

Instrumentação para o Ensino – F 809
Instituto de Física – Unicamp

Geradores Eletrostáticos: Esfera de Enxofre de Otto von Guericke e Chuva Elétrica de Kelvin

Aluno: Juliano Camillo, RA: 016461
julianocamillo@gmail.com



Orientador: Prof. Dr. André Koch Torres de Assis
assis@ifi.unicamp.br

Homepage: <http://www.ifi.unicamp.br/~assis/>

Coordenador da disciplina: Prof. Dr. José Joaquim Lunazzi
lunazzi@ifi.unicamp.br

17 de novembro de 2006

Índice:

AGRADECIMENTOS	03
MOTIVAÇÃO	03
INTRODUÇÃO	04
A ESFERA DE ENXOFRE DE GUERICKE	04
A CONSTRUÇÃO DA ESFERA DE ENXOFRE	04
O EXPERIMENTO COM A ESFERA DE EXOFRE	07
A CHUVA ELÉTRICA DE KELVIN	08
O ELETROSCÓPIO	08
A CONSTRUÇÃO DA CHUVA ELÉTRICA	10
O FUNCIONAMENTO DA CHUVA ELÉTRICA	14
CONCLUSÃO	16
REFERÊNCIAS	18

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, o agradecimento ao Prof. André Assis pelo acompanhamento e orientação deste trabalho e por despertar em mim o interesse pelos experimentos de baixo custo em eletrostática, mostrando a beleza e a sua importância no ensino de Física.

Agradecimentos aos meus pais pelo total apoio. Em especial ao meu pai, que forneceu as ferramentas para a construção dos experimentos, além de sua ajuda técnica e motivacional.

Por fim, agradeço a Elis Monti pelo apoio e pelo cuidadoso trabalho nos detalhes finais necessários para o bom funcionamento dos experimentos.

MOTIVAÇÃO

Experimentos em eletrostática são de uma beleza e uma riqueza de detalhes espantosa. Podem ser feitos experimentos de baixo custo que permitem a visualização de alguns fenômenos físicos, isso os torna ainda mais interessantes quando se trata de ensino de Física.

A esfera de enxofre nos permite reproduzir os experimentos realizados por Guericke, o que nos remete ao início dos experimentos sobre eletrostática e as descobertas nessa área. Somos capazes de encontrar os mesmos resultados, tirar as mesmas conclusões, além de realizar uma análise histórica.

Nenhuma referência foi encontrada em livros ou na internet sobre a construção de uma esfera de enxofre. Aqui serão expostos os detalhes da construção, bem como dificuldades encontradas e informações necessárias para uma próxima realização.

A chuva elétrica de Kelvin já foi tema de um trabalho anterior nesta mesma disciplina [Rodrigues e Carvalho, 2002], porém os resultados esperados não foram obtidos pelos autores. Eles concluíram que o não funcionamento do aparato podia se dever à elevada umidade do ar, dificultando o acúmulo das cargas elétricas.

INTRODUÇÃO

Este trabalho consiste na construção dois tipos de geradores eletrostáticos. O primeiro é algo análogo à esfera de enxofre de Otto von Guericke (1602-1686). A esfera aqui concebida pode ser adaptada a um banco de rotações, já construído por um outro estudante nesta disciplina de instrumentação para ensino, [Vitti e Assis, 2004]. O segundo é o gerador eletrostático de Kelvin (1824-1907), também chamado de chuva elétrica de Kelvin, capaz de produzir altas tensões através da queda de gotas de água.

A ESFERA DE ENXOFRE DE GUERICKE

A primeira máquina eletrostática da história foi criada por Guericke e apresentada em 1672, ver [Guedes, 2001] e [Hackmann, 2001]. O gerador eletrostático de Guericke consiste em uma esfera de enxofre, com um eixo central montado sobre um suporte de madeira e que pode girar facilmente sobre ele, Figuras 1 e 2.

A eletrização era obtida com o atrito contínuo da esfera de enxofre com as mãos. Posteriormente o processo foi aperfeiçoado para que a esfera fosse atritada com pedaços de lã. A esfera carregada era usada para estudar a interação elétrica com outros corpos leves.

