

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

INSTITUTO DE FÍSICA “*Gleb Wataghin*”

F 896 MONOGRAFIA

História e Propriedades dos Eletretos

Aluno: Valter Aparecido Silva Júnior

E-mail: valtersjunior@gmail.com

Orientador: Dr. André Koch Torres de Assis

Homepage: www.ifi.unicamp.br/~assis

Coordenador da disciplina: Dr. Edison Z. da Silva

E-mail: zacarias@ifi.unicamp.br

Campinas, SP
Novembro de 2010

Resumo

Neste projeto é analisada a história dos eletretos e as suas propriedades físicas mais relevantes. É dada uma ênfase maior aos trabalhos fundamentais de Stephen Gray. São também abordadas as aplicações tecnológicas dos eletretos e algumas contribuições desenvolvidas no Brasil sobre este tema, como o efeito Costa Ribeiro (ou efeito termo-dielétrico).

Abstract

In this project it is analyzed the history of electrets and their most relevant physical properties. A greater emphasis is given to the fundamental work of Stephen Gray. It is also discussed some technological applications of electrets and some contributions developed in Brazil related to this issue, as the Costa Ribeiro effect (also known as the thermo-dielectric effect).

Biografia do Autor

Valter Aparecido Silva Júnior nasceu na cidade de Catanduva, São Paulo, em 1989. Nesta mesma cidade, concluiu o ensino fundamental (1º grau) em 2003, e o ensino médio (2º grau) em 2006. Está cursando atualmente a graduação de bacharelado e licenciatura plena em física pela Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), curso que ingressou em 2007, via concurso vestibular. Desde 2009, com bolsa da instituição, tem atuado como auxiliar didático nas disciplinas de F 328 (Eletromagnetismo) e F 428 (Óptica e Física Moderna).

À minha família, por compreender
a minha ausência nesses quatro anos.

Agradecimentos

Ao Prof. Dr. André Koch Torres de Assis, orientador, pela ideia inicial e acompanhamento durante todo o desenvolvimento deste trabalho. Pelas sugestões e discussões sempre pertinentes e enriquecedoras.

A Sérgio Luiz Bragatto Boss, pelos artigos enviados.

Ao prezado colega e amigo Eduardo Zavanin pela ajuda e colaboração dadas.

A João Paulo Martins de Castro Chaib pelo auxílio técnico prestado.

Sumário

Resumo	ii
Abstract	iii
Biografia do Autor	iv
Agradecimentos	vi
1 Introdução	1
2 História dos Eletretos	6
2.1 A Descoberta dos Eletretos	6
2.2 Primeiras Pesquisas	10
2.2.1 A Garrafa de Leiden	10
2.2.2 Absorção Dielétrica	14
2.2.3 As Figuras de Lichtenberg	16
2.2.4 Outras Investigações	19
2.3 Pesquisas Recentes	22
2.3.1 A Técnica Experimental de Eguchi	22

2.3.2	Desdobramentos Posteriores	26
3	Contribuições Brasileiras	28
3.1	Bernhard Gross - Uma Resenha Biográfica	28
3.1.1	O Nascimento da Física Experimental no Brasil	29
3.1.2	Principais Contribuições	32
3.2	Joaquim da Costa Ribeiro - Uma Resenha Biográfica	35
3.2.1	Descoberta e Polêmica	37
3.2.2	Dedicação à Ciência	39
3.3	Um Estudo do Efeito Termo-dielétrico	41
3.4	Outros Desenvolvimentos do Efeito Termo-dielétrico	43
3.4.1	O Efeito Termo-dielétrico Recíproco	44
3.4.2	Generalização do Efeito Termo-dielétrico	44
4	Aplicações	46
4.1	Máquinas Eletrostáticas - O Eletróforo de Volta	46
4.1.1	Operando o Eletróforo	46
4.2	Transdutores Eletromecânicos	48
4.2.1	Microfone de Eletreto	49
4.2.2	Outras Aplicações	51
5	Considerações Finais	53

Introdução

Descobertos por Stephen Gray em 1732, os eletretos são considerados os ímãs da eletrostática.¹ Isto é, são materiais dielétricos que apresentam uma eletrização “quase permanente”. O termo quase permanente significa que o tempo característico para o declínio da carga (descarregamento do eletreto) é muito maior que o período de tempo durante o qual estudos são executados com ele. Ou seja, um dielétrico se comporta como um eletreto quando a razão de decaimento de sua carga se torna tão pequena que uma fração significativa do campo elétrico induzido fica preservada no material, mesmo após a remoção do campo externo, aplicado originalmente para polarizá-lo. A palavra eletreto foi criada por Oliver Heaviside, em 1885, como uma analogia elétrica da palavra magneto (ímã permanente).²

No entanto, a primeira técnica experimental confiável para obtenção de eletretos foi desenvolvida somente em 1919 pelo físico japonês Mototaro Eguchi,³ enquanto ele investigava a dependência da condutividade elétrica, com respeito à temperatura, de algumas ceras naturais, como a cera de carnaúba. Quando fundidos, a condutividade desses materiais é consideravelmente maior do que no estado sólido. Eguchi então constatou que, solidificando-se um dielétrico

¹[Net].

²[Ses80].

³[JW80].

na fase líquida, submetido a um campo elétrico intenso, era possível “congelar” os portadores de cargas, deslocados ou orientados em posições fixas, e produzir um material que mantivesse um campo intrínseco. Ele verificou também que esta polarização era um fenômeno volumétrico: quando cortadas as superfícies de um eletreto, o campo da secção residual diminuía apenas temporariamente, recuperando, em pouco tempo, seu valor original.⁴

Um eletreto pode ter uma carga resultante diferente de zero, como ilustrado na Figura 1.1.

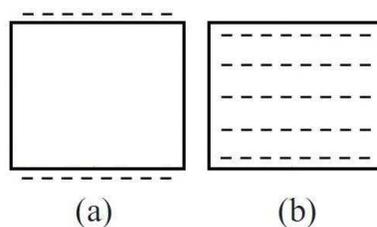


Figura 1.1: Eletreto com carga resultante não nula. (a) Cargas distribuídas ao longo de sua superfície. (b) Cargas distribuídas ao longo de seu volume.

Outra possibilidade é que um eletreto tenha uma carga resultante nula, embora tenha uma polarização permanente, como ilustrado na Figura 1.2.

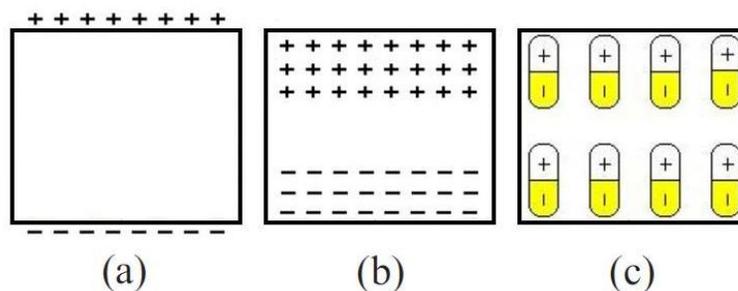


Figura 1.2: (a) Separação de cargas na superfície de um eletreto. (b) Separação de cargas ao longo do volume de um eletreto. (c) Polarização de um eletreto devida à polarização de suas moléculas.

A eletrização de um eletreto pode ser devida a uma combinação destes dois fatores, como

⁴[Egu25].

ilustrado na Figura 1.3.

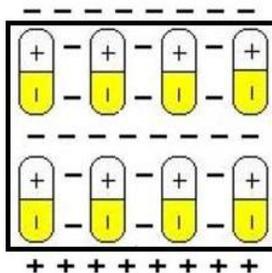


Figura 1.3: Eletrização de um eletreto no caso geral.

Enquanto que a polarização verdadeira é geralmente um alinhamento de dipolos “congelados”, as cargas ditas reais abrangem camadas de portadores positiva e negativamente carregados, frequentemente posicionados sobre ou próximos das superfícies do dielétrico. A carga de um eletreto pode ainda consistir de portadores deslocados no interior das moléculas ou de domínios estruturados através do sólido, semelhante a uma polarização devida a dipolos verdadeiros. Se as cargas estiverem deslocadas para as fronteiras destes domínios, a elas nos referimos como polarização de Maxwell-Wagner.⁵

Geralmente, a carga líquida ou resultante em um eletreto é nula ou próxima de zero e os campos intrínsecos são devidos a uma separação espacial de carga. Além disso, somente será produzido um campo elétrico externo se a polarização e as cargas reais não se compensarem, uma a outra, em toda a extensão do dielétrico. Se satisfeita essa condição, o eletreto se comportará de forma análoga, no sentido eletrostático, a um ímã permanente, embora as propriedades do ímã permanente sejam devidas apenas aos dipolos magnéticos, enquanto que as propriedades do eletreto podem ser provocadas por dipolos e monopolos elétricos. A existência de um campo externo e a correspondente analogia com um ímã são usadas frequentemente para definir um eletreto.⁶

⁵[Ses80].

⁶[Ses80].

Entretanto, conforme Heaviside já havia percebido em 1892,⁷ os campos de um eletreto podem ser compensados, em um intervalo de tempo pequeno, pelo movimento relativo de cargas e de dipolos reais. Isto, de fato, é observado em vários dielétricos. Se quisermos, portanto, incluir alguns destes materiais na categoria de eletretos, como o fez Heaviside, é necessário usar uma definição mais abrangente e desistir da necessidade de um campo externo.

Embora os eletretos tradicionais fossem feitos de cera de carnaúba ou substâncias similares, como resinas e cera de abelha, muitos dos eletretos comerciais, encontrados atualmente, são produzidos com filmes finos de polímeros.⁸ A cera de carnaúba é especialmente apropriada para experiências de laboratório, mas ela perde a estabilidade mecânica (fica quebradiça), não sendo conveniente para aplicações industriais.⁹

Para que um dielétrico se comporte como um eletreto, é necessário produzir nele, de alguma maneira, um acúmulo duradouro de cargas ou uma polarização permanente. As técnicas modernas de obtenção de eletretos consistem, em geral, durante algum estágio do processo, em expor o material, por um determinado tempo, a um campo elétrico externo. Isso se justifica porque, a nível microscópico, muitos dos dielétricos, inclusive os polímeros, contêm moléculas que possuem um momento de dipolo elétrico intrínseco. Portanto, o campo elétrico aplicado externamente tende a alinhar, ao longo de sua direção, estes dipolos elementares de modo a produzir uma polarização elétrica do material. Este é essencialmente um efeito de volume.

Além disso, todos os dielétricos contêm, embora em número reduzido, portadores de cargas livres (íons ou elétrons). Um campo elétrico externo, quando aplicado, tende a separar as cargas positivas das negativas, movendo-as em direção aos eletrodos. Porém, a estrutura de alguns dielétricos não é homogênea. Isto pode ocorrer devido a impurezas existentes ou por defeitos na estrutura. O fato é que existem várias armadilhas distribuídas irregularmente, em profundidades diferentes, por toda a extensão do material. Os portadores de carga que se movem na direção do campo, o fazem até cair nessas armadilhas profundas das quais eles não

⁷[JW80].

⁸[JW80].

⁹[Ses80].

possuem energia suficiente para escapar, a não ser que eles sejam reativados por um aumento de temperatura.

Um dielétrico pode ainda ser polarizado pela deposição ou injeção de portadores de cargas. Nesse caso, há uma transferência efetiva de cargas provenientes de fontes externas para o interior do material.¹⁰

Os eletretos são classificados de acordo com o tratamento dado ao material durante sua formação.¹¹ Aqueles produzidos mediante aquecimento ou derretimento, antes de sua formação, são denominados termo-eletretos. Os produzidos por materiais expostos a radiações são denominados radio-eletretos. Eletretos formados enquanto o material está exposto a um campo magnético são chamados de magneto-eletretos. Os eletretos feitos com determinados materiais expostos a um campo elétrico sob forte iluminação (como se procede com o enxofre), são chamados de foto-eletretos. Esses só mantêm sua eletrização quando armazenados no escuro.¹² Se o material for eletrizado com cargas provenientes de uma descarga corona (faísca elétrica), o eletreto resultante denomina-se corona-eletreto. Se o material for simplesmente exposto a um campo elétrico em sua formação, será denominado eletro-eletreto.

¹⁰[Ses80].

¹¹[JW80].

¹²[Net].

História dos Eletretos

O objetivo deste Capítulo é apresentar os aspectos fundamentais da história da pesquisa de eletretos, desde a descoberta de Gray, a cujos trabalhos será dada maior ênfase, passando por nomes como os de Benjamin Franklin, Faraday e Heaviside, até a técnica experimental desenvolvida por Eguchi. Paralelamente, serão abordadas e discutidas as principais propriedades físicas apresentadas pelos eletretos. Será feito também um breve comentário sobre alguns trabalhos mais recentes nesta área.

2.1 A Descoberta dos Eletretos

Já na antiguidade, os gregos conheciam os efeitos do acúmulo de cargas em materiais dielétricos através do “efeito âmbar”. Desde Platão (aproximadamente 428-348 a.C.),¹ pelo menos, era sabido que o âmbar atritado atrai corpos leves, tais como palha seca e fiapos de tecido, quando estes são colocados em suas vizinhanças. Por esta época, o âmbar provavelmente era atritado no cabelo, em um tecido, na pele de uma pessoa ou de um animal . Séculos mais tarde, nomes como

¹[Ass10, Seção 2.2].

o de Fracastoro² e Gilbert³ deram início às pesquisas modernas sobre a eletricidade. Gilbert, em particular, procurou distinguir claramente os fenômenos associados aos ímãs dos fenômenos associados ao âmbar atritado. Em suas investigações Gilbert descobriu novas substâncias que, quando atritadas, se comportavam como o âmbar. Denominou-as de *elétricas*, ou de *corpos elétricos*.⁴

Contudo, a existência dos eletretos e suas principais propriedades somente foram observadas por Stephen Gray (1666-1736) em 1732. Gray foi um importante, porém pouco mencionado, pesquisador do início do século XVIII. Ele deu importantes contribuições na área da astronomia e da eletricidade. Dentre seus feitos, encontram-se observações precisas sobre manchas solares, a verificação da transmissão da eletricidade e da eletrização por indução, bem como a descoberta fundamental da existência e das principais características dos materiais condutores e isolantes. Gray nasceu provavelmente em Canterbury, Inglaterra, no final do ano de 1666. Atuou inicialmente como tintureiro. Porém, seu crescente interesse científico, bem como sua vontade de deixar a profissão de tintureiro, o fizeram estabelecer contato com o centro de atividade científica da época. É quando começa a se corresponder com a *Royal Society*. As cartas enviadas para a *Royal Society* até 1703 mostram uma grande variedade de assuntos. Já nas primeiras cartas, Gray revela seu interesse pelo “método científico” e indica um enorme talento para utilizar seus limitados aparatos experimentais. Entre 1715 e 1719, obteve autori-

²Girolamo Fracastoro (1478-1553), poeta, médico e filósofo de Verona. Mais conhecido por seus trabalhos em medicina, especialmente epidemiologia. É dele a denominação de sífilis para uma conhecida doença venérea. É dele também a invenção do instrumento elétrico mais antigo inventado pelo homem, o perpendicular, [Ass10, Seção 3.1].

