

Esta cópia eletrônica do trabalho está sendo fornecida para uso individual, para fins de pesquisa. É proibida a reprodução e fornecimento de cópias a outras pessoas. Os direitos autorais permanecem sob propriedade dos autores e das editoras das publicações originais.

This electronic copy is hereby provided for exclusive individual research use. The reproduction and forwarding of copies to third parties is forbidden. Copyright of this work belongs to the authors and publishers of the original publication.

UMA ANÁLISE HISTÓRICA DO USO DE MODELOS NO ELETROMAGNETISMO

Cibelle Celestino Silva – cibelle@ifsc.usp.br
Instituto de Física de São Carlos
Universidade de São Paulo

1. Introdução

A importância da história da ciência como um dos elementos do ensino de ciências é resultado das pesquisas dos últimos anos e é um consenso entre a maioria dos pesquisadores da área (MATTHEWS 1988, GIL 1992, MATTHEWS 1994, BEVILACQUA & GIANNETTO 1996).

Nos últimos anos tem havido um crescente interesse por parte da comunidade de pesquisadores em ensino de ciências sobre o papel dos modelos no ensino de ciências e, em particular, no ensino de física. Há um grande número de trabalhos que abordam esta questão dos mais variados pontos de vista (NERSESIAN 1995, VAN DRIEL & VERLLOP 1999, GRECA & MOREIRA 2000, GILBERT & BOULTER 2000, CLEMENT 2000, CUPANI & PIETROCOLA 2002, ISLAS & PESA 2003).

Apesar de sua grande relevância, muitos estudantes e professores ainda não são capazes de reconhecer o emprego de modelos na construção do conhecimento físico; tampouco de elaborar explicações qualitativas para expressões matemáticas presentes na física (SILVA & PIETROCOLA 2003). Além disso, em muitos casos, há uma grande confusão entre modelo e realidade. Ao invés de discutir estas questões de uma forma abstrata, este artigo analisa alguns de seus aspectos tomando como exemplo a teoria eletromagnética.

O objetivo principal do presente artigo é discutir o desenvolvimento histórico de alguns modelos usados no eletromagnetismo, enfatizando a construção de suas equações e sua relação com os diversos modelos de éter existentes no século XIX. Uma compreensão de aspectos históricos e epistemológicos relacionados aos modelos conceituais é de grande valia para que os docentes reconheçam os alcances e limitações de um modelo conceitual.

Esta compreensão faz com que possam desenvolver estratégias pedagógicas que, através de modelos conceituais, levem o estudante a formar modelos mentais adequados de sistemas físicos (MOREIRA 1996).

2. Uma breve consideração sobre modelos e analogias

Por não ser o objetivo deste artigo e também pelo fato de haver muitos trabalhos publicados sobre este assunto, que abordam tanto aspectos epistemológicos (HESSE 1972, BUNGE 1974) quanto aspectos didáticos (THAGARD 1992, GRECA & MOREIRA 2002), os parágrafos a seguir apresentam uma breve caracterização das noções de modelo e de analogias que este trabalho adota.

A modelização dos fenômenos físicos é considerada como um dos constituintes básicos do desenvolvimento científico (BUNGE 1974). Segundo Mary Hesse, a relação entre modelo e fenômeno modelado geralmente é uma relação de analogia. Ela diferencia entre dois tipos de analogia: a analogia formal e a analogia material. No primeiro caso, as mesmas relações axiomáticas e dedutivas relacionam sujeitos e predicados de sistemas análogos, que são descritos por equações semelhantes. Por exemplo, um pêndulo e um circuito elétrico oscilante são formalmente análogos entre si, pois ambos podem ser descritos por uma mesma equação diferencial. Em uma analogia formal não há necessariamente semelhança entre os sujeitos e predicados de dois sistemas. No caso de uma analogia material, há também semelhanças físicas entre os sistemas, como por exemplo, na teoria cinética dos gases que considera um gás como um conjunto de pequenas esferas (HESSE 1972). A relação analógica seja ela formal ou material, geralmente implica em diferenças e semelhanças, além disso, dois sistemas podem ter apenas uma analogia formal entre si, sem que haja analogia material, por exemplo, os vários modelos mecânicos desenvolvidos no século XIX e os fenômenos eletromagnéticos discutidos neste artigo.

