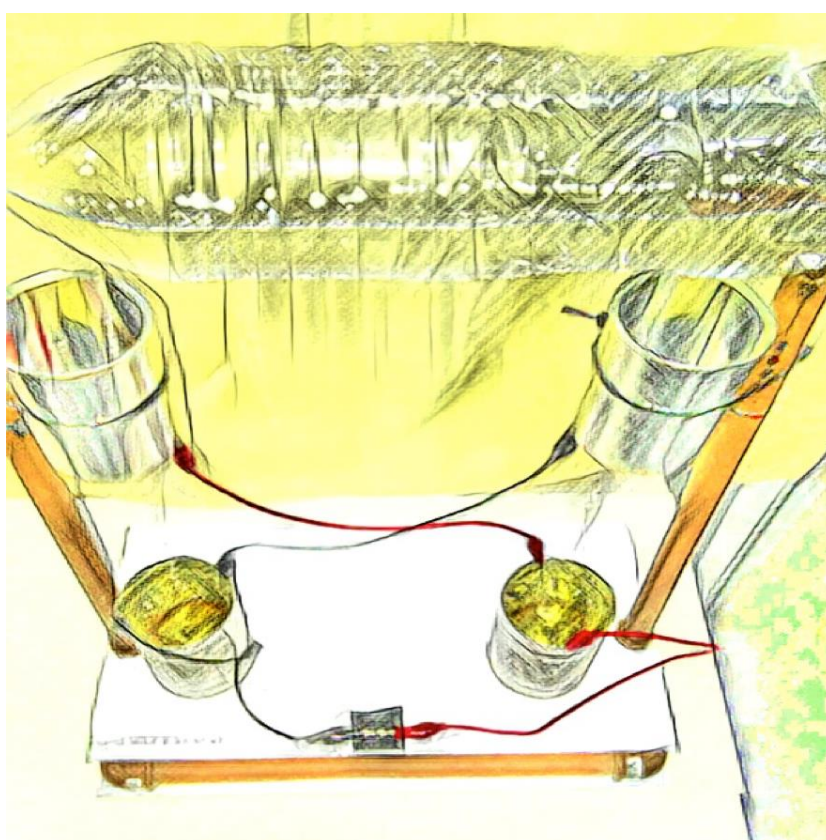


## Oficina de Ensino de Eletrostática



Carlos A. Silva e James A. Souza

## Prefácio

O produto educacional a seguir consiste em um curso de eletrostática no formato de Oficina de Ensino, onde são montados experimentos simples, mas elucidativos, sobre o ensino da eletrostática no ensino médio. Esta Oficina foi desenvolvida usando a sequência didática tradicional do currículo de Eletricidade. Os materiais utilizados são, em sua maioria, de baixo custo e encontrados no comércio local. O projeto foi testado várias vezes em escolas diferentes, tanto dentro do período escolar, fazendo parte da grade horária regular, como no contra período no formato de Oficina. Este foi projetado para auxiliar o professor do Ensino Médio no ensino da Eletrostática, colocando o próprio aluno na construção tanto dos conceitos elétricos quanto de seus próprios equipamentos de observação dos fenômenos eletrostáticos, compondo, ao final do curso, um kit de sua propriedade, que inclui 1 gerador eletrostático de Kelvin, 1 eletroscópio, 3 indutores plásticos, 1 atritador de lã, 1 perpendicular de Fracastoro, 1 versório de Gilbert, 1 versório de Assis, 1 pêndulo elétrico e 2 bases de gesso.

Para que os alunos pudessem se organizar no desenvolvimento das atividades, propomos o uso do diário de bordo, onde o aluno registra o desenvolvimento do projeto, anotando o experimento na forma escrita, através de desenhos ou esquemas, anotando a pergunta do professor e respondendo-a. O uso do diário é justificado porque o mesmo pode representar a história do conhecimento adquirido pelo aluno durante o curso. Esta história não é apagada, e a cada encontro o aluno tem a oportunidade, pela releitura e pelas novas práticas, de construir os conceitos elétricos.

Este produto educacional está organizado de forma a trabalhar os conhecimentos básicos de Eletrostática de maneira dinâmica e entusiástica. Nosso desejo durante a elaboração deste material foi levar a cada encontro uma vontade de saber o que acontecerá no próximo. Esperamos que o professor de física utilize este material como um objeto norteador em suas atividades e que possa estender a proposta para outros tópicos da física.

Para dúvidas ou informações adicionais, envie um e-mail para  
prof.carloaugustosilva@gmail.com

Os autores.

# Sumário

<b>1. Introdução à Oficina de Ensino de Eletrostática.....</b>	<b>4</b>
<b>2. O Uso do Diário de Bordo.....</b>	<b>5</b>
<b>3. Preparação do Ambiente Escolar para a Aplicação da Oficina.....</b>	<b>7</b>
<b>4. Lista de Materiais e Primeiros Passos.....</b>	<b>8</b>
<b>5. Conceitos de Física que podem ser abordados com a Oficina de Eletrostática.....</b>	<b>11</b>
5.1. <i>A Carga Elétrica.....</i>	11
5.2. <i>A Força Elétrica.....</i>	13
5.3. <i>O Campo Elétrica.....</i>	15
5.4. <i>Energia Potencial Elétrica e o Potencial Elétrico.....</i>	18
5.5. <i>A Capacitância.....</i>	19
5.6. <i>Gerador Eletrostático Gotejante de Kelvin.....</i>	24
<b>6. Construção dos Experimentos da Oficina de Ensino de Eletrostática.....</b>	<b>28</b>
6.1. <i>Primeiro Encontro: Eletrização por Atrito – Atração Elétrica.....</i>	28
6.2. <i>Segundo Encontro: Construção das Bases de Gesso.....</i>	32
6.3. <i>Terceiro Encontro: O Pêndulo Elétrico.....</i>	35
6.4. <i>Quarto Encontro: A Força Elétrica e sua Detecção.....</i>	38
6.5. <i>Quinto Encontro: Campo Elétrico e sua Detecção.....</i>	41
6.6. <i>Sexto Encontro: Campo e Potencial Elétricos.....</i>	44
6.7. <i>Sétimo, Oitavo e Novo Encontros: Construção do Gerador Eletrostático de Kelvin.....</i>	52
6.8. <i>Décimo Encontro: Experimentação e Aplicação do Gerador Eletrostático de Kelvin.....</i>	60
6.9. <i>Décimo Primeiro Encontro: Estudo Quantitativo utilizando o Gerador Eletrostático de Kelvin.....</i>	62
<b>7. Referências.....</b>	<b>66</b>

## **1. Introdução à Oficina de Ensino de Eletrostática**

Uma Oficina de Física é um local onde os alunos montam seus próprios instrumentos de pesquisa escolar sendo colocados diante de situações-problemas ou de fenômenos e convidados, pelo professor-tutor, a elaborarem hipóteses para a explicação do que está sendo analisado. Nessa elaboração surgem diálogos, tanto entre alunos como entre o aluno e o professor-mediador, permitindo-se assim a (re)construção de conceitos e leis baseados no modelo científico vigente (BATISTA, 2009).

Eduardo Terrazzan e Ernst Hamburger (1992) apresentam as Oficinas de Física como uma nova forma de trabalho complementar, dirigidas a professores da rede escolar de São Paulo. Por ser um trabalho pioneiro, ele serviu para construir uma forma de atualizar/aperfeiçoar os professores da rede estadual. Ao final de três anos das oficinas e após avaliações, mostrou-se que: (1) os professores davam grande importância a este tipo de atividade; (2) a dinâmica empregada através de atividades experimentais, levantamento bibliográfico, artigos, vídeos seguidos de debates, corresponderam às expectativas dos professores; (3) além das discussões de atividades de aplicações imediatas, puderam rever conteúdos conhecidos ou mesmo estabelecer um contato de primeira mão com conteúdos novos; (4) e um ponto importante, talvez o mais relevante, é que as oficinas se tornassem um espaço permanente de participação e trabalho, onde os professores, além de adquirir habilidades manuais, pudessem refletir sobre as metodologias a serem aplicadas na utilização das atividades sugeridas nas oficinas. Segundo os autores uma oficina de física pode favorecer o professor no aprofundamento de temas da área da física e atualizar o mesmo com relação a abordagens metodológicas e melhoria no embasamento dos procedimentos para modificações futuras.

Uma outra forma de usar as oficinas de ensino de física foi na introdução de novos temas no ensino médio, como a física moderna (CAVALCANTE, 2001). Dentre os vários benefícios que essa metodologia pode trazer para a sala de aula, vale ressaltar a motivação e o interesse que elas despertam, predispondo os alunos à aprendizagem (SALES, 2005). Nesta oficina procedemos de forma que o aluno possa construir e manusear as práticas e a partir delas construir conhecimento.

O conteúdo de física relacionado ao desenvolvimento da oficina é a Eletrostática. A escolha deste tema surgiu da necessidade que tínhamos de desenvolver uma ação que pudesse maximizar a aprendizagem de conceitos abstratos como carga elétrica, processos de eletrização, estrutura da matéria, campo elétrico, potencial elétrico, entre outros.

Nosso objetivo foi mostrar que uma Oficina de Ensino, independentemente do tema considerado, pode ser concebida em um local e horário dentro da escola onde o aprender é feito na prática. Esta foi uma forma muito interessante de trazer o conhecimento aos alunos através de um trabalho prático, que em nosso caso, foi pautado na experimentação investigativa (BATISTA, 2009) orientada pelo professor e auxiliada pela ferramenta metodológica do diário de bordo (OLIVEIRA, 2017) de cada aluno. O diário de bordo foi utilizado para registrar as práticas, os procedimentos e esquemas, as perguntas e respectivas respostas e a (re)construção de conceitos. A construção dos experimentos foi realizada individualmente, ou seja, cada aluno montou sua prática e com ela realizou os procedimentos indicados pelo professor. Ao final de tudo, todos os experimentos passaram a pertencer aos alunos que os construíram.

A Oficina de Ensino de Eletrostática apresentada neste produto educacional pode ser montada com materiais de baixo custo encontrados com muita facilidade em bazares, supermercados e casas de materiais de construção a um preço compatível com o poder aquisitivo de qualquer comunidade escolar. Pela experiência adquirida na aplicação deste projeto acreditamos que este pode também ser aplicado em escolas públicas ou particulares que sofreram diminuição de carga horária, por qualquer motivo que seja (MOREIRA, 2014), tanto em nossa região como em todo o território nacional.

## **2. O Uso do Diário de Bordo**

Para que os alunos pudessem se organizar no desenvolvimento das atividades propomos o uso do diário de bordo. Neste o aluno registra o desenvolvimento do projeto, anotando o experimento na forma escrita, através de desenhos ou esquemas, anotando a pergunta do professor e respondendo-a. O uso do diário é justificado porque o mesmo pode representar a história do conhecimento adquirido pelo aluno durante o curso. Esta história não é apagada, e a cada encontro o aluno tem a oportunidade, pela releitura e pelas novas práticas, de reconstruir os conceitos sobre o assunto tratado anteriormente. Como esclarecimento da proposta de uso do diário de bordo, citamos Michel Batista,

“Pretende-se, portanto, que a utilização da escrita e da leitura seja uma constante, qualquer que seja a área do conhecimento com a qual se está trabalhando para a pesquisa e registro de todo o processo que compreende a execução de atividades experimentais investigativas. Escrever e ler passa a ter significado, pois são instrumentos essenciais de comunicação e registro das concepções que surgem, da pesquisa que se realiza, do que se observa, do que é comprovado ou refutado e, num processo final, do texto coletivo negociado.” (BATISTA, 2009, p. 44).

Em seu artigo, “Diário de bordo: uma ferramenta metodológica para o desenvolvimento da alfabetização científica”, Aldeni Oliveira e outros nos certifica escrevendo que,

“O diário de bordo é um instrumento de estudo que, quando construído durante o desenvolvimento das atividades de aprendizagem dos estudantes, pode ser utilizado com o objetivo de acompanhar a proposta de alfabetizar cientificamente. Pode ser utilizado para o acompanhamento do desenrolar de projetos de pesquisa em sala de aula, juntamente com a construção de mapas conceituais, com relatórios, etc.” (OLIVEIRA, 2017, p. 123).

Verificamos que a construção do conhecimento na pesquisa escolar pode ser potencializada com o uso do diário de bordo, permitindo ao aluno organizar suas impressões sobre o novo fenômeno ou conceito, e saber que num próximo momento ele pode reescrever sobre o mesmo fenômeno ou conceito, acrescentando novas impressões ou mesmo as alterando completamente. A releitura do que foi escrito pelo próprio aluno, juntamente e com o diálogo entre seus pares e com o professor, pode levá-lo à novas anotações e impressões sobre o fenômeno ou conceito que está sendo trabalhado. Isto é rescrever a história do seu pensamento, sem, contudo, alterar o que já fora escrito. Isso se dá também num contexto maior de nossa civilização. Ao longo da História da Humanidade, as leituras e interpretações sobre um fenômeno vem sendo modificadas à medida que novos modelos surgem a partir de um trabalho teórico ou experimental, nos esclarecendo cada vez mais, sem, contudo, apagar o que já fora escrito. Isso pode contribuir muito para o aluno alfabetizar-se no conhecimento científico.

Na realização de cada oficina podemos tomar a decisão de usar ou não o diário no processo de avaliação para atribuir nota ou conceito, além de acompanhar o desenvolvimento do aluno.

A Oficina é baseada no fazer do aluno dentro de um trabalho paralelo entre a construção de seus próprios instrumentos e a construção e reconstrução de conceitos sobre o seu próprio conhecimento da Eletrostática, anotando suas impressões, dicas e sugestões de como fazer as atividades da melhor forma possível, naquele momento. É para isso que sugerimos o uso do diário de bordo, que pode ser uma pequena brochura 1/4 capa dura, costurado, contendo 48 folhas pautadas no formato 140 mm x 200 mm. O diário de bordo é parte do curso, é com ele que o aluno faz todas as suas anotações, evitando levar folhas soltas ou cadernos universitários que ocupam muito espaço na mesa. O diário serve também para registrar as perguntas feitas pelo professor e as respostas dos alunos, resultados da observação e do conhecimento prévio que eles trazem.

### 3. Preparação do Ambiente Escolar para a Aplicação da Oficina

Nosso produto educacional está organizado de forma a trabalhar os conhecimentos básicos em Eletrostática de maneira dinâmica e entusiástica. Nosso desejo durante a elaboração deste material foi levar a cada encontro uma (re)descoberta de novos conhecimentos elétricos e ao mesmo tempo deixar o aluno com a vontade de saber o que acontecerá no próximo encontro. Esperamos que o professor de física utilize este material como um objeto norteador em suas atividades e que possa estender a proposta para outros tópicos da física.

Para viabilizar o projeto, de maneira que ele fosse aplicável em qualquer escola, passamos a chama-lo de Oficina de Ensino de Eletrostática. O termo oficina, nos pareceu adequado pois, segundo o Dicionário Escolar de Língua Portuguesa (MEC), designa um lugar onde se exerce um ofício, laboratório, onde se dão grandes transformações. De acordo com nossa definição, é um lugar onde os alunos podem aprender, trabalhando, transformando e criando, coletivamente, conhecimentos com a tutoria de um professor. Nesta Oficina, os alunos lidarão com algumas ferramentas de uso comum, como ferro de solda, serra de cano, pistola de cola quente e materiais de fácil manuseio e baixo custo como, cartolina, canudo, linha, grampo bailarina, gesso, copinho de café descartável, cola, plástico, etc.

O projeto, como modelo de Oficina, foi aplicado no contra período escolar durante 3 meses com um encontro por semana de duração aproximada de 2 horas cada. Nosso objetivo foi construir com os alunos as práticas/montagens a partir de materiais de baixo custo e sucata, ao mesmo tempo em que construímos os conceitos da Eletrostática. O público alvo pode ser alunos das três séries do ensino médio, sem a necessidade de qualquer pré-requisito, podendo ser aplicado a qualquer aluno do Ensino Médio, formando uma turma de uma só série ou de várias séries. A quantidade de alunos na turma vai depender do espaço que a escola possui para a Oficina. A Oficina, da forma como a conduzimos, teve uma duração total de aproximadamente 2,5 meses, com 1 aula dupla semanal, num total de 20 aulas. Este modelo pode ser repetido todos os anos, aumentando a expectativa dos alunos a participarem da Oficina criando-se uma tradição que pode ser substituída por novas Oficinas, ou criando uma Oficina diferente por série.

Para a aplicação deste produto educacional não é necessário um espaço específico ou sofisticado, este pode ser qualquer lugar da escola onde se tenha mesas ou bancadas, iluminação, pelo menos uma saída de água (torneira) por perto e uma lixeira para descartar os resíduos de materiais. Um quadro de giz ou uma lousa branca ou um *flip chart* pode ser muito

útil para auxiliar o professor durante a aula prática, para que o mesmo possa trazer informações adicionais ou conduzir os alunos em suas anotações. É importante também que a incidência de vento ou corrente de ar seja a menor possível, de preferência nenhuma, pois a maioria dos experimentos e práticas requer um equilíbrio estático e são realizados com materiais muito leves.

#### 4. Lista de Materiais e Primeiros Passos

Para a execução desta proposta é importante e necessário que a escola também colabore, disponibilizando um conjunto de ferramentas e materiais. Em algumas escolas este conjunto já é usado pela manutenção. Listamos abaixo um conjunto mínimo de ferramentas que serão utilizadas pelos alunos e professor durante a oficina. Elas não estão na lista dos materiais que serão comprados pelos alunos, pois desta forma o projeto ficaria inviável.

##### LISTA DA ESCOLA

- 1 furadeira com brocas nº 5, 8 e 10;
- 2 lixas circulares para encaixar na furadeira e lixar PVC (*Polyvinyl Chloride* – Policloreto de Vinil) ou uma lixadeira elétrica com lixas;
- 6 lixas diversas para desbastar e lixar PVC;
- 1 serra tico-tico ou arco de serra;
- 1 pistola ou aplicador de cola quente;
- 4 bastões de cola quente;
- 1 rolo de papel alumínio;
- 3 maços de papel toalha;
- 2 ferros de solda [Fame] 30 W com ponta fina;
- 10 tesouras de uso geral. Este número depende do número de participantes da Oficina;
- 1 rolo de fita adesiva para empacotamento de 45 mm de largura;
- 1 régua escolar de 1 m ou trena;
- 1 martelo;
- 4 estiletes;
- 1 alicate de corte;
- 1 alicate;
- 1 tubo pequeno de vaselina.



Focaremos agora no gerenciamento do material do aluno, que será usado para a construção dos instrumentos e equipamentos. Para um bom andamento desta preparação, devemos eleger o próprio professor de física como o gerenciador do projeto, ou seja, aquele que organiza, adequa o calendário, aplica o projeto, compra os materiais e os distribui aos alunos ao longo da Oficina. Temos duas sugestões de gerenciamento financeiro: FINES - financiada pela escola, que após a submissão do projeto da Oficina à coordenação/direção, espera-se que a mesma acolha e financie o mesmo. Desta forma o professor recebe o repasse financeiro no valor médio atualizado por aluno. Outra opção é o FINAL – financiado pelo aluno, onde a escola aprova o projeto pedagógico, mas não financia o mesmo. Desta forma o professor leva o projeto aos alunos, que pela nossa experiência, aceitam financia-lo, pagando diretamente ao professor o valor médio por aluno. Durante a execução e aplicação da oficina este valor foi de R\$ 35,00. Alguns itens, que estão na lista dos alunos, podem ser passados para a lista da escola ou vice-versa. Caso seja necessário fazer alguma alteração nestas listas, é importante apresentar o custo médio por aluno antes de apresentar o projeto à escola e aos alunos.

