
A EVOLUÇÃO DAS IDÉIAS RELACIONADAS AOS FENÔMENOS TÉRMICOS⁺ E ELÉTRICOS: ALGUMAS SIMILARIDADES⁺

José Lourenço Cindra

Odete Pacubi Baiarl Teixeira

Departamento de Física e Química – Universidade Estadual Paulista

Guaratinguetá - SP

Resumo

Este artigo procura realizar algumas considerações acerca das idéias relacionadas aos fenômenos térmicos e elétricos no que tange ao contexto histórico e, a seguir, aponta características que poderiam apresentar determinadas similaridades em ambos processos de construção. Neste sentido, acredita-se que o conhecimento, por parte do professor, das similaridades presentes nos dois campos de conhecimento poderia subsidiar a elaboração de atividades mediadoras dentro do contexto histórico visando o estabelecimento de relações entre o conhecimento do cientista e as concepções dos alunos, podendo assim propiciar relevantes discussões conceituais.

Palavras-chave: *Ensino de Física, fenômenos térmicos e elétricos, analogias.*

Abstract

In this article, some thoughts about the historical background of thermal and electric phenomena are presented. Similarities of both construction processes are also stressed. The teachers knowledge on these similarities enables them to discuss more profoundly with students. Historical facts work as bridges between the scientist's knowledge and

⁺ The evolution of ideas related to thermal and electric phenomena: some similarities

^{*} *Recebido: setembro de 2004.
Aceito: julho de 2005.*

the students' conceptions. By this way some relevant conceptual discussions are provided.

Keywords: *Physics teaching, thermal and electric phenomena, analogies.*

I. Introdução

Atualmente, parece não haver mais dúvida de que a História da Ciência é uma ferramenta que pode e deve ser utilizada como um recurso bastante enriquecedor em uma situação de ensino. Por intermédio de um enfoque histórico pode-se, em um a situação de sala de aula, levantar questões que não se manifestariam por meio de outros enfoques e que são capazes de revelar lacunas no domínio conceitual construído pelos alunos. Essas questões acabam provocando desequilíbrios, podendo tornar-se elementos importantes para o entendimento dos conceitos, na medida em que levam em consideração causas, motivos, coerências e incongruências.

Alguns trabalhos, como os realizados por Gagliardi e Giordan (1986), Gagliardi (1988), Saltiel e Viennot (1985), Rosmorduc (1987) e Lacombe (1987), fazem uma abordagem neste sentido. Ainda que não desconhecendo que existe uma diferenciação entre a construção do conhecimento realizada pelos sujeitos e aquela realizada pelos cientistas, podemos estabelecer alguns paralelos entre ambas as construções (PIAGET; GARCIA, 1987).

Um dos motivos por que não pode haver um paralelismo estrito entre as concepções espontâneas dos alunos e as concepções dos cientistas em épocas pretéritas das ciências deve-se, em parte, à seguinte consideração:

Talvez o mais importante a compreender é o fato de que em cada momento [histórico] os cientistas eram coerentes, quer dizer, não pensavam em “termos atuais”, senão que utilizavam as ferramentas lógicas de seu meio e de sua época (GAGLIARDI; GIORDAN, 1986, p. 257).

Se aceitarmos que a Ciência se move no sentido da passagem de generalizações de natureza qualitativa para uma abordagem quantitativa mais rigorosa, podemos compreender porque, por exemplo, o conceito científico de temperatura só pôde surgir em um estágio ulterior do conhecimento científico. Segundo o esquema conceitual de Halbwachs (1977), a História da Ciência – e a da Física, em particular – é vista como uma sucessão de paradigmas explicativos, em que o modo de entender a eficácia da categoria de causalidade é alterado ao longo da História, acarretando no surgimento de novos modelos explicativos.

Nesse sentido, é natural que quando analisamos o processo de construção histórica de determinados conceitos observamos que ao longo do tempo alguns paradigmas apresentam certas similaridades. Por outro lado, as analogias podem desempenhar um papel importante na construção dos modelos científicos. A analogia deve ser entendida como uma descrição, um argumento ou uma explicação baseada em uma comparação sistemática de algo com outro já conhecido (REBER, 1985).

Especificamente, nesse trabalho nos restringiremos a analisar determinadas analogias existentes entre a terminologia e a eletricidade. Partimos de explicações no contexto da História da Física, visando a destacar algumas analogias presentes nestes dois campos de conhecimento que pudessem ser utilizadas pelo professor em sala de aula, uma vez que elas poderiam enriquecer discussões conceituais.

II. As idéias relacionadas aos fenômenos térmicos: algumas considerações.

Pelo fato de ter um caráter social imbricado, as noções relacionadas ao calor acabam sendo inatas ao *homo erectus* (que viveu há aproximadamente 700.000 anos), quando houve o início do domínio do fogo como fonte de calor. Contudo, a combustão, analisada como um processo de transformação, foi satisfatoriamente interpretada somente no final do século XVIII.

No período anterior às formulações da teoria mecânica do calor, proliferaram diversas hipóteses no tocante à natureza do calor, tais como, o “fogo como o produtor de calor” (HOPPE, 1928, p. 276-7) e o “calor como a causa da evolução do universo” (BERNAL, 1976). Heráclito de Éfeso (535-470 a.C.) considerava o fogo como o elemento responsável pelas transformações do universo: todas as coisas são permutas do fogo, disse ele. Platão (427-347 a.C.) defendia a hipótese de que em geral o movimento produz o calor. Aristóteles (384-322 a.C.) aceitava que o fogo estava contido em todas as substâncias combustíveis, e delas se desprendia sob a forma de chamas. A partir desse período, nota-se uma preocupação em diferenciar o calor e o fogo.

Somente no século XIII, Roger Bacon (1214-1294) considerou o movimento interno das partículas do corpo como sendo a causa do calor, na medida em que: “os esforços contrários das partículas constituem o calor” (HOPPE, op. cit., p. 278), ainda que não estivesse muito claro em suas palavras se é o calor que é movimento ou se o movimento é que produz o calor.

Johannes Kepler (1571-1630) e Galileu Galilei (1564-1642), apesar de viverem na mesma época, tinham posições contrárias quanto à idéia de calor. Kepler compartilhava das idéias de Bacon, afirmando que o calor era um movimento das partes dos corpos. Galileu, a exemplo de Bernardino Telesius

(1508-1588), considerava o calor como uma espécie de fluido. Por outro lado, Pierre Gassendi (1592-1655), um adepto do atomismo de Epicuro e Lucrécio, concebia duas matérias térmicas distintas: uma produzindo calor, outra frio. Idéias semelhantes haviam sido expressas muito antes por Lucrécio (95-55 a.C.), identificando na sua obra *De Rerum Natura* duas substâncias distintas: o calor que está no Sol e o frio que está nos rios.