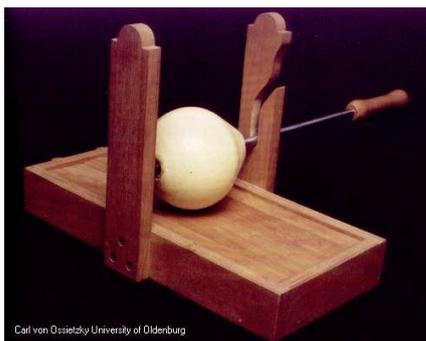


Fig. 1: Reprodução da esfera de enxofre de Guericke.

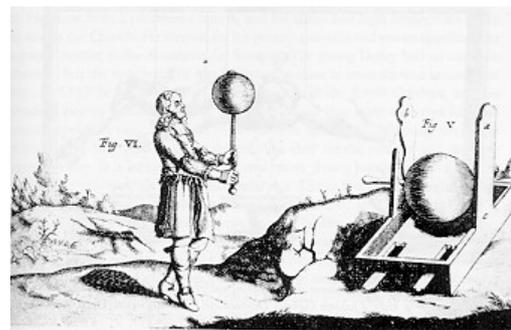


Fig. 2: Guericke com sua esfera.

A CONSTRUÇÃO DA ESFERA DE ENXOFRE

O enxofre necessário para a construção desta esfera foi conseguido em uma loja especializada em produtos químicos na cidade de Campinas. É vendido na forma de pó,

a um custo relativamente baixo (12 reais por quilograma). O único problema é o de ter sua venda controlada pela polícia civil, que exige uma justificativa para a compra.

Um teste inicial de construção foi feito em tamanho reduzido, utilizando como molde o bulbo de uma lâmpada incandescente pequena (lâmpada de 40 W). O modo de preparação da lâmpada para uma utilização alternativa como esta pode ser encontrado em [Gaspar, 2005, Cap. 7].

O ponto de fusão do enxofre é 115,21 °C, não necessitando de grandes fontes de calor. Uma lamparina a álcool foi suficiente nas nossas experiências.

O enxofre se funde vagarosamente, torna-se um líquido viscoso e sua coloração passa de amarelo-limão para marrom escuro. Deve-se tomar cuidado com os vapores que eventualmente se formam, o aquecimento deve ser feito em uma capela ou, com muito cuidado, em um ambiente aberto e bem ventilado.

Depois de conseguida a fusão completa, retirou-se a lamparina e o enxofre resfriou naturalmente, voltando ao estado sólido, com uma consistência bastante rígida e uma coloração bem próxima da inicial. O volume ficou consideravelmente menor do que quando estava no estado líquido, quer por fenômenos de dilatação térmica, quer pela presença de algumas bolhas de ar. Pode-se então completar o espaço vazio, na parte de cima, com enxofre derretido em outro recipiente. Finalmente basta quebrar o vidro que serviu de molde. Esta etapa não apresenta dificuldades uma vez que o enxofre não gruda no vidro e já está ligeiramente afastado das paredes.

O resultado pode ser observado nas fotos (Fig. 3). Vale ressaltar que o vidro da lâmpada foi completamente preenchido com enxofre líquido, o espaço vazio que aparece neste primeiro resultado é o da variação do volume citado acima.



Fig. 03: Imagens da esfera de enxofre.

Se o enxofre é resfriado rapidamente ele adquire uma consistência parecida com a da borracha, que depois de algum tempo acaba dando lugar à consistência rígida, igual quando resfriado vagarosamente. Assim, para efeitos finais, não existe diferença nos métodos para se resfriar o enxofre.

Apesar do tamanho reduzido, esta esfera é capaz de atrair pedaços de papel e outros materiais quando atritada com a pele, cabelo ou com um pedaço de lã. Cabe aqui uma observação sobre o cheiro um pouco desagradável deixado pelo enxofre nas coisas nas quais é atritado.

