



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

Instituto de Física

Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física

Mestrado Profissional em Ensino de Física

Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física



O eletroscópio de folhas de alumínio como instrumento de ensino dos conceitos da eletrostática

Márcio André Souza dos Santos

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientador: Vitorvani Soares

Rio de Janeiro
Novembro de 2016

O eletroscópio de folhas de alumínio como instrumento de ensino dos conceitos da eletrostática

Márcio André Souza dos Santos

Orientador: Vitorvani Soares

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Aprovada por:

Prof. Vitorvani Soares (Presidente)

Prof. Felipe Mondaini

Prof. Alexandre Carlos Tort

Rio de Janeiro
Novembro de 2016

Ficha catalográfica

S194e Santos, Márcio André Souza dos
O eletroscópio de folhas de alumínio como instrumento de ensino dos conceitos da eletrostática / Márcio André Souza dos Santos. – Rio de Janeiro: UFRJ/IF, 2016.
xi, 62 f. : il. ; 30 cm.
Orientador: Vitorvani Soares.
Dissertação (mestrado) – UFRJ / Instituto de Física / Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, 2016.
Referências Bibliográficas: f. 58–59.
1. Ensino de Física. 2. Eletrostática. 3. Eletroscópio.
I. Soares, Vitorvani. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Física, Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física. III. O eletroscópio de folhas de alumínio como instrumento de ensino dos conceitos da eletrostática.

À Deus por me conduzir ate aqui.

Agradecimentos

A minha esposa Fabrícia Santos, pela paciência e compreensão durante esta jornada. Ao meu filho Matheus Santos, meu parceiro. Obrigado pelo apoio de vocês.

Ao meu orientador, Vitorvani Soares, a quem admiro pela competência, dedicação e humildade.. Obrigado por tudo! Pela paciência, exigência e cuidado com que me orientou neste trabalho você foi meu ponto de equilíbrio. Não teria conseguido sem a sua ajuda.

Aos membros da banca, Professores Felipe Mondaini e Alexandre Carlos Tort, pela leitura e apreciação deste trabalho.

À CAPES, ao MNPEF e à Sociedade Brasileira de Física pela concessão da bolsa de mestrado durante toda a realização deste trabalho.

[...] nous avons cherché à montrer ce qu'une expérience peut nous apprendre de nouveau, et à bien séparer ce qu'on admet de ce qu'on démontre.

— PAUL NIEWENGLOWSKI, *Précis d'Électricité*, 1906.

RESUMO

O eletroscópio de folhas de alumínio como instrumento de ensino dos conceitos da eletrostática

Márcio André Souza dos Santos

Orientador: Vitorvani Soares

Resumo da Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Neste trabalho desenvolvemos duas atividades didáticas baseadas no funcionamento de um eletroscópio de folhas de alumínio que permitem estimar as cargas elétricas q e Q induzidas nas folhas e no bastão indutor, respectivamente, a partir da determinação experimental das relações existentes entre as grandezas envolvidas: a distância d entre as folhas, a aproximação D do bastão indutor ao eletroscópio e a massa m da folha que compõe o eletroscópio. A primeira atividade envolve quatro eletroscópios idênticos, exceto pela largura w das folhas, e estabelece experimentalmente uma relação entre a abertura das folhas d e a sua respectiva largura w . O modelo deste resultado experimental determina o valor da carga elétrica q induzida nas folhas de cada eletroscópio. A segunda atividade envolve um único eletroscópio e estabelece uma relação entre a abertura d entre as folhas e a distância D entre o bastão carregado e o eletroscópio. O modelo deste resultado determina o valor da carga elétrica Q presente no corpo indutor. Esperamos que estas atividades com o eletroscópio de folhas auxiliie o professor no ensino dos conceitos da eletrostática e desenvolva as competências e habilidades dos alunos tanto na aquisição de dados experimentais quanto na sua análise por meio de diferentes representações gráficas.

Palavras chave: Ensino de Física, Eletrostática, Eletroscópio.

Rio de Janeiro
Novembro de 2016

ABSTRACT

The aluminum foil leaf electroscope as a tool to teaching electrostatics concepts

Márcio André Souza dos Santos

Supervisor: Vitorvani Soares

Abstract of master's thesis submitted to Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro, in partial fulfillment of the requirements for the degree Mestre em Ensino de Física.

In this work we develop two didactic activities based on the functioning of an aluminum leaf electroscope that allow to estimate the induced electric charges q and Q on the leaf and on the charged rod, respectively, from the experimental determination of the existing relation-ship between the involved parameters: the distance d between the leaves, the proximity D from the charged rod to the electroscope, and the mass m of the leaf that composes the electroscope. The first activity considers four identical electroscopes except by the width w of the leaves, and it establishes experimentally a relationship between the distance d apart the leaves and their corresponding width w . The model of this experimental finding determines the value q of the net charge on each leaf of the electroscopes. The second activity considers only one electroscope and it establishes a relationship between the distance d apart the leaves and the distance D from the rod to the electroscope. The model of this result determines the value of the electric charge Q present on the inducting body. We hope that these activities with the leaf electroscope will help the teacher to teach the concepts of electrostatics and develop the competencies and abilities of the students into the acquisition of experimental data as well as in their analysis through different graphical representations.

Keywords: Physics education, Electrostatics, Electroscope.

Rio de Janeiro
Novembro de 2016

Sumário

1	Introdução	13
2	Uma breve história do eletroscópio	15
3	Os experimentos com o eletroscópio	22
3.1	A abertura entre as folhas e a sua dependência com a sua massa	22
3.1.1	Objetivos da Atividade 1	22
3.1.2	Material empregado na Atividade 1	23
3.1.3	Medidas realizadas na Atividade 1	25
3.1.4	Análise dos resultados da Atividade 1	27
3.2	Abertura das folhas e a sua dependência com a distância do bastão carregado ao centro da esfera do eletroscópio	28
3.2.1	Objetivos da Atividade 2	28
3.2.2	Material empregado na Atividade 2	29
3.2.3	Medidas realizadas na Atividade 2	31
3.2.4	Análise dos resultados da Atividade 2	31
4	O funcionamento do eletroscópio	45
4.1	Determinação teórica da carga elétrica Q do bastão indutor	45
4.2	Determinação teórica da carga q da folha do eletroscópio	49
4.3	Estimativa da carga q induzida nas folhas do eletroscópio	51
4.4	Estimativa da carga Q contida no bastão eletrizado	52
5	Aplicação da proposta de aula	53
6	Considerações finais	57
	Referências	58
A	Roteiro da aula ministrada no Colégio Pedro II	60
A.1	Tema	60
A.2	Conteúdo	60
A.3	Objetivo	60
A.4	Desenvolvimento	61
A.5	Recursos didáticos	61
A.6	Duração	61
A.7	Avaliação	62

Lista de ilustrações

Figura 1	<i>Versorium</i> de Gilbert	15
Figura 2	A máquina de von Guericke	16
Figura 3	Francis Hauksbee e sua máquina elétrica	16
Figura 4	Eletroscópio de Du Fay	17
Figura 5	Eletrômetro de Nollet	18
Figura 6	Eletroscópio de Canton	18
Figura 7	Eletroscópio com lâminas metálicas	19
Figura 8	Dois eletrômetros de Richmann	20
Figura 9	Eletrômetro de Henley	20
Figura 10	Eletroscópio de Bennet	21
Figura 11	Modelo do aparato experimental da Atividade 1	22
Figura 12	Caixa de acrílico para ser usada na Atividade 1	23
Figura 13	Caixa de acrílico com o suporte, usada na Atividade 1	23
Figura 14	Componentes do eletroscópio da Atividade 1	24
Figura 15	Aparato experimental da Atividade 1	24
Figura 16	Bastão atritado com um pano de lã.	25
Figura 17	Bastão em contato com a parte superior da estrutura do eletroscópio.	25
Figura 18	Balança utilizada na medida da massa de cada folha	26
Figura 19	Abertura das folhas do eletroscópio em função da sua largura	27
Figura 20	Abertura das folhas do eletroscópio em função da largura (cont.)	27
Figura 21	Modelo do aparato experimental da Atividade 2.	29
Figura 22	Caixa de acrílico usada na Atividade 2.	29
Figura 23	Caixa de acrílico com o suporte, usada na Atividade 2.	30
Figura 24	Componentes do eletroscópio da Atividade 2	30
Figura 25	Aparato experimental da Atividade 2.	30
Figura 26	Bastão atritado com um pano de lã	31
Figura 27	Bastão posicionado próximo a esfera do bastão	32
Figura 28	Distância entre as folhas do eletroscópio vs. distância do centro do bastão ao centro da esfera para um bastão com carga Q_1	33
Figura 29	Distância entre as folhas do eletroscópio vs. distância do centro do bastão ao centro da esfera para um bastão com carga Q_1 (di-log)	33
Figura 30	Modelo da distância entre as folhas do eletroscópio vs. distância do centro do bastão ao centro da esfera para um bastão com carga Q_1	34
Figura 31	Distância entre as folhas do eletroscópio vs. distância do centro do bastão ao centro da esfera para um bastão com carga Q_2	35

Figura 32	Distância entre as folhas do eletroscópio vs. distância do centro do bastão ao centro da esfera para um bastão com carga Q_2 (di-log) . . .	36
Figura 33	Distância entre as folhas do eletroscópio vs. distância do centro do bastão ao centro da esfera para um bastão com carga Q_2	37
Figura 34	Distância entre as folhas do eletroscópio vs. distância do centro do bastão ao centro da esfera para um bastão com carga Q_3	38
Figura 35	Distância entre as folhas do eletroscópio vs. distância do centro do bastão ao centro da esfera para um bastão com carga Q_3 (di-log) . . .	39
Figura 36	Modelo da distância entre as folhas do eletroscópio vs. distância do centro do bastão ao centro da esfera para um bastão com carga Q_3 .	39
Figura 37	Distância entre as folhas do eletroscópio vs. distância do centro do bastão ao centro da esfera para um bastão com carga Q_4	40
Figura 38	Distância entre as folhas do eletroscópio vs. distância do centro do bastão ao centro da esfera para um bastão com carga Q_4 (di-log) . . .	41
Figura 39	Modelo da distância entre as folhas do eletroscópio vs. distância do centro do bastão ao centro da esfera para um bastão com carga Q_4 .	42
Figura 40	Distância entre as folhas do eletroscópio vs. distância do centro do bastão ao centro da esfera para um bastão com carga Q_5	42
Figura 41	Distância entre as folhas do eletroscópio vs. distância do centro do bastão ao centro da esfera para um bastão com carga Q_5 (di-log) . . .	43
Figura 42	Modelo da distância entre as folhas do eletroscópio vs. distância do centro do bastão ao centro da esfera para um bastão com carga Q_5 .	44
Figura 43	Modelo do funcionamento do eletroscópio de folhas.	45
Figura 44	O método das imagens	46
Figura 45	Ilustração da esfera do eletroscópio e do bastão carregado com carga Q	46
Figura 46	Modelo simplificado do eletroscópio de folhas. A esfera de raio a_2 representa uma das folhas do eletroscópio.	47
Figura 47	Modelo do nosso eletroscópio.	49
Figura 48	Representação das forças que agem sobre cada folha	49
Figura 49	Composição das folhas.	50
Figura 50	Eletroscópio utilizado com os alunos	53
Figura 51	Aparato experimental 1 composto por quatro eletroscópios	55
Figura 52	Aluna aproximando o bastão eletrizado da esfera do eletroscópio . . .	56
Figura 53	Aluna eletrizando o bastão por atrito	56

Lista de tabelas

Tabela 1	Abertura d das folhas do eletroscópio em função da largura w da folha do eletroscópio	26
Tabela 2	Abertura d das folhas do eletroscópio em função da distância D do bastão até a esfera	32
Tabela 3	Resultados experimentais para a dependência entre a abertura d das folhas do eletroscópio em função da distância D do bastão ao centro da esfera do eletroscópio	44

1 Introdução

Trabalhos recentes como, por exemplo, os de Stewart, Skinner e Stewart (2013), têm evidenciado que atividades experimentais com o eletroscópio podem contribuir decisivamente para que os estudantes explorem, de forma construtiva, o conceito de carga elétrica, os processos de eletrização, corpos condutores e isolantes, o conceito de indução e o significado de aterramento. O eletroscópio de folhas, pela sua simplicidade, permite uma demonstração convincente das forças eletrostáticas e sua versatilidade o torna útil na demonstração de um número grande de fenômenos. Ele pode ser usado para ilustrar a propriedade de repulsão de cargas ou também pode ser empregado em demonstrações mais sofisticadas, como o efeito fotoelétrico, utilizando uma lâmpada que emite radiação ultravioleta.

O tema abordado neste trabalho vai ao encontro das orientações da Lei de Diretrizes e Bases (LDB) (1996) e dos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN) (2006, 2002a, 2002b, 2000, 1998) para o estudo das Ciências Físicas no Ensino Médio: uma abordagem mais instigante e prática para os alunos, de maneira que eles possam adquirir competências e habilidades específicas do conteúdo discutido em sala de aula e relacioná-las no seu dia a dia.

De fato, como comentado em Thompson (2014) e Dvořák (2012), existem vários experimentos didáticos propostos na literatura que envolvem a construção de eletroscópios e discutem o seu funcionamento de forma superficial e qualitativa. Nosso objetivo, neste trabalho, é explorar um pouco mais o eletroscópio de folhas apresentando um estudo complementar deste instrumento àquele apresentado na maioria dos livros didáticos usados no ensino médio. Pretendemos chamar a atenção dos professores e estudantes que o eletroscópio de folhas além de ser um sensor de cargas elétricas também pode desempenhar um papel didático como um instrumento para o ensino dos conceitos de eletrostática.

A ideia principal deste trabalho é a discussão dos conceitos básicos da eletrostática. Inicialmente descrevemos a construção de um eletroscópio de folhas: uma barra condutora fina que conecta uma esfera também condutora a um par de folhas de material condutor. Em nosso instrumento empregamos folhas de alumínio. Ao longo das atividades desenvolvidas descrevemos o funcionamento do eletroscópio a partir do estabelecimento de uma relação empírica entre a abertura das folhas e a sua espessura, quando um bastão carregado se aproxima da esfera do eletroscópio. Projetamos e construímos um aparato experimental composto por quatro eletroscópios idênticos exceto pelas larguras das folhas, onde as únicas grandezas que variam é a largura w da folha e a abertura d entre elas. Desenvolvemos um modelo matemático para descrever o resultado experimental e, a partir deste modelo, obtemos o valor aproximado da carga elétrica q induzida em cada folha.

Após as observações do funcionamento do primeiro aparato experimental construímos outro mais simples e com outro objetivo. Este segundo aparato experimental foi elaborado para estudar a relação entre a distância D do bastão carregado ao centro da esfera e a abertura d das folhas. A partir da análise dos dados experimentais estabelecemos uma relação entre a abertura das folhas com a distância do bastão carregado até o centro da esfera do eletroscópio. Também desenvolvemos um modelo matemático para descrever o resultado experimental e, a partir deste modelo, obtemos o valor aproximado da carga elétrica Q contida no bastão eletrizado.

Para uma discussão detalhada do nosso procedimento para a descrição e análise do comportamento do eletroscópio, organizamos nossa dissertação da seguinte maneira: no Capítulo 2 apresentamos um breve resumo da história do eletroscópio; no Capítulo 3 relatamos os passos para a construção dos dois aparatos experimentais, bem como o funcionamento deles; Organizamos os dados experimentais das duas atividades e a sua análise no Capítulo 4 onde também discutimos neste mesmo Capítulo o funcionamento teórico do eletroscópio de folhas a análise matemática dos dois aparatos experimentais; no Capítulo 5 relatamos como aplicamos essa proposta em uma sala de aula do ensino médio do Colégio Pedro II; finalmente, no Capítulo 6, apresentamos a conclusão do nosso trabalho com o cálculo aproximado das cargas elétricas das folhas q e do bastão indutor Q , além das nossas considerações finais.

