

**MNPEF**  
Mestrado Nacional  
Profissional em  
Ensino de Física

**MNPEF** Mestrado Nacional  
Profissional em  
Ensino de Física  
Polo **ufsc** Sorocaba



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**

CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA A SUSTENTABILIDADE

DEPARTAMENTO DE FÍSICA, QUÍMICA E MATEMÁTICA

**ABORDAGEM DE CONCEITOS SOBRE  
ELETROSTÁTICA NO ENSINO MÉDIO ATRAVÉS DE  
UMA OFICINA DE ENSINO DE FÍSICA**

**CARLOS AUGUSTO SILVA**

**ORIENTADOR: PROF. DR. JAMES ALVES DE SOUZA**

Sorocaba - SP  
Setembro de 2019

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA A SUSTENTABILIDADE  
DEPARTAMENTO DE FÍSICA, QUÍMICA E MATEMÁTICA

**ABORDAGEM DE CONCEITOS SOBRE  
ELETROSTÁTICA NO ENSINO MÉDIO ATRAVÉS DE  
UMA OFICINA DE ENSINO DE FÍSICA.**

**CARLOS AUGUSTO SILVA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação de Mestrado Profissional em Ensino de Física (PROFIS-So) da Universidade Federal de São Carlos, *campus* Sorocaba, no Curso de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF), para obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Área de concentração: Física no Ensino Médio.  
Orientador: Prof. Dr. James Alves de Souza

Sorocaba - SP  
Setembro de 2019

**CARLOS AUGUSTO SILVA**


**ABORDAGEM DE CONCEITOS SOBRE ELETROSTÁTICA NO ENSINO  
MÉDIO ATRAVÉS DE UMA OFICINA DE ENSINO DE FÍSICA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação de Mestrado Profissional em Ensino de Física (PROFIS-So) da Universidade Federal de São Carlos, *campus* Sorocaba, no Curso de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF), para obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

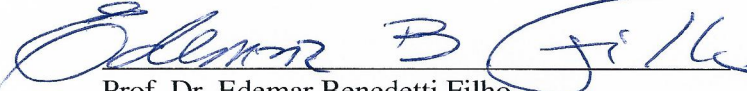
Área de concentração: Física no Ensino Médio.

Sorocaba 06 de setembro de 2019.

Orientador:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. James Alves de Souza  
UFSCar – Sorocaba

Examinador:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Edemar Benedetti Filho  
UFSCar – Sorocaba

Examinador:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Marco Aurélio Euflauzino Maria  
FACENS – Sorocaba

Sorocaba  
Setembro de 2019

Silva, Carlos Augusto

Abordagem de Conceitos sobre Eletrostática no Ensino Médio através de  
uma Oficina de Ensino de Física / Carlos Augusto Silva. -- 2019.  
153 f. : 30 cm.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal de São Carlos, campus  
Sorocaba, Sorocaba

Orientador: James Alves de Souza

Banca examinadora: Edegar Benediti Filho, Marco Aurélio Euflauzino

Maria

Bibliografia

1. Ensino de Física. 2. Gerador Eletrostático de Kelvin. 3. Oficina de  
Ensino. I. Orientador. II. Universidade Federal de São Carlos. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada pelo Programa de Geração Automática da Secretaria Geral de Informática (SIn).

DADOS FORNECIDOS PELO(A) AUTOR(A)

Bibliotecário(a) Responsável: Maria Aparecida de Lourdes Mariano – CRB/8 6979

## **DEDICATÓRIA**

*Em memória de minha querida filha Luiza Miachon Silva e seu marido Jonathan Alex Wigman.*

# AGRADECIMENTO

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo fomento ao Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF) durante todo o período de formação.

Agradeço ao Prof. Dr. James Alves de Souza pela orientação e condução deste trabalho.

Agradeço aos pesquisadores André Koch Torres Assis e Werner Martins Vieira pelas conversas e trocas de ideias.

Agradeço a minha esposa Aline de Souza Pimentel e às minhas filhas Laís Miachon Silva e Julia Miachon Silva pelo incentivo.

Agradeço aos colegas da turma de 2016 do MNPEF Sorocaba pelo compartilhamento de erros e acertos, divergências e convergências.

*“N3o podes caminhar no Caminho enquanto n3o te tornares, tu pr3prio, esse Caminho.”*

Helena Blavatsky

# RESUMO

SILVA, Carlos Augusto. Abordagem de Conceitos sobre Eletrostática no Ensino Médio através de uma Oficina de Ensino de Física. 2019. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física) – Universidade Federal de São Carlos, *campus* Sorocaba, Sorocaba, 2019.

Uma oficina de Física é uma atividade prática que pode ser utilizada em sala de aula ou no contra período letivo para aumentar a motivação dos alunos em cursos introdutórios de física em qualquer nível. Além de ajudar os alunos a adquirir uma boa base conceitual, esta pode contribuir significativamente para aplicação desse conhecimento na solução de problemas e envolvimento dos alunos em práticas científicas. Neste trabalho propomos a elaboração de uma oficina para o ensino de eletrostática. Nosso objetivo foi mostrar que a experimentação em um contexto investigativo no formato de uma oficina pode contribuir para facilitar o entendimento de vários conceitos abstratos, como carga elétrica, corrente elétrica, campo elétrico e potencial elétrico. Esta proposta foi aplicada em três escolas do interior do estado de São Paulo para aproximadamente 60 alunos. Durante a construção dos experimentos os alunos utilizaram o método do diário de bordo para anotar suas observações, elaborar hipóteses e responder questionários. Com este procedimento o aluno teve a oportunidade de participar de seu próprio aprendizado, explorando as vantagens da atividade científica através de propostas experimentais investigativas. O uso da oficina pode ser uma alternativa interessante para minimizar os habituais reducionismos provocados pelo método apostilado, cada vez mais presente nas escolas, melhorar a relação entre professor e alunos e servir como uma metodologia complementar das aulas teóricas de física. Nossa proposta foi muito bem recebida em sala de aula, tendo um caráter motivador e integrador para o ensino dos conceitos de eletrostática. Nosso produto educacional consiste na elaboração de uma metodologia para o emprego de um kit composto por um gerador eletrostático de Kelvin e outros experimentos mais simples para a detecção de campos elétricos, como o pêndulo elétrico, versórios, o eletroscópio. Todos os detalhes da construção e aplicação do kit foram escritos em uma linguagem simples e adequada para o professor de Física do nível médio de ensino.

**Palavras-chave:** Ensino de Física. Eletrostática. Indução. Gerador Eletrostático de Kelvin.



# ABSTRACT

SILVA, Carlos Augusto. Electrostatic Concepts Approach in High School through a Physics Teaching Workshop. 2019. Master's Thesis (Master's degree in Physics Teaching) – Universidade Federal de São Carlos, *campus* Sorocaba, Sorocaba, 2019.

A Physics workshop is a hands-on activity that can be used in the classroom or in the counter-time to increase student motivation in introductory physics courses at any level. In addition to helping students acquire a good conceptual foundation, it can contribute significantly to applying this knowledge in problem solving and engaging students in scientific practice. In this work we propose the elaboration of a workshop for the teaching of electrostatics. Our purpose was to show that experimentation in an investigative context in the format of a workshop can contribute significantly to facilitate the understanding of several abstract concepts such as electric charge, electric current, electric field and electric potential. This proposal was applied to three schools in the outback of the state of São Paulo for approximately 60 students. During the construction of the experiments the students used the logbook method to write down their observations, make hypotheses and answer questionnaires. With this procedure the student had the opportunity to participate in their own learning, exploring the advantages of scientific activity through investigative experimental proposals. The use of the workshop can be an interesting alternative to minimize the usual reductionism caused by the handout method, which is increasingly present in schools, to improve the relationship between teacher and students and to serve as a complementary methodology to theoretical physics classes. Our proposal was very well received in the classroom, having a motivating and integrative character for the teaching of electrostatic contents. Our educational product consists in the elaboration of a methodology for the application of a kit composed of a Kelvin electrostatic water dropper generator and other common experiments for the detection of electric fields, such as the electric pendulum, the electroscope, and also a handbook written in a simple and appropriate language for the high school physics teacher containing all the details of the construction and application of the kit.

**Keywords:** Physics Teaching. Electrostatic. Induction. Kelvin Electrostatic Water Dropper Generator.

# LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Dois objetos carregados: o de carga $q_1$ colocado na origem do sistema de coordenadas e o de carga $q_2$ colocado na posição $r$ . A lei de forças que descreve a interação entre esses dois objetos, considerados como cargas pontuais, é dada pela lei de Coulomb, eq.(3.2). .....	16
Figura 3.2 – 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. ....	16
Figura 3.3 –Versório de Gilbert.....	17
Figura 3.4 – Linhas de força do campo elétrico, mostrando simetria radial divergente para a carga positiva e convergente para a carga negativa. ....	18
Figura 3.5 – Representação das linhas de campo em um dipolo elétrico.....	18
Figura 3.6 – Linhas de campo ortogonais à superfície de um objeto esférico carregado, projetado no plano. ....	19
Figura 3.7 – 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.....	23
Figura 3.8 – (a) Circuito formado por uma bateria B, uma chave S e as placas $a$ e $b$ de um capacitor C. (b) representação simbólica. ....	23
Figura 3.9 – Há um aumento na energia potencial quando uma carga positiva $dq$ é movida do condutor negativo para o condutor positivo.....	25
Figura 3.10 – Gerador Eletrostático de Kelvin montado.....	26
Figura 3.11 - Esquema de funcionamento do Gerador Eletrostático de Kelvin.....	27
Figura 3.12 - Pequenos pedaços de papel seda na cor preta atraídos pelo indutor-canudo.....	37
Figura 3.13 – À esquerda mostramos um indutor atraindo uma pequena abelha e à direita o mesmo atraindo um filete de água.....	38
Figura 3.14 – 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. ....	39
Figura 3.15 - Bases de gesso em uso durante as anotações no diário.....	40
Figura 3.16 – Pêndulo elétrico composto pela base de gesso, canudos, fio de seda e pedaço de papel em forma circular.....	40
Figura 3.17 – Indutor repelindo papel circular do pêndulo elétrico.....	41

- Figura 3.18 – 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. .... 41
- Figura 3.19 – À esquerda mostramos a depressão suave feita com prego e martelo no centro da parte circular do grampo sem furá-lo. À direita tem-se o 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..... 42
- Figura 3.20 – À esquerda é feita a verificação do campo elétrico com o indutor colocado na vertical. Note que os versórios ficam alinhados na direção radial, como se a carga estivesse concentrada no indutor. À direita é mostrado o mesmo efeito com o indutor posicionado horizontalmente. .... 43
- Figura 3.21 – À esquerda mostramos a marca esbranquiçada da fita plástica por ter sido dobrada ao meio e à direita a mesma fita dobrada no formato do grampo aberto, como no versório de Gibert..... 44
- Figura 3.22 – Versório de Assis pronto para ser utilizado. .... 44
- Figura 3.23 – 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. .... 45
- Figura 3.24 – À direita mostramos a vista lateral do eletroscópio e à esquerda o eletroscópio carregado por contato utilizando um indutor. .... 46
- Figura 3.25 – Eletroscópio sendo descarregado por um chinelo de borracha. .... 47
- Figura 3.26 – 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. .... 48
- Figura 3.27 – 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. .... 48
- Figura 3.28 – 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 tarde. 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..... 49
- Figura 3.29 – Estrutura do gerador eletrostático com a base do reservatório encaixada. .... 50
- Figura 3.30 – 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

abraceadeira de nylon. À direita apresentamos os dois indutores fixos na estrutura do gerador.....	50
Figura 3.31 – 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.....	51
Figura 3.32 – Estrutura do gerador de Kelvin com os reservatórios inferiores, latas de leite, conectados aos indutores, latas de atum, 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. ....	52
Figura 3.33 – 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. ....	53
Figura 3.34 – Vista lateral e frontal do Gerador eletrostático de Kelvin pronto para ser colocado em funcionamento. ....	53
Figura 4.1 – Exemplos de ilustrações realizadas pelos alunos em seus diários de bordo durante a execução da oficina de ensino de eletrostática. ....	58
Figura 4.2 – Descrição de um aluno sobre a montagem de um perpendicular de Fracastoro. Note que além de explicar como o experimento é montado o aluno fala um pouco sobre sua utilidade.....	59
Figura 4.3 – Ilustração do processo de carga de um eletroscópio feito por um aluno. A descrição do fenômeno pelo aluno é apresentada acima. ....	59

# LISTA DE TABELAS

**Não há tabelas nesta dissertação.**

# LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

**SI** – *Sistema Internacional de Unidades*

**MCU** – *Movimento Circular Uniforme*

**MHS** – *Movimento Harmônico Simples*

**MNPEF** – *Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física*

**PROFIS-So** – *Programa de Mestrado Profissional em Ensino de Física da Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba.*

**BNCC** – *Base Nacional Comum Curricular*

# SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1 MOTIVAÇÃO .....	6
<b>CAPÍTULO 2 - REVISÃO DA LITERATURA E JUSTIFICATIVA</b> .....	<b>9</b>
2.1 O USO DE OFICINAS PEDAGÓGICAS PARA O ENSINO DE CIÊNCIAS .....	9
2.2 OFICINA DE FÍSICA .....	11
<b>CAPÍTULO 3 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E PREPARAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL</b> .....	<b>12</b>
3.1 CONCEITOS DE FÍSICA QUE PODEM SER ABORDADOS COM A OFICINA DE ELETROSTÁTICA .....	12
3.1.1 A Carga Elétrica .....	13
3.1.2 A Força Elétrica .....	15
3.1.3 O Campo Elétrico .....	17
3.1.4 Energia Potencial Elétrica e o Potencial Elétrico. ....	20
3.1.5 A Capacitância .....	21
3.1.6 Gerador Eletrostático Gotejante de Kelvin .....	26
3.2 DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA UTILIZADA PARA A PREPARAÇÃO E EXECUÇÃO DA OFICINA DE ENSINO DE ELETROSTÁTICA .....	30
3.2.1 O Uso do Diário de Bordo .....	30
3.2.2 Divulgação da Proposta nas Escolas e Preparação do Cenário para a Aplicação da Oficina .....	32
3.2.3 Lista de Materiais e Primeiros Passos .....	33
3.3 CONSTRUÇÃO DOS EXPERIMENTOS DA OFICINA DE ENSINO DE ELETROSTÁTICA .....	36
3.3.1 Conhecendo um Indutor de Cargas .....	37
3.3.2 O Pêndulo Eletrostático e o Perpendículo de Fracastoro .....	38
3.3.3 Detecção de Campos Elétricos utilizando o Versório de Gilbert .....	42
3.3.4 O Versório de Assis .....	43
3.3.5 O Eletroscópio .....	45
3.3.6 O Gerador Eletrostático de Kelvin .....	47

<b>CAPÍTULO 4 - APLICAÇÃO DA OFICINA DE ENSINO DE ELETROSTÁTICA NO AMBIENTE ESCOLAR .....</b>	<b>56</b>
<b>CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>63</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>65</b>
<b>APÊNDICE A - PRODUTO EDUCACIONAL.....</b>	<b>68</b>
<b>APÊNDICE B - PROJETO DE ENSINO DA OFICINA DE ENSINO DE ELETROSTÁTICA.....</b>	<b>134</b>
<b>APÊNDICE C - APRESENTAÇÃO DA OFICINA DE ENSINO DE ELETROSTÁTICA AOS ALUNOS .....</b>	<b>136</b>



# Capítulo 1

## INTRODUÇÃO

---

Campinas foi o berço das escolas particulares primárias e secundárias na Província de São Paulo, ao final do Império e início da República. Conviviam com as escolas públicas primárias, denominadas “escolas régias”, e um ensino público secundário fragmentado, ou seja, não havia nenhuma escola pública regularmente montada, somente aulas avulsas de humanidades que preparavam para o ingresso aos cursos superiores do Império (MORAES, 1985). Entre as escolas particulares podemos destacar, segundo Moraes, a Escola Elementar Alemã (1863) com o primário, o Colégio Feminino Florense (1863), que iniciou com o primário e depois com o secundário, a escola Internacional (1869), com o primário e secundário, e a escola Culto à Ciência (1869), também com o primário e secundário. Esta última foi criada por um grupo de vanguarda, formado por fazendeiros de café, comerciantes e intelectuais, que se afirmavam positivistas, maçons e republicanos, além de apoiarem política e financeiramente outras instituições particulares ou comporem o corpo docente de muitas delas (MORAES, 1985). Muitos destes idealizadores tomaram parte nos primeiros governos republicanos.

Tanto o colégio Culto a Ciência como o Internacional, não só preparavam os alunos para os exames preparatórios à Faculdade de Direito de São Paulo ou aos cursos superiores do Império, como faziam a maioria das escolas públicas secundárias, como também voltavam-se para uma cultura geral: “Para os republicanos de Campinas, esta cultura “geral” ou universal deveria ser ampliada por uma formação propedêutica mais rica em conhecimentos científicos admitidos ao lado dos imprescindíveis estudos literários e ainda pela transformação da escola secundária numa escola verdadeiramente formativa” (MORAES, 1985, p. 118).

Muito tempo se passou desde então e os Colégios Internacional e Florense fecharam. A Escola Alemã fundiu com a Nova Escola Alemã denominando-se Escola Rio Branco, localizada, hoje, no subdistrito de Barão Geraldo e o Culto à Ciência fechou, reabrindo após a proclamação da República com o nome de Escola Estadual Culto à Ciência.

Há 34 anos nas escolas particulares, o ensino se dava por meio de lousa, giz e apagador. Havia, em muitas delas, laboratórios de ensino e o professor montava, como suporte para as suas aulas, seu próprio material, acompanhado de pesquisas em enciclopédias e livros ou usava um ou mais livros didáticos. O ensino continuava propedêutico e muitas escolas faziam questão de propagar esta universalidade.

Nos meados da década de 70 surgem os primeiros cursinhos pré-vestibulares em Campinas, que preparavam os alunos egressos do Ensino Médio, recém-formados ou não, para concorrerem a uma vaga nas universidades públicas estaduais e federais, pois as faculdades particulares eram poucas, comparadas ao número atual. As apostilas dos cursos pré-vestibulares, reproduziam o conteúdo do ensino primário e secundário de forma resumida, acrescentando uma grande quantidade de testes de vestibulares passados, de maneira a resolvê-los junto com os vestibulandos.

A partir disso, alguns cursinhos transformaram-se também em escolas de ensino médio, onde, nos dois primeiros anos, fazia-se uso do livro didático e no terceiro ano eram usadas as mesmas apostilas de revisão do pré-vestibular. Ao longo dos anos, as editoras dos cursinhos foram aproveitando os autores das apostilas para produzirem apostilas também para o segundo e primeiro ano (ADRIÃO, 2008). Estas apostilas são “herdeiras da orientação para o vestibular que caracterizou o surgimento desse tipo de material” (BRITTO, 2011, p. 14).

As mudanças continuaram com algumas escolas tradicionais mostrando interesse no uso de apostilas de revisão para as turmas do terceiro ano do Ensino Médio. Inicialmente eram usadas no contra período, mas aos poucos passaram a ser usadas, sob anuência da coordenação/direção, no período de aula a partir do segundo semestre ou mesmo no início do terceiro ano, redistribuindo os conteúdos das disciplinas em dois anos e meio ou em dois anos. Essa concentração dos conteúdos em apostilas provocou um desalinhamento com o uso dos livros didáticos, que foram projetados para três anos e não para dois anos.

