inferiores, se estas esferas ficarem próximas entre si.

Montagem

Para o funcionamento da chuva elétrica é fundamental que o material utilizado como suporte seja um bom isolante elétrico, com a finalidade de evitar o escoamento das cargas elétricas que estão sendo

mantidas nos indutores. Os materiais isolantes também são fundamentais para evitar a perda das cargas geradas pela queda das gotas eletrizadas armazenadas nos coletores.

Para analisar quais materiais são condutores ou isolantes utilizamos um eletroscópio, cuja função é detectar a presença de cargas elétricas [7-9, 10, cap. 6].

O eletroscópio

O eletroscópio utilizado consiste em um pedaço de cartolina com dimensões da ordem de 10 cm × 10 cm, coberta com papel de alumínio. Na parte superior da cartolina é colada a extremidade de uma tirinha fina de papel de seda. O suporte para a cartolina deve ser um canudo plástico de refrigerante, que se comporta como um excelente isolante elétrico. Muitos outros materiais supostamente isolantes podem não funcionar: um palito de madeira se comporta como condutor para as tensões elétricas envolvidas nestas situações; já o PVC é um ótimo isolante elétrico. Na Fig. 2 temos a foto do eletroscópio que construímos.

Para eletrizar o eletroscópio, basta atritar uma régua plástica no cabelo ou em um pedaço de lã e em seguida raspá-la na parte superior da cartolina. Enquanto se raspa a régua na cartolina, o eletroscópio deve ser segurado pelo canudo plástico, evitando de tocar com as mãos na cartolina ou na tirinha. O eletroscópio, quando carregado, repele a tirinha de papel de seda, uma vez que esta adquire carga de mesmo sinal que a cartolina. O canudo plástico evita que as cargas armazenadas no eletroscópio escoem para a terra.

Para saber se um material é um condutor elétrico ou um isolante, basta segurar este material com a mão e tocar com



Figura 2. Foto do eletroscópio construído.

ele na cartolina de um eletroscópio carregado. Caso a tirinha volte à sua posição original junto à cartolina, conclui-se que as cargas escoaram através deste material, que é então considerado condutor para estas tensões elétricas. Caso o eletroscópio não se descarregue com este procedimento, temos um material isolante.

Detalhes da construção

O suporte foi totalmente feito em PVC (diâmetro de 25 mm, com exceção do eixo central que é de 32 mm). Na parte superior encontramos dois recipientes plásticos que servem de reservatório para a água. Estes reservatórios estavam aterrados em nossa montagem. Para isto foi colocado um fio condutor dentro da água de cada reservatório, e este fio foi ligado a um ponto em contato com o chão. Conectados aos reservatórios estão dois gotejadores, utilizados para a aplicação de soro, facilmente obtidos em uma farmácia ou em lojas de materiais hospitalares. Estes gotejadores fornecem gotas constantes e permitem grande controle sobre a quantidade de gotas liberadas em função do tempo. Abaixo dos gotejadores estão os anéis indutores. No nosso caso utilizamos duas arruelas de 1 polegada (2,5 cm de diâmetro externo e 1 cm de diâmetro interno) presas a arames que atravessam o suporte de PVC central, proporcionando ao indutor uma altura ajustável.

A gota deve se desprender do gotejador a uma distância da ordem de 1 cm acima do indutor, conforme mostra a Fig. 3. Com isto se consegue que a parte inferior do recipiente de água acima do indutor fique carregada com uma carga oposta ao do indutor. Ao cair, as gotas possuem uma carga resultante de sinal oposto à carga do indutor colocado abaixo delas, ou seja, elas estão eletrizadas.

Os recipientes coletores das gotas precisam ser bons isolantes elétricos, para evitar que as cargas acumuladas escoem para a terra. Cada recipiente foi construído introduzindo uma lata de alumínio no interior de um pedaço de cano de PVC com 12 cm de comprimento e 7,5 cm de diâmetro. A parte inferior desta lata termina dentro do cano, sem entrar em contato com o solo para evitar fuga das cargas acumuladas. Nas Figs. 4 e 5 temos fotos do recipiente coletor visto de cima e de baixo, respectivamente.

Dentro de cada recipiente foi colocado um pedaço de fio metálico e na sua ponta foi presa uma pequena bola com papel de alumínio. Uma destas bolas estará ligada a um coletor carregado positivamente, enquanto a outra bola estará ligada ao outro coletor, carregado negativamente. As faís-



Figura 3. Gotejador e indutor de carga elétrica nas gotas.

cas serão formadas entre estas bolas. As bolas que usamos tinham um diâmetro da ordem de 5 cm.

