



Maxwell, a teoria do campo e a desmecanização da física

Valter ALNIS BEZERRA



RESUMO

Este artigo examina o desenvolvimento conceitual da teoria clássica do campo – principalmente a eletrodinâmica de Maxwell, tal como apresentada nos artigos fundadores de 1856, 1861/1862 e 1864 e no *Treatise on electricity and magnetism* – com vistas a compreender o seu papel na crise da imagem mecanicista de natureza. A posição de Maxwell como um personagem de transição entre a visão mecanicista e a pós-mecanicista emerge com clareza ao se analisar a tensão que se estabelece, em seus textos sobre eletrodinâmica, entre a sua metodologia científica, por um lado, e a sua ontologia e axiologia cognitiva, por outro. Essa tensão reflete a própria tensão que existe entre mecanicismo e desmecanização. Atenção especial é dada à análise do papel desempenhado pelo conceito de campo, os modelos mecânicos, as analogias, o formalismo lagrangiano e o sempre mutante conceito de éter. Para efetuar essa análise, desenvolvemos uma taxonomia dos diferentes tipos de mecanicismo, valendo-nos ainda de conceitos provenientes do modelo reticulacional de racionalidade científica de Larry Laudan. Além da eletrodinâmica de Maxwell, são discutidos alguns elementos do período anterior a ele – em particular o debate acerca da ação a distância e as concepções de Faraday sobre força e campo – o que permite contextualizar melhor o seu programa de pesquisa em eletrodinâmica. Também se discutem alguns desenvolvimentos posteriores a Maxwell em teoria do campo, visando obter uma noção mais clara de como o processo de desmecanização prosseguiu a partir daí, até finalmente se completar no século xx, com o advento das teorias da relatividade restrita e geral, a emancipação plena do conceito de campo e a derrocada da visão de mundo mecanicista.

PALAVRAS-CHAVE • Ação a distância. Analogias mecânicas. Campo eletromagnético. Desmecanização. Einstein. Eletromagnetismo. Éter. Faraday. Maxwell. Mecanicismo.

INTRODUÇÃO

Neste artigo pretendo discutir alguns aspectos do processo pelo qual o surgimento da teoria clássica (no sentido de não-quântica) do campo contribuiu para a derrocada da imagem mecanicista de natureza e de ciência a partir da metade do século xix. Considero a teoria clássica do campo eletromagnético, ou eletrodinâmica clássica, de Faraday, Maxwell e seus sucessores, como um elemento fundamental (ainda que não o único) no processo de desmecanização da física.

Uma descrição do pano de fundo em relação ao qual se deram os principais desenvolvimentos inclui: as diferentes acepções assumidas pelo “mecanicismo” entre os séculos xvii e xix; a polêmica sobre a existência ou não de ação a distância; e a proliferação das teorias de fluidos sutis. A isso serão dedicadas as seções 1 e 2. Desejo notar que realizo um breve recuo até os séculos xvii e xviii apenas com o intuito de delinear o pano de fundo para o drama que terá lugar no século xix, e que constitui, esse sim, meu foco de interesse principal.

A James Clerk Maxwell, visto aqui como um personagem central dentro do processo de transição entre uma física mecanicista e uma física desmecanizada, serão dedicadas as seções 3 a 5. É minha convicção que o caso de Maxwell permite apreciar de maneira particularmente vívida as vicissitudes desse processo. Afinal, pode-se dizer que Maxwell *viveu* tal transição em sua obra. No processo de transição entre os dois enfoques, merecem destaque os seguintes aspectos: a renovação na ontologia das teorias físicas, com a inclusão do conceito de campo; a ampla aplicabilidade do formalismo lagrangiano; e o insucesso na busca de mecanismos subjacentes para explicar as interações. Na seção 4, apresento resumidamente as principais inovações da teoria eletromagnética de Maxwell, tal como exposta sucessivamente nos artigos de 1856, 1861/1862, 1864 e no *Treatise on electricity and magnetism*, publicado pela primeira vez em 1873.

Na seção 5, procuro mostrar que subsiste uma tensão entre a metodologia de Maxwell, por um lado, e a sua axiologia e ontologia, por outro. Nessa tensão podemos encontrar a própria tensão que se estabelece entre mecanicismo e desmecanização. O modelo reticulado de racionalidade de Larry Laudan é chamado a desempenhar um papel relevante na análise dessa tensão metodologia/axiologia.

Maxwell ainda atribui uma função ao *éter* em sua teoria eletromagnética. O debate do século xix sobre a dispensabilidade ou não do *éter* será abordado na seção 6. Também cabe destacar o caráter relativisticamente invariante da teoria eletromagnética, que seria reconhecido bem depois de Maxwell. Embora a eletrodinâmica clássica tenha desempenhado um papel crucial, o processo de desmecanização da física somente iria se completar no início do século xx, com a teoria do campo gravitacional (relatividade geral) de Einstein. A era relativística será considerada na seção 7, principalmente no que se refere a sua “herança eletromagnética” e à emancipação do conceito de campo.

Este texto insere-se em uma pesquisa que estou desenvolvendo atualmente, em uma investigação sobre a aplicação de modelos de racionalidade científica – em particular o modelo reticulacional, reformulado em termos de justificação coerencial e equilíbrio reflexivo – ao entendimento das transformações metodológicas e axiológicas na física dos séculos xix e xx. Este texto descreve uma das etapas desse projeto.¹

I PRÓLOGO: O(S) MECANICISMO(S)

Uma vez que se trata de estudar o processo de desmecanização da física, começo por analisar o conceito de “mecanicismo”. Trata-se, claramente, de um termo multifacetado e polissêmico, que assumiu diferentes conotações ao longo do tempo. Será útil, para a nossa análise subsequente, tentar identificar alguns dos significados que o termo pode assumir.² A seguir apresentamos o esboço de uma taxonomia dos diferentes tipos de mecanicismo.

(i) Mencionaremos em primeiro lugar o mecanicismo “clássico”, por assim dizer, que consiste no ideal de reduzir todos os fenômenos físicos a um quadro conceitual cuja ontologia (este termo é empregado aqui com a condição de que não se pense em “ontologia” no sentido contemporâneo) inclui basicamente, como qualidades primárias, a matéria e o movimento.³ Este seria um sentido *ontológico* de mecanicismo, aquilo que se denomina tradicionalmente de uma *concepção mecanicista de natureza*.

Costuma-se sublinhar, falando em termos negativos, que o mecanicismo clássico implica a rejeição de várias teses: (i) a rejeição de quaisquer propriedades ativas da matéria (isto é, a matéria é essencialmente passiva); (ii) a rejeição das diferentes naturezas ou essências específicas: o mundo físico teria, em vez disso, uma só natureza homogênea; (iii) a rejeição da ação a distância: toda ação se dá por contato; (iv) a rejeição das causas finais, com a redução de toda causalidade às causas eficientes; (v) a rejeição de agentes incorpóreos capazes de mover os corpos materiais (esta tese, como se sabe, gera problemas se se desejar incluir a mente ou o espírito e explicar as suas interações com um corpo). Vale lembrar que a primeira aceção de mecanicismo pode assumir uma forma plenista (rejeitando o vazio) ou uma forma atomista (admitindo o vazio).

¹ Apenas para referência do leitor, as etapas anteriores do projeto versavam sobre a renormalização na teoria quântica do campo (Bezerra, 2003a; 2004a) e sobre a antiga teoria atômica de Bohr, Sommerfeld, Kramers e Slater (Bezerra, 2003b; 2004b).

² Para algumas dessas aceções, cf. Abrantes, 1998, p. 82-3 e 222-3, bem como os Cap. 2 e 3; Chalmers, 2001, p. 425-7; Rossi, 2001, p. 242-7; Turner, 1940; Westfall, 1977.

³ Houve diferentes variantes dessa ontologia. Para Descartes, a qualidade primária por excelência era a extensão, ao passo que para Galileu as qualidades primárias eram a grandeza, a figura e o movimento; para Boyle, a extensão, a forma, a impenetrabilidade e o movimento; e para Newton a extensão, a dureza, a impenetrabilidade, a mobilidade e a inércia (cf. Abrantes, 1998, p. 60). Vale lembrar que o mecanicismo clássico, ao distinguir as qualidades primárias das secundárias e limitar rigorosamente a lista das qualidades primárias, favoreceu o projeto de *matematização* da ciência.

(2) Temos também o “mecanicismo” no sentido de um projeto de formular *explicações mecânicas* para os fenômenos físicos, isto é, especificando *causas eficientes* e *mecanismos internos* pelos quais as ações são efetuadas. Podemos dizer que se trata aqui de um mecanicismo num sentido mais *metodológico*.

(3) Temos ainda o “mecanicismo” no sentido de atribuir ao ramo da física conhecido como *mecânica* (a “ciência do movimento”) uma posição especial. Essa singularidade da mecânica pode ocorrer sob, pelo menos, duas formas. (3a) Por um lado, ela pode significar a busca de teorias que persigam o “exemplar” (no sentido kuhniano) da mecânica clássica, ou seja, procurar formular teorias dentro de base conceitual e/ou uma estrutura matemática que lembre ou segue o modelo da mecânica clássica. Este é um mecanicismo que poderíamos chamar de *teórico* ou *estrutural*.

(3b) Por outro lado, pode se tratar de atribuir à mecânica um estatuto logicamente mais fundamental dentro do edifício do conhecimento científico: a mecânica seria uma teoria mais fundamental do que as outras teorias físicas. Desse modo, as outras teorias deveriam ser compatíveis com a mecânica (ou, nas versões mais radicais, redutíveis a ela). Novamente temos aqui um mecanicismo de tipo *metodológico*.

(4) Finalmente, temos ainda o mecanicismo no sentido de uma imagem do universo como *máquina* – ou, de maneira mais restrita, um determinado sistema como sendo semelhante a uma máquina. Este é um mecanicismo *metafísico* extremamente abrangente.

Note-se que, ao propor este ensaio de taxonomia dos “mecanicismos”, não tenho a preocupação de apresentá-los em ordem cronológica, nem de mapear a gênese de cada um, ainda que historicamente eles possam ter surgido em uma certa seqüência e até ter dado origem uns aos outros.⁴ Para os propósitos deste artigo, eles estão identificados numericamente apenas para facilidade de referência posterior. Tampouco tenho a pretensão de investigar a questão das relações entre essas formas de mecanicismo, em particular a existência ou não de relações de inclusão – isto é, se alguma delas constitui um caso particular de alguma outra – embora possa ser verdade que algumas são mais amplas e outras mais restritivas. Finalmente, não tenho aqui a preo-

4 Em particular, é possível que o mecanicismo de tipo (4) tenha sido um dos mais antigos dentro da história da ciência, com a metáfora da *máquina* substituindo gradativamente a metáfora do *organismo* e proporcionando assim um novo pano de fundo metafísico.

cupação de atribuir os diferentes tipos de mecanicismo a autores específicos, a escolas filosóficas ou a períodos históricos particulares. Todos estes tópicos podem ser interessantes em si mesmos, porém seu estudo nos afastaria demasiado do nosso foco e, ademais, certamente demandaria um outro texto.

As acepções de “mecanicismo” acima certamente não são equivalentes (ainda que possam estar relacionadas entre si das maneiras complexas acima apresentadas, como alertamos). Para ilustrar esse fato, podemos imaginar o caso de um filósofo natural que tem uma concepção geral de corpo humano (ou, mais geralmente, de qualquer ser vivo) como uma máquina (mecanicismo de tipo 4) sem, no entanto, defender uma ontologia composta exclusivamente por matéria-e-movimento (mecanicismo de tipo 1), nem utilizar unicamente teorias formalizadas à maneira da mecânica clássica (mecanicismo de tipo 3a). Outro exemplo: um cientista pode formular teorias que visam especificar mecanismos para as ações físicas (tipo 2), porém empregando uma ontologia que inclui o conceito de *força* (ou mesmo o conceito de *energia*), que, embora escape da ontologia mecanicista restrita (tipo 1), ainda seria compatível com os tipos (3a) e (3b). Há outras assimetrias interessantes: por exemplo, uma teoria que adote o formalismo lagrangiano estará acompanhando a mecânica analítica (clássica) da fase posterior a Lagrange, aderindo, portanto, ao mecanicismo no sentido (3a); porém, uma vez que o formalismo lagrangiano remove do primeiro plano as referências aos mecanismos internos dos sistemas, essa mesma teoria estará ao mesmo tempo se afastando do mecanicismo no sentido (2). (Este exemplo será importante quando discutirmos o caso da eletrodinâmica de Maxwell.)

À primeira vista, pareceria que o mecanicismo é um tipo de *materialismo*. Porém, à luz da distinção entre os tipos de mecanicismo, que fiz acima, há certas nuances que precisariam ser consideradas. Por exemplo, uma teoria física do século XIX poderia ser “mecanicista” nas acepções 3 e 4 que mencionei acima (as mais amplas), mas incluir o conceito de *energia*, e assim poder-se-ia dizer que escapa ao materialismo. Também cumpre distinguir mecanicismo de *determinismo*. Ainda que, historicamente, muitos mecanicistas “clássicos” (de tipo 1) tenham sido deterministas, a partir do momento em que consideramos as outras acepções do termo, vemos que o mecanicismo e o materialismo, por um lado, e o “determinismo”, por outro, podem se desligar. Exemplificando: a teoria cinética dos gases, interpretada em termos de mecânica estatística, pode até empregar uma ontologia materialista e mecanicista (isto é, partículas em colisão), porém pode ser interpretada de forma determinista ou indeterminista. Vale lembrar que, numa perspectiva mais contemporânea, o mecanicismo e o determinismo, por sua vez, não devem ser associados com a propriedade da *previsibilidade*, como bem mostra o exemplo do “caos determinístico”: uma teoria como a mecânica clássica – aparentemente das mais bem comportadas – pode, sob certas condições, descrever

sistemas que apresentam um comportamento caótico e *totalmente* imprevisível (cf. Paty, 2004b, seção 3). Finalmente, cumpre separar *mecanicismo* de *reducionismo*. Como mostra Andrew Pyle (1995, apêndice 5), há concepções explicitamente reducionistas que nada têm de mecanicistas.