Atingidos os objetivos durante o primeiro teste na construção da esfera de enxofre, partimos para a construção de uma esfera em tamanho maior. Para tal, utilizamos como molde um balão de aquecimento de fundo redondo com volume de 1 litro, conseguido na mesma loja da compra do enxofre.

O balão foi fixado em um suporte para facilitar seu aquecimento. O enxofre foi então colocado no recipiente e aquecido com a mesma lamparina a álcool do primeiro teste. Desta maneira evita-se um aquecimento demasiadamente rápido e a formação dos indesejáveis vapores. Estando o enxofre completamente fundido, foi introduzido um pedaço de cano de PVC de 23 mm de diâmetro que faz o papel de eixo de rotação. Quando no estado sólido novamente o espaço vazio, resultante da variação de volume, foi preenchido com enxofre derretido em outro recipiente.

Para tornar mais resistente a ligação entre o cano de PVC e a esfera de enxofre, foi acrescentada um pouco de resina do tipo epóxi no topo e na base da esfera.

O resultado final desta esfera pode ser observado através das fotos (Fig. 04). Ela possui aproximadamente 12 cm de diâmetro e 2 kg de massa.



Fig. 04: Fotos da esfera de enxofre.

Para completar a montagem fizemos um suporte para que a esfera pudesse ser adaptada ao banco de rotações, construído em outro projeto desta mesma disciplina de instrumentação para ensino, [Vitti e Assis, 2004].



Fig. 05: Banco de rotações.

Uma última esfera de enxofre foi construída, utilizando outra lâmpada como molde, desta vez um pouco maior (lâmpada de 150 W). Esta esfera foi mantida no interior da lâmpada para servir como exemplo da construção. Ela possui como eixo de rotação um tubo de caneta BIC.



Fig. 06: Esfera de enxofre ainda no vidro.



Fig. 07: Comparando as duas esferas.

O EXPERIMENTO COM A ESFERA DE ENXOFRE

Inicialmente reproduzimos uma das experiências de Guericke, que conseguiu manter uma penugem flutuando sobre a esfera de enxofre atritada. Para isto deixamos cair um pequeno pedaço de algodão sobre a esfera carregada. Ao entrar em contato com ela, o algodão adquire carga de mesmo sinal e passa a ser repelido. Com um pouco de treino pode-se deixar o algodão suspenso no ar. O algodão deve ser bem pequeno para que seu peso seja bem reduzido e tal que caia vagorosamente. Desta forma o equilíbrio se torna mais fácil. Em um teste com resultado satisfatório o algodão caiu 2 m em aproximadamente 10 s. O mesmo fenômeno é conseguido com a utilização de um

canudo plástico. Atrita-se o canudo e com o mesmo procedimento utilizado com a esfera de enxofre equilibra-se o algodão ou ainda pequenas bolinhas de isopor.

CHUVA ELÉTRICA DE KELVIN

A chuva elétrica de Kelvin é capaz de produzir altas tensões através da queda de gotas de água. Para descrições ver as referências “Chuva elétrica de Kelvin”, "Kelvin's Thunderstorm" e “Kelvin Water Dropper” ao final deste trabalho.

A montagem consiste em um reservatório que libera a água em gotas. Um exemplo é ilustrado na Figura 8. Abaixo do gotejador é colocado um indutor carregado, que induz a separação das cargas positivas e negativas das gotas. Como o reservatório de água está aterrado, as cargas induzidas na parte superior das gotas são neutralizadas. A gota que cai está eletrizada com uma carga oposta à do indutor. Ela é recolhida por um reservatório cujas cargas elétricas servirão como indutor para um outro gotejador. A alta tensão entre os dois reservatórios que coletam a água é capaz de produzir faíscas elétricas.