Um outro fio dentro de cada coletor inferior deve ser ligado de forma cruzada aos indutores. Isto é, o fio que sai do coletor da direita é ligado ao indutor da esquerda, já que os dois possuem cargas de mesmo sinal. Já o fio que sai do coletor da esquerda é ligado ao indutor da direita. Assim as cargas elétricas armazenadas nos coletores servirão também para carregar o outro anel indutor do gotejador oposto. Desta maneira, as cargas geradas em um lado servem para induzir as cargas do outro lado. Com esta montagem, conseguimos um equipamento auto-sustentável.

o funcionamento da chuva elétrica

Alguns detalhes devem ser observados para o bom funcionamento do gerador eletrostático gotejante de Kelvin.

- Não existem grandes problemas em relação ao aterramento dos recipientes que contêm água; basta que um fio seja ligado dentro da água de cada recipiente até um ponto que esteja em contato com o chão.
- Alguns autores mencionam que não é necessária uma carga inicial em nenhum dos indutores para dar início ao processo, já que cargas elétricas provenientes da atmosfera se incumbiriam desta eletrização inicial [5, 6]. Para que isto ocorra tem de haver algum desequilíbrio nas cargas. Isto é, os dois indutores não podem começar simultaneamente com o mesmo potencial negativo, nem com o mesmo potencial positivo. Alguma flutuação na distribuição de cargas tem de surgir inicialmente para que o gerador possa

começar a funcionar. No nosso caso não chegamos a experimentar esta possibilidade.

- Para que a chuva elétrica fosse iniciada em nossa montagem, fizemos com que apenas um dos indutores fosse eletrizado antes de abrir os gotejadores. Caso se queira carregar inicialmente os dois indutores, eles precisam ser carregados com cargas opostas. Começamos a operação carregando apenas um dos indutores, o outro indutor passou a ser carregado automaticamente com carga oposta ao do primeiro indutor durante o decorrer da experiência. A carga inicial foi conseguida através do atrito de uma régua no cabo e transferida para o eletroscópio quando raspamos a régua carregada na cartolina do eletroscópio. Seguramos então o eletroscópio carregado por seu canudinho e encostamos a cartolina em uma arruela indutora. O eletroscópio descarregou. Repetimos este procedimento sempre encostando o eletroscópio na mesma arruela, até que o eletroscópio carregado não mais se descarregasse. Isto indicava que o eletroscópio carregado e a arruela carregada haviam alcançado o mesmo potencial elétrico. Este procedimento também ajuda a verificar se os indutores e coletores estão mantendo a carga elétrica, o que é fundamental para a experiência. O eletroscópio carregado em contato com um indutor carregado até o mesmo potencial não pode voltar a sua posição original. Somente após ter carregado o indutor é que abrimos o gotejador para permitir a queda das gotas.



Figura 4. Recipiente coletor visto de cima. É composto por um cano de PVC, que é isolante elétrico, com uma lata de alumínio em seu interior.



Figura 5. Recipiente coletor visto de baixo. O fundo da lata de alumínio fica no ar, sem entrar em contato com o solo.

- Deve-se tomar cuidado para que os indutores não estejam perdendo carga elétrica. Novamente é fundamental a utilização do eletroscópio para esta finalidade. Os indutores não são totalmente carregados logo no primeiro processo de eletrização por atrito, uma vez que a carga deve se distribuir por todo o indutor e também pelo recipiente a ele conectado. O procedimento de carga deve ser repetido algumas vezes até que o indutor esteja totalmente carregado. Depois disto utiliza-se o eletroscópio para ver se ele permanece carregado durante pelo menos 1 minuto. Caso ele não permaneça carregado durante este tempo é sinal de que há alguma fuga de carga, seja pelo suporte ou por algum fio ligado a terra. Só quando o indutor está eletrizado e isolado eletricamente é que se deve iniciar a experiência.
- Os fios elétricos utilizados aqui, mesmo encapados, comportam-se como condutores para as altas

voltagens desta experiência, da ordem de milhares de volts. O contato com eles deve ser evitado. Ou seja, uma vez colocados em suas posições não devemos tocá-los com as mãos ou com outros condutores aterrados. Embora o material plástico que os envolva seja um bom isolante para diferenças de potencial de 100 ou 200 V, este material se mostra na prática como um condutor razoável para diferenças de potencial de milhares de volts.

- A umidade do ar pode ser um problema para o funcionamento ideal deste gerador eletrostático. Quanto maior a umidade, maior é a perda de cargas para o ar. Em alguns momentos é interessante que seja utilizado um secador de cabelo em toda a estrutura e no ambiente ao redor do gerador, para diminuir a umidade.
- Tomados os devidos cuidados com a fuga de cargas e abertos os gotejadores, é então necessário que se formem gotas e não um filete contínuo de água. O filete contínuo de água descarrega a carga acumulada no recipiente coletor de gotas, uma vez que o filete ainda está em contato com o recipiente aterrado. Aumentando a razão de gotas observa-se que a partir de um certo ponto as gotas começam a sair muito

A chuva elétrica pode ser considerada uma experiência de baixo custo e de fácil construção; consegue-se abordar de maneira muito interessante diversos aspectos de eletrostática, que em alguns livros e aulas nos parecem distantes

próximas e grudadas. Este é o limite da taxa de queda das gotas, que não deve ser ultrapassado. O ideal são gotas rápidas e bem definidas. As gotas lentas também induzem carga elétrica, mas o intervalo de tempo entre duas faíscas será muito grande.

