



A noção de modelo na virada do século XIX para o século XX

Tatiana ROQUE & Antonio Augusto PASSOS VIDEIRA



RESUMO

Este artigo descreve o modo pelo qual a noção de modelo começou a ingressar na ciência, em particular na física, no final do século XIX. Este é talvez o primeiro domínio científico a fazer uso explícito e consciente dessa noção, para o qual o uso de modelos significou o abandono de toda e qualquer tentativa de representar fielmente os fenômenos naturais. Em questão, estava a representação dos fenômenos elétricos e magnéticos por meio de analogias.

PALAVRAS-CHAVE • Modelo. Maxwell. Eletromagnetismo. Representação. Boltzmann. Física no século XIX.

INTRODUÇÃO

“Modelo” é daquelas palavras usadas com diferentes significados, mesmo se nos restringirmos ao domínio científico. A presença visível, marcante e difundida do termo “modelo”, o que o torna um termo habitual em nossas práticas e, por isso mesmo, com ares de evidente, faz com que, frequentemente, se esqueça – ao menos entre cientistas – que a noção de modelo já sofreu críticas contundentes e sutis. Por outro lado, para aqueles mais afeitos a tais críticas, chega ser um truísmo afirmar que “modelo” é uma noção complexa, podendo ser definida e compreendida de várias e diferentes maneiras. Sem querermos ser definitivos, modelo é uma noção que oscila entre a familiaridade do uso cotidiano e a obscuridade conceitual. Ainda assim, é possível perceber que a opinião mais difundida sobre o significado da palavra “modelo” é a de que esta noção se refere a um modelo matemático de um fenômeno físico, dado por uma equação que descreve e permite prever os estados atuais e futuros dos fenômenos considerados. Já nos domínios da história da ciência e da filosofia da ciência, o conceito de “modelo” tem sido entendido de modos muito distintos.

A pluralidade de significados atribuídos a este conceito faz com que não possamos usar a palavra “modelo” sem tentar elaborar uma explicação do sentido – se possível, exato – que estamos empregando. Nosso objetivo neste artigo é descrever algumas

das conotações, efetivamente empregadas por matemáticos e físicos, que foram atribuídas a este conceito no período entre a segunda metade do século XIX e os primeiros anos do século XX; mais particularmente, nos interessaremos pela recepção das novas teorias propostas por J. Clerk Maxwell e sua influência na discussão sobre os modos de teorizar os fenômenos naturais e o estatuto epistemológico da explicação física.

Alguns trabalhos de história e filosofia da ciência localizam o surgimento e a difusão da noção de modelo matemático nas primeiras décadas do século XX. Giorgio Israel (1996), por exemplo, afirma que a modelização matemática seria uma forma de matematização típica do século XX, com características particulares com relação às formas anteriores de matematização. Uma destas características seria a renúncia a qualquer tentativa de obter uma imagem unificada da natureza: um modelo matemático consiste em um objeto parcial que pretende descrever um aspecto da realidade. Por esta razão, um mesmo aspecto da realidade pode ser descrito por diferentes modelos; e um mesmo modelo pode descrever diferentes situações reais.

Israel sustenta que a emergência do conceito moderno de modelização matemática dataria das primeiras décadas do século XX: “é efetivamente nos anos 1920 que podemos situar, com surpreendente precisão, o nascimento dessa nova abordagem científica” (Israel, 1996, p. 211). A periodização para o uso de modelo proposta por Israel explica-se pela dependência entre a noção de modelo e a sua utilização nas ciências não físicas. No princípio do processo de matematização da natureza, a partir do século XVII, a matemática não teria sido apenas uma ferramenta auxiliar na descrição e na compreensão dos fenômenos, mas teria exercido um papel constituinte na própria definição do que chamamos de “física” ou de “astronomia”. Tal função de configuração dos eventos físicos permaneceu até o século XIX, quando poderíamos falar de uma analogia mecânica. Essa analogia permitiria exprimir fenômenos físicos por meio de leis matemáticas, o que teria se tornado possível devido ao papel constitutivo que a matemática teve no desenvolvimento da mecânica e da física (cf. Levy-Leblond, 1982; Warwick, 2003).

Mas, no início do século XX, com o abandono obrigatório da imagem de uma sintonia perfeita entre mecânica e matemática, os cientistas teriam começado a empregar modelos matemáticos em outras ciências, as quais se constituíram de modo independente da matemática, como a biologia, a economia e a sociologia. A noção de modelo estaria associada justamente a esta fragmentação, que enxerga a pluralidade e a parcialidade do que o modelo pode ajudar a compreender sobre os fenômenos. Note-se que a noção de teoria começa a perder o prestígio até então desfrutado; teoria seria mais do que modelo, uma vez que fornece os elementos iniciais para a elaboração de modelos.

A explicitação desta tese nos serve aqui justamente para fixar os objetivos que não serão realizados no escopo deste artigo. Nosso objetivo não é entender como a no-

ção de modelo se constituiu com os vários significados, que lhe foram atribuídos ao longo do século passado. Nosso propósito maior é mostrar como alguns protagonistas, físicos e matemáticos, definiram esta noção na segunda metade do século XIX e no início do seguinte e porque essa definição tornou-se necessária.

A metodologia escolhida nos leva a investigar o aparecimento da palavra “modelo” sem ideias pré-concebidas sobre o que é um modelo matemático. Além de serem muitas as acepções deste termo, evitaremos pesquisar a história de uma noção partindo de concepções já estabelecidas sobre o seu significado.

Partindo de um princípio análogo, Martin Zerner reconhece que os usos científicos do termo “modelo” aparecem primeiramente na física, no contexto das teorias eletromagnéticas de Maxwell, sendo incorporado, logo em seguida, por diversos cientistas, como Boltzmann e Hertz. Mas, apesar de observar que muitos dos modelos usados por Maxwell eram geométricos, não seria conveniente iniciar um estudo sobre a história da noção de modelo nesse momento, uma vez que

a maioria desses modelos de fenômenos físicos eram, eles próprios, sistemas físicos, cuja função era obter a teoria do fenômeno do qual eles eram modelos (...). Por essa razão, considero esses modelos *físicos*, não *matemáticos* (Zerner, 2002, p. 9).

Nosso ponto de partida aqui é justamente o oposto. Não sabemos se os modelos propostos por Maxwell forneciam uma explicação real dos fenômenos físicos, ou se eram simples ficções com o objetivo de ajudar a mente a encontrar a matemática associada ao fenômeno. Portanto, seria precipitado designar estes modelos como físicos, e não matemáticos. A expressão “modelo matemático” foi usada muitas vezes, neste período, para enfatizar que certos objetos usados na física não possuem existência real. Este é o caso da posição de Mach sobre o estatuto do átomo.

Uma vez que decidimos não enveredar por uma investigação das origens do que chamamos atualmente de modelo, ou de modelo matemático, não nos parece adequado separar as noções de modelo físico e de modelo matemático. Escolhemos o momento histórico da virada do século XIX para o século XX justamente porque esta noção foi explicitamente discutida neste período. Ou seja, não somos nós que enxergamos aí os primórdios da utilização da ideia de modelo, mas alguns cientistas neste momento sentiram a necessidade de analisar a noção de modelo e de apresentar definições o mais detalhadas possível. Por quê? Em que contexto? Como compreender a noção de termo “modelo” neste caso específico?

Nossa tese é a de que a disputa sobre a pertinência das propostas de Maxwell levou alguns cientistas, como Boltzmann, a teorizar sobre a noção de modelo. Não

obstante a relevância das questões ligadas às concepções maxwellianas sobre a luz e o magnetismo, no caso de Boltzmann, não se deve esquecer que as defesas que fez da mecânica clássica, como base para a física, e do atomismo inserem-se naturalmente na sua concepção mais geral de que toda e qualquer teoria científica é uma representação da natureza. Aqui também podemos sentir a influência de Maxwell sobre Boltzmann, ainda que esta não possa ser considerada a única (cf. Wilson, 1991). Com o fim de defender as novas teorias e, sobretudo, os novos métodos do eletromagnetismo, tornou-se essencial classificar os tipos de modelo, para incluir o novo tipo usado por Maxwell.