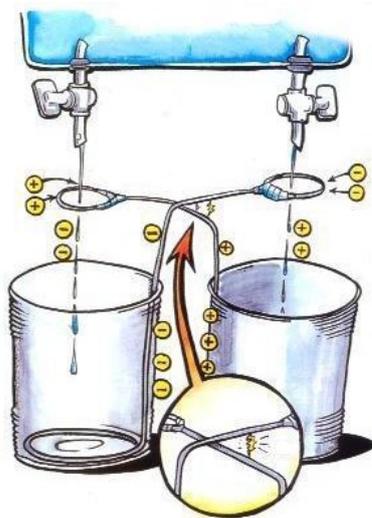


Fig. 08: Esquema da chuva elétrica.

O ELETROSCÓPIO

Antes dos comentários sobre a construção do gerador eletrostático de Kelvin é importante fazer um comentário sobre o eletroscópio. Este instrumento fundamental nos permitiu analisar quais materiais são condutores ou isolantes para as tensões elétricas com as quais estamos trabalhando.

O eletroscópio utilizado consiste em um pedaço de cartolina com dimensões da ordem de 10 cm x 10 cm, que pode ou não ser coberta com folha de alumínio. Na cartolina é colocado um filete fino de papel de seda, com uma das extremidades colada na parte superior da cartolina. Na montagem do eletroscópio, aqui utilizado, o filete de papel foi retirado das embalagens utilizadas para se embrulhar balas de coco. O mais importante na sua construção é observar que a cartolina e o papel de seda se comportam como condutores, enquanto que o canudo plástico se comporta como um isolante.

Como suporte para a cartolina deve ser utilizado um canudo de plástico. Muitos outros materiais, com exceção de PVC, podem não funcionar, uma vez que muitos materiais (como palitos de madeira, etc.) são condutores para estas tensões. Na Figura 09 temos um esquema representativo. A foto do eletroscópio que construímos se encontra na Figura 10.



Fig. 09: Esquema do eletroscópio.



Fig. 10: Foto do eletroscópio.

A construção detalhada do eletroscópio pode ser encontrada em [Gaspar, 2005, Cap. 6].

Atritando-se um canudo plástico no cabelo e o passando na parte superior do eletroscópio vem que o eletroscópio fica carregado e repele o filete de papel, uma vez que o filete adquire carga de mesmo sinal que a cartolina. Para testar se os materiais são condutores ou isolantes basta encostar o material na cartolina. Se o filete voltar à sua posição original junto à cartolina, conclui-se que as cargas escoaram através deste material. Ele é então considerado um condutor para estas tensões. Caso o eletroscópio não se descarregue com este procedimento, diz-se que o material é um isolante. A

utilização do eletroscópio foi de extrema importância na escolha dos materiais utilizados na montagem do gerador eletrostático de Kelvin.

A CONSTRUÇÃO DA CHUVA ELÉTRICA

A construção do gerador eletrostático de Kelvin se deu em várias etapas. Elas foram cheias de fracassos, pelo fato de termos começado a construção sem dados concretos que nos auxiliassem ou que nos indicassem uma direção a seguir.

Uma primeira tentativa de construção desta máquina eletrostática foi feita com um suporte de madeira. Sobre este suporte adaptou-se um recipiente plástico com duas torneiras metálicas que funcionavam como gotejadores. Abaixo das torneiras estavam dois cilindros metálicos cujo papel era induzir a separação (polarização) das cargas elétricas nas gotas de água. As gotas caíam em dois recipientes de alumínio que estavam ligados de maneira cruzada aos indutores. Desta maneira esperava-se conseguir uma máquina auto-sustentável, isto é, bastava uma carga inicial para que a carga nos recipientes inferiores de alumínio aumentasse conforme as gotas caíam. As fotos mostram a montagem experimental.



Fig. 11 : Recipiente plástico com torneiras e abaixo delas os indutores cilíndricos.

Esta montagem não foi bem sucedida. O principal motivo era o contato das partes metálicas, do indutor e dos recipientes de alumínio, com a madeira. A madeira, para as voltagens que estamos trabalhando, é condutora e capaz de descarregar as cargas elétricas acumuladas. Um simples teste com o eletroscópio nos mostrou isso depois do fracasso. O principal erro foi não ter utilizado o eletroscópio antes da montagem com a madeira, talvez por culpa do senso comum de considerar a madeira como um isolante, ignorando que ser isolante ou condutor depende das tensões com os quais estamos trabalhando.