Dessa forma, o mercado editorial, na tentativa de expandir seus produtos, propõe aos autores, que sofreram perdas nas vendas de seus livros didáticos, a (re)escreverem seus livros no formato de apostilas, comprimindo o conteúdo do Ensino Médio em 2 anos. Surgem então os sistemas apostilados ou, como conhecidos hoje, sistemas estruturados de ensino (ADRIÃO, 2009).

Posteriormente, sem, contudo, se constituir em estratégia substitutiva, ganhou corpo a transformação de escolas privadas de menor porte ou experiência em franquias das grandes redes privadas de ensino. Em outras palavras, não se fazia mais necessário, ao grande capital, a aquisição do patrimônio físico das concorrentes, e com ele de seus custos, bastava assegurar a compra reeditada

anualmente dos serviços oferecidos pelas redes: a terceirização do processo pedagógico se instalava. (ADRIÃO, 2009, p. 11)

A partir de nossa experiência temos a impressão de que, à medida que os anos passam, o objetivo do Ensino Médio em algumas escolas particulares de Campinas, que utilizam sistemas estruturados de ensino, seja promover o aluno a passar no vestibular, enquanto que no início da República era de preparar o aluno para os exames de entrada na Faculdade de Direito de São Paulo. Nos dias de hoje, ouvimos muito pouco sobre escolas que possuem, em suas propostas pedagógicas, um caráter mais formativo e universal.

Os sistemas apostilados trouxeram para as nossas aulas um formato de aula do cursinho, com conteúdos e uma quantidade de exercícios definidos para serem ensinados em um determinado intervalo de tempo. Se houver atrasos é necessário repor as aulas. Este formato dificultou muito para nós a implementação de aulas de laboratório e até mesmo as demonstrações feitas no início da aula para introdução de um novo conceito. Nossa impressão é que o conteúdo do Médio e seu ensino não está mais nas mãos dos professores, tampouco da coordenação/direção da escola, seguindo apenas o que é estabelecido nos sistemas apostilados de ensino.

Diante das restrições que nos foram impostas pelos sistemas apostilados nós buscamos novas metodologias para melhorar o ensino. Hoje, os professores têm acesso, pela rede mundial de computadores, a quase todas as metodologias de ensino, propagadas por fontes legitimadas pelos órgãos oficiais de educação. Além disso, há muitas universidades propondo cursos de atualização nas áreas de ensino-aprendizagem através de suas faculdades de educação e faculdades/institutos que ofereçam a opção de licenciatura em seus cursos.

As inovações metodológicas surgiram tanto dentro das metodologias de ensino tradicionais, com novas estratégias de ensino-aprendizagem, quanto na criação de novas metodologias, denominadas de alternativas ou inovadoras. Nossa proposta é mostrar que podemos ajudar a melhorar o ensino para além da aula teórica oferecida pelo material apostilado, usando duas metodologias alternativas: a Oficina de Ensino e o Diário de Bordo.

Uma Oficina de Ensino (VIEIRA, 2002) pode ser concebida em um local e horário dentro da escola onde o aprender é feito na prática, ou seja, onde se aprende fazendo e praticando. Mas, para que isso aconteça, é necessário abrir-se um espaço na escola, ou seja, uma

“Oficina é uma nova pedagogia de conhecimento e inserção na realidade que se desenvolve na escola. É um processo pedagógico no qual alunos e professores desafiam um conjunto de problemas específicos.” (BARROS *apud* VIEIRA, 2000, p. 11),

primeiro mostrando que há uma forma de trazer o conhecimento aos alunos através de um trabalho prático, que em nosso caso, será 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 é utilizado para registrar as práticas, os procedimentos e esquemas, as perguntas e suas respostas e a (re)construção de conceitos. O experimento e sua construção são realizados individualmente, ou seja, cada aluno monta sua prática e com ela faz os procedimentos indicados pelo professor. Ao final de tudo, todos os experimentos passam a pertencer aos alunos que os construíram.

A oficina pedagógica proposta pode ser montada com materiais de baixo custo, ou seja, aqueles 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 privadas que sofreram diminuição de carga horária, por qualquer motivo que seja (MOREIRA, 2014), tanto em nossa região como em todo o território nacional. Este pode ser implementado mesmo quando não se tenha nenhum dos pré-requisitos anteriores ou mesmo diante das justificativas mais tradicionais apresentadas no artigo “A relação com o saber profissional do professor de física e o fracasso da implementação de atividades experimentais no ensino médio”, como:

“a indisponibilidade ou qualidade de material, excessivo número de alunos em sala de aula, formação precária dos professores, pouca bibliografia para orientá-los, restrições institucionais, como falta de tempo para as aulas, disponibilidade da sala de laboratório estar à disposição quando se precisa, ausência de horário específico na programação, necessidade de laboratorista, inexistência de programação e articulação entre atividades experimentais com o curso, falta de atividades preparadas, ausência de tempo para o professor planejar e montar suas atividades, carência de recurso para a compra e substituição de equipamentos e de materiais de reposição.” (LABURÚ, 2007, p. 306).

O conteúdo abordado na nossa Oficina de Ensino foi sobre a Eletricidade, onde a maior parte dos conceitos se refere à eletrostática. A escolha desta área foi feita com base na experiência pedagógica que temos quando a lecionamos. Os alunos normalmente têm dificuldades em entender conceitos ligados à estrutura da matéria, ou seja, elétron, próton, nêutron, átomo, carga, força e campo elétricos, etc. Esta visão é corroborada pelos autores Dias, Barlette e Martins (2009) no artigo em que relatam a “A opinião de alunos sobre as aulas de eletricidade: uma reflexão sobre fatores intervenientes na aprendizagem”, onde os alunos dizem que a física é muito abstrata.

Partindo do princípio que as atividades experimentais demonstrativas ou investigativas em física são importantes, nosso objetivo com a Oficina de Ensino Eletrostático é proporcionar aos alunos um contato direto com a construção de equipamentos a partir de sucatas e materiais de baixo custo, como linha, papel, régua, plástico, cano de PVC, entre outros, que serão usados tanto na produção como na detecção de propriedades elétricas. Ao mesmo tempo em que ocorre a produção e detecção das propriedades elétricas através de práticas demonstrativas, os alunos dialogam com o professor/tutor através de perguntas e respostas, permitindo assim abordagens de conceitos elétricos que vão sendo (re)construídos.

A montagem final consiste no gotejador de Kelvin (CAMILO, 2008), que impressiona, por sua simplicidade, ao produzir descargas elétricas sob uma diferença de potencial de alguns milhares de volts. O gotejador usa a energia potencial gravitacional do sistema água/terra transformando-a em energia potencial elétrica. A água é liberada de um reservatório, devidamente isolado da terra, através de dois furos que fazem com que a água escoe no formato de filetes. Antes mesmo das gotas se soltarem do reservatório, dois anéis metálicos, eletricamente carregados com cargas opostas, induzem a separação de cargas elétricas nas gotas, em positivo e negativo. As gotas já carregadas passam no meio dos dois indutores e são armazenadas em dois reservatórios separados, gerando uma alta tensão que é capaz de provocar a ruptura dielétrica do ar, produzindo, de forma visível, faíscas elétricas.

Antes da construção do gotejador, introduzimos, como pré-requisito, pequenos experimentos que envolvem o estudo da Eletrostática, iniciando-se pela reconstrução dos conceitos básicos, como eletrização por atrito até o mais elaborado como a diferença de potencial elétrico. Tentamos trabalhar seguindo a ordem das apresentações tradicionais dos livros e sistemas apostilados.

Os experimentos tratados na oficina de eletrostática foram inspirados em vários livros, como “Experiências de Ciências para o Ensino Fundamental” de Alberto Gaspar (GASPAR, 2014), “Física em Casa” dos autores Luiz Antônio de O. Nunes e Alessandra Riposati Arantes (NUNES, 2009), “Os Fundamentos Experimentais e Históricos da Eletricidade” volume I de André Koch Torres Assis (ASSIS, 2010). Neste último encontramos a descrição dos experimentos originais em eletrostática criados pelos pioneiros da eletricidade moderna, como William Gilbert (1544-1603), Girolamo Fracastoro (1478-1553), Stephen Gray (1666-1736), Honoré Fabri (1607-1688), Robert Boyle (1627-1691), Charles Francois de Cisternay Du Fay (1698-1739) e William Thomson (Lorde Kelvin) (1824-1907) entre outros.

Dentre os experimentos encontrados nestes livros escolhemos aqueles que mais pudessem auxiliar nas abordagens dos conceitos da Eletrostática, da forma como é apresentada

hoje, para a montagem da oficina de ensino, como eletrização por atrito, carregamento, força de atração, carga elétrica, indução elétrica, separação de cargas, eletrização por contato e descarregamento, capacitância, além de ajudar na noção de campo elétrico, potencial elétrico e energia potencial elétrica. Os benefícios dessa abordagem puderam ser contemplados através da implementação desta proposta em 3 escolas particulares diferentes, nos permitindo verificar o potencial de envolvimento, estímulo e participação do aluno do ensino médio com a pesquisa escolar na abordagem dos conceitos eletrostáticos.

## 1.1 MOTIVAÇÃO

Mesmo há muitos anos lecionando física no ensino médio e no ensino superior, trazemos sempre uma preocupação, que acreditamos ser de todo professor: fazer-se entender. Quando percebemos que o aluno não conseguiu acompanhar, contextualizamos o assunto, buscando uma história, um fato, uma relação com o cotidiano que possa levar o aluno a uma clareza de ideias. Mas nem sempre estas alternativas permitem que os alunos entendam os conceitos e leis trabalhados.

Um procedimento muitas vezes adotado em nosso trabalho pedagógico e que pode ajudar a resolver a dúvida é montar um experimento. Como na maioria de nossas escolas não dispomos de muitos recursos e equipamentos sofisticados, aprendemos a construir, ao longo de nossa carreira, práticas feitas com materiais simples, de baixo custo ou mesmo sucata. Vários materiais podem ser explorados como: barbante, espiral de caderno, papel, arames, régua, tachinhas, cartolina, lata de leite, trilho de cortina, etc., e que estão ao nosso alcance, tanto em casa como na escola e o seu uso faz a diferença no ensino de física, quando montados de maneira adequada.

A implementação de atividades experimentais utilizando esses materiais foram ficando cada vez mais importantes e presentes em nossa vida profissional, de modo a se tornar comum o ensino de ciência/física com experiências demonstrativas ou práticas previamente montadas.

Em nossa prática na pedagogia Waldorf tínhamos um roteiro no ensino de ciências: primeiro apresentávamos o fenômeno aos alunos, que assistiam em silêncio, acompanhando cada passagem com muita atenção; abríamos em seguida à discussão e ao diálogo; num terceiro momento refazíamos o experimento ainda em silêncio e, em seguida, o aluno levava ao papel o que observou, fazendo a descrição do experimento e desenhos representativos da sua

observação. Somente no dia seguinte é que partíamos, em grupo, para o recordar, permitindo-se que afluíssem as perguntas e a partir delas eram construídos os conceitos. Essa prática mostrou que, também na pedagogia Waldorf, a experimentação é fundamental para o ensino/aprendizagem em ciências (FIGUEIREDO, 2015).

Estes procedimentos feitos no ensino fundamental só nos motivaram à inserção de práticas investigativas no ensino médio e de acordo com a Base Nacional Comum Curricular BNCC,

“...a área de Ciências da Natureza e suas Tecnologias oportuniza o aprofundamento e a ampliação dos conhecimentos explorados na etapa anterior (fundamental). **Trata a investigação como forma de engajamento dos estudantes na aprendizagem de processos, práticas e procedimentos científicos e tecnológicos**, e promove o domínio de linguagens específicas, o que permite aos estudantes analisar fenômenos e processos utilizando modelos e fazendo previsões. Dessa maneira, possibilita aos estudantes ampliar sua compreensão sobre a vida, o nosso planeta e o universo, bem como sua capacidade de refletir, argumentar, propor soluções e enfrentar desafios pessoais e coletivos, locais e globais.” (BNCC, 2018, p. 471, grifo nosso).

Outra fonte que nos motivou sobre o uso de práticas experimentais em sala de aula foi a leitura do livro “Atividades experimentais no ensino de Física: Uma nova visão baseada na teoria de Vygotsky”, onde o autor, Alberto Gaspar, propõe atividades a serem realizadas em salas de aula, apoiadas nos princípios pedagógicos de Lev Vygotsky (GASPAR, 2014). Nele, Gaspar escreve sobre a ausência de atividades experimentais na maioria das escolas brasileiras, mesmo naquelas que possuem laboratórios, argumentando que essa situação se deve muito mais às dificuldades pedagógicas do que aos recursos materiais. Argumenta também que as atividades experimentais

“[...] passam a ter a mesma importância de outras práticas menos valorizadas em outros referenciais teóricos, como as corriqueiras aulas expositivas dedicadas à resolução de problemas. Temos certeza, porém, de que essa visão mais realista de seu papel pedagógico fará com que o professor, livre de expectativas inalcançáveis, se sinta mais à vontade na realização de experimentos... é importante ainda fazermos uma breve reflexão sobre a importância do resgate do papel do professor, que, nessa teoria, constitui-se em presença essencial no processo de ensino e aprendizagem: o papel do parceiro mais capaz.” (GASPAR, 2014, p. 245-246).

O que estamos trazendo de mais atual, mas não necessariamente original, é que a Oficina de Ensino seja montada junto com os nossos alunos sob nossa orientação. E assim nos motivamos nesta proposta de maneira que os alunos, à medida que construíssem, tivessem a oportunidade de entender o funcionamento do aparelho e do experimento e como ele poderia ser utilizado, ao mesmo tempo que reconstruíssem habilidades, valores e conceitos, resultando assim em competência acompanhada de habilidade nesta área.

Percebemos que esta área seria a eletricidade, visto que, o entendimento dos conceitos ligados a ela é muito mais abstrato, segundo alguns alunos (DIAS, 2009), e que o fenômeno das cargas não pode ser observado diretamente. Por outro lado, as práticas realizadas evidenciam diretamente as interações elétricas nas quais podemos aprender e entender o modelo/conceito de carga elétrica. Isso nos motivou a reconstruir o gerador eletrostático de Kelvin (CAMILO, 2008) que por si só, nos proporciona o entendimento de alguns fenômenos e conceitos da eletricidade. Seguimos este roteiro e construímos o gerador eletrostático para entender seu funcionamento, o que para nós foi surpreendente, pois sabíamos da literatura (ASSIS, 2010; BEATY, 1995) que esta montagem nos permitiria observar a ruptura dielétrica do ar, mas além disso percebemos o potencial de trabalhar outros conceitos com os nossos alunos além da produção de faísca.

Ao analisar o gerador montado para utilizá-lo em nossas aulas de eletricidade no ensino médio, optamos por ampliar a proposta original, incorporando mais algumas práticas que transformariam o nosso Produto Educacional em um curso de eletrostática. Nosso objetivo foi estabelecer uma sequência de práticas, orientadas pelo professor, que levassem os alunos a participarem de maneira mais efetiva como protagonistas de seu próprio aprendizado (SÉRÉ, 2003).

A Oficina de Eletrostática traz uma proposta de ensino ousada, pois não é uma proposta de ensino tradicional, onde o professor detém o conhecimento, sendo ele o próprio protagonista e detentor do saber e os alunos meros expectadores ou depositários do saber escolar. Como dizia Paulo Freire, “na visão ‘bancária’ da educação, o ‘saber’ é uma doação dos que se julgam sábios aos que julgam nada saber” (FREIRE, 1984b, p. 68). Neste projeto os alunos do ensino médio são estimulados à ação, provocados para um trabalho de construção de ferramentas que vão auxiliá-los na aquisição de conceitos sobre eletrostática. Trata-se de, a cada encontro, provocar o aluno através de um diálogo que surge pelo próprio questionamento dos resultados de seus experimentos.

“Estimular a pergunta, a reflexão crítica sobre a própria pergunta, o que se pretende com esta ou com aquela pergunta em lugar da passividade em face das explicações discursivas do professor, espécie de respostas a perguntas que não foram feitas. Isso não significa realmente que devemos reduzir a atividade docente em nome da defesa da curiosidade necessária, o puro vai-e-vem de perguntas e respostas, que burocraticamente se esterilizam. A dialogicidade não nega a validade de momentos explicativos, narrativos, em que o professor expõe ou fala do objeto. O fundamental é que o professor e alunos saibam que a postura deles, professor e alunos, é diagnóstica, aberta, curiosa, indagadora e não apassivada, enquanto fala ou enquanto ouve. O que importa é que professor e alunos se assumam epistemologicamente curiosos.” (FREIRE, 1996, p. 86).



# Capítulo 2

## REVISÃO DA LITERATURA E JUSTIFICATIVA

---

*Ensinar não é transferir conhecimento, mas criar as possibilidades para a sua própria produção ou a sua construção.*

*Paulo Freire*

### 2.1 O USO DE OFICINAS PEDAGÓGICAS PARA O ENSINO DE CIÊNCIAS

Originalmente, no Brasil, o termo oficina é usado para um local onde se realiza conserto ou manutenção de um produto. O termo passou a ter uma correlação na educação quando houve a necessidade de uma metodologia de ensino-aprendizagem que fosse mais participativa ou em grupo, baseado no aprender na prática ou aprender fazendo, de acordo com Betancurt (2007). Hoje o termo oficina tem sido empregado em várias atividades que podem não ter o mesmo objetivo metodológico, como em reuniões, seminários, convenções entre outros. Assim convém focarmos no termo que desejamos nos apropriar neste trabalho que é o uso da oficina como local onde os alunos entram em um fazer pedagógico coletivo e nele aprendem, segundo Ander-Egg (1991).

No Capítulo 1 acompanhamos o quadro da prática pedagógica nas escolas particulares de Campinas, que tem se restringido cada vez mais a aulas extremamente resumidas e rápidas com o sistema apostilado. Nestas condições é passível que o professor, como foco principal, por portar o conhecimento, carregue cada vez mais o ônus do fracasso e os alunos se tornem cada vez mais expectadores. A proposta de ensinarmos através de oficinas, permite que o

professor divide com os alunos o seu centro da atenção, atribuindo mais importância ao fazer do aluno (VIEIRA, 2000).

Ainda para Ander-Egg (1991):

“uma oficina é uma prática iluminada pela teoria, com a qual adquire a capacidade de aplicar os conhecimentos teóricos e de dar às ações uma perspectiva e significação que transcende enquanto ato concreto.” (ANDER-EGG *apud* VIEIRA, 2000).

Segundo Vieira e Volquind (2000) a metodologia das Oficinas de Ensino é importante em vários aspectos: transfere responsabilidade para o aluno em seu fazer; divide a tarefa do ensinar do professor com seus alunos; cria um espaço para a reflexão e construção do conhecimento; na oficina o importante é a ação sem esquecer da teoria; nos problemas gerados dentro de uma oficina é necessário o apoio da teoria; as perguntas/respostas não são meramente copiadas pelos alunos, elas são selecionadas para promoverem pensamentos reflexivos; estes pensares reflexivos resgatam a dialética entre a forma e o conteúdo; nas oficinas a avaliação surge mais como um diagnóstico e acompanhamento de como o aluno aprende; sugere-se que o professor organize um diário. Ainda sobre a avaliação,

"O que se deseja é que a avaliação seja um instrumento para levar todos a adquirirem o saber, e não eliminar aqueles que logo de saída, por fatores presentes na própria escola, não o conseguem adquirir." (CANDAUI, 1991 *apud* VIEIRA, 2000).