Segue abaixo a lista de materiais por aluno.

#### LISTA PARA UM ALUNO:

- 1 brochura 1/4 capa dura, costurado, contendo 48 folhas pautadas no formato 140 mm x 200 mm usada como diário de bordo;
- 1 régua acrílica de 20 cm ou 15 cm;
- 1 caneta tipo bic transparente;
- 1 dúzia de canudos plásticos em polipropileno de 200 mm x 6mm;
- 0,5 m de fio de algodão;
- 0,5 m de fio de seda;
- 6 colchetes metálicos ou bailarinas, nº8;
- 1 pedaço de cartolina de 20 cm x 20 cm;
- 1 embalagem em papel (seda) de embrulhar bala de cocô, de 8 cm x 20 cm;
- 2 rolhas;
- 2 pregos 14x18 sem cabeça;
- 2 alfinetes com cabeça em plástico usados em costura de tamanho 30 mm;
- 1 tampa, sucata de plástico de embalagens de sorvete de massa da Kibon ou Nestle;
- 1 ímã de neodímio disco 10 mm x 4 mm, disponível em <https://www.imadeneodimio.com/>;
- 10 folhas de papel toalha;
- 2,4 m de cano de PVC de 0,5 polegada;

- 0,6 m de cano de PVC de 1,0 pol;
- 2 latas metálicas, sucata de atum em lata, vazias e sem tampa e fundo circulares;
- 2 latas metálicas, sucata de leite em pó de 400 g ou de nesquik;
- 6 braçadeiras em nylon 6.6 (enforca gato, insulok, tarape, cinta ou fita plástica) de 20 cm;
- 6 cotovelos de PVC de 0,5 pol;
- 4 T de PVC de 0,5 pol;
- 1 tubo pequeno de cola de PVC;
- 1 equipo simples em PVC de 1,2 m;
- 1 garrafa pet sucata vazia de 3 litros;
- 1,2 m de cabo flexível (fio elétrico) de 1,5 mm<sup>2</sup> encapado;
- 8 conectores ou garras ou jacarés, sendo 4 pretos e 4 vermelhos;
- 1 pedaço de 80 cm de forro PVC de 20 cm de largura por 8 mm de espessura;
- 2 copinhos de poliestireno de café;
- 100 g de gesso;
- 1 caixa de papelão de dimensão (45 x 35 x 15) cm para armazenar o gerador elétrico;
- 1 pedaço de 10 cm de fio de solda de 1 mm de bitola;
- 2 pregadores de roupa.

Os resultados obtidos mostraram que, com exceção das sucatas, todos os materiais da lista para os alunos podem ser comprados pelo professor e entregues aos alunos à medida que a oficina for sendo desenvolvida e de acordo com as quantidades descritas acima.

A oficina pode ser iniciada com alguns esclarecimentos feitos pelo professor sobre os propósitos pedagógicos do trabalho a ser desenvolvido e com a entrega do diário de bordo para os alunos, convidando-os a colocar o nome na capa e atrás da capa, onde normalmente há espaços impressos para este fim. É interessante o professor recolher os diários de bordo para ler e acompanhar o que os alunos produziram, escreveram e entenderam com relação aos conteúdos trabalhados para atualizar e alterar roteiros, aprofundar um tema ou aproveitar a próxima prática para fazer uma revisão. O professor conduz a Oficina de forma que cada aluno monte a sua prática, procurando dar atenção àqueles que tem pouca habilidade com as mãos, mas evitando fazer por eles. Sempre surgirão aqueles que terminam antes e poderão ajudar os que precisam.

O método desenvolvido neste projeto foi apresentar ao aluno uma prática da eletrostática, indicando os materiais e/ou o nome da prática. Em seguida apresentamos o procedimento, ou seja, a maneira de construir o equipamento ou a montagem do experimento.

Na sequência pede-se ao aluno que desenhe um esquema e anote no diário de bordo o procedimento realizado e o resultado observado. Em seguida, pergunta-se qual seria a explicação para se obter o resultado observado. A resposta individual deve ser escrita no diário de bordo pedindo-se que não seja apagada após sua conclusão. Passamos assim a escutar os relatos dos alunos seguidos de um diálogo entre eles e entre o professor e os alunos. Ao final podemos ter um texto-resposta que foi negociado, trazendo significado sob vários pontos de vista e com a cultura científica (BATISTA, 2009, p. 44). Este texto-resposta será escrito no diário de bordo logo após as respostas individuais.

Na próxima seção descreveremos os conceitos de física que podem ser trabalhados durante a execução dos experimentos da oficina de ensino de eletrostática.

## **5. Conceitos de Física que podem ser abordados com a Oficina de Eletrostática**

O conteúdo de física relacionado ao desenvolvimento do produto educacional é a Eletrostática. A apresentação que se segue tem como objetivo mostrar as bases teóricas para a construção dos conceitos que serão abordados na mesma sequência durante a aplicação da oficina eletrostática.

### *5.1. A Carga Elétrica*

Quando propomos ao aluno que aproxime um canudo atritado com papel toalha de alguns pequenos pedaços de matéria, surge o fenômeno de atração que nos faz perguntar como o mesmo ocorre. Existe um modelo para tal explicação? Sabemos que a matéria é composta por átomos. De acordo com o modelo atômico de Rutherford os átomos são divididos em duas regiões: uma central, denominada núcleo atômico, com prótons e nêutrons, e uma periférica, denominada eletrosfera, com elétrons que orbitam o núcleo. Neste modelo, os elétrons e prótons tem massas diferentes, onde a massa de um próton é cerca de 1800 vezes maior que a do elétron. Mas não é por isso que os elétrons orbitam o núcleo, mas sim pela característica elétrica negativa atribuída ao elétron e positiva ao próton. O nêutron não porta eletricidade, nem positiva e nem negativa. Desta forma o núcleo positivo mantém os elétrons negativos orbitando por força de atração elétrica. Esta é a essência da dinâmica de um átomo. O próton está fortemente preso ao núcleo atômico, de forma que uma alteração no núcleo, ou seja, a retirada de um

próton, só é possível quando se usa muita energia. Já o elétron pode ser retirado da órbita atômica com energia relativamente menor.

Uma das formas mais simples de retirar ou introduzir um elétron em um material é atritar dois materiais diferentes. A energia produzida na fricção permite que alguns elétrons deixem a eletrosfera de um material, que pode ser denominado de material menos eletronegativo, e sejam capturados pela eletrosfera do outro material, mais eletronegativo. Quando os elétrons deixam o material menos eletronegativo, o número deles diminui e como o número de prótons não se altera, este fica com excesso de prótons e assim adquire uma característica elétrica positiva. Por outro lado, estes elétrons são recebidos pelo material mais eletronegativo, fazendo com que este fique com excesso de elétrons e assim adquira uma característica elétrica negativa. Os materiais atritados, que denominaremos de indutores, adquirem uma propriedade elétrica ligada ao excesso de prótons ou elétrons. Esta propriedade é denominada de carga elétrica.

O modelo da ligação química nos permite entender a formação dos materiais por intermédio das trocas de elétrons, que podem acontecer de duas maneiras: *ligação iônica*, onde um elétron de um átomo é cedido a outro átomo, transformando o primeiro em íon positivo e o segundo em íon negativo, fazendo com que a ligação seja sempre polar; *ligação covalente*, onde há uma partilha dos elétrons das camadas de valência de dois ou mais átomos, podendo gerar uma polarização ou não no sistema. Esta vai depender das eletronegatividades dos elementos químicos envolvidos na ligação covalente, que pode ser apolar, onde os elementos têm a mesma eletronegatividade, como por exemplo o gás cloro  $\text{Cl}_2$ , ou polar, onde os elementos têm eletronegatividades diferentes, fazendo com que a molécula tenha uma distribuição de cargas não simétrica, como no caso da água  $\text{H}_2\text{O}$ .

O elétron por estar mais livre no elemento químico ou na substância pode ser manipulado de forma a produzir íons positivos ou negativos ou substâncias polares originadas de ligação iônica ou covalente. Em termos práticos, a fricção entre dois materiais diferentes é um processo de eletrização, onde um dos materiais adquire excesso ou falta de elétrons. Este processo torna o material carregado eletricamente de tal forma que altera o espaço a sua volta com a manifestação de um campo elétrico. A interação do sistema eletrizado com outras substâncias ou materiais é percebida pelas forças de atração e repulsão exercida nos mesmos.

Para quantificar o quanto um corpo está eletrizado foi atribuído de forma equivalente uma carga elementar para um único elétron e para um único próton com módulo dado por  $|e| = 1,6 \times 10^{-19}$  C. Esta é a menor carga possível que qualquer corpo pode possuir e sua unidade é expressa em Coulombs (C), em homenagem ao físico Charles Coulomb. Isso significa que a

carga total  $Q$ , maior que  $e$ , de qualquer sistema, será calculada como sendo um múltiplo inteiro da carga elementar, ou seja,

$$Q = n|e|, \quad (1)$$

em que  $n = |n_p - n_e|$  é a carga líquida do sistema dada pelo número de prótons  $n_p$  menos o número de elétrons  $n_e$ . Mas como explicar o fenômeno de atração entre dois objetos se somente um deles estiver carregado eletricamente e o outro for neutro, ou seja, possuir carga líquida igual a zero? Se colocarmos um indutor com excesso de elétrons próximo de uma outra substância neutra, o indutor irá atrair na substância as partículas de sinais opostos ao mesmo tempo em que irá repelir as de mesmo sinal para a região mais distante possível do indutor. Esse processo de separação de cargas da substância neutra é chamado de eletrização por indução, resultando em uma força de atração entre o indutor e a substância, visto que as partículas de sinais opostos estão mais próximas do que as de mesmo sinal.

### 5.2. A Força Elétrica

A interação entre dois objetos carregados é descrita por uma força que age a uma certa distância de separação dos objetos. Toda interação elétrica envolve uma força, chamada de força elétrica, que destaca a importância de três variáveis: a carga do objeto 1,  $q_1$ , a carga do objeto 2,  $q_2$ , e a distância, que chamaremos de  $r$ , entre eles. Se os dois objetos carregados, ou em outras palavras, se as duas cargas estiverem em repouso a expressão quantitativa que relaciona estas variáveis na força elétrica é conhecida como Lei de Coulomb. Esta lei estabelece que a força elétrica  $\vec{F}$  entre dois objetos carregados é diretamente proporcional ao produto da quantidade de carga dos dois objetos,  $q_1$  e  $q_2$ , e inversamente proporcional ao quadrado da distância  $r$  que separa os dois objetos, ou seja,

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r}, \quad (2)$$

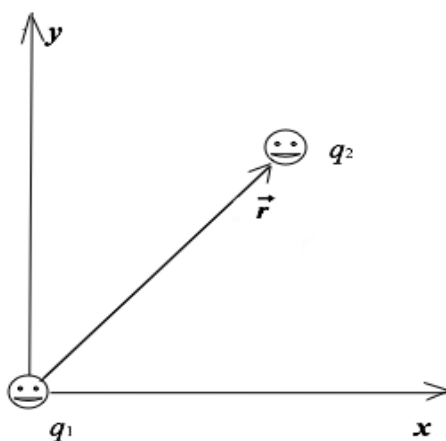
em que  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2$  é a permissividade elétrica no vácuo e  $\hat{r}$  o vetor unitário na direção da distância que liga a carga  $q_1$  à carga  $q_2$ . A expressão dada por

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = k_0 = 9 \times 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2}$$

é comumente chamada de constante de Coulomb no vácuo. Isso significa que a eq.(2) fornece a lei de forças para duas cargas situadas no vácuo. Esta será de repulsão se as cargas forem de mesmo sinal e de atração se tiverem sinais opostos.

É importante ressaltar que a expressão (2) é obtida considerando que uma das cargas está na origem do sistema de coordenadas e a outra localizada na posição  $\vec{r}$ , como ilustrado na figura 1.

**Figura 1** – Dois objetos carregados: o de carga  $q_1$  colocado na origem do sistema de coordenadas e o de carga  $q_2$  colocado na posição  $\vec{r}$ . A lei de forças que descreve a interação entre esses dois objetos, considerados como cargas pontuais, é dada pela lei de Coulomb, eq.(2).



Fonte: Elaborada pelo Autor.

De acordo com Heilbron (1999), em seu livro “*Electricity in the 17th and 18th Centuries – A Study in Early Modern Physics*”, as atrações eletrostáticas eram conhecidas desde o século IV a.C. com o nome de efeito âmbar. Quando se atrita o âmbar a outros materiais, ele tem a propriedade de atrair corpos leves ou com pouca massa, diminuindo o efeito da força gravitacional.

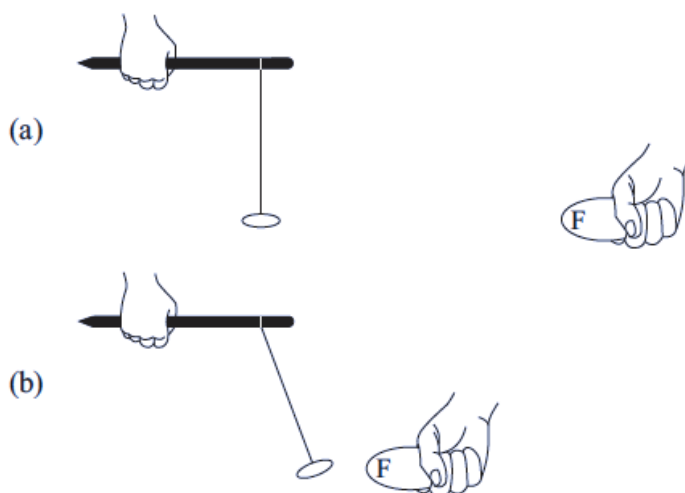
Segundo Heilbron, a partir do século XV houve uma retomada nas pesquisas feitas com o âmbar e outros materiais. O italiano Girolamo Fracastoro (1478-1553) publicou em 1546 sobre um instrumento que pode detectar corpos carregados, denominado de perpendicular de Fracastoro (ASSIS, 2010). Este dispositivo era composto por um pedaço de âmbar ou prata preso à extremidade de um fio, e este preso na outra extremidade a um suporte, quase funcionando como um fio de prumo ou como um pêndulo, como ilustrado na figura 2.

Quando um objeto eletrizado se aproxima do pedaço de âmbar pendurado, este detecta a presença do objeto eletrizado e se aproxima alterando o ângulo de inclinação do fio do pêndulo ou do perpendicular. A eficácia na detecção de um objeto eletrizado é grande, pois o perpendicular tem seu peso equilibrado pela tração no fio o que permite que o mesmo possa se movimentar em todas as direções.

William Gilbert (1544-1603), em seu livro, “*On the Magnet, Magnetic Bodies and that Great Magnet the Earth*” (Sobre o Ímã, Corpos Magnéticos e aquele Grande Ímã a Terra),

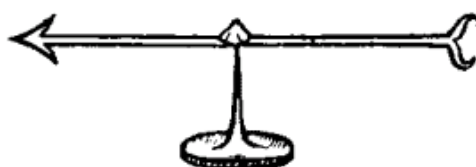
propõe o uso de uma agulha giratória, denominada versório, tão sensível quanto o perpendicular de Fracastoro na detecção de corpos eletrizados, como representado na figura 3.

**Figura 2** – Representação de um perpendicular de Fracastoro: (a) um pedaço de âmbar afastado, onde F é a parte atritada e (b) ilustra o pequeno pedaço de âmbar do perpendicular sendo atraído pelo âmbar atritado em F.



Fonte: ASSIS, 2010, p. 37.

**Figura 3** –Versório de Gilbert.



Fonte: ASSIS, 2010, p. 38.

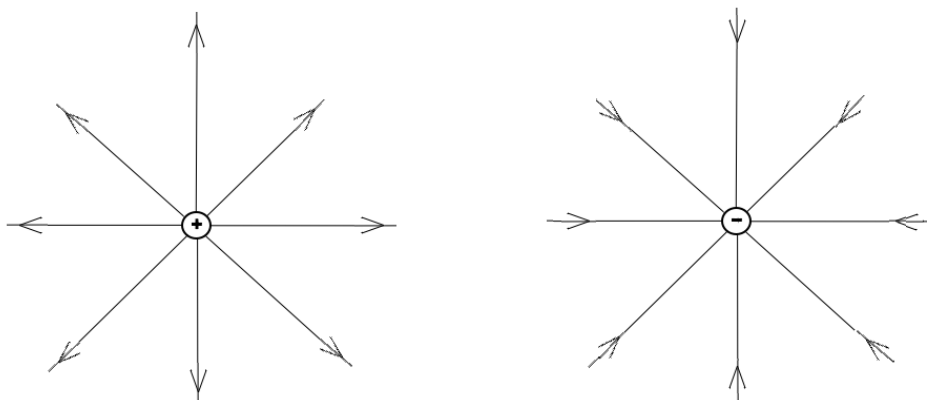
### 5.3. O Campo Elétrico

O campo elétrico  $\vec{E}$  é uma propriedade da carga, ou seja, objetos carregados eletricamente podem ser vistos como centros de campos elétricos. Como o campo elétrico é uma propriedade vetorial, este possui módulo, direção e sentido. As forças elétricas do campo podem ser representadas por linhas, comumente chamadas de linhas de campo ou linhas de força. A disposição espacial dessas linhas depende da distribuição de cargas do corpo. Se tivermos uma carga puntiforme  $+q$  ou  $-q$ , por exemplo, as linhas de força do campo apresentarão simetria radial, como ilustrado na figura 4.

Na ilustração da figura 4 note que as linhas de forças do campo elétrico saem da carga positiva, divergindo, e chegam ou convergem na carga negativa. Se tivermos um sistema

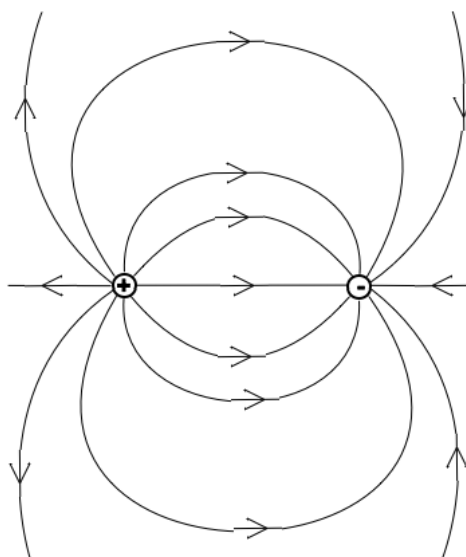
composto por duas cargas de sinais opostos, como um dipolo elétrico, por exemplo, a distribuição de linhas muda em algumas regiões do espaço, veja figura 5. Vale lembrar que o vetor campo elétrico  $\vec{E}$  é sempre tangente às linhas de forças em um ponto destas linhas.