O principal objetivo passou a ser isolar as partes metálicas das partes de madeira. Para isto foi escolhido o uso do PVC, que mesmo em altas voltagens se mantém um bom isolante elétrico.

A segunda montagem consistiu em utilizar um cano de PVC central capaz de sustentar os dois indutores, isolando-os do suporte de madeira. Este cano também podia regular a altura entre os indutores metálicos e as torneiras. Para que os recipientes de alumínio que coletam as gotas de água fossem isolados das partes de madeira, estes recipientes foram apoiados sobre dois pedaços de cano de PVC. Esta montagem para a chuva elétrica pode ser observada nas imagens a seguir.



Fig. 12 : Nova montagem, vista superior.



Fig. 13: Indutores isolados da madeira com PVC.



Fig. 14: Suporte para isolar os coletores.

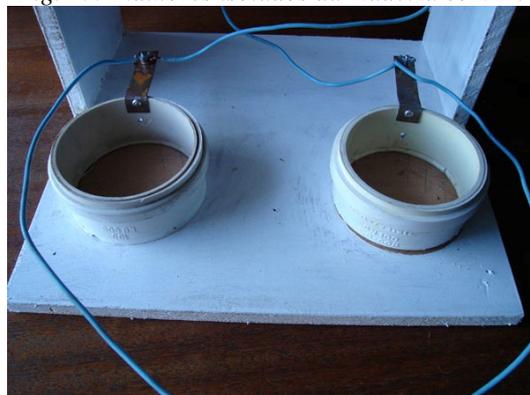


Fig. 15: Sistema que ajusta a altura dos indutores.

A segunda montagem também não foi bem sucedida apesar de todas as partes metálicas terem sido isoladas das partes de madeira. Através de alguns testes mais cuidadosos com o eletroscópio percebemos que existia uma fuga sutil de cargas elétricas através do suporte de PVC central, que estava velho e um pouco sujo. Além desta fuga de cargas, era possível que os indutores utilizados fossem muito grandes, não conseguindo gerar um campo elétrico considerável sobre as gotas.

Para a realização da terceira montagem abandonamos tudo que havíamos construído até agora e tentamos uma montagem totalmente nova. Ela está ilustrada na Fig. 16.



Fig. 16: Terceira montagem, suporte todo em PVC.

A terceira montagem tem suporte 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. Dentro de cada recipiente temos uma tira de metal que permite aterrará-lo. Conectados aos reservatórios estão dois gotejadores utilizados para a aplicação de soro, facilmente obtidos em uma farmácia ou em lojas de materiais hospitalares. Com estes novos gotejadores temos gotas mais constantes e uma grande facilidade de controlar a quantidade de gotas liberadas.

Abaixo dos gotejadores estão os indutores, duas arruelas de 1 polegada (2,5 cm de diâmetro externo 1 cm de diâmetro interno) presas a arames que atravessam o suporte de PVC central, proporcionado ao indutor altura ajustável. A gota deve se desprender do gotejador a uma distância da ordem de 1 cm acima do indutor, para que se consiga a separação de cargas e a neutralização da parte superior da gota aterrada através dos reservatórios de água.



Fig. 17: Gotejador e indutor.



Fig. 18: Gota se formando acima do indutor.

Outro detalhe importante da construção são os recipientes coletores das gotas. Cada recipiente foi construído com um pedaço (12 cm) de cano de PVC de 75 mm de diâmetro. No interior do cano temos uma lata de alumínio. A parte inferior desta lata termina dentro do cano, sem entrar em contato com o solo para evitar fuga das cargas acumuladas.



Fig. 19: Recipiente coletor das gotas (vista superior à esquerda e inferior à direita).

Dentro de cada recipiente foi colocado um pedaço de fio e na sua ponta foi feita uma pequena bola com folha de alumínio, que serve para a formação das faíscas. Um outro fio dentro de cada recipiente deve ser ligado de forma cruzada aos indutores. Isto é, o fio que sai do recipiente da direita é ligado ao indutor da esquerda, enquanto que o fio que sai do recipiente da esquerda é ligado ao indutor da direita.