Nosso objetivo neste artigo é contribuir para o entendimento das razões que fizeram com que, na passagem do século XIX para o seguinte, alguns cientistas propusessem descrever a sua própria atividade científica por meio do termo “modelo”. Doravante, sempre que usarmos esta palavra, estaremos nos referindo ao sentido específico que ela adquiriu neste momento, distinto daquele que é predominante em nossa época.

Começaremos fazendo um breve panorama de algumas concepções de modelo durante a segunda metade do século XIX, principalmente aquelas que foram expressas por cientistas que exercerão um papel essencial na proposição de um sentido para o termo, como é o caso de Ludwig Boltzmann. Em seguida, explicaremos brevemente algumas das novas ideias de Maxwell sobre o eletromagnetismo, concentrando-nos sobre sua utilização de analogias mecânicas e sua concepção sobre a função das mesmas. Por fim, analisaremos a recepção dessas ideias no que diz respeito à discussão sobre os modos de se conceber, naquela época, o estatuto das teorias físicas que descrevem os fenômenos naturais.

I PANORAMA SOBRE OS USOS DO TERMO “MODELO” NA SEGUNDA METADE DO SÉCULO XIX

A segunda metade do século XIX foi particularmente marcante na história da noção de modelo, pois alguns compêndios e enciclopédias de caráter científico preocuparam-se – talvez pela primeira vez – com a publicação de verbetes dedicados à descrição do que seria um modelo. Um exemplo dessa preocupação explícita é o verbete proposto por Boltzmann, em 1902, para a *Enciclopédia Britânica* (cf. Boltzmann, 2013 [1902]; Roque & Videira, 2013). Antes desta data, contudo, desde os anos 1860, a noção já era presente nas práticas dos físicos, sobretudo em conexão com os trabalhos de Maxwell em eletromagnetismo. Mas esta preocupação não era generalizada. No *Dictionnaire de la langue française* (Dictionnaire de la langue française) de Littré, por exemplo, seja na sua primeira edição de 1863-1872, seja na segunda edição de 1872-1877, o verbete

sobre modelo ainda não tem uma conotação científica, trata-se de um termo do senso comum:

termo de escultura, de arquitetura ou de muitas outras artes. Representação em terra, ou em outra matéria, de uma obra a ser executada. Um modelo de terra, de cera, ou um modelo em terra, em cera. Modelo de navio, de canhão. (...)

Fig. Aquilo que é para as coisas do espírito, ou para as coisas morais, o equivalente dos modelos nas artes (Litré, 1863-1872, modelo).

As definições acima aproximaram a noção de modelo daquela outra conhecida como maquete, ou seja, modelo poderia ser usado para referir-se a uma representação física (i.e. concreta, material) em tamanho menor do objeto a ser representado. Seguem-se, ainda neste mesmo dicionário, muitos exemplos do senso comum e da literatura, como “Aquele que comanda deve ser o modelo dos outros”. Observe-se que nenhum dos exemplos citados é oriundo das ciências.

Veremos, contudo, que, poucos anos mais tarde, o termo modelo começa a ser usado para designar uma figura, imagem, diagrama ou artefato que ajuda o entendimento de teorias matemáticas e físicas. Visualizações (ou representações) materiais de teorias físicas e matemáticas por meio de aparatos começaram a ser construídas, por artesãos especializados, a partir dos anos 1870. Em 1892, a União Alemã de Matemáticos organizou uma exposição em Munique com esses aparatos e, logo em seguida, foi publicado um catálogo de modelos, aparatos e instrumentos usados na matemática e na física-matemática escrito por W. Dyck (1994 [1892]).

Essa obra contém mais de 300 modelos, instrumentos e outros objetos disponíveis em várias publicações nos anos 1890. O catálogo contém seções sobre matemática (geometria, álgebra, aritmética) e sobre mecânica. Nele, os modelos são construções que ajudam o entendimento. No caso da matemática, são usadas superfícies e curvas construídas em metal ou em gesso, como é o caso dos modelos empregados por Felix Klein, aliás, um dos autores de um dos artigos introdutórios do catálogo. Para as ciências físico-matemáticas são apresentados inúmeros modelos e aparatos construídos dos mais diversos materiais.

O catálogo dá uma ideia do numeroso arsenal de modelos disponíveis na época. Um dos artigos da introdução foi escrito por Ludwig Boltzmann, que explica a importância daqueles aparatos para uma maior inteligibilidade da ciência naquele momento.

A nossa época está caracterizada por uma crítica quase que exagerada dos métodos de investigação nas ciências naturais (...). Foi na matemática e na geometria que, em primeiro lugar, a necessidade de economia conduziu de métodos pura-

mente analíticos àqueles construtivos e de ilustração por meio de modelos (Boltzmann, 2005 [1905], p. 15).

Opondo-se aos exageros cometidos nas análises epistemológicas a respeito dos fundamentos das ciências naturais, Boltzmann defende a necessidade de tornar intuitivos os resultados dos cálculos, de forma tangível, diz ele “de forma visível, para o olho, palpável para a mão, com gesso e papelão”. No caso da física-matemática, ele defende uma concepção de modelo profundamente inspirada pelas teorias eletromagnéticas da segunda metade do século XIX, em particular pelos trabalhos de Maxwell. A relação entre a difusão do uso de modelos e o eletromagnetismo será discutida adiante.

Nas últimas duas décadas do século XIX, o sucesso experimental das teorias sobre o eletromagnetismo, garantido principalmente por meio dos experimentos de Heinrich Hertz, contribuiu para o surgimento de debates epistemológicos sobre o uso de modelos nas ciências naturais. Em termos breves, o uso intenso de modelos mecânicos, especialmente pelos físicos britânicos, fez com que alguns cientistas e filósofos, entre os quais o físico, filósofo e historiador da ciência francês Pierre Duhem, criticassem acridamente as explicações e descrições destes físicos para o eletromagnetismo (cf. Duhem, 1893; 1989).

Contudo, nem todos os físicos de envergadura desse período criticaram a noção de modelo. Boltzmann, na direção contrária àquela defendida pelo seu colega francês, não apenas foi um adepto entusiasmado da versão maxwelliana do eletromagnetismo, como foi favorável ao uso do tipo de modelo empregado ali em toda a ciência. Para ele, a rigor, a ciência não teria como dispensar o uso dessas estruturas. Boltzmann foi um dos primeiros a defender no continente as teses de Maxwell, o que o levou a ocupar posições diferentes de físicos importantes como W. Weber e Neumann, pai e filho. Além disso, o físico austríaco traduziu para o alemão alguns dos artigos do físico escocês, e justamente aqueles sobre as linhas de força (Maxwell, 1986). A tradução alemã, encomendada por Wilhelm Ostwald para a sua célebre coleção de clássicos da ciência, veio acompanhada de inúmeras notas redigidas por Boltzmann e que constituem quase que a metade do total das páginas do livro. A relação entre Boltzmann e Maxwell mereceria ser objeto de um artigo à parte, o que não será feito aqui devido ao escopo previamente estabelecido por nós neste trabalho. No entanto, é importante mencionar que a defesa de Boltzmann do uso de modelos na física origina-se na sua aceitação e incorporação de teses físicas e filosóficas formuladas por Maxwell. Mais do que isso, a defesa do uso de modelos é inspirada pela teoria de Maxwell sobre o eletromagnetismo.

Como alguns outros físicos germânicos de seu tempo, como, por exemplo, Helmholtz, que admirava as realizações científicas de Faraday, Boltzmann respeitava enormemente os resultados que Maxwell obtivera no eletromagnetismo e na teoria

cinética dos gases. O físico austríaco tomara conhecimento das teses de Maxwell através do seu professor Josef Stefan, que lhe recomendou a leitura das monografias publicadas na década de 1860 e que constituíram os primeiros passos seguros do físico escocês em direção à sua teoria do eletromagnetismo. Como já observado, Boltzmann verteu para o alemão alguns das contribuições seminais de seu colega. Em que pese a mútua admiração que sentiam respectivamente pelos seus trabalhos, os dois físicos possuíam estilos diferentes, o que gerou dificuldades intransponíveis entre os dois a ponto de Maxwell deixar de acompanhar os artigos do seu colega austríaco. Maxwell era direto, conciso e econômico, enquanto Boltzmann redigia artigos muito mais longos, onde se notava a sua tendência à prolixidade, o que desagradava ao colega escocês.