**Figura 4** – Linhas de força do campo elétrico, mostrando simetria radial divergente para a carga positiva e convergente para a carga negativa.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

**Figura 5** – Representação das linhas de campo em um dipolo elétrico.

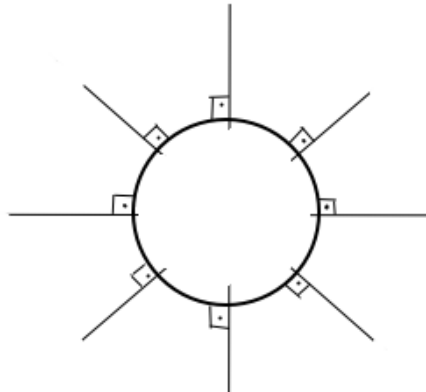


Fonte: Elaborada pelo Autor.

Se tivermos uma distribuição de cargas contínua em um objeto qualquer, como na cúpula de um gerador eletrostático de Van de Graaff, as linhas de campo serão ortogonais à superfície do objeto, como ilustrado na figura 6.



**Figura 6** – Linhas de campo ortogonais à superfície de um objeto esférico carregado, projetado no plano.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Com o auxílio de uma carga de prova,  $q$ , pode-se mapear o espaço no entorno de um objeto carregado eletricamente com carga total  $Q$ , para verificar as características do campo elétrico entre elas.

Da mesma forma que a aceleração da gravidade, dada pelo vetor  $\vec{g}$ , o qual representa o campo gravitacional da Terra nas proximidades de um objeto e é descrito pela força gravitacional  $\vec{F}_G$  que age sobre a massa  $m$  deste objeto, ou seja,

$$\vec{g} = \frac{\vec{F}_G}{m}, \quad (3)$$

o campo elétrico  $\vec{E}$  é descrito pela força elétrica  $\vec{F}_{el}$  que age sobre uma carga de prova arbitrária  $q$ , de modo que,

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_{el}}{q}. \quad (4)$$

As dimensões do campo elétrico são newton/coulomb, N/C. A relação acima mostra que a força elétrica pode ser expressa em termos do campo elétrico  $\vec{F}_{el} = q\vec{E}$ . Para uma carga positiva  $q$  o vetor campo elétrico aponta na mesma direção da força. Por outro lado, se a carga de prova for negativa, força e campo elétricos tem mesma direção, mas sentidos opostos.

Substituindo a lei de Coulomb, dada pela eq. (2), na relação (4), assumindo que a carga teste  $q$  é dada por  $q_2$  tem-se que o campo elétrico gerado pela carga  $q_1$  é dado por,

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_{el}}{q_2} = \frac{k_0 q_1 q_2}{q_2 r^2} \hat{r} = k_0 \frac{q_1}{r^2} \hat{r}. \quad (5)$$

Assim, vemos que cada carga gera seu próprio campo elétrico, não dependendo da outra carga. Podemos pensar também que a força que surge entre duas cargas elétricas pode ser vista como o resultado da interação entre os campos elétricos destas duas cargas.

Na interação de duas ou mais cargas, o campo elétrico resultante, em um dado ponto no espaço, será a soma vetorial de cada um dos campos neste ponto.

#### 5.4. Energia Potencial Elétrica e o Potencial Elétrico

Vimos que o tratamento da força e do campo elétricos é vetorial. Contudo, há uma forma de tratar as interações elétricas fazendo uso da energia potencial elétrica e do potencial elétrico, visto que os cálculos são mais simplificados, pois são feitos com grandezas escalares.

Para calcularmos o potencial elétrico de uma carga puntiforme isolada  $q$  vamos considerar que uma carga de prova  $q_0$ , positiva, é movimentada por um agente externo de um ponto A até um ponto B. Para facilitar os cálculos vamos imaginar que a carga de prova é movimentada ao longo de uma linha de campo da carga geradora e que  $q$ , A e B estão situados ao longo de uma mesma reta. Considerando o ponto B entre  $q$  e A, ou seja, o ponto B mais próximo de  $q$ , o movimento da carga de prova será na direção contrária à linha de campo da carga geradora, ou seja,  $q$  é positivo. Pela definição de trabalho tem-se que,

$$\begin{aligned} \tau_{A \rightarrow B} &= \int_{r_A}^{r_B} \vec{F} \cdot d\vec{r} = -q_0 \int_{r_A}^{r_B} \vec{E} \cdot d\vec{r} = -\frac{q_0 q}{4\pi\epsilon_0} \int_{r_A}^{r_B} \frac{dr}{r^2} = \frac{q_0 q}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{1}{r_B} - \frac{1}{r_A} \right), \\ \frac{\tau_{A \rightarrow B}}{q_0} &= \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{1}{r_B} - \frac{1}{r_A} \right) = V_B - V_A. \end{aligned}$$

Note que substituímos  $\vec{F}$  pelo seu equivalente  $-q_0\vec{E}$  e que  $\vec{E} \cdot d\vec{r} = Edr$ , pois, apesar de  $\vec{E}$  e  $d\vec{r}$  terem sentidos opostos,  $dr$  está diminuindo, uma vez que a carga de prova está se aproximando da carga geradora. Escolhendo o ponto A no infinito como referência de potencial, ou seja, fazendo  $V_A = 0$  para  $r_A \rightarrow \infty$ , e omitindo o índice B podemos definir o potencial elétrico de uma carga puntiforme isolada  $q$  como sendo,

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r}. \quad (6)$$

Portanto, o potencial elétrico em um ponto  $r$  de um campo elétrico é definido como o trabalho realizado sobre a carga de prova para trazê-la de um ponto no infinito até o ponto  $r$ . No caso de um campo elétrico gerado por uma carga puntiforme isolada o potencial elétrico em um ponto  $r$  distante desta carga será dado pela eq.(6). Esta mostra que as superfícies equipotenciais, mesmo potencial, são esferas concêntricas. Como a força eletrostática é conservativa o trabalho da força elétrica pode ser descrito pela diferença da energia potencial  $\Delta\varepsilon_P$  entre os pontos A e B que, de acordo com o desenvolvimento acima, é dada por,  $\tau_{A \rightarrow B} = q_0(V_B - V_A) = \Delta\varepsilon_P$ ,

$$\therefore \varepsilon_P = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q_0 q}{r}. \quad (7)$$

A energia potencial elétrica é a energia necessária para mover a carga de prova no campo da carga geradora do infinito até a posição  $r$ , dada pela distância entre as cargas.

Assim como o campo elétrico é descrito pela força elétrica que age sobre uma carga de prova, podemos atribuir a um ponto do espaço um potencial elétrico,  $V$ , descrito pela energia potencial elétrica,  $\varepsilon_p$ , que age sobre uma carga de prova arbitrária  $q_0$ , ou seja,

$$V = \frac{\varepsilon_p}{q_0}. \quad (8)$$

As dimensões do potencial elétrico são joule/coulomb, J/C, ou V, denominada volt, em homenagem a Alessandro Volta. Tanto a carga, a energia potencial e o potencial elétrico podem ser positivos ou negativos. Na interação de duas ou mais cargas, o potencial resultante, em um dado ponto do espaço, será a soma escalar de cada um dos potenciais neste ponto.

### 5.5. A Capacitância

Em nossa oficina eletrostática precisaremos conhecer sobre a física do capacitor, que é um aparelho usado para armazenar energia elétrica ou cargas elétricas. Para entendermos a funcionalidade e propriedades de um capacitor, vamos considerar uma esfera condutora isolada de raio  $R$ , carregada com carga  $Q$ . A eq. (6) também pode ser utilizada para descrever o potencial elétrico de uma distribuição de cargas de simetria esférica, ou seja, para pontos exteriores da esfera condutora de raio  $R$  podemos escrever:

$$V = k_0 \frac{Q}{R}.$$

Todos os pontos da esfera condutora, tanto os superficiais quanto os interiores, possuem o mesmo potencial elétrico, ou seja,  $V$  é constante. Para pontos externos à superfície da esfera o potencial elétrico diminui de acordo com a expressão de  $V(R)$  acima.

A capacidade de armazenamento de cargas elétricas em sua superfície é dada pela capacitância  $C$ , definida como

$$C = \frac{Q}{V}. \quad (9)$$

As dimensões da capacitância são coulomb/volt, C/V, ou F, denominada farad, em homenagem ao grande experimentalista Michel Faraday. Ao substituirmos o potencial da esfera na eq. (A.9) obtemos

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{Q}{k_0 \frac{Q}{R}} = \frac{R}{k_0} = 4\pi\epsilon_0 R, \quad (10)$$

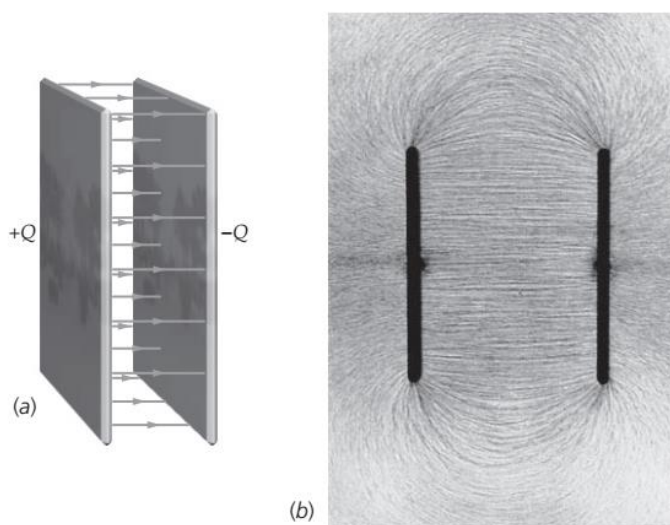
mostrando que a capacitância da esfera não depende de  $Q$  ou  $V$ , mas apenas do raio da esfera. Quando aplicamos esta equação a uma capacitância de 1 F, temos como resultado um raio de esfera de aproximadamente  $9 \times 10^6$  km, que é equivalente a uma esfera de raio 1412 vezes maior do que o raio do planeta Terra! Este resultado mostra que o farad é uma unidade muito grande e assim nas aplicações eletrônicas costuma-se usar o microfarad ( $1 \mu\text{F} = 10^{-6}$  farad) ou o picofarad ( $1 \text{pF} = 10^{-12}$  farad).

Quando carregamos um capacitor esférico, um campo elétrico é produzido em seu entorno. O trabalho necessário para carregar o capacitor pode ser entendido como o trabalho para estabelecer o campo elétrico, ou em outras palavras, a energia armazenada no capacitor é a energia armazenada no campo elétrico, chamada de energia do campo eletrostático.

Outro dispositivo comumente utilizado é o capacitor de placas paralelas, representado na figura 7.

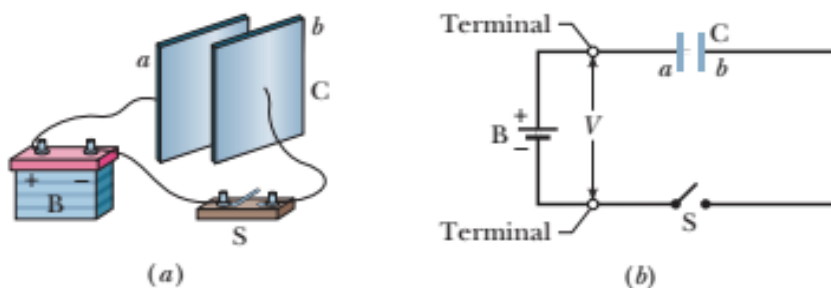
Uma forma de carregar um capacitor é colocá-lo em um circuito elétrico, ou seja, em um circuito fechado em série com uma bateria, por onde pode passar uma corrente elétrica. A bateria serve para manter uma diferença de potencial entre os terminais do capacitor, veja figura 8. Enquanto a chave  $S$  estiver aberta, não há ligação elétrica entre os terminais do capacitor, mas quando a chave  $S$  é fechada surge um campo elétrico criado pela bateria movendo as cargas elétricas, que neste caso são os elétrons. A partir da placa  $a$ , os elétrons se deslocam para o terminal positivo da bateria, deixando placa  $a$  carregada positivamente. Este mesmo campo faz um mesmo número de elétrons se descolarem do terminal negativo da bateria para a placa  $b$ , deixando-a carregada negativamente. Deste modo as cargas nas placas  $a$  e  $b$  tem o mesmo módulo.

**Figura 7** – Capacitor de placas paralelas carregado: (a) representação das linhas de força paralelas e igualmente espaçadas; (b) linhas de força evidenciadas por pequenos pedaços de fibra suspensos em óleo.



Fonte: Harold M. Waage (TIPLER, 2019, p. 111).

**Figura 8** – (a) Circuito formado por uma bateria B, uma chave S e as placas a e b de um capacitor C. (b) representação simbólica.



Fonte: Fundamentos de Física (WALKER, 2012, p. 107).

Inicialmente as placas estão descarregadas e a diferença de potencial é nula. Quando elas estiverem carregadas a diferença de potencial será a mesma estabelecida nos terminais da bateria e desta forma o terminal positivo e a placa  $a$  estão no mesmo potencial elétrico e não há mais um campo elétrico que desloque elétrons. O mesmo acontece com o terminal negativo e a placa  $b$  que estarão sob o mesmo potencial elétrico e sem a ação do campo elétrico. Com o estabelecimento do equilíbrio eletrostático, sem movimento de cargas, o capacitor estará totalmente carregado, sob uma diferença de potencial  $V$  e uma carga  $Q$ .

Analisando agora o capacitor carregado, pode-se mostrar que há um campo elétrico  $\vec{E}$  o qual pode-se relacionar com a carga  $Q$  armazenada em suas placas. Pela lei de Gauss tem-se que,

$$\varepsilon_0 \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = Q, \quad (11)$$

onde a carga  $Q$  é envolvida pela superfície gaussiana e  $\oint \vec{E} \cdot d\vec{A}$  é o fluxo elétrico que atravessa a superfície. Supondo que  $|\vec{E}|$  seja constante e  $\vec{E}$  e  $d\vec{A}$  paralelos, a eq. (11) se reduz a

$$Q = \varepsilon_0 EA.$$

Dividindo-se este resultado pela área  $A$  do capacitor, obtemos sua densidade superficial de carga  $\sigma$ ,

$$\sigma = \frac{Q}{A} = \varepsilon_0 E. \quad (12)$$

O trabalho necessário para deslocar uma carga de prova  $q_0$  de uma placa a outra do capacitor pode ser expresso pela energia potencial elétrica  $q_0V$ , como na eq.(8), ou pela definição de trabalho apresentada no início da seção, em que consideramos o produto da força  $q_0E$  pela distância percorrida  $d$ , dada neste caso pela distância entre as placas do capacitor. Como essas duas expressões devem ser iguais tem-se que,

$$\begin{aligned} q_0V = q_0Ed \quad \rightarrow \quad V = Ed = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} d = \frac{d}{\varepsilon_0 A} Q \\ \therefore \frac{Q}{V} = C = \frac{\varepsilon_0 A}{d}. \end{aligned} \quad (13)$$

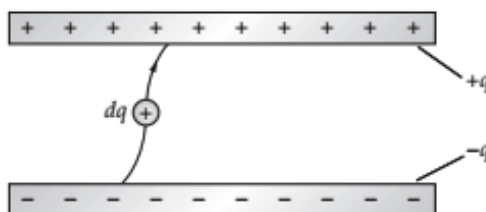
fornecendo assim, a capacitância do capacitor de placas paralelas. Note que a capacitância não depende da carga  $Q$  e da diferença de potencial (ddp)  $V$ , mas somente das dimensões do capacitor e do meio.

Quando o capacitor está sendo carregado, elétrons podem ser transferidos do condutor positivamente carregado para o condutor negativamente carregado. Isto deixa o condutor positivo com uma deficiência de elétrons e o condutor negativo com um excesso de elétrons. O mesmo pode ocorrer com cargas positivas do condutor negativamente carregado para o positivamente carregado. De toda maneira haverá um trabalho para carregar o capacitor e uma parte deste trabalho é armazenada como energia potencial eletrostática.

Se uma pequena quantidade de carga positiva adicional  $dq$  for transferida da placa negativa para a positiva, como ilustrado na figura 9, através de um aumento do potencial  $V$ , a energia potencial elétrica  $\varepsilon_p$  da carga e, portanto, do capacitor, aumenta de

$$d\varepsilon_p = Vdq = \frac{q}{C}dq. \quad (14)$$

**Figura 9** – Há um aumento na energia potencial quando uma carga positiva  $dq$  é movida do condutor negativo para o condutor positivo.



Fonte: Física para Cientistas e Engenheiros (TIPLER, 2006, p. 114).

O aumento total na energia potencial  $\varepsilon_p$  é a integral de  $d\varepsilon_p$  quando  $q$  aumenta de zero até seu valor final  $Q$ , ou seja,

$$\varepsilon_p = \int d\varepsilon_p = \int_0^Q \frac{q}{C} dq = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C}. \quad (15)$$

Esta é a energia armazenada no capacitor, que pode ser expressa em termos de  $Q$  e  $V$ ,  $C$  e  $V$  ou  $Q$  e  $C$ :

$$\varepsilon_p = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} QV = \frac{1}{2} CV^2, \quad (16)$$

ou ainda em relação à intensidade do campo elétrico  $E$  entre as placas e as dimensões do capacitor,

$$\varepsilon_p = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} \left( \frac{\varepsilon_0 A}{d} \right) (Ed)^2 = \frac{1}{2} \varepsilon_0 E^2 (Ad),$$

em que a quantidade  $Ad$  é o volume do espaço entre as placas do capacitor e que contém o campo elétrico. A energia por unidade de volume é chamada de densidade de energia  $u$  que pode ser escrita como

$$u = \frac{\text{energia}}{\text{volume}} = \frac{1}{2} \varepsilon_0 E^2. \quad (17)$$

Assim, a energia por unidade de volume do campo eletrostático é proporcional ao quadrado da intensidade do campo elétrico. Apesar deste resultado ter sido obtido para um capacitor de

placas paralelas, o mesmo pode ser aplicado a qualquer campo elétrico. Sempre que houver um campo elétrico no espaço, a energia eletrostática por unidade de volume é dada pela eq.(17).

### 5.6. Gerador Eletrostático Gotejante de Kelvin

“Se posso construir um modelo mecânico de uma coisa, então posso compreendê-la”. Esta era a expressão favorita de Williams Thomson (Lorde Kelvin), que em 1867 construiu um gerador eletrostático gotejante que permitia gerar uma diferença de potencial da ordem de milhares de volts (LLOYD,1980). O mais interessante deste gerador é o uso da água como condutora de cargas elétricas.

Como vimos anteriormente, os fenômenos que envolvem cargas elétricas não ficam restritos somente ao estudo destas entidades. Devido ao efeito de campo vetorial elétrico ocorrem interações à distância, que nos permitem aprofundar as abordagens conceituais no carregamento de capacitores, potencial elétrico, energia potencial, capacitância, diferença de potencial, corrente elétrica entre outros. A construção e uso do gerador de Kelvin na oficina eletrostática também nos auxilia nestas abordagens. Apresentamos na figura 10 o gerador de Kelvin reconstruído conforme as especificações básicas de Kelvin.