No século XVI, as explicações relacionadas ao aumento de peso dos produtos resultantes de determinadas reações de combustão, particularmente a oxidação, estavam centradas na “leveza positiva” atribuída aos espíritos. Biringuccio (1480-1539), afirmava que a “parte espiritual” dos corpos podia ter peso negativo, entendido como uma “leveza positiva”, segundo sua obra “*Pirotechnic*”, publicada postumamente em 1540. No século XVII prevalecia a idéia de uma substância misteriosa e imponderável denominada “termógeno” que emanava do fogo. O “termógeno” entrava e saía do corpo, na medida em que este era aquecido ou esfriado.

O mistério que cercava as explicações era devido ao fato de, nesta época, não se tinha o conhecimento da composição do ar nem do papel do oxigênio na reação química, e, conseqüentemente a função do comburente na combustão.

Com o desenvolvimento dos trabalhos relacionados com as reações químicas no final do século XVII, envolvendo a inflamabilidade, a volatilidade e a fixidez, cada uma destas características é atribuída aos elementos enxofre, mercúrio e sal, respectivamente. Começa a ser pensado um “princípio do fogo”, como base de todos esses fenômenos. Segundo Johann Joachim Becker (1635-1682), os corpos comburentes continham sulfura, e quando em combustão, esse se separaria dos dois outros elementos. Ernst Georg Stahl (1660-1734), discípulo de Becker, tentando uma forma de explicação para o comportamento de qualquer substância, denomina esse princípio de “flogisto”. Flogisto é um vocábulo de origem grega, que significa “deixar queimar”. Segundo essa hipótese, as substâncias combustíveis são ricas em flogisto.

Para Herman Boerhaave (1668-1738) e Pieter van Musschenbroeck (1632-1761), no estado de equilíbrio térmico, o calor se distribuía uniformemente entre os corpos.

Francis Bacon (1561-1626) considerava o calor não como um movimento de expansão, mas como um movimento vibratório das partículas de um corpo; idéia essa também compartilhada por Robert Boyle (1627-1691), que entendia o calor como um estado de movimento das moléculas (HOPPE, p. 278). Isaac Newton (1642-1727) considerava o calor como sendo uma oscilação do éter, que partiria dos corpos celestes e penetraria nos corpos.

Daniel Bernoulli (1700-1782) e Leonhard Euler (1707-1783) compartilhavam do mesmo ponto de vista. Bernoulli descreveu um modelo de gás que tinha como base uma hipótese cinética para suas partículas. Pelo menos em

Bernoulli aparece bem nítida a correspondência entre uma concepção atomista da matéria e a do calor como movimento.

Benjamin Thompson (1753-1814), também conhecido como Conde Rumford, como superintendente da perfuração de canhões para o arsenal da Bavária, percebeu que, neste processo de perfuração, era gerada uma grande quantidade de calor. Tentando elucidar a natureza do calor, ele fez uma série de experimentos controlados medindo a quantidade de calor gerado e chegou à conclusão de que o calor produzido pelo atrito das brocas com o metal não seria oriundo da passagem do calor de latente para sensível, como queriam fazer crer os adeptos da teoria do calórico. A quantidade de calor produzida parecia ser inesgotável e estar diretamente relacionada com o movimento dos cavalos que moviam as brocas. Portanto, o calor deveria ser uma forma de movimento. Humphry Davy (1778-1829) realiza e interpreta alguns experimentos, concluindo que o calor seria uma espécie de movimento repulsivo (MAGIE, 1935, p. 168). Por outro lado, Fox (1971, p. 4) afirma que nos anos de 1820 não ocorreu um rompimento brusco da teoria do calórico, apesar das experiências espetaculares de Rumford e de Davy. A teoria do calórico somente foi abandonada por volta de 1850.

Nos séculos XVI, XVII e XVIII, com o refinamento na técnica de construção de termômetros, um grande avanço é observado, principalmente quanto ao entendimento de vários aspectos relacionados às propriedades térmicas dos materiais e a constatação da dilatação praticamente regular dos gases. Partindo do princípio de que havia uma linearidade entre o calor fornecido ao corpo e a variação do grau de calor, que era traduzido pela variação da coluna termométrica, poderia parecer à primeira vista que graus de calor (temperatura) e calor fossem pelo menos proporcionais entre si.

Somente em meados do século XVIII, com o desenvolvimento da calorimetria e a utilização da condição de equilíbrio térmico para diferentes corpos comparados com um corpo de prova, que seria um termômetro, foi possível superar concepções incorretas no tocante à capacidade calorífica dos corpos, mais precisamente, àquelas relacionadas à noção de calor específico e de capacidade térmica de um corpo. Aceitava-se, nessa época, que as quantidades de calor requeridas para aumentar o calor de diferentes corpos em um mesmo número de graus deveriam ser diretamente proporcionais à quantidade de matéria nesses corpos, isto é, à sua densidade e volume. Posteriormente, Boerhaave e Musschenbroek, na tentativa de explicar algumas experiências caloríficas, concluíram indevidamente que o calor se distribuía uniformemente entre os corpos em equilíbrio térmico. De acordo com essa concepção, o calor recebido por um corpo era simplesmente proporcional ao seu volume.

Embora o conceito de temperatura já tivesse sido introduzido por Samuel Klingensjerna (1698-1765), que em 1729 formulou a hipótese de que havia diferença entre grau e quantidade de calor (HOPPE, 1928, p. 246), esta questão

parece que só foi resolvida satisfatoriamente por Joseph Black (1728-1799), por volta de 1760, que por meio de experiências cuidadosas, elaborou três importantes conclusões: o calor não se distribui sobre diferentes corpos de modo proporcional às suas respectivas densidades; o calor não se distribuía uniformemente em todo o volume ocupado por diferentes corpos; e, no equilíbrio térmico, a grandeza uniforme comum a todos os pontos ocupados por diferentes corpos é a temperatura. Black também introduz: o conceito de calor latente, em 1756; o conceito de capacidade térmica, em 1760; o conceito de calor latente de fusão, em 1761. O conceito de calor específico foi, em 1772, introduzido por Johan Carl Wilcke (1732-1796). Ressaltamos que Black fez suas pesquisas acreditando no calor como uma espécie de fluido, uma substância imponderável com a tendência a passar dos corpos mais quentes para os mais frios.

Por volta de 1783, Antoine Lavoisier (1743-1794) e Pierre Laplace (1749-1827) constroem o primeiro calorímetro de gelo e com isso conseguem medir o calor específico de vários materiais. Eles inclusive mostraram que os calores específicos de cada substância não eram constantes, já que variavam com a temperatura. Foi Lavoisier que introduziu o termo calórico para designar a substância do calor. Lavoisier e Laplace, em fins do século XVIII, chegaram a afirmar que os estudiosos divergem quanto à natureza do calor: alguns o tomam como um fluido, outros consideram o calor como um movimento invisível das moléculas dos corpos.