Muitos trabalhos, envolvendo Oficinas de Ensino, foram desenvolvidos e apresentados nas duas últimas décadas no sentido de motivar, aprofundar e colocar em prática o ensino/aprendizagem em Ciências. A finalidade das oficinas é ir além do tradicional, promovendo um ambiente de ensino e aprendizagem mais dinâmico, atrativo e desafiador, criar um ambiente de ação e reflexão sobre os conhecimentos da ciência. Os alunos têm aumentado sua curiosidade em um ambiente que permite tirar dúvidas e ampliar as discussões. Este tipo de proposta prevê também um maior envolvimento do aluno e incentivo ao interesse em aprender e vivenciar novas experiências, propiciando momentos diferenciados aos mesmos com relação à sala de aula tradicional, visando completar o estudo de Física no ensino médio. Com as oficinas é possível estabelecer um diálogo interativo com os alunos (FIGUEIREDO, 2006).

## 2.2 OFICINA DE FÍSICA

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).

No artigo “Oficinas: ensinando física com a construção de experimentos de baixo custo” (BRAGA, 2015), os autores utilizam materiais experimentais de baixo custo envolvendo os alunos no uso, no debate e na construção de protótipos. Esta é a principal característica da oficina que elaboramos, ou seja, procedemos de forma que o aluno possa construir e manusear as práticas e a partir delas construir conhecimento.

# Capítulo 3

## FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E PREPARAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL

---

---

*Em uma oficina de ensino, as questões científicas e metodológicas são estudadas a partir da prática.  
Nas oficinas a primazia sempre é da ação, mas não se desmerece a teoria.*

Elaine Vieira e Léa Volquind

Estudar física é estudar a natureza, seus fenômenos e interações, e este estudo pode se dar de muitas maneiras. Neste trabalho este foi conduzido através da montagem de experimentos construídos pelos próprios alunos. Esta metodologia pode ser promissora para despertar o interesse e curiosidade dos estudantes em aprender física, pois eles são os desenvolvedores do trabalho. Para Gaspar e Monteiro (2005), atividades experimentais permitem aos alunos o contato com o objeto concreto e, por sua vez, tira-os da zona de equilíbrio cognitivo, colocando-os em zona de conflito e, conseqüentemente, viabiliza ao estudante construir um novo conhecimento (PIAGET, 1996).

### 3.1 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. Como vimos anteriormente, a escolha deste tema foi intencional, pois surge de

uma necessidade que tínhamos de desenvolver uma ação que pudesse maximizar sua aprendizagem. 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 de eletrostática.

### 3.1.1 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,

$$Q = n|e|, \quad (3.1)$$

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.

### 3.1.2 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,

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r}, \quad (3.2)$$

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. (3.2) 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.

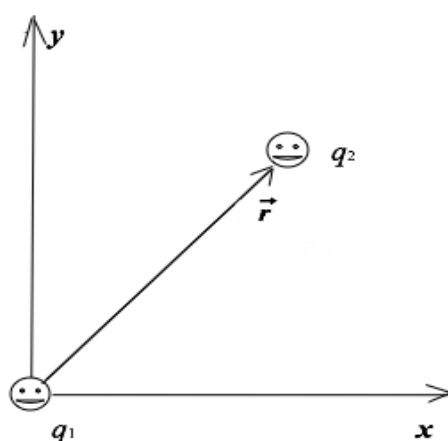
É importante ressaltar que a expressão (3.2) é obtida considerando que uma das cargas está na origem do sistema de coordenadas e a outra localizada na posição  $\vec{r}$ , como ilustrado na figura 3.1.

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

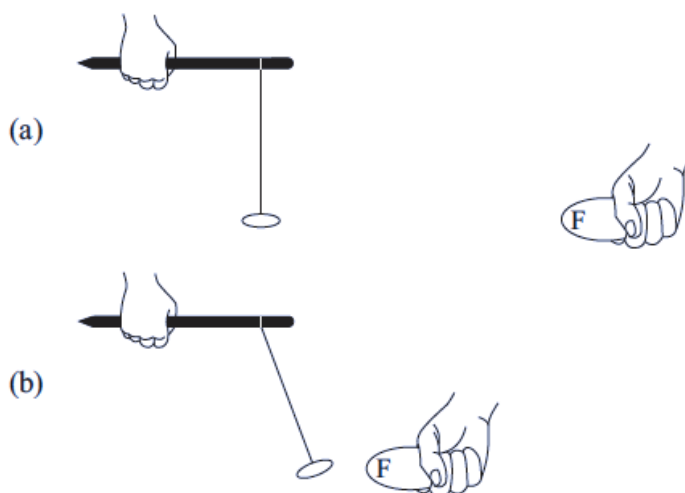
sobre um instrumento que pode detectar corpos carregados, denominado de perpendicular de Fracastoro (ASSIS, 2010). Este dispositivo era composto por um pedaço de âmbar ou prata preso à extremidade de um fio, e este preso na outra extremidade a um suporte, quase funcionando como um fio de prumo ou como um pêndulo, como ilustrado na figura 3.2.

**Figura 3.1** – 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.(3.2).



Fonte: Elaborada pelo Autor.

**Figura 3.2** – 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.

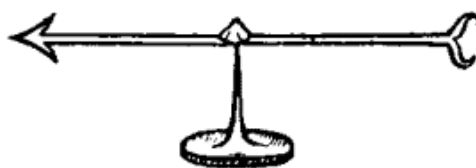
Quando um objeto eletrizado se aproxima do pedaço de âmbar pendurado, este detecta a presença do objeto eletrizado e se aproxima alterando o ângulo de inclinação do fio do pêndulo



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 3.3.

**Figura 3.3** –Versório de Gilbert.



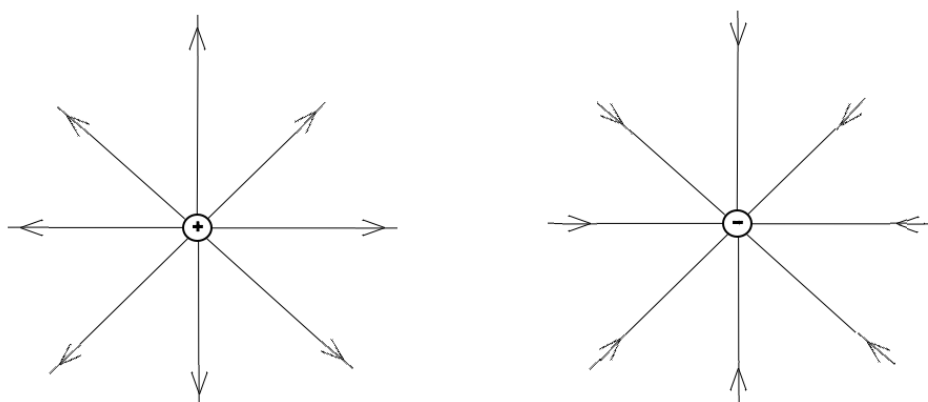
Fonte: ASSIS, 2010, p. 38.

### 3.1.3 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 3.4.

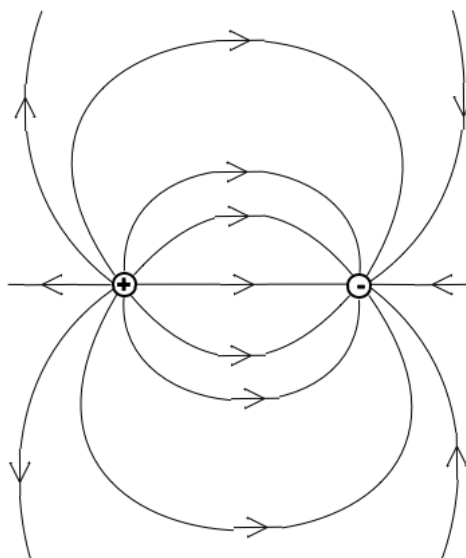
Na ilustração da figura 3.4 note que as linhas de forças do campo elétrico saem da carga positiva, divergindo, e chegam ou convergem na carga negativa. Se tivermos um sistema composto por duas cargas de sinais opostos, como um dipolo elétrico, por exemplo, a distribuição de linhas muda em algumas regiões do espaço, veja figura 3.5. Vale lembrar que o vetor campo elétrico  $\vec{E}$  é sempre tangente às linhas de forças em um ponto destas linhas.

**Figura 3.4** – Linhas de força do campo elétrico, mostrando simetria radial divergente para a carga positiva e convergente para a carga negativa.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

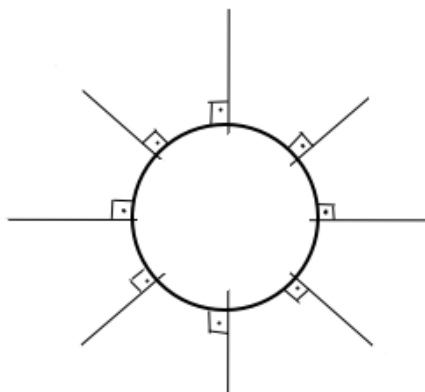
**Figura 3.5** – Representação das linhas de campo em um dipolo elétrico.



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 3.6.

**Figura 3.6** – 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,

$$\vec{g} = \frac{\vec{F}_G}{m}, \quad (3.3)$$

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,

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_{el}}{q}. \quad (3.4)$$

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. (3.2), na relação (3.4), 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,

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_{el}}{q_2} = \frac{k_0 q_1 q_2}{q_2 r^2} \hat{r} = k_0 \frac{q_1}{r^2} \hat{r}. \quad (3.5)$$

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.

### 3.1.4 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  $\vec{E} \cdot d\vec{r} = E dr$ , 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,

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r} . \quad (3.6)$$

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.(3.6). 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  $\Delta\epsilon_p$  entre os pontos A e B que, de acordo com o desenvolvimento acima, é dada por,  $\tau_{A \rightarrow B} = q_0(V_B - V_A) = \Delta\epsilon_p$ ,

$$\therefore \epsilon_p = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_0 q}{r} . \quad (3.7)$$

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,  $\epsilon_p$ , que age sobre uma carga de prova arbitrária  $q_0$ , ou seja,

$$V = \frac{\epsilon_p}{q_0} . \quad (3.8)$$

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.

### 3.1.5 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. (3.6) 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

$$C = \frac{Q}{V}. \quad (3.9)$$

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. (3.9) obtemos

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{Q}{k_0 \frac{Q}{R}} = \frac{R}{k_0} = 4\pi\epsilon_0 R, \quad (3.10)$$

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).

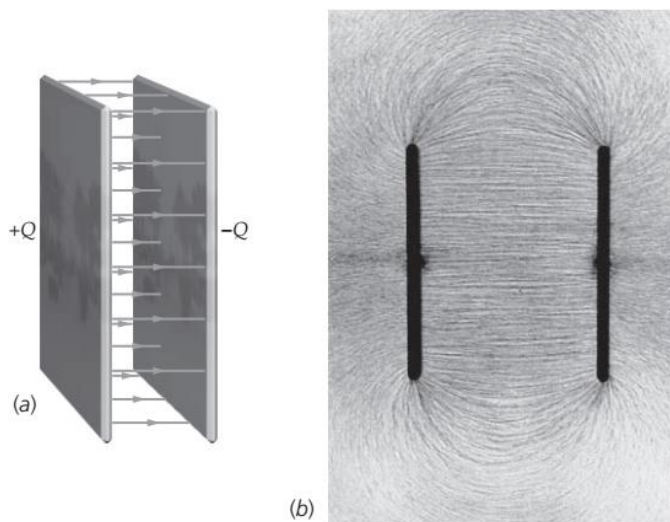
Quando carregamos um capacitor esférico, um campo elétrico é produzido em seu entorno. O trabalho necessário para carregar o capacitor pode ser entendido como o trabalho para estabelecer o campo elétrico, ou em outras palavras, a energia armazenada no capacitor é a energia armazenada no campo elétrico,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

Outro dispositivo comumente utilizado é o capacitor de placas paralelas, representado na figura 3.7.

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 (3.8). 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 a placa  $a$  carregada positivamente. Este mesmo campo faz um mesmo número de elétrons se descolarem do terminal negativo da bateria para a placa

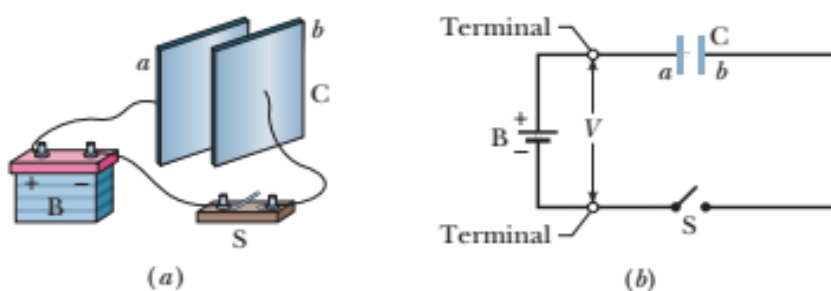
$b$ , deixando-a carregada negativamente. Deste modo as cargas nas placas  $a$  e  $b$  tem o mesmo módulo.

**Figura 3.7** – 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 3.8** – (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,

$$\varepsilon_0 \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = Q, \quad (3.11)$$

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. (3.11) se reduz a

$$Q = \varepsilon_0 EA.$$

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

$$\sigma = \frac{Q}{A} = \varepsilon_0 E. \quad (3.12)$$

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.(3.8), 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,

$$\begin{aligned} q_0V = q_0Ed \quad \rightarrow \quad V = Ed = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} d = \frac{d}{\varepsilon_0 A} Q \\ \therefore \frac{Q}{V} = C = \frac{\varepsilon_0 A}{d}. \end{aligned} \quad (3.13)$$

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.

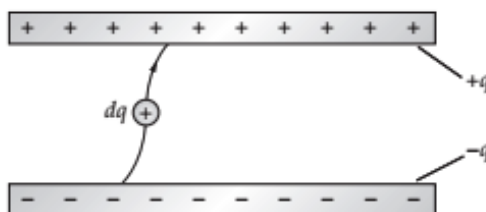
Quando o capacitor está sendo carregado, elétrons podem ser transferidos do condutor positivamente carregado para o condutor negativamente carregado. Isto deixa o condutor positivo com uma deficiência de elétrons e o condutor negativo com um excesso de elétrons. O mesmo pode ocorrer com cargas positivas 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 3.9, através de um aumento do potencial  $V$ , a energia potencial elétrica  $\varepsilon_p$  da carga  $e$ , portanto, do capacitor, aumenta de

$$d\varepsilon_p = Vdq = \frac{q}{C}dq. \quad (3.14)$$

**Figura 3.9** – 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,

$$\varepsilon_p = \int d\varepsilon_p = \int_0^Q \frac{q}{C} dq = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C}. \quad (3.15)$$

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

$$\varepsilon_p = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} QV = \frac{1}{2} CV^2, \quad (3.16)$$

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

$$u = \frac{\text{energia}}{\text{volume}} = \frac{1}{2} \varepsilon_0 E^2. \quad (3.17)$$

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.(3.17).

### 3.1.6 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 3.10 o gerador de Kelvin reconstruído conforme as especificações básicas de Kelvin.

**Figura 3.10** – Gerador Eletrostático de Kelvin montado.

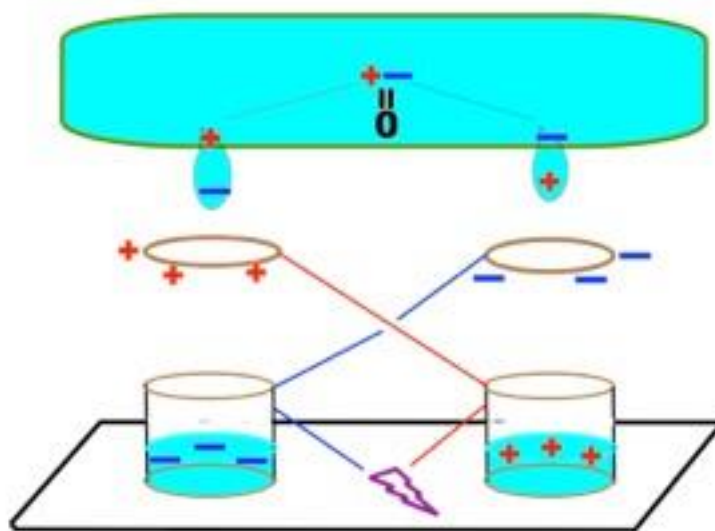


Fonte: Elaborada pelo Autor.

Com o gerador montado acima 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 3.11.

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.

**Figura 3.11** - Esquema de funcionamento do Gerador Eletrostático de Kelvin.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

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. (3.13) 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.

## 3.2 DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA UTILIZADA PARA A PREPARAÇÃO E EXECUÇÃO DA OFICINA DE ENSINO DE ELETROSTÁTICA

Nosso produto educacional, apresentado no Apêndice A dessa dissertação, consiste de um curso sobre eletrostática em que utilizamos a metodologia de Oficina de Física. Neste são montados experimentos simples, mas elucidativos, sobre o ensino da eletrostática o qual denominamos de Oficina de Ensino de Eletrostática. Esta Oficina foi desenvolvida usando a sequência didática tradicional do currículo de Eletricidade do ensino médio. 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 no contra período escolar como Oficina, como no período escolar, fazendo parte da grade curricular. Esta proposta foi projetada 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 pêndulo de Fracastoro, 1 versório de Gilbert, 1 versório de Assis, 1 pêndulo elétrico e 2 bases feitas de gesso.

### 3.2.1 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.

### **3.2.2 Divulgação da Proposta nas Escolas e Preparação do Cenário 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.

Nossa proposta foi divulgada nas escolas particulares de Campinas e região, via e-mail, veja Apêndice B ao final desta dissertação. Após conversas e agendamentos, duas escolas particulares se interessaram em aplicá-la em momentos diferentes. Numa etapa posterior a escola em que lecionamos também permitiu sua aplicação.

O projeto, como modelo de Oficina, foi aplicado no contra período escolar, durante 3 meses, com um encontro por semana de duração de 2 horas cada. Reforçando que o objetivo era testar o projeto, a saber: construir com os alunos as práticas/montagens a partir de materiais de baixo custo e sucata, ao mesmo tempo em que construiríamos os conceitos da Eletrostática. Na primeira escola aplicamos o projeto, como dissemos acima, no contra período da tarde, mas já começamos com uma proposta mais audaciosa. O público alvo seria alunos interessados das três séries do ensino médio para mostrar que este projeto não exigia pré-requisito e que tudo o que fosse construído poderia ser feito independentemente da série do aluno.



A partir da experiência e do fator entusiasmo com a primeira escola, repetimos o procedimento com a segunda escola, acrescentando o diário de bordo para acompanhamento e anotações da Oficina. Ao final desta segunda Oficina surgiu a oportunidade de aplicarmos o projeto na escola onde lecionamos. Repetimos a aplicação da Oficina da mesma forma como foi feita na segunda escola na parte da tarde com os alunos das três séries do ensino médio. No ano seguinte aplicamos o projeto pela quarta vez na nossa escola, não mais no contra período, como uma oficina, mas incluindo-o na grade horária, no período normal de aula, durante 1 semestre com 2 aulas quinzenais intercalando com as aulas teóricas.

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.