Atualmente a teoria eletromagnética é ensinada, em muitos casos, sem nenhuma discussão sobre os modelos sobre os quais foi construída, ficando a visão de que ela foi construída a partir de um conhecimento empírico da natureza.

3. Analogias e modelos no eletromagnetismo do século XIX

Na segunda metade do século XIX, surgiu uma nova maneira de interpretar as relações entre modelos físicos e modelos matemáticos, produzindo um interessante enfoque para o desenvolvimento de explicações para fenômenos físicos, tais como os fenômenos elétrico e magnético. A relação entre modelos e a realidade física era uma grande preocupação entre os físicos do século XIX.

Nesta época, a mecânica e suas aplicações eram um campo de pesquisa bastante desenvolvido. Os físicos buscavam explicações mecânicas para uma grande variedade de fenômenos, inclusive para os fenômenos eletromagnéticos, baseados em conceitos como força, velocidade, aceleração e nas leis de Newton. Um dos métodos utilizados para desenvolver modelos capazes de descrever os fenômenos eletromagnéticos foi o uso de analogias com sistemas físicos já conhecidos e bem estudados, como por exemplo, propagação de calor, movimento de fluidos e estudo de corpos sólidos elásticos, entre outros. Estas analogias tinham um forte caráter matemático, mas também uma preocupação em permitir a formação de uma imagem mental dos fenômenos eletromagnéticos.

A filosofia natural britânica era uma filosofia mecânica que buscava explicações para os fenômenos físicos em termos de matéria, movimento e forças baseadas nas leis de Newton. Dentro deste espírito, o éter seria considerado como base para todos os fenômenos físicos, interpretados como alterações mecânicas do éter. Além de ser o meio que sustentaria a propagação da luz, o éter tinha outras funções, tais como explicar os fenômenos elétricos e magnéticos como “campos” existentes no éter. Assim, a idéia de um éter eletromagnético foi gradualmente ganhando espaço durante o século XIX, dando origem ao conceito de campos elétrico e magnético como estruturas físicas desse éter.

William Thomson, James C. Maxwell, e outros desenvolveram modelos e analogias para explicar os fenômenos elétricos e magnéticos baseadas na existência do éter. As equações que obtiveram pelo método analógico são utilizadas – e ensinadas – até os dias de hoje apesar de não supormos mais a existência de um meio material como o éter permeando todo o espaço.

4. A analogia entre eletricidade e o fluxo de calor de William Thomson

William Thomson (1824–1907) era um matemático com profundos conhecimentos de mecânica analítica. O jovem Thomson estava em perfeitas condições para apreciar e desenvolver os trabalhos matemáticos franceses, tanto que estudou o *Théorie analytique de la chaleur* de Fourier em duas semanas, aos dezesseis anos de idade (DARRIGOL 2000, p. 114). Os trabalhos de Fourier sobre calor chamaram a atenção dos filósofos naturais britânicos por não especularem sobre a natureza do calor e da matéria e por seu forte aspecto geométrico. Suas equações básicas tinham um significado empírico direto e atribuíram um papel central ao conceito de fluxo de calor através de uma superfície.

Em 1842 Thomson começou a explorar mais os processos formais empregados na física utilizando o método analógico. Inicialmente, dedicou-se a desenvolver analogias formais entre eletrostática e fluxo de calor, sem dedicar-se a entender fisicamente o que ocorre no espaço entre os condutores, mas sim encontrar relações entre as equações que descrevem ambos os fenômenos. O mesmo vale para sua analogia entre hidrodinâmica e magnetismo (DARRIGOL 2000, p. 136). Segundo Thomson, estas analogias matemáticas poderiam ser consideradas como pontos de partida em direção a analogias mecânicas mais verdadeiras que poderiam resultar em uma teoria física para a propagação das forças elétrica e magnética (THOMSON 1842).