Para os adeptos da teoria substancialista do calor, o calórico podia ser descrito por meio de cinco postulados básicos descritos por Roller (1950): o calórico é um fluido elástico e auto-repulsivo; as partículas do calórico são atraídas pelas partículas da matéria comum; o calórico é indestrutível e não pode ser criado; o calórico pode ser sensível ou latente; e, o calórico não tem peso apreciável.

O funcionamento da máquina a vapor podia, até certo ponto, ser explicado pela teoria substancialista do calor. Diversos fenômenos térmicos conhecidos na época, como as mudanças de estado das substâncias e a temperatura de equilíbrio nas misturas, também podiam muito bem ser descritos por essa teoria. Isso fez com que essa teoria se tornasse muito poderosa e com grande poder explicativo, perdurando por muito tempo. Sadi Carnot (1796-1832) procurou dar uma explicação teórica adequada para o funcionamento da máquina a vapor. Mostrou que, para a produção de trabalho a partir do calor, qualquer máquina térmica tem que ter uma fonte quente e uma fonte fria. Ele também mostrou que a potência motriz máxima da máquina depende exclusivamente das temperaturas das respectivas fontes. Na concepção de Carnot, a realização de trabalho na máquina a vapor era análoga ao funcionamento de uma roda d'água, ou seja, o calórico ao passar de uma fonte quente para uma fonte fria realizava trabalho, da mesma forma que a água ao cair de um nível mais alto para um nível mais baixo fazia mover uma roda hidráulica, logo, não havia consumo de calor. O calor era algo que se conservava. No final de sua vida, Carnot apresenta a idéia da proporcionalidade

entre calor e trabalho, transformado um no outro. No trabalho de Carnot de 1824 já estava implícito o princípio de aumento de entropia. Entretanto, foi Clausius (1822-1888) quem, em 1865, conseguiu enunciar este princípio sob forma mais geral e matemática, introduzindo inclusive o vocábulo entropia na ciência da termodinâmica.

Ainda que, até por volta de meados do século XIX, a teoria substancialista do calor continuasse a ter grande aceitação para muitos cientistas, alguns deles defendiam a teoria do calor-movimento. Rumford, supervisionando a fabricação de canhões, observou que os resíduos de ferro, que eram produzidos no processo de perfuração do metal, alcançavam temperaturas muito altas, e o calor obtido por esse processo parecia não se esgotar nunca. Isso o levava a acreditar que o calor não poderia ser uma substância, mas sim *movimento*.

Em 1822, Joseph Fourier (1786-1830) publicava um importante trabalho sobre o calor, sem, contudo fazer nenhuma hipótese quanto à sua natureza. Tratava-se da “*Teoria Analítica do Calor*” (*Théorie Analytique de la Chaleur*), na qual a condução do calor era discutida com o emprego de uma equação diferencial em derivadas parciais.

Sir Humphry Davy (1778-1829), discípulo de Rumford, também realizou experimentos envolvendo a fricção. Utilizou blocos de gelo a zero grau centígrado e, ao friccioná-los, verificou que o atrito não diminui a capacidade dos corpos para o calor. A fricção pode induzir algumas mudanças nos corpos, possibilitando-os então a atrair o calor dos corpos em contato, ou seja, a causa do surgimento do calor pode ser definida como um movimento peculiar, provavelmente uma vibração das partículas dos corpos tendendo separá-las. Esse movimento pode ser chamado de um movimento repulsivo (MAGIE, 1935, p. 165).

Apesar de ser adepto da teoria do calórico, Gay Lussac (1778-1850), em 1802, realizou estudos sobre a expansão dos gases, concluindo que todos os gases e vapor se expandem igualmente (HOPPE, 1928, p. 283). Esses estudos tiveram um papel decisivo para Julius Robert Mayer (1814-1878), pois foi a partir das experiências de Gay-Lussac sobre expansão e compressão adiabáticas dos gases que Mayer conclui que o princípio da conservação das forças-vivas (conservação da energia) deveria englobar também os fenômenos térmicos, e não apenas os mecânicos, como até então era aceito (GIBERT, 1982, p. 233; NUSSENZVEIG, 2002, cap. 8).

O trabalho de Pierre Louis Dulong (1785-1838), em 1829, sobre os calores específicos molares dos gases a pressão constante e a volume constante, foi também de grande utilidade para Mayer. Dulong e Alexis Petit (1791-1820) já haviam anteriormente obtido a lei empírica de Dulong-Petit, segundo a qual o produto do calor específico de cada átomo de um sólido pelo seu peso atômico (calor específico molar) é constante e é aproximadamente igual a 6 cal/mol °C.

Mayer publica em 1842 um artigo, inicialmente de pouca repercussão por apresentar um tratamento muito qualitativo, que, no entanto, fazia referência a

um cálculo do *equivalente mecânico do calor*. Ele aparentemente elaborou o seguinte raciocínio: a variação de energia interna do gás sob compressão é igual ao trabalho realizado para comprimi-lo. Quanto à afirmação feita por Mayer sobre a relação entre a queda de um corpo da altura de 365 m e o aquecimento de um peso igual de água de 0 a 1^oC, parece tratar-se de uma inferência com base em um raciocínio analógico, na medida em que havia uma certa convicção de que, neste caso, a variação da energia potencial devia necessariamente se manifestar no aquecimento da água. Posteriormente, depois dos trabalhos mais sistematizados feitos por Joule sobre a relação entre movimento e calor, as idéias apresentadas por Mayer foram consideradas de grande importância, sendo então o artigo republicado em 1862.

Por intermédio do breve histórico sobre as idéias relacionadas aos fenômenos térmicos que acabamos de tecer, podemos estruturar quatro diferentes abordagens: “as explicações filosóficas sobre a natureza do calor” (da Antigüidade até por volta de 1600), “a teoria do flogisto” (das últimas décadas do século XVII ao fim do século XVIII), “a teoria do calórico” (fim do século XVIII ao princípio do século XIX), “a teoria cinética do calor” (a partir de meados do século XIX).

A partir do estabelecimento da teoria mecânica do calor, a temperatura e o calor como forma de energia foram tratados como grandezas escalares, ou seja, não tinham componentes dependentes da direção e do sentido.

III. As idéias relacionadas aos fenômenos elétricos: algumas considerações

As primeiras observações de fenômenos elétricos provavelmente ocorreram na Grécia Antiga. A história registra o nome de Tales de Mileto (640-546 a.C.) como sendo possivelmente o primeiro a constatar que o âmbar, ao ser friccionado, adquiria uma propriedade peculiar que era a de atrair corpos leves. Tales também teria notado a atração do ferro pelo ímã. De modo semelhante, Teofrasto (372-288 a.C.), discípulo de Aristóteles e seu sucessor como chefe do Liceu, observa que diferentes minerais possuíam a mesma propriedade do âmbar. Segundo Rosmorduc (1988, p. 87), parece ter sido Jean Philoponus quem pela primeira vez reconheceu que o mesmo ímã possui a propriedade de atrair e repelir o ferro. O matemático Girolamo Cardano (1501-1576), em 1550, distingue os efeitos do âmbar daqueles do magnetismo. Os fenômenos elétricos e magnéticos foram, em geral, durante séculos tratados separadamente.