³William Gilbert (1544-1603), médico inglês que, em 1600, publicou um importante livro na história da ciência: *Sobre os Ímãs e Corpos Magnéticos e sobre o Grande Ímã, a Terra*. Esta obra relata muitas descobertas relevantes sobre o magnetismo. Nela Gilbert propõe, pela primeira vez, a ideia de que a Terra é um grande ímã, fornecendo assim um modelo para a orientação da bússola explicada por sua interação magnética com a Terra. Ele parece ter sido também o primeiro a observar um líquido sendo atraído pelo âmbar atritado. Sua maior contribuição para a ciência da eletricidade foi a descoberta de uma série de substâncias que se comportavam como o âmbar ao serem atritadas, [Ass10, Capítulos 2 e 3].

⁴[Ass10, Seção 2.6].

zação para participar de várias reuniões, sendo finalmente eleito membro da *Royal Society* em 1733. Nos anos de 1729 até a sua morte em 1736, encontra-se o período mais produtivo da sua pesquisa em eletricidade. Recebeu, em 1731 e 1732, um importante prêmio: a medalha Copley. Esta premiação tem como análogo hoje em dia o prêmio Nobel. Stephen Gray faleceu, provavelmente, em 15 de fevereiro de 1736, em Londres, Inglaterra.⁵

A descoberta dos eletretos é descrita em uma carta de 1732 enviada para a *Royal Society*.⁶ Relatou ter descoberto “um poder perpétuo de atração em todos os corpos elétricos, sem a necessidade de serem excitados por fricção, batidas, etc., ou qualquer outro tipo de atrito”.

Nesta ocasião, Gray se perguntava se “não poderia ser encontrado um meio para tornar mais permanente nos corpos a propriedade de atração elétrica”.⁷ Em suas experiências, fundiu, em conchas de ferro ou recipientes de vidro, vários materiais dielétricos como resina (tanto a preta quanto a branca), asfalto pétreo (piche obtido a partir de diversas árvores coníferas), goma-laca em folhas ou goma-laca (resina em camadas feita da secreção de alguns insetos como, por exemplo, a cochonilha-da-laca), cera de abelhas e enxofre. Mencionou o seguinte:⁸

Quando qualquer um desses corpos estava fundido, ele era retirado do fogo e colocado de lado na concha para esfriar e endurecer. Então, voltava-o ao fogo, onde permanecia até que era derretido o fundo e as laterais em contato com a concha, a fim de ficar móvel. De modo que, pela inversão da concha, ele poderia ser retirado.

Gray descobriu que esses materiais assim tratados, quando se solidificavam novamente, apresentavam uma forte eletrização.⁹

Quando qualquer um dos corpos era retirado da concha, e sua superfície convexa endurecida, a princípio ele não atraía, até que o calor fosse reduzido, ou até chegar

⁵[BC10].

⁶[Gra 2].

⁷[JW80].

⁸[Gra 2].

⁹[Gra 2].

a um certo grau de aquecimento, e então havia uma pequena atração. Estimei este aquecimento como sendo próximo àquele de um ovo de galinha quando posto há pouco. A atração ia aumentando assim até que, quando frio, o corpo era capaz de atrair no mínimo dez vezes mais distante do que inicialmente.

Observou também que, quando o enxofre era fundido em um recipiente de vidro, ambos, o enxofre e o recipiente, se tornavam eletrizados. Outra de suas descobertas foi de que a eletrização (ou, nas suas palavras, “estado de atração”) destes corpos dielétricos poderia ser preservada por meses, caso eles fossem armazenados embrulhados em papel ou tecido, o que os manteria isolados do ar externo.¹⁰

Conforme Jefimenko e Walker ressaltam em seu artigo,¹¹ existe algo de intrigante nos experimentos descritos por Gray. Sabe-se hoje que, ao colocar dois corpos diferentes em contato íntimo, tal como foi feito com o dielétrico fundido e a concha, e então separados, isso determina o aparecimento de cargas superficiais sobre os dois corpos. O fenômeno é basicamente o mesmo como quando dois corpos são eletrizados por atrito. Contudo, em seu relato, Gray afirma ter aquecido e fundido novamente a superfície dos dielétricos antes de retirá-los do molde. Nesse caso, as cargas superficiais deveriam estar na fina camada fundida que restou no molde e, portanto, a eletrização permanente apresentada pelos dielétricos deve ter sido provocada por um outro efeito. De fato, a eletrização descoberta por Gray era devido ao aparecimento de cargas elétricas na interface entre as fases líquida e sólida do dielétrico. Esse efeito somente foi descrito em 1950 pelo brasileiro Joaquim Costa Ribeiro, que o chamou de “efeito termo-dielétrico”.¹²

¹⁰[Gra 2].

¹¹[JW80].

¹²[LF00].

2.2 Primeiras Pesquisas

2.2.1 A Garrafa de Leiden

Descoberta acidentalmente em 1745 por Pieter van Musschenbroek,¹³ a garrafa de Leiden deve este nome à cidade onde foi construída.¹⁴ Precursora dos modernos capacitores, o modelo original era composto por uma garrafa de vidro, com água no seu interior, e por uma rolha perfurada, atravessada por uma haste metálica que ficava em contato direto com a água, Figura 2.1.

Quando a garrafa era segurada pela mão de um operador e a haste posta em contato com o terminal de uma máquina eletrostática, uma grande quantidade de carga elétrica era acumulada pela garrafa. Se o operador então tocasse a haste com a outra mão, recebia um forte choque elétrico, causado pela repentina descarga da garrafa, conforme relatou o próprio van Musschenbroek em uma carta sua a um colega da academia de Paris:¹⁵

Gostaria de lhe contar sobre uma experiência nova, mas terrível, que eu recomendo que você nunca tente, pois nem eu, que experimentei, e sobrevivi, pela graça de Deus, não a faria outra vez, nem por todo o reino de França. Eu estava empenhado em revelar os poderes da eletricidade (...) minha mão direita foi golpeada com tal força que meu corpo inteiro tremia, como alguém atingido por um raio.

A notícia desta experiência se espalhou pelos meios científicos da época e se tornou uma curiosidade.¹⁶

¹³Pieter van Musschenbroek nasceu em Leiden, na Holanda, em 1692 e morreu em 1761, nessa mesma cidade, onde atuava como professor de física e matemática desde 1740. Sua família fabricava instrumentos científicos, como microscópios e telescópios. Talvez por isso ele se interessasse, desde pequeno, pelo estudo das ciências. Ainda menino, aprendeu várias línguas: latim, grego, francês, inglês, alemão, italiano e espanhol. Formou-se médico na Universidade de Leiden, aos 23 anos de idade. Discípulo e amigo de seus compatriotas, Bôer Haave e Gravesande, conheceu Newton durante uma de suas viagens à Inglaterra, [Gue03].

¹⁴[Meh].

¹⁵[Gue03].

¹⁶[Meh].

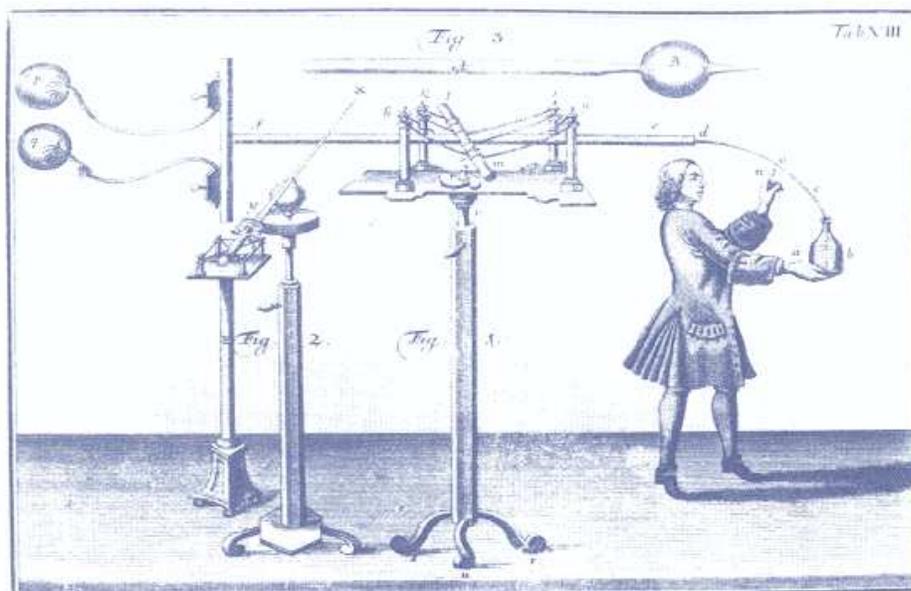


Figura 2.1: Ilustração do processo de carga de uma garrafa de Leiden. A carga elétrica é produzida em globos girantes à esquerda e transmitida por um condutor metálico até a garrafa, [Meh].

A descoberta da garrafa de Leiden representou uma verdadeira revolução no campo das experiências com eletricidade, pois até então não era conhecida nenhuma forma de armazenar eletricidade. É desta propriedade de armazenar ou condensar a eletricidade que derivou o nome de condensador, denominação antiga do capacitor.

O melhor conhecimento do funcionamento da garrafa conduziu a algumas alterações na sua construção. A versão final era constituída por uma garrafa de vidro envolvida e revestida por um invólucro de estanho (garrafa com armaduras metálicas).¹⁷ Ou seja, a garrafa de Leiden correspondia a um capacitor no qual o vidro era o dielétrico.

Franklin foi um dos primeiros cientistas a estudar sistematicamente a garrafa de Leiden. Benjamin Franklin nasceu em Milk Street, Boston, Massachusetts, em 17 de Janeiro de 1706. Faleceu na Filadélfia, Pensilvânia, em 17 de Abril de 1790. Tinha como campo de pesquisa,

¹⁷[Gue03].

além da eletricidade, a oceanografia e a meteorologia. Trabalhou inicialmente com seu pai, Josiah Franklin, um comerciante de velas. Foi aprendiz de seu irmão, James, um impressor que publicava um jornal chamado *New England Courant*. Em Londres, trabalhou como tipógrafo em uma impressora em Bartholomew Close, de 1724 a 1726. Retornando à Filadélfia, estabeleceu sua própria tipografia. Comprou a *Gazeta da Pensilvânia* em 1729. Em 1732, começou a publicar o famoso “Almanaque do Pobre Ricardo” (*Poor Richard’s Almanac*), no qual se baseia uma boa parte da sua reputação popular nos EUA. Tornou-se *postmaster* (ministro dos correios) da Filadélfia em 1737 e *postmaster general* das colônias americanas em 1754. Realizou experiências com eletricidade principalmente entre 1749 e 1752. Fez descobertas em um espaço de poucos anos que lhe trouxeram uma reputação internacional. Entre as suas contribuições, Franklin demonstrou que os raios são um fenômeno de natureza elétrica. É o inventor dos pára-raios. Eleito presidente do estado da Pensilvânia em 1785, foi membro da convenção que elaborou a constituição dos Estados Unidos. Retirou-se da vida pública em 1788. Foi também membro da *Royal Society*, eleito em 29 de maio de 1756, recebendo a medalha Copley em 1753, por seus curiosos experimentos sobre eletricidade.¹⁸

Em 1748 Franklin, com o propósito de determinar a origem da eletricidade armazenada em uma garrafa de Leiden, construiu o que é conhecido hoje como “capacitor desmontável de Franklin”,¹⁹ ilustrado na Figura 2.2. Seu capacitor consistia de uma placa de vidro colocada entre duas placas menores de estanho (eletrodos). Com uma máquina eletrostática, Franklin carregou seu capacitor, depois o descarregou, removeu a placa de vidro dentre as placas de estanho e, utilizando um pêndulo elétrico,²⁰ verificou que ela estava intensamente eletrizada. Ele descobriu ainda que se a placa de vidro fosse recolocada entre as placas de estanho (descarregadas), estas tornar-se-iam carregadas sem a necessidade de se acionar novamente a máquina eletrostática. A experiência do capacitor desmontável de Franklin é um protótipo do método

¹⁸[Roy].

¹⁹[JW80].

²⁰[Ass10, Seção 4.4: O Pêndulo Elétrico].

moderno de obtenção dos “eletro-eletretos”.²¹

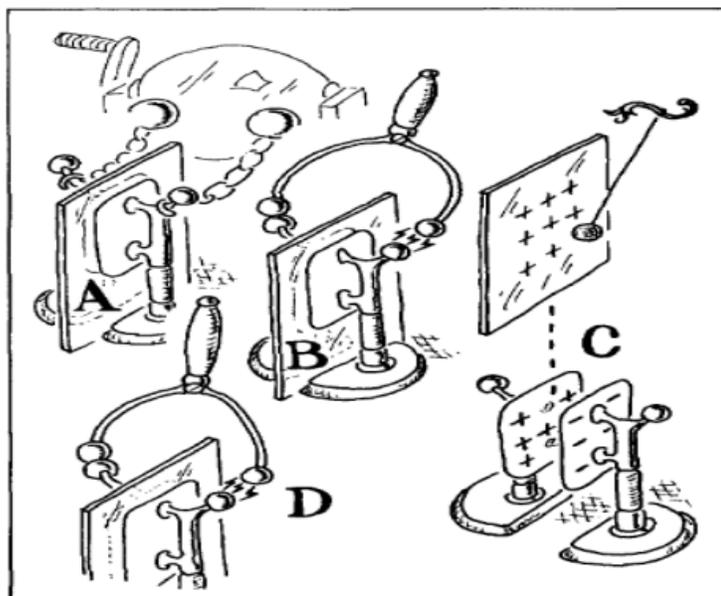


Figura 2.2: (A) Carregamento do capacitor pela máquina eletrostática. (B) Descarregamento do capacitor. (C) A placa dielétrica é retirada do capacitor e sua eletrização é verificada (a placa se tornou um eletreto). (D) Reintrodução da placa no capacitor, que se carrega novamente, [JW80].

A seqüência (B), (C) e (D) da Figura 2.2 pode ser repetida várias vezes, dispensando o procedimento (A). A partir deste experimento, Franklin concluiu que as cargas elétricas de uma garrafa de Leiden carregada eram “absorvidas” pelos “poros” do vidro e não pelo revestimento metálico. Esta descrição da eletrização residual do vidro é precisamente a mesma usada hoje, exceto que agora se diz as cargas são “capturadas” nas “armadilhas” presentes no interior do vidro.²² O fenômeno de eletrização residual de um dielétrico em um capacitor tornou-se mais conhecido como “absorção dielétrica” e foi amplamente estudado por vários cientistas eminentes no século XIX.²³

²¹[JW80].