Como é frequente acontecer entre cientistas, nenhum deles se preocupou em explicar ou mesmo explicitar as influências que sofreram um do outro. Não nos parece simples caracterizar a relação entre Maxwell e Boltzmann. Caracterizá-la como influência talvez constitua um exagero, na medida em que ambos desenvolveram as suas ideias nos dois campos da física de forma independente. O mais acertado seria falar em adoção por Boltzmann de algumas concepções epistemológicas de Maxwell. Boltzmann percebeu em Maxwell a presença de ideias sobre o papel da teoria física que lhe serviam. A semelhança entre eles no domínio da epistemologia permite falar de adoção do ponto de vista de Maxwell por Boltzmann. Este último, sempre que possível, referia-se a Maxwell como tendo percebido com clareza o que uma teoria física poderia realizar. Já na sua tradução dos trabalhos de Maxwell sobre as linhas de força, ele chamava a atenção para as ideias filosóficas ali contidas. Ambos eram partidários de uma concepção de teoria física como representação da realidade. Existiria uma realidade externa independente dos observadores que seria mais compreensivelmente entendida caso fosse adotada a perspectiva mecanicista, segundo a qual o mundo seria constituído por partículas materiais (ou átomos) em movimento.

Finalmente, o uso de hipóteses, necessárias para a formulação de teorias para explicar fenômenos físicos inobserváveis diretamente, estaria garantida com o abandono de uma crença na capacidade da física em descrever, de forma definitiva e completa, esses mesmos fenômenos. As hipóteses serviriam para tentar compreender o que se passava nesse novo mundo que se descortinava para a ciência. A ousadia presente na proposição de representações seria recompensada pela confirmação advinda das experiências. Em outras palavras, ainda que ambos aceitassem e usassem uma concepção de método que incorporava claramente o papel da dedução a partir de uma base teórica arbitrária, a experiência teria a palavra final acerca da veracidade das descrições propostas. Em suma, sem que tivessem estabelecido um pacto científico-epistemológico entre si, Boltzmann e Maxwell compartilharam um mesmo conjunto de crenças científicas e filosóficas, empregado em favor de uma visão de ciência, à época

sob fortes críticas. Contra essas críticas, e para poder superá-las, o melhor a fazer era provar, por meio de realizações científicas concretas, a maior fecundidade e inteligibilidade da sua própria concepção de teoria física.

No artigo citado mais acima, que introduz o catálogo sobre modelos, Boltzmann menciona dois tipos de modelos mecânicos; o primeiro serve para a ilustração dos fenômenos, dentre eles, superfícies de ondas óticas, superfícies termodinâmicas de gesso, máquinas de ondas de todos os tipos, aparelhos para ilustração das leis de refração da luz etc. O segundo tipo ajuda na execução das operações do cálculo propriamente ditas, como a distribuição da corrente elétrica em um condutor de configuração determinada. Menciona também o exemplo de Thomson na avaliação por intermédio de procedimentos gráficos das séries e integrais que aparecem na teoria das marés e na eletrodinâmica (cf. Boltzmann, 2005 [1905]).

Além desses, Boltzmann inclui um terceiro tipo, considerando-o, na época, cada vez mais presente na física teórica. Trata-se da utilização de mecanismos elaborados com a função de fornecer uma imagem, por analogia, de um fenômeno da natureza. Ou seja, estes mecanismos não são mais concebidos como estando verdadeiramente na base dos fenômenos, mas constituem somente uma ilustração mecânica, concebida com o propósito de ajudar o entendimento. Em seguida, Boltzmann refere-se a Faraday e, sobretudo, a Maxwell. Dessa aspiração à evidência, surgiram representações gráficas de conceitos fundamentais da mecânica. Nas palavras de Boltzmann, “as mais surpreendentes e as mais amplas analogias mostraram-se entre os processos naturais, aparentemente os mais díspares” (Boltzmann, 2005 [1905], p. 21).

Antes de investigarmos o sentido preciso de tais analogias e o papel que exerciam na descrição dos fenômenos físicos, precisamos fazer uma breve descrição das teorias de Maxwell sobre o eletromagnetismo, explicando particularmente o modo como as analogias mecânicas eram empregadas.

2 A CONTRIBUIÇÃO DE MAXWELL PARA AS TEORIAS ELETROMAGNÉTICAS DO SÉCULO XIX

Segundo Robert D. Purrington (1997), o eletromagnetismo, ao lado da termodinâmica, pode ser considerado como uma das duas teorias físicas mais importantes do século XIX. Tal como a ciência do calor, as origens do eletromagnetismo foram modestas, mas, graças aos esforços de físicos como Faraday, W. Weber, Helmholtz, Hertz, Boltzmann e, principalmente, Maxwell, o eletromagnetismo chegou a se constituir, ao final do século, como uma jóia entre as muitas então presentes no interior da física (cf. Darrigol, 2000; Jungnickel & McCormach, 1986). Praticamente, todos os físicos mais impor-

tantes deste período investigaram os domínios da luz, da eletricidade e do magnetismo, procurando entender as origens e os processos de transmissão dos efeitos elétricos e magnéticos, bem como a sua relação com a luz.

O eletromagnetismo não existiu como domínio de investigação durante o século XVIII. Isso porque não existia consenso se a eletricidade e o magnetismo seriam manifestações de uma mesma força. Foram necessários os experimentos de Oersted, Faraday e Ampère para que surgisse a suspeita de que ambos seriam uma mesma coisa. Ampère, por exemplo, suspeitava que o magnetismo fosse eletricidade em movimento. De certo modo, as descobertas de Faraday foram inspiradas por essa ideia seminal do físico francês. A descoberta da indução magnética por Faraday pode ser explicada pela sua crença de que uma corrente elétrica poderia produzir um campo magnético. Recorrendo à simetria, Faraday concluiu que o contrário também poderia ocorrer.

Para que o eletromagnetismo pudesse se transformar em realidade, inúmeras inovações e avanços experimentais foram necessários. Talvez o mais importante de todos eles tenha sido a criação do conceito de campo como o responsável pela transformação do meio no qual os corpos físicos se localizam. De acordo com o conceito de campo, as forças elétricas e magnéticas se distribuiriam pelo espaço. A noção de campo origina-se nas linhas de força propostas por Faraday na primeira metade do século XIX (cf. Bezerra, 2006). Em torno da década de 1850, essa noção já era amplamente aceita entre os físicos britânicos, o mesmo não acontecendo entre os físicos que atuavam no continente europeu. De todo modo, a introdução na física do conceito de campo constituiu um dos mais importantes avanços desta ciência no século XIX.

O século XIX não foi apenas a época em que a física conseguiu formular teorias e fornecer modelos para fenômenos tão diferentes como os elétricos, os magnéticos e os do calor, mas também representou o início do declínio da chamada visão de mundo mecanicista, que procurava descrever ou explicar todos os fenômenos que ocorrem na natureza por meio da ação – principalmente do choque entre – de partículas materiais em movimento. Um dos principais responsáveis pelo enfraquecimento dessa visão de mundo foi precisamente o conceito de campo (cf. Hesse, 1961; McMullin, 2002).

Demorou ainda certo tempo para que os cientistas percebessem que o campo não necessitava de um substrato material para que tivesse realidade, ou seja, para que pudesse produzir efeitos. Durante algumas décadas, pensou-se que ao conceito de campo deveria estar irremediavelmente vinculado um substrato material – o éter – responsável pela sua capacidade de atuar. Um dos principais defensores desta visão foi William Thomson, futuro Lord Kelvin. Com o fim de explicar a estrutura física do campo, ele propôs, nas décadas de 1850 e 1860, que a ação do campo poderia ser representada por meio de vórtices moleculares no éter.

Nosso objetivo nesta seção será mostrar que há diferenças relevantes entre a visão mecanicista de Thomson e o papel dos modelos mecânicos na concepção de Maxwell. De nosso ponto de vista, sem esta distinção, seria praticamente impossível compreender a tematização da noção de modelo ocorrida nas últimas décadas do século XIX.