Em 1600, William Gilbert (1540-1603), médico da rainha da Inglaterra, Elisabeth I, publicava o tratado “Do ímã, dos corpos magnéticos e do grande ímã: a Terra”. O trabalho de Gilbert deu origem ao enfoque científico dos fenômenos magnéticos em geral e do magnetismo terrestre em particular.

Ao longo de dois mil anos, o poder atrativo do âmbar foi considerado uma virtude peculiar àquela substância. Gilbert notou que esse ponto de vista estava errado. Ele mostrou que o mesmo efeito podia ser observado por meio da fricção de corpos de toda uma classe de substâncias. Outra contribuição de Gilbert foi ter introduzido no estudo da eletricidade o vocábulo “elétrico”, bem como os seus derivados, tendo em vista que, em grego, o âmbar era chamado de *elektrón*. Depois de Gilbert, o estudo dos fenômenos elétricos começava a se desenvolver, embora ainda muito devagar. Basta dizer que, somente em 1672, Otto von Guericke, fazendo girar rapidamente uma esfera de enxofre friccionada por um retalho de lã, descobriria o princípio de funcionamento das “máquinas eletrostáticas”. Em 1729, Stephen Gray (1666-1736) comunicava haver descoberto o fenômeno da condutividade elétrica. Ele verificou que a eletricidade, ou o poder elétrico, como se denominava na época, podia passar de um corpo para outro. Foi também constatado que apenas uma pequena classe de substâncias, entre as quais se encontravam os metais, tinha a propriedade de agir como uma espécie de canal para o transporte do “poder elétrico”. Além disso, Stephen Gray, eletrizando do mesmo modo um cubo maciço de carvalho e um cubo oco do mesmo material, observou que o efeito elétrico era o mesmo, concluindo assim que, ao contrário do calor que se distribui por todo o volume do corpo, a eletricidade parecia ser um fenômeno de superfície.

Estes trabalhos experimentais foram importantes para o avanço do entendimento dos fenômenos elétricos e foram prosseguidos por Jean Théopille Desaguliers (1683-1744). Às substâncias capazes de transportar a virtude elétrica, Desaguliers, em 1736, deu o nome de não elétricos ou condutores (WHITTAKER, 1989, p. 42). Uma questão importante era saber até que ponto o chamado fluido elétrico era um elemento *sui generis* ou, como alguns suspeitavam, era outra manifestação do fenômeno do calor. De fato, parecia haver semelhanças entre os fenômenos relacionados com o calor e os da eletricidade. Por outro lado, verificou-se que a eletrificação de um corpo não causava aumento apreciável de sua temperatura.

III.1 Teorias sobre eletricidade: um único fluido ou dois fluidos?

Charles-François du Fay (1698-1730), químico e superintendente dos jardins do rei da França, verificou experimentalmente que uma folha de ouro eletrizada por contato com o vidro e uma resina atritada, quando postas próximas uma da outra, eram mutuamente atraídas. Du Fay já havia observado que uma folha de ouro era repelida quando colocada próxima a um vidro eletrizado. Dessas experiências, Du Fay concluiu que deviam existir duas espécies de eletricidade, denominando-as de eletricidade “vítrea” e eletricidade “resinosa”, dando origem histórica à hipótese de dois fluidos elétricos.

Por volta de 1745, o Abade Jean-Antoine Nollet (1700-1770) passou a atribuir a origem dos fenômenos elétricos ao movimento em sentidos opostos de

duas correntes de fluidos “muito sutis e inflamáveis”. Nollet supôs que esses fluidos estivessem presentes em todos os corpos sob quaisquer circunstâncias. Quando um material dielétrico era excitado por fricção, parte do fluido escapava de seus poros, formando uma emanção ou um eflúvio. Com essa suposição, deu uma explicação para o fato de que alguns corpos são atraídos e outros repelidos por um corpo previamente eletrizado. Robert Symmer (1707-1763) foi um cientista inglês que, por volta de 1760, também passou a defender a hipótese dos dois fluidos elétricos.

Um dispositivo capaz de armazenar a eletricidade acabava de ser encontrado, é a chamada garrafa de Leyden, que seria então o primeiro capacitor, descoberto por Pieter van Musschenbroek (1692-1761), na cidade de Leyden, na Holanda, por volta de 1745. Benjamin Franklin (1706-1790), por meio de uma série de experiências, feitas com a garrafa de Leyden, pôde concluir que a carga total em qualquer sistema isolado é invariável. À eletricidade vítrea de Du Fay, Franklin deu o nome de positiva e à eletricidade resinosa ele chamou de negativa. Investigando o funcionamento de uma garrafa de Leyden, Franklin constatou que o fenômeno seria explicado, levando em conta que, neste caso, a deficiência de eletricidade em um dos lados da parede da garrafa coexiste com seu excesso do outro lado, sendo o vidro mesmo impermeável à eletricidade. Estava assim descoberto o fenômeno da “polarização dos dielétricos”.

A teoria da impermeabilidade do vidro foi generalizada por Franz Urrich Theodor Aepinus (1724-1802) e Carl Wilcke (1732-1796) sob a lei de que todos os não-condutores são impermeáveis ao fluido elétrico. Tanto Aepinus quanto Franklin eram adeptos da teoria de um único fluido elétrico. Esse fluido foi chamado por Franklin de “fogo elétrico” (CHERMAN, 2004, p. 76). Na Itália, nesse mesmo período, Giambattista Beccaria (1716-1781) torna-se um grande adepto da teoria da unicidade do fluido elétrico.

Em síntese, podemos afirmar que, por volta de 1760, duas hipóteses quanto à natureza da eletricidade coexistiam: a dos dois fluidos, oriunda dos trabalhos de Dufay, que passou a ser defendida por Nollet, R. Symmer e outros, e a de um único fluido, defendida, principalmente, por Franklin, Aepinus e Beccaria.

Por esta época, o estudo dos fenômenos elétricos já havia se desenvolvido bastante, mas ainda não se dispunha de uma lei matemática para a eletricidade. Essa lei começou a ser delineada por diversos pesquisadores. Aepinus, em 1759, publicou um trabalho sobre eletricidade e magnetismo, que pode ser considerado o primeiro tratado científico a apresentar uma abordagem matemática dos fenômenos elétricos. Joseph Priestley (1733-1804), um dos descobridores do oxigênio, concluiu que a eletricidade deve satisfazer uma lei análoga à lei do inverso do quadrado de Newton para a gravitação. Henry Cavendish, adepto da hipótese de um único fluido, esteve próximo à descoberta da lei do inverso do quadrado para a eletricidade. Como é do conhecimento de todos, a lei do inverso do quadrado veio finalmente ser estabelecida por Charles Augustin Coulomb (1736-

1806), em trabalhos publicados entre 1785 e 1789. Coulomb não aceitava a teoria de um único fluido, preferia uma hipótese de dois fluidos, ou seja, uma concepção próxima à de Du Fay.