Uma comparação assim seca dos diferentes tipos de mecanicismo não pode dar a dimensão do que representou o mecanicismo para a ciência moderna. Nem seria possível, num texto curto como este, transmitir a grandiosidade do programa mecanicista, a riqueza dos resultados que ele produziu e a profundidade dos debates que originou. O ideal mecanicista constituiu uma das mais poderosas tradições intelectuais da ciência ocidental, proporcionando o pano de fundo para grande parte da ciência da modernidade. Trata-se, talvez, da *imagem de ciência e de natureza* – no sentido proposto por Abrantes (1998) – historicamente mais importante da física moderna. Não é exagero dizer que a maior parte da física dos séculos XVII a XIX girou em torno da concepção mecanicista, seja por adesão, seja por oposição. Por isso mesmo, a sua derrocada representou uma mudança conceitual com implicações de enorme alcance. Devo observar que, embora a influência do mecanicismo tenha se estendido a áreas tão diversas como a mecânica, a óptica, a astronomia, a cosmologia, a química, a fisiologia, a teoria da percepção, a geração dos organismos vivos etc. (e até a política), aqui irei me referir apenas ao mecanicismo *na física*.

2 O CAMPO, A AÇÃO A DISTÂNCIA E OS FLUIDOS SUTIS

Pode-se dizer, sem grande margem de erro, que os conceitos de *força* e de *campo* constituíram elementos de complicada assimilação dentro da ordem mecanicista. A discussão sobre a inclusão do conceito de força na física, e sobre o estatuto desse conceito dentro da teoria física, principalmente em Descartes e Newton, é uma questão extremamente complexa de exegese, objeto de uma discussão já bastante extensa na literatura filosófica, e que deixo para os especialistas nesses autores. No presente texto iremos concentrar nossa atenção no conceito de campo e nesta seção iremos esboçar alguns elementos do contexto em que surge esse conceito.

Cabe aqui um esclarecimento: o que se quer dizer ao empregar o termo “campo”? Faremos um parêntese para uma breve reconstrução do significado do conceito. A reconstrução apresentada nos parágrafos seguintes é feita “segundo a ordem das razões”, que não corresponde estritamente à ordem cronológica. Assim, o leitor irá perceber que, por enquanto, escamoteamos certas etapas do desenvolvimento histórico, sendo os episódios históricos mencionados mais a título de exemplo ilustrativo. A narrativa histórica será retomada mais adiante, quando então o conceito de campo irá

emergir mais claramente como uma construção temporalmente estendida. Para um relato histórico amplo, consultar o artigo de Ernan McMullin (2002).

No contexto da física, o termo “campo” denota a capacidade das forças de agirem através do espaço, sem se restringir à ação por contato, mas também sem se confundir com a ação a distância. A caracterização mais informal e geral do conceito de campo tem a ver com a noção de “zona de influência” de um corpo. As concepções de Kepler sobre a gravitação e o magnetismo podem exemplificar essa noção (cf. McMullin, 2002, p. 16-20). Um aspecto que pode ser relacionado a ela é a condição *disposicional*: dizer que existe um campo numa dada região do espaço significa que, se um corpo fosse colocado na posição X dentro dessa região, *então* ele sofreria a ação de uma força com tais e tais características – mesmo que o corpo de prova não tenha sido efetivamente colocado ali.⁵ Essa condição, segundo alguns intérpretes como Howard Stein, seria o que caracteriza a noção de campo em Newton (Stein, 1970, p. 265-9; cf. também McMullin, 2002, p. 20-4). Em particular, a condição disposicional é claramente satisfeita por construtos matemáticos como, por exemplo, os potenciais, cuja teoria foi formulada por Laplace e Poisson.⁶

A condição disposicional é necessária, porém insuficiente, para caracterizar o campo, na medida em que ela poderia ser satisfeita também por uma ação a distância (como observa Mary Hesse, em sua intervenção na discussão do artigo de Stein, 1970, p. 298-9; cf. McMullin, 2002, p. 22; e ainda Hesse em seu livro *Forces and fields, apud McMullin, 2002, p. 28-9*). Pode-se então acrescentar à visão disposicional certas condições mais fortes, como a idéia de que a propagação da ação por meio do campo leva um tempo finito (isto é, não é instantânea), e/ou a idéia de que a ação se dá por contigüidade, entre elementos infinitesimais adjacentes que, juntos, constituem uma quantidade finita. Esta última condição expressa, com efeito, a noção de causalidade física (cf. Paty, 2004a) e, para ser expressa com rigor, requer o emprego do instrumental formal da análise.

A questão que se coloca a seguir é de como dotar esse campo, cujas propriedades matemáticas estão dadas, de um estatuto ontológico. Isso pode ser conseguido acrescentando uma condição de existência física, o que pode ser feito de diferentes maneiras,

⁵ Note que a descrição disposicional atribui disposições a *pontos do espaço*. Ela não deve ser confundida com a concepção que atribui *propensões* de atração e repulsão à *própria matéria*, como sendo constitutivas dela – trata-se de dois enfoques diferentes. (Este último pode ser encontrado tanto em certas épocas e domínios da ciência moderna como na ciência pré-moderna; também subsiste nas fronteiras entre ciência e pseudociência.)

⁶ Segundo Bork (1967), que discute a relação entre os conceitos de campo e potencial na obra de Maxwell, existe um certo “preconceito”, surgido no eletromagnetismo da passagem do século XIX para o XX, no sentido de que, ao passo que o campo é uma entidade real, o potencial seria apenas uma ficção matemática introduzida com o objetivo de resolver problemas. Ele procura mostrar que na obra de Maxwell não se encontram evidências de tal preconceito.

postulando, por exemplo: (a) a existência de um meio sutil interveniente; (b) a existência de “linhas de força” (postulada, como veremos, por Faraday – embora ele hesitasse em fazer hipóteses definidas acerca da natureza dessas linhas de força e preferisse manter-se no terreno das analogias físicas, como o feixe de elásticos ou as figuras formadas pela limalha de ferro); (c) ou ainda a capacidade de conter energia (como afirma Maxwell, como veremos adiante).

Esse estatuto ontológico se completa quando se afirma a *autonomia* ontológica, com o campo sendo uma entidade distinta da matéria e irreduzível a ela. As “três perguntas” de Faraday sobre as ações físicas expressam critérios para avaliar em que medida uma interação requer a postulação de um entidade física mediando as ações (ver adiante, nesta mesma seção). Notemos que a postulação de um meio sutil ou, mais tarde, de um éter equivale a uma nova ampliação no quadro ontológico (que passa a ser composto por matéria, campo e meio sutil). Notemos também que, quando se postula um éter *mecânico*, de certa forma faz-se regredir essa autonomia ontológica conquistada pelo campo, na medida em que o que é referido como “campo” acaba se reduzindo, na realidade, às propriedades do éter. Com isso, terminamos o nosso parêntese sobre o significado do conceito de campo.⁷

A contribuição da teoria do campo para a desmecanização da física pode ser analisada sob vários ângulos. Um dos mais importantes diz respeito ao modo ou processo de transmissão das ações físicas e à ontologia que é mobilizada para formular esse modo ou processo. Nesse sentido, podemos tomar como ponto de partida a noção mecanicista mais estrita de ação (mecanicismo de tipo 2 acima), que era a *ação por contato* (impacto). Essa ação por contato poderia ser formulada supondo-se um pleno (Descartes) ou

⁷ Já numa linguagem plenamente contemporânea (isto é, aquela da “física moderna”, segundo a terminologia dos físicos), o campo é, minimamente, uma atribuição de uma quantidade a um ponto do espaço (ou do espaço-tempo). Essa quantidade pode ser:

(a) um escalar, como por exemplo uma distribuição de temperatura ou de densidade num sólido;

(b) um vetor, como por exemplo o campo elétrico ou o campo gravitacional clássicos, ou a distribuição de velocidades vetoriais num fluido, ou ainda o *gradiente* de um campo escalar. Um exemplo de gradiente é o quão “espremidas” estão as curvas de nível de um mapa topográfico, em cada ponto, ou então as isóbaras de um mapa meteorológico: em ambos os casos, o “estreitamento” expressa o quão rápido, e em que direção, aumenta uma certa quantidade escalar, como a altitude ou a pressão atmosférica;

(c) um tensor, como o campo gravitacional de Einstein, ou o campo eletromagnético na forma covariante.

A esta altura, o que se tem é ainda uma descrição do campo basicamente como um construto matemático – essencialmente uma aplicação de um domínio (espacial ou espaço-temporal) em um determinado contradomínio. Quando o conceito adquire estatuto ontológico? No contexto não-quântico, isso acontece quando o campo é identificado com um espaço-tempo que se afasta do estado plano (no sentido métrico), curvado pela presença de uma densidade, seja de matéria, seja de energia. No contexto quântico, o campo recebe estatuto ontológico quando é definido como uma interação que se dá entre tipos específicos de partículas e, principalmente, que é *mediada* por quanta dotados de propriedades específicas (por exemplo, propriedades de simetria). (Note-se que, na descrição proposta pela teoria quântica de campos, os campos não são mais descritos por *funções*, mas sim por *operadores*.)

supondo-se átomos no vazio (Boyle, Gassendi). A ação por contato opunha-se à *ação a distância*, sem mediação, noção que sempre parecia rondar quando se tratava dos fenômenos da atração gravitacional, da eletricidade e do magnetismo, mas que era considerada pouco aceitável por muitos filósofos, uma vez que se aceitava que “*a matéria não pode atuar onde não está*”.

A teoria do campo irá gradualmente ocupar um espaço conceitual intermediário entre a ação a distância e ação por contato – a saber, a *ação contínua*. Porém, a teoria “pura” do campo não é o único tipo de teoria que pode se encaixar nesse espaço: ali também podem alojar-se as teorias dos meios sutis e do éter, bem como teorias híbridas de campo-com-éter.

É verdade que já com respeito à teoria da gravitação de Isaac Newton colocam-se questões como: se Newton admitia ou não uma ação instantânea a distância; se ele aceitava ou não a existência de um éter gravitacional (uma vez que, ao que parece, o éter luminífero era aceito por ele); se a noção de campo ainda é meramente disposicional ou se o campo possui uma existência autônoma; e finalmente, dependendo das respostas às questões anteriores, a questão de se ele já tem ou não uma teoria do campo propriamente dita. Estas são questões controversas; e a sua discussão é uma tarefa que deixamos para os especialistas em Newton. Alguns autores que se debruçaram sobre o tema são Howard Stein (1970); Mary Hesse, nos comentários a Stein (1970); e Ernan McMullin (2002). (Em particular, a discussão feita por esses autores revela que, para estudar o ponto de vista newtoniano acerca desses assuntos, é preciso examinar outros textos newtonianos além do *Principia*.)

No período que se seguiu à publicação do *Principia* de Newton, durante aproximadamente a primeira metade do século XVIII, o método indutivo adquiriu proeminência, e o método de formular hipóteses sobre entidades ou processos não diretamente observáveis havia caído em desfavor entre os filósofos naturais.⁸ Porém, após esse período “anti-hipotético”, por assim dizer, o método das hipóteses voltou gradualmente a estar em voga em meados do século XVIII. Em particular, para a explicação dos fenômenos da eletricidade, magnetismo, calor e gravitação, os filósofos passaram a invocar uma grande variedade de “fluidos sutis” ou “meios sutis” que poderiam, entre outras funções, mediar as várias ações físicas. (Vale lembrar que os conceitos de “matéria sutil” e “fluido sutil” remontam pelo menos aos séculos XVI e XVII – isso para não falar em noções muito mais antigas como a “quintessência”).

⁸ Determinar se Newton respeitou os seus próprios pronunciamentos metodológicos (isto é, se a sua metodologia *implícita* estava de acordo com a sua metodologia *explícita*) e se ele implementou em sua própria ciência a famosa máxima contra as hipóteses acerca de inobserváveis (“*hypothesis non fingo*”), bem como avaliar se é sequer *possível* implementar tais teses, é um outro conjunto de questões de exegese newtoniana de que não trataremos aqui.

Mapear todo o verdadeiro labirinto de tipos de fluidos sutis dos séculos XVIII e XIX – onde despontam nomes como George LeSage, David Hartley, Benjamin Franklin – seria uma tarefa quase impossível. Mesmo mapear uma parte dele seria inviável num texto como este. Vamos nos limitar a dizer que os meios sutis da física foram se tornando cada vez mais complexos e menos compatíveis com as teses mecanicistas, na medida em que se tratava de um tipo de matéria diferente da ordinária e sujeita a interações diferentes, às vezes com as suas partículas sendo dotadas até de poderes ativos. (As marchas e contramarchas do método das hipóteses, bem como o debate sobre os fluidos sutis, são mapeados e analisados por Laudan em *Science and hypothesis*, 1981.)

Mais tarde, no início do século XIX, um evento particularmente importante foi o ressurgimento da *teoria ondulatória da luz* de Young, Fresnel e outros. A teoria ondulatória (que tem suas raízes em Huygens) acabou por revelar um poder explicativo e uma consiliência superiores aos da teoria corpuscular (que tem Newton como pioneiro) e parecia apontar claramente para a necessidade de um meio para a transmissão das vibrações luminosas. A física britânica do século XIX se notabilizaria pelo desenvolvimento de teorias altamente sofisticadas sobre o éter. A propósito, deve-se notar que o êxito das teorias que empregavam hipóteses sobre entidades inobserváveis conferiu um novo fôlego ao método hipotético-dedutivo. Laudan (1981) analisa esse processo de interação não-hierárquica entre teorias e metodologias, onde não só as metodologias podem guiar a construção e a avaliação das teorias, mas também o desempenho das teorias pode levar a uma reavaliação e até a uma revisão de metodologias. Não deixou de haver polêmica, é claro, quanto ao importe metodológico da adoção de hipóteses (como as do éter): o exemplo mais célebre foi o confronto entre o indutivista J. S. Mill e o hipotético-dedutivista William Whewell.