²²[JW80].

²³[Net].

2.2.2 Absorção Dielétrica

Vamos agora apresentar algumas contribuições de Faraday. Michael Faraday nasceu em Newington, Surrey, Inglaterra, em 22 de setembro de 1791. Faleceu em Hampton Court, Middlesex, Londres, em 25 de agosto de 1867. Foi filósofo natural e tinha como campo de pesquisa, além da física, a química. Muitas vezes chamado de a primeira celebridade científica na Grã-Bretanha, Faraday foi um dos cientistas mais influentes de sua geração. Seus trabalhos nos campos da eletricidade e magnetismo levaram à descoberta da rotação eletromagnética - a base teórica do motor elétrico. Começou sua carreira como assistente do famoso químico Humphry Davy, mas havia se estabelecido como um grande experimentalista no momento de sua grande descoberta, hoje conhecida como lei de indução de Faraday, que mudou o pensamento científico sobre o eletromagnetismo. Seus trabalhos formaram a base para os progressos de engenharia no fim do século XIX por pessoas como Edison, Siemens, Tesla e Westinghouse, que tornaram possível a eletrificação das sociedades industrializadas. Membro eleito da *Royal Society* em 8 de janeiro de 1824, recebeu a medalha Copley (1832 e 1838), a medalha real da Inglaterra (1835 e 1846) e a medalha Rumford (1846) por suas contribuições. Em 1858 uma delegação da *Royal Society* visitou Faraday, a quem pediu para ser o próximo presidente da Sociedade. Faraday teria recusado a oferta.²⁴

Um século após a descoberta de Gray, Michael Faraday estabeleceu os primeiros fundamentos teóricos sobre as propriedades apresentadas pelos eletretos. Em 1837 investigou a absorção dielétrica usando um capacitor desmontável esférico contendo uma casca hemisférica de goma-laca como dielétrico.²⁵ Faraday descobriu que, imediatamente após o capacitor ter sido carregado, o dielétrico exibia uma eletrização, isto é, uma carga residual com uma polaridade oposta àquela aplicada ao capacitor durante seu carregamento. Ou seja, a superfície dielétrica que esteve em contato com a placa positiva durante o carregamento exibia uma carga negativa, enquanto que a superfície que esteve em contato com a placa negativa exibia uma

²⁴[Roy].

²⁵[JW80].

carga positiva. Entretanto, essas cargas eram temporárias, diminuindo gradualmente, em um intervalo de tempo relativamente pequeno (um ou dois dias).²⁶ Após o completo decaimento de tais cargas, surgiam gradualmente, em poucos dias, cargas superficiais de sinais opostos às anteriores. Ou seja, surgiam cargas positivas sobre a superfície dielétrica que esteve em contato com a placa positiva do capacitor, e cargas negativas sobre a superfície que esteve em contato com a placa negativa. Portanto, a eletrização do dielétrico tinha sua polaridade invertida e assim permanecia estável por um tempo apreciável.²⁷

Faraday interpretou estes resultados como a superposição de dois efeitos: (a) alinhamento dos dipolos moleculares por indução eletrostática, um fenômeno volumétrico, responsável pela polaridade inicial apresentada pelo dielétrico; e (b) deslocamento (uma transferência efetiva) de cargas elétricas das placas do capacitor (eletrodos) para o material, responsável pela polaridade final apresentada pelo dielétrico. A inversão de polaridade descoberta por Faraday é um efeito importante também apresentado pelos eletretos modernos.²⁸

Vários experimentos sobre absorção dielétrica foram também descritos pelo físico italiano Carlo Matteucci.²⁹ Em 1849, ele mapeou a distribuição de cargas elétricas ao longo de uma haste

²⁶[Egu25].

²⁷[JW80].

²⁸[Net].

²⁹Carlo Matteucci, físico e neurofisiologista italiano, um dos pioneiros no estudo da bioeletricidade. Nasceu em Forlì, na província de Romagna, em 21 de junho de 1811. Entre os anos de 1825 e 1828, estudou matemática na Universidade de Bolonha, recebendo seu doutorado em 1829. De 1829 a 1831, estudou na *École Polytechnique*, França. Ao retornar à Itália, se estabeleceu como o chefe do laboratório do hospital de Ravenna (1837) e se tornou professor de física na faculdade local. Em 1840, por recomendação de François Arago (1786-1853), seu professor na *École Polytechnique*, Matteucci aceitou um cargo de professor de física na Universidade de Pisa. Instigado pelo trabalho de Luigi Galvani (1737-1798) sobre bioeletricidade, Matteucci começou em 1830 uma série de experimentos que continuou até sua morte em 1865. Em 1844, por estes estudos, foi premiado com a medalha Copley da *Royal Society* de Londres e se tornou membro da Academia de Ciências de Paris. A partir de 1847, participou ativamente da vida pública. Em 1860 foi eleito senador, acumulando também o cargo de inspetor-geral das linhas de telégrafo da Itália. Dois anos depois foi nomeado Ministro da Educação. Matteucci morreu em Ardenza, perto de Livorno, em 1868, [Mat].

de enxofre após uma de suas extremidades ter sido colocada em contato, por um determinado tempo, com uma garrafa de Leiden carregada.³⁰ Examinando a haste, concluiu que, se o tempo de carregamento (ou seja, o tempo em que ela estivera em contato com a garrafa de Leiden) fosse suficientemente longo, a haste adquiria cargas do condutor, que penetravam em uma pequena extensão dela. Porém, se o tempo de carregamento fosse pequeno, a carga líquida continuaria nula, e a haste exibiria somente uma polarização residual.

Em outro experimento, Matteucci carregou a mesma haste de enxofre primeiro positivamente e então negativamente, como é mostrado na Figura 2.3. A polaridade observada da eletrização resultante, que era negativa imediatamente após o carregamento, então se tornou positiva. Finalmente concluiu que a eletrização de um dielétrico poderia sofrer várias inversões de polaridade se o mesmo dielétrico fosse carregado com cargas de sinais opostos,³¹ conforme ocorria a um dielétrico em um capacitor.

2.2.3 As Figuras de Lichtenberg

Apesar das evidências experimentais obtidas por Franklin, Faraday e Matteucci, o mecanismo da absorção dielétrica estava longe de ser completamente entendido.³² Todos os corpos sólidos possuem inúmeras irregularidades em sua superfície e, portanto, as placas de um capacitor, durante seu carregamento, estão em contato com somente alguns poucos pontos do dielétrico. Nesse caso, uma quantidade muito pequena de cargas pode possivelmente ser transferida dos eletrodos para o dielétrico, o que não justifica a intensa eletrização apresentada por este último.

Como solução a esta dificuldade, tendo em vista a alta tensão aplicada nos eletrodos, foi proposto que grande parte dessa transferência se daria através de pequenas descargas elétricas (faíscas), eliminando desse modo a necessidade de um contato efetivo. A esse tipo de carga é dado atualmente o nome de carga corona, sendo amplamente utilizado na produção de eletretos.³³

³⁰[Net].

³¹[JW80].

³²[JW80].

³³[Net].

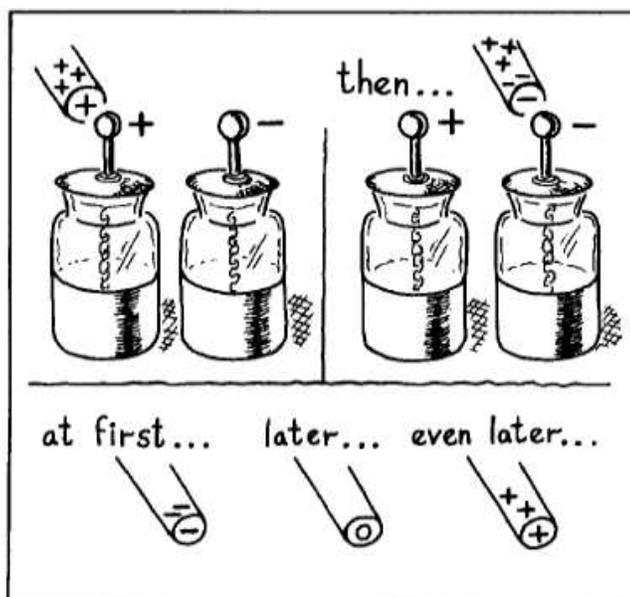


Figura 2.3: Cargas por etapas: uma haste de enxofre sendo carregada alternadamente por garrafas de Leiden carregadas com cargas opostas. Após o carregamento alternado, a haste exhibe várias mudanças de polaridade, [JW80].

Os pontos onde as faíscas incidem sobre o dielétrico poderiam ser tornados visíveis pulverizando a região eletrizada com pó feito de algum material não condutor, formando as chamadas figuras de Lichtenberg, Figura 2.4.

As figuras de Lichtenberg são “centelhas congeladas”, descargas elétricas preservadas ao longo da superfície ou mesmo no interior de materiais dielétricos.³⁴ Elas são assim chamadas em referência ao físico alemão Lichtenberg, seu descobridor e autor de vários estudos pioneiros sobre esse fenômeno.

Georg Christoph Lichtenberg nasceu em Oberramstadt, próximo a Darmstadt, Alemanha, em 01 de julho de 1742 (ou 1744). Faleceu em Göttingen, Alemanha, em 24 de fevereiro de 1799. Tendo a física como campo de pesquisa, publicou trabalhos sobre probabilidade e astronomia. Em 1770 tornou-se professor extraordinário e, seis anos depois, professor ordinário de física

³⁴[Hic].

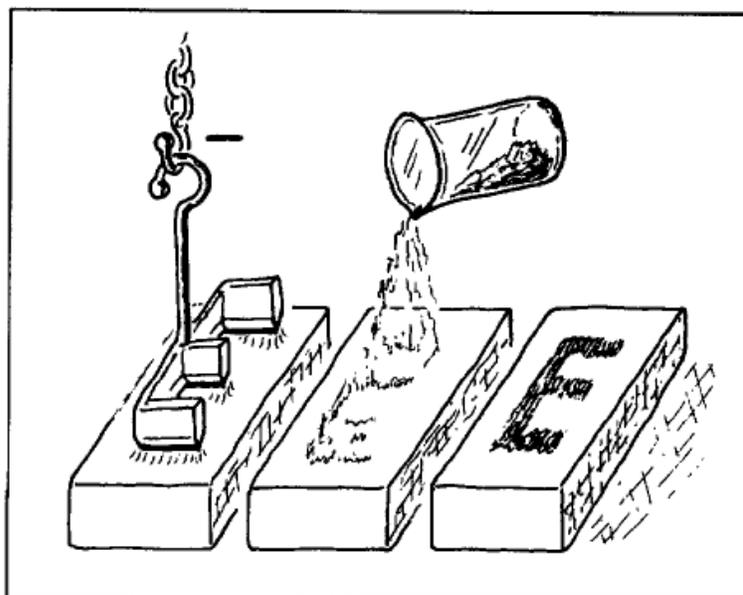


Figura 2.4: Figuras de Lichtenberg: as cargas injetadas pelas descargas elétricas produzem uma eletrização duradoura nas regiões do dielétrico em contato com o eletrodo e com a mesma forma deste, [JW80].

pela Universidade de Göttingen. Foi o primeiro a ocupar uma cadeira explicitamente dedicada à física experimental na Alemanha. Ficou no cargo até sua morte. Lichtenberg era membro da *Royal Society*, eleito em 11 de Abril de 1793.³⁵

As primeiras figuras elétricas observadas eram, entretanto, imagens ramificadas ou arborescentes, padrões bidimensionais formados sobre a superfície de placas eletricamente carregadas de materiais como resina, ebonite (borracha dura), ou vidro.³⁶ Elas foram obtidas por Lichtenberg em 1777, ano em que construiu um grande capacitor capaz de armazenar uma quantidade apreciável de cargas.³⁷

Colocada perpendicularmente sobre a superfície da placa isolante, a ponta afiada de uma agulha metálica, sustentada por uma estrutura também isolante, era posicionada muito próxima

³⁵[Roy].

³⁶[Lic].

³⁷[Hic].

ou posta em contato com o dielétrico. O capacitor, que bem poderia ser uma garrafa de Leiden,³⁸ era então descarregado na agulha, criando uma súbita descarga elétrica sobre um ponto da placa. Isso depositava cargas superficiais sobre ela.

A superfície eletrizada podia ser visualizada por aspensão de uma mistura de enxofre e de chumbo vermelho (tetróxido de chumbo),³⁹ ambos um pó colorido que se fixava sobre a placa. Durante o manuseio, o enxofre tende a adquirir, por atrito, uma carga ligeiramente negativa, enquanto que o chumbo vermelho tende a adquirir uma carga positiva. As áreas da placa carregadas positivamente atraíam, portanto, o pó de enxofre, negativo, enquanto as áreas carregadas negativamente atraíam o pó de chumbo, positivo, produzindo uma distribuição de cores. Pressionando cuidadosamente um pedaço de papel contra a superfície polvilhada, Lichtenberg foi capaz de transferir e gravar essas imagens sobre o papel, descobrindo o princípio básico daquilo que mais tarde se tornaria o processo de xerografia.⁴⁰

2.2.4 Outras Investigações

Novos experimentos indicaram, entretanto, que a absorção dielétrica também poderia ocorrer a baixas voltagens,⁴¹ sem que houvesse, através de descargas elétricas, uma transferência efetiva de cargas de fontes externas para o dielétrico. Essa possibilidade foi investigada, em 1854, pelo físico alemão R. Kohlrausch⁴². Ele sugeriu que um corpo dielétrico poderia adquirir uma eletrização residual por quatro mecanismos distintos, Figura 2.5: (a) polarização devido à

³⁸[Lic].

³⁹[JW80].

⁴⁰[Hic].

⁴¹[JW80].

⁴²Rudolf Hermann Arndt Kohlrausch nasceu em Göttingen, Alemanha, em 06 de novembro de 1809. Faleceu em 08 de março de 1858. Filho do educador Heinrich Friedrich Theodor Kohlrausch, passou a maior parte de sua vida como professor de ciência e como experimentalista. Foi sucessivamente professor de matemática e física nas cidades de Luneberg, Rinteln, Cassell e Marburg. Em 1857 foi nomeado professor de física da Universidade de Erlangen. Em colaboração com Wilhelm Weber (1804-1891), realizou as primeiras medições mecânicas das forças produzidas por correntes elétricas, trabalho este que estabeleceu as bases para o moderno sistema absoluto de medição elétrica, [Koh].

migração de cargas internas para a superfície do dielétrico, (b) polarização devido à migração de cargas internas para várias camadas ou domínios estruturados no interior do dielétrico, de modo que a eletrização resultante seja semelhante àquela devida a dipolos verdadeiros, (c) polarização devido à migração de cargas atômicas a extremidades opostas das moléculas do dielétrico, e (d) polarização devido ao alinhamento de moléculas polares (dipolos) do dielétrico.