Utilizando essas idéias, Thomson estudou fenômenos físicos totalmente diferentes entre si, como problemas de fluxo de calor, atração eletrostática e atração gravitacional. Isso foi possível justamente pela força do uso de analogias formais. Thomson notou que tais fenômenos poderiam ser descritos por equações do mesmo tipo, bastando atribuir os significados próprios a cada símbolo nelas utilizado.

Como exemplo, vejamos o caso da lei de Gauss aplicada ao caso da distribuição de temperatura. Thomson superpôs fontes puntiformes de calor com densidade σ em uma superfície dS para chegar na seguinte expressão para a temperatura θ a uma distância r das

$$\text{fontes: } \theta = \iint \frac{\sigma dS}{r}.$$

Esta expressão é idêntica à expressão para o potencial elétrico de uma densidade de carga σ situada a distância r . Os elementos da analogia desenvolvida por Thomson são mostrados na tabela abaixo:

| | |
|-----------------------|------------------------------|
| Fluxo de calor | Atração eletrostática |
| Calor | Eletricidade |
| Temperatura | Potencial elétrico |
| Fontes de calor | Cargas elétricas |

Thomson considerava ser possível desenvolver novas idéias para eletricidade através do estudo das equações que descrevem a condução de calor (e vice-versa), pois os conjuntos de equações são análogos. Em seu raciocínio, ele foi de uma teoria para outra várias vezes, transpondo conceitos e teoremas de uma para outra. O ponto inicial de uma teoria (lei de Coulomb) tornou-se resultado da outra (distribuição de temperatura de fontes puntiformes). Uma consequência óbvia de uma teoria (transferência local de calor na teoria de Fourier) tornou-se um teorema essencial da outra (fluxo do campo através de uma superfície) (SILVA & MARTINS 2003).

Seguindo a distinção entre analogia formal e analogia material de Mary Hesse descrita anteriormente, a analogia desenvolvida por Thomson entre calor e eletricidade é uma analogia do tipo formal. Ele considera que apenas as equações que descrevem os dois fenômenos são análogas, mas não os fenômenos em si – a analogia pode ser construída pela atribuição de significados próprios de cada teoria aos símbolos das equações. Para ele, seria possível desenvolver novas idéias na eletricidade a partir do estudo das equações que descrevem o fenômeno de condução de calor (e vice-versa), uma vez que suas equações são análogas.

5. A analogia com um meio elástico

A analogia entre eletrostática e propagação de calor discutida anteriormente é do tipo formal – não se preocupa em criar um objeto-modelo para explicar os fenômenos, apenas descreve-os matematicamente através de uma estrutura matemática “emprestada” de outra teoria. Esse processo analógico inicialmente formal foi capaz de fornecer um suporte provisório ao pensamento visando apreender conceitualmente a nova área de investigação.

De alguma maneira, a imaturidade conceitual da abordagem da eletricidade e do magnetismo adquiriu significados precisos com a estruturação matemática obtida a partir da analogia utilizada. No entanto, era preciso avançar na direção de uma estruturação conceitual própria ao domínio eletromagnético. Para tentar criar uma imagem mental dos fenômenos elétrico e magnético, Thomson desenvolveu um outro tipo de analogia: a analogia com movimentos em um meio elástico. Novamente, seguindo a definição de Mary Hesse, esta seria uma analogia do tipo material.