### **3.2.3 Lista de Materiais e Primeiros Passos**

Para a execução desta proposta é necessário que a escola também participe, 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.

No início da oficina a proposta é apresentada aos alunos pelo professor como forma de esclarecimento (Ver Apêndice C). O professor entrega o 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. Isso é feito para simplificar o trabalho do professor quando precisar recolher os diários. Acompanhar o que os alunos produzem nos permite atualizar e alterar roteiros, aprofundando 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 ele. 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.

No produto educacional, apresentado no Apêndice A, apresentamos alguns comentários para auxiliar o professor na descrição científica dos fenômenos observados e a conduzir a oficina de forma mais eficiente. Na próxima seção descrevemos como cada experimento da oficina pode ser construído e quais perguntas podem ser realizadas durante a execução de cada um deles com os alunos.

### 3.3 CONSTRUÇÃO DOS EXPERIMENTOS DA OFICINA DE ENSINO DE ELETROSTÁTICA

Todos os detalhes com relação ao tempo de construção e execução dos experimentos da oficina de ensino de eletrostática são apresentados no nosso produto educacional, veja o

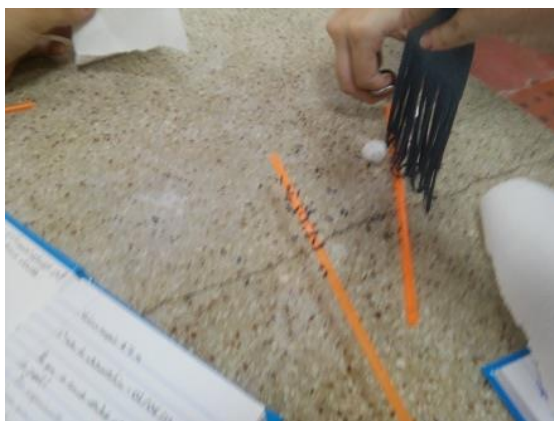
Apêndice A. Nesta seção apresentamos apenas a montagem e algumas sugestões de perguntas que podem ser feitas aos alunos durante estes procedimentos.

### 3.3.1 Conhecendo um Indutor de Cargas

Iniciamos a oficina fornecendo para cada aluno 1 canudo, 1 folha de papel toalha, 1 tesoura, 1 embalagem de bala de coco, 1 régua de acrílico de 20 cm e 1 tubo de caneta esferográfica da marca *BiC*.

Corta-se as pontas do papel desfiado da embalagem de bala de coco em pequenos pedaços, no máximo 2 mm x 2 mm. O canudo deve ser atritado com o papel toalha, como se estivesse limpando o mesmo. O canudo é o indutor e o papel o atritador. Esse procedimento faz com que o canudo fique carregado. Isso pode ser observado quando aproxima-se o canudo dos pedaços de papel, os quais serão atraídos, como mostrado na figura 3.12. Outros materiais podem ser utilizados como indutores, como a régua de acrílico e o tubo de caneta, e também atritadores, como o cabelo.

**Figura 3.12** - Pequenos pedaços de papel seda na cor preta atraídos pelo indutor-canudo.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Nesta prática sugerimos que o professor faça algumas perguntas como:

- *Por que o indutor atraiu os pedaços de papel e o canudo não atritado não os atraiu?*
- *Será que todos os materiais podem ser atraídos pelo indutor? Como podemos verificar isso?*

Após conhecer o efeito de um indutor peça aos alunos que aproximem o indutor de outros materiais, como papel alumínio, restos de madeira provenientes do apontamento de um

lápiz, ou mesmo o grafite, uma formiga pequena, mosquito, filete de água numa torneira, etc. Veja alguns exemplos na figura 3.13.

**Figura 3.13** – À esquerda mostramos um indutor atraindo uma pequena abelha e à direita o mesmo atraindo um filete de água.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Outras perguntas podem ser feitas como:

- *Pôde-se observar que os materiais que são atraídos apresentam pouca massa. Por quê?*
- *Qual o sinal da carga líquida adquirida pelo canudo após este ser atritado com o papel toalha?*
- *O que o indutor atraiu com sua carga líquida negativa nos pequenos pedaços de materiais?*
- *Como pode um indutor, mesmo estando "longe" dos induzidos, atraí-los? Ou de outro modo, de que maneira as cargas negativas atuam nos pequenos pedaços de materiais?*

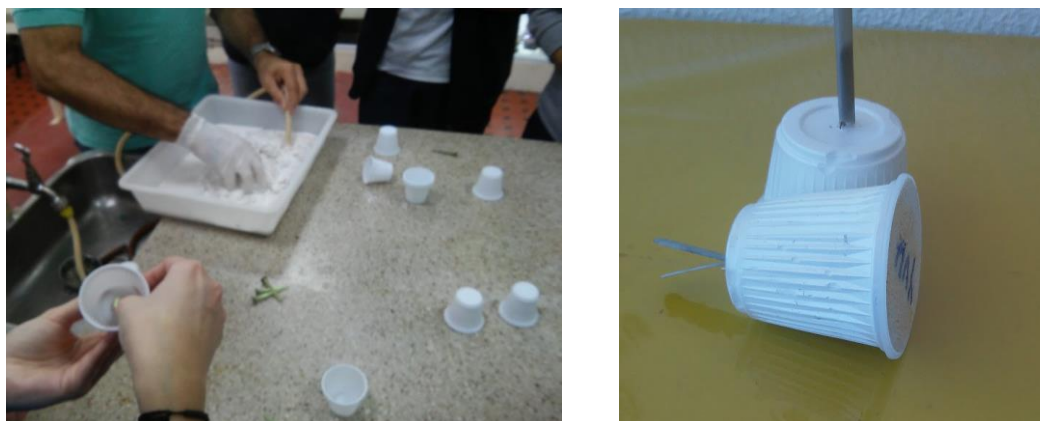
### 3.3.2 O Pêndulo Eletrostático e o Perpendículo de Fracastoro

Para a construção de um pêndulo eletrostático foi necessário confeccionarmos duas bases de gesso por aluno. Estas servirão para outras práticas.

Distribui-se dois copinhos plásticos, 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 3.14.

**Figura 3.14** – 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.

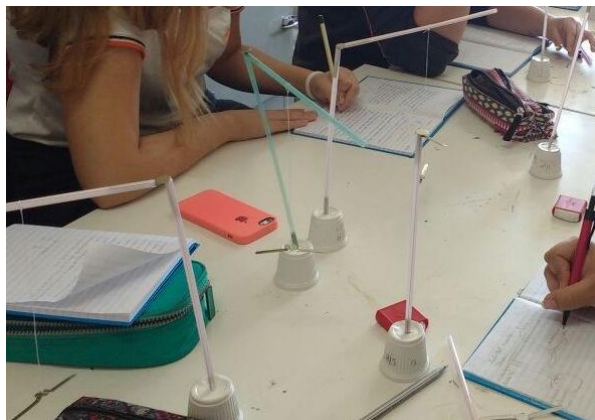


Fonte: Elaborada pelo autor

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. Uma dica para uma secagem eficaz é colocar 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 é espetar as bases em uma folha de isopor de um dia para o outro. Esta base poderá ser utilizada para sustentar diversas práticas, como no exemplo mostrado na figura 3.15.

Para a 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. 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 3.16.

**Figura 3.15** - Bases de gesso em uso durante as anotações no diário.



Fonte: Elaborada pelo autor

**Figura 3.16** – Pêndulo elétrico composto pela base de gesso, canudos, fio de seda e pedaço de papel em forma circular.

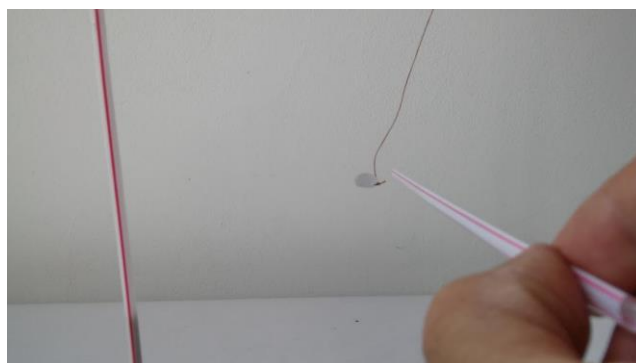


Fonte: Elaborada pelo autor

O experimento com o pêndulo é realizado utilizando um indutor, como o canudo, e verificando o efeito da aproximação do mesmo com o pedaço de papel preso no fio. Veja o exemplo na figura 3.17.

- *Como explicar a atração provocada pelo indutor sobre o papel circular, seguida de uma repulsão?*



**Figura 3.17** – Indutor repelindo papel circular do pêndulo elétrico.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

A estrutura do pêndulo elétrico pode ser aproveitada para a montagem de um instrumento extremamente sensível para detectar a presença de cargas elétricas nos indutores, chamado de perpendicular de Fracastoro. Este foi montado por Girolamo Fracastoro por volta de 1546. Os materiais necessários são, um grampo e um pedaço de fio de algodão de 25 cm. 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 3.18. Para manter o grampo em equilíbrio na horizontal, basta ajustar as hastes do mesmo.

**Figura 3.18** – 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.

- Ao aproximar um indutor do perpendicular ocorre movimentação de cargas elétricas nas hastes do grampo metálico? Explique.

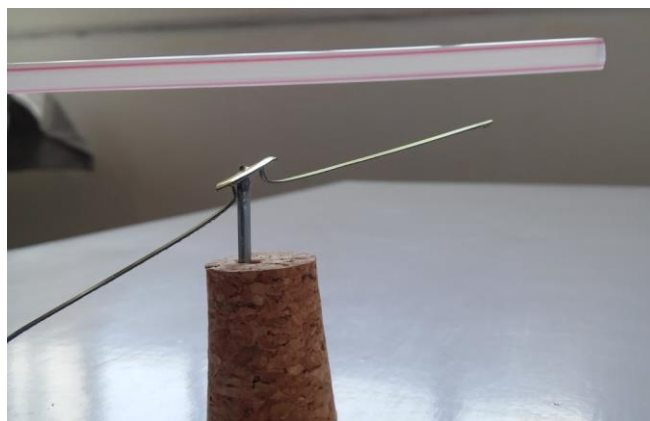
- Por que o grampo move-se para a esquerda mesmo sabendo que age sobre o grampo duas forças, uma de atração e outra de repulsão?
- Qual a relação entre as intensidades das forças de atração e repulsão provocadas pelo indutor no grampo?
- Qual destas duas forças é maior em módulo?

### 3.3.3 Detecção de Campos Elétricos utilizando o Versório de Gilbert

Para a construção do versório de Gilbert são necessários um grampo bailarina, uma rolha, um prego e um alfinete de cabeça. Após abrir as hastes do grampo usa-se o martelo e o prego para se fazer uma pequena depressão. Esta deve ser feita no centro da parte metálica circular do grampo de onde saem as hastes, mas sem furá-lo, como mostrado na figura 3.19.

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 para que a mesma tenha melhor sustentabilidade sobre uma superfície. Veja a figura 3.19.

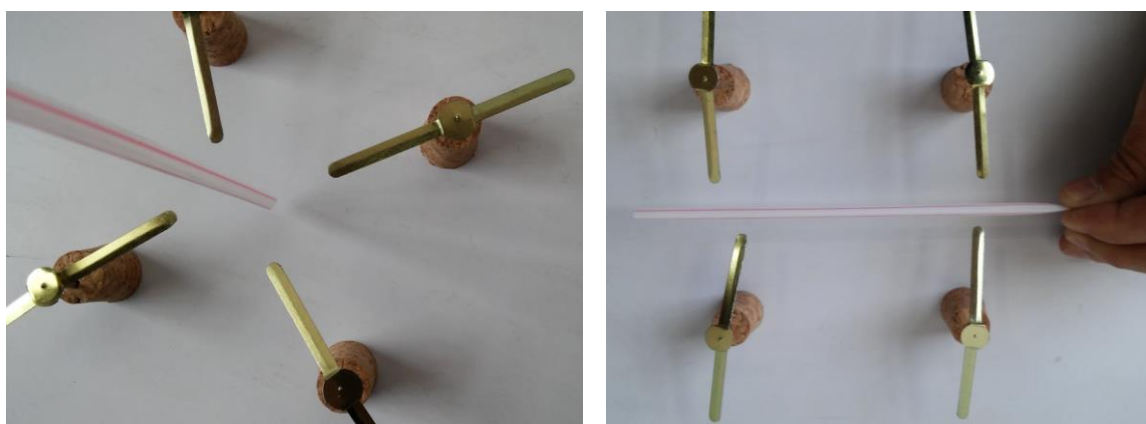
**Figura 3.19** – À esquerda mostramos a depressão suave feita com prego e martelo no centro da parte circular do grampo sem furá-lo. À direita tem-se o versório de Gilbert composto por uma rolha, em formato de tronco de cone, perfurada por um prego. Na ponta do prego é colocado um grampo equilibrado por uma pequena depressão no centro de sua parte circular.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Após a construção do versório de Gilbert aproxime um indutor do mesmo e veja que ele se comportará como uma bússola elétrica, apontando na direção do indutor. Isso permite que o campo do indutor utilizado possa ser mapeado pelo versório. Note a disposição dos versórios em torno do indutor na figura 3.20. Estes sugerem que existem linhas de forças dispostas radialmente em torno do indutor, cuja origem é o próprio indutor, independentemente da posição do mesmo.

**Figura 3.20** – À esquerda é feita a verificação do campo elétrico com o indutor colocado na vertical. Note que os versórios ficam alinhados na direção radial, como se a carga estivesse concentrada no indutor. À direita é mostrado o mesmo efeito com o indutor posicionado horizontalmente.



Fonte: Elaborada pelo autor

### 3.3.4 O Versório de Assis

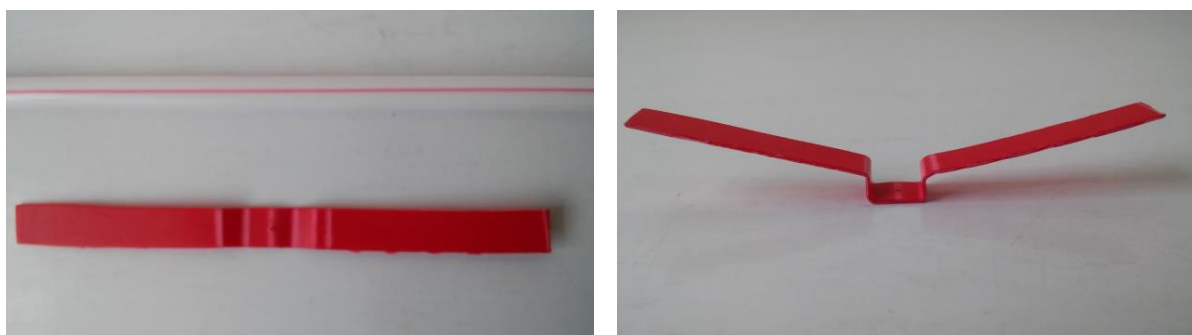
O versório de Assis é uma versão do versório de Gilbert, mas neste é utilizado um material feito de plástico para a confecção das hastes no lugar de metal. Este versório foi construído para mostrar que um detector de campo não precisa ser necessariamente de metal. Durante as discussões fica evidente que no versório de metal as cargas negativas são repelidas pelo indutor, carregado negativamente, para a outra extremidade do versório gerando uma corrente elétrica.

*- Se o versório for construído com material plástico, ainda existirá corrente elétrica, ou seja, ainda haverá movimentação de elétrons?*

Para a construção do versório de Assis serão necessários 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, com dimensões de 80 mm de comprimento por 5 mm de largura, podem ser obtidas de tampas plásticas provenientes de caixas de sorvete de 1 ou 2 litros. Para que a fita fique com o aspecto do grampo metálico une-se suas pontas dobrando levemente a fita ao meio de modo a deixar uma marca esbranquiçada no plástico. Esta marcação indica o centro de massa da fita. Esticando-se a fita faz-se duas leves dobraduras com uma distância de 5 mm de cada lado da linha central e em seguida faz-se mais duas, uma de cada lado com a mesma distância de 5 mm. Dobra-se a fita nas 4 linhas demarcadas. Veja figura 3.21.

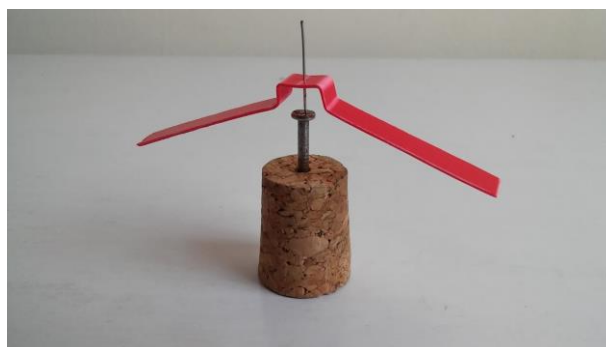
**Figura 3.21** – À esquerda mostramos a marca esbranquiçada da fita plástica por ter sido dobrada ao meio e à direita a mesma fita dobrada no formato do grampo aberto, como no versório de Gilbert.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Em seguida atravessa-se a região central da fita com um alfinete o qual será equilibrado sobre a cabeça de um prego fixado a uma rolha, como mostrado na figura 3.22. Com o versório pronto é só iniciar os testes com os alunos e verificar se o mesmo possui o mesmo comportamento e sensibilidade na presença do campo de forças do indutor que o versório de Gilbert.

**Figura 3.22** – Versório de Assis pronto para ser utilizado.



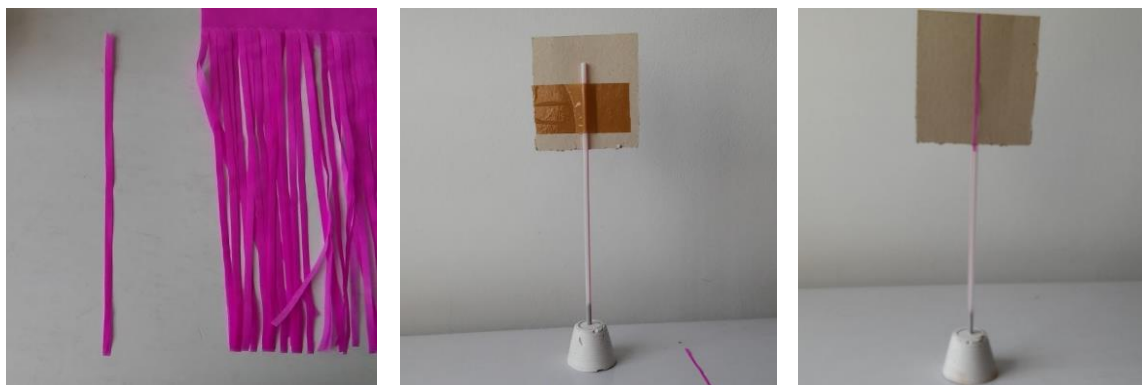
Fonte: Elaborada pelo autor.

- Por que os versórios de Gilbert e de Assis são tão sensíveis na presença de um indutor?
- Existe diferença entre o plástico e o metal que compõem as hastes dos versórios quando os mesmos são submetidos a carga-campo do indutor?

### 3.3.5 O Eletroscópio

Para a construção do eletroscópio aproveitaremos a base de gesso e utilizaremos adicionalmente um corte de cartolina ou papel cartão, tira de papel seda, canudo e cola. Corta-se pedaços de papel cartão ou cartolina com dimensões de 8 cm por 8 cm. Esta peça quadrada deve ser fixada 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 a base de gesso, confeccionada anteriormente, 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-se o cuidado de não escolher partes amassadas, e cole-o na superfície oposta ao canudo. Veja a sequência de montagem na figura 3.23.