2 Uma breve história do eletroscópio

Para descrevermos uma breve história do eletroscópio usamos como referência os trabalhos de Assis (2010b) e Medeiros (2002). Segundo estes autores, o mais antigo instrumento utilizado para identificar corpos carregados foi o *versorium*, de William Gilbert (1544–1603), ilustrado em seu livro *De Magnete*, publicado em 1600 e indicado na Figura 1, que consistia de uma agulha montada num pivô, lembrando uma bússola (GILBERT, 1958). O termo *versorium* significa um instrumento girador ou um aparato girante. Gilbert foi um dos pioneiros nas investigações dos fenômenos elétricos e na identificação de uma natureza própria para a eletricidade, distinta do magnetismo. A agulha do *versorium* era feita inicialmente de um metal claro, não magnetizado, equilibrada em um pino colocado no ponto central da mesma. O *versorium* deixou de ser utilizado e foi substituído pelo eletroscópio em meados do século XVIII.



Figura 1. – *Versorium* de Gilbert, como ilustrado em seu livro *De Magnete*, de 1600.

Por muito tempo, após a época de Gilbert, a eletricidade ainda era produzida apenas pelo atrito de pedaços de âmbar, vidro ou enxofre com materiais como as roupas do pesquisador ou mesmo com as suas próprias mãos. Ainda no século XVII, no entanto, foi criado um novo modo de eletrizar mais vigorosamente os corpos: a máquina eletrostática. A máquina eletrostática mais primitiva foi desenvolvida por Otto von Guericke (1602–1686), em Magdeburgo, por volta de 1663, e representada na Figura 2. Esta máquina consistia em uma esfera sólida de enxofre montada sobre um eixo de ferro que se encaixava em um suporte sobre uma caixa de madeira. A caixa servia para guardar acessórios para o gerador. A esfera era girada em torno de seu eixo com uma das mãos do operador enquanto era atritada com a sua outra mão. Quando eletrizada, a esfera era retirada do suporte e usada para experimentos diversos, tais como, por exemplo, perseguir uma pena, que era ora atraída, ora repelida pela esfera. Von Guericke, entretanto, não distinguia claramente o que era a eletricidade. Essa primitiva máquina de atrito foi sucessivamente aperfeiçoada durante todo o século XVIII.

Um outro precursor do eletroscópio foi o método rudimentar, inventado em 1705 por Francis Hauksbee (1660–1713). O eletroscópio de Hawksbee foi o primeiro instrumento construído intencionalmente para produzir a eletrificação de corpos e está ilustrado na

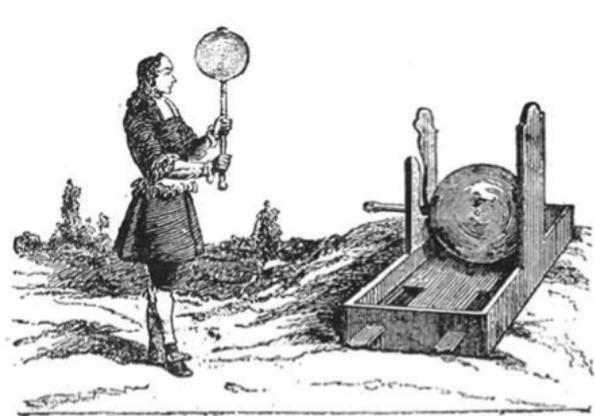
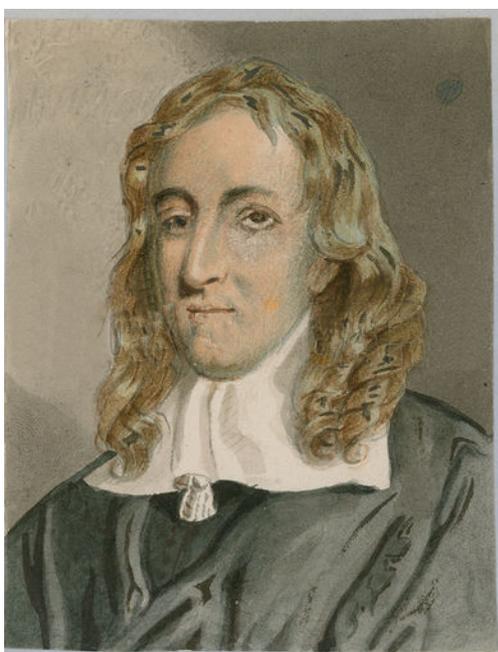
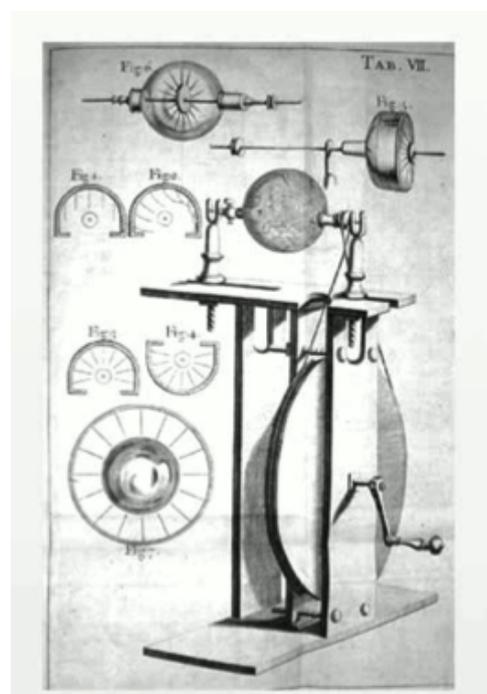


Figura 2. – A máquina eletrostática desenvolvida por Guericke (1672). Esta máquina consistia em uma esfera sólida de enxofre montada sobre um eixo de ferro, que se encaixava em um suporte sobre uma caixa de madeira.

Figura 3. Tal método consistia na utilização de vários pedaços de linha suspensos, lado a lado, na extremidade de uma barra cilíndrica de vidro ou na superfície interior de uma esfera oca, igualmente de vidro, de tal modo que as linhas ficavam penduradas e com suas extremidades afastadas, aproximadamente, uma polegada do vidro (figura 3). Quando o vidro era eletrificado por atrito, as linhas reordenavam-se passando todas a apontarem radialmente em direção a ele.



(a)



(b)

Figura 3. – (a) Imagem de Francis Hauksbee (2011) e (b) sua máquina elétrica, como ilustrado em seu livro (HAUKSBEE, 1719). Observe os vários pedaços de linha suspensos, lado a lado, na extremidade da barra cilíndrica de vidro.

Talvez o primeiro eletroscópio da história tenha sido construído em 1737 por Charles

Du Fay (1698–1739). Stephen Gray (1666–1736), antes de Du Fay, já usava um fio de algodão ou de linho preso em uma vareta para indicar se um corpo estava ou não carregado. Entretanto, para observar a eletrização, era necessário aproximar a vareta do corpo e ver se o fio era ou não atraído pelo corpo. Du Fay, por sua vez, passou a dependurar fios dobrados em duas partes iguais sobre o corpo. Ao carregar o corpo, estas duas partes se afastavam, com o fio ficando na forma da letra “V” invertida. Quanto maior fosse o ângulo de abertura, mais carga continha o corpo.

Na primeira experiência que descreveu, Du Fay tinha uma barra de ferro suspensa horizontalmente por cordões de seda. Estes cordões garantiam o isolamento elétrico do conjunto, evitando que ele se descarregasse para a Terra. Du Fay colocou sobre a barra fios de comprimentos idênticos mas de diversos tipos: linho, algodão, seda e lã. Cada fio era dobrado ao meio, com suas partes centrais apoiadas sobre a barra. Ao eletrizar a barra, ele observou que elas se afastavam mais se os fios fossem de linho, depois os de algodão, em seguida os de seda. Os fios de lã eram os que menos se afastavam entre si. Du Fay atribuiu este comportamento a uma capacidade maior do linho de acumular a matéria elétrica, comparado com as outras substâncias. A Figura 4 representa um modelo simplificado do eletroscópio criado por Du Fay.

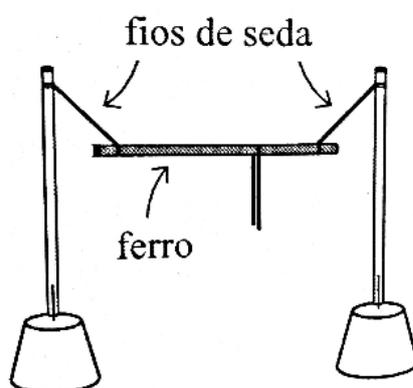


Figura 4. – Modelo simplificado do eletroscópio de Du Fay. Observe os fios dobrados ao meio, com suas partes centrais apoiadas sobre a barra (ASSIS, 2010a).

Du Fay também usou seu eletroscópio, entre outras coisas, para descobrir quais materiais seriam os melhores isolantes. Para isto pendurou uma barra de ferro por cordões confeccionados com diferentes materiais ou a apoiou sobre corpos sólidos compostos de materiais diferentes. Du Fay carregou a barra com o tubo de vidro previamente atritado e, em seguida, observou através do ângulo de afastamento dos seus fios presos à barra qual substância permitia que ela ficasse carregada por mais tempo. Esta substância (o cordão que sustenta a barra ou o corpo sólido a apoiando) seria então o melhor isolante.

Em 1747, Jean-Antoine Nollet (1700–1770) apresentou um aperfeiçoamento do eletroscópio de Du Fay. A Figura 5 representa um modelo do eletroscópio de Nollet. Os fios abertos na forma de um “V” invertido ficavam ligados diretamente ao corpo carregado.

Uma lâmpada iluminava os fios e projetava suas sombras sobre uma tela graduada na qual se podia ler o ângulo de abertura dos fios. Isto permitiu uma grande precisão na determinação destes ângulos, já que a tela e o observador poderiam ficar distantes do eletroscópio, sem afetá-lo durante a leitura. Nollet criou um nome para este instrumento: o eletrômetro. Deste modo, um eletrômetro é um eletroscópio que permite uma medida quantitativa precisa de alguma propriedade, como um ângulo neste caso, associada à eletricidade.

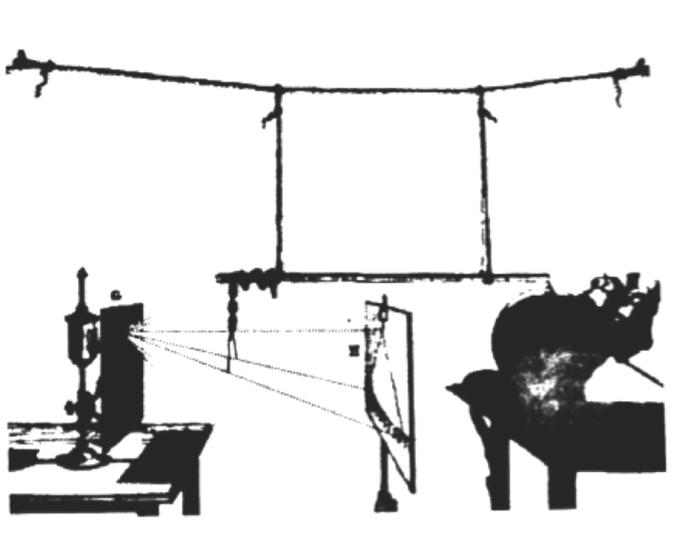


Figura 5. – Eletrômetro de Nollet. Uma lâmpada iluminava os fios e projetava suas sombras sobre uma tela graduada na qual se podia ler o ângulo de abertura dos fios (ASSIS, 2010a).

Mais tarde, para evitar as perdas elétricas que ocorriam nas pontas dos fios do eletroscópio, passou-se a prender bolinhas da medula envelhecida de plantas como o sabugueiro, ou bolinhas de cortiça, nas pontas destes fios. Um dos cientistas responsáveis por esta montagem experimental foi John Canton (1718–1772) que, em 1752, apresentou o seu eletroscópio, representado na Figura 6.

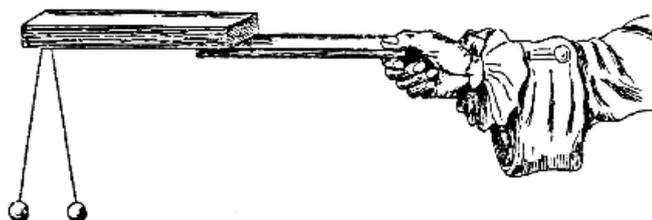


Figura 6. – Eletroscópio de Canton. Observe as bolinhas de cortiça, nas pontas dos fios (ASSIS, 2010a).

As linhas de linho ou de algodão foram substituídas, em seguida, por palhas rígidas ou por lâminas metálicas. Estas lâminas eram mais duráveis do que as linhas de algodão.

Além disso, elas permitiam uma leitura mais precisa do ângulo de afastamento entre as lâminas do que no caso do ângulo de afastamento entre duas linhas flexíveis. Entre os cientistas importantes que contribuíram com estes desenvolvimentos estão Abraham Bennet (1750–1799) e Alessandro Volta (1745–1827). A Figura 7 representa um dos primeiros eletroscópios de lâminas metálicas.

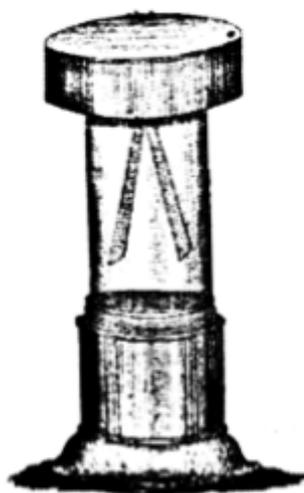


Figura 7. – Eletroscópio com lâminas metálicas (ASSIS, 2010a).

Georg Wilhelm Richmann (1711–1753) criou entre 1744 e 1753 um eletrômetro no qual uma das lâminas permanece fixa em relação à Terra e no qual apenas uma lâmina ou tira se afasta da vertical quando o eletroscópio está carregado. O eletroscópio de Richmann está ilustrado na Figura 8.

Em 1770, em Londres, Tibérius Cavallo (1749–1809) construiu um eletroscópio com fios de prata pendurados de uma haste metálica, adicionando bolinhas de sabugueiro nos seus terminais e encerrando o conjunto num vaso de vidro com folhas metálicas finas envolvendo as suas paredes. A haste metálica projetava-se para cima do vaso de vidro com uma pequena esfera em sua extremidade superior. O eletroscópio começava a tomar a sua forma atual. Pouco tempo depois, Volta construiria um eletrômetro que utilizava dois pequenos pedaços retos de palha suspensos a partir de um mesmo ponto por meio de uma junta bastante móvel.

William Henley (1813?–1882), em 1772 construiu um eletrômetro que podia medir com precisão a abertura da folha móvel. Este instrumento possui uma única haste móvel e leve, representada pela letra “A” na Figura 9. Esta haste móvel “A” pode girar ao redor de “B”. Na extremidade desta haste móvel existe uma pequena rolha. Quando o eletrômetro está carregado há uma repulsão entre a haste móvel “A” e a haste fixa “C”,

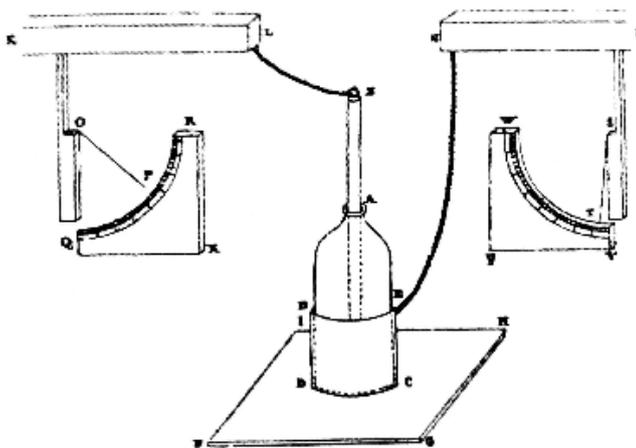


Figura 8. – Dois eletrômetros de Richmann: somente uma das lâminas é móvel (ASSIS, 2010a).

fazendo com que a haste “A” fique afastada da haste “C”. O ângulo de abertura pode ser lido precisamente no transferidor preso ao instrumento.

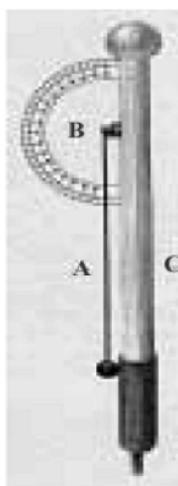


Figura 9. – Eletrômetro de Henley e a medida precisa da abertura da folha móvel (MEDEIROS, 2002).