**Figura 10** – Gerador Eletrostático de Kelvin montado.

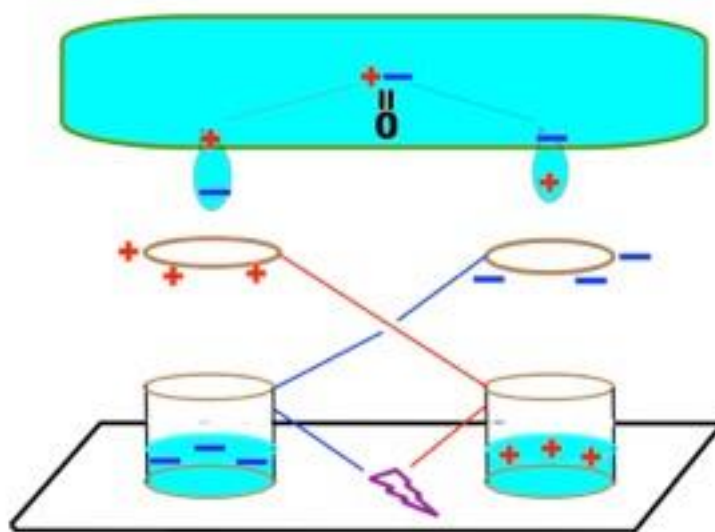


Fonte: Elaborada pelo Autor.



Com este gerador foi possível gerar uma diferença de potencial de aproximadamente 6000 volts através do acúmulo de cargas elétricas positivas e negativas. As cargas são transportadas por gotas de água, que caem, pela ação da gravidade, de um reservatório e passam por dois indutores que promovem a separação de cargas na gota através do efeito de campo. Desta forma as gotas saem do reservatório carregadas e são acumuladas em dois reservatórios separados, ou seja, água com carga negativa e água com carga positiva. Para facilitar o entendimento, veja o esquema do funcionamento do gerador de Kelvin na figura 11.

**Figura 11** - Esquema de funcionamento do Gerador Eletrostático de Kelvin.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Acompanhemos duas gotas d'água que saem de dois orifícios do reservatório. Cada uma das gotas é eletrizada por indução por meio de um indutor colocado logo abaixo do orifício. O indutor da esquerda é carregado positivamente e irá induzir uma separação de cargas na gota da esquerda, onde a parte inferior da gota fica com cargas negativas e o lado de cima da gota com cargas positivas. A gota negativa, ao soltar-se, é recolhida no reservatório metálico da esquerda, deixando-o carregado negativamente. O indutor da direita é carregado negativamente e irá induzir uma separação de cargas na gota da direita, deixando-a positiva na parte inferior e negativa na parte superior. A gota positiva, ao soltar-se, é recolhida no reservatório da direita, deixando-o carregado positivamente.

No reservatório superior ficaram cargas positivas e negativas que se neutralizam. Os dois reservatórios de baixo contêm um elevado número de cargas negativas e positivas. Conseqüentemente, o potencial elétrico destes aumenta à medida que água cai nos mesmos. Em

nossa montagem há um fio vermelho, que conecta o indutor da esquerda com o reservatório da direita, e um fio azul que conecta o indutor da direita com o reservatório da esquerda. Essas conexões são para manter os indutores carregados com seus respectivos campos elétricos. Há ainda outros dois fios, azul e vermelho, que estão ligados às latas armazenadoras esquerda e direita, usados para descarregar o gerador, produzindo um faiscamento. Este processo é descrito de maneira sucinta pelo próprio Kelvin como:

“...arranjo recíproco, no qual o corpo carregado pelas gotas de água torna-se o indutor para um outro feixe, sendo que as gotas deste feixe, por sua vez, mantêm a carga do indutor do primeiro feixe.” (LLOYD, 2007, p. 506).

O funcionamento do gerador, após abrir as duas saídas para o escoamento das gotas, ocorre em torno de 2 minutos. Este pode ser acelerado tomando-se um canudo carregado por atrito e o encostando em um dos indutores, carregando-o por contato negativamente, que por sua vez carrega por indução a gota, que se desprende do reservatório com carga positiva.

A medida que os reservatórios inferiores, os quais devem estar isolados de qualquer aterramento, vão acumulando cargas, ocorre um aumento na diferença de potencial elétrico entre os mesmos. Isso pode ser observado quando uma parte das gotas que saem do reservatório superior se espalham e provocam uma ‘chuva’ em torno dos indutores. Uma explicação para esse fenômeno é o aumento do número de cargas de mesmo sinal em uma gota devido ao aumento de cargas nos indutores. Isso faz com que as mesmas se distanciem devido ao aumento da força elétrica de repulsão entre elas, provocando uma pulverização da gota.

O potencial do conjunto condutor, que é recíproco, e composto de indutor, fio de ligação, lata e fio terminal ou de faiscamento, é o mesmo em toda sua extensão, atingindo um valor máximo pouco antes do faiscamento. Os dois conjuntos condutores estão sobre uma base isolante, feita de PVC, e desta forma não há fuga de carga por ela. Para acompanhar o carregamento destes conjuntos, coloca-se um eletroscópio de folhas encostado em uma das latas, que tem uma de suas folhas afastando-se da outra, atingindo uma abertura máxima para um potencial máximo. A explicação para isso é que o potencial do eletroscópio passa a ser o mesmo do conjunto condutor, e as cargas se espalham sobre sua superfície, provocando forças de repulsão entre as folhas.

Em que condições ocorre o faiscamento? Na construção e experimentação do gerador, a distância  $d$  entre os fios terminais foi de 2,0 mm, e o que os separa é o ar, que é um isolante quando submetido a campos elétricos pouco intensos. O faiscamento ou a descarga em arco ocorre quando o campo elétrico produzido entre os terminais ioniza o ar, permitindo que alguns

íons sejam acelerados e colidam com moléculas da vizinhança, aumentando assim a concentração de íons e de elétrons. Os elétrons colidem com outros átomos do ar, e estes produzem luz ou centelha. Este campo elétrico é conhecido como rigidez ou ruptura dielétrica do ar e seu valor é em torno de 3 kV/mm. Este valor nos permite estimar a diferença de potencial elétrico,  $V$ , gerada entre estes mesmos terminais. Utilizando a primeira parte da eq.(13) obtemos para a distância de 2 mm,

$$V = Ed = 3000 \times 2 = 6000 \text{ volts}$$

Este resultado surpreende pela intensidade, pois o que normalmente os alunos observam no cotidiano é uma diferença de potencial de 127 ou 220 volts, enquanto que em nossa oficina conseguimos um valor de 3000 volts por terminal durante o faiscamento. Para obter um potencial dessa magnitude é necessária uma grande concentração de cargas elétricas nas extremidades dos faiscadores. As cargas elétricas se espalham pela superfície do condutor, visto que no interior do condutor temos um campo elétrico nulo e um potencial constante em sua superfície. O nosso condutor é um conjunto recíproco de indutor, lata/reservatório e fios conectados em série e é sobre este conjunto que se dá o acúmulo de cargas. Sabemos também que uma superfície acumuladora de cargas se transforma em um capacitor, que é carregado quando submetido a uma diferença de potencial elétrico. Quando o ar não consegue mais isolar uma extremidade do fio da outra, uma faísca é produzida e o processo de carga no gerador é reiniciado. Portanto, se fizermos a analogia do funcionamento do gerador de Kelvin com um circuito elétrico, este funciona como se fosse um capacitor sendo carregado e descarregado periodicamente, com a água fazendo o papel da corrente elétrica proveniente de uma bateria, com força eletromotriz dada pela força da gravidade.

Outras discussões podem ser conduzidas com o gerador gotejante de Kelvin como o acúmulo de cargas e o poder das pontas nas extremidades dos faiscadores, estimativa da densidade e até mesmo do número de cargas nos indutores e reservatórios, as direções dos campos elétricos formados entre o reservatório superior e os indutores e entre os indutores e os reservatórios inferiores, entre outras.

## 6. Construção dos Experimentos da Oficina de Ensino de Eletrostática

O tempo em que propomos as atividades a seguir é baseado na experiência que adquirimos com a aplicação da oficina de ensino de eletrostática. Dependendo da realidade da escola em que a proposta for aplicada, os experimentos podem ser construídos e discutidos em mais ou menos tempo. Realizamos encontros semanais e cada encontro corresponde a aproximadamente duas horas.

### 6.1. Primeiro Encontro: Eletrização por Atrito – Atração Elétrica

1ª PRÁTICA: cada aluno recebe 1 canudo; 1 folha de papel toalha; 1 tesoura; 1 embalagem de bala de coco; 1 régua acrílica de 20 cm; 1 tubo de caneta da marca *BiC*®.

PROCEDIMENTO 1: Começa-se a prática cortando as pontas do papel desfiado da embalagem de bala de coco em pequenos pedaços, no máximo 2 mm x 2 mm. Aproxima-se o canudo dos pedaços de papel, sem encostá-los e observa-se o que acontece. Em seguida faz-se um esquema ou desenho da prática e anota-se o que foi observado.

PROCEDIMENTO 2: Entrega-se mais um canudo, que deve ser atritado ao papel toalha [ATRITADOR]. Aproxima-se o canudo atritado [INDUTOR] dos papéis de seda, sem encostá-los e observa-se o que acontece. Em seguida faz-se um esquema da prática e anota-se o que foi observado.

COMENTÁRIOS: No procedimento 1 nada ocorreu, mas no procedimento 2 os pedaços de papel são atraídos ao canudo, veja figura 12. Veja que é diferente de encostar o canudo nos papéis.

PROCEDIMENTO 3: Repete-se o procedimento 2 usando uma régua de acrílico como indutor e observa-se o que acontece. Em seguida faz-se um esquema da prática e anota-se o que foi observado.

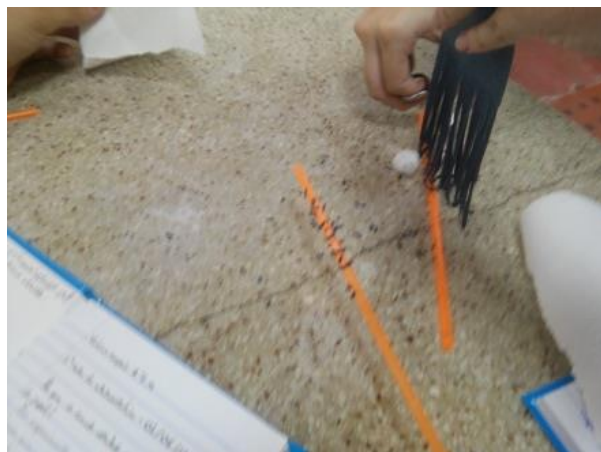
PROCEDIMENTO 4: Repete-se o procedimento 2 usando um tubo de caneta *BiC*® como indutor e observa-se o que acontece. Em seguida faz-se um esquema da prática e anota-se o que foi observado.

PROCEDIMENTO 5: Repete-se o procedimento 2 usando o cabelo como atritador e a sequência canudo, régua acrílica e tubo de caneta como indutores. Observa-se o que acontece. Em seguida faz-se um esquema da prática e anota-se o que foi observado.

**PROCEDIMENTO 6:** Anota-se qual foi o instrumento que atraiu os papeis com mais intensidade para selecionar o MELHOR INDUTOR, ou seja, aquele que induz os pequenos pedaços de papel seda a serem atraídos ou INDUZIDOS com mais intensidade.

**COMENTÁRIO:** Nem todos os alunos selecionam o mesmo instrumento como seu melhor indutor.

**Figura 12** - Pequenos pedaços de papel seda na cor preta atraídos pelo indutor-canudo.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Nesta etapa da oficina muitos alunos ficam eufóricos devido aos fenômenos observados, ao mesmo tempo que outros não conseguem fazer os papeis serem atraídos. Auxilia-se o aluno, mostrando que a região atritada do indutor é a que deve ser aproximada dos papeis. Muitas vezes eles atritam uma parte do indutor mas aproximam a outra parte que não foi atritada, sem perceberem. Pode-se também usar outras opções de atritadores para testes, como um casaco, a camiseta e outros vestuários ou tecidos.

Após esta prática ter sido efetivamente completada, foi permitido aos alunos que terminassem suas anotações, esquemas ou desenhos das práticas. Este procedimento é muito importante para que o aluno perceba e pense sobre os detalhes que está anotando.

Lembrando que em nossa metodologia toda a escrita, esquemas e desenhos devem ser feitos no diário de bordo.

Após as atividades foram feitos alguns questionamentos aos alunos sobre os fenômenos observados.

*- Por que o indutor atraiu os pedaços de papeis e o canudo não atritado não os atraiu?*

COMENTÁRIO: Observamos de forma geral que as primeiras respostas forneceram conhecimentos prévios dos alunos, o senso comum ou as hipóteses que eles tinham sobre o fenômeno. Em seguida pedimos a um aluno que lesse a sua resposta para que o diálogo fosse estabelecido entre os alunos e o professor. Após o diálogo, foram feitas conclusões com a colaboração de todos, as quais foram anotadas no diário de bordo.

Conforme observamos na 1ª prática o canudo não atritado não atraiu os pequenos pedaços de papel, porém o mesmo canudo atritado adquiriu uma propriedade denominada de carga elétrica. A carga elétrica altera o espaço a sua volta produzindo um campo denominado de campo elétrico. Este campo interage com o papel, induzindo-o a uma ‘separação de cargas’, atraindo cargas de sinais opostos e repelindo cargas de mesmo sinal. As cargas de mesmo sinal estão mais afastadas, as forças de repulsão são menores. As cargas de sinais opostos estão mais próximas, as forças de atração são maiores. Desta interação, surge uma força resultante de atração.

Mesmo uma explicação completa, como a dada acima, nem sempre faz com que os alunos compreendam o fenômeno em um primeiro momento. Algumas respostas dos alunos descrevem a atração como sendo um resultado do aumento de temperatura, devido ao atrito. Porém, um aquecimento pode não provocar atração entre corpos. Dessa forma, foi necessário abordar o modelo atômico da matéria. Baseado nele, a matéria é composta de átomos que se mantêm em uma rede, conectados por forças elétricas e nucleares. O átomo, por sua vez, é composto de um núcleo positivo, devido às cargas dos prótons, e por nêutrons, que são partículas sem carga. Ao redor do núcleo há uma região negativa, chamada de eletrosfera, populada por elétrons com cargas elétricas negativas, na mesma quantidade de prótons que se encontram no núcleo. Quando há atrito entre duas superfícies de materiais diferentes, ou seja, entre átomos diferentes, há uma troca de elétrons entre os materiais, e por uma questão de afinidade ou eletroafinidade, um dos materiais perde elétrons e torna-se localmente positivo, enquanto que o outro material que ganha elétrons torna-se localmente negativo. Atualmente sabemos que as trocas eletrônicas são melhores entendidas pelo modelo quântico e não pelo modelo elétrico, mas nesta Oficina não foi necessário abordar a matéria de forma profunda e detalhada como é feito na mecânica quântica.

Lembrando que o termo indutor foi usado para a régua, o canudo ou a caneta. Depois que foram atritados passaram a atrair pequenos pedaços de materiais, mostrando que o mesmo estava carregado. Isso significa que o material estava com um excesso de cargas positivas ou negativas. Em nossa prática, apesar de não mostrarmos como chegamos a este resultado, a carga do indutor é negativa. Ou seja, quando atritamos a régua ao cabelo, o cabelo perde elétrons para

a régua, de modo que a régua é dita mais eletronegativa que o cabelo. Neste momento a disciplina de Química pode ajudar muito, pois nesta o conceito de eletronegatividade é utilizado usualmente. Também é um momento oportuno para falar sobre a série triboelétrica, que indica qual material fica negativo ou positivo após o atrito entre dois materiais.

Finalmente, quando aproximamos o indutor com carga líquida negativa do papel foi observado que este era atraído pela sua porção positiva e repelido pela sua porção negativa, e como foi observado na prática, a atração domina a repulsão, mostrando que a força de atração é maior que a de repulsão.

*- Será que todos os materiais podem ser atraídos pelo indutor? Como podemos verificar isso?*

COMENTÁRIO: Como o indutor está carregado eletricamente este possui um campo elétrico. Dessa forma, este poderá exercer uma força que induzirá uma ‘separação de cargas’ no material, surgindo assim, uma força resultante de atração. Isso foi verificado pelos alunos ao aproximarem outros materiais do indutor.

2ª PRÁTICA: Pede-se aos alunos que aproximem o seu melhor indutor de outros materiais.

PROCEDIMENTO: Procuram-se por diferentes materiais dispostos no local onde está sendo realizada a oficina ou fora dela. À medida que os materiais são encontrados, os mesmos devem ser cortados em pequenos pedaços ou pulverizados. Após aproximar o indutor dos mesmos observa-se o que acontece. Faz-se um esquema da prática e anota-se o que foi observado.

COMENTÁRIO: O professor pode ajudar sugerindo materiais ou objetos encontrados na natureza ou manufaturados. Pode-se acrescentar o metal representado pelo papel alumínio, a madeira representada pelos restos do apontamento de um lápis, ou mesmo o grafite, formiga pequena, mosquito, etc., veja figura 13.

Após essas duas práticas a primeira semana da oficina foi encerrada. Os alunos levaram seus diários de bordo e os instrumentos construídos para casa. É importante ter cuidado no transporte destes instrumentos e materiais para não os danificar. Para evitar que os equipamentos se perdessem ou amassassem foi sugerido aos alunos que portassem, para o próximo encontro, uma caixa de sapatos, para acondicionar os mesmos e aqueles que ainda seriam confeccionados nos próximos encontros. É possível encontrar no comércio pequenas caixas de ferramenta para tal finalidade a um preço bastante acessível. É interessante preservar

os experimentos para permitir que os alunos possam refazer as práticas em casa junto a seus familiares e amigos. O aluno acaba se tornando um divulgador da ciência.

**Figura 13** – À esquerda mostramos um indutor atraindo uma pequena abelha e à direita o mesmo atraindo um filete de água.



Fonte: Elaborada pelo autor.

## 6.2. Segundo Encontro: Construção das Bases de Gesso

Iniciamos a segunda semana da oficina com as seguintes perguntas:

- *Pôde-se observar que os materiais que são atraídos apresentam pouca massa! Por quê?*

COMENTÁRIO: alguns alunos demoram para responder ou não fazem a associação da força gravitacional com a força de atração que está sendo estudada. Neste caso quanto menor a massa mais evidente torna-se a força de atração. Lembrando que a força de atração sempre vai existir quando se aproxima um indutor de qualquer material. Porém, isso pode não ser evidenciado quando a massa do induzido for relativamente maior.

- *O que o indutor atraiu com sua carga líquida negativa nos pequenos pedaços de materiais?*

COMENTÁRIO: Somente com o que foi tratado até aqui os alunos induzirão cargas positivas.