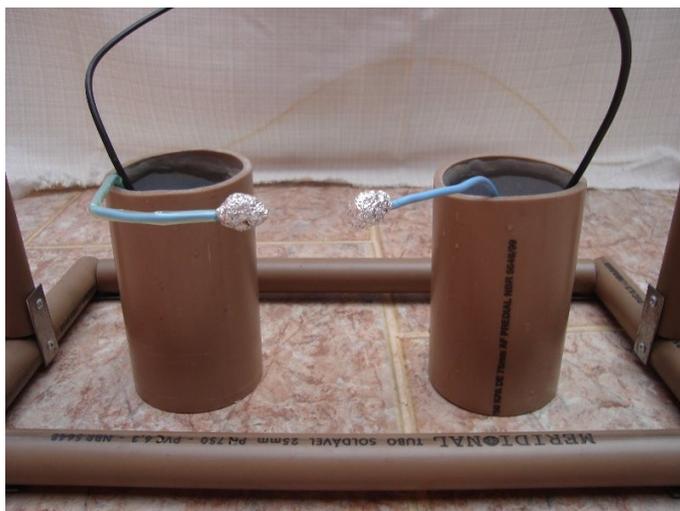


Fig. 20: Esferas para a formação das faíscas.

O FUNCIONAMENTO DA CHUVA ELÉTRICA

Após a construção do gerador eletrostático de Kelvin alguns detalhes devem ser observados para o seu funcionamento.

- aterramento

Não existem grandes problemas com relação ao aterramento dos recipientes que contêm água, basta que um fio seja ligado dentro da água até um ponto que esteja em contato com o chão.

- carga inicial nos indutores

Para que a chuva elétrica seja iniciada é necessário que um dos indutores seja carregado, ou os dois, mas com cargas contrárias. Somente carregar um dos indutores já é suficiente.

Deve-se tomar cuidado para que os indutores não estejam perdendo carga elétrica. Novamente é fundamental a utilização do eletroscópio para esta finalidade. Carrega-se um dos indutores e com o eletroscópio faz-se o teste para ver se ele continua carregado durante algum tempo. Os indutores não ficam 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.

Uma maneira de se carregar o indutor é com o próprio eletroscópio. Carrega-se o eletroscópio como mostrado acima, raspando na cartolina do eletroscópio um canudo plástico atritado no cabelo. Através do contato deste eletroscópio carregado com o indutor transfere-se a carga para o indutor. Este procedimento deve ser repetido até que o filete de papel permaneça afastado da cartolina, o que significa que o indutor está carregado e que esta carga não está sendo perdida para o ambiente.

- cuidado com os fios elétricos

Os fios elétricos utilizados, mesmo encapados, deixam que a carga elétrica escoe caso entrem em contato com a mão ou com outro condutor aterrado. O contato com eles deve ser evitado. Para melhorar o problema da fuga de cargas, os fios podem ser cobertos com canudos plásticos, que se mostram ótimos isolantes, mesmo para as altas tensões com as quais trabalhamos nesta experiência.

- umidade

A umidade do ar é um grande problema para o funcionamento ideal deste gerador, já que quanto maior a umidade, maior é a perda de cargas para o ar. Em alguns momentos é interessante que seja passado um secador de cabelo em toda a estrutura e no ambiente ao redor do gerador, melhorando as condições de umidade.

- razão das gotas

É necessário que se formem gotas e não um filete contínuo de água, caso contrário o processo de separação de cargas elétricas não irá funcionar. O filete contínuo de água também descarrega a carga acumulada no recipiente coletor de gotas. Aumentando a razão de gotas observa-se que a partir de um certo ponto as gotas começam a sair muito próximas e grudadas. Este é o limite da razão de gotas, que não deve ser ultrapassado. O ideal está um pouco antes, ou seja, gotas rápidas e bem definidas. As gotas lentas também induzem carga elétrica, mas o intervalo de tempo entre duas faíscas será muito grande.