III.2 A corrente elétrica

Em 1780, Luigi Galvani (1737-1798) observou acidentalmente um efeito semelhante a uma corrente elétrica quando dissecava uma rã. Alessandro Volta (1745-1827) compreendeu que, nas observações de Galvani, um fator decisivo para o surgimento do efeito elétrico seria o contato de dois metais diferentes. De fato, nas investigações de Galvani, as pernas da rã tinham contato com peças metálicas. Com essa hipótese, ele testou diversos dispositivos utilizando combinações de diferentes metais úmidos, chegando finalmente, em 1799, à invenção da sua pilha elétrica. Volta percebeu algumas semelhanças, mas também notou diferenças apreciáveis existentes entre a pilha elétrica e a garrafa de Leyden.

No início do século XIX, a eletricidade e o magnetismo ainda continuavam a se desenvolver separadamente. Em 1819, Oersted descobre um fenômeno curioso, que relacionava a corrente elétrica ao magnetismo. André-Marie Ampère (1775-1836) entre 1820 e 1826 faz um estudo exaustivo do eletromagnetismo. O termo “eletrodinâmica” foi introduzido no vocabulário científico por Ampère.

Em 1821, Thomas Johann Seebeck (1770-1831) constata que soldas de metais distintos formando um circuito, quando mergulhadas em recipientes a temperaturas diferentes, fazem surgir nesse circuito uma corrente – é o efeito termoelétrico (ROSMORDUC, 1988, p. 136). Os efeitos termoelétricos são as interações entre as diferenças de temperatura e o fluxo de calor, por um lado, e, por outro lado, o surgimento de voltagens e correntes. Todos os materiais, mesmo os líquidos condutores, exibem efeitos termoelétricos, porém, os efeitos são muito mais acentuados nos semicondutores que nos metais. Ressaltamos que todos os chamados efeitos termoelétricos são adicionais ao efeito Joule ordinário, expresso matematicamente por:

$$Q = Ri^2.$$

Em 1827, quer dizer, logo após a publicação dos trabalhos de Ampère, Georg S. Ohm (1787-1854), utilizando elementos termoelétricos em lugar das pilhas de Volta, estabelece a lei que rege a passagem da corrente em um circuito. Ele comparou o fluxo de eletricidade nos condutores com o fluxo de calor. Por isso, ele introduziu uma grandeza cujo comportamento nos fenômenos elétricos deveria lembrar a temperatura na teoria do calor, e outra que guardava analogia com o próprio calor. Essas grandezas seriam, respectivamente, as que hoje são conhecidas como potencial e corrente elétrica. A diferença de potencial nos condutores de eletricidade é análoga ao gradiente de temperatura nos condutores de calor. A

corrente elétrica tem certa analogia com o próprio calor, que se propaga nos condutores de calor. Estas analogias de Ohm tinham como protótipo os trabalhos de Jean Baptiste Joseph Fourier sobre a transmissão de calor, cuja obra foi publicada em 1822.

Ohm, além de introduzir o conceito de intensidade de corrente elétrica, em substituição à vaga idéia de quantidade de eletricidade, introduziu também o conceito de resistência elétrica que, para ele, dependia do tipo de material e da geometria dos condutores (ROCHA, 2002, p. 208).

Outro fato digno de menção é que Ohm reconheceu que as correntes elétricas não estão confinadas às superfícies dos condutores, mas sim que penetram em seu interior, o mesmo que faz o calor. No caso do fenômeno analisado por Ohm, a procura de analogia entre o calor e a eletricidade mostrou ser um procedimento eficaz. Neste aspecto, nota-se uma profunda diferença entre o comportamento da eletricidade estática e o da corrente.

Foi mais ou menos nesse mesmo período que Siméon Denis Poisson (1781-1840), físico matemático francês, e George Green (1793-1841), físico matemático inglês, desenvolveram a teoria dos potenciais. O conceito de potencial tornou-se muito importante para o estudo mais avançado da eletricidade. Na realidade, Poisson publicou seus trabalhos alguns anos antes de Green. Em 1813, Poisson estudou o potencial no interior de um corpo (potencial gravitacional) e esses resultados tiveram aplicação na eletrostática. Green, que recebeu influência científica de Poisson, publicou seu trabalho mais famoso sobre a teoria dos potenciais em 1828.

Em 1839, Carl Friedrich Gauss (1777-1855) expôs o teorema fundamental da eletrostática, o conhecido teorema de Gauss, relacionando a integral de fluxo do campo elétrico e as cargas no interior de uma superfície fechada por onde se efetua a integração.

Ainda que a carga elétrica seja considerada uma grandeza escalar, vários fenômenos relacionados com a eletricidade se comportam como grandezas vetoriais, ou seja, possuem componentes relacionadas à direção e ao sentido.

IV. Uma tentativa de estabelecimento de um paralelismo entre a construção das idéias relacionadas aos fenômenos térmicos e elétricos

Podemos verificar por intermédio da evolução das idéias referentes ao calor e à eletricidade, descritas anteriormente, que analogias podem ser estabelecidas entre alguns fenômenos do calor e da eletricidade, embora, haja fenômenos nos respectivos ramos da ciência que não apresentam analogias entre si.

Iremos nos restringir, neste momento, a analisar as seguintes similaridades entre os fenômenos relacionados ao calor e à eletricidade: a fricção e a condução bem como entre o potencial elétrico e a temperatura.

Desde a Grécia Antiga conhecia-se que a fricção podia produzir calor e também produzir eletricidade estática em alguns corpos. Por outro lado, por volta do início do século XVIII, era de conhecimento geral que a eletrização de um corpo não produzia aumento apreciável de sua temperatura. Nessa época ainda não se sabia com certeza se os fenômenos relacionados com o calor ou com a eletricidade eram distintos, ou se a eletricidade era simplesmente uma manifestação dos fenômenos do calor.

Gray, em 1729, teve então a idéia de verificar se não havia uma analogia ainda maior entre a eletricidade e o calor. Para isso, ele tomou dois cubos de carvalho, um maciço e outro oco, atritou-os de modo semelhante e verificou que, no tocante à manifestação da eletricidade, ambos os corpos apresentavam o mesmo comportamento. Com isso ele inferiu que, ao contrário do calor que se dissemina em toda a massa de um corpo, a eletricidade não tinha essa propriedade. Em outras palavras, parecia que a eletricidade era um fenômeno de superfície, ou que talvez fosse um efeito que se dissemina em volta do corpo, como uma espécie de atmosfera elétrica, mas que não deveria penetrar em seu interior. Desse modo, os pesquisadores foram percebendo que, embora houvesse analogias marcantes entre os fenômenos do calor e da eletricidade, essas analogias não deveriam ser levadas muito longe.