**Figura 3.23** – 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.

Para carregar o eletroscópio é necessário primeiramente carregar o indutor por atrito e passar o mesmo na parte superior do eletroscópio, ou seja, o eletroscópio é carregado por contato. O procedimento deve ser feito como se estivéssemos tirando o excesso de manteiga de uma faca (indutor). Na figura 3.24 mostramos o eletroscópio carregado através do procedimento descrito acima.

**Figura 3.24** – À direita mostramos a vista lateral do eletroscópio e à esquerda o eletroscópio carregado por contato utilizando um indutor.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para descarregar o eletroscópio basta encontrar o dedo na parte de cima do eletroscópio carregado. Veja algumas sugestões de perguntas:

- Explique porque a fita de papel seda se afasta da cartolina.
- Por que a fita de papel seda volta a se aproximar da cartolina quando encostamos o dedo no eletroscópio?
- Para onde foi o excesso de cargas do eletroscópio?

O eletroscópio também pode ser descarregado utilizando outros materiais. Após carregar o eletroscópio com o indutor tente descarregá-lo utilizando materiais 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, etc. 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 e veja o que acontece. Na figura 3.25 mostramos como exemplo o eletroscópio sendo descarregado por um chinelo de borracha.

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

**Figura 3.25** – Eletroscópio sendo descarregado por um chinelo de borracha.



Fonte: Elaborada pelo autor.

### 3.3.6 O Gerador Eletrostático de Kelvin

O gerador eletrostático de Kelvin pode ser construído junto com os alunos por etapas, pois este experimento é muito elaborado para ser construído em apenas um encontro.

Para a construção da 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 3.26.

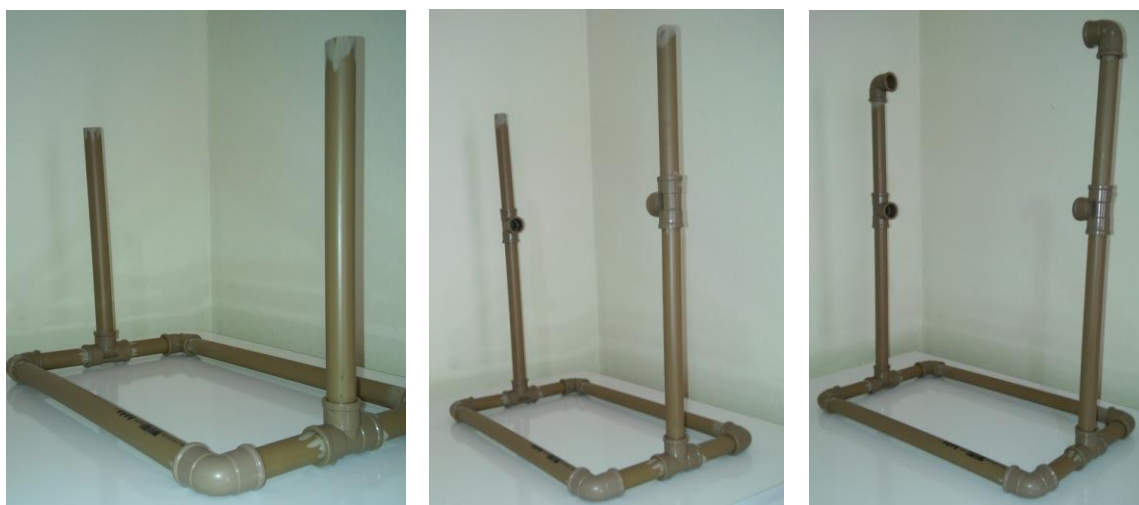
**Figura 3.26** – À esquerda mostramos as peças utilizadas para a construção da base do gerador eletrostático. Note que as peças já estão cortadas, lixadas e prontas para serem encaixadas. À direita mostramos a base pronta. Note que os T's são fixados com o encaixe central para cima.



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 3.27.

**Figura 3.27** – 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.

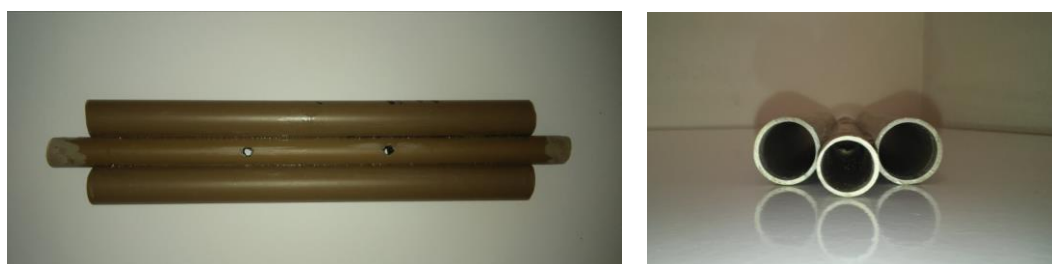


Fonte: Elaborada pelo Autor.



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 3.28.

**Figura 3.28** – 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 tarde. 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 3.29 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 3.30.

**Figura 3.29** – Estrutura do gerador eletrostático com a base do reservatório encaixada.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

**Figura 3.30** – 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 3.31.

**Figura 3.31** – 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 3.32 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.

**Figura 3.32** – Estrutura do gerador de Kelvin com os reservatórios inferiores, latas de leite, conectados aos indutores, latas de atum, 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 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 3.28, 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.

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 3.33.

Na figura 3.34 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.

**Figura 3.33** – 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 3.34** – Vista lateral e frontal do Gerador eletrostático de Kelvin pronto para ser colocado em funcionamento.



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Após a montagem do gerador com os alunos é iniciada a parte de experimentação e investigação de seu funcionamento. O assunto pode ser conduzido a partir de várias questões colocadas aos alunos, como as sugeridas a seguir:

- Por que o gerador eletrostático não funciona de maneira adequada em dias úmidos?
- Como o indutor circular da direita pode ser carregado?
- Como e com que carga as gotas da direita deixam o canudo?

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

O carregamento dos reservatórios inferiores, compostos pelas latas de leite, pode ser verificado utilizando o eletroscópio construído anteriormente.

- *Podemos dizer que o afastamento entre a haste de papel seda e a cartolina no eletroscópio é provocada por forças de repulsão entre cargas negativas? Justifique!*
- *O que provoca a aproximação da haste do eletroscópio junto a cartolina?*

Peça aos alunos para verificar que a centelha observada entre os terminais do gerador é periódica. Para determinar o intervalo de tempo entre uma faísca e outra utilize um cronômetro, relógio ou celular.

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

A maior parte dos estudos realizados até o momento possui um caráter mais qualitativo. Estes são feitos a partir de perguntas e respostas conduzidas pelo professor/mediador através da observação do fenômeno e do modelo eletrostático utilizado. As próximas perguntas têm o objetivo de trabalhar os conceitos da eletrostática que envolvem o funcionamento do gerador eletrostático de Kelvin de uma maneira mais quantitativa.

- *Sabendo que a diferença de potencial necessária para que o ar se torne condutor é da ordem de  $3 \times 10^6$  volts por metro, qual o valor da diferença de potencial elétrico nos terminais do gerador de Kelvin construído?*
- *Qual o valor do potencial elétrico em cada terminal?*

- Qual região do gerador possui um potencial aproximado de 3.000 volts, só o terminal ou todo o conjunto recíproco formado pelo indutor, lata/reservatório e fios?
- Como devemos proceder para determinar a quantidade de cargas elétricas  $Q$  distribuídas ao longo da superfície de um destes conjuntos recíprocos?
- A partir do valor da carga  $Q$  e sabendo que a carga elementar é dada por  $e = 1,602 \times 10^{-19}C$ , determine a quantidade de cargas elétricas elementares (elétrons ou prótons) espalhadas pela superfície do gerador de Kelvin.
- 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.

Maiores detalhes sobre os procedimentos de montagem e da aplicação dos experimentos da oficina de eletrostática com os alunos são fornecidos no nosso produto educacional, veja o Apêndice A. No próximo capítulo apresentamos o relato da aplicação da nossa proposta em sala de aula.

# Capítulo 4

## APLICAÇÃO DA OFICINA DE ENSINO DE ELETROSTÁTICA NO AMBIENTE ESCOLAR

---

---

A oficina de ensino de eletrostática foi aplicada em três escolas particulares de Ensino Médio do interior do estado de São Paulo, todas no contra período, na parte da tarde. O espaço cedido pela escola foi o laboratório de projetos. Nós trabalhamos todos os experimentos da oficina com 30 alunos das três séries do ensino médio. Nesta aplicação a escola financiou a proposta, fornecendo R\$ 35,00 por aluno. Apesar de termos trabalhado todo o conteúdo da oficina, finalizando a mesma com a montagem do gerador eletrostático de Kelvin, nós ainda não havíamos exigido o uso do diário de bordo. Os alunos tomaram nota dos experimentos utilizando algumas folhas soltas de caderno. Nós também não havíamos preparado um questionário muito elaborado para discutir os conceitos abordados durante a execução da oficina.

Na segunda escola não houve ajuda de custo para a realização da oficina. Apesar disso, os alunos se mostraram empolgados com a proposta e decidiram pagar R\$ 35,00 cada um para a compra dos materiais. O espaço utilizado para as práticas foi o laboratório de física/química/ciências e a proposta foi aplicada para 20 alunos das três séries do ensino médio. Para esta turma nós exigimos o diário de bordo sendo possível desenvolver melhor o trabalho com questionários, anotações e uma melhor dinâmica entre o professor e os alunos e entre os alunos. Nós também conseguimos discutir todos os experimentos da oficina, mas não foi possível verificar o arco voltaico no gerador de Kelvin, pois já havia começado as chuvas de verão e a umidade do ar ficou relativamente alta para realizar experimentos de eletrostática.



Nesta escola a Oficina foi montada para a feira de ciências e os alunos puderam apresentar as práticas para a comunidade de pais e alunos.

Na terceira escola a oficina também foi desenvolvida com o apoio financeiro dos alunos, com cada um pagando R\$ 35,00 para a compra dos materiais. A oficina foi aplicada para 18 alunos da segunda série do ensino médio no laboratório de física/química da escola. O diário de bordo com um questionário detalhado também foi aplicado nesta turma. Os alunos construíram todos os experimentos da oficina e foi possível observar o gerador de Kelvin em pleno funcionamento. No ano seguinte, nesta mesma escola, aplicamos a oficina pela quarta vez, incluindo a proposta na grade horária da escola. Esta foi desenvolvida no período normal de aula e teve duração de 4 meses, com 2 aulas quinzenais, intercalando as práticas com as aulas teóricas. Nesta turma poucos alunos conseguiram terminar o gerador eletrostático de Kelvin. Apesar disso, foi possível testar a proposta em sala de aula e verificar a viabilidade de se utilizar a oficina como um subsídio para o sistema apostilado, agregando uma dinâmica prática, do fazer ciência, às aulas teóricas.

Os experimentos da oficina de ensino de eletrostática foram abordados na sala de aula de uma forma investigativa. Apesar do professor ter fornecido medidas padrões e dicas essenciais para a construção dos experimentos, a exploração dos fenômenos foram conduzidas de maneira similar ao trabalho científico. Diferentemente do paradigma tradicional, em que o professor detém o conhecimento e os alunos seguem roteiros fortemente estruturados, na nossa aplicação o professor atuou apenas como um orientador, enquanto que os alunos assumiram um papel mais central durante a elaboração e testes de hipóteses, identificação de problemas e proposição de soluções, interpretação e discussão de resultados com o professor e seus colegas e registro de dados e informações no diário de bordo. Este último foi utilizado pelos alunos da mesma forma que um caderno de laboratório é utilizado para um cientista.

Este tipo de atividade experimental investigativa é classificada por Souza *et al.* (2013) como atividade de nível 1. Nas palavras dos autores:

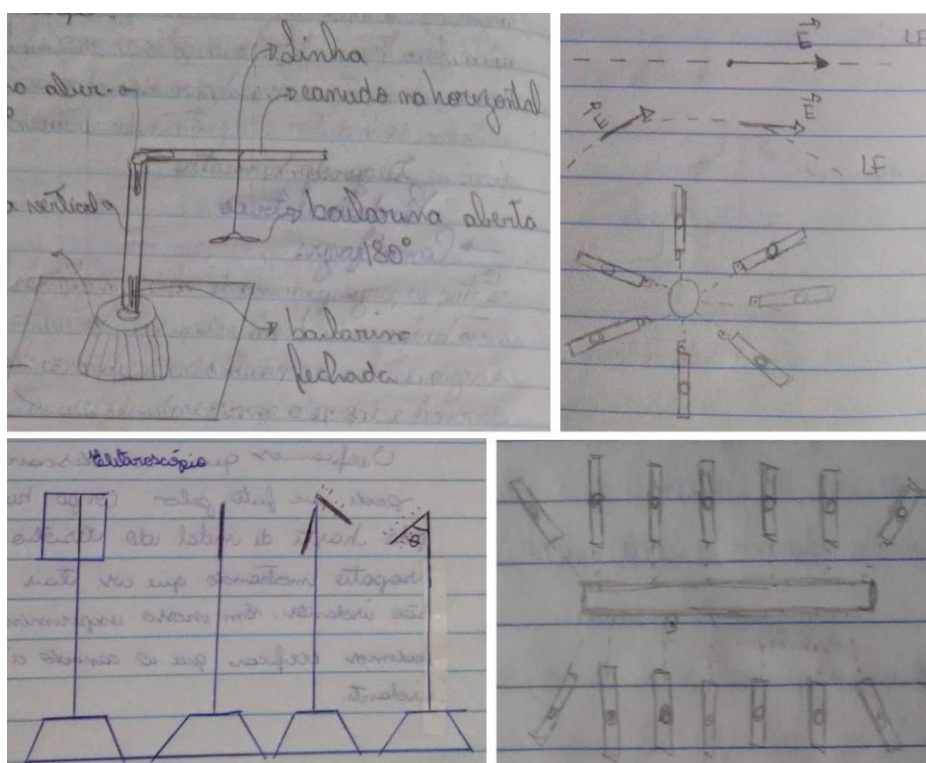
“Atividade experimental investigativa de nível 1  
[...] cabe ao professor propor uma situação problema e também fornecer o procedimento dos experimentos. Ao aluno cabe coletar e analisar os dados, elaborar uma conclusão e também propor soluções para o problema em questão.” (SOUZA, 2013, p. 24)

O diário de bordo foi utilizado pelos alunos não só para tomar nota sobre os fenômenos observados ou dimensões e medidas do experimento, mas também para a realização de esquemas ilustrativos que facilitassem o entendimento do assunto abordado. Veja alguns exemplos na figura

4.1. Nestes esquemas os alunos tinham total liberdade de anotar e ilustrar o que estava sendo observado da forma que eles achavam que estava certo. Abaixo transcrevemos a descrição de um aluno sobre a montagem de um perpendicular de Fracastoro. Veja o esquema e a descrição na figura 4.2.

*“Foi utilizado uma base de gesso, canudos ligados por um colchete e uma linha pendurando outro colchete (versório). Foi usado para estudarmos a ação do ímã sobre os materiais utilizados, como detectores de cargas.” (ALUNO, FIGURA 4.2).*

**Figura 4.1** – Exemplos de ilustrações realizadas pelos alunos em seus diários de bordo durante a execução da oficina de ensino de eletrostática.



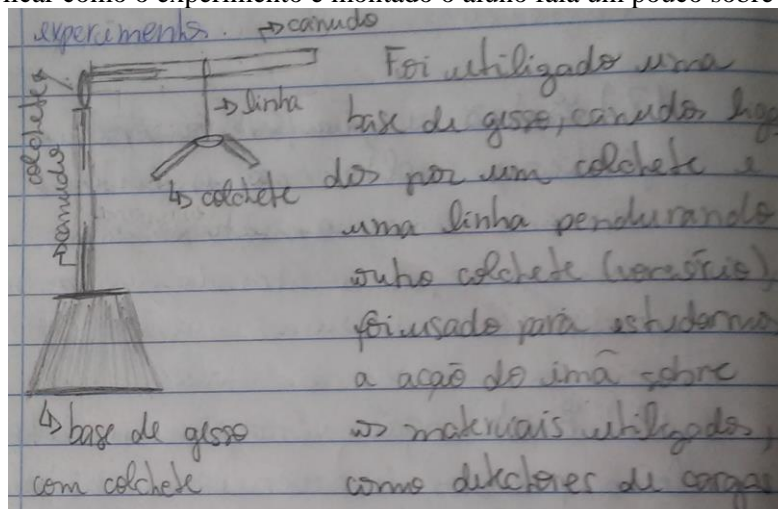
Fonte: Elaboradas pelos alunos.

Na figura 4.3 apresentamos a explicação dada por outro aluno sobre o processo de carga e descarga de um eletroscópio. Note abaixo que o aluno explica não só o funcionamento do eletroscópio, mas também o porquê de seu experimento não ter funcionado como esperado.

“Quando aproximamos um indutor carregado e encostamos no Eletroscópio observamos que o papel seda se afasta do papel cartão, mostrando que tanto o papel cartão e o papel seda são condutores, pois a carga se distribui em todo o eletroscópio. Em nosso experimento podemos perceber que realmente a umidade do ar atrapalha o carregamento, pois o papel seda levantou muito pouco. Se tivéssemos em um dia seco observaríamos esse efeito com mais intensidade. Verificamos que o descarregamento pode ser feito pelo corpo humano, pela haste de metal do versório, pelo sapato, mostrando, mostrando que esses materiais não são isolantes. Em nosso experimento só podemos verificar que o canudo pode ser um isolante.”(ALUNO, FIGURA 4.3).

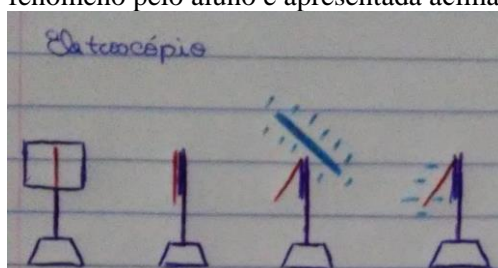
Note a atenção especial dada pelo aluno durante a elaboração do texto no diário de bordo, refletindo o trabalho realizado e potencializando a dimensão da investigação científica.

**Figura 4.2** – Descrição de um aluno sobre a montagem de um perpendicular de Fracastoro. Note que além de explicar como o experimento é montado o aluno fala um pouco sobre sua utilidade.



Fonte: Elaborada por um aluno.

**Figura 4.3** – Ilustração do processo de carga de um eletroscópio feito por um aluno. A descrição do fenômeno pelo aluno é apresentada acima.



Fonte: Elaborada por um aluno.

Além dos esquemas e ilustrações os alunos também utilizaram os diários de bordo para responder as perguntas feitas pelo professor durante a execução dos experimentos. A seguir apresentamos algumas respostas dos alunos referentes ao porque pequenos pedaços de papel eram atraídos por um canudo ou caneta atritados.