Faraday acreditava que as forças elétrica e magnética se propagavam por meio de tensões em um meio elástico, mas não tentou explicar essas tensões em termos de tensões mecânicas específicas pois achava que a dinâmica matemática não era capaz de explicar os conceitos de força e poder em que sua física estava baseada. Thomson pensava de forma diferente. Acreditava que as forças elétrica e magnética se propagavam de forma análoga a tensões em um meio elástico. Coincidentemente, George Gabriel Stokes havia acabado um elegante estudo sobre sólidos elásticos na época, proporcionando um novo enfoque sobre a dinâmica dos meios contínuos (DARRIGOL 2000, pp. 126-128). Stokes estudou matematicamente o movimento mais geral de um elemento de fluido, decompondo o movimento de um elemento do fluido em três dilatações ou contrações em torno de três eixos ortogonais e uma rotação. Com essas hipóteses Stokes deduziu as equações de movimento de um sistema de tensões agindo sobre um elemento de superfície arbitrário.

Thomson aplicou as idéias de Stokes e interpretou os três tipos simples de soluções para as equações de equilíbrio de um sólido incompressível como análogas aos campos de uma carga puntiforme, de um dipolo magnético e de um elemento de corrente. Observando as equações que descrevem estes fenômenos e comparando-as com as que descrevem o movimento geral (translações e rotação) de um elemento de sólido elástico, notou que a analogia deveria ser entre força elétrica e deslocamento elástico e que as forças magnética e eletromagnética seriam análogas a rotações. Os resultados de Thomson mostravam uma imagem da propagação da força elétrica ou magnética como sendo equivalente à forma como mudanças no deslocamento elástico se propagam através de um sólido elástico. A importância desta analogia está no fato de que ela sugere explicitamente a propagação das forças elétrica e magnética por processos mecânicos no éter (deslocamentos, rotações,

forças e outras grandezas mecânicas). Essa abordagem de Thomson para tratar problemas de eletromagnetismo através de analogias influenciou bastante o jovem Maxwell.

A introdução do éter como objeto-modelo configura-se como um passo importante na produção de uma interpretação própria ao domínio eletromagnético. Através dele, foi possível produzir representações adequadas dos fenômenos. Estava em curso o processo de produção de modelos teóricos, e coube a Maxwell o papel histórico de desenvolver grande parte desses modelos.

6. As analogias e modelos mecânicos no trabalho de Maxwell

Em seus trabalhos, Maxwell fez grande uso de modelos mecânicos desenvolvidos por Faraday e Thomson para representar os fenômenos eletromagnéticos, seguindo a tradição da física matemática de Cambridge no século XIX. Mas até que ponto essas imagens eram uma representação literal da realidade?

Maxwell não tomava as equações de campo como a única coisa importante. Ele pensava ter construído uma teoria mecânica do campo eletromagnético, na qual o campo seria um meio material e contínuo. Para obter suas equações, usou o tratamento formal de meios materiais contínuos que aprendeu principalmente com Thomson. Para Maxwell, relacionar eletromagnetismo com uma teoria de éter era importante pois lhe parecia fundamental a existência de modelos mecânicos adequados para explicar os fenômenos físicos e que, ao mesmo tempo, permitissem formar uma imagem mental destes fenômenos.

O artigo *Sobre as linhas de força de Faraday* publicado em 1856 foi uma tentativa de unir as idéias de Faraday com as analogias matemáticas desenvolvidas por Thomson e com isso obter uma teoria matemática para descrever as linhas de força (MAXWELL 1965, vol. 1, pp. 155-229). Seu objetivo era produzir um método que “exigisse atenção e imaginação, mas não cálculos”. Neste trabalho, partiu de uma analogia formal com o movimento de um fluido incompressível para chegar a uma analogia material. Inicialmente, chegou às seguintes expressões para a velocidade e a pressão do fluido a uma distância r da fonte

$$v = \frac{1}{4\pi r^2} \quad \text{e} \quad p = \frac{1}{4\pi r}.$$

Essas equações são do mesmo tipo que as equações do campo e potencial. Devido a essa igualdade, Maxwell pensou que as idéias de linha de força como um movimento de um fluido “podem ser modificadas para serem aplicadas às ciências de eletricidade estática, magnetismo permanente, magnetismo de indução e correntes galvânicas uniformes, deixando as leis do eletromagnetismo para uma consideração especial” (MAXWELL 1965, vol. 1, p. 175-77). Vemos aqui, o uso de analogias materiais por Maxwell, que permitem a construção de imagens mentais e explicações concretas para os fenômenos eletromagnéticos a partir de um fenômeno mais familiar, o movimento de um fluido.