Em 1729, Stephen Gray descobria o fenômeno da condutividade elétrica. Em seguida foi constatado que os bons condutores de calor também eram bons condutores de eletricidade. Mas o que se entendia por eletricidade nessa época?

Alguns pesquisadores eram adeptos da hipótese de um único fluido elétrico, outros defendiam a hipótese da existência de dois fluidos elétricos. No que compete ao calor, era geralmente aceita a hipótese da existência de um fluido: o calórico. Portanto, mais uma analogia era estabelecida entre calor e eletricidade. Uma analogia parcial, pois, nessa época, no que diz respeito ao calor, não houve necessidade da hipótese de dois fluidos. Devido a essa recorrência aos fluidos para explicar os mais diversos efeitos e fenômenos físicos, o século XVIII, segundo Schenberg (1984, p. 69), ficou conhecido como a época dos fluidos. Seria interessante observar a utilização, nessa época, de uma determinada terminologia para designar fenômenos diversos, assim, durante muitos séculos, foi usual relacionar o “fogo” aos fenômenos do calor e da luz. Portanto, torna-se justificável a utilização da expressão “fogo elétrico” por Franklin.

A importância dos modelos mentais na história da eletricidade é salientada por Medeiros (2002, p. 356-357). Segundo o autor, Guericke concebia a eletricidade como uma virtude, uma “*vis*”. Este modelo permitia-lhe observar apenas que uma bola tocada por outra já eletrizada ganhava a referida “virtude

elétrica”, mas não conseguia imaginar nada passando entre elas e não observava assim nenhuma condução elétrica. Com Gray, a eletricidade deixa de ser vista simplesmente como uma “*virtude*” que podia ser transmitida, para ser tida como algo substancial que podia viajar através da matéria. Entretanto, como assinala Medeiros, assim como Guericke não tinha o conceito de carga elétrica, Gray não tinha o de potencial. Por isso, o comportamento idêntico dos dois cubos examinados por ele, podia sugerir-lhe que os potenciais eletrostáticos dos dois cubos eram iguais, mas nada disso ele observou: faltava-lhe a ferramenta teórica do conceito de potencial. O autor, ainda acrescenta que esta complexa imbricação teoria-observação, na análise de um fenômeno, é uma das coisas mais importantes para aqueles que ensinam Física. Afinal, de acordo com o sentido grego da palavra: “*fenômeno é aquilo que pode ser visto*” (MEDEIROS, 2002, p. 357).

Em 1749, era publicado, em Paris, o livro do físico suíço Jean Jallabert com o título: *Experiences sur l'électricité, avec quelques conjectures sur la cause de ses effects*. O autor argumentava que a eletricidade deveria ser um fluido presente em todos os corpos, mas que só produzia os efeitos típicos da eletricidade quando postos em movimento por uma causa externa (a fricção de um corpo contra outro, por exemplo). Jallabert afirmava também haver uma analogia da matéria da eletricidade com aquela do calor e da luz (JALLABERT, 2004).

Franz Karl Achard foi outro pesquisador que, em 1779, iria escrever um ensaio intitulado: *Sur l'analogie qui trouve entre la production & les effects de l'électricité & de la chaleur*, no qual fazia comentários bastante detalhados sobre as analogias entre o calor e a eletricidade sob vários aspectos.

Eu proponho provar que a produção da eletricidade é semelhante àquela que produz o calor. Os efeitos produzidos pelo fluido elétrico são análogos àqueles produzidos pelo fluido ígneo. Há uma relação exata entre a aptidão dos corpos para conduzir o fluido elétrico e sua aptidão para receber o calor (ACHARD, 1779).

Gaston Bachelard (1984, p. 48-50) apresenta algumas reflexões sobre as características mais marcantes da “garrafa de Leyden” e o perigo de querer ver analogias inexistentes entre esse instrumento e uma garrafa comum. No caso de uma garrafa comum, como aquela que usamos para colocar os líquidos, a sua capacidade para armazená-los depende de seu volume, no entanto, no caso da garrafa de Leyden, a sua capacidade no tocante à eletricidade não depende do seu volume, mas sim da área de suas armaduras. Na realidade, neste caso, não se trata de uma analogia propriamente dita, mas de uma metáfora, isso porque a metáfora pode ser entendida como uma transferência de significado que tem por base uma analogia. Bachelard em um era três características da garrafa de Leyden que parecem dignas de serem notadas:

a) É natural que a armadura interna da garrafa seja de cobre e termine em forma de gancho e a garra deve ser suspensa na barra de cobre da máquina de Ramsden. Na época já se sabia que os metais eram bons condutores de eletricidade. A máquina de Ramsden foi um dos primeiros geradores eletrostáticos, criada na segunda metade do século XVIII pelo célebre inventor britânico Jesse Ramsden (1735 -1800). Esses geradores eram utilizados para carregar as garrafas de Leyden.

b) A garrafa de Leyden não é uma garrafa e não tem absolutamente nenhuma das funções da garrafa. A capacidade da garrafa de Leyden não é a capacidade de um recipiente. Ela não contém eletricidade em função do seu tamanho.

c) Quanto maior for a garrafa de Leyden, mais forte, com a mesma máquina de Ramsden, o choque elétrico! Quanto mais fino é o vidro, maior é a capacidade. Não podemos, no entanto, servir-nos de vidros demasiadamente finos porque a descarga elétrica poderia atravessá-los. A própria matéria do vidro influi na intensidade do fenômeno elétrico.

Podemos acrescentar que a capacidade calorífica de um corpo é proporcional ao volume desse corpo enquanto que a capacitância elétrica é proporcional à área de suas placas e inversamente proporcional à distância entre elas.

Um exemplo em que a analogia entre fenômenos térmicos e elétricos desempenhou um grande papel foi a lei de Ohm. Segundo Whittaker (1989), Ohm, para estabelecer a lei que leva seu nome, procurou encontrar uma analogia entre a teoria de Fourier sobre condutividade de calor em um sólido e a corrente elétrica em um condutor. Notou que a corrente era análoga ao calor transmitido e a condutividade elétrica análoga à condutividade térmica. Faltava uma grandeza análoga ao gradiente de temperatura. Essa grandeza foi logo encontrada por ele: “a força eletromotiva”, a tensão ou diferença de potencial.

Parece também haver uma analogia entre temperatura e potencial elétrico no sentido de que o potencial elétrico, no equilíbrio eletrostático, tem um mesmo valor em toda a superfície, enquanto, no equilíbrio térmico, a temperatura é a grandeza que se mantém constante em todo o volume do corpo.