- *Como pode um indutor estando "longe" dos induzidos atraí-los? Ou de outro modo, de que maneira as cargas negativas atuam nos pequenos pedaços de materiais?*



COMENTÁRIO: Às vezes, ensinar usando o experimento pode exigir mais do que uma aula expositiva, pois vamos sendo levados a dialogar, a cada passagem feita, durante a prática. Para responder a esta pergunta podemos começar perguntando também sobre como uma bola, que foi arremessada para cima, volta à superfície da Terra. Para uma resposta imediata dizemos que a bola volta, pois atua sobre ela uma força gravitacional de atração, nomeada de força peso, mesmo que a bola não esteja, durante algum tempo, em contato com a superfície da Terra.

Este fenômeno é conhecido como ação à distância, ou seja, existem forças que atuam em outros corpos à distância. Dizemos que há uma perturbação no espaço em torno da bola, o mesmo acontecendo no espaço em torno dos induzidos. Podemos concluir que a Terra, assim como o indutor, cria uma perturbação no espaço que pode ser sentida pela bola e pelos induzidos, respectivamente. Esta perturbação é conhecida como campo. No caso da Terra, o campo é conhecido como campo gravitacional e no caso do indutor o campo é conhecido como campo elétrico.

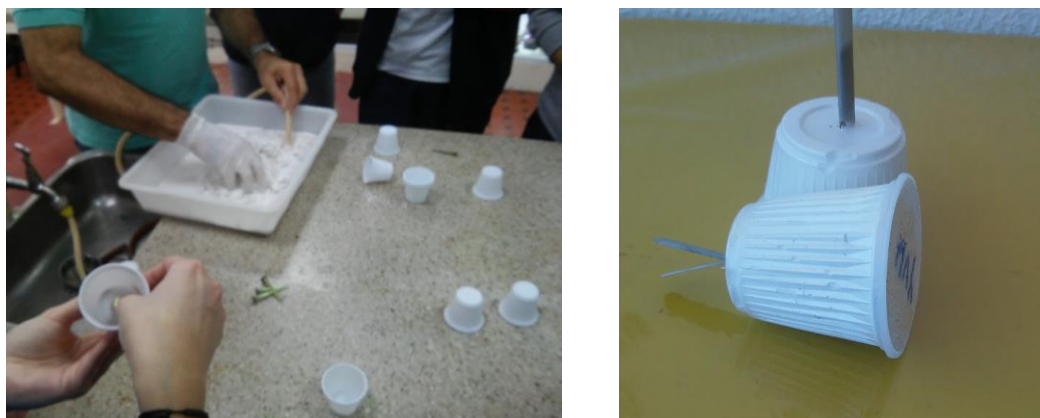
Assim como no caso da massa existe um campo associado à carga elétrica. O campo elétrico não é criado pela carga, dizer que carga existe é dizer que campo existe, não há campo sem carga e nem carga sem campo, poderíamos chamar os dois de sistema carga-campo ou no caso da Terra, massa-campo.

Resumindo, a matéria não atritada não apresenta carga elétrica líquida e conseqüentemente não apresenta campo elétrico. Vimos isso quando aproximamos um canudo não atritado dos papéis de seda. Mas quando atritamos a matéria, ela se torna eletricamente carregada com carga elétrica e campo elétrico.

3ª PRÁTICA: montagem de 2 bases em gesso por aluno, que servirão para outras práticas.

PROCEDIMENTO: Distribui-se dois copinhos plásticos, destes usados para servir café, e dois grampos colchetes ou bailarinas, número 8, por aluno. Cada aluno deve fazer um corte no fundo do copinho, no centro, usando preferencialmente a ponta de um estilete. A largura do corte é a mesma da haste do grampo bailarina. Em seguida, insere-se o grampo bailarina de modo que as duas hastes fiquem para fora do copinho e a parte superior do grampo para dentro, mas sem encostar no fundo do copinho. Prepara-se a mistura de gesso com água em uma bacia. Com os grampos encaixados, coloca-se a massa de gesso no copinho, garantindo-se que a massa envolva a parte de cima do grampo, pois quando a massa secar terá fixado o grampo de forma segura e firme. Coloca-se o nome nos copinhos. Veja figura 14.

**Figura 14** – À esquerda é mostrado a preparação das bases de gesso misturando o gesso com água em uma bacia e à direita mostra a base pronta já com os grampos.

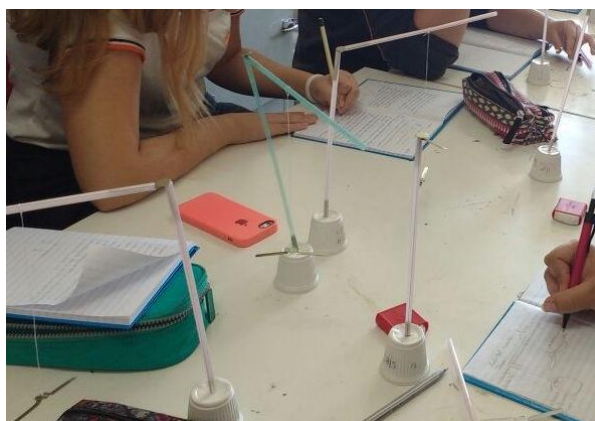


Fonte: Elaborada pelo autor

Deve-se preencher completamente o copinho com a massa de gesso, deixando-a rente, espalhada e plana. Caso ela não fique plana após a secagem, pode-se lixá-la. Fazendo-se desta maneira, pode-se usar o copinho como base para sustentar diversas práticas, como mostrado na figura 15.

Dica para uma secagem eficaz: coloca-se a parte superior do copinho com gesso sobre uma pia de um dia para o outro. Desta forma a superfície ficará naturalmente lisa e plana. Outra dica: espetar as bases em uma folha de isopor de um dia para o outro.

**Figura 15** - Bases de gesso em uso e anotações em diário.



Fonte: Elaborada pelo autor

### 6.3. Terceiro Encontro: O Pêndulo Elétrico

**4ª PRÁTICA:** Montagem do pêndulo elétrico. Entrega-se 2 canudos, 1 grampo bailarina, 1 pedaço de linha de seda de 25 cm e um pequeno pedaço de papel.

**PROCEDIMENTO:** Coloca-se sobre a mesa uma base em gesso e encaixa-se um canudo na vertical. Na extremidade deste canudo encaixa-se uma das hastes de um grampo. Na extremidade da outra haste encaixa-se um canudo que fique na horizontal, formando-se um ângulo reto entre os canudos e entre as hastes. Na haste horizontal faz-se um furo na extremidade do canudo e faz-se passar o pedaço de fio de seda. Na extremidade do fio de seda amarra-se o pedacinho de papel cortado em forma circular, veja figura 16.

**Figura 16** – Pêndulo elétrico composto pela base de gesso, canudos, fio de seda e pedaço de papel em forma circular.

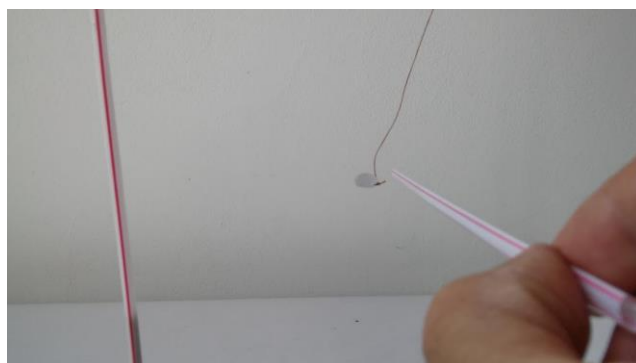


Fonte: Elaborada pelo autor

**5ª PRÁTICA:** Usando-se o pêndulo elétrico.

**PROCEDIMENTO:** Aproxime o melhor indutor do papel circular do pêndulo e observe o que acontece. Repete-se a operação e desta vez permita que o indutor encoste no papel circular. Atrita-se um pouco mais o indutor e tente encostar novamente. Observa-se o que acontece. Faz-se um esquema da prática e anota-se o que foi observado. Veja figura 17.

- Como explicar a atração provocada pelo indutor sobre o papel circular e em seguida uma repulsão?

**Figura 17** – Indutor repelindo papel circular do pêndulo elétrico.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

**COMENTÁRIO:** Parte desta pergunta é a mesma já feita no começo de nossas práticas. Observa-se o quanto é difícil para alguns alunos escreverem sobre o mesmo fenômeno. Não se fala nada neste momento, só se observa. Deixa-se um bom tempo para que eles pensem e tentem escrever. Permita a eles que respondam usando também desenhos e que discutam entre si. Na Oficina é sempre interessante permitir a interação social para os alunos poderem trocar ideias e experiências.

O fenômeno observado ocorre porque ao aproximar o indutor o campo elétrico induz no grampo uma separação de cargas, onde as cargas positivas são atraídas para mais perto do indutor e as cargas negativas são repelidas para o mais distante possível do indutor, que neste caso é a outra extremidade do papel. A resposta à segunda pergunta diz respeito a um carregamento por contato, onde parte dos elétrons passam para o papel, tornando-o negativo. Desta forma tanto o indutor como o induzido têm o mesmo sinal de carga e desta forma se repelem. Após as anotações pede-se a um dos alunos uma leitura de sua resposta.

Observamos que com este experimento muitos alunos têm contato, pela primeira vez, com a força de repulsão elétrica, a qual se dá entre cargas de mesmo sinal.

Após a leitura abre-se o diálogo entre os alunos e em seguida com o professor. Ao final do processo dialógico temos um texto-resposta coletivo, que se anota no diário de bordo.

**6ª PRÁTICA:** Aproveita-se o suporte do pêndulo elétrico para montar o perpendicular de Fracastoro, entregando-se mais um grampo e um pedaço de fio de algodão de 25 cm.

**PROCEDIMENTO:** Usando-se prego e martelo, fura-se o centro da parte circular do grampo sobre uma madeira. Em seguida passa-se o fio de algodão pelo furo dando um nó em sua extremidade, como mostrado na figura 18.

**Figura 18** – À esquerda mostramos como fazer o furo no centro do grampo com martelo e prego e à direita o perpendicular de Fracastoro pronto para ser usado.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Para manter o grampo em equilíbrio na horizontal basta ajustar as hastes. Faz-se um esquema e anotações desta montagem.

7ª PRÁTICA: Aproxima-se o indutor de várias maneiras do perpendicular sem que haja contato entre eles. Observa-se o que acontece. Faz-se um esquema da prática e anota-se o que foi observado.

COMENTÁRIO: Esta prática foi realizada com o intuito de mostrar o primeiro instrumento de detecção elétrica inventado pelo ser humano. Ele é extremamente sensível e detecta a presença de cargas elétricas. Foi montado por Girolamo Fracastoro por volta de 1546.

8ª PRÁTICA: Aproxima-se o indutor de maneira que ele fique alinhado com a haste, mas sem encostar na mesma. Observe e anote no diário sua observação.

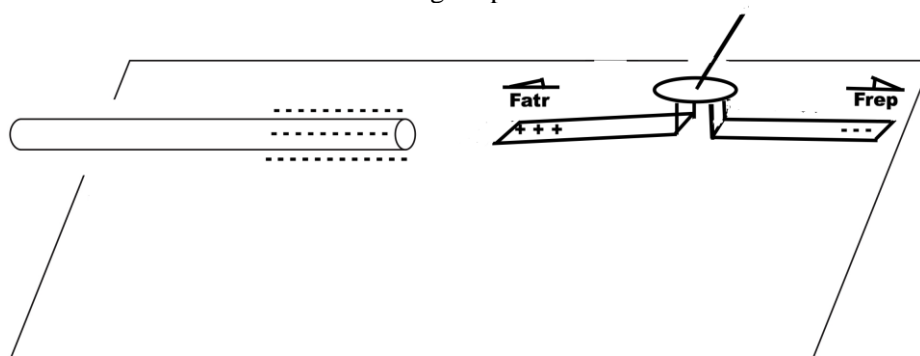
- *Ocorreu movimentação de cargas elétricas negativas nas hastes do grampo metálico?*

COMENTÁRIO: Após a anotação da pergunta e dado o tempo para a anotação da resposta, pede-se a um aluno que faça a leitura de sua resposta. Em seguida abre-se o diálogo e após uma conclusão anota-se no diário de bordo o texto-resposta. Nem sempre as conclusões são tiradas somente pelos alunos, pois neste processo o professor tem um papel importante de mediador/representante do conhecimento científico. É importante que sempre haja uma intervenção por parte do mediador para que as discussões sejam complementadas com outras perguntas ou respostas mais elaboradas. Neste caso é importante realçar que neste modelo não

há movimentação de cargas positivas, mas somente de cargas negativas representadas pelos elétrons. A movimentação ordenada de cargas em um sentido determinado recebe o nome de corrente elétrica.

É interessante que se faça um esquema no quadro ou lousa do indutor e o grampo, realçando a separação de cargas no indutor e as forças de atração e repulsão elétricas sobre o grampo, como exemplificado na figura 19.

**Figura 19** - Esquema do indutor carregado negativamente após ser atritado e a separação de cargas no grampo, por indução. Veja também os sentidos das forças de atração  $F_{atr}$  e repulsão  $F_{rep}$  sobre o grampo.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Foi pedido para os alunos reproduzirem o esquema da figura acima considerando a linha de ação de forças entre as cargas para a discussão da terceira lei de Newton, ação e reação. É muito interessante que se faça esta figura, pois é possível criar uma ponte entre as forças vistas na mecânica e as forças na eletricidade, que denominamos de forças elétricas.

#### 6.4. Quarto Encontro: A Força Elétrica e sua Detecção

A quarta semana de aplicação da proposta foi iniciada com as seguintes perguntas:

- Por que o grampo se moveu para a esquerda, mesmo sabendo que age sobre o grampo duas forças, uma de atração e outra de repulsão?

COMENTÁRIO: Pede-se que repitam a prática várias vezes observando atentamente. Este comentário também é importante para dizer que durante toda a oficina, alguns alunos refazem os experimentos várias vezes e no olhar de cada um deles percebe-se uma satisfação, um entusiasmo que poucas vezes se nota em uma aula tradicional.

- *Qual a relação entre as intensidades das forças de atração e repulsão provocadas pelo indutor no grampo?*
- *Qual destas duas forças é maior em módulo?*

COMENTÁRIO: Durante a condução do trabalho fazemos alguns questionamentos dirigidos. Os alunos conseguem mostrar o raciocínio descrevendo o que a questão precisa para ser resolvida. Assim que as questões forem plenamente respondidas, ou seja, que a força elétrica de atração é maior que a de repulsão, e que depende da distância entre as cargas do indutor e as do grampo, aproveitamos para abordar a lei de Coulomb, descrita anteriormente.

Utilizando questões do material apostilado ou do livro didático, pode-se fazer uma aplicação quantitativa da lei de Coulomb. Não faremos aqui estes cálculos, mas a partir de nossas práticas foi possível mostrar qualitativamente que nossos resultados são amparados por uma lei que envolve as quantidades de cargas em cada um dos corpos e a distância entre eles. Em nosso caso quando o processo de indução é feito ele permite separar cargas de mesma quantidade, ou seja, a carga sobre o indutor atrai e repele a mesma quantidade de carga no induzido. Desta forma o que se difere nas forças de atração e repulsão é a distância entre as cargas. As cargas opostas, que estão mais próximas, geram uma força de atração mais intensa; as cargas de mesmo sinal, que estão mais afastadas, geram uma força de repulsão menos intensa. A força resultante será de atração entre o indutor e o induzido. Após o diálogo e intervenções, conclui-se os textos-respostas de cada uma das perguntas anteriores no diário de classe. Os alunos ficam livres para comparar suas respostas e no caso de dúvidas, o diálogo é retomado.

9ª PRÁTICA: Montando o versório de Gilbert. Entrega-se aos alunos um grampo bailarina, uma rolha, um prego e um alfinete de cabeça.

PROCEDIMENTO: Após abrir as hastes do grampo usa-se o martelo e o prego para que uma pequena depressão no centro da parte metálica circular do grampo seja feita. Esta deve ser feita sem furar o grampo, como mostrado na figura 20.

Nesta prática temos duas opções de montagem: uma delas é utilizando um prego preso em uma rolha para equilibrar o grampo e a outra utilizando um alfinete. Para as duas opções é necessário utilizar um alicate de corte para cortar a cabeça do alfinete ou do prego. Penetra-se, com a ajuda de um instrumento metálico, a ponta cortada do alfinete ou do prego no centro da área menor da rolha em formato de tronco de cone, de modo que a parte pontuda fique para fora da rolha. Em seguida é só apoiar o grampo pela depressão em seu centro na ponta do alfinete

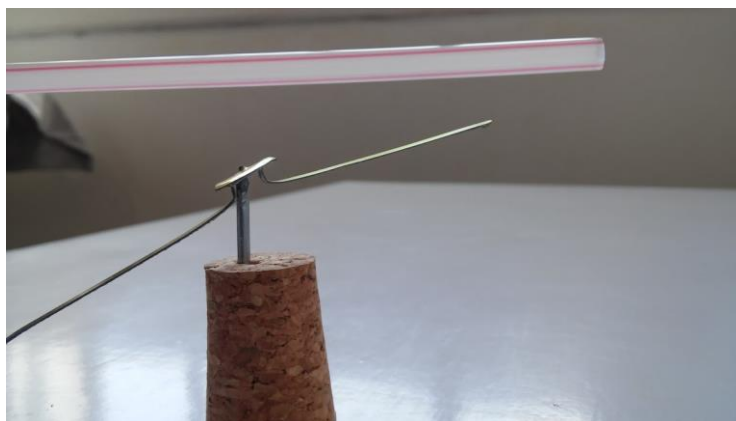
ou do prego. A maior área da rolha será a base do sistema que a mesma tenha melhor sustentabilidade sobre uma superfície. Veja a figura 21.

**Figura 20** – Depressão feita com prego e martelo no centro da parte circular do grampo sem furá-lo.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

**Figura 21** – Versório de Gilbert composto por uma rolha, em formato de tronco de cone, perfurada por um prego. Na ponta do prego é colocado um grampo equilibrado por uma pequena depressão no centro de sua parte circular.



Fonte: Elaborada pelo autor

COMENTÁRIO: O versório foi criado por Williams Gilbert. Ele detecta cargas elétricas com muita sensibilidade, como o pêndulo de Fracastoro. O centro de massa do versório deve situar-se abaixo do ponto de apoio e às vezes é necessário ajustar as hastes para se conseguir o equilíbrio horizontal.



### 6.5. Quinto Encontro: Campo Elétrico e sua Detecção

Com a construção dos experimentos descritos anteriormente torna-se importante que os alunos utilizem uma caixa para transportar os mesmos. Estes já formam um kit de eletrostática contendo 3 indutores (canudo, caneta e régua acrílica), 2 bases de gesso, 1 pêndulo elétrico, 1 versório de Gilbert, além do diário de bordo. Apesar da variedade de experimentos é pedido para os alunos que utilizem somente os instrumentos do kit para as próximas práticas. Quando nas práticas houver a utilização de água, toalhas de papel ou alguns panos deverão estar em local de fácil acesso, para secagem e limpeza. Nesta oficina foi permitido aos alunos o uso de celulares para tirar fotos e vídeos dos experimentos.