Nesse contexto surgem os fundadores do eletromagnetismo moderno: Faraday e Maxwell, além de William Thomson (Lord Kelvin) e outros. A pesquisa dos “eletricistas” britânicos era centrada explicitamente no imperativo de construir uma teoria em que a ação eletromagnética não se desse a distância, como era defendido pelos físicos europeus do continente (como Ampère, F. Neumann e W. Weber), mas, ao contrário, se propagasse de maneira mediata. Ao longo de uma longa, laboriosa e cuidadosa investigação, que se estendeu por muitos anos, Faraday foi levado a concluir que seus resultados experimentais acerca da indução eletromagnética poderiam ser melhor explicados por meio da hipótese das “linhas de força” que de algum modo preenchem o espaço entre os corpos em interação. Já se trata aqui de um tipo de ação diferente da ação por contato e da ação a distância, a saber, uma *ação contínua*. (O desenvolvimento da teoria matemática do campo eletromagnético por Maxwell também pode ser visto como um [grande e decisivo] momento da defesa da ação contínua.)⁹

Faraday inclusive formulou um conjunto de critérios para determinar quando uma ação se dá a distância (como então se acreditava ser o caso da gravitação) e quando ela é contínua, em particular através de linhas físicas de força (ver McMullin, 2002, p. 36; Hesse, 1955, p. 345-7; Hesse, comentário a Stein, 1970, p. 298-9; Doran, 1975, p. 178). Os três principais critérios são os seguintes:

- (i) A transmissão da ação é afetada por modificações materiais que ocorreram no espaço entre os corpos (resultando, por exemplo, em curvatura das linhas ou efeitos de polarização)? Uma resposta negativa constitui evidência no sentido de que a transmissão da ação se dá a distância. Uma resposta afirmativa aponta para uma ação por linhas de força.
- (ii) A transmissão da ação leva tempo? Uma resposta negativa constitui forte evidência em favor de uma ação a distância. Uma resposta afirmativa aponta no sentido de que algum processo de propagação está ocorrendo no espaço interveniente.
- (iii) A transmissão depende da condição do corpo que recebe a ação? Uma resposta afirmativa é consistente com a ação a distância.

Faraday também considera um quarto critério para as linhas de força [não mencionado por Hesse, e que McMullin considera ser “não inteiramente claro”]: apresentar uma “capacidade limitada de ação”. Não o discutiremos aqui.

Faraday considera cinco exemplos de aplicação desses critérios, a saber, aos casos da *gravitação*, *radiação luminosa*, *indução elétrica*, *condução elétrica* e *magnetismo*. No caso da gravitação, as respostas que Faraday encontra são: negativa para (i) (a influência

9 André-Marie Ampère (1775-1836) e Michael Faraday (1791-1867) foram contemporâneos e conheciam o trabalho um do outro. Ampère, a quem se deve o termo “eletrodinâmica”, e que foi chamado por Maxwell “o Newton da eletricidade” (cf. Maxwell, 1954 [1891], v. 2, p. 175), era um físico matemático; tomou como ponto de partida os experimentos de Ørsted e foi influenciado pelas noções e técnicas da física newtoniana. Privilegiava o raciocínio matemático e encarava os experimentos mais como “teoremas reificados” do que como campo de provas ou como exploração de um território novo. Aliás, quando realizava experimentos, Ampère estava mais interessado em salientar aspectos qualitativos do que em obter medidas quantitativas.

Faraday, por outro lado, era um experimentador brilhante, sistemático e laborioso, que não dominava a matemática (como ele próprio reconheceu) e não tinha uma base teórica muito substancial. Diferentemente de Ampère, que simplesmente encomendava a construção dos instrumentos de que necessitasse, Faraday construía seus próprios equipamentos, com criatividade e rapidez. Ele estava mais preocupado em estabelecer correlações entre os seus muitos experimentos do que em construir um edifício teórico bem fundamentado. Embora Faraday fosse, com suas linhas de força, o inaugurador de um caminho que acabaria desembocando na noção de campo, faltavam-lhe ainda os instrumentos da análise, que permitiriam formular uma noção de campo como algo que se propaga *do próximo ao próximo*, por assim dizer. (Sobre Ampère, cf. Darrigol, 2000, Cap.1, seções 1.2 e 1.4. Sobre Faraday, cf. as seções 1.3 e 1.5. Para uma comparação entre os estilos de ambos, ver as seções 1.3.3 e 1.6.)

se dá em linha reta, independentemente da presença de outros corpos), aparentemente negativa para (ii), e positiva para (iii) (depende da massa do corpo), constituindo uma forte indicação no sentido de que a ação gravitacional se dá a distância. No caso dos raios luminosos, as repostas são: afirmativa para (i) (direção de propagação e polarização que dependem das propriedades do meio), afirmativa para (ii), e negativa para (iii), indicando que os raios têm existência física própria. No caso da indução elétrica, as respostas são, respectivamente: afirmativa (as linhas de indução são afetadas, podendo ser curvadas), aparentemente negativa, e afirmativa (depende de um corpo de reação), sugerindo que o processo de propagação tem existência própria – ainda que dependa das duas extremidades das linhas de força. No caso da corrente elétrica, as respostas são: enfaticamente afirmativa (a corrente depende essencialmente da existência de um meio condutor), afirmativa e afirmativa (depende das duas extremidades), indicando claramente uma ação contínua. Finalmente, no caso do magnetismo, Faraday responde de forma aparentemente negativa a (i) (exceto no caso do ferro), aparentemente negativa a (ii) e afirmativa a (iii) (depende dos pólos), o que poderia fazer supor uma ação a distância (como de fato aconteceu historicamente). Porém, aqui Faraday faz notar uma propriedade peculiar: as linhas de ação magnética se mostram curvadas, o que para ele é muito difícil de reconciliar com a ação a distância, e é algo difícil de conceber *exceto supondo-se algo – isto é, linhas físicas de força magnética – com existência autônoma no espaço interveniente*. Essas conclusões de Faraday a respeito das diferentes interações, em vista dos diferentes critérios, estão sintetizadas no Quadro 1.

Quadro 1. Os critérios de Faraday para a determinação do tipo de ação.

Critério	Gravitação	Luz	Indução	Corrente elétrica	Magnetismo elétrico
Influência do meio	N	S	S	S	N
Tempo para propagação	N	N	N	S	N
Dependência da extremidade final	S	N	S	S	S
Conclusão	ação a distância	raios (linhas de propagação contínua)	linhas de força	condução (contínua) pelo meio	linhas de força em vista da curvatura

Podemos dizer, fazendo uma analogia com a própria óptica, que o meio postulado pelas embrionárias “teorias do campo” (aqui o termo ainda vai entre aspas) e o meio luminífero da teoria ondulatória constituem duas linhas de teorização que seriam levadas a “interferir construtivamente” com Maxwell.

3 MAXWELL

James Clerk Maxwell (1831-1879), em sua investigação teórica, fortemente inspirada na pesquisa de cunho mais experimental de Faraday, refletiu longa e profundamente sobre como se poderia entender as “linhas de força” de Faraday. O desenvolvimento da eletrodinâmica de Maxwell está representado por uma série de trabalhos que se inicia em 1856, com o artigo “On Faraday’s lines of force”, prossegue com “On physical lines of force”, de 1861/1862, chega a “A dynamical theory of the electromagnetic field”, de 1864, e culmina no monumental *A treatise on electricity and magnetism*, de 1873 (que teve também edições em 1881 e 1891). A teoria de Maxwell, ele mesmo um *virtuose* da física matemática, é celebrada, muito justamente, pela façanha de unificar os domínios da eletricidade, do magnetismo e da óptica. Em certo sentido, ela já é uma teoria do campo; em outro sentido, como veremos, ainda não.

As famosas equações diferenciais parciais que Maxwell formulou para o campo eletromagnético (hoje escritas como quatro equações) continuam sendo aceitas até hoje (exceção feita, a rigor, ao domínio dos fenômenos eletrodinâmicos na escala quântica). Em notação moderna, as equações de Maxwell são:

$$\begin{aligned} \text{rot } \mathbf{E} &= -\partial \mathbf{B} / \partial t \text{ (lei da indução de Faraday)} \\ \text{rot } \mathbf{H} &= \partial \mathbf{D} / \partial t + \mathbf{J} \text{ (lei de Ampère com corrente de deslocamento)} \\ \text{div } \mathbf{D} &= \rho \text{ (lei de Coulomb generalizada)} \\ \text{div } \mathbf{B} &= 0 \text{ (inexistência de monopolos magnéticos),} \end{aligned}$$

(sendo que $\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$ e $\mathbf{H} = (1/\mu) \mathbf{B}$ nos meios isotrópicos). No vácuo (isto é, fora dos meios materiais), elas se tornam:

$$\begin{aligned} \text{rot } \mathbf{E} &= -\partial \mathbf{B} / \partial t \\ \text{rot } \mathbf{B} &= (1/c^2) \partial \mathbf{E} / \partial t + \mu_0 \mathbf{J} \\ \text{div } \mathbf{E} &= \rho / \epsilon_0 \\ \text{div } \mathbf{B} &= 0, \end{aligned}$$

(sendo que $\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E}$, $\mathbf{H} = (1/\mu_0) \mathbf{B}$ e $\mu_0 \epsilon_0 = 1/c^2$). E, no vácuo e na ausência de fontes (cargas e correntes), tornam-se:

$$\begin{aligned} \text{rot } \mathbf{E} &= -\partial \mathbf{B} / \partial t \\ \text{rot } \mathbf{B} &= (1/c^2) \partial \mathbf{E} / \partial t \\ \text{div } \mathbf{E} &= 0 \\ \text{div } \mathbf{B} &= 0. \end{aligned}$$

É na Parte III do artigo “A dynamical theory of the electromagnetic field” (Maxwell, 2003c [1864]) que, pela primeira vez, Maxwell formula por extenso todas as suas equações do eletromagnetismo, as quais serão rerepresentadas nos Caps. VIII e IX da Parte IV, Vol. 2 do *Treatise* (Maxwell, 1954 [1891]). Em “A dynamical theory...”, Maxwell não utiliza a notação vetorial costumeira hoje em dia, mas escreve todas as equações em termos de componentes. O potencial vetor não é utilizado meramente como um expediente matemático conveniente, como chegaram a pensar alguns maxwellianos posteriores, mas desempenha um papel fundamental na formulação da teoria. Já no *Treatise*, Maxwell utiliza a notação de componentes, mas também utiliza ocasionalmente a notação vetorial e a notação de quaternions. Na notação de Maxwell, (p, q, r) são as componentes do vetor (densidade de) corrente de condução, modernamente designado por \mathbf{J} , enquanto que (α, β, γ) são as componentes do vetor campo magnético \mathbf{H} , e (f, g, h) são as componentes do vetor deslocamento elétrico \mathbf{D} . Além disso, (P, Q, R) são as componentes do vetor campo elétrico \mathbf{E} (que ele chama de “*electromotive force*” no artigo e de “*electromotive intensity*” no *Treatise*) e (F, G, H) são as componentes do potencial vetor \mathbf{A} (que ele chama de “*electromagnetic momentum*” no artigo e de “*electromagnetic momentum*”, “*vector potential*” e de “*electrokinetic momentum*” no *Treatise*). Todas essas notações estão sintetizadas no Quadro 2.

Quadro 2. A notação de Maxwell em “A dynamical theory of the electromagnetic field” (1864) e no *Treatise* (1891).

Componentes	Representam	Notação vetorial moderna
(p, q, r)	(densidade de) corrente de condução	\mathbf{J}
(α, β, γ)	campo magnético (“magnetic intensity” em 1864, “magnetic force” no <i>Treatise</i>)	\mathbf{H}
(a, b, c)	indução magnética ou (densidade de) fluxo magnético (“magnetic induction” no <i>Treatise</i>)	\mathbf{B} (= $\text{rot } \mathbf{A}$)
(f, g, h)	deslocamento elétrico	\mathbf{D}
(P, Q, R)	campo elétrico (“electromotive force” em 1864, “electromotive intensity” no <i>Treatise</i>)	\mathbf{E} (= $-\nabla\Phi - \partial\mathbf{A}/\partial t$)
(F, G, H)	potencial vetor (“electromagnetic momentum” em 1864; “vector potential”, “electromagnetic momentum” e “electrokinetic momentum” no <i>Treatise</i>)	\mathbf{A}

Assim como as equações do campo eletromagnético, também a descrição de Maxwell das *ondas eletromagnéticas* continua válida ainda hoje. Como se sabe, a derivação de uma equação diferencial parcial descrevendo uma onda transversal que se propaga com a velocidade da luz depende da simetria entre os campos elétrico e magnético

nas equações de Maxwell. Olhando retrospectivamente, vemos que é a introdução do termo da “corrente de deslocamento” $\partial\mathbf{D}/\partial t$ que permite instaurar essa simetria. (Com respeito à questão da interpretação da corrente de deslocamento, pode-se consultar Roche, 1998.) Outros argumentos de simetria estarão envolvidos na assimilação do eletromagnetismo pela relatividade restrita, como veremos na seção 7.

Também importante é o fato de o campo eletromagnético de Maxwell (bem como a onda eletromagnética) possuir *energia*, como viria a se demonstrar. O próprio Maxwell já dizia: “Ao falar sobre a Energia do campo... desejo ser entendido literalmente” (2003c [1864], p. 564), muito embora ele ainda afirmasse que essa energia é uma energia *me-cânica*. Desse modo, o campo já não é mais apenas uma propriedade disposicional (isto é, se uma partícula fosse colocada em tal ponto do espaço, *então* ela sentiria tal força), mas sim uma entidade física com existência real. Assim, aponta-se claramente para uma transformação na ontologia básica da física. Porém, a rigor, a teoria de Maxwell ainda não é plenamente, e exclusivamente, uma teoria do campo eletromagnético. É também uma teoria do *éter eletromagnético* (que ele acabaria concluindo ser o mesmo que o éter luminífero).

4 OS TRÊS GRANDES ARTIGOS E O *Treatise*

Nesta seção, irei destacar algumas características fundamentais dos quatro principais textos de Maxwell – os artigos “On Faraday’s lines of force”, “On physical lines of force” e “A dynamical theory of the electromagnetic field”, e o *Treatise on electricity and magnetism*.