No final do século XVIII, os eletroscópios já eram utilizados nas experiências de indução. Por exemplo, diversos tipos de eletroscópios e eletrômetros, dentre os quais o criado pelo reverendo Abraham Bennet (1749–1799), um aperfeiçoamento do aparelho de Tiberius Cavallo, se tornariam os mais conhecidos. Apresentamos na Figura 10 uma fotografia do eletroscópio de Bennet.

Abraham Bennet publicou na *Philosophical Transactions*, da Royal Society de Londres, em 1787, duas invenções de grande importância. Uma delas era o *eletroscópio de folhas de*



Figura 10. – Eletroscópio de folhas de ouro de Bennet (MEDEIROS, 2002).

ouro, que seria aperfeiçoado, logo em seguida, por William Hasledine Pepys (1775–1856), tornando-se o mais preciso detector de eletricidade disponível à época. Esse instrumento, bem mais sensível que o seu antecessor de linhas, daria um enorme impulso nas pesquisas sobre a eletricidade.

Ao final do século XVIII, vários outros eletroscópios e eletrômetros estavam igualmente em uso ou em desenvolvimento. O mais importante de todos os instrumentos de medida da eletricidade, surgidos ao final do século XVIII, foi a *balança de torção*, apresentada em 1784 por Charles Augustin Coulomb (1736–1807). O uso da balança de torção por Coulomb marca o início dos trabalhos quantitativos na eletricidade e o final de um acelerado período evolutivo nos trabalhos exploratórios com o eletroscópio.

3 Os experimentos com o eletroscópio

Neste Capítulo apresentamos duas atividades didáticas que representam o emprego do eletroscópio como um instrumento de medida da carga elétrica.

3.1 A abertura entre as folhas e a sua dependência com a sua massa

Os livros didáticos usados no ensino médio que fazem parte do PNLD abordam de forma muito superficial as diversas possibilidades do uso do eletroscópio de folhas. Com o objetivo de produzir um material que possa explorar algumas possibilidades do eletroscópio de folhas, produzimos um aparato experimental no qual podemos relacionar a abertura d das folhas do eletroscópio com a largura w da massa m de cada folha.

O aparato experimental é composto por quatro eletroscópios com folhas de massas diferentes e através da aproximação de um bastão eletrizado por atrito, ocorrerá uma migração dos elétrons livres o que produzirá um afastamento das folhas do eletroscópio de uma distância (d). Pretendemos, através dessas medidas e da análise dos dados obtidos, estabelecer uma relação entre a abertura das folhas e a sua massa.

3.1.1 Objetivos da Atividade 1

Verificação da relação existente entre a abertura das laminas e sua massa. Nosso ponto de partida foi o modelo do eletroscópio, conforme a Figura 11.

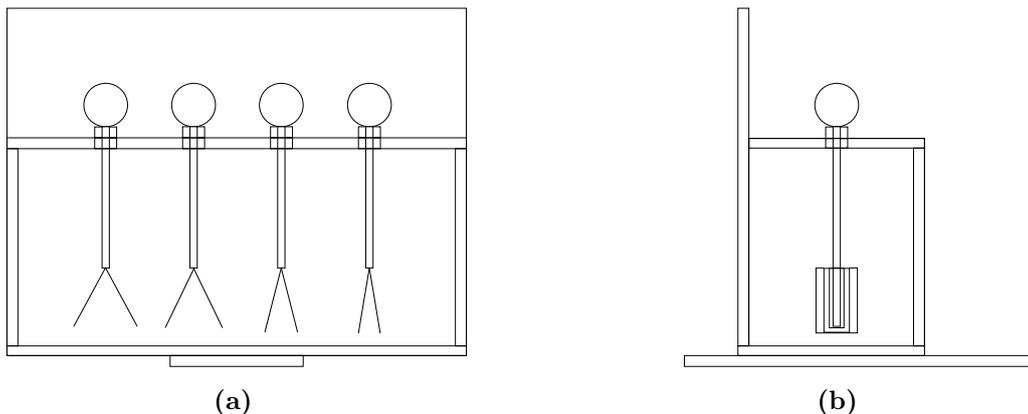


Figura 11. – Modelo do aparato experimental da Atividade 1. (a) Visão frontal do modelo. (b) Visão lateral do modelo. Observe as diferentes larguras das folhas de cada eletroscópio.

3.1.2 Material empregado na Atividade 1

Construímos, numa mesma estrutura, quatro eletroscópios idênticos exceto pelas massas das folhas. O material utilizado foi o acrílico por ser um bom isolante elétrico. O acrílico utilizado tem 4,0 mm de espessura. Construímos um cubo de acrílico com 40,0 cm (comprimento), 22,0 cm (altura) e 9,0 cm (profundidade). Os furos têm diâmetros de 1,5 cm e estão distantes de 10,0 cm um do outro, como ilustrado na Figura 12.

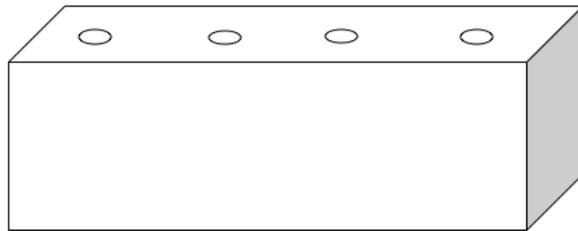


Figura 12. – Caixa de acrílico para ser usada na Atividade 1.

Utilizamos uma placa para suporte da caixa com 40,0 cm (comprimento) e 30,0 cm (altura) e uma base para toda a estrutura com 30,0 cm \times 15,0 cm, como indicado na Figura 13.

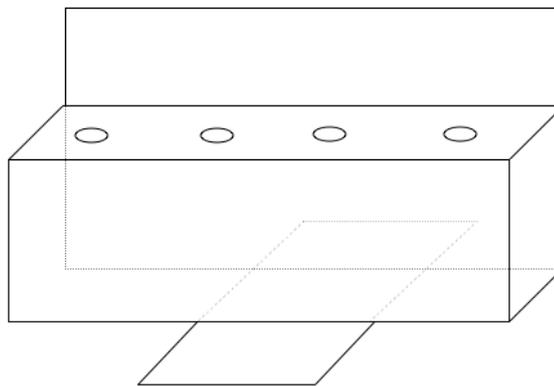


Figura 13. – Caixa de acrílico com o suporte, usada na Atividade 1.

O eletroscópio foi construído com uma esfera de aço maciço com 2,5 cm de diâmetro, uma haste de cobre maciço com 15,0 cm de comprimento e folhas de alumínio com 3,0 cm de comprimento, como indicado na Figura 14.

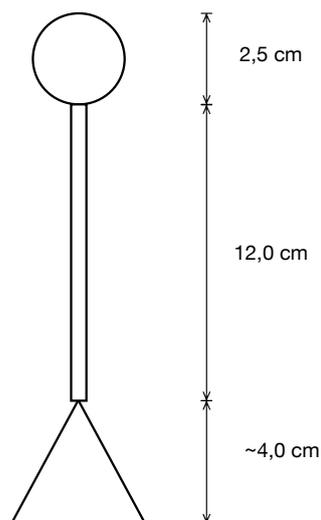


Figura 14. – Componentes do eletroscópio da Atividade 1: a esfera, a haste e as folhas.

Colocamos quatro eletroscópios idênticos, exceto pelas massas das folhas. Todas as folhas têm o mesmo comprimento $l = 3,0$ cm e diferentes larguras $w = 4,0$ mm, $8,0$ mm, $12,0$ mm e $16,0$ mm. Suas massas são, respectivamente, $m = 5,9$ mg, $13,6$ mg, $19,2$ mg e $28,1$ mg. A Figura 15 é a imagem do aparato experimental da Atividade 1 que foi construído para um dos trabalhos didáticos propostos nessa dissertação .



Figura 15. – Aparato experimental da Atividade 1.

Na parte superior de cada eletroscópio colocamos um pedaço cilíndrico de cortiça (isolante) que serve como ajustador da distância da esfera até a superfície suporte da caixa, feita em acrílico. Isso é de extrema importância para que o bastão carregado esteja a uma mesma distância D ao passar próximo a cada esfera de aço. Colocamos, ainda, uma folha de papel milimetrado na parte inferior da caixa, atrás das folhas de alumínio do eletroscópio, de modo a facilitar as medidas da abertura entre elas.

3.1.3 Medidas realizadas na Atividade 1

Efetuamos as medidas com o aparato experimental 1 através de uma sequência de procedimentos para que os dados obtidos fossem gerados com o mesmo padrão.

Primeiro, atritamos o bastão de PVC com um pano de lã. Esse atrito produziu uma carga Q no bastão, como ilustrado na Figura 16.



Figura 16. – Bastão atritado com um pano de lã.

Em seguida, o bastão precisa estar com sua extremidade encostada na parte superior do suporte do aparato experimental 1. Isso é necessário para que a distância entre o bastão e os quatro eletroscópios seja a mesma. A Figura 17 apresenta a visualização desse procedimento. O bastão carregado é posicionado bem acima de cada esfera e efetuamos a medida da abertura das folhas.

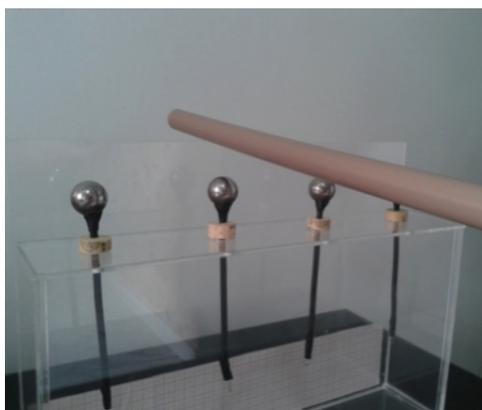


Figura 17. – Bastão em contato com a parte superior da estrutura do eletroscópio.

Finalmente, registramos os dados obtidos para o bastão carregado com a carga adquirida pelo atrito com a lã. Realizamos quatro vezes esse procedimento e as massas das folhas foram medidas com uma balança de precisão de um décimo de miligrama, indicada na Figura 18.



Figura 18. – Balança utilizada na medida da massa de cada folha, com precisão de um décimo de miligrama.

Para realizar o primeiro conjunto de medidas com o aparato experimental 1, atritamos o bastão de PVC com o pano de lã e depois aproximamos o bastão da esfera do eletroscópio. O bastão estava carregado com uma carga elétrica Q_1 e foi mantido a mesma distância de todas as quatro esferas, como está representado na Figura 17. Essa aproximação produziu uma migração do elétrons livres das estrutura do eletroscópio abrindo suas folhas de uma distância d entre elas.

Realizamos esse procedimento quatro vezes e em cada procedimento o bastão esteve carregado com carga elétrica diferente. Os dados obtidos estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1. – Abertura d das folhas do eletroscópio em função da largura w da folha do eletroscópio, com o bastão eletrizado com quatro cargas Q_1 , Q_2 , Q_3 e Q_4 . Todas as folhas possuem comprimento $L = 3,0$ cm. A incerteza das medidas é igual a $0,1$ cm.

m (mg)	w (mm)	d_{Q_1} (cm)	d_{Q_2} (cm)	$d_{Q_{12}}$ med (cm)	d_{Q_3} (cm)	d_{Q_4} (cm)	$d_{Q_{34}}$ med (cm)
5,9	4,0	2,4	2,3	2,4	2,7	2,8	2,8
13,6	8,0	1,8	1,8	1,8	2,2	2,1	2,2
19,2	12,0	1,6	1,5	1,6	1,9	1,8	1,8
28,1	16,0	1,6	1,4	1,5	1,9	1,7	1,8

Conforme os dados descritos na Tabela 1, verificamos que as medidas da abertura das folhas (d) para o bastão carregado com cargas Q_1 e Q_2 são próximas e considerando a incerteza $\pm 0,1$ cm, podemos concluir que $Q_1 \approx Q_2$. Assim, de forma análoga, concluimos também que $Q_3 \approx Q_4$. Em função dessa observação, fizemos uma média dos valores obtidos entre d_1 e d_2 e entre d_3 e d_4 . Os dados estão descritos na Tabela 1 como $d_{Q_{12}}$ e $d_{Q_{34}}$.

3.1.4 Análise dos resultados da Atividade 1

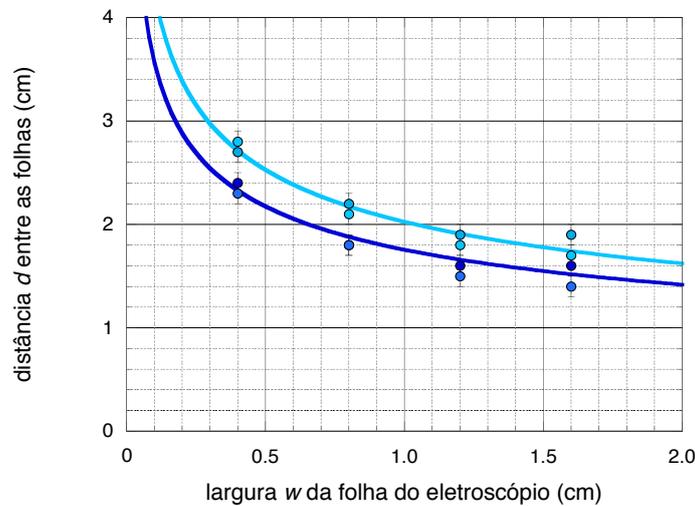


Figura 19. – Abertura d das folhas do eletroscópio em função da largura w da folha do eletroscópio, com o bastão eletrizado com quatro cargas Q_1 , Q_2 , Q_3 e Q_4 . Todas as folhas possuem comprimento $L = 3,0$ cm. A incerteza das medidas é igual a $0,1$ cm.

Observamos na Figura 19 que a medida que aumentamos a largura w da folha a distância d entre as folhas decresce. Observamos também que para uma largura nula, $w = 0$, a distância d entre as folhas diverge. Isto sugere que a relação matemática entre d e w deve ser na forma de potência. Para determinar este expoente construímos o gráfico em escala logarítmica, como representado na Figura 20.

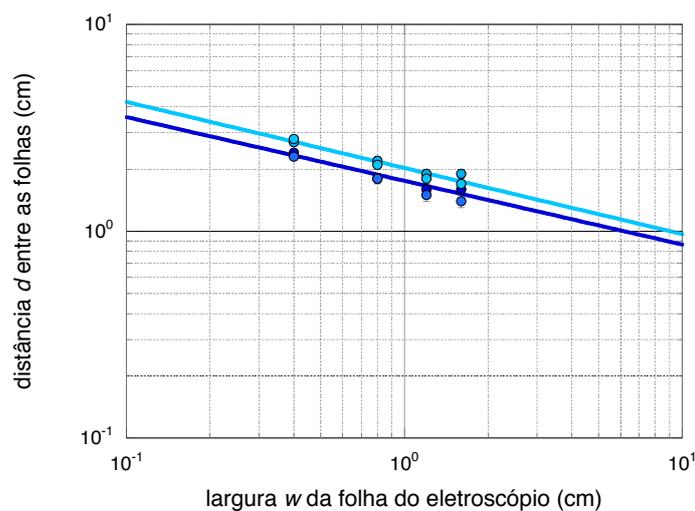


Figura 20. – Abertura d das folhas do eletroscópio em função da largura w da folha do eletroscópio, com o bastão eletrizado com quatro cargas Q_1 , Q_2 , Q_3 e Q_4 , em escala logarítmica. Todas as folhas possuem comprimento $L = 3,0$ cm. A incerteza das medidas é igual a $0,1$ cm.

Do gráfico representado da Figura 20 podemos concluir que

$$d = Aw^p, \quad (3.1)$$

onde temos o mesmo expoente p para as duas curvas da Figura 20, gerados pelo método dos mínimos quadrados¹, cujo valor é

$$p = -0,36 \pm 0,05 \quad (3.2)$$

e, para cada curva indicada na Figura 20, temos a constante A com os seguintes valores:

$$A_{Q12 \text{ med}} = (2,0 \pm 0,1) \text{ cm}^{1,36} \quad (3.3)$$

e

$$A_{Q34 \text{ med}} = (1,7 \pm 0,1) \text{ cm}^{1,36}. \quad (3.4)$$

Concluimos então que a constante A depende da forma com que atritamos o bastão.