Neste encontro aprofundamos as discussões sobre o conceito de carga elétrica e a reorganização destas após carregar um objeto por atrito, mostrando o indutor como sendo o instrumento que induz uma separação de cargas no induzido. Para isso foi preciso trabalhar um pouco mais o conceito de campo elétrico associado à carga elétrica como um sistema inseparável carga-campo.

Com as práticas anteriores foi possível mostrar que se pode detectar a carga líquida de um objeto pelo seu campo elétrico utilizando instrumentos de fácil fabricação, mas extremamente sensíveis a presença de carga-campo, como o perpendicular de Fracastoro ou o pêndulo elétrico. Observou-se que a força elétrica tem duas ações sobre os induzidos, uma de atração e uma de repulsão. Nas detecções das forças pôde-se evidenciar o campo e ao mesmo tempo notar as linhas de ação dessas forças. Para a próxima prática tentamos trazer a ideia de linhas de força.

10ª PRÁTICA: Usando o versório de Gilbert para detectar a carga-campo.

PROCEDIMENTO: Aproximar o indutor de várias maneiras ou posições do versório de Gilbert. Anotar suas observações e desenhar alguns esquemas das posições obtidas durante a prática.

COMENTÁRIO: Dá-se um tempo aos alunos para essas observações. Faz-se perceber que o versório funciona como uma bússola que é usada para detectar a direção norte-sul ou a linha de força de indução magnética.

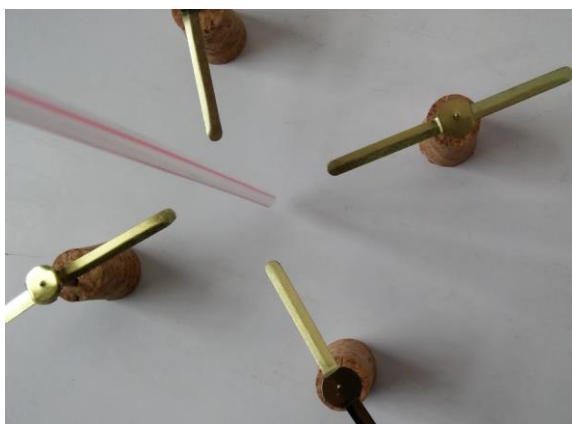
11ª PRÁTICA: Mapeamento do campo elétrico em torno da carga, simulação de uma carga pontual usando-se os versórios de Gilbert e um indutor-canudo.

**PROCEDIMENTO:** Em um grupo de 4 ou 6 alunos agrupa-se seus versórios no formato de uma circunferência, o mais próximo possível, evitando-se que as hastes se toquem e deixando um espaço vazio no centro da circunferência. Atrita-se o canudo-indutor do meio até a ponta posicionando-o ortogonalmente à mesa no centro da circunferência de versórios, como mostrado na figura A.22. O canudo não pode ser encostado na mesa para evitar perdas de cargas por aterramento. Observa-se o que acontece. Faz-se um esquema da prática e anota-se o que foi observado.

**12ª PRÁTICA:** Mapeamento do campo elétrico em torno da carga, simulação de uma carga extensa usando-se os versórios de Gilbert e um indutor-canudo.

**PROCEDIMENTO:** Mantendo o grupo de 4 ou 6 alunos, agrupa-se os versórios em duas filas paralelas com o mesmo número de versórios e um espaço entre elas. Atrita-se o canudo em toda a sua extensão, posicionando-o na horizontal, paralelo à mesa entre as duas filas de versórios, mas sem tocar o canudo na mesa e nos versórios, como mostrado na figura 23. Observa-se o que acontece. Faz-se um esquema da prática e anota-se o que foi observado.

**Figura 22** - Verificação do campo elétrico com o indutor posicionado na vertical. Veja que os versórios ficam alinhados na direção radial, como se a carga estivesse concentrada em único ponto.



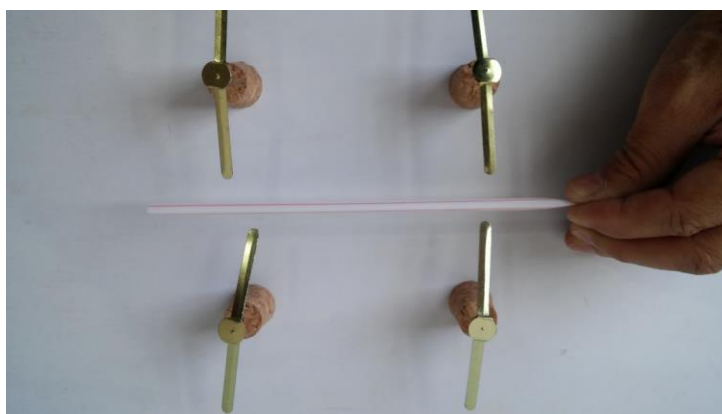
Fonte: Elaborada pelo autor

Desenha-se na lousa os esquemas das práticas. Pede-se aos alunos que façam estes esquemas no diário, evidenciando-se as linhas pontilhadas fazendo ângulo reto com a superfície do condutor, como mostrado na figura 24.

**COMENTÁRIO:** Através destas duas práticas fica evidenciado que a carga gera alteração no espaço em sua volta. Essa alteração é representada pelo campo elétrico. Foi possível mapear o

campo elétrico a partir de indutores carregados negativamente, mostrando que as linhas de força são perpendiculares à superfície do indutor.

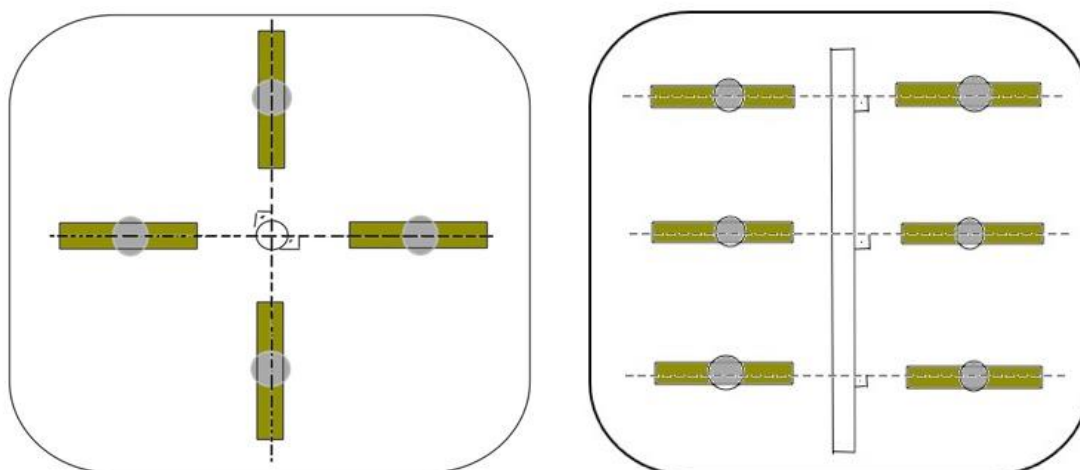
**Figura 23** - Verificação do campo elétrico com o indutor posicionado na horizontal. Observe que os versórios ficam alinhados perpendicularmente ao indutor, como se cada ponto do indutor fosse a fonte de campo elétrico.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na 11ª prática a carga espalhada na metade do canudo para baixo é percebida pelos versórios como se toda a carga fosse um foco de cargas pontual. Na 12ª prática a carga espalhada em uma extensão linear é percebida pelos versórios como se cada porção do canudo fosse um foco de cargas pontual.

**Figura 24** – À esquerda ilustramos o esquema da 11ª prática, em que é verificado que os versórios ficam alinhados radialmente à uma carga-campo resultante, dada pelo canudo na vertical. À direita apresentamos o esquema da 12ª prática, em que é verificado que os versórios ficam alinhados ortogonalmente à uma carga-campo espalhada na superfície do canudo posicionado horizontalmente. Em ambos os casos as linhas pontilhadas nos auxiliam a perceber que as linhas de ação das forças representam as direções do campo elétrico.



Fonte: Elaborada pelo autor.

### 6.6. Sexto Encontro: Campo e Potencial Elétricos

Construímos também um versório de plástico, o qual denominamos de versório de Assis. Este versório foi feito para mostrar que um detector de campo não precisa ser necessariamente de metal, como a bússola, que tem um metal magnetizado. Ficou evidente que no versório de metal as cargas negativas foram repelidas para a extremidade do versório gerando uma corrente elétrica.

- Se o versório for feito de plástico, teremos ainda esta corrente elétrica, ou seja, uma movimentação de elétrons?

#### 13ª PRÁTICA: Construção do versório de Assis.

PROCEDIMENTO: Entrega-se aos alunos um pedaço de fita plástica, grampo bailarina, uma rolha, um alfinete e um prego. Usando-se a mesma rolha do versório de Gilbert, tira-se a agulha ou o prego e coloca-se um prego com a cabeça para cima, deixando uma parte para fora da rolha.

As fitas plásticas de 80 mm de comprimento por 5 mm de largura foram confeccionadas a partir de tampas plásticas provenientes de caixas de sorvete de 1 ou 2 litros. Para que a fita fique com um aspecto do grampo metálico é necessário unir suas pontas, dobrando levemente a fita ao meio na posição de seu centro de massa de modo a deixar uma marca esbranquiçada no plástico. Veja figura 25.

**Figura 25** - Fita plástica dobrada na posição do seu centro de massa para a construção do versório de Assis.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Esticando-se a fita, faz-se duas leves dobraduras com uma distância de 5 mm de cada lado da linha central e em seguida mais duas, uma de cada lado com a mesma distância de 5 mm. Dobra-se a fita nas 4 linhas demarcadas. A forma final da fita deve ser semelhante à mostrada na figura 26.

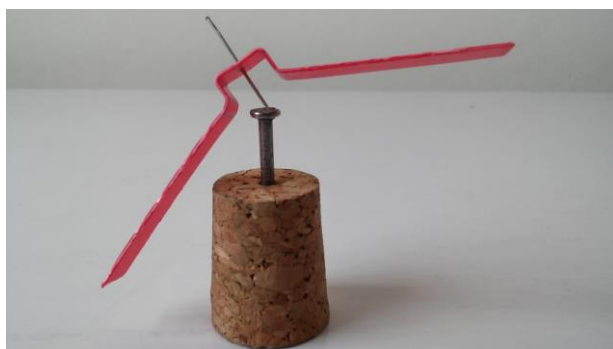
**Figura 26** - Fita plástica dobrada no formato de um grampo aberto.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Ao atravessar o centro da fita com um alfinete, coloca-se a ponta da agulha sobre a cabeça do prego ligado à rolha, como mostrado na figura 27. Se o equilíbrio foi atingido o versório de Assis estará pronto para ser utilizado.

**Figura 27** – Versório de Assis. É desejável que o equilíbrio horizontal da fita seja feito na horizontal. Aqui apresentamos a fita um pouco inclinada.

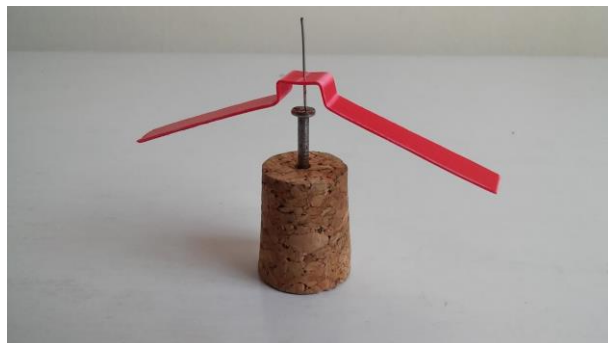


Fonte: Elaborada pelo autor.

Pode acontecer de alguns alunos não conseguirem montar o versório em equilíbrio na horizontal. Alguns ajustes podem ser feitos como diminuir o tamanho da parte do alfinete que atravessou a fita plástica empurrando-o para cima ou dobrar mais as hastes da fita para baixo, diminuindo-se o ângulo entre as mesmas. Isso é feito com o intuito de mover o centro de massa

da peça para um ponto que fique abaixo do ponto de apoio. A configuração desejável para o versório de Assis é a mostrada na figura 28.

**Figura 28** – Versório de Assis em equilíbrio horizontal.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Com o versório pronto, pede-se aos alunos que testem a sensibilidade do versório ao girar as hastes em torno do eixo que toca o prego.

- *Por que o versório apresenta toda esta sensibilidade?*

COMENTÁRIO: É desejável que os alunos percebam que o atrito entre a agulha e o prego durante o giro do sistema é pequeno, devido a pequena área de contato entre eles, o que faz com a agulha gire sem deslizamentos. Além deste, o peso é compensado pela ação da força normal, resultando em força nula na vertical. Por ser este versório e todos os nossos instrumentos muito sensíveis, reforçamos que a sala que utilizada não deve ter correntes de ar.

14ª PRÁTICA: Refazer a 10ª, 11ª e 12ª práticas usando o versório de Assis.

PROCEDIMENTO: O procedimento é o mesmo que os descritos naquelas práticas. Observa-se o que acontece. Faz-se um esquema das práticas e anota-se o que foi observado.

COMENTÁRIO: Vamos abordar o fato do versório ser feito de plástico. Quando aproximamos o indutor de uma de suas hastes o resultado é parecido com o da aproximação do indutor das hastes do versório de Gilbert. Lembrando que no versório de Gilbert, por ser metálico, o modelo de separação de cargas, quando induzido pelo campo elétrico do indutor, se dá pela movimentação de elétrons de uma extremidade a outra do versório.

- *Existe diferença entre o plástico e o metal quando submetidos a carga-campo do indutor?*

COMENTÁRIO: Entendemos que este é um bom momento de introduzirmos o conceito de potencial elétrico. Vimos que da interação do campo do indutor com a haste do versório, surge uma força de repulsão elétrica deslocando os elétrons. Assim, há uma transferência de energia do campo elétrico aos elétrons, com esta sendo convertida em energia cinética. Esse deslocamento se dá através do trabalho da força elétrica, que transfere energia para a haste do versório. Sabendo que a força elétrica é conservativa, o trabalho feito pelo operador contra a força elétrica se transforma em energia armazenada no campo elétrico, conhecida como energia potencial elétrica.

Pode-se dizer também que a diferença de energia potencial faz com que os elétrons adquiram energia cinética.

É interessante fazer analogias com outros sistemas conhecidos, como no caso da queda livre de um corpo de massa  $m$ . Este cai sob a ação do campo gravitacional da Terra de uma altura  $H$  para uma altura  $h$ . Dizemos que há um trabalho  $\tau_{F_g}$  da força gravitacional agindo no corpo, transferindo energia ao mesmo, dado por:

$$\tau_{F_g} = mg\Delta h = mg(H - h) = mgH - mgh = \varepsilon_{p_g}(H) - \varepsilon_{p_g}(h) = -\Delta\varepsilon_{p_g}. \quad (18)$$

Pode-se reescrever a eq. (A.18) como segue,

$$\tau_{F_g} = m(g\Delta h) = mg(H - h) = m(gH - gh) = -m\Delta P, \quad (19)$$

em que  $\Delta P$ , dada pelo produto do campo gravitacional pela altura em que o corpo se encontra, é a diferença de potencial gravitacional. Esta terminologia é pouco usada nos textos de física, mas muito apropriada para introduzir a ideia de potencial. Quando se coloca massa nesta altura o sistema massa-terra adquire energia, denominada de energia potencial gravitacional, com o plano horizontal de referência na superfície da terra.

Podemos usar esse mesmo raciocínio para estudar as interações elétricas, usando os termos de energia potencial elétrica e potencial elétrico. Desta forma, quando um campo elétrico de uma carga negativa atua sobre um elétron, este desloca-se de uma posição em que sua energia potencial elétrica é maior para uma posição de energia potencial elétrica menor. Equivalentemente, em termos do potencial elétrico, o elétron movimenta-se de um potencial maior, devido à proximidade do indutor carregado negativamente, até um potencial menor devido ao afastamento do indutor.

No caso do versório de Assis, em que as hastes são feitas de plástico, ocorre o mesmo processo, com os elétrons se movimentando de uma região de potencial maior para uma de potencial menor. Isso significa que também há corrente elétrica no plástico. Usualmente aprendemos que só existe corrente elétrica nos condutores.

- *Como explicar a corrente elétrica nos materiais isolantes, como o plástico?*

Para responder a essa pergunta realizamos a próxima prática, a qual fornece uma ideia melhor aos alunos sobre a movimentação de elétrons nos materiais denominados de isolantes.

**15ª PRÁTICA:** Construção do eletroscópio usando 1 base de gesso, um corte de cartolina ou papel cartão, tira de papel seda, canudo e cola.

**PROCEDIMENTO:** Corta-se pedaços de papel cartão ou cartolina com dimensões de 8 cm por 8 cm. Fixar esta peça quadrada ao canudo usando cola ou fita adesiva de empacotamento de 45 mm. A fixação pode ser feita no meio do quadrado paralelo a um dos lados. Coloca-se sobre a mesa uma base de gesso e sobre ela encaixa-se a outra extremidade do canudo, mantendo-se o conjunto na vertical. Pega-se 1 tira do papel de bala, tomando o cuidado de não se escolher partes amassadas, e cola-se a mesma na superfície oposta do canudo. Veja a sequência de montagem na figura 29.

**Figura 29** – Montagem do eletroscópio mostrando da esquerda para a direita, a retirada do papel de bala, a colagem do canudo no papel cartão e a fita colada.



Fonte: Elaborada pelo autor.

**16ª PRÁTICA:** Carregando o eletroscópio.

**PROCEDIMENTO:** Carregar o indutor por atrito e passar o mesmo na parte superior do eletroscópio, carregando o eletroscópio por contato. O procedimento deve ser feito como se



estivéssemos tirando o excesso de manteiga de uma faca (indutor). Observa-se o que acontece. Faz-se um esquema da prática e anota-se o que foi observado. Veja a figura 30.

**Figura 30** – À direita mostramos a vista lateral do eletroscópio e à esquerda o eletroscópio carregado utilizando o indutor.



Fonte: Elaborada pelo autor.

- *Como pode-se explicar o afastamento da fita de papel seda da cartolina?*

COMENTÁRIO: Os alunos logo notarão que o fenômeno ocorre devido a repulsão de cargas de mesmo sinal que se espalhou sobre as superfícies do eletroscópio, gerando-se forças de repulsão elétrica. Após a escrita da resposta no diário pede-se a um aluno que leia sua resposta estendendo a discussão para o diálogo coletivo. Com o texto-resposta concluído escreve-se no diário.

- *Isso quer dizer que esse espalhamento de cargas se dá porque a cartolina e o papel seda são condutores?*

COMENTÁRIO: Caso não se tenha ainda uma resposta, passa-se para a próxima prática.

17ª PRÁTICA: Descarregando o eletroscópio.

PROCEDIMENTO: Encostar o dedo na parte de cima do eletroscópio carregado. Observa-se o que acontece. Faz-se um esquema da prática e anota-se o que foi observado.

- *O que levou a fita de papel seda voltar a se aproximar da cartolina?*

COMENTÁRIO: Pode-se dizer que tanto o nosso corpo como a cartolina e a fita de papel seda são condutores, pois o excesso de cargas contidas no eletroscópio foi conduzido para fora.