(1) Em “On Faraday’s lines of force” (Maxwell, 2003a [1856]), por exemplo, Maxwell adota uma abordagem analógica e desenvolve um modelo em termos da dinâmica dos fluidos em tubos para entender as linhas de força de Faraday. (Cabe lembrar que a dinâmica de fluidos de Euler, D’Alembert e outros constitui o primeiro tratamento sistemático das ações físicas nos meios contínuos. O próprio programa de matematização da física através da *análise* começa ali, mostrando desde então o poder da análise para lidar com a noção de *proximidade* e, por extensão, com os conceitos [como o de campo] que utilizam essa noção.) Maxwell inicia o seu artigo salientando que, em sua opinião, “o estado atual da ciência elétrica parece peculiarmente desfavorável à especulação”, devido à situação então reinante de, por um lado, insuficiência de dados experimentais em determinadas áreas, e, por outro, escassa integração entre as diferentes partes do edifício teórico (Maxwell, 2003a [1856], p. 155). Nessas condições, uma teoria da eletricidade não poderia ser proposta, escreve ele, a menos que exibisse “a conexão não apenas entre a eletricidade em repouso e a eletricidade em correntes, mas também

entre as atrações e efeitos indutivos da eletricidade em ambos os estados”. A forma matemática das leis empíricas então disponíveis — leis com as quais as equações de tal teoria deveriam ser compatíveis — era conhecida, lembra Maxwell, constituindo “um corpo considerável de matemática intrincada”, cuja própria complexidade poderia constituir um obstáculo ao progresso naquele campo. Desse modo, impunha-se a tarefa de “simplificação e redução dos resultados das investigações precedentes a uma forma em que a mente pudesse apreendê-los” (Maxwell, 2003a [1856], p. 155). Ora, os resultados desse processo podem, segundo Maxwell, “tomar a forma de uma fórmula puramente matemática ou de uma hipótese física”. E ele continua:

No primeiro caso, perdemos completamente de vista os fenômenos a serem explicados; e embora possamos rastrear as conseqüências de dadas leis, não conseguimos nunca obter visões mais amplas das conexões daquele tema. Se, por outro lado, adotarmos uma hipótese física, enxergaremos os fenômenos somente através de um meio, e ficaremos sujeitos àquela cegueira aos fatos e à precipitação nos pressupostos que uma explicação parcial encoraja. Devemos, portanto, descobrir algum método de investigação que permita à mente, a cada passo, dispor de uma concepção física clara, sem se comprometer com qualquer teoria fundada na ciência física da qual aquela concepção é tomada de empréstimo, de modo que ela não seja nem afastada do assunto na busca de sutilezas analíticas, nem levada para além da verdade por uma hipótese preferida (Maxwell, 2003a [1856], p. 155-6).

O método procurado, propõe Maxwell, é o método das analogias físicas, onde por *analogia física* entende-se “aquela semelhança parcial entre as leis de uma ciência e as de uma outra, que faz com que cada uma delas ilumine a outra” (Maxwell, 2003a [1856], p. 156). A idéia é considerar duas teorias que se aplicam a domínios de fenômenos completamente diferentes, por exemplo, a teoria do potencial eletrostático e a teoria da condução de calor. Embora as forças entre partículas carregadas e os processos de transferência de calor num meio contínuo não possuam, estritamente falando, características físicas em comum, pode-se aproveitar o fato de que as leis matemáticas de ambas as teorias apresentam semelhanças formais. Assim, partindo de um problema de atração eletrostática, a analogia permite passar ao domínio dos problemas de condução de calor, cuja solução pode ser mais fácil ou melhor conhecida, e depois retornar ao domínio do problema original (cf. Klein, 1972, p. 68). (O percurso no sentido inverso também é possível, quando se trocam os papéis da teoria de origem e da teoria alternativa.) Em “On Faraday’s lines of force”, Maxwell se vale, como dissemos, de uma analogia entre as linhas de força de Faraday e o fluxo de um fluido incompressível.

Quanto ao estatuto pretendido pelo seu modelo, Maxwell explica, após fazer referência às analogias feitas por Thomson entre a electricidade e a condução de calor, que:

É pelo emprego de analogias desse tipo que procurei colocar diante da mente, de uma forma conveniente e tratável, as idéias matemáticas que são necessárias ao estudo dos fenômenos da eletricidade. [...] Através do método que adoto, espero deixar evidente que não estou tentando estabelecer nenhuma teoria física numa ciência acerca da qual eu não fiz um experimento sequer, e que o termo do meu projeto é mostrar de que maneira, por uma aplicação estrita das idéias e métodos de Faraday, pode-se colocar claramente diante da mente matemática a conexão entre as diferentes ordens de fenômenos que ele descobriu (Maxwell, 2003a [1856], p. 157-8).

E também:

Ao referir tudo à idéia puramente geométrica de movimento de um fluido imaginário, espero alcançar generalidade e precisão, bem como evitar os perigos que surgem de uma teoria prematura que alega explicar as causas dos fenômenos. Se os resultados de mera especulação que compilei se revelarem de algum valor para os filósofos experimentais, na organização e interpretação dos seus resultados, eles [os resultados] terão servido ao seu propósito; e uma teoria madura, na qual os fatos físicos sejam fisicamente explicados, será formulada por aqueles que, interrogando a natureza, podem obter a única solução verdadeira dos problemas que a teoria matemática sugere (Maxwell, 2003a [1856], p. 159).

Com respeito a essa teoria “madura” que Maxwell esperava fosse formulada um dia, na qual “os fatos físicos fossem explicados fisicamente”, o historiador Martin J. Klein esclarece que:

Em 1855, o assunto não estava pronto para uma teoria desse tipo. Maxwell estava argumentando contra um compromisso prematuro com a hipótese física de uma força agindo a distância entre cargas em movimento, como a força proposta por Weber. Ele [Maxwell] desejava deixar aberta a possibilidade de uma teoria baseada na ação local de um campo de força, de Faraday, mesmo que não pudesse ainda construir tal teoria (Klein, 1972, p. 68).

Já com relação ao teor do seu modelo propriamente dito, Maxwell alerta, com relação ao fluido considerado no modelo, que:

Não se deve supor que a substância de que se trata aqui possua nenhuma das propriedades dos fluidos ordinários, exceto as de liberdade de movimento e resistência à compressão. Não é nem mesmo um fluido hipotético que é introduzido para explicar os fenômenos reais. Trata-se meramente de uma coleção de propriedades imaginárias, que pode ser utilizada a fim de estabelecer certos teoremas na matemática pura, de uma maneira mais inteligível a muitas mentes, e mais aplicável aos problemas físicos do que aquela em que se utilizam apenas os símbolos algébricos (Maxwell, 2003a [1856], p. 160).

Mais adiante, ao falar sobre o “estado eletrotônico” de Faraday, Maxwell faz a seguinte observação:

Neste esboço das teorias elétricas de Faraday, tal como elas se apresentam de um ponto de vista matemático, não posso fazer mais do que simplesmente enunciar os métodos matemáticos pelos quais creio que os fenômenos elétricos podem ser melhor compreendidos e reduzidos a cálculos; e meu objetivo foi apresentar à mente as idéias matemáticas sob uma forma reificada [*embodied*], como sistemas de linhas ou superfícies, e não como meros símbolos, que nem transmitem as mesmas idéias, nem se adaptam facilmente aos fenômenos a serem explicados. A idéia do estado eletrotônico, porém, ainda não se apresentou à minha mente de forma tal que sua natureza e suas propriedades possam ser explicadas claramente sem referência aos meros símbolos; e portanto proponho, na investigação a seguir [isto é, na parte II do artigo], empregar símbolos livremente, e tomar por assentes as operações matemáticas ordinárias (Maxwell, 2003a [1856], p. 187-8).

Ou seja, o emprego de modelos por parte de Maxwell corresponderia a uma espécie de “matemática concretizada” ou “reificada” (*embodied mathematics*).

(II) Em “On physical lines of force” (Maxwell, 2003b [1861/1862]), Maxwell prossegue com o método das analogias e propõe o famoso modelo de células tubulares vorticais (“nanotubos”, é como nos sentiríamos tentados a chamá-los hoje em dia), com partículas de rolamento (*idle wheels*) interpostas entre elas, sem deslizamento. (Ver a Figura 1.)

As linhas de campo magnético corresponderiam aos eixos das células tubulares. Nos condutores, as partículas de rolamento poderiam se deslocar, formando uma corrente de condução, colocando as células contíguas em movimento. Nos isolantes, elas

não poderiam se desgrudar da superfície das células, de modo que qualquer movimento provocaria uma distorção elástica nas células. Essa distorção corresponde ao campo elétrico. Dentro de corpos isolantes e condutores não ocorre acúmulo de partículas, uma vez que o número de partículas que entra em uma unidade de volume será o mesmo que sai pelo outro lado. Na fronteira entre um isolante e um condutor, porém, há uma descompensação, visto que no primeiro as células etéreas são distorcidas e no segundo não. O excesso de partículas na superfície de um isolante limitado por um condutor constitui a carga elétrica. Explicações desse tipo também poderiam ser elaboradas para os outros fenômenos elétricos. Para Maxwell, cargas, correntes e campos deveriam ser entendidos como estados mecânicos do éter (cf. Chalmers, 1973; 2001). Assim, na teoria de Maxwell, a carga e o campo são conceitos derivados, e não conceitos primários da teoria, como ocorre nas axiomatizações modernas da eletrodinâmica.

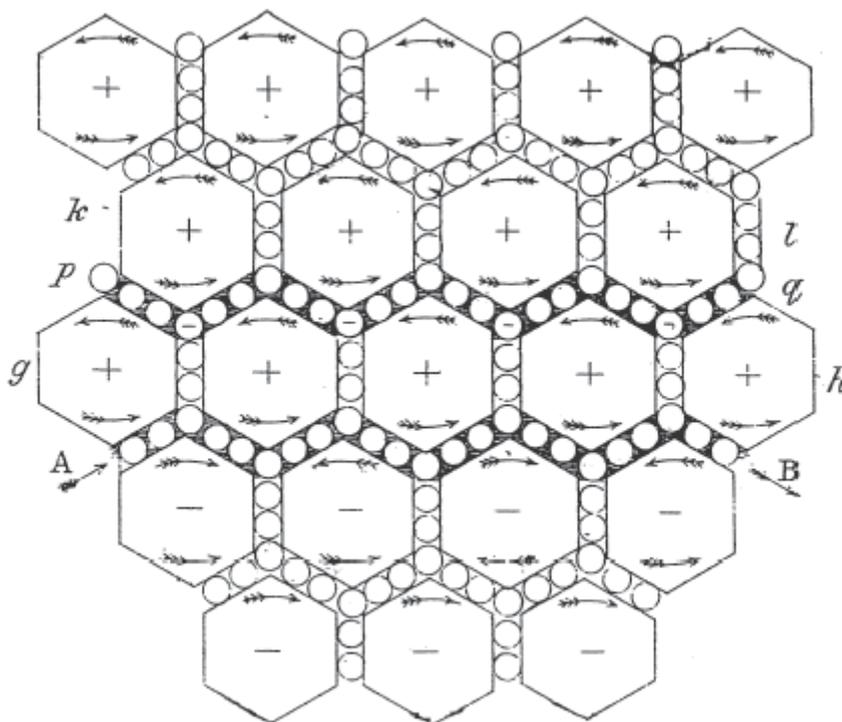


Figura 1. Diagrama original de Maxwell ilustrando o seu modelo mecânico de 1861/1862.

Em “On physical lines of force”, já aparece a suposição de que as correntes de deslocamento produzem efeitos eletromagnéticos idênticos às correntes de condução (ver “On physical lines of force”, eq. (112), p. 496, juntamente com a eq. (105), p. 495, sobre a proporcionalidade entre o vetor campo elétrico e o vetor deslocamento elétrico). Nesse artigo, Maxwell ainda não afirma que a luz é uma onda eletromagnética, porém (i) mostra que a velocidade de propagação dos distúrbios eletromagnéticos é muito próxima da velocidade da luz determinada experimentalmente:

A velocidade das ondulações transversais em nosso meio hipotético, calculada a partir dos experimentos eletromagnéticos dos Srs. Kohlrausch e Weber, concorda de maneira tão exata com a velocidade da luz calculada a partir dos experimentos ópticos do Sr. Fizeau, que é difícil evitar a conclusão de que *a luz consiste em ondulações transversais do mesmo meio que é a causa dos fenômenos elétricos e magnéticos* (Maxwell, 2003b [1861/1862], p. 500; grifo no original).

e (ii) conclui que, provavelmente, o meio eletromagnético e o éter luminífero (da teoria ondulatória da luz) são o mesmo meio:

Não procurei explicar essa ação tangencial [isto é, das partículas de rolamento sobre as células], porém, para dar conta da transmissão de rotação das partes exteriores para as partes interiores de cada célula, é necessário supor que a substância nas células possui elasticidade de forma, de um tipo semelhante, embora em grau diferente, daquela observada nos corpos sólidos. A teoria ondulatória da luz pede que, para dar conta das vibrações transversais, admitamos esse tipo de elasticidade no meio luminífero. Não precisamos nos surpreender, então, se o meio magneto-elétrico possuir a mesma propriedade (Maxwell, 2003b [1861/1862], p. 489).

De modo semelhante ao que fizera em “On Faraday’s lines of force”, Maxwell sublinha que o modelo de vórtices e rolamentos utilizado em “On physical lines of force” é apenas uma analogia:

A noção de uma partícula que tem seu movimento conectado com o de um vórtice por contato perfeito via rolamento pode parecer um tanto canhestra. Eu não a proponho como um modo de conexão que exista na natureza, nem mesmo como aquilo com que eu concordaria prontamente enquanto hipótese elétrica. Trata-se, porém, de um modo de conexão que é mecanicamente concebível e facilmente investigado e serve para revelar as conexões mecânicas reais entre os fenôme-

nos eletromagnéticos conhecidos; de sorte que me arrisco a dizer que qualquer um que compreenda o caráter provisório e temporário dessa hipótese irá se ver auxiliado por ela, em vez de por ela obstado, em sua busca pela interpretação verdadeira dos fenômenos (Maxwell, 2003b [1861/1862], p. 486).

Maxwell faz as seguintes considerações a respeito do seu projeto geral em “On physical lines of force”:

Meu objetivo neste artigo é aplinar o caminho para a especulação nesta direção, investigando os resultados mecânicos de certos estados de tensão e movimento em um meio e comparando-os com os fenômenos observados do magnetismo e da eletricidade. Ao indicar as conseqüências mecânicas de tais hipóteses, espero ser útil àqueles que consideram os fenômenos como devidos à ação de um meio, mas têm dúvidas quanto à relação dessa hipótese com as leis experimentais já estabelecidas, as quais em geral têm sido expressas na linguagem de outras hipóteses (Maxwell, 2003b [1861/1862], p. 452).