Como é bem conhecido, o ponto de partida da concepção maxwelliana do eletromagnetismo foi o conjunto de ideias desenvolvidas por Faraday. A obra máxima de Maxwell, o *Tratado sobre eletricidade e magnetismo*, de 1873, pode ser vista como uma tradução matemática das ideias de Faraday, explorando as implicações geométricas – portanto, matemáticas – das linhas de força. Pouco instruído nas teorias matemáticas então disponíveis, Faraday sempre preferiu, ou foi obrigado a, usar somente formulações qualitativas, ainda que bastante engenhosas e fecundas.

Desde suas primeiras publicações sobre a teoria da eletricidade, como em “Sobre as linhas de força de Faraday”, Maxwell trata a ação elétrica como análoga ao movimento de um fluido incompressível (Maxwell, 1890 [1856]). Ele esclareceu, no entanto, que não tinha a intenção de fornecer uma teoria da eletricidade baseada na realidade dos fluidos incompressíveis, mas propunha somente um exemplo mecânico que mostrava uma analogia com os fenômenos elétricos, tornando-os mais acessíveis ao entendimento.

O interesse de Maxwell pela geometria já manifesta uma nuance em relação a Thomson. Inspirado por Faraday, Maxwell definiu as linhas de força como as linhas que são sempre tangentes à força que age em um polo ou carga pontual. Como Gauss e Thomson, ele introduziu superfícies normais a estas linhas, as equipotenciais. Maxwell, contudo, já apresentava uma inovação ao considerar simultaneamente as linhas e as superfícies, e ao regular seu espaçamento, com o fim de obter informações quantitativas a partir da configuração geométrica.

Norton Wise (1981) afirma que uma das maiores inovações de Maxwell está na geometrização do conceito de campo devido a Faraday e Thomson. Diferentemente de seus contemporâneos, inclusive Thomson, que foi uma das suas principais inspirações nas investigações que o levaram à teoria do eletromagnetismo, Maxwell não partia da teoria da ação à distância nem do conceito de potencial. Seu ponto de partida eram as linhas de força de Faraday, empregadas para expressar as leis diretamente em termos do campo de forças.

Maxwell descrevia, em primeiro lugar, o movimento uniforme de um fluido incompressível e imponderável em um meio resistente contendo fontes e sumidouros. O fluido era, então, repartido em tubos unitários, dentro dos quais passa uma unidade de volume em uma unidade de tempo. A direção dos tubos nos dá a direção do

movimento do fluido e sua seção inversa determina a velocidade. Sendo assim, a configuração dos tubos define completamente o fluxo.

O historiador da física Olivier Darrigol, pelo seu lado, sustenta que, com essa ilustração, Maxwell provou um teorema análogo ao que Thomson já havia provado, sendo o seu argumento mais direto, pois se baseava na geometria dos tubos de fluxo (cf. Darrigol, 2000). Por exemplo, Maxwell chegou a empregar a seguinte consideração geométrica: o fluxo fora de uma superfície imaginária fechada permanece inalterado quando substituimos o fluido dentro da superfície por um sistema de fontes e sumidouros sobre a superfície, de modo que este sistema mantenha o fluxo em cada tubo que a intercepta. Com esta imagem, Maxwell justifica a possibilidade de trocar a integral do campo por uma soma das fontes, resultado que Gauss e Thomson tinham obtido de modo puramente analítico.

Uma das particularidades do estilo de fazer ciência adotado por Maxwell diz respeito ao uso intenso e consistente de analogias como elementos capazes de contribuir para a representação de fenômenos naturais para os quais a ciência ainda não tinha sido capaz de fornecer modelos, leis ou teorias. Assim, o físico escocês empregava a analogia com um fluxo imaginário para estudar vários domínios da eletricidade e do magnetismo. Ele pretende obter, deste modo, o fundamento matemático destas ciências experimentais.

Maxwell se distanciou mais uma vez de Thomson, ao problematizar seu uso de analogias com comentários filosóficos. Ele explicava que as “analogias físicas” fornecem um método de investigação que permite ao espírito obter uma concepção física clara, sem se comprometer com nenhuma teoria física, nem ir além da verdade ao assumir a predileção por uma hipótese. Por isso, ele se confronta com a teoria de W. Weber, muito dependente de hipóteses físicas que seriam, aos seus olhos, questionáveis. A teoria de Maxwell não é uma teoria física. Segundo ele mesmo, o seu mérito é constituir um instrumento de pesquisa temporário que não dá conta do fenômeno físico. O fluido incompressível que serve de analogia para os fenômenos eletromagnéticos é puramente imaginário.

O papel do modelo mecânico sofre uma mudança sutil em seu segundo trabalho, intitulado “Sobre as linhas físicas de força” (Maxwell, 1890 [1861]; 1890 [1862]). Maxwell constrói roldanas que se movem dentro de células e paredes elásticas, a partir de turbilhões hidráulicos e de fricção (ver figura 1). Este exemplo mecânico serve para a compreensão do eletromagnetismo, por analogia. Maxwell chamava estes modelos de “ilustrações dinâmicas” (cf. Harman, 1982).

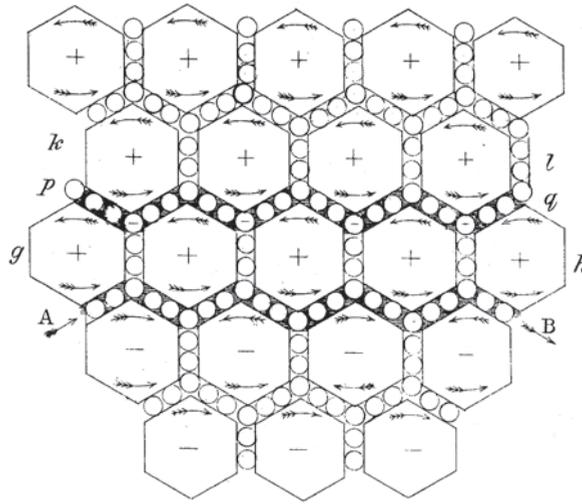


Figura 1. Diagrama originalmente publicado em Maxwell (1890 [1861]), ilustrando a estrutura tubular do seu modelo mecânico para o éter eletromagnético, que possibilitava uma visualização das ações físicas envolvendo cargas e correntes.

Em um trecho do verbete “modelo”, Boltzmann afirma que quando “a questão deixa de ser a verificação da estrutura interna real da matéria, muitas analogias mecânicas ou ilustrações dinâmicas tornam-se disponíveis com diferentes vantagens”. (cf. Boltzmann, 2013). O termo “ilustração dinâmica” é, portanto, de Maxwell e a posição de Boltzmann espelha a concepção do inglês sobre o papel dos modelos.

Com base no modelo proposto, Maxwell demonstrou a possibilidade de reduzir ações eletromagnéticas a ações mecânicas contíguas. Ele não deixou de notar, contudo, a estranheza do modelo e de explicitar a sua ignorância sobre a natureza da eletricidade. Seu conhecimento lhe permitia propor um modelo mecânico consistente que unificava a eletrostática com a eletrodinâmica, o que tornava possível deduzir as equações de campo conhecidas hoje como “equações de Maxwell”.

Suas pressuposições mecânicas não possuíam, todavia, o mesmo papel da analogia com o fluido. Neste último caso, o modelo fornecia uma concepção geométrica clara das linhas de força, e não envolvia hipóteses sobre a natureza das ações elétricas e magnéticas. A nova abordagem presumia a existência de tensões das quais as ações mecânicas derivariam. As linhas de força se referiam a essas tensões e eram, portanto, físicas. Adotando a teoria de Thomson, Maxwell supôs que estas tensões se deviam a vórtices moleculares.

Darrigol observa que essas hipóteses físicas permitiram uma compreensão dinâmica unificada do magnetismo e da eletricidade, o que estava no centro da teoria de

Maxwell (cf. Darrigol, 2000, p. 153-4). No entanto, este historiador acrescenta que Maxwell não acreditava na verdade literal de suas pressuposições mais específicas a respeito da constituição e da interconexão dos vórtices moleculares. Maxwell afirma:

A concepção de uma partícula, tendo seu movimento conectado ao de um vórtice por meio de um contato de rolamento perfeito, pode parecer, de algum modo, estranha. Eu não o sugiro como um modo de conexão existente na natureza ou como aquele que eu gostaria de atribuir como sendo uma hipótese elétrica. Ele é, no entanto, um modo de conexão concebível mecanicamente, e facilmente investigado, servindo para a formulação de conexões mecânicas reais entre os fenômenos eletromagnéticos conhecidos. Assim, eu ousou dizer que, qualquer um que entender o caráter provisório e temporário desta hipótese, será mais ajudado do que impedido por essa hipótese na sua busca por uma interpretação verdadeira do fenômeno (Maxwell, 1890 [1862], p. 451-3).