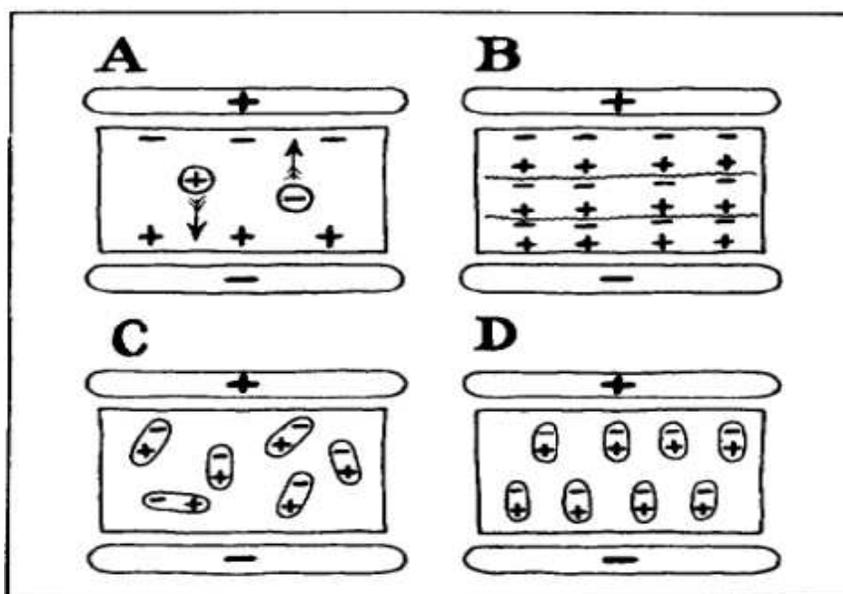


Figura 2.5: Os quatro mecanismos listados por Kohlrausch, [JW80].

Kohlrausch acreditava que o último mecanismo era o que provavelmente produzia uma eletrização duradoura já que moléculas polares, tendo sido alinhadas por um campo externo, requerem um longo tempo para retornarem a uma distribuição aleatória.⁴³ Hoje se sabe que todos esses efeitos, além da transferência de carga de uma fonte externa para o dielétrico, podem ocorrer na produção dos eletretos modernos.⁴⁴

Uma “receita” teórica para a obtenção de um corpo que se comportasse como um eletreto foi finalmente dada em 1885 por Oliver Heaviside.⁴⁵ Segue sua prescrição em uma forma

⁴³[JW80].

⁴⁴[Net].

⁴⁵Oliver Heaviside nasceu em Camden Town, Londres, Inglaterra, em 18 de maio de 1850. Faleceu em Torquay,

abreviada:⁴⁶

1. Coloque em um campo elétrico uniforme um dielétrico eletricamente neutro.
2. Mantenha o dielétrico no campo por um período de tempo suficiente para que a absorção dielétrica possa ocorrer.
3. Remova o dielétrico do campo. Se absorção resultar em uma eletrização permanente, o dielétrico tornar-se-á um eletreto. Embora ainda permaneça eletricamente neutro, ele agora produz seu próprio campo elétrico, semelhante ao campo magnético produzido por um ímã similarmente moldado.
4. Cubra o eletreto com uma superfície metálica ou qualquer outra superfície condutora. Isso produzirá cargas superficiais sobre ele que neutralizarão sua eletrização intrínseca. Este conjunto é semelhante a de um capacitor com um dielétrico.
5. Remova a superfície condutora. O eletreto neutralizado não exhibe mais um campo externo.
6. Mantendo o eletreto isolado, deixe a eletrização intrínseca diminuir. Quando isso ocorrer, um campo elétrico reaparece ao redor do eletreto, mas de polaridade oposta àquele obser-

Devon, em 03 de fevereiro de 1925. Era telegrafista e tinha como campo de pesquisa, além da telefonia, a física e a matemática. Uma doença infantil o deixou surdo anos mais tarde, tendo passado os últimos 25 anos da sua vida isolado e solitário. Trabalhou para a *Great Northern Telephone Company* em Newcastle. Em 1874, porque sofria de surdez, foi forçado a se aposentar. Nos tempos livres estudava eletricidade e chegou a publicar alguns artigos inspirados no *Tratado de Eletricidade e Magnetismo* de Maxwell. Apesar das várias contribuições para o eletromagnetismo, é mais conhecido pelo estudo de análise vetorial. No entanto, o seu trabalho foi alvo de fortes críticas por falta de rigor matemático. Heaviside achava que não se devia perder tempo na demonstração de algo que parecia intuitivamente estar certo. Em 1902 postulou a existência da ionosfera, uma camada da atmosfera terrestre que pode refratar as ondas de rádio, o que permite a transmissão de ondas de rádio entre os continentes. Foi agraciado com a primeira medalha Faraday, uma medalha de bronze criada em 1922 para comemorar o 50º aniversário da primeira reunião ordinária da Sociedade Britânica de Engenheiros Telégrafos (atual Instituto de Engenharia e Tecnologia), [Roy].

⁴⁶[Hea92, Seção 12] e [JW80].

vado inicialmente. A inversão de polaridade ocorre porque a carga superficial se mantém constante, ao passo que a eletrização intrínseca diminui.

7. Finalmente, a carga superficial pode também ser neutralizada se o eletreto for novamente coberto por uma superfície metálica. O dielétrico torna-se, então, eletricamente neutro.

Hoje se sabe que, na verdade, na maioria dos eletretos, é a carga superficial que diminui enquanto que a eletrização intrínseca permanece praticamente inalterada.⁴⁷

Foi o próprio Heaviside quem cunhou o termo “eletreto”, uma palavra que soava como uma contrapartida elétrica de “magneto”, um ímã permanente, conforme ele explica em um de seus trabalhos:⁴⁸

Uma palavra é evidentemente necessária para descrever um corpo que se apresenta permanentemente eletrizado. Observando que [a palavra] “magneto” é obtida de “magnetismo” reduzindo-a ao final, o mesmo pode ser feito a partir da palavra “eletricidade”. Um “elétrico” poderia ser um bom nome para um corpo intrinsecamente eletrizado, mas [não o é] por duas razões. Primeiro, este termo foi originalmente empregado para descrever aquilo que agora denominamos de dielétrico ou isolante. Em segundo lugar, elétrico é hoje usado como um adjetivo (...). Outra possibilidade é [a palavra] eletreto, contra a qual não pesa nenhuma objeção exceto o fato de ela soar estranho. Esta é, entretanto, uma mera questão de hábito.

2.3 Pesquisas Recentes

2.3.1 A Técnica Experimental de Eguchi

Contudo, não há evidências de que o próprio Heaviside tenha tentado produzir um eletreto.⁴⁹ O primeiro eletreto seguinte este método foi obtido somente décadas mais tarde pelo cientista

⁴⁷[JW80].

⁴⁸[Hea92, Artigo 30: Electromagnetic Induction and Its Propagation, Seção 12: Electrification and Electrification. Natural Electrets, p. 488].

⁴⁹[JW80].

japonês Mototaro Eguchi. Ele partiu de seus próprios estudos, realizados entre 1919 e 1924, sobre a variação, conforme o grau de solidificação, da condutividade elétrica de algumas ceras e resinas. Ele fez o eletreto seguindo essencialmente a prescrição de Heaviside segundo relatou em um artigo de 1925, embora utilizando um método de preparação que foi obtido independentemente do trabalho de Heaviside:⁵⁰

Encontrei nos “Electrical Papers” de Oliver Heaviside uma Seção com o título “Electrization and Electrification - Natural Electret”. Neste trabalho ele propôs pela primeira vez o uso do termo “eletreto” para designar um corpo eletrizado intrinsecamente, e algumas possibilidades teóricas de eletretos foram discutidas. Contudo, o método de preparação atual foi obtido independentemente e também em uma forma totalmente diferente daquela apresentada em suas discussões.

Neste mesmo artigo, Eguchi descreveu o aparato experimental por ele desenvolvido para a preparação de seus eletretos. Ele consistia de:⁵¹

Um recipiente de metal B , raso e circular, com profundidade de 1 cm e diâmetro de 20 cm [Figura 2.6], colocado sobre um eletrodo P_1 de diâmetro um pouco maior. O eletrodo estava apoiado sobre três peças isolantes de enxofre S_1, S_2, S_3 , que eram, por sua vez, postas sobre um tripé de madeira T , que podia ser nivelado sobre parafusos ajustáveis f_1, f_2, f_3 . Um segundo eletrodo, um disco metálico oco P_2 , estava suspenso por três fios isolantes, t_1, t_2, t_3 . Estes fios eram feitos de linha de pesca japonesa, *Tegusu* (um tipo de linha de seda espessa), cujas superfícies haviam sido tratadas com uma mistura de ceras e resinas para eliminar as perdas superficiais. O disco [metálico B] e o eletrodo na forma de disco são cobertos com folhas de estanho (não mostradas na Figura). A lâmina de chumbo L é usada como um peso para prender a lâmina de estanho fortemente ao disco. Como um ajuste

⁵⁰[Egu25].

⁵¹[Egu25].

preliminar, o nivelamento do disco B é efetuado inicialmente pelos três parafusos f_1 , f_2 e f_3 . Em segundo lugar, o gancho na extremidade do fio C é transferido do suporte h_1 para um outro suporte h_2 , e a placa P_2 é regulada pelos três parafusos Sc' , Sc'' e Sc''' de tal forma que sua superfície inferior chegue até a margem de B . Um outro fio C' , tensionado e passando por um furo perfurado próximo da extremidade do guia g , prevenia qualquer oscilação do eletrodo P_2 .

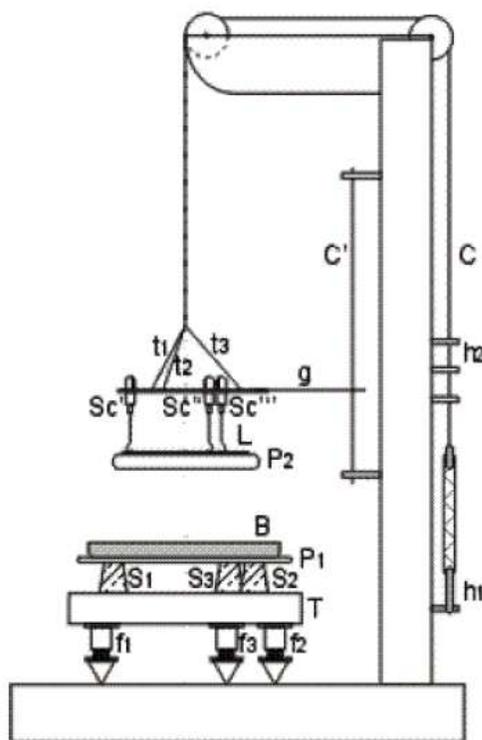


Figura 2.6: O aparato experimental de Eguchi, [Egu25].

O procedimento para se obter um eletreto era simples. Com a extremidade de C presa ao suporte h_1 , a base B era preenchida pelo dielétrico fundido, que se encontrava geralmente em uma temperatura acima de seu ponto de fusão (aproximadamente $130^\circ C$), quando então P_2 era posto em contato com o material fundido. A única ressalva de Eguchi diz respeito à fonte

de alta tensão que fornecia o campo elétrico externo:⁵²

Tomou-se cuidado no ajuste da voltagem fornecida pela fonte de alta tensão a fim de se evitar qualquer efeito indesejável tal como descargas elétricas entre os eletrodos ao longo da superfície do dielétrico enquanto ele estava parcialmente solidificado.

O campo elétrico era somente desligado após a completa solidificação do material. Os eletretos assim obtidos se comportaram essencialmente da mesma forma como Heaviside havia previsto. Eles invertiam sua polaridade geralmente em um dia ou dois depois de prontos.⁵³

Como fica claro na sua descrição, Eguchi fez somente uma modificação no procedimento proposto por Heaviside, a saber, antes de colocar o dielétrico em um campo externo, ele o fundiu. Ele então o deixou solidificar na presença do campo elétrico externo. Desse modo ele “congelou”, no interior do material, os acúmulos de carga e os dipolos alinhados pelo campo. A técnica de Eguchi foi, portanto, uma combinação das técnicas de Gray e Heaviside.⁵⁴

O material utilizado por Eguchi era uma mistura consistindo de partes iguais de cera de carnaúba e resina, com uma certa quantidade de cera de abelha. Ou seja, eram basicamente os mesmos materiais estudados por Gray. Essa mistura é ainda utilizada para a produção de eletretos em laboratório. Os eletretos produzidos por Eguchi são hoje conhecidos como termo-eletretos, uma vez que eles envolvem um tratamento térmico do dielétrico.⁵⁵

Em suas investigações, Eguchi observou também que a eletrização de um eletreto não podia ser destruída nem mesmo por várias tentativas como aquecimento por uma chama de bico de Bunsen, exposição a raios X , aplicação de solventes, ou mesmo cortando suas superfícies com uma faca. Esta eletrização também não desaparecia, mesmo após vários anos de observação. Não havia nada que fizesse com que a eletrização diminuísse. Finalmente concluiu:⁵⁶

⁵²[Egu25].

⁵³[Egu25].

⁵⁴[JW80].

⁵⁵[Net].

⁵⁶[Egu25].

Dos vários estudos subsequentes, tornou-se evidente que a mudança elétrica de um dielétrico não é de natureza superficial, mas sim uma mudança interna permanente que ocorre no interior do material.

Mesmo que o campo elétrico externo do eletreto venha a ser anulado pela deposição de cargas opostas em suas superfícies, a distribuição interna de cargas permanece inalterada. De fato, o único modo de modificar essa distribuição de cargas é fundindo novamente o dielétrico. Para Eguchi, este comportamento estável identificava a principal propriedade de um eletreto como um armazenador de cargas e como detentor de um campo elétrico intrínseco.