A seguinte comparação estabelecida por Maxwell entre o importe metodológico e ontológico de “On physical lines of force” e aquele de “On Faraday’s lines of force” é de interesse para nós. Primeiro, ele escreve:

Em um artigo anterior [isto é, Maxwell, 2003a [1856]], procurei colocar diante da mente do geômetra uma concepção clara acerca da relação entre as linhas de força e o espaço em que elas são traçadas. Empregando a noção de correntes num fluido, mostrei como desenhar linhas de força, as quais deveriam indicar, por meio do seu número, a quantidade de força, de modo que cada linha possa ser chamada de linha unitária de força (ver as *Researches* de Faraday, 3122); e investi-guei a trajetória das linhas ali onde elas passam de um meio para outro.

No mesmo artigo, encontrei o significado geométrico do “Estado eletrotônico”, e mostrei como deduzir as relações matemáticas entre o estado eletrotônico, o magnetismo, as correntes elétricas e a força eletromotiva, empregando ilustrações mecânicas para auxiliar a imaginação, porém não para explicar [*account for*] os fenômenos (Maxwell, 2003b [1861/1862], p. 452).

Por contraste, em “On physical lines of force”, diz ele,

Proponho agora examinar os fenômenos magnéticos de um ponto de vista mecânico e determinar quais tensões de um meio, ou movimentos nesse meio, são

capazes de produzir os fenômenos mecânicos observados. Se, pela mesma hipótese, pudermos conectar os fenômenos da atração magnética com os fenômenos eletromagnéticos e com aqueles das correntes induzidas, teremos encontrado uma teoria que, se não for verdadeira, somente poderá ser provada errada por experimentos que não de aumentar grandemente o nosso conhecimento desta parte da física (Maxwell, 2003b [1861/1862], p. 452).

(iii) Em “A dynamical theory of the electromagnetic field” (Maxwell, 2003c [1864]), Maxwell expõe uma teoria do campo eletromagnético que é também uma teoria eletromagnética da luz. Na Parte I do artigo (que possui ao todo sete partes), ele destaca sua oposição às teorias de ação a distância. Na Parte III, ele formula as equações do campo eletromagnético. Aqui aparece, é claro, a importante suposição de Maxwell sobre o papel desempenhado pela *corrente de deslocamento* (ver “A dynamical theory...”, eqs. (A), p. 554, juntamente com as eqs. (C), p. 557). Na Parte VI, Maxwell formula a teoria eletromagnética da luz, afirmando que a luz é uma onda eletromagnética. Ele obtém a equação de onda eletromagnética diretamente das equações do campo e passa a mostrar que a luz e os distúrbios eletromagnéticos possuem as mesmas propriedades (como a transversalidade), o que reforça a suposição de que a luz é uma onda eletromagnética.

Ao contrário do que fizera no artigo de 1861/1862, Maxwell alega aqui desenvolver sua teoria sem “hipóteses mecânicas”. A abordagem analógica (pelo menos em termos de analogias *físicas*) é abandonada.¹⁰ A articulação da teoria já se encaminha para a adoção do *formalismo lagrangiano*, o que permite dispensar as hipóteses sobre a constituição do sistema. Por exemplo, no final da Parte III do artigo, Maxwell escreve:

(73) Em uma ocasião anterior [isto é, Maxwell, 2003b [1861/1862]], procurei descrever um tipo específico de movimento e um tipo específico de deformação [*strain*], dispostos de tal modo a dar conta dos fenômenos. No presente artigo, evito qualquer hipótese desse tipo; e, quando emprego palavras como momento elétrico [*electric momentum*] e elasticidade elétrica [*electric elasticity*] com referência aos fenômenos conhecidos da indução de correntes e da polarização de dielétricos, desejo meramente direcionar a mente do leitor para fenômenos mecânicos que irão auxiliá-lo na compreensão dos fenômenos elétricos. Todas as frases desse tipo, no presente artigo, devem ser consideradas como ilustrativas, e não como explicativas (Maxwell, 2003c [1864], p. 563-4).

¹⁰ A possibilidade de fazer analogias *formais* (isto é, matemáticas) na física continua existindo e, de fato, esse caminho será adotado por vários físicos posteriores a Maxwell. Mas trata-se de um aspecto que não podemos desenvolver mais no âmbito do presente artigo.

A propósito, fazendo um parêntese nessa citação, vale ressaltar que, em carta da mesma época, Maxwell escreve:

Eu obtive, agora, dados para calcular a velocidade de transmissão de um distúrbio magnético, através do ar, baseado em evidência experimental, sem qualquer hipótese sobre a estrutura do meio ou qualquer explicação mecânica da eletricidade e do magnetismo (Maxwell, carta a Stokes de 1864, *apud* Abrantes, 1998, p. 197).

Voltando à Parte III do artigo, na continuação do texto Maxwell já defende a noção de que o campo eletromagnético possui uma realidade autônoma:

(74) Ao falar sobre a Energia do campo, no entanto, desejo ser entendido literalmente. [...] A única pergunta é: onde ela reside? Segundo as teorias antigas, ela reside nos corpos eletrizados, circuitos condutores e ímãs, sob a forma de uma qualidade desconhecida chamada energia potencial, ou poder de produzir certos efeitos a distância. De acordo com a nossa teoria, ela reside no campo eletromagnético, no espaço ao redor dos corpos eletrizados e magnetizados, bem como nos próprios corpos [...] (Maxwell, 2003c [1864], p. 564).

(Notemos que todo este trecho dos parágrafos (73) e (74) será retomado como objeto de discussão na próxima seção do presente texto. Em particular, veremos como precisamente as passagens por ora omitidas aqui colocam certos problemas.)

(iv) Na sua grande “*summa*” eletromagnética, o *Treatise on electricity and magnetism* (Maxwell, 1954 [1891]), Maxwell sintetiza a sua teoria matemática do eletromagnetismo. As equações do campo eletromagnético são rerepresentadas nos Caps. VIII e IX da Parte IV (Vol. 2), agora utilizando também a notação vetorial e a notação de quaternions. O postulado relativo à corrente de deslocamento é rerepresentado no Artigo 610 (Maxwell, 1954 [1891], Vol. 2, p. 253). No início do Cap. II da Parte IV (Vol. 2), Maxwell contrasta as abordagens da ação a distância (de Ampère) e da ação contínua (de Faraday) ao eletromagnetismo, e reitera sua adesão decidida à segunda:

As idéias que guiaram Ampère pertencem ao sistema que admite a ação direta a distância, e iremos constatar que Gauss, Weber, F. E. Neumann, Riemann, Betti, C. Neumann, Lorenz e outros conduziram uma notável linha de especulação e investigação baseada nessas idéias, com resultados bastante notáveis tanto na descoberta de novos fatos quanto na formação de uma teoria da eletricidade. Ver os Arts. 846-866.

As idéias que procurei desenvolver são aquelas da ação através de um meio, de uma porção à porção contígua. Essas idéias foram muito utilizadas por Faraday, e o seu desenvolvimento sob uma forma matemática, bem como a comparação dos resultados com os fatos conhecidos, foi o meu objetivo em vários artigos publicados. A comparação, sob um ponto de vista filosófico, entre os resultados de dois métodos tão completamente opostos, no que tange aos seus primeiros princípios, deve conduzir a dados valiosos para o estudo das condições da especulação científica (Maxwell, 1954 [1891], v. 2, p. 158).

Tanto em “A dynamical theory of the electromagnetic field” como no *Treatise*, Maxwell adota o formalismo lagrangiano já consagrado em mecânica. Maxwell expressa da seguinte forma, no *Treatise*, as vantagens do método lagrangiano:

O que eu proponho fazer agora é examinar as conseqüências da suposição de que os fenômenos da corrente elétrica são os de um sistema em movimento, com o movimento sendo comunicado de uma parte a outra do sistema por forças, cuja natureza e cujas leis nós nem tentaremos definir por ora, uma vez que podemos eliminar essas forças das equações de movimento pelo método dado por Lagrange para qualquer sistema com vínculos [*connected system*] (Maxwell, 1954 [1891], v. 2, p. 198).

E também:

Apliquei esse método de modo a evitar a consideração explícita do movimento de qualquer parte do sistema exceto as coordenadas ou variáveis das quais depende o movimento do todo. É sem dúvida importante que o estudante seja capaz de rastrear a conexão entre o movimento de cada parte do sistema e aquele das variáveis, porém não é necessário, em absoluto, fazer isso no processo de obtenção das equações finais, que são independentes da forma particular dessas conexões (Maxwell, 1954 [1891], v. 2, p. 200).

E ainda:

Neste esboço dos princípios fundamentais da dinâmica de um sistema com vínculos [*connected system*], deixamos de lado o mecanismo pelo qual as partes do sistema estão conectadas. Nem sequer escrevemos um sistema de equações indicando como o movimento de qualquer parte do sistema depende da variação das variáveis. Restringimos a nossa atenção às variáveis, suas velocidades e momen-

tos, e às forças que atuam sobre as porções [*pieces*] que representam as variáveis. Nossas únicas suposições são: que as conexões do sistema são tais que o tempo não aparece explicitamente nas equações das condições, e que o princípio de conservação da energia se aplica ao sistema (Maxwell, 1954 [1891], v. 2, p. 209).

No formalismo lagrangiano, como se sabe, o conceito de *energia* ocupa um lugar fundamental, em vez do conceito de *força*. (Assim, temos um afastamento em relação à ontologia mecanicista.) Além disso, o formalismo lagrangiano dispensa o conhecimento detalhado dos vínculos mecânicos internos do sistema e das forças devidas a esses vínculos. É preciso lidar apenas com as forças externas aplicadas ao sistema. Finalmente, diferentemente do método tradicional da mecânica, onde é necessário trabalhar com várias forças e acelerações vetoriais, no método lagrangiano é preciso trabalhar apenas com *uma única função escalar* $L = T - V$, onde T é a energia potencial e V a energia cinética.¹¹

5 A TENSÃO METODOLÓGICA E AXIOLÓGICA EM MAXWELL

Um exame do percurso de Maxwell entre “On Faraday’s lines of force” e o *Treatise* nos mostra basicamente três tendências gerais: um crescente questionamento dos modelos mecânicos, uma tendência a investir a noção de campo de realidade física e um movimento em direção a uma teoria mais matematizada e abstrata, instanciada particularmente no uso do formalismo lagrangiano.

O trabalho de análise histórica do surgimento da teoria do campo ficaria facilitado se o trajeto de Maxwell, ao longo dos quatro textos mencionados, pudesse ser descrito como um trajeto que se afasta de uma visão mecanicista e avança rumo a uma visão desmecanizada segundo uma função “contínua, lisa e monotônica” do tempo (para tomar de empréstimo uma expressão dos matemáticos). Porém a situação é na realidade um pouco mais complicada. Mesmo manifestando as tendências básicas acima referidas, a obra de Maxwell coloca certas dificuldades de interpretação. Essas dificuldades surgem, em primeiro lugar, porque o modo pelo qual ele articula sua teoria deixa sem resolução certas tensões entre o ponto de vista mecanicista e o não-mecanicista; em segundo lugar, o trajeto de Maxwell entre o ponto de vista mecanicista e o não-mecanicista apresenta, por assim dizer, certas idas e vindas, não sendo totalmente linear no tempo.

¹¹ No que concerne ao formalismo lagrangiano entendido como um método de caráter geral em física, cf. Abrantes, 1998, Cap. 6; Bunge, 1957; Doughty, 1990; Goldstein, Poole & Safko, 2002; Lanczos, 1986; Penrose, 2004, Cap. 20.

Vimos que, entre “On Faraday’s lines of force” e “A dynamical theory of the electromagnetic field” – e, posteriormente, no *Treatise* –, pode-se observar, pelo menos nos *pronunciamentos* de Maxwell, uma crescente intenção de abrir mão dos modelos mecânicos. Esse deslocamento conceitual já indica que Maxwell é, de alguma forma, um personagem de transição. Um exame mais detido, porém, mostra que a situação é, na realidade, mais complexa. Superpostas a esse movimento metodológico mais aparente, existem certas tensões e “não linearidades” ontológicas e metodológicas dignas de nota, que iremos analisar.

É preciso entender, em primeiro lugar, como o próprio Maxwell encarava suas próprias posições. Assim como ele desejara, em “On Faraday’s lines of force” e “On physical lines of force”, adotar as analogias mecânicas sem se comprometer com a realidade física dos mecanismos propostos, também o seu abandono das analogias mecânicas e sua adoção de um formalismo que dispensava o conhecimento das conexões entre as partes do sistema “não significava que a sua busca por uma explicação mecânica detalhada tivesse sido abandonada”, como lembra Martin J. Klein (1972, p. 69). A adoção de modelos mecânicos, num primeiro momento, e o seu abandono, num segundo momento, constituem decisões no plano *metodológico*. Porém, ao mesmo tempo, Maxwell continua sustentando um compromisso mecanicista no plano *axiológico*, como veremos. Embora “a analogia mecânica detalhada [tenha sido] quase completamente abandonada”, escreve Klein, “ele ainda estava construindo uma teoria mecânica” (1972, p. 69). Se por um lado Maxwell alerta para o fato de que os modelos analógicos devem ser considerados como meros “auxílios para a mente”, e as hipóteses correspondentes não devem ser entendidas num sentido literal, explicativo – e ainda que, num segundo momento, Maxwell chegue mesmo a abandonar os modelos analógicos –, por outro lado ele repetidamente expressa a convicção de que uma explicação “completa e satisfatória” de um fenômeno físico somente seria obtida quando se conhecesse *o mecanismo subjacente a ele*, e quando o fenômeno fosse reduzido a *mudanças na configuração e movimento de um sistema material*. Vejamos evidências textuais para esta afirmação.