Maxwell não duvidava da verdade das relações obtidas entre campos elétricos e magnéticos, aceitando que estas relações eram obtidas a partir das leis da mecânica. Contudo, conclui Darrigol, uma combinação tão peculiar de vórtices e roldanas inertes (*idle wheels*) não poderia se encaixar na concepção maxwelliana sobre a simplicidade da natureza. Como Maxwell explicou em carta para Tait: “A natureza deste mecanismo está para o verdadeiro mecanismo assim como um planetário está para o sistema solar” (Maxwell, 1890-1895, Maxwell para Tait, 23 December 1867).

Um planetário é um dispositivo mecânico, que ilustra as posições relativas e os movimentos dos planetas e das luas no sistema solar. Os elementos componentes do sistema solar são movidos por um mecanismo com um globo representando o sol no centro e com um planeta na extremidade de cada braço. Obviamente, Maxwell não pensava que esse mecanismo estava realmente por trás da força gravitacional, mas constituía somente um modelo mecânico, capaz de nos ajudar a entender o movimento dos planetas. Este exemplo ilustra bem o papel dos modelos mecânicos na explicação dos fenômenos físicos.

Darrigol mostra também que a teoria de Maxwell sobre os campos elétricos e magnéticos, obtida por meio dos vórtices, era perfeitamente consistente e não envolvia os absurdos denunciados pelos leitores continentais de Maxwell (cf. Darrigol, 2000, p. 174). O que pode explicar, em parte, estas incompreensões é o fato de que a terminologia usada por Maxwell era realmente estranha para a época, quando não enganosa. Ele chamava de “deslocamento de eletricidade” a polarização de uma porção do dielétrico. Mas ele queria dizer somente que, se separarmos imaginariamente uma

porção do resto do dielétrico, esta porção irá apresentar cargas opostas em duas extremidades opostas. Ele não queria dizer, como entenderam alguns de seus oponentes, que uma carga elétrica era deslocada. Para dificultar ainda mais a situação, Maxwell afirmou que os movimentos da eletricidade são como os de um fluido incompressível. Mas, mais uma vez, ele queria dizer somente que o caráter fechado da corrente total torna os movimentos elétricos análogos ao fluxo de um fluido incompressível, e não que a eletricidade é um fluido incompressível (cf. Maxwell, 1873, #61).

No contexto da prática maxwelliana de fazer ciência há um aspecto importante a destacar: o papel dessas analogias mecânicas na dedução das equações que descrevem os fenômenos elétricos. O uso do simbolismo matemático por Maxwell sempre esteve subordinado à presença de uma imagem física. As equações eram traduções simbólicas de aspectos da figura e necessitavam que se recorresse imaginariamente a essa figura.

Vimos que, no artigo sobre as linhas físicas de força, Maxwell forneceu um modelo mecânico do campo magnético bastante próximo das ideias de Thomson sobre a natureza do magnetismo com base em vórtices (cf. Maxwell, 1890 [1861]; 1890 [1862]). Esse modelo dava conta das forças mecânicas de origem magnética e da indução eletromagnética. Maxwell, entretanto, modificou a teoria para incluir a ótica e a eletrostática, levando-o a deduzir as equações conhecidas hoje em dia como as “equações de Maxwell” para o campo eletromagnético. Mais tarde, em seu artigo sobre a teoria dinâmica do campo eletromagnético, Maxwell substituiu o modelo dos vórtices por uma justificativa dinâmica das equações do campo (cf. Maxwell, 1890 [1865]). Ele tratava o campo magnético como um mecanismo escondido, cujo movimento era controlado pela corrente elétrica. Maxwell combinou suas equações do campo para obter a equação da onda e constituiu uma ótica eletromagnética que considerava a luz como um campo eletromagnético ondular.

Na nova teoria dinâmica, melhor desenvolvida em seu *Tratado* de 1873, Maxwell define a corrente elétrica como uma transferência de polarização e a carga como uma descontinuidade de polarização (Maxwell, 1873). A polarização aqui é um conceito primitivo; não pode ser entendido como um deslocamento microscópico de carga elétrica.

Segundo a interpretação de Darrigol, “a teoria de Maxwell era uma pura teoria de campo, ignorando a dicotomia moderna entre eletricidade e campo” (Darrigol, 2000, p. 173). Em seguida, este historiador defende que os conceitos de campo, carga e corrente possuem um sentido macroscópico e esta teoria macroscópica está no centro das preocupações de Maxwell. A necessidade de uma imagem mais detalhada da conexão entre éter e matéria ocupa uma parte periférica de sua obra.

Outros pesquisadores, entre os quais Siegel (1975; 1991), mostram que as inconsistências notadas nestes trabalhos de Maxwell por comentadores mais antigos se devem ao fato destes últimos não terem percebido que os conceitos mais relevantes

para ele são os de carga e corrente, que devem ser distinguidos dos outros propostos perifericamente no *Tratado*.¹

A teoria de Maxwell exhibe uma metodologia, que marcou a segunda metade do século XIX. Ele usa as ideias dinâmicas que caracterizaram o pensamento matemático de Thomson e Tait, que não foram forjadas por matemáticos puros, mas recorriam frequentemente a imagens físicas. No entanto, Maxwell privilegiava igualmente a argumentação geométrica e as relações topológicas que podiam ter implicações físicas. A partir de analogias mecânicas ilustrativas, deduziu equações que podiam ser vistas como a verdadeira “explicação” por detrás dos fenômenos eletromagnéticos. Nas palavras de Harman,

a teoria do éter físico de Maxwell de 1861-62 forneceu uma teoria sistemática da propagação das forças elétricas e magnéticas, empregando um éter mecânico que era imaginado como um modelo ilustrativo ao invés de uma explicação física definitiva. Ele refinou a sua teoria do campo em um artigo publicado em 1865 e, apesar de perseverar no apoio à sua interpretação mecânica, enfatizando que os fenômenos eletromagnéticos eram produzidos pelo movimento de partículas da matéria no éter, ele abandonou toda e qualquer tentativa de formular um modelo mecânico específico do campo, usando, ao invés disso, os métodos da dinâmica analítica de Lagrange, um formalismo geral não vinculado a qualquer tipo de modelo mecânico (Harman, 1982, p. 6).

É certo que Maxwell jamais abandonou a sua crença inicial na validade e na fecundidade dos modelos mecânicos, mas também é correto afirmar que ele, com o passar dos anos, passou a preferir explicações mais gerais. Isto o levou a afirmar que os modelos mecânicos não seriam representações fiéis, como cópias, da realidade, mas indicariam a possibilidade de os fenômenos eletromagnéticos serem, em princípio, descritos com o uso de mecanismos. Ou seja, a construção mecânica conferiria inteligibilidade a tais fenômenos.

¹ A questão de saber se cargas e correntes são conceitos fundamentais ou derivados em Maxwell é complexa. As referências citadas mostram, por si só, que é possível fazer leituras diferentes sobre o estatuto dessas noções na obra do físico inglês. Ainda assim, permitimo-nos trazer uma citação. “Segundo Maxwell, então, a corrente de condução era efetivamente uma série contínua de cargas e descargas. Como nenhum condutor, raciocinava ele, tem falta de capacidade indutiva (...), mas como todos os condutores se recusam a sustentar permanentemente a indução, ela decai em todos eles em taxas determinadas pela razão entre sua condutividade e sua capacidade. A corrente de condução é esse processo de crescimento e decaimento do deslocamento, (...) em um meio dado. A questão remanescente é como quantificar esse processo. Esse problema foi prontamente resolvido por Maxwell, mas às expensas de um certo grau de obscuridade conceitual” (Buchwald, 1985, p. 29).

Se quisermos caracterizar Maxwell como integrante da corrente reducionista – que buscava exprimir os mecanismos que explicam os fenômenos – deveremos admitir, no mínimo, o caráter particular de seu ponto de vista. A esse respeito, Darrigol afirma que:

ele inaugurou um tipo moderado de reducionismo mecânico, no qual o mecanismo conector não era mais exibido. A mera suposição da existência de um tal mecanismo implicava a existência de uma Lagrangeana, da qual a evolução de quantidades empiricamente controláveis podia ser deduzida (Darrigol, 2000, p. 175).