3.2 Abertura das folhas e a sua dependência com a distância do bastão carregado ao centro da esfera do eletroscópio

O aparato experimental 2 foi construído com o objetivo de explorar mais uma possibilidade de ensino de eletrostática através da utilização do eletroscópio de folhas. Nesse aparato encontramos uma relação entre a abertura d das folhas do eletroscópio e a distância D do bastão carregado ao centro da esfera do eletroscópio que nos permitirá determinar o valor aproximado da carga elétrica Q adquirida pelo bastão, por meio do atrito com a lã.

O aparato experimental 2 é composto por um único eletroscópio de folhas e através da aproximação do bastão de PVC eletrizado por atrito com um pano de lã, ocorrerá uma migração dos elétrons livres e este efeito, por sua vez, produzirá um afastamento das folhas do eletroscópio de uma distância d .

3.2.1 Objetivos da Atividade 2

Esse aparato permite relacionar a abertura d entre as folhas com a distância D do bastão ao centro da esfera do eletroscópio. A partir das medidas da distância D do bastão ao centro da esfera e da abertura d das folhas e da análise dos dados obtidos, estabelecemos uma relação entre d e D e este resultado permitirá a determinação do valor aproximado da carga elétrica Q presente no bastão. Por ser um bom isolante, escolhemos o acrílico como o material para a construção da caixa de suporte do eletroscópio. O acrílico utilizado tem 4,0 mm de espessura. A Figura 21 representa o aparato experimental da Atividade 2.

¹ Neste trabalho empregamos o programa KaleidaGraph® para a análise dos dados.

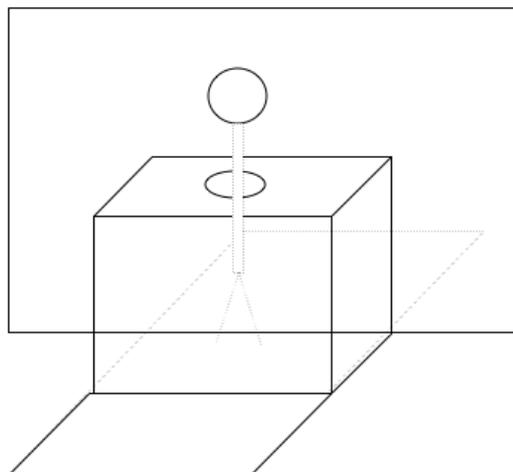


Figura 21. – Modelo do aparato experimental da Atividade 2.

3.2.2 Material empregado na Atividade 2

Construímos uma caixa de acrílico com 15,0 cm (comprimento), 15,0 cm (altura) e 9,0 cm (profundidade). O orifício tem diâmetro de 1,5 cm, como ilustrado na Figura 22.

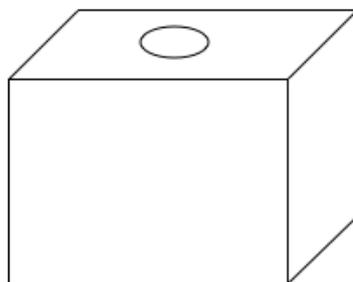


Figura 22. – Caixa de acrílico usada na Atividade 2.

Utilizamos uma placa para suporte da caixa com 30,0 cm (comprimento) e 30,0 cm (altura) e uma base para toda a estrutura com 30,0 cm \times 15,0 cm, como indicado na Figura 23.

O eletroscópio foi construído com uma esfera de aço maciço com 2,5 cm de diâmetro, uma haste de cobre maciço com 9,0 cm de comprimento e seção 5,0 mm e as folhas de alumínio tem 4,0 cm de comprimento e massa $m = 18,7$ mg. A Figura 24 ilustra o eletroscópio utilizado em nosso experimento.

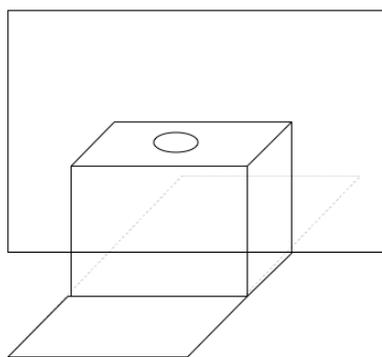


Figura 23. – Caixa de acrílico com o suporte, usada na Atividade 2.

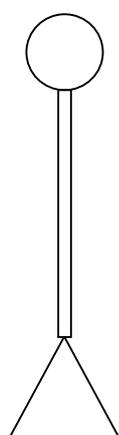


Figura 24. – Componentes do eletroscópio da Atividade 2: a esfera, a haste e as folhas.

A Figura 25 é a imagem do aparato experimental 2 que foi construído para um dos trabalhos didáticos propostos nessa dissertação.

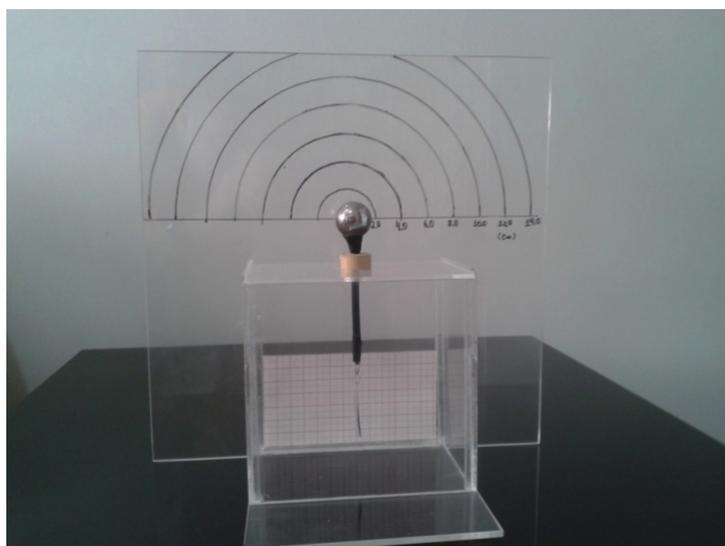


Figura 25. – Aparato experimental da Atividade 2.

Na parte superior do eletroscópio colocamos um pedaço cilíndrico de cortiça (isolante) que serviu como ajustador da distância da esfera até a base superior da caixa. Colocamos círculos concêntricos a partir do centro da esfera, que estão distantes de 2,0 cm cada, para que pudéssemos medir a distância do basta carregado ao centro da esfera. Colocamos, ainda, uma folha de papel milimetrado na parte inferior da caixa, atrás das folhas de alumínio do eletroscópio, de modo a facilitar as medidas da abertura entre elas.

3.2.3 Medidas realizadas na Atividade 2

Efetuamos as medidas com o aparato experimental 2 através de uma sequência de procedimentos para que os dados obtidos fossem gerados com mesmo padrão.

Primeiro, atritamos o bastão de PVC com um pano de lã. Esse atrito produziu uma carga Q no bastão, como ilustrado na Figura 26;



Figura 26. – Bastão atritado com um pano de lã, usado na atividade experimental 2.

Em seguida, utilizando a graduação do aparato experimental 2, posicionamos o bastão a diferentes distâncias D do centro da esfera do eletroscópio e medimos a abertura d entre as folhas. A Figura 27 ilustra esse procedimento.

Realizamos diversas vezes esse procedimento. Os dados obtidos estão descritos na Tabela 2. Cada conjunto de dados obtidos da abertura d das folhas do eletroscópio foi realizada com o bastão carregado com uma determinada carga Q , adquirida através do atrito com a lã.

3.2.4 Análise dos resultados da Atividade 2

Análise da série de medidas para um bastão com carga Q_1

A série de medidas da distância d entre as folhas do eletroscópio para diferentes distância D do centro do bastão ao centro da esfera, para um bastão com carga Q_1 , está representada na Figura 28. Nesta figura, a curva azul é somente um guia e revela a relação



Figura 27. – Bastão posicionado próximo a esfera do bastão. A escala circular impressa na estrutura do eletroscópio é utilizada para determinar a distância até o centro da esfera.

Tabela 2. – Abertura d das folhas do eletroscópio em função da distância D do bastão até a esfera, com o bastão eletrizado com cargas Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 e Q_5 . A incerteza das medidas é igual a 0,05 cm.

$D(\text{cm})$	$d_{Q_1}(\text{cm})$	$d_{Q_2}(\text{cm})$	$d_{Q_3}(\text{cm})$	$d_{Q_4}(\text{cm})$	$d_{Q_5}(\text{cm})$
2,0	3,3	2,9	3,3	3,1	3,2
3,0	2,9	2,5	2,9	2,8	2,7
4,0	2,5	2,1	2,7	2,4	2,4
5,0	2,0	1,8	2,2	2,1	2,2
6,0	1,8	1,6	1,9	1,8	1,7
7,0	1,6	1,4	1,7	1,6	1,5
8,0	1,4	1,3	1,6	1,4	1,4
9,0	1,2	1,1	1,4	1,3	1,2
10,0	1,1	1,0	1,2	1,0	1,0
11,0	1,0	0,9	1,1	0,9	0,9
12,0	0,9	0,8	1,0	0,8	0,8
13,0	0,8	0,8	0,9	0,8	0,8

não linear entre os parâmetros físicos envolvidos e ela também sugere um comportamento entre estes parâmetros conforme uma lei de potência. Esta hipótese pode ser verificada construindo-se um gráfico em escala logarítmica entre os parâmetros físicos considerados, como representado na Figura 29.

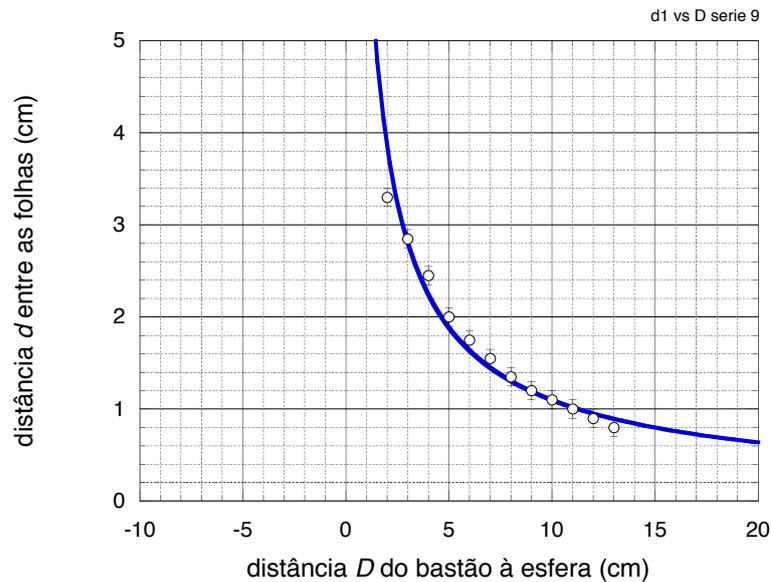


Figura 28. – Medidas da distância d entre as folhas do eletroscópio vs. distância D do centro do bastão ao centro da esfera para um bastão com carga Q_1 . A curva azul é somente um guia e revela a relação não linear entre os parâmetros físicos envolvidos. Esta curva sugere um comportamento entre estes parâmetros que obedece a uma lei de potência.

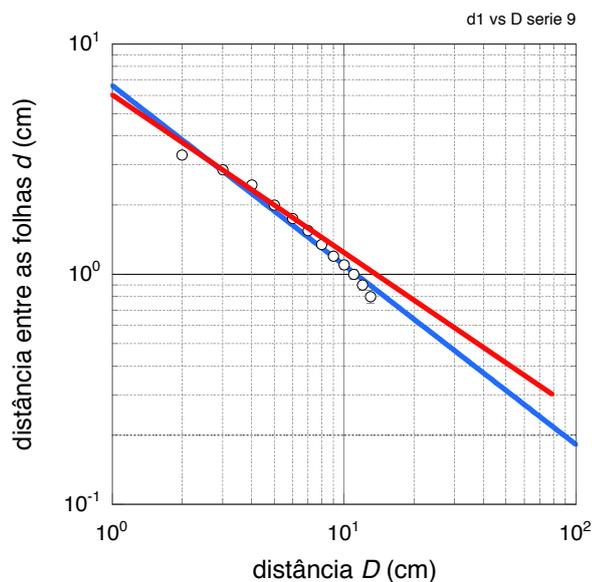


Figura 29. – Representação em escala logarítmica das medidas da distância d entre as folhas do eletroscópio vs. distância D do centro do bastão ao centro da esfera para um bastão com carga Q_1 . A reta azul é o guia que confirma, em primeira aproximação, o comportamento entre estes parâmetros conforme uma lei de potência. A reta em vermelho representa o resultado do modelo teórico.

Ao analisarmos o gráfico da Figura 28, observamos que, de fato, obtemos uma relação na forma de potência entre os parâmetros envolvidos:

$$d = aD^p, \quad (3.5)$$

onde

$$p \approx -0,78 \pm 0,02 \quad (3.6)$$

e

$$a \approx (6,6 \pm 0,1) \text{ cm}^{1,78}. \quad (3.7)$$

O modelo teórico, a ser discutido na seção 4.1, sugere uma lei de potência onde o expoente p_{teo} é igual a $2/3$. Comparando o valor encontrado na experiência com o valor de p previsto pelo modelo teórico encontramos uma discrepância Δ de

$$\Delta = \frac{p - p_{\text{teo}}}{p_{\text{teo}}} \approx 0,16, \quad (3.8)$$

o que representa uma diferença de 16% entre o valor previsto e o observado para o expoente p . Se impusermos este valor para a lei de potência, como indicado pela reta em vermelho no gráfico da Figura 29, encontramos um novo valor para a constante $a \approx 5,6 \text{ cm}^{1,67}$. Os dois resultados estão ilustrados na Figura 30.

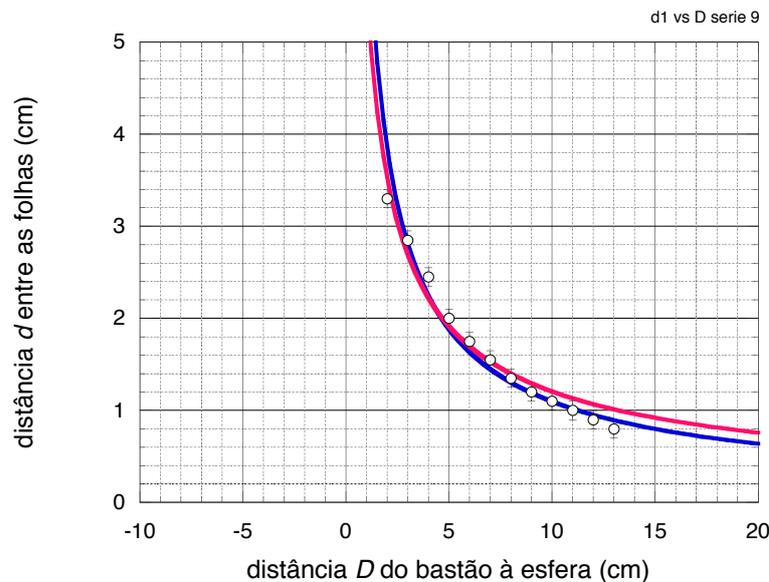


Figura 30. – Medidas da distância d entre as folhas do eletroscópio vs. distância D do centro do bastão ao centro da esfera para um bastão com carga Q_1 . A curva azul é o guia que representa, em primeira aproximação, o comportamento entre estes parâmetros conforme uma lei de potência. A curva em vermelho representa o resultado do modelo teórico.

Análise da série de medidas para um bastão com carga Q_2

A série de medidas da distância d entre as folhas do eletroscópio para diferentes distâncias D do centro do bastão ao centro da esfera, para um bastão com carga Q_2 , está representada na Figura 31.