Um disco de eletreto, envolvido por folhas metálicas, feito com uma mistura de cera de carnaúba e resina natural, com 20 cm de diâmetro e 1 cm de espessura encontra-se preservado no Museu de Ciências de Tóquio. Foi possível verificar a permanência de suas cargas superficiais, ainda que com um sétimo do valor inicial, decorridos 45 anos após o seu preparo.⁵⁷

2.3.2 Desdobramentos Posteriores

Nas décadas seguintes aos trabalhos de Eguchi, eletretos de várias outras substâncias puderam ser obtidos a partir do desenvolvimento de novas técnicas. Uma delas, tendo Selenyi por pioneiro em 1928, baseava-se na injeção de portadores de carga (elétrons ou íons) no interior de dielétricos.⁵⁸

Investigações relacionadas ao efeito da luz sobre camadas fotoelétricas foram realizadas, em 1938, por Nadjakoff. Ele estudou a separação que ocorria das cargas em tais camadas pela aplicação simultânea de luz e de um campo elétrico, descobrindo o fotoeletreto. O efeito da fotocondutividade sobre a polarização interna dos materiais foi, mais tarde, extensamente estudado por Kallmann e colaboradores.⁵⁹

Na década de 1950, numerosas técnicas de obtenção de eletretos, que dependiam da aplicação de radiação ionizante de altas energias, foram desenvolvidas. Entre elas, a mais simples con-

⁵⁷[Fuk00].

⁵⁸[Ses80].

⁵⁹[Ses80].

sistia no bombardeamento de dielétricos com um feixe de elétrons de alcance ou de poder de penetração menor do que a espessura do alvo. Outras técnicas similares foram baseadas na irradiação de dielétricos, convenientemente expostos aos penetrantes raios gama, e na posterior aplicação de um campo elétrico para separar os portadores de carga gerados pela radiação. Mesmo sem um campo elétrico, é ainda possível polarizar um dielétrico com raios gamas devido às correntes Compton que se estabelecem no material, conforme foi mostrado por Gross.⁶⁰

Durante o desenvolvimento da xerografia, um método simples de obtenção de eletretos, semelhante à técnica dos feixes de íons de Selenyi, mas dependentes da aplicação de uma descarga corona, foi desenvolvido e, mais tarde, estendido a filmes finos. Dielétricos também foram carregados através da aplicação de um campo magnético e de aquecimento. Mais recentemente, entre as décadas de 1980 e 1990, a polarização de filmes finos com feixes de elétrons de baixas energias foi noticiada.⁶¹

Embora o período anterior tenha produzido uma quantidade significativa de resultados experimentais, um entendimento completo do fenômeno da eletrização permanente apresentada pelos dielétricos, após terem recebido algum tipo de tratamento, não foi inicialmente atingido. O armazenamento de cargas pelos eletretos (absorção dielétrica) e seus comportamentos anômalos (entre eles, a inversão de polaridade), que muito intrigavam os cientistas da época, somente puderam ser esclarecidos após alguns trabalhos fundamentais, alguns deles desenvolvidos em laboratórios brasileiros. A contribuição brasileira para o tema eletretos é discutida no próximo Capítulo.

⁶⁰[Ses99].

⁶¹[Ses80].

Contribuições Brasileiras

O objetivo deste Capítulo é apresentar algumas contribuições desenvolvidas no Brasil relacionadas ao tema eletretos, como o efeito Costa Ribeiro (ou efeito termo-dielétrico). Será dispensada uma atenção especial aos trabalhos dos brasileiros Joaquim da Costa Ribeiro e Sérgio Mascarenhas, e às investigações pioneiras do alemão, naturalizado brasileiro, Bernhard Gross.

3.1 Bernhard Gross - Uma Resenha Biográfica

Durante sua carreira científica, Bernhard Gross contribuiu para várias áreas da física e engenharia. Alguns de seus estudos, tais como os efeitos da radiação em sólidos e armazenamento e transporte de portadores de carga em dielétricos, são partes integrantes da pesquisa de eletretos, um campo que Gross promoveu e cujos progressos ele guiou por mais de seis décadas.¹ É apresentada a seguir uma breve resenha biográfica, com dados sobre a vida pessoal, sobre os trabalhos e sobre o relacionamento deste pesquisador com a comunidade científica de sua época. Pretende-se discutir paralelamente algumas das contribuições de Gross e o impacto de seu trabalho sobre a pesquisa moderna com eletretos.

¹[Ses99].

3.1.1 O Nascimento da Física Experimental no Brasil

Bernhard Gross nasceu em Stuttgart, Alemanha, em 22 de novembro de 1905.² Antigo assistente do renomado físico da área de raios cósmicos E. Regener, formou-se engenheiro em física técnica pela *Technische Hochschule* daquela cidade obtendo, em 1931, pela mesma instituição, seu doutoramento em ciências naturais.³

Gross chegou ao Brasil em 1933, em um período em que não existia no país a profissão de físico, nem curso especializado que levasse ao bacharelado de física. Em poucos anos reuniu em torno de si um grupo de jovens pesquisadores, autodidatas em física, dedicados aos estudos dos raios cósmicos - sua área de investigação na Europa. Os primeiros resultados das pesquisas que empreendeu no Brasil não tardaram e, já em 1934, publicou um primeiro trabalho nos Anais da Academia Brasileira de Ciências.⁴

Seu interesse pelos fenômenos provocados pela interação da radiação com a matéria inspirou-lhe mais tarde uma nova linha de investigação no domínio da física - o estudo de dielétricos reais, área em que realizou importantes trabalhos.⁵ Gross contribuiu de modo significativo para a compreensão das correntes e voltagens termoestimuladas, os termoeletretos e, em particular, dos efeitos de acumulação de cargas em vidros e polímeros por meio das radiações, os radioeletretos.⁶ Tratava-se de trabalhos pioneiros no campo hoje denominado ciências dos materiais.⁷

Em 1945 publicou, em colaboração com a francesa Line Ferreira-Denard, um artigo no qual propunha uma nova interpretação dos eletretos.⁸ Três anos depois, uma segunda publicação deu base para o entendimento do comportamento dos eletretos. Destes trabalhos, Gerhard M. Sessler viria a desenvolver o microfone de eletreto (1962).⁹

Estudando o *fall out* radioativo, Gross detectou, pela primeira vez na América Latina, uma

²[GF].

³[LF02].

⁴[GF].

⁵[Ses99].

⁶[GF].

⁷[Mot04, página 292].

⁸[GFD45].

⁹[Ses99].

partícula “quente”, ou seja, fortemente radioativa, oriunda de explosões nucleares realizadas na atmosfera de outros continentes:¹⁰

Certo dia aconteceu uma coisa curiosa: em um filtro havia radioatividade cem vezes maior que nos outros. Primeiro pensamos que fosse uma medida errada, que o filtro já estava contaminado. Mas tudo indicava que a radioatividade era do mesmo tipo da dos demais. Não compreendíamos como, de repente, podia aparecer algo tão forte. Lembrei-me de que poderia ser uma partícula radioativa maior. Colocamos o filtro na câmara escura, com filme fotográfico. Quando revelamos, estava lá a imagem, em um ponto enegrecido: tínhamos capturado uma partícula bastante grande e com uma atividade bastante alta. Estudamos essa partícula e pudemos identificar, pelo tempo de queda de atividade, que ela provinha de uma explosão que os ingleses haviam feito nas *Christmas Islands*.

Foi Gross quem introduziu o conceito e demonstrou experimentalmente a existência da corrente Compton, produzida pela absorção de raios gama pela matéria, construindo mais tarde um dosímetro baseado nesse efeito.¹¹

Quando os raios gama atravessam a matéria, projetam para a frente elétrons secundários Compton. Estes elétrons espalhados para a frente constituem uma corrente elétrica. (...) Fizemos medidas sistemáticas dessas correntes elétricas geradas por raios gama, que eu chamei de correntes Compton. Imediatamente concluí que [este efeito] deveria permitir a construção de dosímetros. Fiz então uma descrição e patentei o dosímetro Compton no Brasil, na Alemanha e nos Estados Unidos. (...) Estes dosímetros passaram a ser utilizados na monitorização de explosões nucleares pelos americanos.

¹⁰[GF].

¹¹[GF].

Sempre atento aos aspectos matemáticos da ciência, Gross desenvolveu, no campo da física matemática, a teoria geral da resposta linear na teoria dos circuitos elétricos.¹²

Uma geração de jovens cientistas se formou sob sua influência: Joaquim da Costa Ribeiro, Plínio Sussekind Rocha, Armando Dias Tavares, Francisco Oliveira Castro, Sérgio Mascarenhas, Yvonne Mascarenhas, E. Rodrigues e Guilherme Leal Ferreira.¹³

Participou ativamente da criação do Instituto Nacional de Tecnologia na década de 1930, do Conselho Nacional de Pesquisas (CNPq) em 1949 e, nos anos 50, da Comissão de Energia Nuclear,¹⁴ instituições que foram fundamentais para o desenvolvimento da ciência no país. Diretor da Divisão de Informática Científica da Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA) de 1960 a 1967, em Viena, Gross foi pioneiro na aplicação de modernas técnicas de informação em ciência, ao criar o Serviço Internacional de Informação Nuclear (INIS).¹⁵ Ainda em 1967, foi secretário organizador da II Conferência para Usos Pacíficos da Energia Atômica. Por seus trabalhos recebeu o Prêmio B. Houssay da Organização dos Estados Americanos.¹⁶

Entre outras homenagens, Gross recebeu, em 1975, o título de *Doutor Honoris Causa* da Universidade de São Paulo e, mais tarde, da Universidade Técnica de Darmstadt.¹⁷ Aliás, um outro aspecto da carreira científica de Gross foi a intensa interação que teve com vários colegas nas Américas e na Europa. Sua atuação não se restringiu ao Brasil somente. Ao longo dos anos, ele colaborou com, ou trabalhou em, vários laboratórios diferentes. Como resultado de suas colaborações, estimulou atividades nessas instituições que persistiram muito tempo depois de suas atribuições.¹⁸

Trazido para o Instituto de Física da Universidade de São Paulo, em São Carlos, no começo da década de 1970, permaneceu ativo até 1996, quando orientou a última tese de doutorado.

¹²[Ses99].

¹³[GF].

¹⁴[GF].

¹⁵[Mas99].

¹⁶[GF].

¹⁷[GF].

¹⁸[Ses99].

Gross faleceu aos 96 anos no dia 01 de janeiro de 2002.¹⁹

3.1.2 Principais Contribuições

Quando, na década de 1930, Bernhard Gross iniciou seus primeiros trabalhos sobre os fenômenos de carga e polarização de dielétricos,²⁰ o campo de pesquisa de eletretos estava ainda na sua infância. Na década anterior, o físico japonês Eguchi havia realizado os primeiros experimentos sistemáticos com eletretos e havia observado, entre outros efeitos, a inversão de polaridade que deixou, naquele momento, os cientistas intrigados. Outro fenômeno relacionado aos eletretos, e muito então discutido, era a absorção dielétrica, ou seja, a propriedade dos dielétricos de armazenar carga quando expostos a campos intensos. Estes fenômenos fascinaram Bernhard Gross que começou alguns estudos fundamentais dos processos físicos subjacentes. No decorrer destes trabalhos, introduziu as bases da moderna pesquisa de eletretos.²¹

Absorção Dielétrica: O Princípio de Superposição

Conforme já foi dito, Gross iniciou suas investigações com eletretos através de seu trabalho sobre radiação cósmica.²² Na época, era sabido que a absorção dielétrica limitava a sensibilidade das câmaras de ionização.²³ Neste contexto, alguns dos primeiros trabalhos de Gross foram dedicados ao tema.

A polarização e a despolarização de um dielétrico submetido a um campo elétrico externo são controladas pelo princípio de superposição. Este princípio afirma que uma certa variação da força externa sempre resulta no mesmo efeito, independentemente do estado do sistema. Com base nele, Gross foi capaz de formular uma teoria de resposta linear para dielétricos.²⁴ Em particular, derivou relações fundamentais para as correntes, voltagens, efeitos de polarização e tempos de relaxação. Estas relações constituem a ferramenta básica para a descrição e o

¹⁹[LF02].

²⁰[GF].

²¹[Ses99].

²²[GF].

²³[Ses99].

²⁴[Ses99].

entendimento da absorção dielétrica.

Inversão de Polaridade

Do breve histórico apresentado no Capítulo anterior, um dos fenômenos mais intrigantes associados aos eletretos é a inversão de polaridade. Nem todos os eletretos invertem sua polaridade, mas a maioria dos termoeletretos o faz.²⁵ O mecanismo exato deste fenômeno foi somente compreendido e explicado por Gross, em 1944. Para isto empregou os conceitos de “homocargas” e “heterocargas”, segundo uma definição previamente estabelecida.²⁶

Trabalhos anteriores haviam proposto a existência de duas cargas de naturezas distintas e de polaridades opostas em dielétricos eletrizados cujas superfícies estiveram, quando submetidos a um campo externo, em contato com eletrodos conectados aos terminais de uma fonte de alta tensão. De acordo com esta teoria, um eletreto adquire, durante sua formação, os dois tipos de carga: a “homocarga”, cuja polaridade é a mesma daquela aplicada pelos eletrodos; e a “heterocarga”, cuja polaridade é oposta àquela aplicada pelos eletrodos. Inicialmente a heterocarga domina. Entretanto, ela decresce rapidamente, enquanto que a homocarga se mantém por um tempo maior. Portanto, o eletreto fatalmente inverte sua polaridade. A teoria leva em conta, entre outras coisas, a condutividade elétrica do material, mas não especifica a natureza física do processo responsável pela formação dos dois tipos de cargas ou o motivo para a maior longevidade da homocarga. Portanto, ela é somente uma teoria fenomenológica.²⁷ Sua ideia básica pode ser plenamente ilustrada usando uma analogia hidrodinâmica, descrita na Figura 3.1.

Foi somente com uma série de experimentos fundamentais realizados por Gross que a coexistência destes tipos diferentes de carga foi demonstrada de forma convincente e suas identidades reveladas.²⁸

Seu procedimento experimental consistia basicamente na medição isotérmica da corrente

²⁵[JW80].

²⁶[Ses99].

²⁷[JW80].

²⁸[Ses99].