O caráter problemático da adesão de Maxwell ao mecanicismo já foi analisado por diversos autores, como Chalmers (2001) e Bezerra (2006), mas já estava presente em Klein (1972) e Abrantes (1998a). A singularidade do mecanicismo de Maxwell é tão evidente que sua teoria despertou a antipatia de Thomson. Mesmo exprimindo alguma admiração por aspectos do pensamento de Maxwell, Thomson afirmava que sua teoria eletromagnética da luz consistia em um passo atrás em relação à procura de um movimento mecânico. A teoria da luz deveria ser fundada sobre modelos mecânicos verdadeiros e o tratamento lagrangeano de mecanismos ocultos não podia ser considerado como um fundamento mecânico satisfatório. Maxwell encarava seus métodos dinâmicos abstratos como provisórios, mas, desde seus primeiros trabalhos, ele extraía dos modelos mecânicos noções que não pertenciam ao campo original de estudo, e extrapolavam modelos mecânicos ou geométricos específicos. Com esta metodologia, ele obteve conceitos fundamentais da teoria, como a distinção entre fluxo, força, e a corrente de deslocamento. Mas este uso da analogia não agradava Thomson.²

Como dissemos, muitos cientistas não entenderam na época o papel das analogias mecânicas no trabalho de Maxwell e pensaram que ele estivesse defendendo que estes mecanismos estivessem realmente por trás dos fenômenos elétricos. Como este não era o caso, torna-se possível questionar se os modelos mecânicos empregados por Maxwell nos autorizam a classificá-lo como mecanicista, ao menos em sentido estrito. Em termos gerais, é certo que ele era defensor de se considerar a mecânica como a base da física: “Portanto, a primeira parte da ciência física diz respeito à posição relativa e ao movimento dos corpos” (Maxwell, s.d., p. 2). Mas isso não leva à conclusão de que a explicação de todos os fenômenos devia ser mecânica.

² Thomson afirma: “eu nunca fico satisfeito até ter feito um modelo mecânico de uma coisa. Se eu posso fazer um modelo mecânico, eu posso entendê-la. Na medida em que não posso fazer um modelo mecânico para todo o caminho, eu não posso entender; e eis por que eu não posso apreender a teoria eletromagnética” (1884). Esta citação é extraída de uma série de palestras proferidas por Thomson, em 1884, na Universidade John Hopkins em Baltimore. O conteúdo dessas notas foi revisto por Thomson (1904), mas a frase acima tinha sido excluída.

3 A RECEPÇÃO DOS TRABALHOS DE MAXWELL SOBRE O ELETROMAGNETISMO, O PLURALISMO TEÓRICO E O PAPEL DA ANALOGIA

Maxwell, assim como Boltzmann e Poincaré, integram um grupo, à época relativamente diminuto, que valorizava as formulações hamiltoniana e lagrangiana das leis da mecânica, herdadas do final do século xvii e início do século seguinte. Em uma das muitas preleções que pronunciou para iniciar os seus cursos de mecânica, Boltzmann assim se expressou:

sobre esse fundamento obtido por Newton os melhores analistas de todas as nações (como Lagrange, Laplace, Euler e Hamilton) continuaram a construir, resultando, a partir da mecânica analítica, uma criação que é admirada com razão como modelo para qualquer teoria físico-matemática (Boltzmann, 2005, p. 127).

Anos antes de proferir a declaração acima, e no mesmo texto que serviu de introdução ao volume sobre modelos referido parágrafos acima, o físico austríaco, na mesma linha de raciocínio, afirmava que

a partir dos fundamentos elaborados por Galileu e Newton foi alcançado, *principalmente pelos grandes matemáticos parisienses da época da Revolução Francesa, e até mesmo posteriormente*, um método preciso e rigoroso para a física teórica. Suposições mecânicas foram feitas, por meio das quais conseguiu-se explicar um grupo de fenômenos naturais, isto por meio de princípios da mecânica alçados até a evidência geométrica. É bem verdade que se estava consciente de que essas suposições não podiam ser corretamente encaradas como uma certeza apodítica (Boltzmann, 2005 [1905], p. 18; grifo nosso).

Em outras palavras, com os métodos propostos por Lagrange, Poisson e Hamilton, para ficarmos com alguns nomes, passou a ser possível formular leis descrevendo os movimentos dos corpos sem que fosse preciso tomar como verdadeiras as suposições referentes às suas naturezas ou constituições internas. As generalizações alcançadas com o uso desses novos métodos permitiam, inclusive, aumentar o grau de unidade interna presente nas teorias físicas.

A menção aos nomes de Maxwell, Duhem, Poincaré e Boltzmann nos parece suficiente para ilustrar o interesse pela busca de uma formulação unificada dos fenômenos elétricos e magnéticos, que consumiu esforços de físicos de diferentes nacionalidades. Ainda assim, não nos parece exagerado afirmar que, entre os alemães, esse interesse pode ser comparado ao dos físicos britânicos. Além dos nomes de Hertz,

Weber e Carl Neumann, já citados anteriormente, pode-se acrescentar os de Gauss e, acima de tudo, o de Helmholtz, o qual se opôs ao modelo de ação à distância proposto por Weber, tal como já havia feito o próprio Maxwell. Deve-se observar, entretanto, que Helmholtz manteve-se fiel à ação à distância em alguns dos seus artigos publicados ao longo da década de 1870. Além de propor seus próprios modelos a respeito de como se propagariam os efeitos eletromagnéticos, Helmholtz foi seminal também devido ao fato de que muitas das primeiras propostas de comprovação empírica dos modelos maxwellianos foram de sua autoria. Boltzmann, no início da década de 1870, quando estagiou em Berlim, e Hertz, dez anos depois a partir de um prêmio proposto por Helmholtz, realizaram testes sugeridos por este último para comprovar a validade das ideias do físico escocês (cf. D'Agostino, 2000).

Hertz deu duas contribuições fundamentais para o desenvolvimento da teoria de campo. A primeira delas se refere à propagação das ondas eletromagnéticas e a segunda consiste numa reformulação radical da estrutura conceitual das equações de campo tal como propostas por Maxwell no *Tratado*. Segundo Hertz, a teoria de Maxwell se reduzia às suas equações, o que nos faz pensar que os modelos, muitos deles mecânicos, elaborados pelo segundo, não eram de sua predileção: “À questão, ‘O que é a teoria de Maxwell?’, eu não conheço outra resposta, mais breve ou mais clara, do que a seguinte: a teoria de Maxwell é o sistema de equações de Maxwell” (Hertz, 1962, p. 21). Em 1884, por exemplo, Hertz analisou as relações entre o campo e as forças centrais das teorias do eletromagnetismo, mostrando que a pressuposição de Maxwell sobre a propagação das forças elétricas era consistente com as leis então conhecidas. No entanto, Hertz se recusou a admitir a validade das hipóteses físicas sobre a presença de um éter eletromagnético como avançado por Maxwell. Tratava-se, em suma, de uma consistência lógico-formal. Ao final da década de 1880, Hertz realizou a série de experimentos que lhe permitiram produzir ondas elétricas e medir os seus comprimentos de onda. Com o cálculo da frequência do oscilador, ele foi capaz de determinar que a velocidade das ondas elétricas seja igual à velocidade da luz.

No centro das inúmeras discussões a respeito do eletromagnetismo encontrava-se precisamente a questão do que seria responsável pela inteligibilidade das teorias que o representavam. Ainda aqui, é importante citar o nome de Maxwell, uma vez que ele, mesmo tendo proposto um modelo mecânico para compreender os fenômenos eletromagnéticos, mostrou que a inteligibilidade da teoria eletromagnética dependia somente do formalismo matemático adotado para representá-la. Segundo Harman: “Maxwell argumentou que a linguagem matemática das equações diferenciais parciais era a expressão matemática da estrutura física do campo” (Harman, 1982, p. 73).