(i) Primeiramente, é interessante notar que, em “On Faraday’s lines of force”, onde Maxwell propõe seu modelo fluido-mecânico, embora ele afirme que o uso de modelos corresponde meramente a uma espécie de “*embodied mathematics*”, ele acaba afirmando que:

Por meio de um estudo cuidadoso das leis dos sólidos elásticos e dos movimentos dos fluidos viscosos, espero descobrir um método para formar uma *concepção mecânica* desse estado eletrotônico, adaptada ao pensamento geral [*general reasoning*] (Maxwell, 2003a [1856], p. 188; grifo meu).

(Ao final dessa frase, uma nota de rodapé remete a um texto de W. Thomson publicado em 1847, “On a mechanical representation of electric, magnetic and galvanic forces”.) Essa assertiva é relevante na medida em que revela que Maxwell não é, como poderia parecer, um instrumentalista matemático; ao contrário, a sua axiologia cognitiva inclui a crença na busca de uma “concepção mecânica” dos fenômenos.

(II) Em “On physical lines of force”, Maxwell propõe o modelo de células vorticais e partículas de rolamento; e, na “recapitulação” feita ao final da Parte II do artigo (que possui ao todo quatro partes), ele afirma, claramente, que:

(1) Os fenômenos magneto-elétricos são devidos à existência de *matéria sob certas condições de movimento ou de pressão* em toda parte do campo magnético, e não à ação direta a distância entre os ímãs ou correntes. A substância que produz esses efeitos pode ser uma certa parte da matéria ordinária, ou pode ser um éter associado com a matéria. A sua densidade é maior no ferro e menor nas substâncias diamagnéticas; porém, em todos os casos, exceto no do ferro, ela deve ser extremamente rarefeita [*very rare*], uma vez que nenhuma outra substância possui uma razão grande da capacidade magnética com aquilo que denominamos vácuo (Maxwell, 2003b [1861/1862], p. 485; grifo meu).

Numa passagem já citada, ao falar sobre a camada de partículas de rolamento, ele faz referência ao fato de uma hipótese que serve para revelar “as conexões mecânicas reais entre os fenômenos eletromagnéticos”; e comenta que tal hipótese, ainda que “provisória e temporária”, irá representar, se bem compreendida, um progresso em direção à “interpretação verdadeira dos fenômenos”:

A noção de uma partícula que tem seu movimento conectado com o de um vórtice por contato perfeito via rolamento pode parecer um tanto canhestra. Eu não a proponho como um modo de conexão que exista na natureza, nem mesmo como aquilo com que eu concordaria prontamente enquanto hipótese elétrica. Trata-se, porém, de um modo de conexão que é mecanicamente concebível e facilmente investigado e serve para revelar *as conexões mecânicas reais* entre os fenômenos eletromagnéticos conhecidos; de sorte que me arrisco a dizer que qualquer um que compreenda o caráter provisório e temporário dessa hipótese irá se ver auxiliado por ela, em vez de por ela obstado, em sua busca pela *interpretação verdadeira dos fenômenos* (Maxwell, 2003b [1861/1862], p. 486; grifo meu).

(iii) Em “A dynamical theory of the electromagnetic field”, a teoria é apresentada pelo próprio Maxwell não mais como uma teoria “mecânica”, mas como uma “teoria dinâmica”. De que maneira se poderia entender essa distinção? Abrantes sugere que, na teoria “mecânica” existe a especificação de um mecanismo subjacente aos fenômenos (aqui, mecanicismo de tipo 2), ao passo que, na teoria “dinâmica”, não se especifica a ação de nenhum mecanismo ou parte de mecanismo, embora os processos ainda devam obedecer às leis da mecânica (aqui, mecanicismo de tipo 3b) (cf. Abrantes [1998], p. 197ss, o qual, no entanto, não emprega uma taxonomia dos vários tipos de mecanicismo como a nossa). Ora, essa definição é consistente com os *pronunciamentos metodológicos* de Maxwell (em “A dynamical theory...” e também no *Treatise*), porém nem sempre é consistente com a ontologia e a axiologia instanciadas na *prática* de Maxwell.

(iv) É indispensável analisar aqui o “salto lagrangiano” executado por Maxwell, que é descrito por Paulo Abrantes como “uma guinada metodológica importantíssima, que hoje temos condição de avaliar como um passo no sentido de uma desmecanização da teoria eletromagnética” (Abrantes, 1998, p. 197).

Após citar uma passagem de Maxwell já reproduzida aqui – o parágrafo (74) no final da parte (iii) de “A dynamical theory”, na qual Maxwell afirma que, ao falar sobre a energia do campo, ele deseja ser entendido literalmente – Sparzani observa, em seu artigo sobre os conceitos de força e campo, que “daqui por diante, a descrição dos fenômenos eletromagnéticos prossegue secamente em termos de campo”. E, logo em seguida, a respeito da nova física que começa a nascer com “A dynamical theory of the electromagnetic field”, Sparzani comenta:

Nestas poucas frases, e mais ainda na estrutura de todo o trabalho, assim como no *Treatise*, está contida uma considerável mudança de perspectiva relativamente aos dois primeiros artigos: aqui se percebe um dos episódios importantes de uma revolução epistemológica de grande alcance, que apresenta aspectos diversos e problemáticos, mas que, em todo caso, se pode apreender na passagem de um ideal explicativo, mecânico, modelístico em sentido realista, que inspirou a maior parte da investigação física do século XIX, a um ideal mais abstracto e formal, modelístico em sentido lógico e, em todo caso, mais matematizante, que *grosso modo* prevaleceu dos primeiros anos do século [XX] aos nossos dias.

O excerto de Maxwell que citamos [Maxwell, 2003c [1864], p. 563-4] ilustra em particular uma nova maneira de considerar o problema da transmissão a distância de perturbações eletromagnéticas e prepara uma solução que, a partir desse momento, se foi tornando cada vez mais dominante. Maxwell afirma ainda que a propagação das ondas eletromagnéticas se dá num meio dotado de um funcio-

namento complicado e em todo o caso desconhecido para nós, mas de que é suficiente a descrição poderosa e exaustiva, que não entra no pormenor desconhecido do mecanismo de transmissão, fornecida pelas quatro equações diferenciais que têm o seu nome (Sparzani, 1993, p. 294).

Esta maneira de ver é também compartilhada por J. M. Lévy-Leblond, que escreve o seguinte:

[E]m torno do segundo terço do século 19, o próprio Maxwell, que elaborou a teoria do campo eletromagnético em sua forma completa, insistindo na necessidade dos modelos mecânicos, deixa-os passar progressivamente para o segundo plano no desenvolvimento de sua teoria, cujo formalismo elegante e fecundo assume o lugar dos hipotéticos e complexos mecanismos subjacentes (Lévy-Leblond, 2004, p. 108).

No que diz respeito ao *Treatise*, porém, deve-se atentar para uma situação peculiar. Por um lado, o fato de que as técnicas de Lagrange permitem descrever um sistema, apesar de desconhecermos seus “agenciamentos internos” – a elegante expressão é de Abrantes (1998, p. 202) –, era aparentemente entendido por Maxwell como uma virtude. Várias passagens parecem constituir uma profissão de fé no método lagrangiano e poderiam nos fazer supor, por implicação, que ele desistiu da busca por mecanismos. Porém Maxwell ainda revela, em outros trechos importantes, uma ligação surpreendentemente explícita com o mecanicismo (tanto de tipo 2, isto é, mecanismos, como até de tipo 1, isto é, matéria e movimento):

O primeiro tipo de energia, aquela do movimento, é denominada energia cinética e, uma vez compreendida, parece ser um fato tão fundamental da natureza que não podemos imaginar a possibilidade de analisá-lo em termos de alguma outra coisa. O segundo tipo de energia, aquela que depende da posição, é denominada energia potencial e deve-se à ação daquilo que denominamos forças, vale dizer, tendências à mudança de posição relativa. Com relação a essas forças, embora possamos aceitar a sua existência como um fato estabelecido, sentimos, contudo, que qualquer explicação do mecanismo pelo qual os corpos são postos em movimento representa um acréscimo real ao nosso conhecimento (Maxwell, 1954 [1891], v. 2, p. 211).

Com efeito, ele expressa a sua convicção de que uma “teoria dinâmica completa” deveria especificar os *mecanismos* pelos quais as ações são efetuadas – *diferentemente*, admite ele, *do que se faz no Treatise* (confissão que não deixa de soar surpreendente):

Um conhecimento disso [isto é, “se a corrente elétrica é realmente uma corrente de uma substância material, ou uma corrente dupla, ou se a sua velocidade é grande ou pequena”] corresponderia pelo menos aos primórdios de uma *teoria dinâmica completa da eletricidade*, na qual deveríamos considerar a ação elétrica não como um fenômeno devido a uma causa desconhecida, sujeito apenas às leis gerais da dinâmica (como neste tratado), mas sim como resultado de *movimentos conhecidos de porções conhecidas de matéria*, onde se toma como objetos de estudo não apenas os efeitos totais e os resultados finais, mas sim *todo o mecanismo intermediário e os detalhes do movimento* (Maxwell, 1954 [1891], v. 2, p. 218; grifo meu).

Para sermos justos, devemos lembrar, com Abrantes (1998, p. 199), que a própria possibilidade de aplicar o formalismo lagrangiano a um determinado domínio de fenômenos era percebida *na época* como uma indicação da “natureza mecânica” dos fenômenos estudados. Porém, essa maneira de ver foi se modificando posteriormente. De resto, cabe lembrar que, na atualidade, o formalismo lagrangiano demonstra possuir aplicabilidade extremamente geral, não se restringindo apenas ao domínio da mecânica.¹²

De qualquer modo, embora a decisão metodológica de utilizar o formalismo lagrangiano apontasse numa direção *oposta* à busca de uma concepção mecânica, parece que Maxwell não enxergava inconsistência entre, por um lado, adotar a abordagem lagrangiana e, por outro, manter no horizonte a busca por mecanismos subjacentes. Como observa Abrantes (1998, p. 197), Maxwell não viu a “guinada metodológica” da abordagem lagrangiana como um passo no sentido de uma desmecanização da teoria eletromagnética. Assim, talvez não seja um grande exagero caracterizar Maxwell como um “lagrangiano ambivalente”.

¹² Assim, o formalismo lagrangiano permite que teorias muito diferentes (por exemplo, sobre partículas clássicas, partículas quânticas, campos clássicos, campos quânticos) sejam formuladas de maneira estruturalmente análoga. Como se sabe, no século xx *os próprios campos* (e não apenas as suas ações sobre os corpos materiais) viriam a ser descritos em termos lagrangianos (como sistemas com um número infinito de graus de liberdade — ver Thidé, 2001, e Frenkel, 1996). Vale lembrar que esse método não está restrito aos campos clássicos, podendo se estender *também aos campos quantizados*.

Deveríamos entender a possibilidade de estender o formalismo lagrangiano às outras áreas como sendo uma indicação de que elas partilham de um certo “caráter mecanicista”? Creio que não. Ao contrário, creio que a validade do formalismo lagrangiano em teorias que escapam do âmbito mecanicista deveria ser lida no sentido inverso — não como apontando para uma primazia da mecânica, mas sim como uma indicação de que existe um aspecto intrinsecamente não-mecanicista nas outras teorias, e esse aspecto não-mecanicista está presente *até mesmo na própria mecânica*. Não são as outras teorias que são “mecanizadas”, mas a própria mecânica é que tem o seu estatuto revisto em função das teorias não-mecanicistas. Assim, poderíamos dizer que o formalismo lagrangiano não exporta para as outras teorias o que há de mecanicista na mecânica, mas, antes, nos faz ver os aspectos não-mecanicistas que a mecânica partilha com as outras teorias.

Vimos que Maxwell tem o cuidado de atribuir uma função apenas “tática” tanto à adoção como à rejeição das hipóteses e modelos mecânicos, abrindo assim a possibilidade de traçar a distinção aqui mencionada entre o plano metodológico e o plano axiológico. Portanto, ele evita que haja uma contradição *interna* à metodologia, ou *interna* à axiologia; porém persiste uma tensão *entre* os dois planos: metodológico e axiológico. Como vimos, em diversas passagens dos escritos de Maxwell se pode perceber duas tendências opostas: no plano axiológico, a busca de mecanismos subjacentes à ação (que denominamos aqui mecanicismo de tipo 2) e, no plano metodológico, o abandono de tais mecanismos. A propósito, é bom não deixar de notar que, no plano axiológico, até mesmo o mecanicismo que denominamos como de tipo 1 – isto é, redução a matéria e movimento – parece voltar à tona em algumas das passagens que acabaram de ser citadas.

Que essa tensão entre metodologia e axiologia tem conseqüências não desprezíveis pode-se perceber, em primeiro lugar, lembrando que a metodologia deve ser entendida com um *meio* (ou um conjunto de meios) para a obtenção de determinados *fins* cognitivos. Se o fim é a busca de uma concepção mecânica do eletromagnetismo, uma metodologia que permite (na verdade, encoraja) um crescente afastamento de qualquer modelo mecânico constitui um meio inadequado ao atingimento daquele fim. Além do mais, uma vez que o processo de construção e seleção de teorias é condicionado paralelamente tanto pela metodologia como pela axiologia, ele poderia ficar sujeito a influências conflitantes. Portanto, o princípio de coerência que busca harmonizar teoria, metodologia e axiologia deve predominar, sob pena de se ter *constraints* atuando de maneira contraditória sobre as teorias. (A esse respeito, ver a concepção reticucional de dinâmica científica desenvolvida por Larry Laudan, 1984.)

Finalmente, consideremos o plano ontológico. A teoria de Maxwell é uma teoria do *campo* eletromagnético, mas, ao mesmo tempo, é também uma teoria do *éter* eletromagnético. Um primeiro aspecto a notar é que existe uma tensão entre o trajeto de Maxwell rumo ao conceito de campo eletromagnético “puro”, sem suporte, e o seu compromisso com o conceito de meio etéreo quase-material. Retomemos a passagem já citada do final da Parte III de “A dynamical theory”, onde Maxwell fala sobre o fato de o campo possuir energia. Como já observamos, essa passagem pareceria indicar que o campo já se acha investido de estatuto ontológico próprio:

(74) Ao falar sobre a Energia do campo, no entanto, desejo ser entendido literalmente. [...]