Exemplo: Tomemos duas esferas carregadas a um potencial V_1 e V_2 , respectivamente. Quando essas esferas são postas em comunicação por meio de um condutor, cargas irão fluir da esfera de potencial mais alto para a de potencial mais baixo, até que ambas as esferas atinjam o mesmo potencial. No fim desse processo, não podemos afirmar que ambas as esferas têm a mesma carga elétrica. Vejamos agora um fenômeno análogo referente ao calor e à temperatura. Tomemos duas esferas com temperaturas iniciais T_1 e T_2 . Se estas duas esferas são postas em contato, o calor irá passar de uma esfera para outra, até que elas adquiram a mesma temperatura final. No fim deste processo, não podemos afirmar que a energia

interna destas esferas seja a mesma, mas podemos afirmar que a temperatura é a mesma.

Portanto, deve haver uma analogia entre calor (energia interna) e carga elétrica, assim como há uma analogia entre potencial eletrostático e temperatura.

Em calorimetria temos a relação $Q = C\Delta T$, onde C é a capacidade térmica do corpo, ΔT a variação de temperatura e Q a quantidade de calor recebida ou cedida pelo corpo. Na eletrostática, temos a relação $q = C\Delta V$, onde C é a capacitância do sistema, ΔV a diferença de potencial e q a carga recebida ou perdida pelo sistema. Nesse exemplo existe uma analogia muito acentuada entre as duas classes de fenômenos.

Embora haja, de fato, algumas analogias entre os fenômenos da eletricidade e o calor, elas não podem ser levadas muito longe, principalmente por algumas razões, desconhecidas dos primeiros pesquisadores dos fenômenos elétricos e dos fenômenos do calor, que decorrem do fato de que o calor é uma forma de energia, mas a carga elétrica não o é. Portanto, quando falamos em analogia entre corrente elétrica e fluxo de calor em um sólido, esta imagem seria realmente adequada, apenas segundo a concepção do calor como substância e não com a concepção do calor como energia e da eletricidade como uma substância.

Maxwell em seu tratado intitulado *A treatise on electricity & magnetism*, de 1873, tece comentários sobre duas diferenças marcantes entre o calor e a eletricidade, que vão além da dicotomia entre energia e substância, em sua forma mais evidente:

a) Há conservação da carga elétrica, mas não há conservação do calor. O calor pode ser aumentado ou diminuído no interior de um volume dado sem a passagem dele para dentro ou para fora desse volume, a eletricidade não. Isto ocorre porque o calor é uma forma de energia e pode ser gerado ou destruído por processos internos ao volume dado. Já a eletricidade, ou melhor, os portadores da eletricidade não são energia, mas talvez uma substância *sui generis*.

b) Outra razão por que a eletricidade, ou melhor, as cargas elétricas não podem ser energia, como o calor o é, consiste no fato de que a energia pode ser expressa como o produto da carga elétrica pelo potencial:

$$E = eq$$

Maxwell acrescenta então que é impossível serem a eletricidade e a energia grandezas de mesma natureza, pois a eletricidade é apenas um dos fatores da energia, o outro fator é o potencial.

Maxwell ainda escreve que:

a analogia entre a teoria da condução da eletricidade e a do calor é à primeira vista quase completa. Se tomarmos dois sistemas geometricamente similares, e tais que a condutividade do calor em qualquer parte do primeiro seja proporcional à

condutividade da eletricidade em qualquer parte correspondente do segundo, e se também fizermos a temperatura em qualquer parte do primeiro proporcional ao potencial elétrico nas partes correspondentes do segundo, então o fluxo de calor através de qualquer área do primeiro será proporcional ao fluxo de eletricidade através da área correspondente do segundo (MAXWELL, 1954, p. 364).

Entretanto, Maxwell faz uma interessante ressalva, afirmando que existe uma diferença marcante entre os fenômenos da eletricidade e os do calor e justifica esta asserção por intermédio de um experimento imaginário, conforme descrito a seguir:

Suspenda, por um fio de seda, um corpo condutor dentro de um vaso condutor fechado e carregue o vaso com eletricidade. O potencial do vaso e de tudo que nele estiver contido será imediatamente aumentado, mas ainda que o vaso seja eletrizado durante muito tempo, e ainda que a eletrização seja muito potente, quer o corpo entre ou não entre em contato com o interior do vaso, nenhum sinal de eletrização irá aparecer dentro do vaso, nem o corpo em seu interior irá manifestar qualquer efeito elétrico. Mas, se o vaso for aquecido até uma alta temperatura, o corpo dentro dele irá ser aquecido até a mesma temperatura, não instantaneamente, mas depois de um tempo considerável, e se ele é retirado do vaso, veremos que ele está aquecido (MAXWELL, 1954, p. 365).

Maxwell esclarece então que a diferença entre estes fenômenos consiste no fato de que os corpos são capazes de absorver e emitir calor, mas não têm uma propriedade correspondente no que concerne à eletricidade. Para aumentarmos a temperatura de um corpo temos necessariamente que fornecer calor ao corpo, já o potencial de um corpo pode ser elevado sem fornecer eletricidade ao corpo, como vimos no exemplo citado. Isso ocorre quando o processo de eletrização é por indução.

É bom lembrar que Maxwell escreveu isso alguns anos antes da descoberta do elétron, a partícula portadora de eletricidade negativa. O próton, a partícula portadora de eletricidade positiva, iria ser descoberto ainda mais tarde. Na época de Maxwell (décadas de sessenta e setenta do século XIX) reinava ainda uma grande incerteza no que diz respeito à natureza da eletricidade e da corrente elétrica em particular. Maxwell, em seu *Treatise*, argumenta que a eletricidade deve ser considerada uma grandeza física. Não podemos, entretanto, muito apressadamente supor que ela seja ou não seja uma substância, ou que seja ou não seja uma forma

de energia. Maxwell ainda ressalta que já havia sido confirmada a conservação das cargas em sistemas fechados, e nada mais. Ao contrário do calor, que pode ser gerado ou destruído no interior de uma superfície fechada, sem, contudo, haver sua passagem através desta superfície, a eletricidade só pode ser aumentada ou diminuída pela passagem de carga através desta superfície.

Maxwell também acrescenta que há outro motivo por que não podemos afirmar que a eletricidade seja, como o calor o é, uma forma de energia. Basta ver que no caso eletrostático a energia potencial U é dada pelo produto da carga elétrica e pelo potencial φ , isto é, $U = e\varphi$. Logo, a energia e a eletricidade não podem ser grandezas da mesma categoria, visto que o potencial não é uma grandeza adimensional.

Podemos acrescentar que, após a descoberta das partículas elementares portadoras de eletricidades negativa e positiva, o elétron e o próton respectivamente, a natureza da eletricidade ficou um pouco mais clara do que era na época de Maxwell. Foi também constatado que o elétron tem massa quase duas mil vezes menor que a do próton, e que há uma terceira partícula desprovida de carga elétrica, o nêutron, de massa aproximadamente igual à do próton. Em suma, ficou estabelecido que toda matéria é constituída basicamente dessas três partículas.