Isto exprime uma clara consciência da abstração exercida pelo emprego da análise matemática. Nesta época, o uso das palavras “abstração” e “analogia” é recorrente

em diversos escritos, desde os tratados físicos, como os de Mach e Hertz, como em trabalhos de outras áreas, como a economia de Pareto. Um pouco mais tarde, nas obras epistemológicas de Poincaré, a noção de analogia se tornou fundamental para discutir a relação entre física e matemática. Deve-se, contudo, observar que já nas suas preleções sobre ótica proferidas na Sorbonne na última década do século XIX, e que incluíram as teses maxwellianas, Poincaré comentava esse novo modo de teorizar incorporado pela física e concretizado nos modelos.

À medida que o século XIX se aproximava do seu término, as tensões crescentes entre representações físicas e matemáticas para os sistemas mecânicos, bem como as discussões sobre a relação entre representações mecânicas e realidade, passaram a desempenhar um papel muito importante na formulação das teorias físicas. Um dos resultados epistemológicos obtidos nas muitas discussões em torno desse tema foi a conscientização de alguns físicos a respeito do fosso existente entre teoria e realidade: a primeira não poderia alimentar pretensões de representar completamente a segunda.

Uma segunda consequência epistemológica, mas igualmente válida no plano ontológico, extraída pelos físicos do período em tela, particularmente valorizada por Henri Poincaré, foi o pluralismo teórico: os mesmos fenômenos poderiam ser representados diferentemente, por exemplo, através de um pleno de forças, de fluido contínuo ou ainda de um éter específico. Além da enunciação da tese do pluralismo teórico, também defendida por Maxwell – “os fatos do eletromagnetismo são tão complicados e variados, que uma explicação de certo grupo deles através de muitas e diferentes hipóteses deve ser de interesse, e não apenas para os físicos” (Maxwell, 1986, p. 52) – e Boltzmann, Poincaré deve ser lembrado como o primeiro cientista, no contexto francês, a apresentar aos estudantes as ideias de Maxwell sobre o eletromagnetismo (cf. Abrantes, 1998, cap. 7).

No que diz respeito à validade e o interesse intrínseco da teoria do eletromagnetismo proposta por Maxwell, Poincaré e Duhem estavam em lados opostos. É certo que o último respeitava essa teoria em função da presença de muitas ideias e teses inovadoras. Contudo, Duhem não podia aceitar as bases sobre as quais se assentavam essa teoria, bem como a maioria absoluta das outras propostas pelos físicos britânicos. Em 1893, ele publicou um artigo intitulado “A escola inglesa e as teorias físicas”, no qual dizia, por exemplo, o seguinte:

Compreender um fenômeno físico é, para os físicos da escola inglesa, compor um modelo que imita esse fenômeno; por isso, compreender a natureza das coisas materiais será imaginar um mecanismo, cujo funcionamento representará, simulará as propriedades dos corpos. A escola inglesa é, pois, inteiramente partidária das explicações puramente mecânicas dos fenômenos físicos.

Esta certamente não é uma característica suficiente para distinguir as doutrinas inglesas das tradições científicas que florescem em outros países; as teorias mecânicas são originárias de um gênio francês, o gênio de Descartes; eles reinaram por muito tempo sem contestação na França assim como na Alemanha; o que distingue a escola inglesa, não é ter tentado a redução da matéria a um mecanismo, é a forma particular de suas tentativas de atingir esse fim (Duhem, 1989, p. 67).

A particularidade inglesa, referida por Duhem, é a relação de analogia entre a realidade e os modelos propostos com a finalidade de representá-la. Ou seja, ele desqualifica justamente o aspecto que destacamos aqui como um traço inovador da concepção de Maxwell sobre a utilidade do modelo. Posição diferente foi adotada por Boltzmann, que reconhecia o papel dos modelos na dedução das equações; na tradução alemã que publicou dos artigos de Maxwell sobre as linhas de força, escrevia o seguinte:

A revolução provocada pelas equações de Maxwell, não apenas na teoria da eletricidade e na óptica, mas também nas nossas intuições (*Anschauungen*) das essências e na tarefa de uma teoria física, é tão bem conhecida, que se torna desnecessário descrevê-la aqui (Boltzmann *apud* Maxwell, 1986, p. 85).

As modificações sugeridas por Boltzmann dizem respeito não apenas ao surgimento de uma nova concepção de teoria física, mas também ao já referido pluralismo. O próprio Maxwell em seus textos sobre as linhas de força já tinha declarado que a complexidade e a variabilidade dos fatos eletromagnéticos como que impunham o recurso a muitas e diferentes hipóteses para que a suas explicações fossem possíveis. Investigações posteriores, argumentava Maxwell, seriam capazes de fornecer indícios e argumentos para a escolha de uma dentre essas muitas possibilidades explicativas.

Boltzmann incorporou a tal ponto as posições de Maxwell que, podemos afirmar, elas constituem o núcleo duro de sua própria formulação filosófica do que é uma teoria científica e do que cabe a ela realizar. Na nossa apresentação do verbete modelo, mostramos o papel preponderante do pluralismo teórico na visão de Boltzmann sobre a ciência, e a importância da noção de modelo na defesa de suas ideias (cf. Roque & Videira, 2013).

Depois de Hertz, também ele influenciado ainda que em parte pelas concepções de Maxwell, era incontornável discutir o papel das novas teorias sobre o eletromagnetismo e, portanto, seus métodos. É neste contexto que devemos entender a defesa do uso de modelos e de um novo modo de teorizar os fenômenos naturais. Esta necessidade explica a passagem de uma concepção de mecânica mais tradicional para um novo

ponto de vista, que requer um novo sentido para o termo modelo, no qual se destaca a relação de analogia.

Este é o primeiro passo para que a utilização de modelos possa ser estendida com igual sucesso a outras áreas, uma vez que a relação entre o fenômeno e o modelo é somente de analogia. A partir daí, o objetivo dos modelos pode ser o de descrever, e não explicar, o mundo dos fenômenos.

Para dar somente um exemplo da discussão da época sobre a utilização de modelos matemáticos para além da física, em áreas como a economia, a biologia ou a sociologia, citamos um artigo de Volterra, que pelo número de republicações,³ teve bastante repercussão na época. No início do século passado, ele afirmava que

ao passo que perdíamos a esperança de explicar todos os fenômenos físicos por leis análogas à da gravitação universal ou por um mecanismo único, concretizava-se uma ideia que compensava, ou quase, a queda deste edifício de esperanças. Tratava-se da ideia dos modelos mecânicos, a qual, se não satisfaz aqueles que procuram novos sistemas de filosofia natural,⁴ chega a contentar provisoriamente aqueles que, mais modestos, se apegam a qualquer analogia matemática que consiga dissipar a escuridão que envolve tantos fatos naturais (Volterra, 1901-1902, p. 23).

Em seguida, Volterra exemplifica os diversos modelos que podem ser usados na economia, como os de Pareto, ou a estatística de Galton na biologia etc. Podemos ver aí, como faz Israel, as origens da noção de modelo matemático, tal como se desenvolveu a partir dos anos 1920. Não obstante essa rápida disseminação do emprego de modelos em outras áreas do conhecimento científico, nós não podemos compreender o seu contexto sem nos debruçarmos sobre o modo como as teorias físicas abriram caminho para uma nova concepção de modelo mecânico na virada do século XIX para o século XX.⁵

AGRADECIMENTOS. Tatiana Roque agradece à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) pelo apoio por meio do programa Jovem Cientista do Nosso Estado. Antonio Augusto Passos Videira agradece ao CNPq pela Bolsa de Produtividade e à UERJ/FAPERJ pela bolsa Prociência. Os autores agradecem os comentários úteis e enriquecedores feitos pelos dois árbitros da revista.

3 Este texto foi escrito inicialmente em 1901 para a conferência inaugural da Universidade de Roma. Recebeu a seguir várias publicações (cf. Volterra, 1901; 1901-1902; 1906a; 1906b).

4 Ainda que não esteja explicitado no texto, podemos ver aqui uma referência a Thomson. Seu clássico livro, escrito com Tait, chama-se *Tratado de filosofia natural (Treatise on natural philosophy)* e busca justamente novos sistemas de filosofia natural.