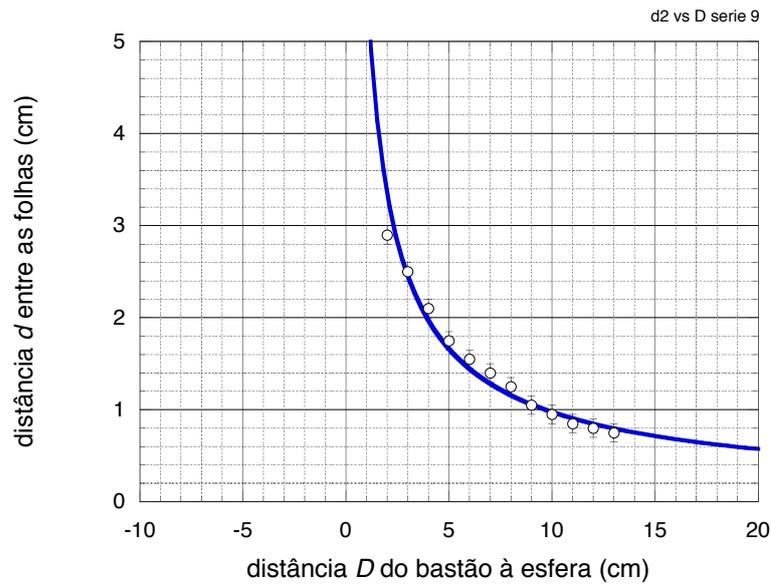


Figura 31. – Medidas da distância d entre as folhas do eletroscópio vs. distância D do centro do bastão ao centro da esfera para um bastão com carga Q_2 . A curva azul é novamente um guia e revela a relação não linear entre os parâmetros físicos envolvidos. Esta curva mais uma vez sugere um comportamento entre estes parâmetros que obedece a uma lei de potência.

Nesta figura, a curva azul é novamente um guia e revela a relação não linear entre os parâmetros físicos envolvidos e mais uma vez sugere um comportamento entre estes parâmetros conforme uma lei de potência. Esta hipótese pode ser verificada construindo-se um gráfico em escala logarítmica entre os parâmetros físicos considerados, como representado na Figura 32.

Ao analisarmos o gráfico da Figura 31, observamos que também obtemos uma relação na forma de potência entre os parâmetros envolvidos:

$$d = aD^p, \quad (3.9)$$

onde

$$p \approx -0,77 \pm 0,02 \quad (3.10)$$

e

$$a \approx (5,7 \pm 0,1) \text{ cm}^{1,77}. \quad (3.11)$$

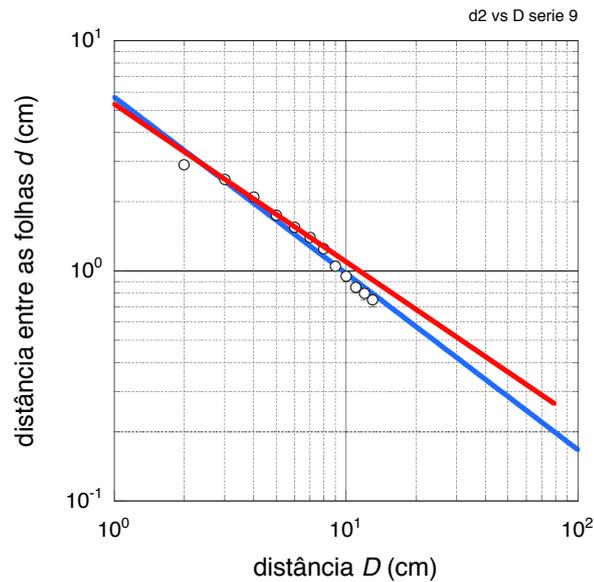


Figura 32. – Representação em escala logarítmica das medidas da distância d entre as folhas do eletroscópio vs. distância D do centro do bastão ao centro da esfera para um bastão com carga Q_2 . A reta azul é o guia que confirma, em primeira aproximação, o comportamento entre estes parâmetros conforme uma lei de potência. A reta em vermelho representa o resultado do modelo teórico.

Comparando o valor encontrado na experiência com o valor de p previsto pelo modelo teórico, $2/3$, que discutiremos na seção 4.1, encontramos uma discrepância Δ de

$$\Delta = \frac{p - p_{\text{teo}}}{p_{\text{teo}}} \approx 0,15, \quad (3.12)$$

o que representa uma diferença de 15% entre o valor previsto e o observado para o expoente p . Se impusermos este valor para a lei de potência, como indicado pela reta em vermelho no gráfico da Figura 32, encontramos um novo valor para a constante $a \approx 5,0 \text{ cm}^{1,67}$. Os dois resultados estão ilustrados na Figura 33.

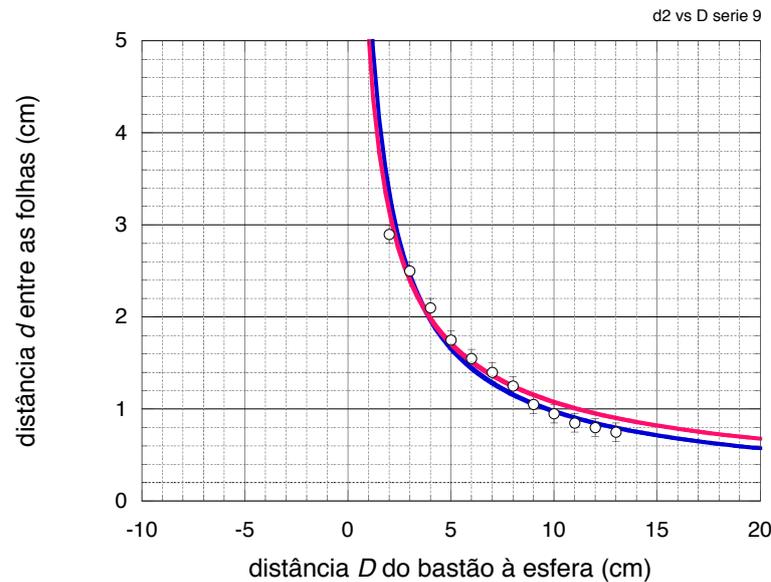


Figura 33. – Medidas da distância d entre as folhas do eletroscópio vs. distância D do centro do bastão ao centro da esfera para um bastão com carga Q_2 . A curva azul é o guia que representa, em primeira aproximação, o comportamento entre estes parâmetros conforme uma lei de potência. A curva em vermelho representa o resultado do modelo teórico.

Análise da série de medidas para um bastão com carga Q_3

A série de medidas da distância d entre as folhas do eletroscópio para diferentes distância D do centro do bastão ao centro da esfera, para um bastão com carga Q_3 , está representada na Figura 34.

Nesta figura, a curva azul é novamente um guia e revela a relação não linear entre os parâmetros físicos envolvidos e também sugere um comportamento entre estes parâmetros conforme uma lei de potência. Esta hipótese pode ser verificada construindo-se um gráfico em escala logarítmica entre os parâmetros físicos considerados, como representado na Figura 35.

Ao analisarmos o gráfico da Figura 34, observamos que também obtemos uma relação na forma de potência entre os parâmetros envolvidos:

$$d = aD^p, \quad (3.13)$$

onde

$$p \approx -0,73 \pm 0,02 \quad (3.14)$$

e

$$a \approx (6,5 \pm 0,1) \text{ cm}^{1,73}. \quad (3.15)$$

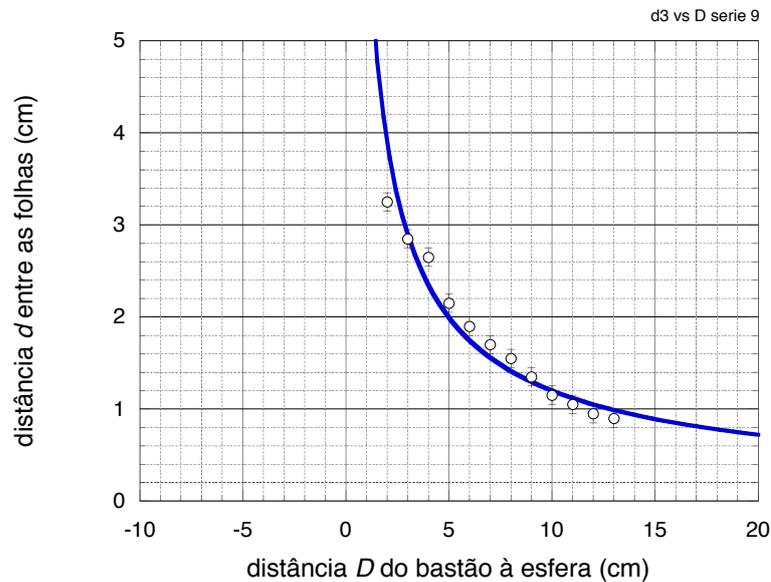


Figura 34. – Medidas da distância d entre as folhas do eletroscópio vs. distância D do centro do bastão ao centro da esfera para um bastão com carga Q_3 . A curva azul é novamente um guia e revela a relação não linear entre os parâmetros físicos envolvidos. Esta curva mais uma vez sugere um comportamento entre estes parâmetros que obedece a uma lei de potência.

Comparando o valor encontrado na experiência com o valor de p previsto pelo modelo teórico, $2/3$, encontramos uma discrepância Δ de

$$\Delta = \frac{p - p_{\text{teo}}}{p_{\text{teo}}} \approx 0,09, \quad (3.16)$$

o que representa uma diferença de 9,0% entre o valor previsto e o observado para o expoente p . Se impusermos este valor para a lei de potência, como indicado pela reta em vermelho no gráfico da Figura 35, encontramos um novo valor para a constante $a \approx 6,2 \text{ cm}^1$.⁶⁷ Os dois resultados estão ilustrados na Figura 36.

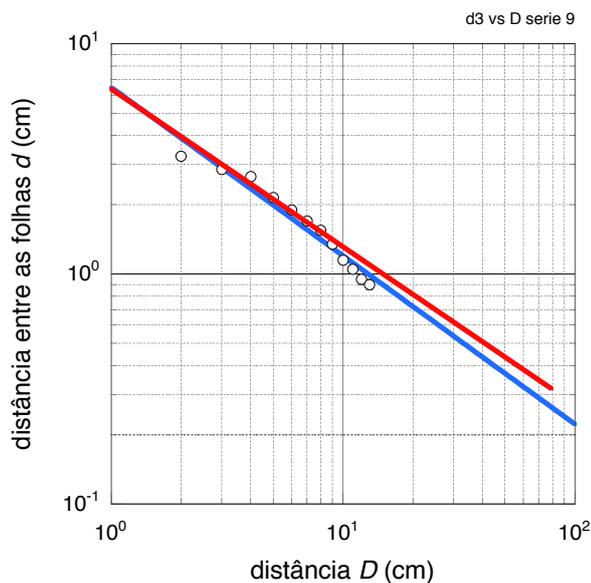


Figura 35. – Representação em escala logarítmica das medidas da distância d entre as folhas do eletroscópio vs. distância D do centro do bastão ao centro da esfera para um bastão com carga Q_3 . A reta azul é o guia que confirma, em primeira aproximação, o comportamento entre estes parâmetros conforme uma lei de potência. A reta em vermelho representa o resultado do modelo teórico.

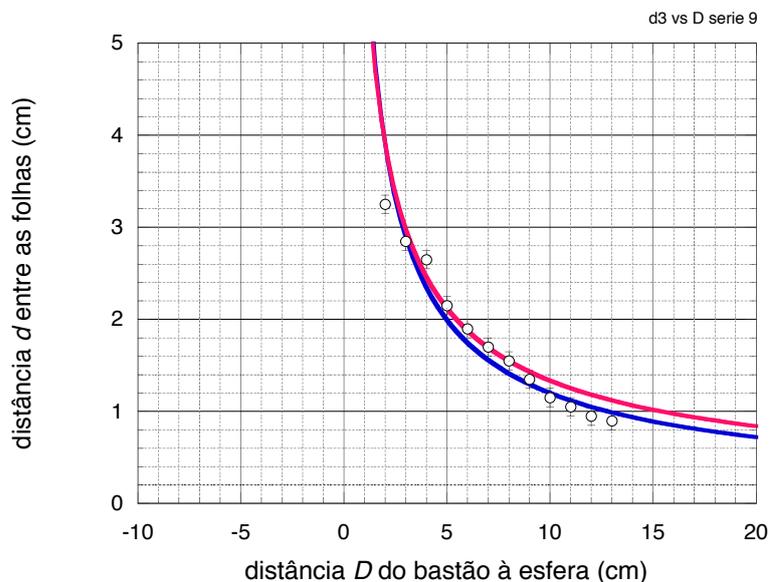


Figura 36. – Medidas da distância d entre as folhas do eletroscópio vs. distância D do centro do bastão ao centro da esfera para um bastão com carga Q_3 . A curva azul é o guia que representa, em primeira aproximação, o comportamento entre estes parâmetros conforme uma lei de potência. A curva em vermelho representa o resultado do modelo teórico.

Análise da série de medidas para um bastão com carga Q_4

A série de medidas da distância d entre as folhas do eletroscópio para diferentes distância D do centro do bastão ao centro da esfera, para um bastão com carga Q_4 , está representada na Figura 37.

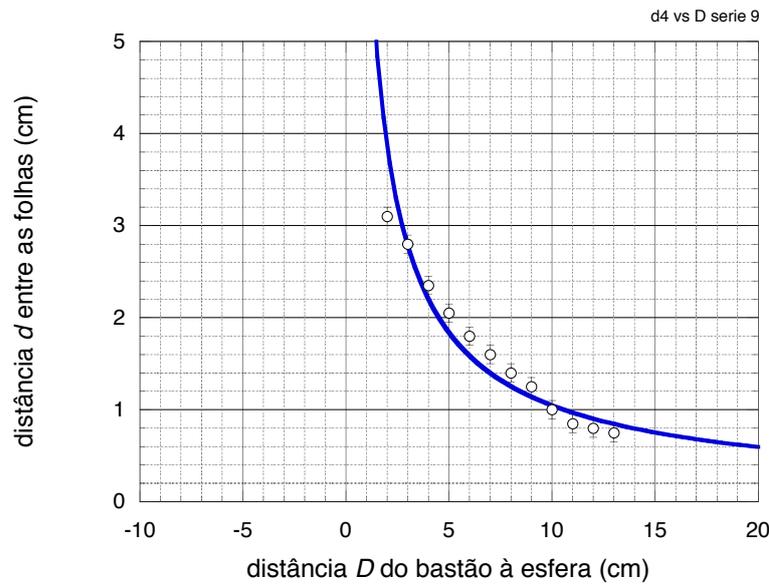


Figura 37. – Medidas da distância d entre as folhas do eletroscópio vs. distância D do centro do bastão ao centro da esfera para um bastão com carga Q_4 . A curva azul é novamente um guia e revela a relação não linear entre os parâmetros físicos envolvidos. Esta curva mais uma vez sugere um comportamento entre estes parâmetros que obedece a uma lei de potência.

Nesta figura, a curva azul é novamente um guia e revela a relação não linear entre os parâmetros físicos envolvidos e também sugere um comportamento entre estes parâmetros conforme uma lei de potência. Esta hipótese pode ser verificada construindo-se um gráfico em escala logarítmica entre os parâmetros físicos considerados, como representado na Figura 38.

Ao analisarmos o gráfico da Figura 37, observamos que também obtemos uma relação na forma de potência entre os parâmetros envolvidos:

$$d = aD^p, \quad (3.17)$$

onde

$$p \approx -0,81 \pm 0,02 \quad (3.18)$$

e

$$a \approx (6,8 \pm 0,1) \text{ cm}^{1,81}. \quad (3.19)$$

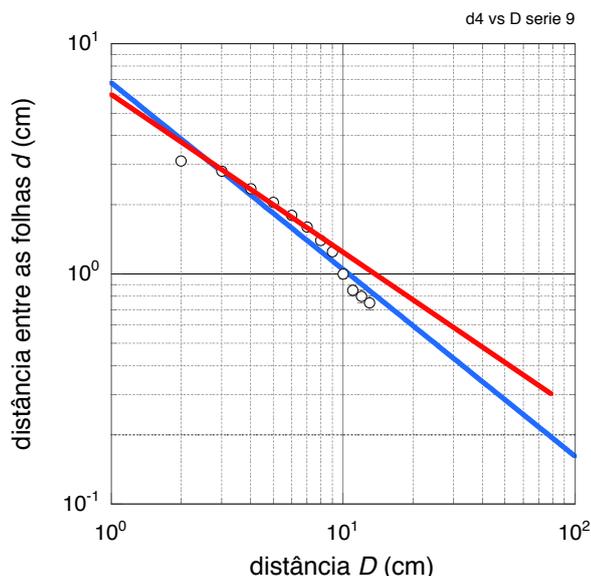


Figura 38. – Representação em escala logarítmica das medidas da distância d entre as folhas do eletroscópio vs. distância D do centro do bastão ao centro da esfera para um bastão com carga Q_4 . A reta azul é o guia que confirma, em primeira aproximação, o comportamento entre estes parâmetros conforme uma lei de potência. A reta em vermelho representa o resultado do modelo teórico.