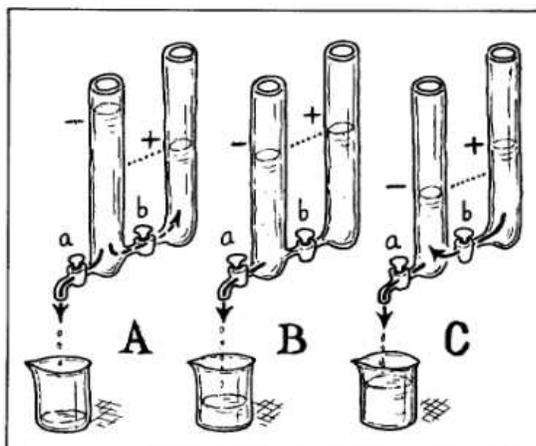


Figura 3.1: A inversão de polaridade de um eletreto é provocada por diferentes taxas de decaimento ou de dissipação das hetero e homocargas. Esse fenômeno é análogo à inversão do nível de água no aparato mostrado acima. Nele, o nível no tubo da frente corresponde à heterocarga de um eletreto, o nível de água no tubo detrás à homocarga, a válvula “a” (grande abertura) corresponde ao mecanismo de decaimento da heterocarga, e a válvula “b” (pequena abertura) corresponde ao mecanismo de decaimento da homocarga. (A) domínio da heterocarga; (B) estado neutro; (C) domínio da homocarga, [JW80].

externa e da carga superficial, em diferentes temperaturas, sobre um capacitor desmontável, que Gross aperfeiçoou, durante os períodos em que este era carregado e descarregado. Entre as placas do capacitor, havia um disco de cera de carnaúba que podia ser submetido a campos elétricos de várias intensidades. Destes experimentos foi possível concluir que a heterocarga está ligada à absorção dielétrica envolvendo dipolos em substância polares, ou cargas iônicas em outros materiais, responsáveis por uma polarização volumétrica do dielétrico. Já a homocarga é devida à eletrização interfacial do dielétrico pelos eletrodos adjacentes (as cargas projetadas pelos eletrodos, de pequena penetração, são “aprisionadas” em armadilhas energéticas, observadas em níveis microscópicos, na estrutura molecular do dielétrico). Isto está ilustrado na Figura 3.2.

Os trabalhos de Gross, além de complementar as observações de Eguchi, forneceram as

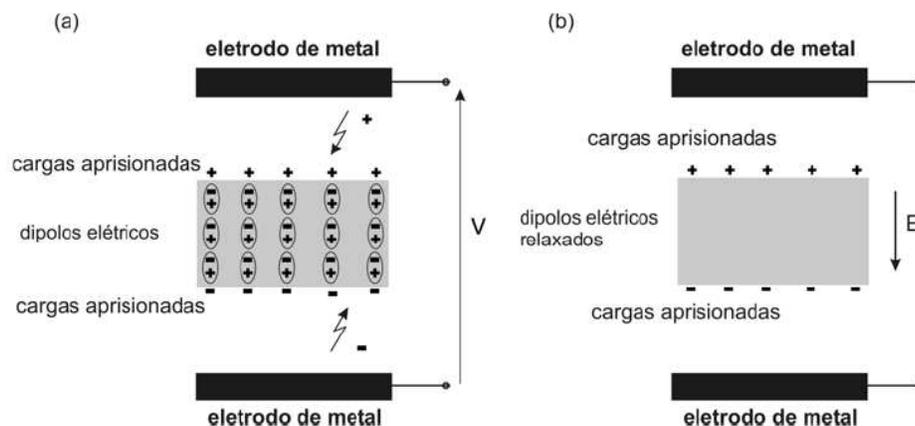


Figura 3.2: (a) Hetero e homocargas; (b) homocargas estáveis, [Aqu07].

primeiras informações sobre a influência da temperatura no comportamento dos eletretos.²⁹

Efeito Termo-dielétrico: Uma Nova Teoria

Em 1953, Bernhard Gross elaborou uma teoria³⁰ do recém descoberto efeito termo-dielétrico, ou efeito Costa Ribeiro, como mais tarde viria a ser chamado em homenagem ao seu descobridor, o brasileiro Joaquim da Costa Ribeiro. Uma descrição detalhada do efeito e um enfoque geral da teoria proposta por Gross são apresentados na Seção 3.3.

3.2 Joaquim da Costa Ribeiro - Uma Resenha Biográfica

Os laboratórios científicos instalados na antiga Universidade do Brasil, no Rio de Janeiro, nas primeiras décadas do século passado, contavam com poucos recursos e eram bastante modestos se comparados com laboratórios internacionais, como os existentes na Europa ou nos Estados Unidos. Uma dessas bancadas de pesquisa, porém, seria o palco de uma importante descoberta na área de física experimental, feita na época da Segunda Guerra Mundial por um engenheiro eletricitista brasileiro que estudava a aplicação de cargas elétricas em materiais dielétricos.³¹

²⁹[GFD45].

³⁰[Gro53] e [Gro54].

³¹[Abr04].

Esse engenheiro era Joaquim da Costa Ribeiro, nascido no Rio de Janeiro no dia 8 de julho de 1906 e considerado hoje um dos pioneiros da física experimental no país. Filho de Antonio Marques da Costa Ribeiro e pai de nove filhos (Ghislaine, Sérgio, Annah, Carlos, Paulo, Luiz, Yvonne, Martha e Jeanne), Costa Ribeiro fez seus estudos secundários no Externato Santo Inácio, onde concluiu o curso em 1922.³² Diplomado engenheiro civil e engenheiro mecânico-eletricista, em 1928, pela antiga Escola Politécnica do Rio de Janeiro, em pouco tempo passou a integrar o ambiente científico do então Instituto de Tecnologia, onde trabalhou ao lado de outros pesquisadores nacionais pioneiros e do físico alemão Bernhard Gross, com quem manteve uma estreita interação científica.³³ Gross organizou o primeiro curso de física do Rio de Janeiro, iniciado em 1935.³⁴

A convite de Gross, Costa Ribeiro vai para a recém-criada Universidade do Distrito Federal no Rio de Janeiro. Com a transformação desta em Universidade do Brasil, ocupa interinamente a Cátedra da Faculdade Nacional de Filosofia, iniciando sua carreira científica em 1940 com estudos físicos sobre materiais naturais encontrados no Brasil.³⁵ Suas primeiras investigações incluíam a busca de um novo método para medir a radioatividade e sua aplicação a minerais radioativos brasileiros.³⁶ Colaborou na localização de ocorrências minerais de urânio e tório em Minas Gerais.³⁷ Em seguida, passou a estudar a produção de eletretos empregando diversos materiais dielétricos, como parafina, colofônio, naftaleno e também a cera de carnaúba (extraída de uma palmeira da região Nordeste).³⁸ Na época, os eletretos eram produzidos em geral através da aplicação de um campo elétrico externo, fornecido por uma fonte de alta tensão, conforme a técnica experimental desenvolvida por Eguchi.

Costa Ribeiro foi efetivado em suas funções na Faculdade Nacional de Filosofia da Universi-

³²[Abr].

³³[LF00].

³⁴[Abr04].

³⁵[LF00].

³⁶[Abr].

³⁷[LF00].

³⁸[Abr04].

dade do Brasil (FNFUB) em 1946,³⁹ com a tese “Sobre o fenômeno termo-dielétrico (correntes elétricas associadas a mudanças de estado físico)”. No Departamento de Física da FNFUB formou-se então um grupo de colaboradores, dentre os quais se destacava o professor Armando Dias Tavares. Entre os colaboradores, encontravam-se ainda numerosos estudantes (não do Departamento de Física, mas do Departamento de Química): Sérgio e Yvonne Mascarenhas, Edson Rodrigues e Rosa F. Rabelo, entre outros.⁴⁰

3.2.1 Descoberta e Polêmica

Durante as pesquisas com eletretos, em que estudava a formação de sólidos carregados sob a ação de campos elétricos perto do ponto de fusão, Costa Ribeiro observou um novo fenômeno físico de caráter muito geral:⁴¹ o eletreto se formava mesmo sem a aplicação de um campo externo, quando o material dielétrico se solidificava naturalmente, após ter sido fundido. Isso significava que a mudança no estado físico dos dielétricos era, por si só, capaz de eletrizar esses materiais, desde que uma das fases envolvidas na transição fosse a sólida. Era uma descoberta inesperada, ainda mais diante das condições em que as pesquisas eram realizadas no Brasil, na época.⁴²

Sabe-se agora que bem antes, em 1732, Stephen Gray mencionara e descrevera o fenômeno.⁴³ Isso, porém, não diminui a importância histórica da (re)descoberta do mesmo fenômeno e de seu estudo para a física brasileira, nem o grande mérito de Costa Ribeiro que repousa sobretudo em sua persistência em estudar experimentalmente o efeito encontrado, conforme observou Gross:⁴⁴

O Costa Ribeiro sentado à minha frente, colocando sobre a mesa pedacinhos carregados de cera de carnaúba solidificados sem a aplicação de campos elétricos. Eu quase desencorajei-o a prosseguir na elucidação do efeito, dada as previsíveis difi-

³⁹[Abr].

⁴⁰[LF00].

⁴¹[Abr].

⁴²[Abr04].

⁴³[Gra 2].

⁴⁴[LF00].

culdade que encontraria. Mas ele foi perseverante.

O fenômeno, batizado de “efeito termo-dielétrico” pelo cientista e descrito por ele em um artigo nos Anais da Academia Brasileira de Ciências em 1944 e 1950,⁴⁵ gerou grande interesse nos meios científicos do país e do exterior, trazendo notoriedade para seu descobridor. A partir daí, Costa Ribeiro integraria várias expedições de estudo, no Brasil e no exterior, participaria de vários congressos e conferências e publicaria trabalhos sobre o fenômeno em revistas científicas internacionais.

Costa Ribeiro realizou seminários em vários centros, como na Sorbonne, na Universidade de Strassbourg, no MIT, em Yale, entre outros. A descoberta deu a ele, em 1953, o prêmio Einstein da Academia Brasileira de Ciências. Na ocasião, Costa Ribeiro foi saudado por Gross:⁴⁶

... Penso que este episódio mostra bem os extraordinários dotes de pesquisador de Costa Ribeiro e o seu modo de proceder - a curiosidade científica que tudo considera digno de estudo, o poder de observação a par com o raciocínio que tira conclusões de relevo de fatores aparentemente insignificantes, a atitude crítica que tudo põe no seu devido lugar...

Hoje, o efeito termo-dielétrico também é conhecido como efeito Costa Ribeiro, em sua homenagem.⁴⁷

Entretanto, alguns anos depois da descrição do fenômeno por Costa Ribeiro, a prioridade brasileira sobre descoberta enfrentou um intenso debate.⁴⁸ O foco da discórdia foi um artigo por dois físicos norte-americanos, Everly J. Workman e Steve E. Reynolds, publicado em maio de 1950, posterior, portanto, às comunicações de Costa Ribeiro,⁴⁹ no periódico *Physical Review*, que circulava em todo o meio científico internacional. Os norte-americanos não citaram os

⁴⁵[Cos50].

⁴⁶[LF00].

⁴⁷[Tin06].

⁴⁸[Abr04].

⁴⁹[LF00].

trabalhos de Costa Ribeiro. Esse trabalho descrevia o mesmo fenômeno, observado por eles na transição de fase entre a água e o gelo. Apesar dos artigos e conferências de Costa Ribeiro e dos protestos dos cientistas brasileiros, ainda hoje a eletrização de materiais dielétricos na mudança de fase é chamada, em muitos artigos científicos veiculados pela internet, de “efeito Workman-Reynolds”.⁵⁰

Um documento que esclarece a questão é a moção apresentada à Academia Brasileira de Ciências, no início dos anos 50, pelo biofísico Carlos Chagas Filho (1910-2000), reivindicando para o Brasil a descoberta do efeito termo-dielétrico. A moção destaca ser provável que Workman e Reynolds desconhecem as experiências de Costa Ribeiro, embora amplamente divulgadas no meio acadêmico pelo menos dois anos antes do início dos trabalhos dos norte-americanos. Chagas Filho lista todas as publicações sobre o efeito termo-dielétrico, nacionais e internacionais, as citações internacionais feitas a esse efeito e a apresentação da Costa Ribeiro sobre o resultado de suas pesquisas feita à Academia Brasileira de Ciências em sessão de 14 de novembro de 1944.⁵¹ Na época, essa questão mobilizou a comunidade científica nacional em favor de Costa Ribeiro. Leal Ferreira, em seu artigo,⁵² comenta o episódio:

... [Everly J. Workman e Steve E. Reynolds], pesquisadores que não costumavam mencionar os trabalhos já realizados aqui (é verdade que publicado nos Anais da Academia Brasileira de Ciências, pouco conhecido, mas parece não ser só por mero desconhecimento) e por isso estiveram nossas cordas nacionalistas.

3.2.2 Dedicção à Ciência

Joaquim da Costa Ribeiro, além de sua atividade como professor e pesquisador, desempenhou várias funções públicas,⁵³ com atuações importantes na criação de instituições relevantes para o desenvolvimento da ciência no Brasil e em iniciativas internacionais sobre o uso da energia

⁵⁰[Abr04].

⁵¹[Abr04].

⁵²[LF00].

⁵³[LF00].

nuclear. No final dos anos 40, participou, como delegado do Brasil, do Comitê Consultivo das Nações Unidas para as Aplicações Pacíficas da Energia Nuclear, e dos debates que levaram à criação do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, em 1949, e do Conselho Nacional de Pesquisas (CNPq), em 1951.⁵⁴ Em meados dos anos 50, colaborou na elaboração do projeto do Estatuto da Agência Internacional de Energia Atômica, e depois foi o delegado brasileiro na Conferência Internacional de Nova York, que aprovou o texto final do referido Estatuto.⁵⁵

No Brasil, integrou a Comissão de Energia Atômica do CNPq (que presidiu em 1956) e a Comissão Nacional de Energia Nuclear da Presidência da República (em 1957). Em outubro de 1957, foi o delegado brasileiro na 1ª Conferência Geral da Agência Internacional de Energia Atômica, em Viena (Áustria). Em fevereiro de 1958, foi nomeado diretor da Divisão de Intercâmbio e Treinamento da Agência Internacional de Energia Atômica, cargo que desempenhou até novembro de 1959.⁵⁶

Por toda a vida, dedicou-se ao desenvolvimento da ciência e às aplicações que esta poderia ter para engrandecer a vida humana. Pelo conjunto de sua obra, foi agraciado com o prêmio Álvaro Ozório de Almeida, do CNPq. Joaquim da Costa Ribeiro morreu em 29 de julho de 1960, com 54 anos, no Rio de Janeiro.⁵⁷

A julgar pelo entusiasmo de seus admiradores ao relembrar as realizações do físico, sua contribuição para a ciência brasileira foi muito além das quatro paredes de um laboratório. O historiador da ciência Simon Schwartzman destacou, em uma oportunidade, a luta de Costa Ribeiro para tornar a pesquisa dentro das universidades mais autônoma, atualizada, articulada com o cenário internacional e desvinculada de interesses políticos. “Sua idéia era a de que não havia incompatibilidade entre o trabalho científico e o uso prático. O importante não era apoiar só o que podia gerar tecnologia. Ele pensava em como inserir a ciência dentro da universidade”.⁵⁸

⁵⁴[Abr].

⁵⁵[Abr04].

⁵⁶[Abr04].

⁵⁷[Abr].

⁵⁸[Tin06].