Mas, e a pergunta “o que é mesmo a eletricidade”? Ela é substância ou energia? Essa questão, conforme era feita no século XIX, parece ter perdido sua razão de ser. Que a eletricidade não é uma forma de energia, os argumentos de Maxwell já esclareceram. Podemos também concluir que ela não é uma substância específica, pois todas as partículas portadoras ou não de eletricidade possuem massa. Além disso, os átomos de toda substância são constituídos basicamente de prótons, elétrons e nêutrons ou, no caso do hidrogênio, de prótons e elétrons. A carga total do átomo é sempre nula, exceto quando ele está ionizado. O próton tem uma massa considerável em relação ao elétron, e o nêutron, que não tem carga, tem massa da ordem de grandeza da do próton. Isso nos leva a crer que seguramente a carga elétrica não é uma substância *sui generis* disseminada nos interstícios das substâncias ordinárias, como ainda poderia ser pensado no século XIX, mas um estado da substância, pois o próton e o elétron são partículas constituintes da matéria que possuem cargas elétricas, positiva e negativa, respectivamente. Entretanto, não pretendemos, no âmbito deste artigo, discorrer mais sobre as nuances deste assunto. Se assim procedêssemos, teríamos que tratar de aspectos da Mecânica Quântica e da Teoria da Relatividade Restrita; com isso, iríamos ultrapassar seu objetivo principal, que é o de tratar de algumas analogias entre calor e eletricidade, restringindo-nos aos aspectos clássicos da questão.

Na tabela 1, sistematizamos as principais similaridades verificadas anteriormente entre grandezas relacionadas aos fenômenos térmicos e aos fenômenos elétricos.

Tabela 1

Grandezas	
Fenômenos térmicos	Fenômenos elétricos
$Q = C \Delta T$	$q = C \Delta V$
Q é a quantidade de calor recebida ou cedida pelo corpo.	q é a carga recebida ou perdida pelo sistema.
C é a capacidade térmica do corpo.	C é a capacitância do sistema.
ΔT é a variação da temperatura.	ΔV é a diferença de potencial.
Calor é uma forma de energia.	Carga elétrica é entendida como uma propriedade da matéria.
Fluxo de calor (Φ): $\Phi = Q/\Delta t$	Fluxo de carga ou corrente elétrica (i): $i = q/\Delta t$

Vimos, ao longo deste artigo que, de fato, diversas analogias foram observadas entre os fenômenos do calor e da eletricidade. Entretanto, em alguns casos importantes, há uma falta de analogia entre fenômenos desses dois ramos da ciência, como por exemplo no caso de Stephen Gray, que verificou que, diferentemente do calor que se propaga para o interior do corpo, a eletricidade não deveria penetrar no interior do corpo, sendo possivelmente um fenômeno de superfície. Ainda mais, poderíamos ressaltar que enquanto as grandezas utilizadas na termologia e na termodinâmica como um todo são grandezas escalares, o estudo da eletricidade e do magnetismo está repleto de grandezas vetoriais. A estrutura distinta dos dois campos da ciência já é um indício de que não se pode ir muito longe na busca de analogias entre as grandezas correspondentes aos dois domínios supra citados. Contudo, a busca de analogias entre os fenômenos elétricos e o fenômeno do calor serviu de heurística positiva para muitos cientistas, sobretudo para Stephen Gray, para Georg Ohm e até mesmo para o famoso James Clerk Maxwell, que elaborou uma síntese entre os fenômenos elétricos, magnéticos e luminosos.

Referências

ACHARD, F. K. Sur l'analogie Qui se trouve entre la production & les effects de l'électricité & de la chaleur, Nouvelles memoires de l'Academie des Sciences et Belles-Lettres, 1779 (Berlim Decker, 1781). Disponível em: <<http://www.bbaw.de/bibliothek/digital/struktur/03-nouv/1779/ipg.0600/00000088.htm>> Acesso em 12 mar. 2004

BACHELARD, G. **A Epistemologia**. Coleção O Saber da Filosofia. Lisboa: Edições 70, 1984.

BERNAL, J. D. **Ciência na História**. Lisboa: Livros Horizonte, 1976.

CHERMAN, A. **Sobre os ombros de gigantes: uma história da Física**. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed., 2004.

FOX, R. **The caloric theory of gases from Lavoisier to Regnault**. Oxford: Clarendon Press, 1971.

GAGLIARDI, R. Como utilizar la historia de las ciencias en la enseñanza de las ciencias. **Enseñanza de las Ciencias**, v. 6, n. 3, p. 291-296, 1988.

GAGLIARDI, R.; GIORDAN, A. La historia de las ciencias: una herramienta para la enseñanza. **Enseñanza de las Ciencias**, v. 4, n. 3, p. 253-258, 1986.

GIBERT, A. **Origens históricas da Física Moderna**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1982.

HALBWACHS, F. Historia de la explicación en las Ciencias. In: PIAGET, J. (Org.) **La explicación en las ciencias**. Barcelona: Martínez Roca, 1977. cap. IV.

HOPPE, E. **Histoire de la Physique**. Paris: Payot, 1928.

JALLABERT, J. **Experiences sur l'électricité, avec quelques conjectures sur la cause de ses effects**. Paris: Durant e Pissot, 1749. Disponível em: <<http://cem.um.cnam.fr/SYN/12SAR7.html>>. Acesso em 12 mar 2004.

LACOMBE, G. Pour la introduction de l'histoire des sciences dans l'enseignement du second cycle, **Aster Recherches em Didatique des Sciences Experimentales**, v. 5, p. 87-115, 1987.

MAGIE, W. F. **A source book in Physics**. New York: McGraw-Hill Book, 1935.

MAXWELL, J. K. **A treatise on electricity & magnetism**. New York: Dover, 1954. v. 1.

MEDEIROS, A. As origens históricas do eletroscópio. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 24, n. 3, 2002, p. 353-361.

NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica: Fluidos, Oscilações e Ondas, Calor.** 4. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2002. v. 2.

PIAGET, J.; GARCIA, R. **Psicogênese e História das Ciências.** Lisboa: Dom Quixote, 1987.

REBER, A. **The Penguin Dictionary of Psychology.** England: Viking, 1985.

ROCHA, J. F. M. (Org.) **Origens e evolução das idéias da Física.** Salvador: UDFBA, 2002.

ROSMORDUC, J. L'histoire de la physique peut-elle éclairer les obstacles épistémologiques? **Aster-Recherches em Didatique des Sciences Experimentales**, v. 5, p. 117-141, 1987.

ROSMORDUC, J. **Uma História da Física e da Química de Tales a Einstein.** Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed., 1988.

SALTIEL, E.; VIENNOT, L. Que aprendemos de las semejanzas entre las ideas históricas y el razonamiento espontaneo de los estudiantes? **Enseñanza de las Ciencias**, v. 3, n. 2, p.137-144, 1985.

SCHENBERG, M. **Pensando a Física.** São Paulo: Brasiliense, 1984.

WHITTAKER, E. **A History of Theories of Aether & Electricity.** New York: Dover Publications Inc., 1989.