Comparando o valor encontrado na experiência com o valor de p previsto pelo modelo teórico, $2/3$, encontramos uma discrepância Δ de

$$\Delta = \frac{p - p_{\text{teo}}}{p_{\text{teo}}} \approx 0,17, \quad (3.20)$$

o que representa uma diferença de 17% entre o valor previsto e o observado para o expoente p . Se impusermos este valor para a lei de potência, como indicado pela reta em vermelho no gráfico da Figura 38, encontramos um novo valor para a constante $a \approx 5,8 \text{ cm}^1$.⁶⁷ Os dois resultados estão ilustrados na Figura 39.

Análise da série de medidas para um bastão com carga Q_5

A série de medidas da distância d entre as folhas do eletroscópio para diferentes distância D do centro do bastão ao centro da esfera, para um bastão com carga Q_5 , está representada na Figura 40.

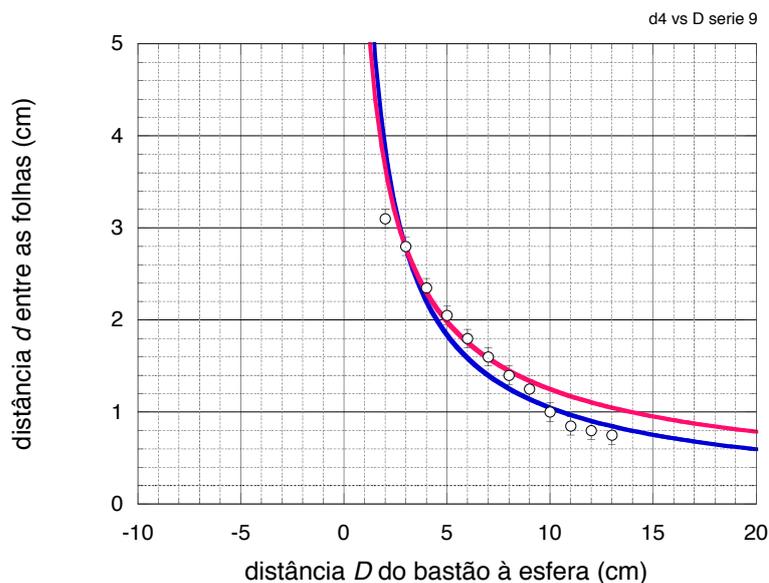


Figura 39. – Medidas da distância d entre as folhas do eletroscópio vs. distância D do centro do bastão ao centro da esfera para um bastão com carga Q_4 . A curva azul é o guia que representa, em primeira aproximação, o comportamento entre estes parâmetros conforme uma lei de potência. A curva em vermelho representa o resultado do modelo teórico.

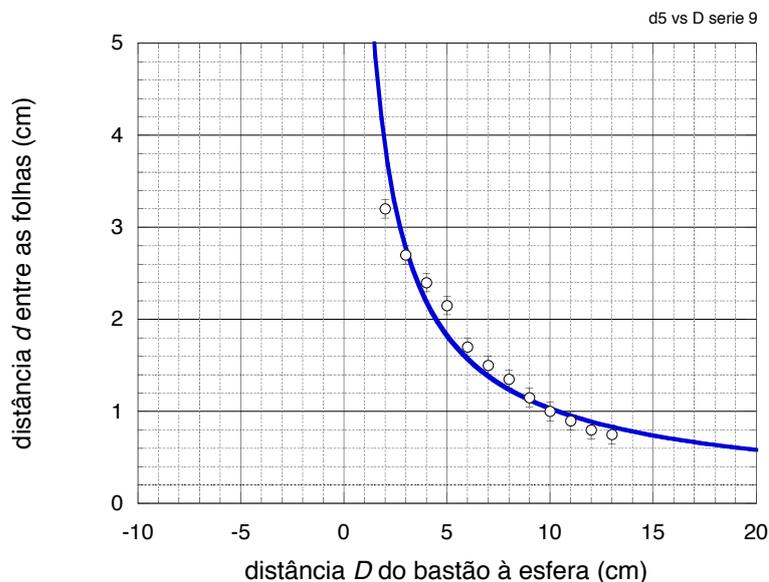


Figura 40. – Medidas da distância d entre as folhas do eletroscópio vs. distância D do centro do bastão ao centro da esfera para um bastão com carga Q_5 . A curva azul é novamente um guia e revela a relação não linear entre os parâmetros físicos envolvidos. Esta curva mais uma vez sugere um comportamento entre estes parâmetros que obedece a uma lei de potência.

Nesta figura, a curva azul é novamente um guia e revela a relação não linear entre os parâmetros físicos envolvidos e também sugere um comportamento entre estes parâmetros conforme uma lei de potência. Esta hipótese pode ser verificada construindo-se um gráfico em escala logarítmica entre os parâmetros físicos considerados, como representado na Figura 41.

Ao analisarmos o gráfico da Figura 40, observamos que também obtemos uma relação na forma de potência entre os parâmetros envolvidos:

$$d = aD^p, \quad (3.21)$$

onde

$$p \approx -0,82 \pm 0,02 \quad (3.22)$$

e

$$a \approx (6,8 \pm 0,1) \text{ cm}^{1,82}. \quad (3.23)$$

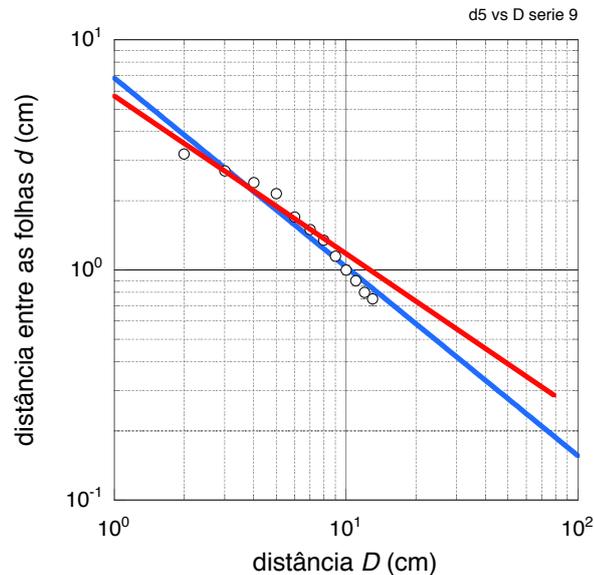


Figura 41. – Representação em escala logarítmica das medidas da distância d entre as folhas do eletroscópio vs. distância D do centro do bastão ao centro da esfera para um bastão com carga Q_5 . A reta azul é o guia que confirma, em primeira aproximação, o comportamento entre estes parâmetros conforme uma lei de potência. A reta em vermelho representa o resultado do modelo teórico.

Comparando o valor encontrado na experiência com o valor de p previsto pelo modelo teórico, $2/3$, encontramos uma discrepância Δ de

$$\Delta = \frac{p - p_{\text{teo}}}{p_{\text{teo}}} \approx 0,21, \quad (3.24)$$

o que representa uma diferença de 21% entre o valor previsto e o observado para o expoente p . Se impusermos este valor para a lei de potência, como indicado pela reta em vermelho no gráfico da Figura 41, encontramos um novo valor para a constante $a \approx 5,6 \text{ cm}^{1,67}$. Os dois resultados estão ilustrados na Figura 42.

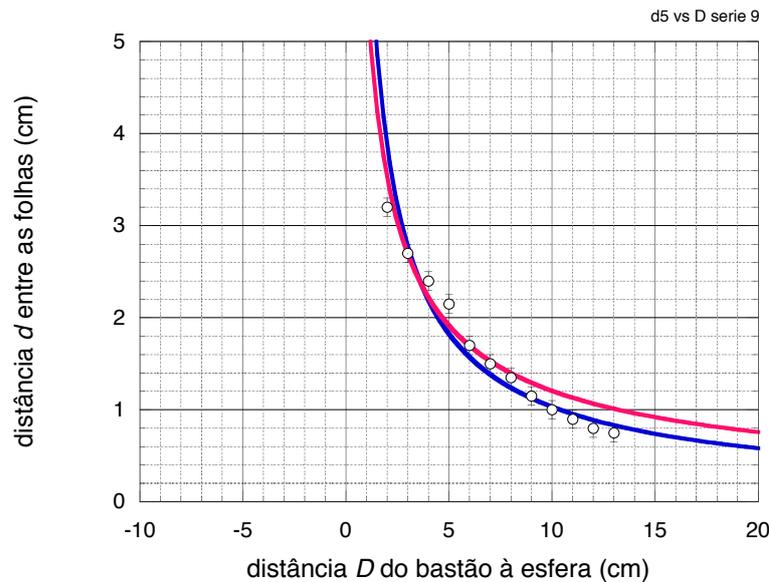


Figura 42. – Medidas da distância d entre as folhas do eletroscópio vs. distância D do centro do bastão ao centro da esfera para um bastão com carga Q_5 . A curva azul é o guia que representa, em primeira aproximação, o comportamento entre estes parâmetros conforme uma lei de potência. A curva em vermelho representa o resultado do modelo teórico.

Reunimos na Tabela 3 os resultados experimentais desta seção.

Tabela 3. – Resultados experimentais para a dependência entre a abertura d das folhas do eletroscópio em função da distância D do bastão ao centro da esfera do eletroscópio, com o bastão eletrizado com as cargas Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 e Q_5 , dado pela relação $dD^{-p} = a$. Todas as folhas possuem comprimento $L = 4,0 \text{ cm}$.

carga no bastão	a_{exp}	a_{ajustado}	p_{exp}
Q_1	$(6,6 \pm 0,1) \text{ cm}^{1,78}$	$(5,6 \pm 0,1) \text{ cm}^{5/3}$	$-0,78 \pm 0,02$
Q_2	$(5,7 \pm 0,1) \text{ cm}^{1,77}$	$(5,0 \pm 0,1) \text{ cm}^{5/3}$	$-0,77 \pm 0,02$
Q_3	$(6,5 \pm 0,1) \text{ cm}^{1,73}$	$(6,2 \pm 0,1) \text{ cm}^{5/3}$	$-0,73 \pm 0,02$
Q_4	$(6,8 \pm 0,1) \text{ cm}^{1,81}$	$(5,8 \pm 0,1) \text{ cm}^{5/3}$	$-0,81 \pm 0,02$
Q_5	$(6,8 \pm 0,1) \text{ cm}^{1,82}$	$(5,6 \pm 0,1) \text{ cm}^{5/3}$	$-0,82 \pm 0,02$

4 O funcionamento do eletroscópio

Neste capítulo fazemos uma análise teórica do funcionamento do eletroscópio de folhas com o objetivo de construir um modelo matemático que relacione as grandezas físicas relevantes em cada aparato experimental. Na seção 4.1 realizamos uma análise mecânica e também analisamos a distribuição das cargas elétricas ao longo do eletroscópio. Na seção 4.2 realizamos uma análise mecânica da abertura das folhas no momento que aproximamos o bastão indutor carregado. Usamos como referência os trabalhos de Thomson (2011), McDonald (2002a), McDonald (2002b) e Pugh (1960).

4.1 Determinação teórica da carga elétrica Q do bastão indutor

Quando o bastão carregado por atrito é aproximado do eletroscópio, ele produz uma diferença de potencial (d.d.p.) nos extremos do eletroscópio. Essa d.d.p produz uma migração dos elétrons livres até que o equilíbrio eletrostático seja estabelecido na sua superfície. Variando a distância D do bastão carregado ao centro da esfera, ocorrerá nova migração de elétrons livres, o que fará variar a distância d entre as folhas do eletroscópio, conforme ilustra o modelo a seguir.

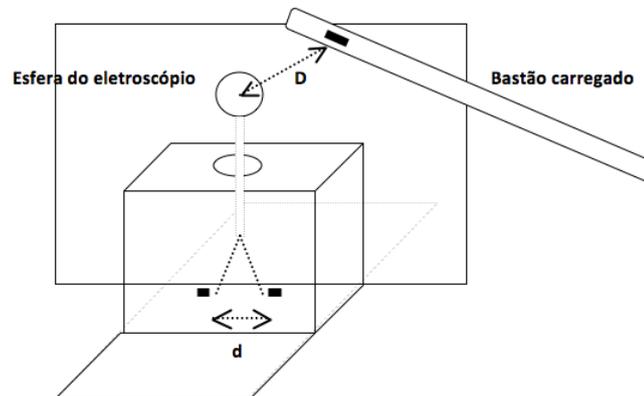


Figura 43. – Modelo do funcionamento do eletroscópio de folhas.

Inicialmente analisamos o nosso eletroscópio composto somente pela sua esfera. Quando aproximamos o bastão carregado com uma carga indutora, que chamaremos Q , ela induzirá uma distribuição de cargas na superfície da esfera do eletroscópio, que chamaremos de q_1 . O método das imagens permite considerar que essa carga distribuída na superfície da esfera do eletroscópio esteja posicionada em um ponto sobre o diâmetro da esfera e tratá-la como uma carga pontual. A Figura 44 ilustra o método das imagens, onde uma carga real Q do bastão induz uma carga oposta q_1 na esfera do eletroscópio. A carga

induzida q_1 , pelo método das imagens, está posicionada como se estivesse localizada em um ponto acima do centro da esfera.

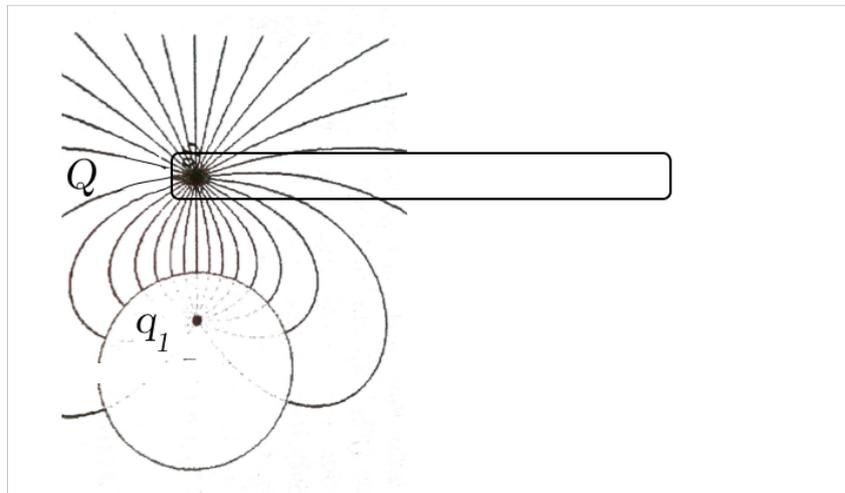


Figura 44. – Esta figura ilustra o método das imagens, onde uma carga real Q do bastão induz uma carga oposta q_1 na esfera do eletroscópio. A carga induzida q_1 , pelo método das imagens, é como se estivesse localizada em um ponto acima do centro da esfera.

Como indicado na Figura 45, podemos construir um modelo matemático com o método das imagens que relaciona a distância do bastão carregado ao centro da esfera D com a abertura da folhas do eletroscópio. Vamos considerar apenas o bastão carregado (corpo indutor) e a esfera do eletroscópio (induzido).