*“O atrito com as duas superfícies faz com que o indutor saia mais carregado atraindo os pedaços de papel e pedaços de plástico. Eles se ionizam e um atrai o outro.”*

*“Com a força de atrito no papel toalha e repetindo várias vezes observa-se que deixa super carregado o canudo e como os papeis estão neutros a parte mais atritada irá puxar os materiais neutros.”*

*“Ao ter um atrito entre a caneta e o cabelo eles ficam eletrizados e ao ter contato com pequenos pedaços de papel ela o atrai pois gera uma energia pois supostamente a régua é eletronegativa e os pedacinhos supostamente são positivos e por isso acaba por atraí-los.”*

*“Ao atritarmos o canudo com o papel, deixamos ele que antes não possuía carga por ser de um material isolante, agora super carregado, de cargas negativas ou positivas, ao aproximarmos o canudo do papel as cargas dele são atraídas pelas cargas opostas do papel.”*

*“Quando passamos o papel no canudo ele passa algumas forças sendo elas (prótons e elétrons), os papeizinhos cortados possui também alguma força. Prótons, elétrons ou nêutrons. Quando o canudo depois de atritado no papel e posto próximo aos papeizinhos cortados eles ‘grudam’ por conta dessas forças. Provavelmente em algum dos materiais (canudo e papel cortado) contenha mais prótons e no outro elétrons. Sabendo disso ocorre atração. Caso contrário não ia ocorrer nada (repulsão).”*

*“O atrito cria um tipo de atração entre os corpos (tem a ver com os elétrons) – atração eletrostática. A movimentação faz com que o corpo em questão (canudo) ganha ou perde elétrons, o que o deixa polarizado.”*

*“O atrito realizado no canudo, através do papel, fornece força a este; e essa força fornecida é responsável por atrair os pedaços de papel.”*

*“O canudo atrai os papeis pois o atrito provocado entre ele e o papel (grande) faz com que eletricidade estática seja acumulada, o que provoca a atração.”*

*“Com o atrito, o canudo possui carga elétrica.”*

As respostas acima foram retiradas dos diários de bordo de alunos das 3 escolas onde foram aplicadas a oficina. Nessas respostas percebe-se que cada um traz um conhecimento prévio diferente, mesmo que os alunos sejam de uma mesma realidade escolar. Apesar das

correções dos erros ortográficos, erros de semântica no texto dos alunos são recorrentes, mostrando que eles possuem dificuldades de se expressarem cientificamente para explicar o que estão observando, como no caso em que o aluno diz que não acontece nada no processo, mas coloca repulsão entre parênteses. Ou seja, para ele só acontece algo se houver atração.

É notável também a forte presença do senso comum nas respostas dos alunos. Um deles diz que energia é gerada no processo de eletrização, enquanto que outro diz que elétrons e prótons são forças que são transmitidas do papel para o canudo. Outro aluno diz ainda que o papel fornece força ao canudo através do atrito, como se força fosse uma função de único valor que pudesse ser transmitida de um corpo para outro como a energia.

A seguir apresentamos algumas respostas mais elaboradas sobre o mesmo assunto. Estas respostas foram fornecidas após várias repetições e observações de experimentos feitos com o indutor atraindo outros materiais como borracha, plástico, formiga, água, metais, entre outros, e discussões entre os alunos e entre os alunos e o professor.

*“Antes de atritar a régua ela estava neutra, após ser atritada ela fica eletrizada perdendo ou ganhando energia onde foi atritada, assim virando um íon, assim quando ela se aproxima dos papeis faz os elétrons se moverem e serem “puxados” para a régua ou serem repelidos para o outro lado, se a régua for positiva ela irá puxar os elétrons e vice e versa com os prótons.”*

*“Resumindo a régua ao se aproximar do induzido neutro começa a ter um força elétrica repelindo os elétrons para o lado oposto, assim havendo atração entre os elétrons do indutor e os prótons do induzido.”*

*“O indutor ao ser atritado, rouba os elétrons do agente de atrito ficando com um excesso de elétrons (negativo – eletronegatividade). Quando aproximado de um corpo neutro (ou eletricamente oposto), induz a separação das cargas do mesmo. Repele os elétrons para o lado oposto, deixando o outro lado positivo surgindo uma força de atração (força elétrica).”*

Estas três respostas foram fornecidas pelos mesmos alunos, respectivamente, que apresentaram as três primeiras respostas anteriores. A partir destas últimas é possível perceber uma evolução conceitual dos alunos. Aparentemente eles conseguiram compreender melhor o que aconteceu durante o processo de eletrização à luz do modelo atômico da matéria. Essas últimas respostas se aproximam mais do conhecimento proposto pela ciência.

Note como a proposta de inserir o diário de bordo nas práticas é promissora. A partir da análise das respostas dos alunos o professor pode realizar melhorias nos experimentos, intensificar o tratamento correto de alguns conceitos e ainda monitorar o que os alunos estão

assimilando em sala de aula. A partir do diário de bordo os professores podem criar condições até mesmo para quantificar a aprendizagem dos alunos no ensino de ciências.

Finalizamos este capítulo apresentando a resposta de um aluno sobre a seguinte reflexão: Como você avalia o trabalho desenvolvido pelo professor que conduziu a oficina de ensino de eletrostática? Faça sua avaliação a partir do que você aprendeu ou reteve durante a oficina.

*“Apesar do curto período da oficina e do fato de que ele começou no último semestre anual, nos possibilitou maior entendimento dos assuntos estudados, com aulas práticas temos maior interesse e foco, por serem aulas mais visuais. Acredito que esse tipo de aula deva estar presente em todos os cronogramas escolares, com mais entretenimento, há um aumento no rendimento dos alunos. A visão que temos em aulas apenas teóricas é bem menor com relação a aulas práticas e matérias como essa, que tem seu maior foco na ciência das coisas é sempre necessário atividades extras como essa. Consegui responder todo o questionário, com exceção de duas perguntas onde a resolução estava em uma aula na qual não pude comparecer.” (ALUNO).*

# Capítulo 5

## CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

---

---

Pela nossa experiência vimos que o ensino de física, quando conduzido com material apostilado, é realizado usualmente por meio de lousa ou quadro branco através de aulas expositivas, onde o assunto é reproduzido sem que se faça uma preparação a partir do que o aluno já traz como conhecimento prévio. Neste trabalho propomos a utilização das oficinas com experimentação para facilitar a tarefa do professor no ensino de eletrostática ou de outras áreas da física. Com este procedimento o aluno teve a oportunidade de participar de seu próprio aprendizado, usufruindo da riqueza da atividade científica através de propostas experimentais investigativas para minimizar os habituais reducionismos provocados pelo método apostilado.

Adicionalmente a isso foi possível verificar alguns aspectos positivos com o desenvolvimento do trabalho tais como, permitir que o ensino seja desenvolvido de forma mais dinâmica e motivadora, permitir que o aluno se alfabetize cientificamente ou inicie-se nas práticas da pesquisa escolar, tornar o aluno mais observador e atento, fazer com que o aluno pratique a escrita científica através da elaboração e testes de hipóteses fortalecendo seu poder de argumentação, permitir ao aluno desenvolver habilidades e técnicas durante a experimentação como soldar, colar, serrar, desbastar, lixar, conectar, entre outros. A oficina também foi muito útil para servir como complemento prático para a teoria trabalhada em sala de aula além de estimular um fórum de discussões entre os alunos e o professor sobre o tema estudado.

Um aspecto negativo que observamos está relacionado à forma como a oficina foi conduzida. Como esta foi apresentada aos alunos como um curso livre, não estando vinculada a nenhum processo de avaliação, alguns alunos desenvolveram os experimentos sem muita dedicação e interesse, apesar de não serem obrigados a participar. Isso mostra que

inevitavelmente existem alunos que não gostam da prática, preferem a teoria, ou apenas estudam e desenvolvem as atividades propostas à espera de uma nota.

Outro problema observado foi com relação a ausência de alguns alunos em alguns encontros. Isso fez com que estes alunos não acompanhassem a sequência de conceitos e experimentos com qualidade. Apesar dos alunos terem conseguido construir o gerador eletrostático de Kelvin, não tivemos tempo hábil para documentar as respostas dos alunos no diário de bordo referentes às perguntas sobre o funcionamento do gerador. Estas foram discutidas apenas oralmente durante a montagem do experimento.

Podemos concluir que o emprego da oficina em sala de aula, com uma abordagem investigativa, fez com que houvesse uma valorização por parte dos alunos às atividades que fujam do cotidiano, fornecendo assim uma oportunidade de tratar aplicações imediatas que elucidam situações que se apresentam no dia a dia do aluno fora da escola.

Esperamos que este trabalho seja uma motivação para os professores do ensino médio para o desenvolvimento de oficinas em outros temas da Física, ou mesmo para o aprofundamento deste estudo com práticas cada vez mais significativas e que levem o aluno a um nível de habilidade e reflexão satisfatórios para entender conceitos abstratos como carga e campo elétrico.



# REFERÊNCIAS

---

ADRIÃO, T.; GARCIA, T.; BORGHI, R.; ARELARO, L. Uma modalidade peculiar de privatização da educação pública: a aquisição de “sistemas de ensino” por municípios paulistas. *Educação e Sociedade*, 2009. Volume 30, número 108. “Disponível em:” <https://submission3.scielo.br/index.php/es/article/view/16837>. Acesso em 29 jun. 2019.

ADRIÃO, T. e PERONI, V. Público e privado na educação: novos elementos para o debate. São Paulo: Xamã, 2008. (p. 99-110).

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.

BEATY, W. J. Kelvin's Thunderstorm Lord Kelvin's water-drop electrostatic generator. 1995. “Disponível em:” <http://www.amasci.com/emotor/kelvin.html>. Acesso em 04 out. 2016.

BETANCOURT, A. M. El taller educativo. Qué es? Fundamentos, cómo organizarlo y dirigirlo, cómo evaluarlo. (2a ed.). Bogotá: Cooperativa Editorial Magisterio. 2007.

BNCC. Base Nacional Comum Curricular. “Disponível em:” <http://basenacionalcomum.mec.gov.br/abase/#medio#a-bncc-do-ensino-medio>. 2018. Acesso em 03 de out. 2018.

BRITTO, T. F. O livro didático, o mercado editorial e os sistemas de ensino apostilados. 2011. “Disponível em:” <http://www.abrale.com.br/wp-content/uploads/Livro-didático-o-mercado-editorial-e-os-sistemas-apostilados.pdf>. Acesso em 28 jun. 2019.

CAMILO, J. e ASSIS, A. K. T. Construção de um gerador eletrostático gotejante. Física na Escola, 2008. Volume 9, número 1. <http://www.sbfisica.org.br/fne/Vol9/Num1/gerador.pdf>. Acesso em 05 out. 2016.

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.

DIAS, A. C. G.; BARLETTE, V. E.; MARTINS, C. A. G. A opinião de alunos sobre as aulas de eletricidade: uma reflexão sobre fatores intervenientes na aprendizagem. “Disponível em:” [http://if.ufmt.br/eenci/artigos/Artigo\\_ID76/v4\\_n1\\_a2009.pdf](http://if.ufmt.br/eenci/artigos/Artigo_ID76/v4_n1_a2009.pdf). Acesso em 04 mar. 2018.

FIGUEIREDO, C. G. Ensino de ciências na pedagogia Waldorf: intenções e ações. 2015. “Disponível em:” <http://hdl.handle.net/11449/141883>. Acesso em 06 jul. 2019.

FIGUEIREDO, M. A. C.; SILVA, J. R.; NASCIMENTO, E. S.; SOUZA, V. Metodologia de oficina pedagógica: uma experiência de extensão com crianças e adolescentes. 2006.

“Disponível em:”  
<http://www.periodicos.ufpb.br/ojs/index.php/extensaocidada/article/view/1349/1022>. Acesso em 25 de maio 2018.

SÉRE, M-G.; COELHO, S. M.; NUNES, A. D. O papel da experimentação no ensino da Física. “Disponível em:”  
[http://www.paulorosa.docente.ufms.br/Pratica\\_III/Sere\\_Coelho\\_Nunes\\_O\\_papel\\_experimentalcao.pdf](http://www.paulorosa.docente.ufms.br/Pratica_III/Sere_Coelho_Nunes_O_papel_experimentalcao.pdf). Acesso em 17 de abr. 2018.

FREIRE, P. Pedagogia da autonomia: saberes necessários à prática educativa. São Paulo: Paz e Terra, 1996.

GASPAR, A. Atividades experimentais no ensino de Física: uma nova visão baseada na teoria de Vigotski. 1ª edição. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2014.

GASPAR, A.; MONTEIRO, I. C. C. Um estudo sobre as emoções no contexto das interações sociais em sala de aula. “Disponível em:”  
<https://www.if.ufrgs.br/cref/ojs/index.php/ienci/article/view/478/280>. Acesso em 08 de jul. 2018

HEILBRON, J. L. Electricity in the 17th and 18th Centuries – A Study in Early Modern Physics. 1999. Dover, New York, 1999.

LABURÚ, C. E.; BARROS, M. A.; KANBACH, B. G. A relação com o saber profissional do professor de física e o fracasso da implementação de atividades experimentais no ensino médio. “Disponível em:” <https://www.if.ufrgs.br/cref/ojs/index.php/ienci/article/viewFile/462/266>. Acesso em 5 jul. 2019.

LELLIS, M. Sistemas de ensino versus livros didáticos: várias faces de um enfrentamento. “Disponível em:” <http://www.abrale.com.br/wp-content/uploads/sistemas-ensino-livros-didaticos.pdf>. Acesso em 29 jun. 2019.

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.

MORAES, C. S. V. O ideário republicano e a educação: o ensino em Campinas no final do século XIX. “Disponível em:” <http://www.periodicos.usp.br/rfe/article/view/33340>. Acesso em 06 de jun. 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.

MOREIRA, M. A. Subsídios Teóricos para o Professor Pesquisador em Ensino de Ciências. “Disponível em:” <http://moreira.if.ufrgs.br/Subsidios6.pdf>. Acesso em 01 set. 2019.

NUNES, L. A. O. ARANTES, A. R. Física em Casa. 2009. “Disponível em:”  
<http://www.lla.if.sc.usp.br/ensino/down/eletrostatica-capas-1-24.pdf>. Acesso em 06 jul. 2018.

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. e 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.cienciamao.usp.br/dados/snef/oficinasdefisicaumapropo.trabalho.pdf>. Acesso em 25 de maio 2108.

SOUZA, F. L; AKAHOSHI, L. H.; MARCONDES, M. E. R.; CARMO, M. P. Atividades experimentais investigativas no ensino de química. 2013. “Disponível em:” [https://ensinointegral.webnode.com/\\_files/200000193-4b5cf4c52b/LIVRO%20ATIVIDADES%20EXPERIMENTAIS%20DE%20QU%20C3%8DMI%20CA%20NO%20ENSINO%20M%20C3%89DIO.pdf](https://ensinointegral.webnode.com/_files/200000193-4b5cf4c52b/LIVRO%20ATIVIDADES%20EXPERIMENTAIS%20DE%20QU%20C3%8DMI%20CA%20NO%20ENSINO%20M%20C3%89DIO.pdf). Acesso em 01 set. de 2019.

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. and MOSCA, G. Física para Cientistas e Engenheiros, volume 2. 6ª edição. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2006.

VERITASIIUM, EUA. Sparks from Falling Walter: Kelvin’s Thunderstorm. 2014. “Disponível em:” [https://www.youtube.com/watch?v=rv4MjaF\\_wow](https://www.youtube.com/watch?v=rv4MjaF_wow). Acesso em 10 de jan. de 2018.

VIEIRA, E. e VOLQUIND, L. Oficinas de ensino: o quê? Por quê? Como? 4ª edição. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2002.

# Apêndice A

## PRODUTO EDUCACIONAL

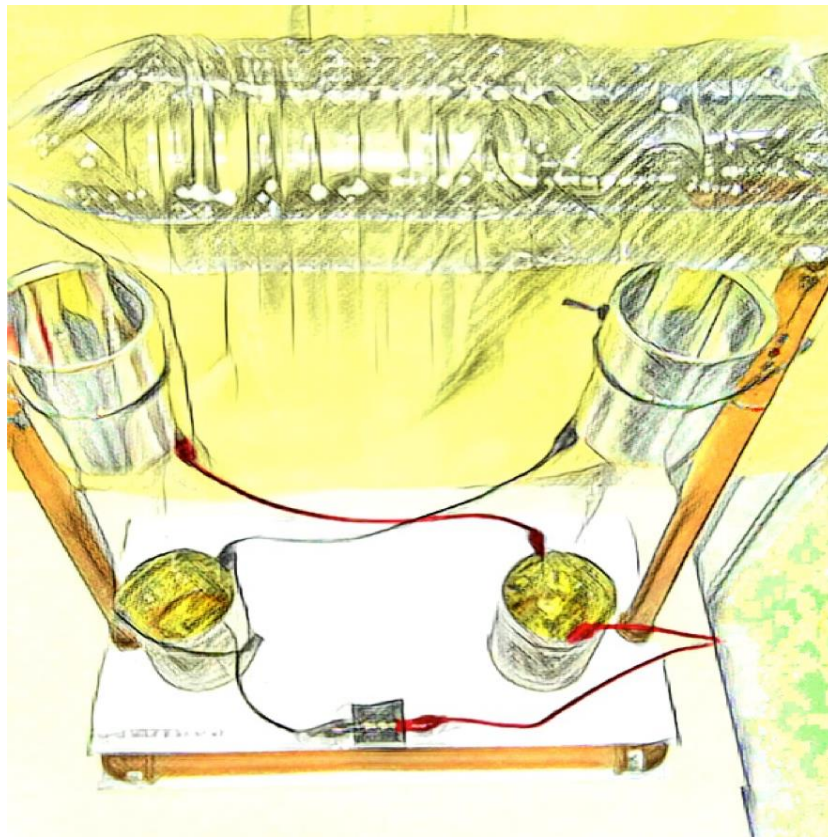
---

**MNPEF**  
Mestrado Nacional  
Profissional em  
Ensino de Física

**MNPEF** Mestrado Nacional  
Profissional em  
Ensino de Física  
Polo **ufscar** Sorocaba

**SBF**  
SOCIEDADE BRASILEIRA DE FÍSICA

### Oficina de Ensino de Eletrostática



Carlos A. Silva e James A. Souza

UFSCar – Sorocaba

Setembro de 2019

## 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.carlosaugustosilva@gmail.com

Os autores.

# Sumário

<b>A.1. Introdução à Oficina de Ensino de Eletrostática.....</b>	<b>71</b>
<b>A.2. O Uso do Diário de Bordo.....</b>	<b>72</b>
<b>A.3. Preparação do Ambiente Escolar para a Aplicação da Oficina.....</b>	<b>74</b>
<b>A.4. Lista de Materiais e Primeiros Passos.....</b>	<b>75</b>
<b>A.5. Conceitos de Física que podem ser abordados com a Oficina de Eletrostática.....</b>	<b>78</b>
A.5.1. <i>A Carga Elétrica.....</i>	78
A.5.2. <i>A Força Elétrica.....</i>	80
A.5.3. <i>O Campo Elétrica.....</i>	82
A.5.4. <i>Energia Potencial Elétrica e o Potencial Elétrico.....</i>	85
A.5.5. <i>A Capacitância.....</i>	86
A.5.6. <i>Gerador Eletrostático Gotejante de Kelvin.....</i>	91
<b>A.6. Construção dos Experimentos da Oficina de Ensino de Eletrostática.....</b>	<b>95</b>
A.6.1. <i>Primeiro Encontro: Eletrização por Atrito – Atração Elétrica.....</i>	95
A.6.2. <i>Segundo Encontro: Construção das Bases de Gesso.....</i>	99
A.6.3. <i>Terceiro Encontro: O Pêndulo Elétrico.....</i>	102
A.6.4. <i>Quarto Encontro: A Força Elétrica e sua Detecção.....</i>	105
A.6.5. <i>Quinto Encontro: Campo Elétrico e sua Detecção.....</i>	108
A.6.6. <i>Sexto Encontro: Campo e Potencial Elétricos.....</i>	111
A.6.7. <i>Sétimo, Oitavo e Novo Encontros: Construção do Gerador Eletrostático de Kelvin.....</i>	119
A.6.8. <i>Décimo Encontro: Experimentação e Aplicação do Gerador Eletrostático de Kelvin.....</i>	127
A.6.9. <i>Décimo Primeiro Encontro: Estudo Quantitativo utilizando o Gerador Eletrostático de Kelvin.....</i>	129
<b>A.7. Referências.....</b>	<b>133</b>

## **A.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.

## **A.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.

### A.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.

#### **A.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.

## **A.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.

### *A.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,

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

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.