*- Para onde foi o excesso de cargas do eletroscópio?*

COMENTÁRIO: Os alunos geralmente respondem a essa pergunta dizendo que o excesso de cargas se espalha pelo corpo humano, pois a área do corpo é muito maior que a área do eletroscópio, ou foi para o sapato e conseqüentemente foi para o chão.

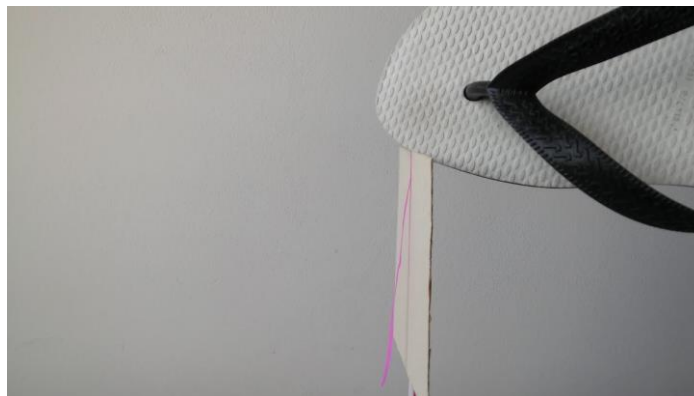
18ª PRÁTICA: Com o eletroscópio carregado tente descarregá-lo usando diferentes materiais.

PROCEDIMENTO: Carregar o eletroscópio quantas vezes forem necessárias para, em seguida, descarregá-lo utilizando diferentes materiais, sempre segurando o material pela ponta dos dedos. Use os materiais que já se encontram na Oficina como o plástico do versório, uma rolha, o prego solto, outro pedaço de cartolina, um pedaço maior de papel seda, a base de gesso, o pedaço de lã, pedaço de papel toalha, um chinelo, um tênis, pedaço de mangueira de chuveiro, entre outros. É interessante utilizar também um recipiente de vidro contendo água de torneira em seu interior. Encoste a ponta inferior do eletroscópio carregado na superfície da água. Observa-se o que acontece. Faz-se um esquema da prática e anota-se o que foi observado.

COMENTÁRIO: Com estas práticas os alunos percebem que a maioria dos materiais descarregam o eletroscópio, ou seja, eles conduzem o excesso de cargas mostrando serem condutores. Alguns materiais, como o próprio canudo, não descarregam o eletroscópio, mostrando que estes são bons isolantes elétricos. Na figura 31 mostramos o eletroscópio sendo descarregado com um chinelo de borracha. Exemplos como estes são importantes para mostrar que mesmo materiais que acreditamos ser bons isolantes elétricos, como a borracha do chinelo, podem apresentar condução elétrica descarregando o eletroscópio.

*- Como podemos explicar este movimento de cargas do eletroscópio para a terra usando o modelo de potenciais elétricos?*

COMENTÁRIO: É interessante deixar os alunos trocarem informações entre si. Dá-se um tempo para a escrita. Ao final da atividade peça que falem sobre suas respostas. Neste momento é importante que o professor atue como mediador das discussões para dar um melhor direcionamento ao assunto.

**Figura 31** – Eletroscópio sendo descarregado com um chinelo.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Nas respostas dos alunos espera-se descrições sobre o movimento de elétrons de um potencial maior, em módulo, para um potencial menor, em módulo. Outras discussões poderão aparecer como o potencial da terra ser menor que o do eletroscópio; o potencial do eletroscópio ser bem maior que o da terra; o potencial da superfície de um carro, por exemplo, após carregar-se por atrito com o ar, é maior que o do eletroscópio, pois a superfície do carro é bem maior, sugerindo que haja uma quantidade de cargas sobre a superfície muito maior que na superfície do eletroscópio. Dessa forma, quando encostamos no carro podemos sentir um "choque", ou seja, uma corrente elétrica passando pelo nosso corpo. Às vezes esta é acompanhada de um pequeno estalo ou som.

Esta conversa pode ser estendida de acordo com as experiências trazidas pelos alunos, mas o importante é que o aluno compreenda que a corrente elétrica surge sempre que houver um confinamento de cargas elétricas, gerando um potencial maior, e que o descarregamento seja feito através de um condutor para um local com um potencial menor.

Com estas últimas práticas é possível deixar claro que qualquer material pode se comportar como um condutor e que apenas alguns materiais se mostraram ser bons isolantes nas condições estabelecidas com o eletroscópio. Dessa forma não podemos dizer que os materiais ditos isolantes no nosso cotidiano são realmente isolantes, pois isto depende das condições impostas, como a diferença de potencial elétrico a que eles forem submetidos.

O próximo passo na nossa oficina é mostrar que é possível acumular cargas elétricas de maneira que o potencial elétrico atinja um valor suficiente para que seja observado o faiscamento ou um arco voltaico no ar durante a descarga elétrica, mesmo sabendo que o ar é um bom isolante para as diferenças de potencial do dia a dia. Ou seja, estabeleceremos condições para que o ar se torne um condutor. Isso é realizado através da construção de um

gerador eletrostático de Kelvin, o qual é capaz de gerar uma diferença de potencial da ordem de milhares de volts.

### 6.7. Sétimo, Oitavo e Novo Encontros: Construção do Gerador Eletrostático de Kelvin

Nossa proposta final foi construir o gerador eletrostático de Kelvin. Como já discutido na seção 5.6, com este gerador foi possível obter uma diferença de potencial de aproximadamente 6000 volts através do acúmulo de cargas elétricas positivas e negativas, transportadas por gotas de água que caem de um reservatório à 50 cm de altura.

O ideal para o bom andamento da oficina é que o professor construa o gerador alguns dias ou semanas antes do trabalho com os alunos para testá-lo e fazer os ajustes necessários para o seu bom funcionamento. Lembrando que o gerador de Kelvin, assim como qualquer outro experimento de eletrostática, funciona bem em clima seco, pois em clima úmido o sistema é aterrado pelas moléculas polares de água presentes na atmosfera e na superfície das partes do equipamento.

Toda a estrutura do gerador é montada com canos, conexões e um forro de PVC branco, que forma a base para as latas metálicas. Estes materiais são isolantes, o que faz com que as latas metálicas não percam a carga armazenada. Há também um circuito no sistema interligando o indutor negativo com a lata armazenadora negativa e o terminal negativo e o indutor positivo com a lata armazenadora positiva e o terminal positivo.

19ª PRÁTICA: Verificar se o cano e o forro, ambos feitos de PVC, são indicados para servir de estrutura isolante para o gerador de Kelvin.

PROCEDIMENTO: Carregar o eletroscópio e em seguida encostar um pedaço de cano e um pedaço do forro, feitos de PVC, na parte superior do eletroscópio carregado. Observa-se o que acontece. Faz-se um esquema da prática e anota-se o que foi observado.

COMENTÁRIO: Os alunos constatarão que tanto o cano quanto o forro de PVC são bons isolantes elétricos, pois eles não descarregam o excesso de cargas armazenadas no eletroscópio. Conclui-se com este resultado que os materiais feitos com PVC são excelentes para serem utilizados na estrutura do gerador de Kelvin. As cargas armazenadas nos reservatórios metálicos só serão descarregadas através da ruptura dielétrica do ar entre os terminais do gerador.

Em alguns modelos de geradores é utilizado um fio terra ligado à água do reservatório superior, evitando assim o acúmulo de cargas no reservatório. No nosso modelo assumimos que a separação de cargas nas gotas da esquerda deixa o reservatório positivo, simultaneamente a

separação de cargas nas gotas da direita deixa o reservatório negativo. Consequentemente, a carga líquida no reservatório durante o funcionamento do gerador se mantém aproximadamente zero.

Após a montagem e testes realizados para ganhar um conhecimento mais profundo sobre o funcionamento do gerador eletrostático de Kelvin nós começamos a construção do mesmo com os alunos. É possível construir o gerador em dois encontros. Para este experimento os alunos desenvolverão habilidades técnicas para realizar soldas, cortes, lixamento, entre outros.

Durante todo o processo de montagem é natural que ocorram dúvidas e perguntas, as quais podem ser solucionadas mediante uma boa interação entre a equipe de trabalho e o professor.

#### 20ª PRÁTICA: Construção do gerador eletrostático de Kelvin.

PROCEDIMENTO: Todos os dados que serão aqui transcritos devem ser anotados no diário de bordo, observando-se o que acontece e fazendo alguns esquemas. Estes dados dizem respeito à construção de 1 gerador de Kelvin por aluno.

Para a estrutura que irá sustentar o gerador serão necessários um cano de  $\frac{1}{2}$  polegada com comprimento total de 248 cm e um cano de  $\frac{3}{4}$  de polegada de 60 cm. Do cano de  $\frac{1}{2}$  polegada é necessário cortar 3 peças de 35 cm, 6 peças de 7,5 cm, 2 peças de 16,5 cm, 2 peças de 25 cm e 6 cotovelos e 4 T's. Do cano de  $\frac{3}{4}$  de polegada é necessário cortar 2 peças de 30 cm.

Usualmente os canos são vendidos em barras de 3 a 6 metros. Para haver economia no momento da compra é importante saber o número de alunos que participarão da oficina para que não haja desperdício de recursos e material.

A região de corte pode ser marcada com caneta hidrográfica e os cortes feitos com um arco de serra ou máquina de corte. Após o corte é necessário retirar as rebarbas das extremidades das peças usando-se uma lixa manualmente ou uma lixadeira elétrica. Com exceção das 2 peças de  $\frac{3}{4}$  de polegada é interessante lixar as superfícies exteriores das extremidades das peças e interiores das conexões, cotovelos e T's, numa extensão de 2 cm a partir das pontas para aumentar o atrito entre as peças durante o encaixe. Como pretendemos construir uma estrutura desmontável, o maior atrito nos encaixes garante uma melhor rigidez para a estrutura. Todo o gerador desmontado pode ser transportado em uma caixa de papelão ou uma pequena sacola. Ao final do lixamento é muito importante limpar todas as peças utilizando um pano úmido para remover o excesso de pó e resíduos, pois estes podem contribuir para descarregar o gerador eletrostático.

Para a montagem da base do gerador são necessárias 2 peças de 35 cm, 4 peças de 7,5 cm, 4 cotovelos e 2 T's, como mostrado na figura 32.

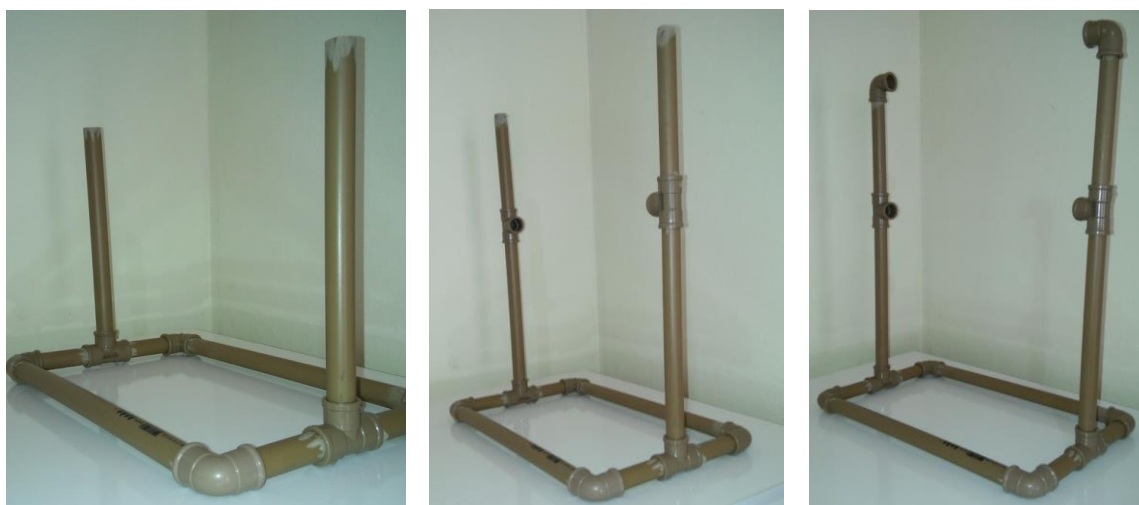
**Figura 32** – À esquerda mostramos as peças utilizadas para a construção da base do gerador eletrostático. Note que as peças já estão cortadas, lixadas e prontas para serem encaixadas. À direita mostramos a base pronta. Note que os T's são fixados com o encaixe central para cima.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Na sequência encaixam-se as duas peças de 25 cm na posição vertical nos dois T's da base. Sobre essas peças são encaixados dois T's de maneira que o centro de cada T fique voltado para dentro da estrutura. Em seguida encaixam-se duas peças de 16,5 cm sobre os T's com dois cotovelos na parte superior das mesmas. Todos os detalhes dessa montagem são apresentados na figura 33.

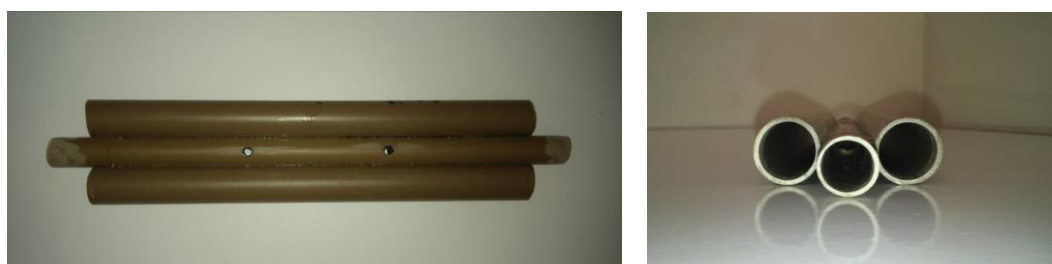
**Figura 33** – Da esquerda para direita mostramos o encaixe das 2 peças de 25 cm nos T's da base do gerador. Em seguida são encaixados dois T's sobre estas peças, os quais ficam virados para o interior da estrutura. No encaixe superior dos T's são encaixadas outras duas peças de 16,5 cm com dois cotovelos encaixados na parte superior das mesmas, como mostra a figura à direita.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Para a base de sustentação do reservatório principal, composto por uma garrafa PET, é utilizada a terceira peça de  $\frac{1}{2}$  polegada de 35 cm e as 2 peças de 30 cm de  $\frac{3}{4}$  de polegada. Colocam-se estas peças juntas em uma superfície plana, de maneira que a peça maior fique centralizada entre as peças menores, ou seja, a peça central terá 2,5 cm de cada lado ultrapassando as peças menores. Marque as áreas laterais de contato das duas peças com a peça central. Prepare essas áreas lixando e limpando as mesmas e em seguida cole-as com cola própria para PVC. É importante que as peças sejam mantidas sobre uma superfície plana durante todo o procedimento porque a peça de  $\frac{1}{2}$  polegada tem um diâmetro menor que as peças de  $\frac{3}{4}$  de polegada. Isso fará com que o reservatório repouse sobre essa estrutura de maneira estável sem qualquer encaixe. Veja os detalhes dessa montagem na figura 34.

**Figura 34** – À esquerda mostramos a base do reservatório principal vista de cima. Note que as peças são coladas lateralmente. A peça de  $\frac{1}{2}$  polegada é colada entre as peças de  $\frac{3}{4}$  de polegada. Os detalhes dos furos realizados na peça central serão fornecidos mais adiante. À direita é apresentado a vista frontal da base. Note a depressão formada na estrutura pela peça lateral. O reservatório de água, composto por uma garrafa PET, poderá repousar nesta estrutura de maneira estável.

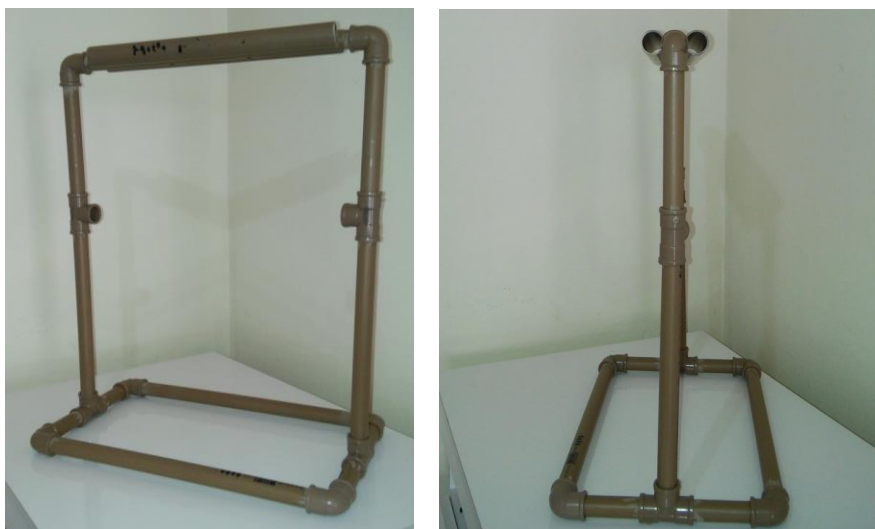


Fonte: Elaborada pelo Autor.

Na figura 35 apresentamos a estrutura do gerador com a base do reservatório encaixada.

O próximo passo é encaixar as 2 peças de 7,5 cm nos T's que se encontram nas barras verticais. Nestas serão fixados os 2 indutores do gerador. Estes são feitos com duas latas de atum, sem tampa e sem fundo para a passagem dos filetes de água, presas nas peças de PVC através de uma abraçadeira de nylon, comumente conhecida como presilha “enforca gato”. Para passar a abraçadeira no cano de PVC é necessário fazer furos no mesmo. No nosso caso estes foram feitos a 1,2 cm da extremidade do cano utilizando um ferro de solda. Veja a disposição dos indutores na figura 36.

**Figura 35** – Estrutura do gerador eletrostático com a base do reservatório encaixada.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

**Figura 36** – À esquerda mostramos um dos indutores do gerador de Kelvin feito com lata de atum, sem tampa e sem fundo, preso ao cano de PVC de 7,5 cm por uma abraçadeira de nylon. À direita apresentamos os dois indutores fixos na estrutura do gerador.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Para apoiar os reservatórios inferiores do gerador utilizamos um pedaço de forro de PVC branco de 40 cm. Pode-se utilizar uma caneta hidrográfica para marcar as regiões que devem ser cortadas em contato com os T's inferiores, e um estilete ou o ferro de solda para realizar os cortes. Se o corte for feito rente às marcações não haverá necessidade de colar as partes, bastando encaixar as mesmas na base. Caso a estrutura fique balançando será necessário colar algumas partes para obter melhor estabilidade.



Como já discutido, a base em forro PVC será utilizada para acomodar os reservatórios inferiores, os quais são feitos com duas latas de leite, veja figura 37.

**Figura 37** – À esquerda mostramos a base da estrutura do gerador revestida com chapas de forro de PVC e à direita são mostrados os reservatórios inferiores, compostos por duas latas de leite, sobre a base revestida.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Para fazer as ligações entre os reservatórios inferiores, latas de leite, com os indutores, latas de atum, utilizamos fios de cor azul e vermelha, 4 conectores jacaré na cor vermelha e 4 na cor preta, ferro de solda, estanho e alicate.