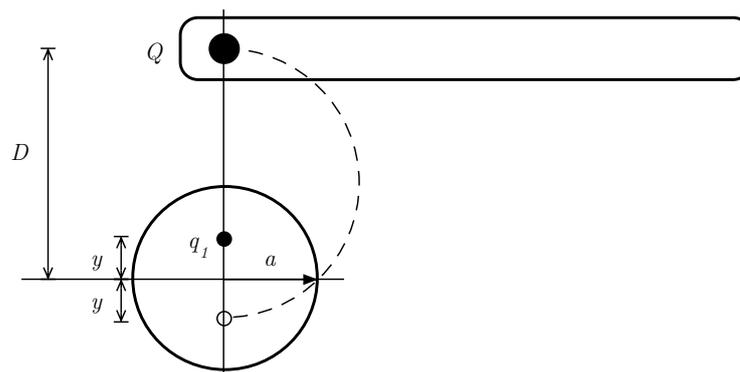


Figura 45. – Ilustração da esfera do eletroscópio e do bastão carregado com carga Q . Arco de circunferência tracejado de raio $(D + y)/2$. A carga imagem q_1 induzida posiciona-se acima do centro da esfera de raio a .

Temos, pelo arco tracejado da figura, que o raio a da esfera, a distância D do bastão ao centro da esfera e a posição y da carga induzida q_1 é dada por

$$a^2 = Dy \quad (4.1)$$

e, portanto, podemos escrever que conhecendo-se o raio a da esfera e a distância D , a posição y da carga imagem induzida q_1 é dada por

$$y = a^2/D. \quad (4.2)$$

Sabemos que na superfície da esfera condutora do eletroscópio, o potencial elétrico resultante produzido pelas cargas Q e q_1 é zero. Então, a soma do potencial da carga Q produzido no ponto A sobre a superfície da esfera e do potencial da carga q_1 no mesmo ponto é zero. Deste modo, temos que

$$\frac{Q}{D-a} = \frac{q_1}{a-y}. \quad (4.3)$$

Substituindo (4.2) em (4.3) e solucionado a equação resultante para o valor da carga induzida q_1 obtemos

$$q_1 = Q \frac{a}{D}. \quad (4.4)$$

Para o nosso eletroscópio de folhas, vamos considerar que temos uma esfera de raio a_2 no lugar de uma das folhas, conforme indicado na Figura 46

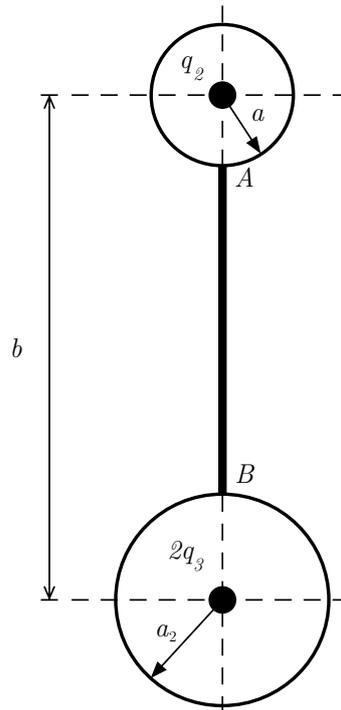


Figura 46. – Modelo simplificado do eletroscópio de folhas. A esfera de raio a_2 representa uma das folhas do eletroscópio.

As cargas q_2 e $2q_3$ são as cargas induzidas pelo bastão indutor que foram distribuídas no eletroscópio. De modo a conservar a carga total, devemos ter

$$2q_3 + q_2 = -q_1. \quad (4.5)$$

Por conveniência, denominamos $2q_3$ a carga induzida na esfera de raio a_2 porque posteriormente transformaremos esta esfera nas duas folhas do eletroscópio. Quando for estabelecido o equilíbrio eletrostático, o potencial elétrico resultante nos pontos A e B , produzidos pelas cargas $2q_3$ e q_2 , são iguais. Em primeira aproximação, podemos escrever que

$$\frac{q_2}{b-a_2} + \frac{2q_3}{a_2} = \frac{q_2}{a} + \frac{2q_3}{b-a}. \quad (4.6)$$

Então, resolvendo (4.6) para a razão entre as cargas $2q_3/q_2$ obtemos

$$\frac{2q_3}{q_2} = \frac{a_2}{a} \frac{b-a}{b-a_2}. \quad (4.7)$$

Combinando (4.4), (4.5) e (4.7) obtemos o valor da carga q_2 em função da carga Q no bastão:

$$q_2 = Q \frac{a}{D} \left[\frac{a(b-a_2)}{a_2(b-a) + a(b-a_2)} \right]. \quad (4.8)$$

Substituindo (4.8) em (4.5) determinamos o valor da carga $2q_3$ em função da carga Q no bastão:

$$2q_3 = Q \frac{a}{D} \left[\frac{a_2(b-a)}{a_2(b-a) + a(b-a_2)} \right]. \quad (4.9)$$

Para o nosso eletroscópio, iremos considerar que a sua esfera principal é descrita pela esfera de raio a ; o comprimento da haste mais o comprimento l da folha correspondendo ao parâmetro b ; e a esfera auxiliar, de raio a_2 , estando localizada na extremidade inferior de cada uma das folhas do eletroscópio e seu raio a_2 correspondendo a, aproximadamente, metade da largura w da folha.

Para o nosso eletroscópio, temos que suas dimensões são dadas por

$$a \approx 1,25 \text{ cm}, \quad (4.10)$$

$$b \approx \text{comprimento da haste} + \text{comprimento } l \text{ da folha} \approx 15,30 \text{ cm} \quad (4.11)$$

e

$$a_2 \approx w/2 \approx 0,20 \text{ cm}. \quad (4.12)$$

Em função das dimensões do nosso aparato experimental, temos que $a_2 \ll b$ e $a_2 \ll a$. Deste modo, podemos determinar Q pela expressão

$$Q \approx q_3 \frac{4D}{w}. \quad (4.13)$$

Podemos então concluir deste modelo que o valor da carga Q é dado aproximadamente por (4.13). Seu valor fica univocamente determinado pela geometria do problema e pelo valor da carga q_3 localizada essencialmente na extremidade das folhas do eletroscópio. Podemos então determinar o valor da carga q_3 a partir da força elétrica F entre as duas cargas q_3 induzidas nas extremidades das folhas, como será realizado na seção 4.2.

4.2 Determinação teórica da carga q da folha do eletroscópio

Observando o funcionamento das lâminas do eletroscópio, podemos estabelecer uma relação existente entre a abertura das laminas e suas massas. Nosso ponto de partida foi o modelo do eletroscópio. Quando o bastão carregado se aproxima do eletroscópio a d.d.p que ele gera no eletroscópio produz uma migração dos elétrons livres, conforme a Figura 47.

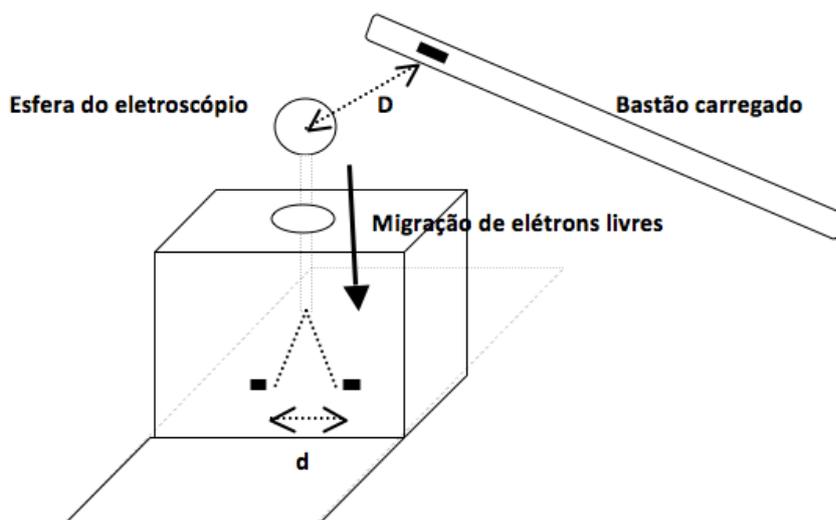


Figura 47. – Modelo do nosso eletroscópio.

As folhas se abrem devido a repulsão elétrica. Fazendo uma análise das forças de interação, temos, conforme o sistema de forças ilustrado na figura 48:

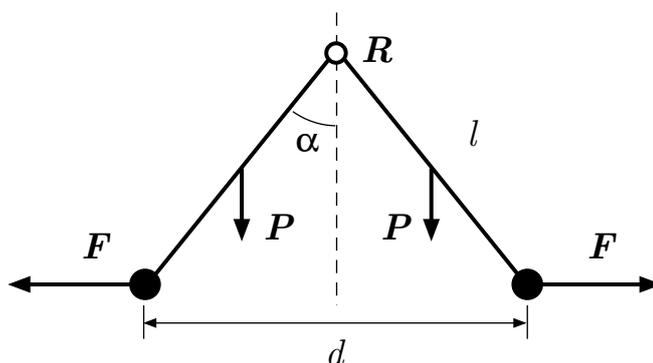


Figura 48. – Representação das forças que agem sobre cada folha. O ponto R é o ponto de rotação das folhas e l é o comprimento de cada folha. Os vetores \mathbf{F} e \mathbf{P} representam a força elétrica e a força peso, respectivamente.

Da Figura 48 observamos que, em relação ao eixo de rotação na junção das duas folhas, o torque resultante é zero. Se as folhas estiverem em equilíbrio estático, podemos concluir

que

$$F = \frac{P}{2} \tan \alpha, \quad (4.14)$$

onde F é a força elétrica entre as folhas, P é o peso de cada folha e α é a metade do ângulo de abertura das folhas. A força peso é dada por

$$P = mg \quad (4.15)$$

e a força elétrica é dada por

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q^2}{d^2}, \quad (4.16)$$

onde d é a distância entre as folhas abertas, q é a carga distribuída na extremidade da folha e ϵ_0 é a constante de permeabilidade elétrica do meio. Então, ao substituir (4.15) e (4.16) em (4.14) obtemos o quadrado do valor da carga elétrica q induzida pelo bastão:

$$q^2 = 2\pi\epsilon_0 mg d^2 \tan \alpha. \quad (4.17)$$

Utilizando o triângulo retângulo da figura 49,

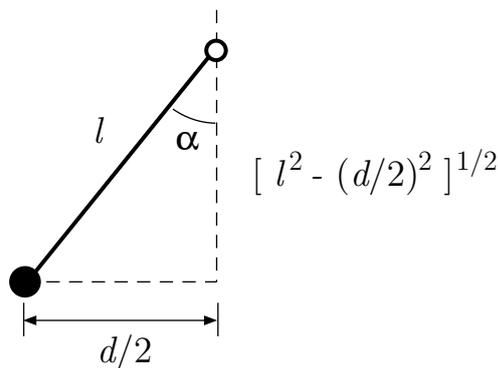


Figura 49. – Composição das folhas.

temos que

$$\tan \alpha = \frac{d/2}{\sqrt{l^2 - (d/2)^2}}. \quad (4.18)$$

onde l corresponde ao comprimento da folha. Substituindo (4.18) na (4.17) obtemos, para $d \ll 2l$, uma relação bem simples entre a massa m da folha e a distância de separação entre elas:

$$q^2 \approx \frac{\pi\epsilon_0}{l} mg d^3. \quad (4.19)$$

Concluimos então que a determinação da carga q localizada na extremidade da folha depende somente do material usado para confeccionar a folha, da sua geometria e da abertura entre elas.

Sabendo que

$$m = \rho w l \delta, \quad (4.20)$$

onde ρ é a densidade do material da folha, w a sua largura e δ a sua espessura, podemos escrever que

$$w d^3 \approx \frac{q^2}{\pi \varepsilon_0 \rho g \delta}. \quad (4.21)$$

Se mantivermos a carga induzida q invariante durante um experimento, como realizado na Atividade 1, devemos então observar que

$$w d^3 \approx \kappa_1, \quad (4.22)$$

onde κ_1 é uma constante.

Lembramos, da seção 4.1, que o valor da carga do bastão Q é dada aproximadamente por $Q \approx q(4D/w)$. Se mantivermos a massa m da folha invariante durante um experimento, como realizado na Atividade 2, podemos substituir este resultado em (4.19) e concluir que

$$Q \approx \kappa_2 d^{3/2} D, \quad (4.23)$$

onde κ_2 é uma constante dada por

$$\kappa_2 = \frac{4}{w} \sqrt{\pi \varepsilon_0 \frac{m g}{l}}. \quad (4.24)$$

Portanto, para um experimento onde aproximamos o bastão eletrizado com carga Q , variamos a distância D entre o bastão e o centro da esfera e, por consequência, ocorre o afastamento igual a d entre as extremidades das folhas do eletroscópio.

4.3 Estimativa da carga q induzida nas folhas do eletroscópio

Utilizando a equação (4.21) do modelo matemático que construímos, junto com as equações (3.1), (3.2), (3.3) e (3.4), obtidas experimentalmente a partir da análise dos resultados, podemos encontrar o valor experimental aproximado da carga elétrica q nas folhas.

Da equação (4.21), obtemos

$$w d^3 = \frac{q^2}{\pi \varepsilon \delta \rho g}, \quad (4.25)$$

onde as constantes δ e ρ representam a espessura e a densidade da folha de alumínio:

$$\delta = 2,0 \cdot 10^{-5} \text{ m}$$

e

$$\rho = 2,7 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3.$$

Substituindo as constantes, podemos reescrever a equação (4.21) na forma

$$q^2 = (1,5 \cdot 10^{-11})wd^3. \quad (4.26)$$

Para as cargas acumuladas nas folhas ($q_1 \approx q_2$, como já vimos na seção 3.1) de larguras $w = 4,0$ mm e $w = 8,0$ mm da Atividade 1 temos, conforme as equações (3.2) e (3.3):

$$q^2 = (1,5 \cdot 10^{-11})(8,0 \cdot 10^{-8}) C^2. \quad (4.27)$$

Portanto, podemos estimar o valor da carga induzida na folha:

$$q_1 \approx q_2 \approx 1,1 \cdot 10^{-9} C. \quad (4.28)$$

Para as cargas acumuladas nas folhas ($q_3 \approx q_4$, como já vimos na seção 3.1) de larguras $w = 12,0$ mm e $w = 16,0$ mm da Atividade 1 temos, conforme as equações (3.2) e (3.3):

$$q^2 = (1,5 \cdot 10^{-11})(4,9 \cdot 10^{-8}) C^2. \quad (4.29)$$

Portanto, podemos estimar uma vez mais o valor da carga induzida na folha:

$$q_3 \approx q_4 \approx 0,86 \cdot 10^{-9} C. \quad (4.30)$$

Estes valores são compatíveis com aqueles descritos nos livros didáticos usados no Ensino Médio como, por exemplo, o livro de Alvarenga e Máximo (2015).

4.4 Estimativa da carga Q contida no bastão eletrizado

Por meio da Atividade 2, podemos obter o valor aproximado experimental da carga elétrica Q contida no bastão indutor carregado.

Utilizando o modelo matemático desenvolvido na seção 4.1 temos, das equações (4.23) e (4.24), que a carga Q do bastão eletrizado é dada por

$$Q \approx \kappa_2(d D^{2/3})^{3/2} \quad (4.31)$$

onde $\kappa_2 = 3,6 \cdot 10^{-3} \text{ Cm}^{-5/2}$. Substituindo o valor de $d D^{2/3}$ para a série de medidas para o bastão com diferentes carga Q , indicados na Tabela 3, encontramos

$$Q_1 \approx \kappa_2(5,6 \cdot 10^{-10/3})^{3/2} \approx 4,8 \cdot 10^{-7} C, \quad (4.32)$$

$$Q_2 \approx \kappa_2(5,0 \cdot 10^{-10/3})^{3/2} \approx 4,0 \cdot 10^{-7} C, \quad (4.33)$$

$$Q_3 \approx \kappa_2(6,2 \cdot 10^{-10/3})^{3/2} \approx 5,6 \cdot 10^{-7} C, \quad (4.34)$$

$$Q_4 \approx \kappa_2(5,8 \cdot 10^{-10/3})^{3/2} \approx 5,0 \cdot 10^{-7} C \quad (4.35)$$

e

$$Q_5 \approx \kappa_2(5,6 \cdot 10^{-10/3})^{3/2} \approx 4,8 \cdot 10^{-7} C. \quad (4.36)$$

5 Aplicação da proposta de aula

Aplicamos a proposta deste trabalho no Colégio Pedro II, na unidade de Duque de Caxias, com alunos do 3º ano do ensino médio. O planejamento foi feito para dois tempos de aula de 45 minutos cada. Esses alunos já tinham estudado, de maneira formal, em aulas anteriores os princípios da eletrostática, os processos de eletrização e a lei de Coulomb. Os alunos foram divididos em grupos de, no máximo, cinco alunos.