#### A.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,

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

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

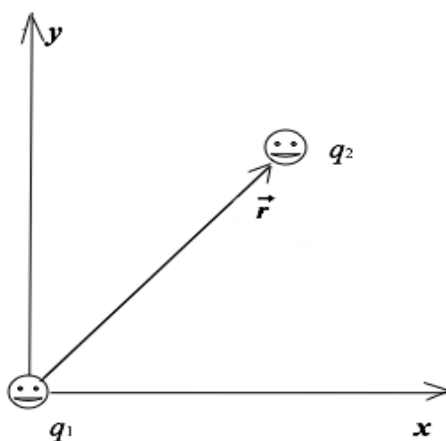
$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = k_0 = 9 \times 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2}$$

é comumente chamada de constante de Coulomb no vácuo. Isso significa que a eq. (A.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 (A.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 A.1.

**Figura A.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.(A.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.

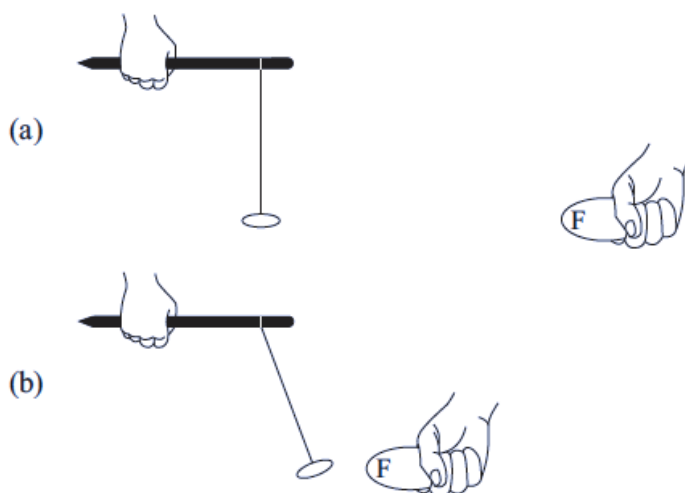
Segundo Heilbron, a partir do século XV houve uma retomada nas pesquisas feitas com o âmbar e outros materiais. O italiano Girolamo Fracastoro (1478-1553) publicou em 1546 sobre um instrumento que pode detectar corpos carregados, denominado de perpendicular de Fracastoro (ASSIS, 2010). Este dispositivo 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 A.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 A.3.

**Figura A.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 A.3** – Versório de Gilbert.



Fonte: ASSIS, 2010, p. 38.

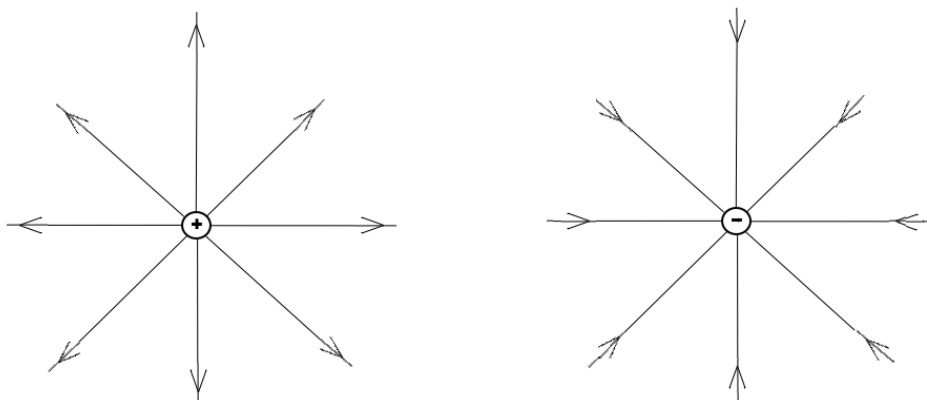
### A.5.3. O Campo Elétrico

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 A.4.

Na ilustração da figura A.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

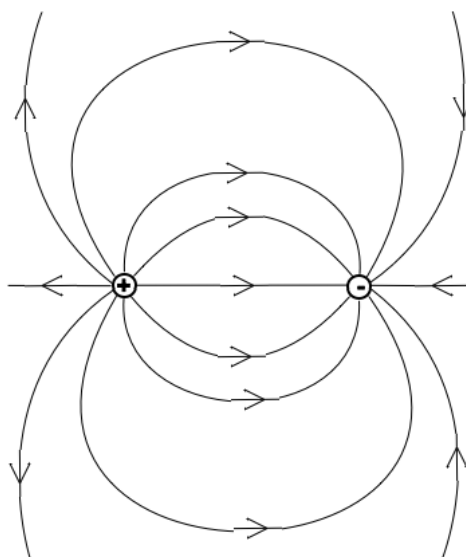
sistema composto por duas cargas de sinais opostos, como um dipolo elétrico, por exemplo, a distribuição de linhas muda em algumas regiões do espaço, veja figura A.5. Vale lembrar que o vetor campo elétrico  $\vec{E}$  é sempre tangente às linhas de forças em um ponto destas linhas.

**Figura A.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.

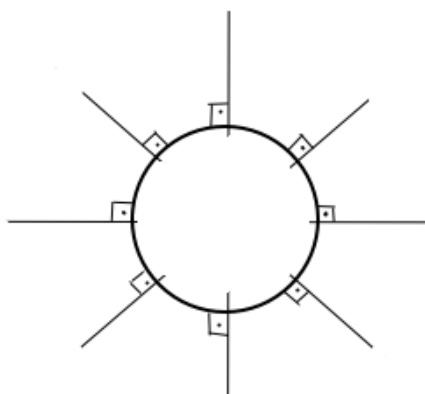
**Figura A.5** – Representação das linhas de campo em um dipolo elétrico.



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 A.6.

**Figura A.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,

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

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,

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

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. (A.2), na relação (A.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,

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

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.

#### A.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,

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

$$\frac{\tau_{A \rightarrow B}}{q_0} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{1}{r_B} - \frac{1}{r_A} \right) = V_B - V_A.$$

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,

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r} . \tag{A.6}$$

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.(A.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,  $\tau_{A \rightarrow B} = q_0(V_B - V_A) = \Delta\varepsilon_p$ ,

$$\therefore \varepsilon_p = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q_0q}{r}. \quad (A.7)$$

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,

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

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.

#### A.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. (A.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

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

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

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

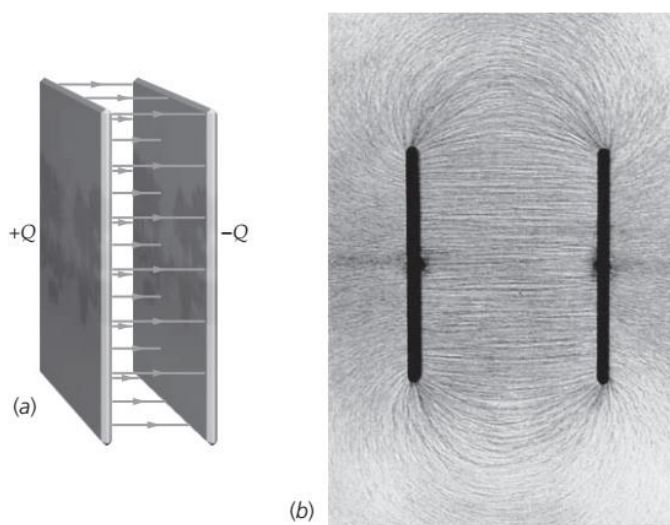
mostrando que a capacitância da esfera não depende de  $Q$  ou  $V$ , mas apenas do raio da esfera. Quando aplicamos esta equação a uma capacitância de 1 F, temos como resultado um raio de esfera de aproximadamente  $9 \times 10^6$  km, que é equivalente a uma esfera de raio 1412 vezes maior do que o 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 A.7.

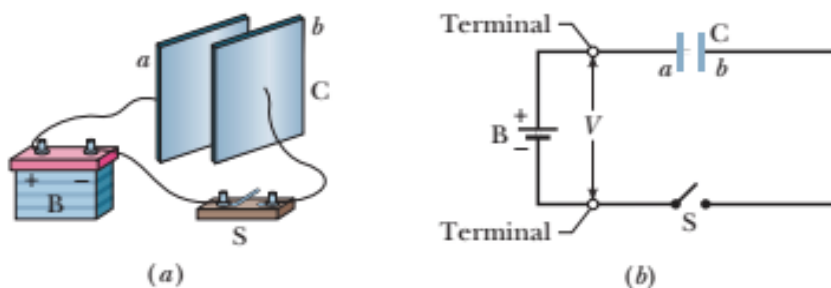
Uma forma de carregar um capacitor é colocá-lo em um circuito elétrico, ou seja, em um circuito fechado em série com uma bateria, por onde pode passar uma corrente elétrica. A bateria serve para manter uma diferença de potencial entre os terminais do capacitor, veja figura (A.8). Enquanto a chave  $S$  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 A.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 A.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,

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

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. (A.11) se reduz a

$$Q = \varepsilon_0 EA.$$

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

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

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.(A.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,

$$q_0V = q_0Ed \quad \rightarrow \quad V = Ed = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} d = \frac{d}{\varepsilon_0 A} Q$$

$$\therefore \frac{Q}{V} = C = \frac{\varepsilon_0 A}{d}. \quad (A.13)$$

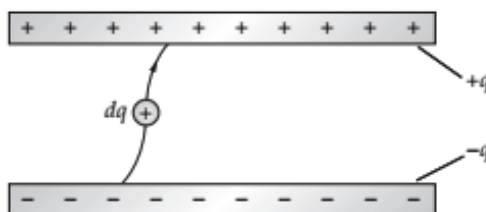
fornecendo assim, a capacitância do capacitor de placas paralelas. Note que a capacitância não depende da carga  $Q$  e da diferença de potencial (ddp)  $V$ , mas somente das dimensões do capacitor e do meio.

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 A.9, através de um aumento do potencial  $V$ , a energia potencial elétrica  $\varepsilon_p$  da carga e, portanto, do capacitor, aumenta de

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

**Figura A.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,

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

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

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

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

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

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.(A.17).

#### A.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 A.10 o gerador de Kelvin reconstruído conforme as especificações básicas de Kelvin.

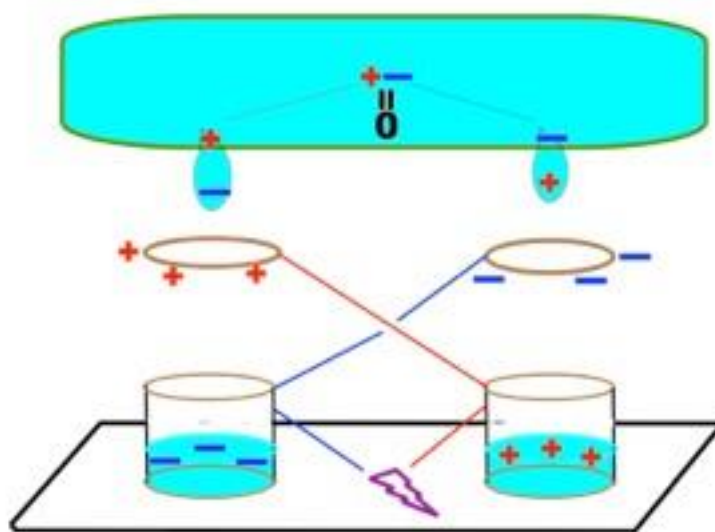
**Figura A.10** – Gerador Eletrostático de Kelvin montado.



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 A.11.

**Figura A.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. (A.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.

## A.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.

### A.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 A.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.

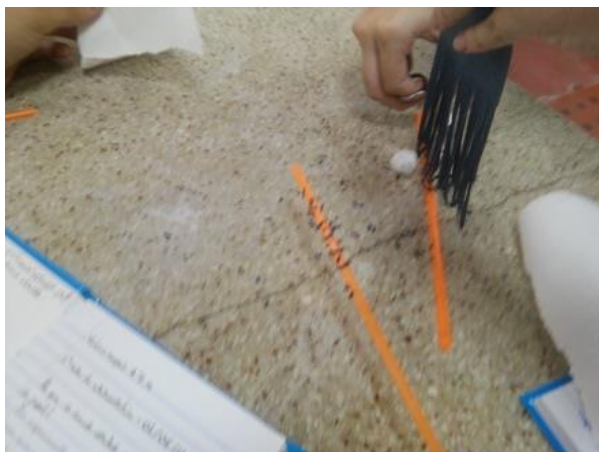
PROCEDIMENTO 4: Repete-se o procedimento 2 usando um tubo de caneta *BiC*® como indutor e observa-se o que acontece. Em seguida faz-se um esquema da prática e anota-se o que foi observado.

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



Fonte: Elaborada pelo autor.

#### A.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.

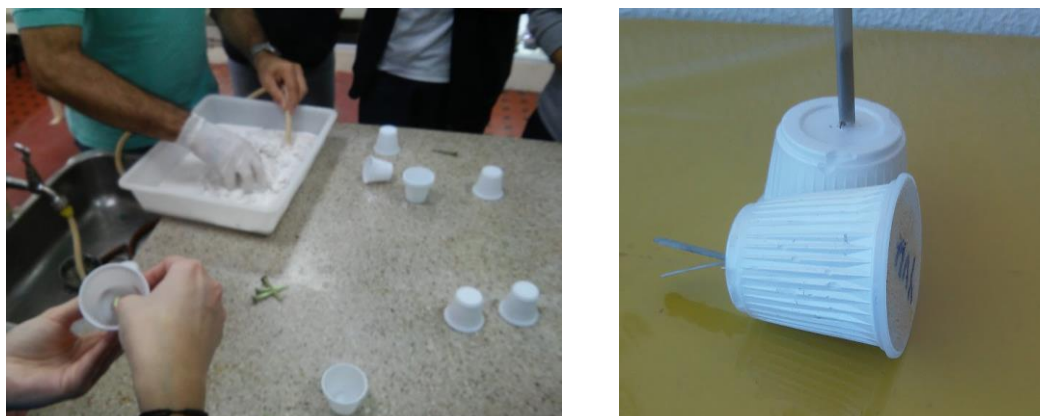
Assim como no caso da massa existe um campo associado à carga elétrica. O campo elétrico não é criado pela carga, dizer que carga existe é dizer que campo existe, não há campo sem carga e nem carga sem campo, poderíamos chamar os dois de sistema carga-campo ou no caso da Terra, massa-campo.

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 A.14.

**Figura A.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.

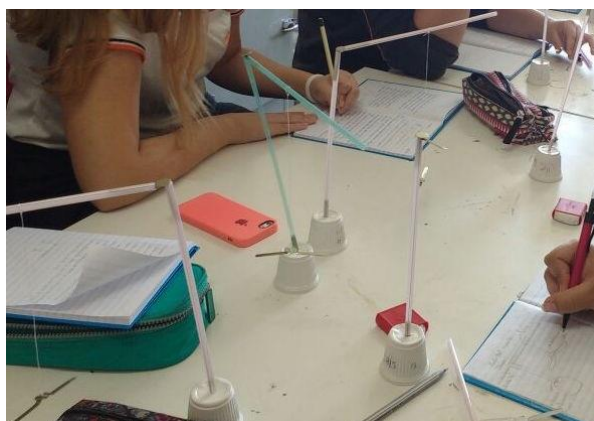


Fonte: Elaborada pelo autor

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



Fonte: Elaborada pelo autor

### A.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 A.16.

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



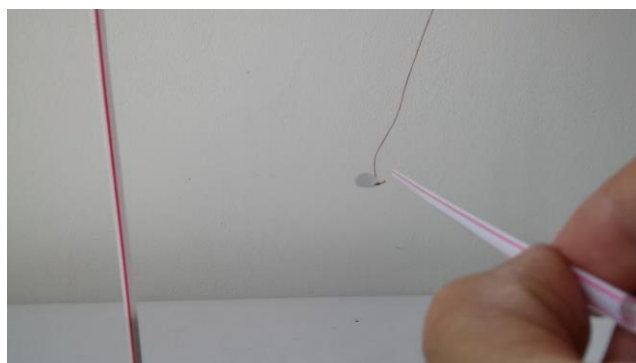
Fonte: Elaborada pelo autor

**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 A.17.

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

**Figura A.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 A.18.

**Figura A.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?*

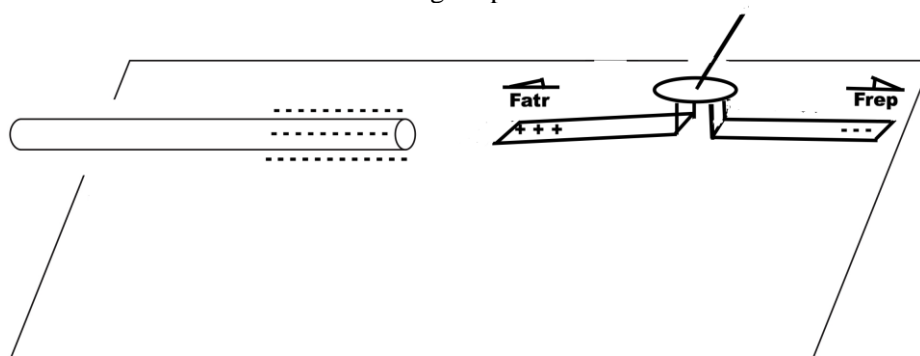
COMENTÁRIO: Após a anotação da pergunta e dado o tempo para a anotação da resposta, pede-se a um aluno que faça a leitura de sua resposta. Em seguida abre-se o diálogo e após uma conclusão anota-se no diário de bordo o texto-resposta. Nem sempre as conclusões são tiradas somente pelos alunos, pois neste 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 A.19.

**Figura A.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.

#### A.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 A.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

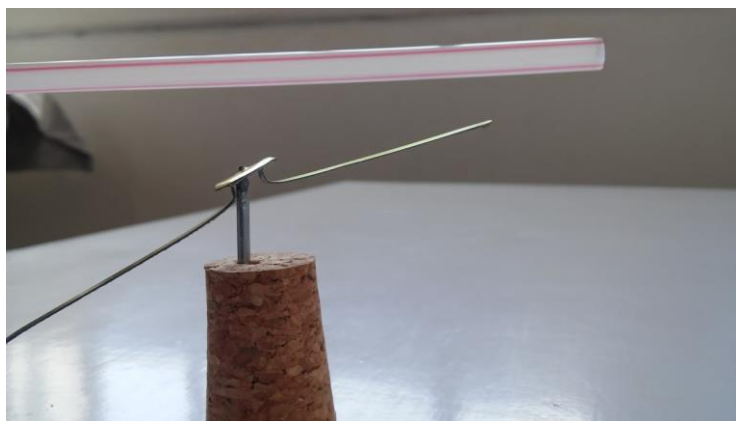
ou do prego. A maior área da rolha será a base do sistema que a mesma tenha melhor sustentabilidade sobre uma superfície. Veja a figura A.21.