- distância para a formação da faísca

Para a formação de faíscas as esferas de alumínio devem estar afastadas cerca de 2 mm. Uma distância maior permite um maior acúmulo de carga elétrica, porém o tempo entre duas faíscas se torna, novamente, grande. Outro fato interessante é que

quando os indutores vão ficando mais carregados eles começam a atrair a água dos gotejadores e a velocidade das gotas se torna maior. Neste caso algumas gotas de água chegam a tocar nos indutores. Isso faz com que percam parte da carga elétrica, atrasando a próxima faísca.

Conhecendo a rigidez dielétrica do ar (campo elétrico E de cerca de $3 \cdot 10^6$ V/m) e também a distância d para o qual se formam as faíscas (2 mm) podemos estimar a diferença de potencial U que estamos conseguindo gerar com a chuva elétrica de Kelvin:

$$U = E \cdot d \Rightarrow U = 3 \cdot 10^6 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \Rightarrow U = 6000V$$

Então no momento da formação da faísca temos uma diferença de potencial elétrico de cerca 6000 V entre as duas esferas de alumínio. Neste caso consideramos as esferas como sendo dois planos paralelos para facilitar a estimativa.



Fig. 21: Faísca gerada entre as duas esferas de alumínio.

CONCLUSÃO

É interessante notar a riqueza de detalhes que se consegue abordar com experimentos sobre eletrostática. Os dois experimentos aqui propostos são ferramentas

muito interessantes para o ensino de física. Deve ser ressaltado também o baixo custo para a construção.

Nossos objetivos foram alcançados nas duas partes deste trabalho. Conseguimos construir com sucesso os dois geradores eletrostáticos e realizar algumas experiências interessantes com eles.

Vale ressaltar a importância da realização de experimentos em sala de aula e também de se utilizar a história da ciência, mostrando a física como uma construção do ser humano e que o conhecimento não surge da noite para o dia e nem é uma obra acabada. A esfera de enxofre de Guericke nos leva a este tipo de reflexão.

A chuva elétrica de Kelvin nos permite estudar a eletrostática, que em alguns livros e aulas parece tão “sem vida”, de uma maneira muito interessante e em vários níveis de aprofundamento, desde o ensino básico até níveis avançados.

Conseguimos ainda neste trabalho mostrar conceitos como “condutores e isolantes”, detalhar a utilização do eletroscópio e deixar uma possível referência para trabalhos posteriores neste mesmo tema.

REFERÊNCIAS

“Chuva elétrica de Kelvin” - http://www.feiradeciencias.com.br/sala11/11_01.asp

"Kelvin's Thunderstorm" - <http://www.amasci.com/emotor/kelvin.html>

“Kelvin Water Dropper” - <http://www.csiro.au/helix/experiments/dhexpkelvin.shtml>

GASPAR, A., Experiências de Ciências para o Ensino Fundamental, Ed. Ática, São Paulo, 2005.

GUEDES, M. V., Um globo de enxofre, *Revista Electricidade*, n° 386, p. 81, março 2001, <http://paginas.fe.up.pt/histel/fhistins/GlobEnxof.pdf>

HACKMANN, W. Electricity from Glass: the History of the Frictional Electrical Machine (1600-1850). Alphen aan den Rijn, The Netherlands, Sijthoff & Noordhoff, 1978.

RODRIGUES, C. F. M. e Carvalho, M. M. G. d., Gerador eletrostático a água, trabalho de Instrumentação para Ensino desenvolvido junto ao Instituto de Física da Unicamp no segundo semestre de 2002. Relatório final em: http://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809/F809_sem2_2002/970362_CarlosRodrigues_Gerador.pdf

Vitti, L. G. e Assis, A. K. T., Banco de rotações, trabalho de Instrumentação para Ensino desenvolvido junto ao Instituto de Física da Unicamp no segundo semestre de 2004. Relatório final em: http://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/F530_F590_F690_F809_F895/F809/F809_sem2_2004/009209Luis_Andre_RF.pdf