Após a formação dos grupos, apresentamos aos alunos o eletroscópio da Figura 50, construído especialmente para a aula. A primeira discussão é sobre o processo de eletrização através do atrito entre um tubo de PVC e um pano de lã. Discutimos a ideia de corpos condutores e isolantes. Também discutimos a possibilidade de usar uma barra metálica no lugar do tubo. Mostramos que também podemos carregá-la por atrito com a lã, desde que tenhamos o cuidado de não colocar a mão livre sobre a barra. Um suporte de borracha serve como solução para este problema e este é um bom momento para chamar a atenção dos alunos para o efeito de migração de cargas através do contato com o corpo humano.

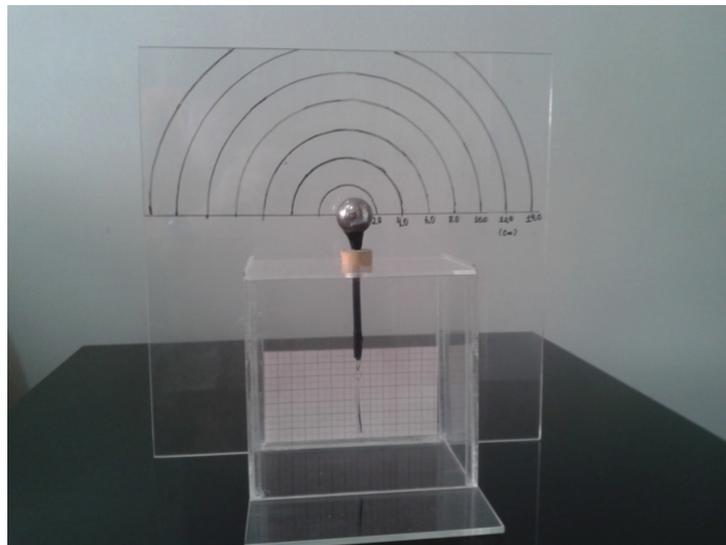


Figura 50. – Eletroscópio utilizado com os alunos para discussão dos conceitos básicos da eletrostática.

A etapa seguinte da aula é a discussão do funcionamento do eletroscópio. Aproximando o bastão PVC da esfera do eletroscópio as folhas se abrem e a medida que variamos a distância do bastão à esfera, a abertura entre as folhas também varia. Mostramos aos alunos que ao aproximar o bastão da esfera, o bastão produz uma diferença de potencial (d.d.p) nas extremidades do eletroscópio. Essa d.d.p, de forma análoga aos terminais de uma pilha, gera uma migração dos elétrons livres do eletroscópio. Na extremidade do eletroscópio, onde ficam as folhas, forma-se uma região com “excesso” de elétrons

e, portanto com cargas negativas. Lembramos o princípio da eletrostática — cargas de mesmo sinal se repelem — e explicamos porque as folhas do eletroscópio se abrem.

Aproveitamos a mesma atividade para também discutir o processo de eletrização do eletroscópio por indução. Com o bastão carregado e próximo a esfera, solicitamos a um aluno que encoste o dedo na esfera do eletroscópio indicado na Figura 50. Após a retirada do contato com a esfera e o posterior afastamento do bastão, as folhas continuam afastadas e a medida aproximamos o bastão, as folhas se aproximam. Perguntamos aos alunos sobre uma possível explicação do fenômeno observado. Após algumas sugestões, discutimos o fato da migração dos elétrons através do contato do corpo condutor (mão do aluno) e que o eletroscópio fica carregado com uma carga oposta a do bastão indutor e, por isso, a distância entre as folhas se reduz quando o bastão é aproximado da esfera. Nessa etapa da aula, para que todos os alunos possam entender o motivo do fechamento das folhas, descrevemos esquematicamente no quadro-negro um modelo da distribuição das cargas presentes no eletroscópio e no bastão quando ele é aproximado da esfera.

Nesse momento da aula, aproveitamos para discutir o conceito de potencial elétrico criado por uma carga puntiforme em repouso e o conceito de força elétrica (lei de Coulomb).

Utilizamos o modelo mecânico da abertura das folhas para representar as forças que atuavam em cada folha e utilizando alguns conceitos físicos, construímos o modelo matemático descrito nesse trabalho. Toda essa construção foi feita no quadro negro em etapas para que os alunos fossem capazes de compreender todo o processo. Após algum trabalho algébrico chegamos a equação:

$$q = \left(\frac{4\pi\epsilon mgd^3}{2l} \right)^{1/2} \quad (5.1)$$

Solicitamos aos alunos que começassem a medir a abertura d entre as folhas a medida que aproximássemos o bastão. Após algumas medidas anotadas e utilizando a massa das folhas (previamente medidas) e o comprimento de 4,0 cm, obtemos com o auxílio do modelo matemático, os valores aproximados das cargas elétricas que se acumularam nas folhas a medida que variávamos a distância do bastão carregado até a esfera do eletroscópio.

Como trabalho domiciliar apresentamos o aparato experimental 1 com quatro eletroscópios idênticos, exceto pelas massas das folhas que variam com suas larguras (figura 51).

Solicitamos aos grupos que efetuassem medidas da abertura das folhas com o bastão de PVC carregado próximo aos eletroscópios. Foi explicado o funcionamento do eletroscópio e seu objetivo de relacionar a abertura d entre as folhas com suas larguras w e a equação desenvolvida segundo o modelo matemático descrito para calcular a carga da folha na atividade anterior. Substituímos apenas a massa pelo produto da densidade pela largura w da folha, temos

$$wd^3 \approx \frac{2q^2}{4\pi\epsilon_0}\rho \quad (5.2)$$



Figura 51. – Aparato experimental 1 composto por quatro eletroscópios idênticos, exceto pelas massas (m) das folhas que são proporcionais às larguras (w).

ou

$$wd^3 \approx K. \quad (5.3)$$

Ensinamos aos alunos as técnicas de representação gráfica linear e logarítmica para analisar a relação entre a abertura d entre as folhas em função da sua largura w e, assim, obter o valor experimental aproximado da constante K . A partir da determinação do valor experimental da constante K , os alunos foram orientados a estimar o valor da carga elétrica q induzido nas folhas.

Fizemos uma discussão final sobre a possibilidade de existirem dúvidas e encerramos a aula. As fotos mostradas nas figuras 52 e 53 ilustram as atividades realizadas em classe.



Figura 52. – Aluna aproximando o bastão eletrizado da esfera do eletroscópio, em uma aula regular sobre eletrostática.



Figura 53. – Aluna eletrizando o bastão por atrito, em uma aula regular sobre eletrostática..

6 Considerações finais

Apresentamos neste trabalho um material pedagógico para uma aula sobre eletrostática examinando as propriedades de um eletroscópio de folhas. Este instrumento tem sido considerado pela literatura especializada como uma poderosa ferramenta para o ensino de eletrostática, com diversas possibilidades didáticas a serem exploradas, e a discussão de suas características é um tema presente em nosso programa do Ensino Médio. Entretanto, este instrumento tem sido descrito, pela maioria dos livros didáticos, apenas de forma qualitativa por meio de modelos e esquemas, e a sua função restringindo-se a somente identificar corpos carregados. Neste nosso trabalho apresentamos algumas alternativas didáticas ao ensino de eletrostática a serem exploradas com o auxílio do eletroscópio ao utilizá-lo não apenas como um identificador de corpos carregados mas também como um instrumento capaz de nos permitir estimar quantitativamente tanto o valor aproximado da carga elétrica q induzida nas suas folhas por um bastão indutor quanto o valor da carga elétrica Q distribuída neste mesmo bastão.

Com as duas atividades desenvolvidas e discutidas no presente trabalho, e sob a orientação do professor, esperamos ter oferecido condições que permitam ao aluno abordar um problema científico: a observação do fenômeno, o estabelecimento das condições para a sua reprodução em situações controladas e, finalmente, a descoberta da sua representação matemática. Com isso, esperamos que a proposta discutida nessa dissertação contribua para o desenvolvimento das suas habilidades e competências, assim como para o aperfeiçoamento da sua postura científica. Deste modo, ao realizar estas duas atividades também seguimos as orientações dos Programas Curriculares Nacionais do Ensino Médio—PCNEM quanto ao desenvolvimento de instrumentos de análise algébrica que permitem aos alunos construir abstrações matemáticas através da interpretação de gráficos ligados aos aspectos físicos de um problema.

Desejamos com esse trabalho, também ressaltar a importância da experimentação científica na formação do estudante. Como Baker et al. (1986) nos chamam a atenção, “experimentar, em Ciências, é uma exploração, uma pesquisa no desconhecido” e “esta característica da atividade experimental a torna ainda mais prazerosa quando os resultados obtidos pelo pesquisador fazem avançar a fronteira do conhecimento, por menor que seja este avanço.” Com isso, esperamos que o aluno ao terminar as atividades seja capaz de observar que as leis científicas e os modelos analíticos adotados pela comunidade científica são formulados com base na observação e devem ser continuamente testados para sabermos os limites de validade de tais representações.

Referências

- ALVARENGA, B.; MÁXIMO, A. *Física – Contexto e Aplicações*. 1. ed. São Paulo: Scipione, 2015.
- ASSIS, A. K. T. *The experimental and historical foundations of electricity*. Montreal: Apeiron, 2010.
- ASSIS, A. K. T. *Os fundamentos experimentais e históricos da eletricidade*. Montreal: Apeiron, 2010.
- BAKER, A. G. et al. *The Systematic Experiment*. Cambridge: Cambridge University Press, 1986.
- BRASIL. *Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional*. Brasília: Congresso Nacional, 1996. Lei no 9.394, de 20 de dezembro de 1996. Disponível em: <<http://www.mec.gov.br>>. Acesso em: outubro de 2016.
- BRASIL. *Parâmetros Curriculares Nacionais*. Brasília: MEC/SEF, 1998.
- BRASIL. *Parâmetros Curriculares Nacionais – Ensino Médio*. Brasília: SEMTEC/MEC, 2000.
- BRASIL. *PCN+Ensino Médio: orientações educacionais complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais; Ciências da natureza, Matemática e suas Tecnologias*. Brasília: MEC/SEMTEC, 2002.
- BRASIL. *PCN+Física: orientações educacionais complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais: Ciências da natureza, Matemática e suas tecnologias*. Brasília: MEC/SEMTEC, 2002.
- BRASIL. *PCN+Ensino Médio: orientações educacionais complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais – Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias*. Brasília: MEC/Semtec, 2006.
- DESCONHECIDO, A. *Francis Hawksbee*. 2011. Disponível em: <<http://www.lookandlearn.com/history/discretionary{-}{-}{-}images>>. Acesso em: outubro de 2016.
- DVOŘÁK, L. Bipolar transistors can detect charge in electrostatic experiments. *Physics Education*, v. 47, n. 4, p. 434, 2012.
- GILBERT, W. *De magnete*. New York: Dover, 1958.
- GUERRICKE, O. von. *Experimenta Nova (ut vocantur) Magdeburgica De Vacuo Spatio*. Amstelodami: Janssonius, 1672. 148 p.
- HAUKSBEE, F. *From Physico–Mechanical Experiments*. 2. ed. London: [s.n.], 1719.
- MCDONALD, K. T. Conducting ellipsoid and circular disk. *Princeton Univ., Princeton, NJ. [Online]*, 2002. Disponível em: <<http://puhep1.princeton.edu/~mcdonald/examples/ellipsoid.pdf>>. Acesso em: outubro de 2016.

- MCDONALD, K. T. Two conducting spheres at the same potential. *Princeton Univ., Princeton, NJ.[Online].*, 2002. Disponível em: <<http://puhep1.princeton.edu/~mcdonald/examples/twospheres.pdf>>. Acesso em: outubro de 2016.
- MEDEIROS, A. The historical origins of the electroscope. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 24, n. 3, p. 353–361, 2002.
- PUGH, E. M. *Principles of electricity and magnetism*. [S.l.]: Addison-Wesley, 1960.
- STEWART, J.; SKINNER, S.; STEWART, G. The leaf electroscope: A take-home project of unexpected depth. *The Physics Teacher*, v. 51, n. 9, p. 520–521, 2013.
- THOMPSON, F. An electronic electroscope. *Physics Education*, v. 49, n. 1, p. 18, 2014.
- THOMSON, W. *Reprint of Papers on Electrostatics and Magnetism*. Cambridge: Cambridge University Press, 2011. Disponível em: <<https://www.cambridge.org/core/books/reprint-of-papers-on-electrostatics-and-magnetism/18C83945925B90F68460706270B999A8>>. Acesso em: outubro de 2016.

A Roteiro da aula ministrada no Colégio Pedro II

Apresentamos nesse apêndice o Roteiro da aula Ministrada no Colégio Pedro II. Esse modelo de roteiro da aula dada no Colégio Pedro II descreve o conteúdo a ser trabalhado, objetivo da aula, as estratégias, os recursos utilizados, a duração a aula e a avaliação.

A.1 Tema

O eletroscópio de folhas como instrumento de construção dos conceitos da eletrostática.

A.2 Conteúdo

Noções básicas de eletrostática:

- Carga elétrica.
- Condutores e isolantes.
- Processos de eletrização.
- Aterramento.
- Força elétrica – Lei de Coulomb.
- Potencial elétrico.

A.3 Objetivo

Esperamos que os alunos sejam capazes de:

- Compreender o conceito de carga elétrica;
- Diferenciar corpos condutores de isolantes e identificar, na natureza, os condutores e os isolantes;
- Entender os processos de eletrização e como eles ocorrem;
- Entender e aplicar a lei de Coulomb. Também desenvolver competências matemáticas que o capacite para calcular a força elétrica entre corpos carregados;
- Compreender o conceito de potencial elétrico e sua importância no movimento de cargas elétricas;

- Entender o funcionamento de eletroscópio à luz de todos os conceitos que foram ensinados sabendo identificar onde estão inseridos no processo de funcionamento do eletroscópio;
- Realizar medidas com os aparatos experimentais;
- Construir gráficos e interpretá-los;
- Desenvolver, através da análise gráfica, as relações existentes entre as grandezas físicas;
- Adquirir competências que o possibilitem realizar medidas diminuindo o erro.

A.4 Desenvolvimento

A proposta dessa aula é ensinar, através da utilização de um eletroscópio de folhas, os conceitos básicos da eletrostática a partir do seu funcionamento, uma vez que os alunos irão observar os fenômenos estudados no funcionamento do eletroscópio.

O ponto de partida dessa aula será a solicitação para que os alunos construam um eletroscópio de folhas. O trabalho precisa ser em grupo de no máximo 4 alunos. Não será dada qualquer explicação teórica sobre a montagem do eletroscópio, nem dos conceitos que estão envolvidos em seu funcionamento, cabendo aos alunos um trabalho de pesquisa. O prazo para a entrega será de duas semanas.

No dia da apresentação, os conceitos físicos da eletrostática serão discutidos pelo professor com os alunos após a apresentação dos trabalhos. O professor irá desenvolver a teoria proposta em sequência conforme o processo de funcionamento do eletroscópio. Após essa etapa, o professor, utilizando um eletroscópio calibrado para medir a abertura das folhas, irá solicitar que cada grupo realize medidas da abertura das folhas variando a distância do bastão ao eletroscópio. Os alunos deverão entregar um relatório (simples) das suas medidas e do cálculo da carga elétrica acumulada em cada folha, bem como da relação qualitativa entre a abertura da folha e da distância do bastão. Isso deverá ser entregue na próxima aula.

A.5 Recursos didáticos

Atividades didáticas 1 e 2, apresentadas nesta dissertação.

A.6 Duração

1h e 30 minutos.

A.7 Avaliação

Será feita na observação do envolvimento de cada grupo e na análise do relatório que cada grupo deverá entregar no próximo encontro.