- Após algum tempo já é possível perceber o acúmulo de carga elétrica nos indutores e nos coletores. Com este procedimento as cargas que são acumuladas servirão para alimentar os indutores. O processo torna-se mais intenso após algum tempo de funcionamento, uma vez que as cargas vão se acumulando. É interessante notar que quando os indutores vão ficando mais carregados eles começam a atrair as gotas eletrizadas com cargas opostas, com a velocidade de queda das gotas aumentando. Neste caso algumas

gotas de água chegam a tocar nos indutores, fazendo-os perder parte da carga elétrica. Isto atrasa a próxima faísca.

- Para que exista a formação de faíscas, as esferas feitas de papel de alumínio devem estar afastadas cerca de 2 mm (menor distância entre dois pontos da superfície das esferas). Uma distância maior permite um maior acúmulo de carga elétrica, porém o tempo entre duas faíscas se torna, novamente, grande.
- Quanto maiores forem as esferas, mais carga elas acumulam e maior pode ser a distância mínima entre elas para ocorrer a descarga elétrica. Se elas forem muito pequenas ainda vai ocorrer a descarga elétrica, mas neste caso as faíscas podem não ser visíveis.
- A experiência fica em funcionamento enquanto as gotas continuam caindo.

Conclusão

Conhecendo a rigidez dielétrica do ar (campo elétrico E da ordem de 3×10^6 V/m) e também a distância d na qual se formam as faíscas (2 mm) podemos estimar a diferença de potencial U que estamos conseguindo produzir com o gerador eletrostático gotejante de Kelvin. Para isto supomos esferas de grande diâmetro com uma pequena separação entre elas, tal que o sistema possa ser considerado como um capacitor de placas

paralelas. Neste caso $U = Ed = 6 \times 10^3$ V. No momento da formação da faísca temos então uma diferença de potencial elétrico de aproximadamente 6.000 V entre as duas esferas de alumínio. Uma foto de uma das faíscas que obtivemos encontra-se na Fig. 6. O intervalo entre as faíscas depende da taxa de queda das gotas, mas



Figura 6. Faísca obtida com o aparato.

um tempo característico é da ordem de uma faísca a cada 10 segundos. Enquanto continuar o gotejamento, as descargas elétricas continuarão a ser produzidas. É interessante notar a riqueza de detalhes que se consegue ilustrar com esta experiência. A chuva elétrica pode ser considerada uma experiência de baixo custo e de fácil construção. Conseguimos abordar de maneira muito interessante diversos aspectos de eletrostática, que em alguns livros e aulas nos parecem distantes. O nível de aprofundamento pode ir desde o ensino básico até níveis mais avançados. Conceitos como condutores e isolantes ganham uma dimensão diferente daquela existente em livros didáticos, que ignoram a dependência das tensões elétricas a qual submetemos os materiais.

Agradecimentos

Agradecemos aos Profs. J.J. Lunazzi, M.M.G. de Carvalho e N. Studart, assim como ao assessor da primeira versão deste artigo, por sugestões relativas a este trabalho.

Referências

- [1] W. Thomson, Proceedings of the Royal Society of London **16**, 67 (1867-1868).
- [2] N. Studart, Revista Brasileira de Ensino de Física **29**, 485 (2007).
- [3] J.T. Lloyd, Revista Brasileira de Ensino de Física **29**, 499 (2007).
- [4] J. Camillo and A.K.T. Assis. *Geradores Eletrostáticos: Esfera de Enxofre de Otto von Guericke e Chuva Elétrica de Kelvin*. Trabalho realizado na disciplina de Instrumentação para Ensino do Instituto de Física da Unicamp no segundo semestre de 2006, disponível em http://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809/F809_sem2_2006/JulianoC-Assis_F809_RFcomplete.pdf, 2006 (acessado em 2008).
- [5] L.F. Netto, *Chuva Elétrica de Kelvin*. Disponível em http://www.feirade ciencias.com.br/sala11/11_01.asp (acessado em 2008).
- [6] B. Beaty, *Kelvin's Thunderstorm - Lord Kelvin's Water-Drop Electrostatic Generator*. Available at <http://www.amasci.com/emotor/kelvin.html> (accessed in 2008).
- [7] N. Ferreira, *Eletrostática* (Instituto de Física da USP, São Paulo), v. 1.
- [8] N. Ferreira, *Eletrostática* (Instituto de Física da USP, São Paulo), v. 2.
- [9] N. Ferreira and J.-P. Maury, *Plus et Moins, les Charges Électriques. Qu'est-ce que c'est?* (Ophrys, Paris, 1991).
- [10] A. Gaspar, *Experiências de Ciências para o Ensino Fundamental* (Ática, São Paulo, 2003).