Porém, logo em seguida, ele afirma que essa energia é uma energia *mecânica*:

Toda energia é energia mecânica, quer ela exista sob a forma de movimento ou sob a forma de elasticidade, ou ainda sob qualquer outra forma. A energia, nos fenômenos eletromagnéticos, é energia mecânica. [...]

E Maxwell conclui, inicialmente atribuindo a energia ao campo, mas depois re-
cuando dessa posição:

A única pergunta é: onde ela reside? Segundo as teorias antigas, ela reside nos corpos eletrizados, circuitos condutores e ímãs, sob a forma de uma qualidade desconhecida chamada energia potencial, ou poder de produzir certos efeitos a distância. De acordo com a nossa teoria, ela reside no campo eletromagnético, no espaço ao redor dos corpos eletrizados e magnetizados, bem como nos próprios corpos, e existe sob duas formas diferentes, que podem ser descritas, sem hipóteses, como polarização magnética e polarização elétrica, ou, segundo uma hipótese bastante provável, *como o movimento e a deformação [strain] de um mesmo meio* (Maxwell, 2003c [1864], p. 564; grifo meu).

Desse modo, embora possa parecer à primeira vista que a energia reside no campo, esta interpretação defronta-se com a dificuldade de o campo ainda não ser, aqui, uma entidade com estatuto ontológico autônomo; assim, em última análise, a energia do campo residiria, por sua vez, em um meio mecânico.

Um segundo aspecto importante no plano ontológico é que Maxwell ainda atribui um papel ao meio na transmissão da ação eletromagnética e, por vezes, ainda recai num ideal mecanicista que ecoa o mecanicismo de tipo (1), ou seja, matéria e movimento:

Eu preferi, portanto, buscar uma explicação para os fatos em outra direção, supondo que eles são produzidos por ações que ocorrem no meio circundante assim como nos corpos excitados, e procurando explicar a ação entre os corpos sem pressupor a existência de forças capazes de agir diretamente a distâncias apreciáveis.

(3) A teoria que proponho pode, portanto, ser denominada uma teoria do *campo eletromagnético*, pois diz respeito ao espaço nas proximidades dos corpos elétricos ou magnéticos, e pode ser chamada uma teoria *dinâmica*, pois pressupõe que naquele espaço existe *matéria em movimento*, por meio da qual os fenômenos eletromagnéticos observados são produzidos (Maxwell, 2003c [1864], p. 527; último grifo meu).

Maxwell, inclusive, discute as *propriedades* do meio etéreo:

(4) O campo eletromagnético é aquela parte do espaço que contém e envolve os corpos em condições elétricas ou magnéticas.

Ele pode ser preenchido com qualquer tipo de matéria, ou então podemos procurar esvaziá-lo de toda matéria maciça [*gross matter*], como no caso dos tubos de Geissler e de outros assim chamados vácuos.

Sempre resta, porém, matéria suficiente para receber e transmitir as ondulações da luz e do calor e, devido ao fato de que a transmissão dessas radiações não se altera muito quando o assim chamado vácuo é substituído por corpos transparentes de densidade mensurável, somos obrigados a admitir que as ondulações são de uma substância etérea, e não da matéria maciça, cuja presença meramente altera de algum modo o movimento do éter.

Temos, portanto, razões para acreditar, com base nos fenômenos da luz e do calor, que existe um meio etéreo preenchendo o espaço e permeando os corpos, capaz de ser posto em movimento e de transmitir esse movimento de uma parte a outra, e de comunicar esse movimento à matéria maciça de modo a aquecê-la e afetá-la de várias maneiras.

(5) Ora, a energia que é transmitida ao corpo ao aquecê-lo deve ter existido antes no meio movente, pois as ondulações haviam partido da fonte de calor algum tempo antes de atingirem o corpo, e durante esse tempo a energia deve ter estado metade na forma de movimento do meio e metade na forma de resiliência elástica. Com base nessas considerações, o Prof. W. Thomson sustentou que o meio deve possuir uma densidade comparável àquela da matéria maciça, e chegou mesmo a atribuir um limite inferior a essa densidade.

(6) Podemos portanto acolher, como um dado derivado de um ramo da ciência independente daquele com o qual precisamos lidar, a existência de um meio onipresente [*pervading medium*], com uma densidade pequena porém real, capaz de ser posto em movimento e de transmitir o movimento de uma parte a outra com velocidade grande, porém não infinita (Maxwell, 2003c [1864], p. 527-8).

Concluimos que, em vários níveis, Maxwell ainda oscila entre a adesão à visão mecanicista e o rompimento com ela – algo que não nos deveria causar espanto, visto tratar-se de um personagem de transição, que é ele mesmo o protagonista de uma revolução científica. No plano ontológico, vemos que, em Maxwell, já existe um conceito de campo, dotado de sua própria energia; porém, ainda se trata de um campo atrelado a um meio etéreo. Por outro lado, o conceito de campo permitiria explicar a propagação das ações eletromagnéticas sem recair na ação a distância; entretanto, ainda vemos Maxwell lançar mão também do meio interveniente para explicar essa propagação. No plano metodológico temos, primeiramente, a adoção dos modelos mecânicos

apenas num registro analógico, depois, o abandono de tais modelos e, finalmente, a adoção do formalismo lagrangiano; mas, ao mesmo tempo, ainda identificamos, no plano axiológico, entre os valores cognitivos operantes, uma clara expectativa de descobrir mecanismos subjacentes, bem como uma preferência por explicações que utilizem uma ontologia de matéria e movimento.

Alan Chalmers comenta que “os indubitáveis êxitos de Maxwell no eletromagnetismo foram obtidos *apesar* da sua busca por explicações mecânicas naquele domínio, ao passo que sua abordagem conduziu a erros e becos sem saída que precisariam ser superados por aqueles que adotassem uma abordagem diferente” (Chalmers, 2001, p. 427; grifo meu). Ou seja, na elaboração por Maxwell de sua teoria eletromagnética, seus pressupostos metateóricos teriam funcionado, na realidade, como um *obstáculo*, mais do que como um estímulo. Creio ter ajudado a localizar de forma mais precisa as raízes desse obstáculo: sustento que ele reside na *axiologia* e na *ontologia* de Maxwell e na sua *relação de tensão* com a metodologia, mais do que na metodologia propriamente dita. A tensão entre axiologia+ontologia, por um lado, e metodologia, por outro, somente viria a ser resolvida bem depois da época de Maxwell. Consideraremos, nas duas próximas seções, um pouco desses desenvolvimentos subseqüentes.

6 O(S) ÉTER(ES), CONTINUAÇÃO

Como vimos, boa parte da teoria do campo do século XIX é uma teoria do *campo* eletromagnético, mas, simultaneamente, também é uma teoria do *éter* eletromagnético. A teoria do campo continuaria a ser desenvolvida fazendo uso do éter até a virada do século XIX para o XX. É certo que se tratava de um éter cada vez mais distante do plenismo (e do atomismo) do século XVII e dos fluidos sutis do século XVIII. Admitia-se abertamente que o éter tinha que ser postulado com propriedades completamente diferentes da matéria ordinária. Como explica J. M. Lévy-Leblond:

De fato, esse éter tinha características bem estranhas: por um lado, a luz se propagava aí a uma velocidade tão considerável (os famosos 300.000 km/s) que esse meio devia ser concebido como muito rígido (seus corpúsculos deviam estar muito estreitamente acoplados para reagir com rapidez aos deslocamentos de uns em relação aos outros); por outro, dado que a luz se propaga nos recintos em que não há nenhum gás usual ou no espaço intersidereal, esse meio devia ser muito fluido, de forma a passar através de toda matéria comum. Uma excepcional rigidez aliada a uma extrema fluidez, eis o que tornava bastante difícil a concepção de modelos mecânicos, isto é, corpusculares e, portanto, discretos do éter (Lévy-Leblond, 2004, p. 108).

Além do mais, embora por um lado a matéria ordinária precisasse ser “transparente” ao éter ao se deslocar através dele, por outro lado acreditava-se que o movimento da Terra em sua trajetória em meio ao éter deveria produzir um efeito de arrasto do éter (efeito que, por sinal, haveria de ser observável). Por essas razões, o éter acabava constituindo uma entidade ontologicamente diferente da matéria. Outro aspecto a notar é que os modelos alcançaram um alto grau de complexidade e sofisticação matemáticas.

Dois casos importantes podem ser destacados aqui. Por exemplo, após ter-se tratado o éter como um fluido, passa-se a considerá-lo como um *sólido elástico “ideal”*, especialmente G. G. Stokes, em meados do século XIX (cf. Doran, 1975). Assim, não há mais *transporte* de partículas, mas apenas *comunicação de tensão (stress)*. Novamente, a ação não é por contato nem a distância, mas sim um tipo de *ação contínua*. William Thomson (Lord Kelvin), desejando alcançar uma síntese entre o éter contínuo e a concepção molecular da matéria que vinha no bojo da (então recente) teoria cinética do calor, formulou sua teoria do “átomo vortical” (*vortex atom* – cf. a extensa discussão em Doran, 1975), concepção que, aliás, ele discutiu com Faraday. (Thomson não acreditava em *átomos* propriamente ditos, por entender que isso implicava corpúsculos interagindo por contato ou a distância no vazio.) Aqui temos um retorno ao pleno, porém com características novas. Toda a matéria é contínua e o espaço é pleno; a heterogeneidade molecular consiste em movimentos vorticais locais do éter contínuo. (Pareceria que a noção de “vórtices num pleno” soa cartesiana. Porém, no pensamento cartesiano, a matéria é um conceito fundamental, ao passo que, na teoria de Thomson, a matéria se revela ser *derivada*. Doran enxerga em certos aspectos do pensamento de Thomson uma forte herança leibniziana, questão que não iremos discutir aqui.) Por volta de 1880, existia na esteira da teoria do “*vortex atom*” uma escola que poderíamos chamar de “teoria etérea da matéria”: a matéria não seria mais a substância básica, mas seria derivada do meio etéreo primordial. Até Lorentz e Larmor, por volta de 1900, a grande maioria dos físicos teóricos ainda trabalha na vertente híbrida do “campo-com-éter”. Poderíamos citar muitos nomes. À parte as diferenças de detalhe entre as teorias, o certo é que se tratava, em geral, de rejeitar a ação a distância e defender a ação contínua.

Barbara Doran (1975), que estuda detalhadamente o desenvolvimento das teorias eletromagnéticas britânicas na segunda metade do século XIX, sustenta que a visão mecanicista de natureza *já havia sido abandonada*, e uma visão eletromagnética de natureza, com todas as letras, *já estava em vigor* no lugar dela *ainda durante o período das teorias do éter*, em pleno século XIX. Ela descreve a revolução eletromagnética dizendo que

por volta do final do século XIX as noções mecânicas de ‘átomos no vazio’ e ‘forças atuando entre partículas materiais’ haviam sido substituídas pelas noções de campo eletromagnético como um pleno não-material e contínuo e de átomos materiais como produtos estruturais-dinâmicos discretos do pleno.

E caracteriza a revolução eletromagnética como

uma rejeição consciente dos conceitos mecânicos de átomo, vazio e força em favor de um pleno e uma noção campo-teórica [*field-theoretic*] de matéria (Doran, 1975, p. 134-5).

Em diversas passagens de seu longo estudo, ela fala em *desmecanização do éter* (inclusive distinguindo entre “*early demechanization*” e “*late demechanization*”, por exemplo, p. 138, 150, 162, 206, 208, 210). E chega a afirmar:

A nova concepção do éter revelou-se superior aos postulados mecânicos de átomos no vazio e de forças entre partículas na explicação de fenômenos elétricos, magnéticos e ópticos envolvendo as interações entre éter e matéria, e a síntese resultante, na visão eletromagnética de natureza, completou a revolução estimulada em parte pela recente desmecanização do éter luminífero (Doran, 1975, p. 162).

E, mais adiante:

Já completamente desmecanizado e equivalente ao campo moderno, o éter britânico dos anos 1880 foi reconhecido como a base para uma nova visão de mundo (Doran, 1975, p. 210).

Ora, esta caracterização soa inconsistente e insatisfatória. Ela me parece ser decorrente de uma visão demasiado abrangente da física do campo ou de uma visão demasiado estreita de mecanicismo, ou talvez de ambas as coisas. Tenho grande dificuldade em entender como uma física que oscilava tão violentamente quanto ao estatuto ontológico de seus conceitos primitivos; que continuava buscando mecanismos e postulando propriedades mecânicas (como densidade, elasticidade, rotação, tensão interna, inércia) para explicar as ações eletromagnéticas; e que continuava atrelando o campo a um meio ou suporte “quase-material” poderia ser descrita como uma “física desmecanizada”. No máximo, penso que podemos falar em uma *fase de transição* rumo a uma física do campo efetivamente desmecanizada, porém a desmecanização ainda estava longe de ser completa.

No final do século XIX, os problemas do éter continuavam sem solução satisfatória, a saber: a caracterização da diferença entre o éter e a matéria ordinária, e a interação entre o éter e a matéria. E, ao longo do século XIX, repetidas tentativas de detectar experimentalmente as propriedades e a própria presença do éter revelavam-se infrutíferas. Certamente o resultado negativo da experiência de Michelson-Morley, em 1887, foi um dos fatores que contribuíram para o abandono do éter, porém não foi o único, nem tampouco foi decisivo. Ao mesmo tempo, algumas vozes começam a ser ouvidas (principalmente de físicos alemães, como Carl Neumann), segundo as quais o campo não necessitaria do suporte de um meio etéreo – o campo “bastaria a si mesmo”, por assim dizer. É nesse sentido que, como lembra Howard Stein (1970), deve-se entender a observação de Hertz, de que “a teoria de Maxwell é o sistema das equações de Maxwell”. Ou seja, a teoria não necessita de quaisquer hipóteses suplementares acerca do éter. Com efeito, acabou-se por perceber que Maxwell já havia formulado uma teoria que era perfeitamente independente da noção de éter, embora ele mesmo e muitos de seus contemporâneos e sucessores tenham tido dificuldade para entendê-la assim. Doran discorda – consoante a sua clara tendência a desvalorizar o trabalho de Maxwell em favor de outros físicos britânicos como Thomson e Larmor – e afirma que “as equações de Maxwell são a teoria de Maxwell do éter, e como tal devem ser estudadas” (Doran, 1975, p. 199).