Tatiana ROQUE

Instituto de Matemática,
Universidade Federal do Rio de Janeiro,
Jovem Cientista do Nosso Estado,
Fundação de Amparo à Pesquisa do
Estado do Rio de Janeiro, Brasil.
tati@im.ufrj.br

Antonio Augusto PASSOS VIDEIRA

Instituto de Filosofia e Ciências Humanas,
Universidade Estadual do Rio de Janeiro,
Bolsa do Conselho Nacional de Pesquisa
Científica e Tecnológica, Brasil.
guto@cbpf.br

The notion of model at the turn of the 20th century

ABSTRACT

This article describes the way in which the idea of model began to be discussed in science, in particular in physics, towards the end of the 19th century. Physics is perhaps the first scientific domain that explicitly and consciously made use of models in a way that was understood to involve abandoning any attempt faithfully to represent natural phenomena. The representation of electromagnetic phenomena by means of analogies was in question.

KEYWORDS • Model. Maxwell. Electromagnetism. Representation. Boltzmann. Physics in the 19th century.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRANTES, P. *Imagens de natureza, imagens de ciência*. Campinas: Papirus, 1998.
- ABRANTES, P. A recepção das teorias de J. C. Maxwell. In: ABRANTES, P. *Imagens de natureza, imagens de ciência*. Campinas: Papirus, 1998a. p. 205-29.
- BEZERRA, V. A. Maxwell, a teoria do campo e a desmecanização da física. *Scientiae Studia*, 4, 2, p. 177-220, 2006.
- BOLTZMANN, L. Sobre os métodos da física teórica. In: BOLTZMANN, L. *Escritos populares*. São Leopoldo: Editora Unisinos, 2005 [1905]. p. 15-24.
- _____. Modelo. Tradução C. de A. Machado. *Scientiae Studia*, 11, 2, p. 381-9, 2013 [1902].
- BUCHWALD, J. Z. *From Maxwell to microphysics: aspects of electromagnetic theory in the last quarter of the nineteenth century*. Chicago/London: The University of Chicago Press, 1985.
- CHALMERS, A. Maxwell, mechanism, and the nature of electricity. *Physics in Perspective*, 3, p. 425-38, 2001.

- D'AGOSTINO, S. *A history of the ideas of theoretical physics: essays on the nineteenth and twentieth century physics*. Dordrecht: Kluwer Academic, 2000.
- DARRIGOL, O. *Eletrodinamics from Ampère to Einstein*. Oxford: Oxford University Press, 2000.
- DUHEM, P. L'école anglaise et les théories physiques. A propos d'un livre récent de W. Thomson. *Revue des Questions Scientifiques*, 2ème série, IV, p. 345-78, 1893.
- _____. A escola inglesa e as teorias físicas. Tradução P. R. Mariconda. *Ciência e Filosofia*, 4, p. 63-84, 1989.
- DYCK, W. *Katalog mathematischer und mathematisch physikalischer Modelle, Apparate, und Instrumente*. Hildesheim/Zürich/New York: George Olms Verlag, 1994 [1892].
- GUÉNARD, F. & LELIÈVRE, G. (Org.). *Penser les mathématiques*, Paris: Seuil, 1982.
- HARMAN, P. M. *Energy, force, and matter: the conceptual development of nineteenth-century physics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1982.
- HERTZ, H. *Electric waves being researches on the propagation of electric action with finite velocity through space*. Tradução D. E. Jones. New York: Dover, 1962.
- HESSE, M. *Forces and fields: A study of action at a distance in the history of physics*. London: Thomas Nelson, 1961.
- _____. *Models and analogies in science*. London: Sheed and Ward, 1963.
- ISRAEL, G. *La mathématisation du réel*. Paris: Seuil, 1996.
- JUNGNICKEL, C. & MCCORMACH, R. *Intellectual mastery of nature: theoretical physics from Ohm to Einstein*. Chicago: The Chicago University Press, 1986. 2v.
- KLEIN, M. J. Mechanical explanation at the end of the 19th century. *Centaurus*, 17, p. 58-81, 1972.
- LEVY-LEBLOND, J.-M. Physique et mathématiques. In: GUÉNARD, F. & LELIÈVRE, G. (Org.). *Penser les mathématiques*, Paris: Seuil, 1982. p. 195-210.
- LITTRÉ, E. *Dictionnaire de la langue française*. Paris: Hachette, 1863-1872. 4v. Disponível em: <<http://francois.gannaz.free.fr/Littre/accueil.php>>. Acesso em: 10 mai. 2011.
- MAXWELL, J. C. On Faraday's lines of force. In: NIVEN, W. D. (Ed.). *The scientific papers of James Clerk Maxwell*. Cambridge: Cambridge University Press, 1890 [1856]. p. 155-229.
- _____. On physical lines of force (Part I and II). In: NIVEN, W. D. (Ed.). *The scientific papers of James Clerk Maxwell*. Cambridge: Cambridge University Press, 1890 [1861]. p. 45-88.
- _____. On physical lines of force. (Part III and IV). In: NIVEN, W. D. (Ed.). *The scientific papers of James Clerk Maxwell*. Cambridge: Cambridge University Press, 1890 [1862]. p. 489-513.
- _____. A dynamical theory of the electromagnetic field. In: NIVEN, W. D. (Ed.). *The scientific papers of James Clerk Maxwell*. Cambridge: Cambridge University Press, 1890 [1865]. p. 586-97.
- _____. *A treatise on electricity and magnetism*. Oxford: MacMillan/The Clarendon Press, 1873. Disponível em: <http://posner.library.cmu.edu/Posner/books/book.cgi?call=537_M46T_1873_VOL_1>. Acesso em: 10 mai. 2011.
- _____. *Über physikalische Kraftlinien*. Tradução e notas L. Boltzmann. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 1986.
- _____. *Matter and motion*. New York: Dover, s.d.
- McMULLIN, E. The origins of the field concept in physics. *Physics in Perspective*, 2, 2002, p. 13-39, 2002.
- NEUENSCHWANDER, E. & BOUQUIAUX, L. (Org.). *Science, philosophy and music*. Turnhout: Brepols, 2002. (Proceedings of the xxth International Congress of History of Science, v. 20).
- NIVEN, W. D. (Ed.). *The scientific papers of James Clerk Maxwell*. Cambridge: Cambridge University Press, 1890.
- PURRINGTON, R. D. *Physics in the nineteenth century*. New Brunswick: Rutgers University Press, 1997.
- SIEGEL, D. Completeness as a goal in Maxwell's electromagnetic theory. *Isis*, 66, p. 361-8, 1975.
- _____. *Innovation in Maxwell's electromagnetic theory: molecular vortices, displacement current and light*. Cambridge: Cambridge University Press, 1991.

- THOMSON, W. *Notes of lectures on molecular dynamics and the wave theory of light. Delivered at the John Hopkins University*. Baltimore: John Hopkins, 1884.
- _____. *Baltimore lectures on molecular dynamics and the wave theory of light*. London: Clay and Sons, 1904.
- VIDEIRA, A. A. P. Boltzmann: um físico-filósofo. *Ciência Hoje*, 16, 96, p. 44-9, 1993.
- _____. Modelo: a noção síntese das concepções filosóficas de Boltzmann. *Scientiae Studia*, 11, 2, p. 373-80, 2013.
- VOLTERRA, V. Sui tentate di applicazione delle matematiche alle scienze biologiche e sociali. *Giornale degli Economisti*, 23, p. 436-58, 1901.
- _____. Sui tentate di applicazione delle matematiche alle scienze biologiche e sociali. *Annuario della Università di Roma*, p. 3-28, 1901-1902.
- _____. Les mathématiques dans les sciences biologiques et sociales. *La Revue du Mois*, 1, p. 1-20, 1906a.
- _____. Le matematiche nelle scienze biologiche e sociale. *Archivio di Fisiologia*, 3, p. 175-91, 1906b.
- WARWICK, A. *Masters of theory: Cambridge and the rise of mathematical physics*. Chicago/London: The University of Chicago Press, 2003.
- WISE, N. The flow analogy to electricity and magnetism – Part 1: William Thomson's reformulation of action at a distance. *Archive for History of Exact Sciences*, 25, p. 19-70, 1981.
- ZERNER, M. The mathematical model: epistemological tool or ideological notion? In: NEUENSCHWANDER, E. & BOUQUIAUX, L. (Org.). *Science, philosophy and music*. Turnhout: Brepols, 2002. (Proceedings of the xxth International Congress of History of Science, v. 20). p. 9-14.