3.3 Um Estudo do Efeito Termo-dielétrico

Para estudo, Costa Ribeiro escolheu o naftaleno, material que apresenta o efeito em magnitude acentuada.⁵⁹ A eletrização deste dielétrico era medida através da carga adquirida, em um dado intervalo de tempo, por um capacitor (de capacitância C_p), ligado ao eletrodo onde se processava a mudança de fase, ao mesmo tempo em que se media a variação de massa, de uma fase em relação a outra, devido à solidificação do dielétrico fundido. No decorrer do experimento, o capacitor se carregava positivamente e, por conseqüência, também o naftaleno. Costa Ribeiro caracterizou experimentalmente o efeito pelo quociente da carga externa medida por unidade de massa crescida, obtendo valores da ordem de 10^{-9} C/g.⁶⁰

Uma explicação qualitativa do efeito foi apresentada por Gross em um trabalho apresentado à Academia Brasileira de Ciências em 1953. Intitulado “Teoria do Efeito Termo-dielétrico”, ele indica os principais processos físicos capazes de dar uma interpretação satisfatória do efeito:⁶¹

As condições necessárias para o aparecimento do efeito [termo-dielétrico] são a existência de uma fase sólida e de uma interface definida entre as duas fases sólido-líquido. (...) A generalidade do novo efeito exclui [portanto] uma interpretação em termos de um mecanismo especial e peculiar a certas classes de dielétricos. As suas causas devem ser procuradas em processos que são característicos do comportamento da grande maioria das substâncias dielétricas.

A condutividade dos dielétricos líquidos, tanto quanto se sabe agora, é de natureza iônica. Também nos dielétricos sólidos, a maioria dos fenômenos elétricos pode ser interpretada por efeitos iônicos, a não ser em campos elevados próximos à ruptura, quando intervêm também elétrons livres. Por estas razões acreditamos que nas correntes termo-dielétricas, as partículas carregadas também são íons, muito embora a intervenção de um efeito eletrônico na interface não possa ser excluída “a priori”.

⁵⁹[LF00].

⁶⁰[LF00].

⁶¹[Gro53].

Consideramos o caso em que uma fase líquida e uma fase sólida do mesmo dielétrico se encontram em contato, separadas por uma interface definida. À interface corresponde uma barreira de potencial que representa as forças de superfície de van der Waals. A barreira não é intransponível, haverá sempre um intercâmbio de moléculas entre as duas fases, mas no equilíbrio o balanço global será nulo. No entanto, equilíbrio para as moléculas neutras não significa necessariamente equilíbrio para os íons. Sabe-se ademais que o comportamento dos íons positivos é diferente do dos íons negativos, cada espécie iônica sendo caracterizada por valores próprios de mobilidade e coeficiente de difusão. Portanto, mesmo no equilíbrio, poderá haver ainda migração dos íons através da interface, em um sentido ou no outro, com preferência de íons de uma polaridade. Isto significa que pode haver um transporte de carga elétrica através da interface. Ou, dito de outra maneira, os pontos de fusão (ou ebulição) dos íons positivos e negativos são diferentes entre si e diferentes das moléculas neutras. Este fenômeno se acentua na ausência de equilíbrio, quando a interface se desloca em uma determinada direção.

Ou seja, o mecanismo do efeito termo-dielétrico seria, a “grosso modo”, o seguinte:⁶²

A interface, como se fosse um filtro seletivo, é mais facilmente transponível para os íons de uma polaridade que de outra. Quando ela se desloca, em virtude do processo de solidificação, há um fluxo contínuo de carga através da mesma e aparece, portanto, excesso de cargas de uma polaridade no depósito sólido e excesso de cargas de polaridade contrária no líquido. No sólido, as cargas constituem uma carga espacial desde que a condutividade do mesmo seja suficientemente pequena. No líquido, em virtude da condutividade relativamente grande deste, constituem uma carga superficial adjacente à interface.

Portanto, a interface age como uma barreira de potencial que ao avançar empurra em sua frente os íons para os quais é intransponível, deixando atrás de si uma zona de cargas

⁶²[Gro53].

espaciais constituídas pelos íons para os quais é permeável. É o campo elétrico resultante desta distribuição de cargas que dá origem às tensões que são observadas no circuito representado na Figura 3.3.

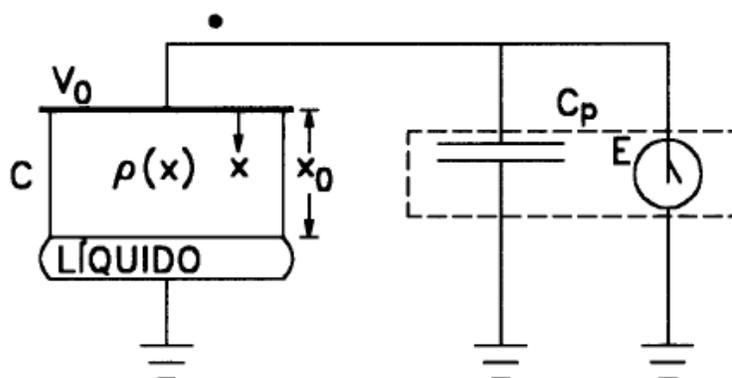


Figura 3.3: Representação esquemática da medida elétrica do efeito termo-dielétrico. A densidade de carga, $\rho(x)$, depositada no sólido, de espessura x_0 , à medida que a fase sólida “cresce”, cria um potencial V_0 no eletrodo isolado em $x = 0$. Aqui C é a capacitância do sólido crescido e C_p a capacitância em paralelo, [LF00].

3.4 Outros Desenvolvimentos do Efeito Termo-dielétrico

Por décadas, o efeito termo-dielétrico continuou despertando o interesse de vários cientistas de diferentes nacionalidades. Dentre os pesquisadores brasileiros, destacam-se figuras como a de Armando Dias Tavares, que dedicou grande parte de sua atividade científica ao estudo de diferentes aspectos do efeito termo-dielétrico, escrevendo, pouco antes de seu falecimento (fevereiro de 1988), um amplo trabalho de revisão do assunto.⁶³ Podemos citar também a Sérgio Mascarenhas que, no início de seus estudos universitários, exerceu funções de assistência a Costa Ribeiro em atividades de pesquisa e ensino. Professor emérito do Instituto de Física da USP de São Carlos, Mascarenhas atualmente dirige o Instituto de Estudos Avançados da

⁶³[LF00].

mesma universidade.

3.4.1 O Efeito Termo-dielétrico Recíproco

Costa Ribeiro conjecturou que se cargas elétricas aparecem em uma mudança de fase, a mudança de fase poderia ser alterada pela presença de um campo elétrico. Isto é, suspeitou que o campo elétrico podia gerar uma mudança de fase de um material dielétrico. Em 1954, ele descreve o fenômeno da eletro-fusão. Embora não o seja propriamente, o efeito ficou conhecido como Efeito Termo-dielétrico Recíproco.⁶⁴

Sérgio Mascarenhas realizou um amplo estudo deste efeito, mostrando ser o mesmo devido à variação da condutividade térmica global do líquido, aumentando-a ou diminuindo-a, proporcionalmente ao quadrado da tensão aplicada (da ordem de centenas de volts). Ele interpretou seus resultados através da teoria termodinâmica dos processos irreversíveis, criando o que chamou de teoria da eletrotermocondutividade:⁶⁵

Sua marca característica é que é um efeito tremendamente interdisciplinar, porque você pega uma coisa do calor, da termodinâmica e do estado sólido e transporta para um efeito elétrico.

3.4.2 Generalização do Efeito Termo-dielétrico

Utilizando uma montagem semelhante àquela concebida originalmente por Costa Ribeiro (ver a Figura 3.3), porém investigando materiais distintos, Mascarenhas pôde observar a ocorrência do efeito termo-dielétrico em outras transições de fase. Em 1962, registrou o aparecimento de enormes tensões elétricas, da ordem de 100 quilovolts, durante a formação de gelo seco, o que possibilitou a construção de um gerador eletrostático de CO_2 . Trabalho este que, naquele ano, ganharia destaque internacional no *American Journal of Physics*. A respeito destas investigações, Mascarenhas uma vez declarou:⁶⁶

⁶⁴[LF00].

⁶⁵[Mou07].

⁶⁶[Mou07].

Costa Ribeiro tinha verificado isso [o efeito termo-dielétrico] durante a fusão de um sólido, e eu pensava que esse era um efeito mais universal. Daí, fui procurá-lo em outras mudanças de fase e o encontrei também na sublimação de certos materiais. Depois eu o encontrei em materiais biológicos.

Investigando a ocorrência do efeito termo-dielétrico em sistemas biológicos, Mascarenhas introduziu o conceito de bioeletreto.⁶⁷

Fui procurar o mesmo efeito em substâncias biológicas, como o DNA, proteínas... Encontrei em todas elas e, a meu ver, foi essa uma das contribuições maiores que dei: a criação do conceito de bioeletretos.

Nas últimas décadas os bioeletretos têm encontrado inúmeras aplicações médicas interessantes. Estas e algumas outras aplicações científicas e industriais dos eletretos serão abordadas no próximo Capítulo.

Por fim, Mascarenhas conclui:⁶⁸

Assim, houve uma generalização do efeito termo-dielétrico...

Outro trabalho nesse sentido é devido a Armando Dias Tavares que, empregando um gérmen cristalino aderido ao eletrodo frio para induzir o crescimento ordenado do depósito, observou o efeito termo-dielétrico na condensação de vapor. Ele trabalhou com o naftaleno e efeito similar já tinha sido observado em outras substâncias. O interessante de sua experiência é que ele aplicou campos elétricos de grande intensidade, transversais à coluna ascendente de vapor, de forma a garantir que íons eventualmente presentes no vapor fossem eliminados da coluna. Verificou então que o efeito continuava presente, mostrando tratar-se, pelo menos no caso em questão, de um efeito eletrônico.⁶⁹

⁶⁷[Mou07].

⁶⁸[Mou07].

⁶⁹[LF00].

Aplicações

O objetivo deste Capítulo é apresentar algumas das aplicações tecnológicas dos eletretos. Em particular, vamos discutir sua utilização em máquinas eletrostáticas, microfones e outros aparelhos modernos.

4.1 Máquinas Eletrostáticas - O Eletróforo de Volta

A mais antiga aplicação da duradoura eletrização de um dielétrico aparece em um dispositivo denominado eletróforo, ou mais precisamente, “eletróforo perpétuo”, conforme a denominação dada, em 1775, pelo cientista italiano Alessandro Volta (1745-1827).¹ O eletróforo consiste de uma placa isolante, apoiada sobre uma superfície qualquer aterrada, e de um disco condutor, geralmente metálico, com um cabo isolante preso ao seu centro, disposto perpendicularmente em relação ao disco, ao longo de seu eixo de simetria, Figura 4.1.

4.1.1 Operando o Eletróforo

O eletróforo de Volta é uma máquina eletrostática simples, cujo carregamento se dá por indução. Para fazê-la funcionar, o disco condutor, que é sempre seguro pelo cabo isolante, é colocado

¹[Jon10].



Figura 4.1: O eletróforo de Volta, [Vol].

sobre a placa, também isolante, e que foi previamente atritada. A placa, que após o atrito se eletriza negativamente, induz cargas no disco: positivas na face em contato com a placa e negativas na face oposta. Com o disco ainda sobre a placa, toca-se com o dedo a sua face superior (aterramento elétrico). Isso faz com que as cargas negativas escoem para o solo. Retirado o dedo, o disco, que se tornou positivamente eletrizado, é então afastado da placa, Figura 4.2.

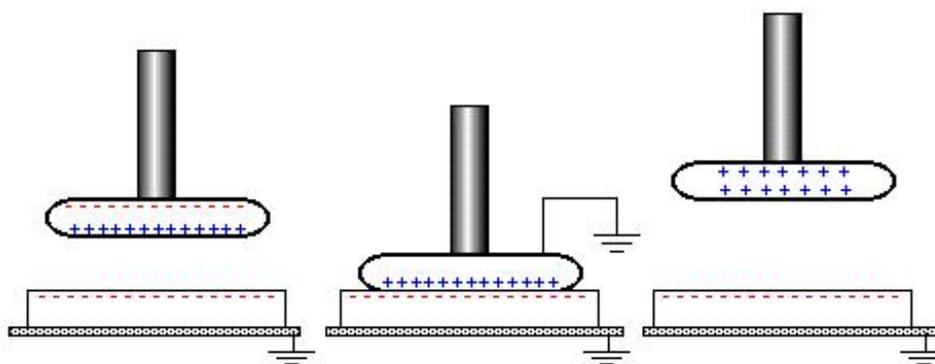


Figura 4.2: Carregamento de um eletróforo, [Jon10].

As cargas geradas pelo atrito sobre a placa isolante são apenas superficiais, com um tempo característico de decaimento relativamente pequeno, o que a caracteriza como um pseudo-

eletreto.²

Desde que o disco e a placa, quando postos em contato, se tocam em somente alguns poucos pontos, apenas são descarregadas aquelas regiões da placa que se encontram extremamente próximas aos pontos de contato. Sobre o restante da superfície da placa, as cargas permanecem inalteradas. Portanto, o disco, uma vez descarregado, pode ser eletrizado repetidas vezes sem, contudo, a necessidade de a placa ser novamente atritada.

4.2 Transdutores Eletromecânicos

O transdutor é qualquer dispositivo capaz de transformar um tipo de sinal em outro para permitir o controle de processos físicos, ou realizar uma medição, etc. São denominados de transdutores eletromecânicos aqueles dispositivos com a atribuição de estabelecer relações bilaterais entre fenômenos de natureza elétrica com outros de natureza mecânica.³ Em geral, são empregados para a geração de sinais elétricos alternados quando submetidos a vibrações mecânicas.

Boa parte destes transdutores, que operam na entrada ou na saída de um processo, são normalmente constituídos de materiais piezelétricos ou capacitivos. São chamados de piezelétricos àqueles materiais que apresentam uma diferença de potencial proporcional à deformação mecânica experimentada, ou a devolvem como resposta de um estímulo elétrico, também de maneira linear. No entanto, transdutores destes materiais possuem um custo elevado e algumas vezes sua massa inercial elevada interfere sobre o sentido real das grandezas manipuladas e, conseqüentemente, sobre a sensibilidade dos instrumentos com eles construídos.⁴

Uma alternativa aos transdutores piezelétricos ou capacitivos surgiu, em meados do século passado, com o emprego de películas poliméricas eletricamente carregadas, com massa desprezível e com um custo muito inferior comparado aos dos transdutores eletromecânicos usuais. Em linhas gerais, tais películas são eletretos no sentido de que se trata de materiais dielétricos,

²[JW80].

³[Aqu07].

⁴[Aqu07].

maleáveis e com capacidade de reter cargas elétricas, de modo a exibir um campo elétrico externo permanente. A carga elétrica constante depositada nestas películas substitui uma fonte de alimentação contínua de tensão, possibilitando a construção de instrumentos portáteis.