Para realizar as conexões no gerador foram necessários quatro pedaços de fio de aproximadamente 20 cm de comprimento, dois azuis e dois vermelhos. Utilizando o ferro de solda e o estanho nós soldamos os conectores jacaré em cada extremidade desses fios. Dois fios foram utilizados para conectar os reservatórios nos indutores e os outros dois para fazer o faiscador, com duas de suas extremidades conectadas aos reservatórios inferiores e as outras duas fixadas na base a uma distância de 2 mm para observação do arco elétrico, comumente referido como arco voltaico. Note na figura 38 que o indutor da direita é conectado no reservatório da esquerda enquanto que o indutor da esquerda é conectado no reservatório da direita. Essa configuração é necessária para manter a diferença de potencial entre os reservatórios.

Para finalizar a montagem do gerador de Kelvin é necessário instalar o reservatório de água superior, composto por uma garrafa PET de dois ou três litros. Para isso é necessário fazer dois furos na base superior da estrutura, como mostrado anteriormente na figura 34, os quais devem estar alinhados com outros dois furos feitos na garrafa PET e também com o centro dos

indutores. Estes furos delimitarão a trajetória das gotas de água através dos indutores até serem armazenadas nos reservatórios inferiores. Os furos podem ser feitos com o ferro de solda.

**Figura 38** – Estrutura do gerador de Kelvin com os reservatórios inferiores, latas de leite, conectados aos indutores, latas de alumínio, através de conectores jacaré. Note que o fio vermelho conecta o indutor da esquerda ao reservatório da direita e o fio azul conecta o indutor da direita ao reservatório da esquerda para manter a separação de cargas e consequentemente a diferença de potencial nos reservatórios. Observe que há dois fios com duas de suas extremidades conectados nos reservatórios e as outras ficam fixas na base a uma distância de aproximadamente 2 mm para a descarga do sistema.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Para facilitar o direcionamento do escoamento da água através dos indutores é conveniente utilizar dois canudos. Estes devem ser colados com cola quente para evitar vazamentos. Para realizar o abastecimento do reservatório superior fizemos um furo quadrado de dimensões 2 cm por 2 cm na garrafa, veja figura 39.

Na figura 40 apresentamos a montagem final do gerador eletrostático de Kelvin. Note que utilizamos 2 prendedores de roupas nos canudos. Eles são úteis para ajustar o fluxo de água que passará pelos indutores.

- Por que o gerador eletrostático não funciona de maneira adequada em dias úmidos?

**Figura 39** – Reservatório superior, composto por uma garrafa PET, mostrando os canudos presos por cola quente em dois furos feitos na garrafa para direcionar o escoamento de água através dos indutores. À esquerda mostramos um corte de dimensões de 2 cm por 2 cm para realizar o abastecimento do reservatório quando o gerador estiver em funcionamento.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

**Figura 40** – Vista lateral e frontal do Gerador eletrostático de Kelvin pronto para ser colocado em funcionamento.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

COMENTÁRIO: Como já discutido, é importante ter clareza para o professor e para os alunos que qualquer experimento de eletrostática, como o gerador de Kelvin, funciona de maneira mais eficiente em dias mais secos, pois se o ar estiver com grande umidade são formadas películas de água nas superfícies dos equipamentos contribuindo para o aterramento dos mesmos, fazendo com o que o excesso de cargas armazenadas seja perdido. Na região em que nossa proposta foi aplicada o melhor período para aplicação de tais experimentos está entre os meses de maio a outubro, onde a umidade relativa do ar atinge valores abaixo de 50%. Mesmo em um

período de seca, uma chuva ocasional aumenta a umidade do ar podendo comprometer os experimentos. Uma solução que pode minimizar a umidade do ar é, se caso a escola tiver o recurso, ligar o ar condicionado da sala em que os experimentos estão sendo realizados ou utilizar um secador de cabelo.

### 6.8. *Décimo Encontro: Experimentação e Aplicação do Gerador Eletrostático de Kelvin*

Após a montagem do gerador com os alunos partimos para a parte de experimentação e investigação de seu funcionamento.

21ª PRÁTICA: O uso do gerador de Kelvin na produção de faíscas ou arcos voltaicos.

PROCEDIMENTO: Verifica-se a distância entre os terminais azul e preto. Nós fixamos essa distância em aproximadamente 2 mm. Enquanto o reservatório superior é abastecido mantém-se os canudos fechados por meio dos prendedores. O fluxo de água nos canudos é liberado aos poucos mexendo-se nos prendedores de maneira que os filetes de água não sejam contínuos, mas intermitentes, ou seja, seguidos por gotas com intervalos pequenos entre elas para garantir a indução de cada uma delas. Escolhendo-se o indutor da direita, por exemplo, com o gerador na frente do observador, podemos afirmar que quando as gotas começam a cair este indutor ainda não está carregado, pois não é observado nenhum faiscamento nos terminais.

- *Como o indutor circular da direita pode ser carregado?*

COMENTÁRIO: Os alunos responderão com base em suas práticas anteriores, ou seja, carregando-se um indutor por atrito, como um canudo por exemplo, e em seguida carregando-se o indutor do gerador por contato. Neste caso o indutor circular direito será carregado com cargas negativas.

- *Como e com que carga as gotas da direita deixam o canudo?*

COMENTÁRIO: Construa um texto-resposta em conjunto, procurando usar as informações dos próprios alunos. Peça para eles escreverem o texto-resposta no diário para registrar o que está sendo discutido.

- *Qual é a carga do reservatório da direita?*

- *Qual será a carga do indutor da esquerda?*
- *Qual a carga do reservatório da esquerda?*

Após carregar o indutor por contato é possível verificar, depois de algum tempo, um faiscamento intermitente nas extremidades dos conectores vermelho e preto decorrente da descarga elétrica. É importante evitar contatos diretos com partes do gerador, pois isso pode aterrar o equipamento, descarregando o mesmo. Se isso ocorrer pode ser necessário esvaziar os reservatórios inferiores e recomeçar o experimento.

22ª PRÁTICA: Verificando o carregamento das latas usando o eletroscópio.

PROCEDIMENTO: Sobre a base branca de PVC monta-se o eletroscópio, encostando-o em um dos reservatórios inferiores. Observa-se o que acontece. Faz-se um esquema da prática e anota-se o que foi observado.

- *Podemos dizer que o afastamento entre a haste de papel seda e a cartolina é provocada por forças de repulsão entre cargas negativas? Justifique.*

COMENTÁRIO: Nesta pergunta pode-se ter duas possibilidades de respostas. Eles podem afirmar que sim ou que não, dependendo da lata que está sendo usada com o eletroscópio, pois o reservatório escolhido pode ser aquele com excesso de cargas negativas ou positivas, respectivamente.

- *O que provoca a aproximação da haste do eletroscópio junto a cartolina?*

23ª PRÁTICA: Verificar que a centelha é periódica e determinar o período de faiscamento do gerador.

PROCEDIMENTO: Utilizando um cronômetro, relógio ou celular registre o intervalo de tempo entre uma faísca e outra. Observa-se o que acontece. Faz-se um esquema da prática e anota-se o que foi observado.

- *O período encontrado é o mesmo encontrado pelos outros alunos? Faça uma pesquisa comparando os resultados.*
- *O que faz este valor ser aproximadamente o mesmo?*

- *O que faria ser este valor diferente, ou o que deveria ser mudado no equipamento ou experimento?*

COMENTÁRIO: Note que há um sincronismo entre o faiscamento e a aproximação/afastamento da haste do eletroscópio!

### *6.9. Décimo Primeiro Encontro: Estudo Quantitativo utilizando o Gerador Eletrostático de Kelvin*

Boa parte de nossa oficina foi desenvolvida através de estudos qualitativos entre a observação do fenômeno e o modelo eletrostático utilizado com perguntas e respostas conduzidas pelo professor/mediador. Na última semana da oficina trabalhamos os conceitos da eletrostática que envolvem o funcionamento do gerador de maneira quantitativa.

- *O que provoca o faiscamento nos terminais do gerador de Kelvin?*

COMENTÁRIO: O faiscamento é uma corrente eletrônica que se desloca a partir do terminal negativo do gerador, rompendo o isolamento dielétrico do ar, chocando-se com moléculas do ar produzindo luz. Isso ocorre de maneira semelhante ao observado para alguns materiais que foram testados para saber se eles eram condutores ou isolantes. Nas práticas com o descarregamento do eletroscópio, para que o ar se torne condutor é preciso que ele seja submetido a uma diferença de potencial elétrico extremamente alta, da ordem de 3 milhões de volts por metro ou, equivalentemente, em torno de 3 kV/mm.

- *Sabendo que a diferença de potencial necessária para que o ar se torne condutor é da ordem de 3kV/mm, qual o valor da diferença de potencial elétrico nos terminais do nosso gerador de Kelvin?*

COMENTÁRIO: Este resultado pode surpreender os alunos pela intensidade, uma vez que eles utilizam no cotidiano diferenças de potencial da ordem de centenas de volts, 127 ou 220 volts.

- *Qual é o potencial elétrico em cada terminal?*

COMENTÁRIO: Como estamos trabalhando com uma diferença de potencial de aproximadamente 6000 volts nas condições obtidas no experimento, podemos concluir que o potencial elétrico por terminal é da ordem de 3000 volts em modulo, ou -3000 volts e +3000 volts em cada um dos terminais.

*- O que exatamente está a 3.000 volts, só o terminal ou todo o conjunto recíproco de indutor, lata/reservatório e fios?*

COMENTÁRIO: Até o momento verificamos que somente uma concentração grande de cargas elétricas nos leva a um potencial desta magnitude. As cargas elétricas, como sabemos, se espalham pela superfície do condutor, visto que em seu interior o campo elétrico é nulo e o potencial elétrico é constante em sua superfície. O nosso condutor é um conjunto recíproco de indutor, lata/reservatório e fios conectados em série e é sobre este conjunto que se dá o acúmulo de cargas. Sabemos também que uma superfície acumuladora de cargas se transforma em um capacitor quando submetido a uma diferença de potencial elétrico, como em um capacitor de placas paralelas.

*- Como devemos proceder para determinar a quantidade de cargas elétricas distribuídas ao longo da superfície de um destes conjuntos recíprocos?*

COMENTÁRIO: Um dos conjuntos recíprocos apresenta 3 superfícies, a primeira é a do indutor na forma de um cilindro, cuja área é a de um retângulo, já que o cilindro não tem as tampas. A segunda é da lata/reservatório também na forma de um cilindro com uma base, cujas áreas são de um retângulo e um círculo, respectivamente. A terceira superfície corresponde aos fios de ligação, cuja área é muito pequena quando comparada às áreas da primeira e segunda superfícies juntas. As dimensões aproximadas da lata/reservatório (lata de leite) são: altura  $H = 12 \text{ cm} = 0,12 \text{ m}$  e raio da base  $r_r = 5 \text{ cm} = 0,05 \text{ m}$ . As dimensões aproximadas do indutor (lata de atum) são altura  $h = 4 \text{ cm} = 0,04 \text{ m}$  e raio da base  $r_i = 4 \text{ cm} = 0,04 \text{ m}$ .

O cálculo da carga  $Q$  na superfície do conjunto recíproco pode ser feito através de aproximações, desconsiderando efeitos de pontas, perdas de cargas, entre outros, de modo a obtermos uma estimativa desta carga. No presente caso podemos fazer tal estimativa aproximando a área de todo o conjunto pela área de uma esfera de raio  $R_{esf}$ , ou seja,

$$A = 2\pi r_i h + 2\pi r_r H + \pi r_r^2, \quad (20)$$

$$A = 4\pi R_{esf}^2. \quad (21)$$

Igualando as equações acima é possível estimarmos o raio da esfera equivalente. Logo,

$$\begin{aligned} 4\pi R_{esf}^2 &= 2\pi r_i h + 2\pi r_r H + \pi r_r^2 \\ 4R_{esf}^2 &= 2r_i h + 2r_r H + r_r^2 \\ R_{esf}^2 &= \frac{2r_i h + 2r_r H + r_r^2}{4} \\ R_{esf} &= \frac{\sqrt{2r_i h + 2r_r H + r_r^2}}{2}. \end{aligned} \quad (22)$$

Substituindo os valores na equação acima obtém-se  $R \approx 0,067 \text{ m} = 6,7 \text{ cm}$ . Sabendo que o potencial elétrico para as regiões exteriores de uma esfera condutora é dado por:

$$\begin{aligned} V &= k_0 \frac{Q}{R} \rightarrow 3000 = 9 \times 10^9 \times \frac{Q}{0,067} \\ Q &= 22,3 \times 10^{-9} \text{ C} = 22,3 \text{ nC}. \end{aligned}$$

Esta é a magnitude da carga elétrica do conjunto recíproco. Para os dois conjuntos teremos os valores de  $22,3 \text{ nC}$  e  $-22,3 \text{ nC}$ .

- A partir do valor da carga  $Q$  e sabendo que a carga elementar é dada por  $|e| = 1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$ , determine a quantidade de cargas elétricas elementares (elétrons ou prótons) espalhadas pela superfície do gerador de Kelvin.

COMENTÁRIO: Com este resultado vamos estimar a quantidade de cargas elétricas elementares (elétrons ou prótons) espalhadas pela superfície do conjunto recíproco. Dado o valor da carga elementar  $|e| = 1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$  e a equação  $Q = n |e|$ , tem-se que,

$$\begin{aligned} 22,3 \times 10^{-9} &= n 1,6 \times 10^{-19} \\ n &= 1,394 \times 10^{11}, \end{aligned}$$

ou seja, estima-se que a quantidade de cargas elementares espalhadas no gerador é da ordem de centenas de bilhões. Dessa forma, entendemos que esta quantidade de cargas elétricas elementares provoca um campo elétrico intenso nas extremidades ou terminais do gerador. Mencionamos neste momento o poder da pontas nos terminais, pois suas áreas são pequenas aumentando ainda mais a concentração de cargas por área com relação ao valor estimado. Isso faz com que o campo elétrico naquela região seja muito maior de modo a observarmos o faiscamento.



- Da teoria eletrostática podemos calcular a capacitância de um condutor elétrico, ou seja, a capacidade de armazenar cargas em sua superfície. Desta forma, pesquise sobre esta equação e determine a capacitância de um dos capacitores.

COMENTÁRIO: Vimos que a capacitância  $C$ , em farad, de um condutor carregado é a razão entre a quantidade de cargas  $Q$ , em Coulomb, e o seu potencial elétrico em volts, ou seja,  $C = Q/V$ . Substituindo os valores obtidos para a carga  $Q$  e o potencial  $V$  obtemos,

$$C = \frac{22,3 \times 10^{-9}}{3000} \rightarrow C = 7,4 \times 10^{-12} F.$$

Como usamos uma esfera imaginária para estimar o valor da carga no gerador, poderíamos ter utilizado a eq.(A.10) para estimar a capacitância  $C$  da esfera, pois esta fornece o mesmo resultado:

$$C = \frac{R}{k_0} = \frac{6,7 \times 10^{-2}}{9 \times 10^9} = 7,4 \times 10^{-12} F.$$

A partir deste resultado podemos fazer duas observações interessantes. A primeira é que o resultado da capacitância da Terra é de cerca de 100 milhões de vezes maior que a capacitância de nossos capacitores. A segunda é que o valor de capacitância de  $C = 1F$  é um valor muito alto, pois nem mesmo em um sistema com o tamanho do nosso planeta é possível armazenar tanta carga em sua superfície se considerarmos o ar como dielétrico. Caso existisse uma esfera que tivesse uma capacitância de 1 F, o seu raio seria de 9 milhões de quilômetros, equivalente a uma estrela de raio 12,9 vezes o raio do nosso Sol, que tem um raio de aproximadamente 700.000 km. Por esta razão que em muitos cálculos realizados utilizando-se a capacitância, as unidades dos valores obtidos são sempre os submúltiplos de F, como o mF,  $\mu F$ , nF, pF, respectivamente. Se considerarmos capacitores com outros materiais como dielétricos, que não seja o ar, é possível obter  $C = 1F$  para dimensões menores que 2 cm.

Após as estimativas realizadas anteriormente nós encerramos as atividades da oficina de ensino de eletrostática. Com esta proposta foi possível aplicar com os alunos os conhecimentos de eletricidade/eletrostática de forma extremamente concreta, mostrando em cada atividade prática sua ligação com o conhecimento teórico previsto nas leis da Física. Outras habilidades foram exigidas dos alunos, como escrever, pensar, desenhar, cortar, serrar, furar, queimar, lixar, colar, derreter, soldar, entre outras.

## 7. Referências

- ASSIS, A. K. T. Os Fundamentos Experimentais e Históricos da Eletricidade. 2010. “Disponível em:” <http://www.ifi.unicamp.br/~assis/Eletricidade.pdf>. Acesso em: 03 out. 2016.
- BATISTA, M. C.; POLÔNIA, A. F.; BLINI, R. B. Reflexões sobre a importância da experimentação no ensino de física. 2009, “Disponível em:” <https://www.redalyc.org/pdf/3073/307325328006.pdf>. Acesso em 4 de jul. 2019.
- CAVALCANTE, M. A.; TAVOLARO, C.R. C. Uma oficina de física moderna que vise a sua inserção no ensino médio. 2001. “Disponível em:” <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/10027>. Acesso em 20 de maio 2018.
- HEILBRON, J. L. Electricity in the 17th and 18th Centuries – A Study in Early Modern Physics. 1999. Dover, New York, 1999.
- LLOYD, J. T. Lorde Kelvin demonstrado. 2007. “Disponível em:” [http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1806-11172007000400005&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1806-11172007000400005&script=sci_arttext). Acesso em 07 jul. 2019.
- MOREIRA, M. A. Grandes desafios para o ensino da física na educação contemporânea. 2014. “Disponível em:” [https://www.if.ufrj.br/~pef/aulas\\_seminarios/seminarios/2014\\_Moreira\\_DesafiosEnsinoFisica.pdf](https://www.if.ufrj.br/~pef/aulas_seminarios/seminarios/2014_Moreira_DesafiosEnsinoFisica.pdf). Acesso em 01 jul. 2019.
- OLIVEIRA, A. M.; GEREVINI, A. M.; STROHSCHOEN, A. A. G. Diário de bordo: uma ferramenta metodológica para o desenvolvimento da alfabetização científica. 2017. “Disponível em:” <https://seer.ufs.br/index.php/revtee/article/view/6429>. Acesso em 12 jul. 2019.
- SALES, G. L.; BARBOSA, M. N. Oficinas de Física: Uma proposta para desmitificar o ensino de Física e conduzir para uma aprendizagem significativa. 2005. “Disponível em:” [http://www.ciencia.iao.usp.br/dados/snef/\\_oficinasdefisicaumapropo.trabalho.pdf](http://www.ciencia.iao.usp.br/dados/snef/_oficinasdefisicaumapropo.trabalho.pdf). Acesso em 25 de maio 2108.
- TERRAZZAN, E. A.; HAMBURGER, E. W. Oficinas de Física: uma Experiência em Educação Continuada. 1992. “Disponível em:” <http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/vol14a38.pdf>. Acesso em 12 jun. 2018.
- TIPLER, P. A.; MOSCA, G. Física para Cientistas e Engenheiros, volume 2. 6ª edição. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2006.