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



Fonte: Elaborado pelo Autor.

**Figura A.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.

#### A.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.

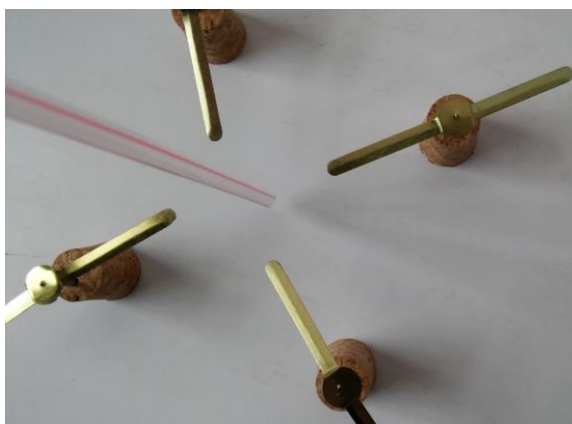
11ª PRÁTICA: Mapeamento do campo elétrico em torno da carga, simulação de uma carga pontual usando-se os versórios de Gilbert e um indutor-canudo.

**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 A.23. Observa-se o que acontece. Faz-se um esquema da prática e anota-se o que foi observado.

**Figura A.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.



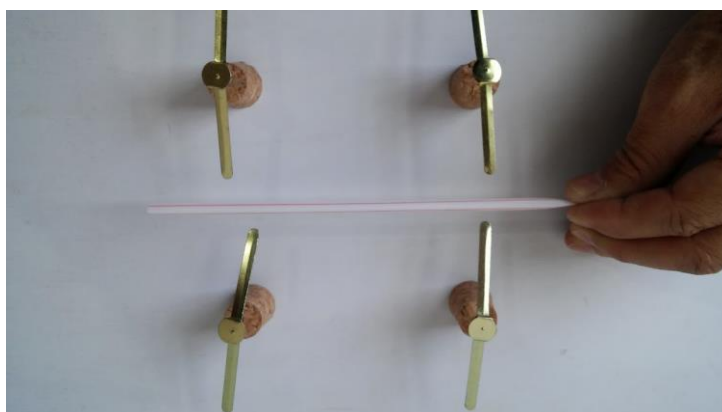
Fonte: Elaborada pelo autor

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 A.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.

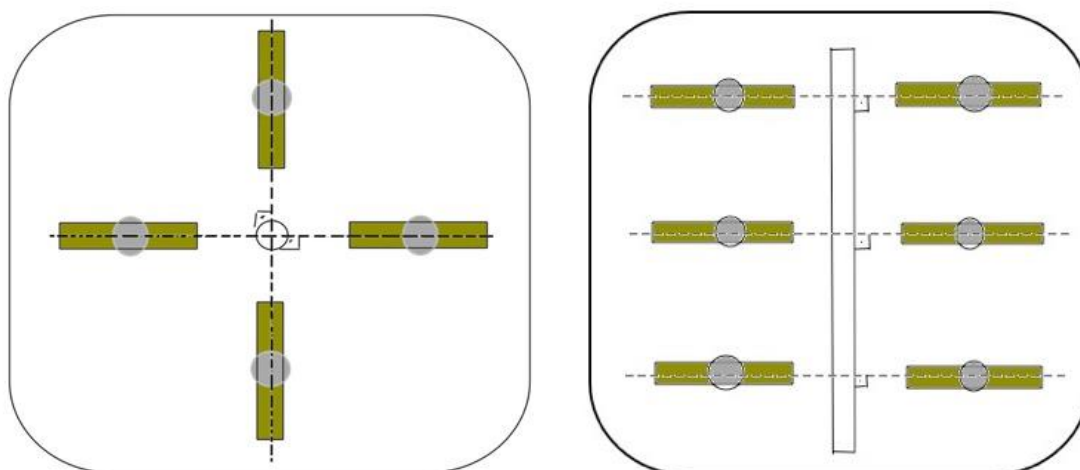
**Figura A.23** - Verificação do campo elétrico com o indutor posicionado na horizontal. Observe que os versórios ficam alinhados perpendicularmente ao indutor, como se cada ponto do indutor fosse a fonte de campo elétrico.



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 A.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.

### A.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 A.25.

**Figura A.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 A.26.

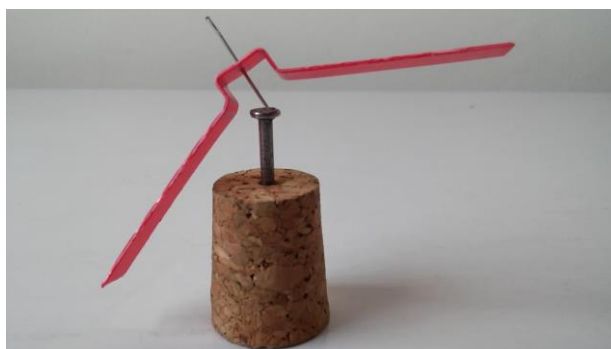
**Figura A.26** - Fita plástica dobrada no formato de um grampo aberto.



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 A.27. Se o equilíbrio foi atingido o versório de Assis estará pronto para ser utilizado.

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



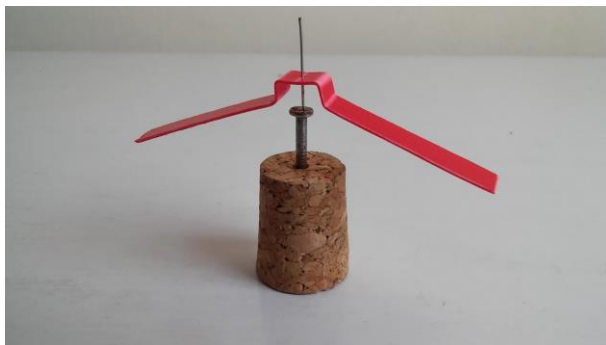
Fonte: Elaborada pelo autor.

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 A.28.

**Figura A.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:

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

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

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

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.

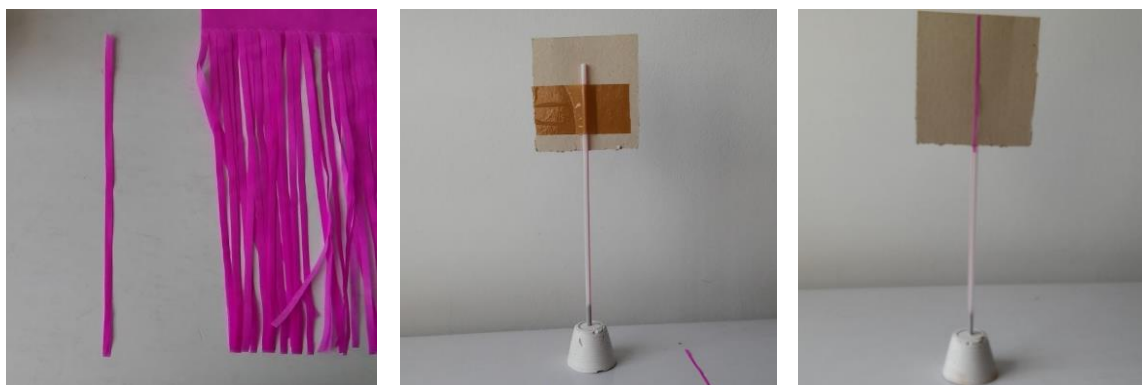
- *Como explicar a corrente elétrica nos materiais isolantes, como o plástico?*

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 A.29.

**Figura A.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 A.30.

**Figura A.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.

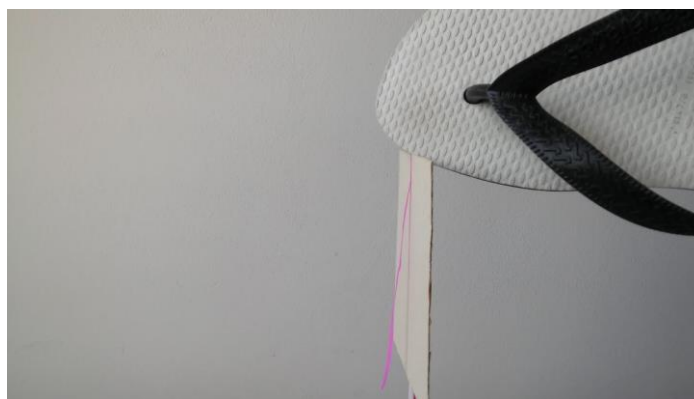
PROCEDIMENTO: Carregar o eletroscópio quantas vezes forem necessárias para, em seguida, descarregá-lo utilizando diferentes materiais, sempre segurando o material pela ponta dos dedos. Use os materiais que já se encontram na Oficina como o plástico do versório, uma rolha, o prego solto, outro pedaço 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 A.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 A.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.

#### *A.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 A.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 A.32.

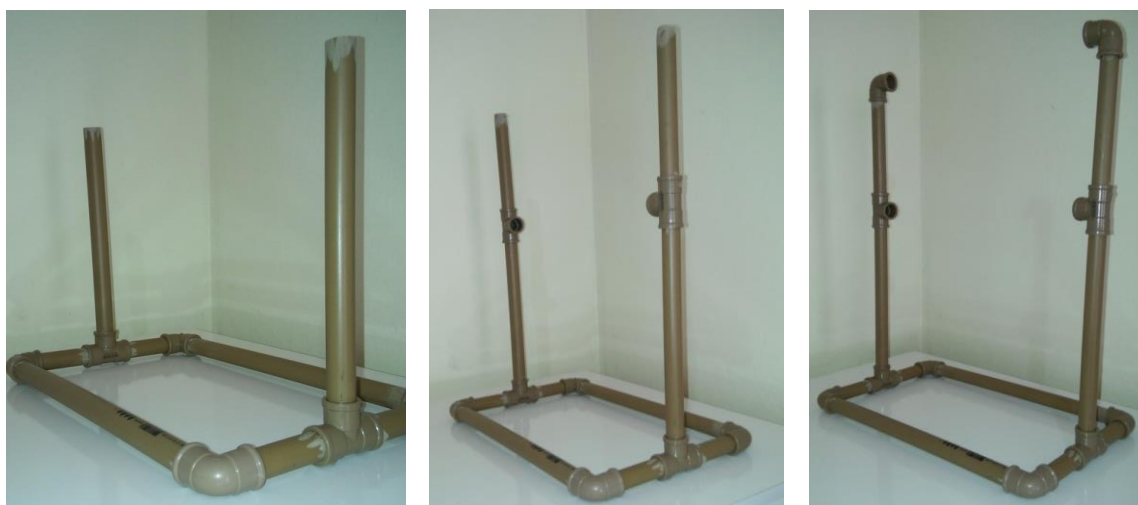
**Figura A.32** – À esquerda mostramos as peças utilizadas para a construção da base do gerador eletrostático. Note que as peças já estão cortadas, lixadas e prontas para serem encaixadas. À direita mostramos a base pronta. Note que os T's são fixados com o encaixe central para cima.



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 A.33.

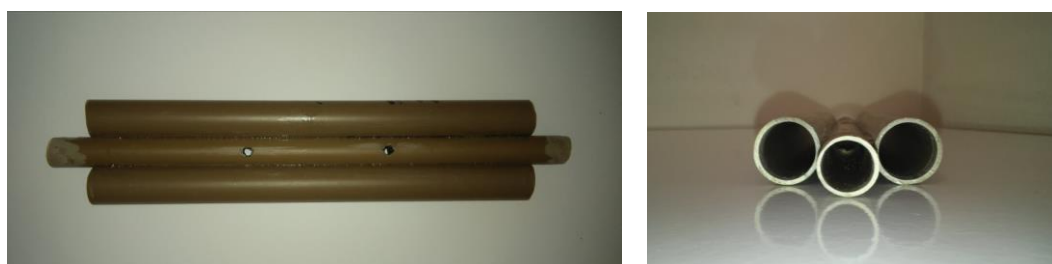
**Figura A.33** – Da esquerda para direita mostramos o encaixe das 2 peças de 25 cm nos T's da base do gerador. Em seguida são encaixados dois T's sobre estas peças, os quais ficam virados para o interior da estrutura. No encaixe superior dos T's são encaixadas outras duas peças de 16,5 cm com dois cotovelos 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 A.34.

**Figura A.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 apresentada 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 A.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 A.36.

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



Fonte: Elaborada pelo Autor.

**Figura A.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 A.37.

**Figura A.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 fuscador, 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 A.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 A.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 A.38** – Estrutura do gerador de Kelvin com os reservatórios inferiores, latas de leite, conectados aos indutores, latas de atum, 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 A.39.

Na figura A.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 A.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 A.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.

#### A.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!

#### *A.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,

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

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

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

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

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.

## A.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.cienciamao.usp.br/dados/snef/\\_oficinasdefisicaumapropo.trabalho.pdf](http://www.cienciamao.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.

# Apêndice B

## PROJETO DE ENSINO DA OFICINA DE ENSINO DE ELETROSTÁTICA

---

---

**MNPEF**  
Mestrado Nacional  
Profissional em  
Ensino de Física

**MNPEF** Mestrado Nacional  
Profissional em  
Ensino de Física  
Polo **ufisoc** Sorocaba



Campinas, 06 de março de 2017.

À Direção do Colégio

Aos cuidados da Coordenação

Venho por meio desta carta trazer uma proposta do uso do laboratório de física, com ênfase em eletrostática/eletricidade, para fins didáticos para incorporar um projeto de dissertação de mestrado na área de ensino de Física.

**OBJETIVO:** Em ambiente próprio e através de materiais de baixo custo, recicláveis e comuns, levar os alunos a perceberem que os fenômenos físicos (com ênfase na eletricidade) previstos e ensinados no material didático, acontecem em nosso cotidiano e podem ser simulados por eles mesmos. Além de agregar valor às aulas teóricas de eletricidade, este trabalho estará contribuindo no desenvolvimento das habilidades de nossos alunos na investigação e pesquisa no ensino de Física.

**DESENVOLVIMENTO:** Usando os materiais citados acima desenvolveremos equipamentos simples que permitam ao aluno descobrir, durante os experimentos, o real significado de conceitos como carga elétrica, eletrização por atrito, condução e indução, força

e campo elétrico, potencial e energia elétrica. Ao final do projeto será construído um gerador eletrostático capaz de gerar milhares de volts e conduzir energia elétrica, de forma simples e não convencional, através da combinação de um fluxo contínuo de cargas em um circuito fechado.

**EQUIPAMENTO FINAL:** Denominado Gerador Eletrostático de Kelvin, vem sendo reconstruído por mim, a partir da ideia original de Lord Kelvin, através do Mestrado Profissional Em Ensino De Física – PROFIS-So da Universidade Federal de São Carlos, UFSCar, *campus* Sorocaba <http://www.mnpefsorocaba.ufscar.br/>.

**METAS:** Conseguir construir, junto com a turma de alunos interessados, um gerador que possibilite observar a energia produzida através do fenômeno de carregamento eletrostático; que os alunos consigam entender e explicar o funcionamento desse equipamento e os fenômenos associados a ele, independentemente se os alunos já viram ou não, na teoria, durante as aulas; que essa ideia seja motivadora para eles de forma que se torne replicável às demais turmas e que essa motivação se multiplique e a proposta seja aplicada em diversas instituições de ensino.

**PROPOSTA DE AULA:** para conciliar este projeto com a rotina da escola, sugiro:

- Uma **aula semanal**, no contra período, com a participação de alunos interessados do EM.
- **Ou duas aulas** no contra período **a cada 15 dias**, com a participação dos alunos interessados do EM.
- Os alunos que vierem a participar deste projeto poderão ser avaliados, caso a coordenação/professores o queiram.
- **As aulas não serão cobradas**, visto que se trata do desenvolvimento de um projeto para a aquisição de meu diploma de mestrado em ensino de Física. Por outro lado, **os materiais deverão ficar por conta da escola ou de cada aluno** que vier a participar do projeto. Caso a escola em questão venha a se interessar pelo projeto, repassarei a lista de materiais. Lembrando que são materiais simples, de baixo custo ou sucata.
- **O projeto prevê uma duração de 3 meses, ou 12 aulas de 1h e 40 minutos.**

Me coloco a disposição para dialogar sobre o projeto em horário previamente combinado.

Sinceramente

*Carlos Augusto Silva*  
*Licenciatura plena em Física MEC: **75.147***  
Mestrando em Ensino de Física pela UFSCar/Sorocaba

# Apêndice C

## APRESENTAÇÃO DA OFICINA DE ENSINO DE ELETROSTÁTICA AOS ALUNOS

---

**MNPEF**  
Mestrado Nacional  
Profissional em  
Ensino de Física

**MNPEF** Mestrado Nacional  
Profissional em  
Ensino de Física  
Polo **ufscar** Sorocaba



### Eletrostática na Prática

Este projeto será apresentado ao Mestrado Profissional em Ensino de Física, PROFIS-So da Universidade Federal de São Carlos, UFSCar, *campus* Sorocaba, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Nosso objetivo é mostrar que, através de materiais simples e de baixo custo, é possível ensinar os conceitos e leis da Eletrostática e Eletricidade de uma maneira estimulante em espaços escolares, sem a necessidade de equipamentos de alto custo ou laboratórios com tecnologia avançada.

Nos experimentos realizados durante o projeto surgirão alguns conceitos como: carga elétrica, força elétrica, campo elétrico, potencial e energia potencial elétricos, rigidez dielétrica, descarga elétrica, capacitância, corrente elétrica, diferença de potencial, etc.

Agradeço a participação dos alunos do Ensino Médio do Colégio Franciscano Ave Maria de Campinas - SP, sem os quais este projeto não poderia ser concluído. Agradeço também à direção do Colégio por acreditar na viabilidade do projeto, que objetiva ensinar ciência usando experimentos simples e reais.



Prezados alunos, usaremos neste projeto vários tipos de materiais que promoverão um ensino diferenciado e não cotidiano da eletricidade. Serão muitos experimentos simples, que os motivarão a perguntar e a responder de forma dinâmica, como os fenômenos elétricos acontecem e quais as leis e raciocínios que podem dar sustentação a eles e às suas respostas.

Como nada poderá passar despercebido, cada um usará um diário de tamanho médio para anotar tudo o que for observado durante os experimentos. Essas anotações servirão para organizar e reter informações que serão usadas para responder às suas próprias dúvidas e perguntas que surgirão ao longo do projeto. Além do mais eu também usarei seus apontamentos para mostrar se o projeto que venho desenvolvendo é viável ou não, ou como posso melhorá-lo para que seja viável de ser utilizado em outras realidades escolares.

Uma das formas de verificar se estamos no caminho certo, é respondendo às perguntas (QUESTIONÁRIO ELETROSTÁTICA NA PRÁTICA), que serão aplicadas ao longo das aulas, e servirão para balizar o projeto. As respostas deverão ser escritas, baseadas no conhecimento que se tem até aquele momento, a respeito dos processos eletrostáticos e elétricos.

Atenciosamente

Prof. Carlos Augusto Silva

Aluno do Mestrado Profissional em Ensino de Física (PROFIS-So)

UFSCar, Sorocaba