Estas e outras características despertaram o interesse nas mais diversas áreas da engenharia. Hoje, os transdutores eletromecânicos de eletretos poliméricos podem ser encontrados em vários aparelhos modernos. Alguns deles são apresentados a seguir.

4.2.1 Microfone de Eletreto

A mais antiga aplicação dos eletretos modernos deve-se aos japoneses, que os utilizaram em seus telefones militares durante a Segunda Guerra Mundial.⁵ Contudo, os microfones de eletreto tiveram o seu desenvolvimento em escala industrial somente em 1962, nos laboratórios da Bell, por Gerhard Sessler e James West.⁶ Hoje, eles são amplamente difundidos por seu preço, tamanho (1 mm de espessura e 5 mm de diâmetro) e excelentes características eletroacústicas. Na Figura 4.3 são mostramos alguns desses microfones que podem ser facilmente encontrados no comércio.



Figura 4.3: Microfones de eletreto, [Mic].

Os eletretos comerciais obtidos destes aparelhos são membranas flexíveis (filmes delgados),

⁵[Net].

⁶[GF].

com espessura da ordem de 25 micrômetros, produzidos a partir de um material plástico (teflon), um polímero com condutividade elétrica extremamente pequena e que, por isso, retêm uma carga estática indefinidamente.⁷ Entre outras características, o emprego deste tipo de material está também relacionado a suas excelentes propriedades mecânicas. De fato, materiais como ceras e resinas são apropriados para experiências de laboratório, mas eles perdem rapidamente sua estabilidade mecânica (ficam quebradiços), não sendo convenientes para aplicações industriais.⁸

O modo mais simples para se fazer um eletreto de filme delgado (Figura 4.4) é “pulverizar” uma folha plástica com cargas elétricas através de pequenas faíscas (descarga corona). Durante este processo, há uma transferência efetiva de cargas de uma fonte externa (eletrodos) para o dielétrico de modo que os eletretos assim produzidos, também conhecidos como corona-eletretos, possuem uma carga resultante não nula. Acoplado aos microfones de eletreto, existe ainda um amplificador de sinal que aumenta a intensidade do sinal de saída e, conseqüentemente, a sensibilidade do aparelho.⁹

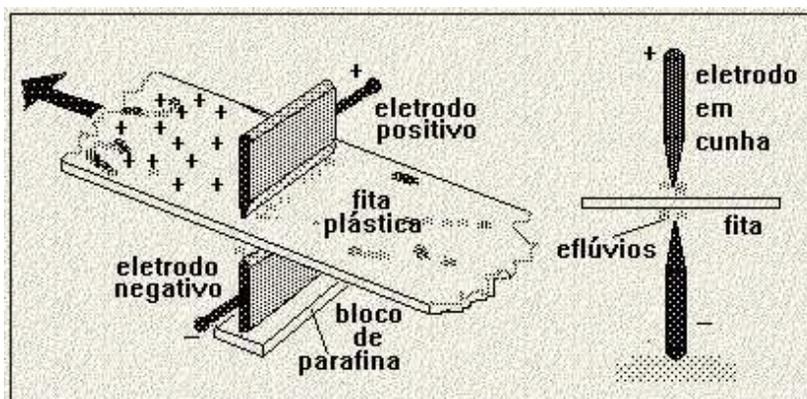


Figura 4.4: Produção de um corona-eletreto: os dois eletrodos são conectados a uma fonte de alta tensão (\simeq kV), [Net].

A Figura 4.5 mostra a estrutura interna de um microfone de eletreto. Quando o eletreto é

⁷[GF].

⁸[JW80].

⁹[Aqu07].

colocado como dielétrico entre duas placas de metal, forma um tipo especial de capacitor. A relação entre a tensão (V), a carga (Q) e a capacitância (C) é dada por

$$V = \frac{Q}{C} . \quad (4.1)$$

A carga Q armazenada no dielétrico é mantida praticamente constante. O pequeno movimento do diafragma de metal devido à ação do sinal sonoro (ondas mecânicas), acarreta em pequenas variações na capacitância do capacitor, fazendo com que haja variações na tensão V . São estas variações de tensão que constituem o sinal elétrico de saída.¹⁰

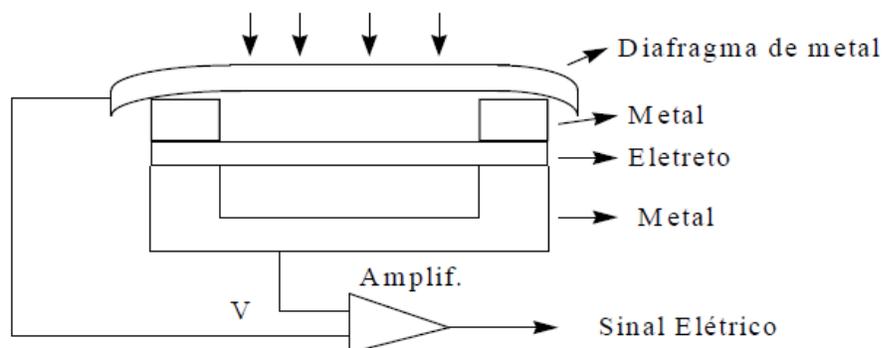


Figura 4.5: Princípio de funcionamento do microfone de eletreto, [Mot, pág. 18].

4.2.2 Outras Aplicações

Vários aparelhos ou dispositivos nos quais os eletretos se fazem presentes foram sugeridos e patenteados nas últimas décadas. Entre eles estão detectores de radiação, dosímetros, unidades de armazenamento de memória, medidores de umidade e pressão, purificadores de ar, detectores de vibração, relés, fontes de tensão e corrente, motores eletrostáticos, defletores de feixe de elétrons, chaves “pushbutton”, etc. Talvez a mais admirável aplicação dos eletretos tenha sido em detectores sísmicos utilizados nas missões espaciais Apollo. Uma das propostas é a aplicação

¹⁰[Mot].

dos eletretos em sistema de segurança de aeroportos.¹¹

¹¹[JW80].

Considerações Finais

Em linhas gerais, neste trabalho, trouxemos um apanhado amplo e didático sobre o tema eletretos. Fizemos aqui uma revisão geral sobre o assunto, analisando as publicações históricas mais importantes, assim como artigos e livros recentes dedicados ao tema.

Preocupados com os aspectos fundamentais da eletricidade, apresentamos, no Capítulo 2, a história da pesquisa de eletretos, desde a descoberta de Gray, a cujos trabalhos demos maior ênfase, passando por nomes como os de Benjamin Franklin, Faraday e Heaviside, até a técnica experimental desenvolvida por Eguchi, quando os eletretos passaram a ser estudados de forma sistemática. Paralelamente a isso, foram abordadas e discutidas as suas propriedades físicas mais relevantes. Fizemos também um breve comentário sobre alguns trabalhos mais recentes nesta área. Discutimos, sobretudo, o desenvolvimento de novas técnicas que, entre outras coisas, permitiram a obtenção de eletretos a partir de diversos materiais dielétricos, diferentes daqueles originalmente estudados por Gray.

As contribuições brasileiras relacionadas ao tema eletretos, como o efeito termo-dielétrico, foram abordadas no Capítulo 3. Dedicamos uma atenção especial aos trabalhos pioneiros de Bernhard Gross e Joaquim da Costa Ribeiro, que contribuíram de forma significativa para a compreensão de fenômenos como o armazenamento de cargas pelos eletretos (absorção dielétrica)

e seus comportamentos anômalos (entre eles, a inversão de polaridade), que muito intrigavam os cientistas da época.

No Capítulo 4, tratamos de algumas das aplicações tecnológicas (a utilização de eletretos em máquinas eletrostática, microfones e outros aparelhos modernos). Em uma outra disciplina que cursamos neste segundo semestre de 2010, Tópicos de Ensino de Física I (F 609), coordenada pelo Prof. Lunazzi, analisamos a fabricação e as aplicações de eletretos. Nesta disciplina, realizamos algumas experiências utilizando materiais de baixo custo e reproduzimos grande parte das experiências de Gray. Desta forma esperamos ter obtido uma formação mais ampla sobre este tema tão fascinante, embora pouco difundido nos livros didáticos de eletromagnetismo.

Por fim, o tema é bastante rico, não sendo possível esgotá-lo em um único trabalho. Por isso, a bibliografia que se segue pode servir de referência para trabalhos posteriores neste mesmo tema.

Referências Bibliográficas

- [Abr] E. M. Abrahão. Resenha Biográfica de Joaquim da Costa Ribeiro. *Arquivos Históricos CLE/ Unicamp*. Disponível em: <http://www.cle.unicamp.br/arquivoshistoricos/biografiafjcr.pdf>.
- [Abr04] E. M. Abrahão. Uma descoberta inesperada. *Ciência Hoje*, 35:75–77, 2004. Disponível em: <http://www.cienciahoje.uol.com.br/revista-ch/revista-ch-2004/209/ch-209-uma-descoberta-inesperada>.
- [Aqu07] C. V. Aquino, 2007. Tese de mestrado: Transdutores eletromecânicos de eletretos poliméricos com bolha de ar termoformada. São Carlos, USP.
- [Ass10] A. K. T. Assis. *Os Fundamentos Experimentais e Históricos da Eletricidade*. Apeiron, Montreal, 2010. ISBN: 9780986492617. Disponível em: www.ifi.unicamp.br/~assis.
- [BC10] S. L. B. Boss and J. J. Caluzi. Uma breve biografia de Stephen Gray (1666-1736). *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 32:1602–1609, 2010.
- [Cos50] J. d. Costa Ribeiro. On the thermo-dielectric effect. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 22:325–348, 1950.
- [Egu25] M. Eguchi. On the permanent electret. *Philosophical Magazine*, 49:178–180, 1925. Disponível em: <http://rimstar.org/materials/electrets/Mototaro-Eguchi1.pdf>.

- [Fuk00] E. Fukada. History and recent progress in piezoelectric polymers. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 47:1277–1290, 2000. Disponível em: <http://courses.engr.illinois.edu/AE598-MM/files>.
- [GF] R. Guedes and T. Franken. Bernhard Gross. *Centro de História Contemporânea da Fundação Getúlio Vargas*. Disponível em: <http://www.canalciencia.ibict.br/notaveis/txt.php?id=50>.
- [GFD45] B. Gross and L. Ferreira Denard. On permanent charges in solid dielectrics. *Physical Review*, 67:253–259, 1945.
- [Gra 2] S. Gray. Farther account of his experiments concerning electricity. *Philosophical Transactions*, 37:285–291, 1731-2.
- [Gro53] B. Gross. Teoria do efeito termo-dielétrico. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 25:175, 1953. Disponível em: http://www.cle.unicamp.br/arquivoshistoricos/p_fjcr_gross_ftd.pdf.
- [Gro54] B. Gross. Theory of thermodielectric effect. *Physical Review*, 94:1545–1551, 1954.
- [Gue03] M. V. Guedes. O Fenómeno Eléctrico: algumas ideias e experiências durante o século XVIII. 2003. FEUP - Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto. Disponível em: <http://paginas.fe.up.pt/histel/FenomEl.pdf>.
- [Hea92] O. Heaviside. *Electrical Papers*, volume 1. Chelsea, New York, 1892. Disponível em: <http://www.archive.org/stream/electricalpapers01heavuoft>.
- [Hic] B. Hickman. Lichtenberg figures. Disponível em: <http://www.capturedlightning.com/frames/lichtenbergs.html>.
- [Jon10] T. B. Jones. Electrophorus and accessories. 2010. Disponível em: <http://www.ece.rochester.edu/~jones/demos/electrophorus.html>.

- [JW80] O. D. Jefimenko and D. Walker. Electrets. *The Physics Teacher*, 18:651–659, 1980.
- [Koh] Kohlrausch, Rudolf Hermann Arndt. Fonte: [http://en.wikisource.org/wiki/The_Encyclopedia_Americana_\(1920\)/Kohlrausch,_Rudolf_Hermann_Arndt](http://en.wikisource.org/wiki/The_Encyclopedia_Americana_(1920)/Kohlrausch,_Rudolf_Hermann_Arndt).
- [LF00] G. F. Leal Ferreira. Há 50 anos: o efeito Costa Ribeiro. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 22:434–443, 2000.
- [LF02] G. F. Leal Ferreira. A importância do físico Bernhard Gross (1905-2002). *Jornal da Ciência*, E-mail 1968(05 de fevereiro), 2002. Disponível em: <http://www.jornaldaciencia.org.br/Detailhe.jsp?id=570>.
- [Lic] G. C. Lichtenberg. Sechs Originalarbeiten Lichtenbergs über die elektrischen Figuren. Disponível em: <http://www.rzuser.uni-heidelberg.de/~gj7/lichtenberg.pdf>.
- [Mas99] S. Mascarenhas. Bernhard Gross and his contribution to physics in Brazil. *Brazilian Journal of Physics*, 29:217–219, 1999.
- [Mat] Carlo Matteucci. Fonte: <http://www.newadvent.org/cathen/10056a.htm>.
- [Meh] E. L. M. Mehl. Circuitos Elétricos I - Capítulo 1: Fundamentos da Eletricidade. Disponível em: <http://www.eletrica.ufpr.br/mehl/downloads/circuitos-cap1.pdf>.
- [Mic] Fonte: http://img.alibaba.com/photo/10307543/Electret_Condenser_Microphone.jpg.
- [Mot] S. Motoyama. Telefonia - Capítulo 2: O Aparelho Telefônico. Disponível em: <http://www.dt.fee.unicamp.br/~motoyama/ee981/apostilas/Capitulo2.pdf>.
- [Mot04] S. Motoyama. *Prelúdio para uma História: Ciência e Tecnologia no Brasil*. Edusp, São Paulo, 2004.
- [Mou07] M. Moura. A física do mundo presente. *Pesquisa Fapesp*, 137, julho de 2007. Disponível em: <http://www.revistapesquisa.fapesp.br>.

- [Net] L. F. Netto. Eletreto (o ímã da eletrostática). Disponível em: http://www.feiradeciencias.com.br/sala11/11_T02.asp.
- [Roy] The Royal Society. Fonte: <http://www.royalsoc.ac.uk> (base de dados *Sackler Archive Resource*).
- [Ses80] G. M. Sessler. Electrets. *Topics in Applied Physics*, 33:1–12, 1980.
- [Ses99] G. M. Sessler. Bernhard Gross and the evolution of modern electret research. *Brazilian Journal of Physics*, 29:220–225, 1999.
- [Tin06] J. Tinoco. Costa Ribeiro lembrado. *Instituto Ciência Hoje*, 2006. Disponível em: <http://www.cienciahoje.uol.com.br/noticias/historia-da-ciencia-e-epistemologia/costa-ribeiro-lembrado/>.
- [Vol] Eletróforo de Volta. Fonte: <http://www.fis.unb.br/exper/prolego/eletro/eletrofo.htm>.