Neste artigo, apesar de Maxwell aplicar a idéia de linhas de força para vários casos (eletrostática, magnetismo, eletrodinâmica), não há um modelo unificado que permita formar uma idéia clara dos mecanismos que explicariam os fenômenos elétricos e magnéticos pois cada fenômeno é explicado de uma forma diferente e independente dos outros.

Além de discutir questões físicas, Maxwell também fez comentários filosóficos sobre o uso de analogias no artigo *Sobre as linhas de força de Faraday*. Para ele, as analogias físicas proporcionam um método de investigação que permite visualizar cada passo até se atingir uma concepção física clara, sem a necessidade de hipóteses baseadas em outras teorias físicas.

7. Conclusão

Como vimos na análise do desenvolvimento da teoria eletromagnética, a matematização não é uma mera tradução da teoria para a linguagem matemática: a matematização é uma etapa integrante do processo de construção da teoria. Thomson e Maxwell utilizaram a linguagem matemática como elementos *estruturantes* da teoria eletromagnética e não como mera descrição de aspectos empíricos (SILVA & PIETROCOLA 2003). Na discussão histórica apresentada, a matematização do domínio eletromagnético foi obtida às custas de um processo que inicialmente envolveu analogias formais. Os objetos conceituais próprios da teoria só apareceram depois. Nesse caso, a analogia formal só foi possível devido a crença de Thomson, Maxwell e outros de que havia motivos para se pensar a eletricidade e o magnetismo através de uma estrutura matemática semelhante a da teoria do calor e dos fluidos. Essa estratégia de uso de

analogias formais, utilizada em diversos episódios da História da Ciência, parece demonstrar o papel estruturante que a Matemática desempenha no pensamento do mundo, ou pelo menos da porção dita “natural” do mundo (PIETROCOLA 2002). De outro forma, como entender a função heurística que analogia formal desempenhou neste episódio da estruturação da teoria eletromagnética? O próprio desenvolvimento posterior dessa teoria, em particular com o abandono do éter no início do século XX, parece indicar que houve um processo de estruturação gradativa, que acabou por gerar conhecimento próprio a essa área, na forma de conceitos, leis, princípios e etc. Esse processo se valeu amplamente das possibilidades organizativas que a linguagem matemática oferecia. Inicialmente, com Thomson e Maxwell, a Matemática utilizada fora “emprestada” de outras teorias – na seqüência, uma estruturação matemática própria foi desenvolvida.

Por trás de uma teoria, por assim dizer, formulada na linguagem vulgar ou semi-científica, pode haver muitas teorias precisas. Por outro lado, falar de matematização não significa unicamente quantificar, porque na formulação da teoria eletromagnética (e de várias outras) utilizam-se também ferramentas matemáticas como cálculo vetorial, cálculo diferencial integral e outros, dependendo da teoria, que estão intimamente relacionadas com os aspectos conceituais da própria teoria. O fato de existirem grandezas relacionadas a deslocamentos lineares (como campo elétrico) e grandezas relacionadas a rotações (como o campo magnético) é um exemplo dessa intimidade, e isso foi decisivo na elaboração da teoria eletromagnética.

Em todo caso, as vantagens da matematização não se limitam à máxima precisão. Ela aumenta a potência dedutiva da teoria (ou seja, a capacidade de deduzir novos enunciados); permite constatações empíricas mais finas; facilita a identificação de defeitos e inconsistências e a comparação da teoria com outras rivais.

Por estas e outras razões (não discutidas neste artigo), é fundamental discutir o papel desempenhado pela Matemática no conhecimento físico. Isso, aliado a outras discussões, permite ao estudante formar uma idéia sobre o conhecimento científico mais próxima do conhecimento filosófico atual.

8. Bibliografia

- BEVILACQUA, F. & GIANNETTO, E. The history of physics and European physics education. *Science & Education*, v.5, p. 235-246, 1996.
- BUNGE, Mario. *Teoria e Realidade*. São Paulo: Perspectiva, 1974.
- CLEMENT, J. Model based learning as a key research area for science education. *International Journal of Science Education* **22(9)**: 1041-1053, 2000.
- CUPANI, A. & PIETROCOLA, M. A relevância da epistemologia de Mario Bunge para o ensino de ciências. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **19 (especial)** 2002.
- DARRIGOL, Olivier. *Electrodynamics from Ampère to Einstein*. New York: Oxford University Press, 2000.
- GIL, D. Implicaciones de la Historia y la Filosofía de la Ciencia en la enseñanza de las Ciencias. *Enseñanza de las ciencias* **10(1)**: 102-104, 1992.
- GILBERT, J. K & BOULTER, C. J (eds.) *Developing models in science education*. Dordrecht: Kluwer, 2000.
- GRECA, I. & MOREIRA, M. A. Mental models, conceptual models, and modeling. *International Journal of Science* **22(1)**: 1-11, 2000.
- GRECA, I. M. & MOREIRA, M. A. Mental, physical, and mathematical models in the teaching and learning of physics. *Science Education* **85(6)**: 106-21, 2002.
- HESSE, Mary. Models and analogy in science. In EDWARDS, Paul (ed.). *The encyclopedia of philosophy*. New York: MacMillan, 1972. Vol. 5, pp. 354-359.
- ISLA, S. M. & PESA, M. A. Qué rol asignan los profesores de física de nivel medio a los modelos científicos y a las actividades de modelado? *Enseñanza de las ciencias* **21(extra)**: 57-66, 2003.
- MATTHEWS, Michael R. A role for history and philosophy of science teaching, *Educational Philosophy and Theory*, v.20, p.67-81, 1988.
- MATTHEWS, Michael. R. *Science Teaching – The role of History and Philosophy of Science*. New York: Routledge, 1994.
- MAXWELL, James C. *Scientific papers*. Edited by William Davidson Niven. New York: Dover, 1965.
- MOREIRA, M. A. Modelos mentais. *Investigações em ensino de ciências* **1(3)**: 193-232, 1996.

- NERSESSIAN, Nancy. Should physicists preach what they practice? *Science & Education* **4**: 203-226, 1995.
- PIETROCOLA, M. A Matemática como estruturante do pensamento físico. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **19 (1)**: 93-114, 2002.
- SILVA, Cibelle C. & MARTINS, Roberto de A. William Thomson e o uso de analogias e modelos no eletromagnetismo. *Epistemología e Historia de la Ciencia* **9**: 401-409, 2003.
- SILVA, Cibelle C. & PIETROCOLA, Maurício. O papel estruturante da matemática na teoria eletromagnética: um estudo histórico e suas implicações didáticas. *IV ENPEC (Encontro Nacional de Pesquisadores em Ensino de Ciências)*, (25/11/2003 a 29/11/2003), Bauru, SP, Brasil 2003.
- THAGARD, P. Analogy, explanation and education. *Journal of Research in Science Teaching* **29(6)**: 537-544, 1992.
- THOMSON, William. On the uniform motion of heat in homogeneous solid bodies and its connection with mathematical theory of electricity. *In: THOMSON, William. Reprint of Papers on Electrostatic and magnetism*. London: MacMillan & Co, 1872, pp. 1-14.
- VAN DRIEL, I. & VERLOOP, N. Teachers' knowledge of models and modeling science. *International Journal of Science Education* **21(11)**: 1141-1153, 1999.