7 FINAL: A RELATIVIDADE

A efetiva independência da estrutura formal da eletrodinâmica de Maxwell em relação ao éter nos dá ensejo de tratar de um aspecto que me parece altamente significativo: que Maxwell, com uma intuição extraordinária, logrou formular uma teoria muito adiante de seu tempo, no sentido de que ela se mostra ser *já compatível com a imagem relativística de natureza*. Essa compatibilidade se revela de várias maneiras.

(1) Antes de mais nada, o que em primeiro lugar salta aos olhos é que as equações de Maxwell e a equação de onda eletromagnética são, como se sabe, *relativisticamente invariantes* – mais precisamente, são invariantes sob transformações de Lorentz, ao passo que não o são sob transformações galileanas.¹³ Como é sabido, Einstein inicia seu artigo “Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento” (Einstein, 1905) denunciando as assimetrias que surgem quando se tenta utilizar a eletrodinâmica “tal

¹³ Com relação à não-invariância da equação de onda sob transformações de Galileu, cf. Jackson, 1999, p. 516. A demonstração é um exercício tedioso porém simples.

como usualmente entendida no momento” (isto é, na formulação de Lorentz) para descrever o fenômeno de indução na interação entre um ímã e um condutor, conforme se considere um ou outro como estando em repouso, e o outro em movimento relativamente ao primeiro. O caminho adotado por Einstein, como se sabe, não foi o de rejeitar a eletrodinâmica maxwelliana, mas sim preservá-la, ainda que isso custasse uma redefinição do espaço, do tempo e da simultaneidade, além de levar ao abandono do éter. Não é um “milagre” que as equações de Maxwell sejam invariantes de Lorentz, uma vez que a manutenção da forma das equações é pressuposta (juntamente com o postulado da constância da velocidade da luz) na derivação das próprias transformações. O que é notável é o potencial *heurístico* exibido pelas equações de Maxwell: o fato de que o apego a essas equações tenha dado origem a um conjunto de transformações que viriam a desempenhar, em seguida, o papel que nós bem conhecemos — isto é, receberam abundante corroboração experimental e assumiram a função de *constraints* fundamentais e quase ubíquos dentro do sistema das teorias físicas, constituindo-se em verdadeiros pilares da ciência subsequente.¹⁴

14 Há outro aspecto ligado à simetria que deve ser mencionado aqui. Embora Einstein, em 1905, tenha mantido as equações de Maxwell, com a adoção das novas transformações de espaço-tempo, resta um elemento na teoria que não é invariante de Lorentz, a saber, a densidade de carga. Num contexto relativístico, nem a densidade de carga nem a densidade de corrente podem ser consideradas isoladamente uma da outra. O que aparece como uma distribuição de carga estática num dado referencial aparecerá como uma distribuição de carga e de corrente em outro referencial, em movimento relativamente ao primeiro. O que se faz necessário é passar a uma *nova forma de representação* das equações de Maxwell que torne claro o fato de que a densidade de carga e a densidade de corrente — que aparecem separadas nas equações originais — são na verdade manifestações *da mesma quantidade*. Isso é conseguido passando à formulação *covariante* das equações.

Na formulação covariante (cf. Jackson, 1999, seção 11.9, e Frenkel, 1996, seções 10.1 e 10.2), a densidade das “fontes” do campo é representada como um *quadrivetor* $J\alpha = (cp, \mathbf{J})$, o campo eletromagnético é representado como um *tensor* $F\alpha\beta = \partial\alpha A\beta - \partial\beta A\alpha$, e o potencial é também representado como um quadrivetor $A\alpha = (\Phi, \mathbf{A})$. O quadrivetor carga-corrente $J\alpha$ é um invariante de Lorentz e obedece à equação da continuidade (em quatro dimensões). Vale lembrar que, nessa formulação, as quatro equações originais se reduzem a apenas duas, sendo uma homogênea e uma não-homogênea. No caso do vácuo (isto é, fora dos meios materiais), e empregando unidades gaussianas, elas possuem a seguinte forma:

$$\begin{aligned}\partial\alpha\mathcal{F}\alpha\beta &= 0 \\ \partial\alpha F\alpha\beta &= (4\pi/c)J\beta\end{aligned}$$

sendo que o tensor dual $\mathcal{F}\alpha\beta$ é obtido a partir de $F\alpha\beta$ através da contração com o tensor totalmente anti-simétrico $\epsilon\alpha\beta\gamma\delta$ (o que equivale a fazer as substituições $\mathbf{E} \rightarrow \mathbf{B}$ e $\mathbf{B} \rightarrow -\mathbf{E}$ nos elementos do tensor).

Note-se que é possível adotar uma representação ainda mais compacta das equações, em termos do operador dual “estrela” de Hodges, caso em que as equações assumem, respectivamente, a forma: $dF = 0$ e $d^*F = 4\pi^*J$ (cf. Penrose, 2004, seção 19.2). Sobre as relações entre ambas as representações, sua interpretação geométrica em termos de espaços fibrados com conexão, e a relação com o conceito de transformação de *gauge*, ver Videira, 1987, seções II e III, e também Penrose, 2004, seção 19.4.

(2) Além disso, as equações de Maxwell anunciam uma união inextricável entre campo elétrico e campo magnético num único campo, união que *depende, por sua vez, de uma união entre espaço e tempo* (como lembra A. L. L. Videira, 1987, p. 146-7); o que é um tema característico da relatividade. Isso já pode ser percebido quando examinamos o par de equações que governam os campos elétrico e magnético de uma onda eletromagnética no vácuo:

$$\begin{aligned}\mathbf{rot} \mathbf{E} &= -\partial\mathbf{B}/\partial t \\ \mathbf{rot} \mathbf{B} &= \partial\mathbf{E}/\partial t.\end{aligned}$$

Aqui, a variação de cada um dos campos no espaço¹⁵ está indissolúvelmente ligada com a variação do outro campo no tempo. Assim, a “dança inexorável” dos campos \mathbf{E} e \mathbf{B} , o seu “casamento eterno e indissolúvel”, como escreve Videira, requer, por sua vez, um casamento entre espaço e tempo.

(3) A relação que existe entre, por um lado, a unificação dos dois campos em um só (o campo eletromagnético) e, por outro, a unificação do espaço e do tempo num contínuo espaço-tempo, fica ainda mais visível quando examinamos as expressões relativísticas para a transformação dos campos elétrico e magnético entre diferentes referenciais. Considerando um referencial K e um referencial K' movendo-se com velocidade \mathbf{v} relativamente a K , temos, de maneira simplificada (f e g representam funções vetoriais):

$$\begin{aligned}\mathbf{E}' &= f(\mathbf{E}, \mathbf{B}) \\ \mathbf{B}' &= g(\mathbf{E}, \mathbf{B})\end{aligned}$$

Ou, escrevendo explicitamente as transformações (lembrando que $\beta = \mathbf{v}/c$, $\beta = |\beta|$ e $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$):

$$\begin{aligned}\mathbf{E}' &= \gamma(\mathbf{E} + \beta \times \mathbf{B}) - (\gamma^2 / (\gamma + 1)) \beta(\beta \cdot \mathbf{E}) \\ \mathbf{B}' &= \gamma(\mathbf{B} - \beta \times \mathbf{E}) - (\gamma^2 / (\gamma + 1)) \beta(\beta \cdot \mathbf{B})\end{aligned}$$

No caso em que o referencial $K' = (x'_1, x'_2, x'_3)$ se move em relação a $K = (x_1, x_2, x_3)$ sobre o eixo x_1 , com velocidade $v = \beta c$, temos:

$$\begin{aligned}E'_1 &= E_1 & B'_1 &= B_1 \\ E'_2 &= \gamma(E_2 - \beta B_3) & B'_2 &= \gamma(B_2 + \beta E_3) \\ E'_3 &= \gamma(E_3 + \beta B_2) & B'_3 &= \gamma(B_3 - \beta E_2)\end{aligned}$$

¹⁵ Lembremos que o rotacional é uma derivada espacial.

Como se vê, a expressão para o campo elétrico num referencial em movimento é uma função do próprio campo elétrico *e também do campo magnético*; e analogamente para a expressão do campo magnético. Isso significa que os campos **E** e **B** não têm existência independente um do outro. Um campo que é puramente elétrico ou puramente magnético em um certo referencial irá aparecer com uma *mistura* de campos elétrico e magnético em outro referencial. Essa é a maior evidência de que os dois campos estão indissolúvelmente ligados, e essa ligação existe graças a uma integração entre espaço e tempo.

(4) Esse tema da revisão nos conceitos de espaço e tempo nos leva ao golpe final desferido na visão mecanicista. Para o surgimento da teoria da relatividade, era necessário que os últimos bastiões de uma visão mecanicista de mundo – a saber, o espaço e o tempo – fossem postos abaixo. Os conceitos clássicos de espaço e tempo absolutos e independentes são pressupostos por qualquer um dos tipos de mecanicismo que citamos no início, na medida em que permitem falar em extensão, forma e movimento (mecanicismo de tipo 1), permitem construir o edifício da mecânica (mecanicismo de tipos 3a e 3b) ou proporcionam a arena para especificar os mecanismos subjacentes (tipo 2) ou os sistemas-máquinas (tipo 4). A teoria da relatividade restrita, sem pretender reduzir o eletromagnetismo à mecânica (nem vice-versa), alcança uma unificação entre as duas teorias. Mas essa unificação, para que seja possível, precisa ter precedência *até em relação aos conceitos de espaço e tempo* (como lembra Hirosige, 1976). A teoria da relatividade incorpora princípios aos quais têm que se sujeitar tanto a mecânica quanto o eletromagnetismo. Esse é mais um golpe na visão mecanicista (especialmente de tipo 3a e 3b).

(5) A teoria da relatividade geral completa a demolição, na medida em que o próprio espaço-tempo, a própria geometria do universo, se identifica com o campo gravitacional. O último resquício da imagem mecanicista de natureza e de ciência se foi. Resta uma física nova, governada pelas simetrias abstratas, como a covariância e a invariância de *gauge*, totalmente alienígenas à visão mecanicista. Nesta física também as *leis de conservação* são desmecanizadas, estando conectadas às simetrias via teorema de Noether (demonstrado originalmente em 1918). Por exemplo:

invariância por translação espacial \leftrightarrow conservação do momento;

invariância por translação temporal \leftrightarrow conservação da energia;

invariância por rotação \leftrightarrow conservação do momento angular, etc.

Neste novo quadro conceitual, até mesmo as *quebras* de simetria podem ter conseqüências surpreendentes (como acontece, por exemplo, na teoria eletrofraca de Weinberg-Salam). E, finalmente, após uma longa e acidentada travessia histórica, agora investido de um estatuto ontológico comparável ao da matéria, resta, enfim, o *campo*. ☞

AGRADECIMENTOS. Desejo agradecer os comentários incisivos feitos pelos Professores Michel Paty, Osvaldo Pessoa Jr., Claudemir R. Tossato e Renato Kinouchi, que me permitiram reparar várias omissões e imprecisões em uma versão anterior do texto. Uma versão resumida de parte do material exposto aqui foi apresentada sob a forma de comunicação no IV Encontro da Associação de Filosofia e História da Ciência do Cone Sul (AFHIC), em Buenos Aires, Argentina, em março de 2004. Agradeço ao público ali presente pelas questões levantadas durante a discussão. Desejo agradecer aqui também ao Prof. Walter M. Pontuschka, do Instituto de Física da USP, pela assistência com algumas referências bibliográficas. A pesquisa aqui apresentada foi financiada por uma bolsa de pós-doutoramento da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP). Esta pesquisa também se beneficiou em parte do Projeto Temático “Estudos de filosofia e história da ciência” da FAPESP, 2002-2005, no Departamento de Filosofia da FFLCH-USP.

Valter ALNIS BEZERRA

Professor Doutor da Faculdade de São Bento.

Pós-doutorando FAPESP/Departamento de Filosofia
da Universidade de São Paulo, Brasil.

bezerra@usp.br



ABSTRACT

This paper surveys the conceptual development of classical field theory – particularly Maxwell’s electrodynamics, as it was presented in the pioneer papers of 1856, 1861/1862 and 1864 and in the *Treatise on electricity and magnetism* – aiming at getting an understanding of the role it played in the crisis of the mechanistic image of nature. Maxwell’s role as a transition character between the mechanistic and the post-mechanistic views stands out clearly when one analyzes the tension that builds up in his texts on electrodynamics between his scientific methodology, on the one hand, and his ontology and cognitive axiology, on the other. This tension reflects the very tension existing between mechanism and demechanization. Special attention is given to an analysis of the role played by the field concept, the mechanical models, analogies, the Lagrangian formalism and the ever-changing concept of ether. In order to carry out this analysis, we develop a taxonomy of the different kinds of mechanism, and also avail ourselves of concepts brought forth by Larry Laudan’s reticulation model of scientific rationality. Some features of the phase prior to Maxwell are discussed besides his electrodynamics – in particular the debate concerning action-at-a-distance, as well as Faraday’s views on fields and forces – thus allowing one to better bring into context his research program in electrodynamics. Some latter developments in field theory are also discussed, aiming at getting a clearer notion of how did the demechanization process proceed in the ensuing years, until being finally brought to completion in the twentieth century, with the coming of special and general relativity theory, the full emancipation of the concept of field, and the ultimate demise of the mechanistic worldview.

KEYWORDS • Action at distance. Aether. Demechanization. Einstein. Electromagnetic field. Electromagnetism. Faraday. Maxwell. Mechanical analogies. Mechanism.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRANTES, P. *Imagens de natureza, imagens de ciência*. Campinas: Papirus, 1998.
- BARROS, A. L. R. (Ed.). *Perspectivas em física teórica: anais do simpósio de física em homenagem ao 70º aniversário do Prof. Mário Schenberg*. São Paulo: Instituto de Física da USP, 1987.
- BEZERRA, V. A. Racionalidade, consistência, reticulação e coerência: o caso da renormalização na teoria quântica do campo. *Scientiae Studia*, 1, 2, p. 151-81, 2003a.
- _____. *Schola quantorum*: progresso, racionalidade e inconsistência na antiga teoria atômica. Parte I: desenvolvimento histórico, 1913-1925. *Scientiae Studia*, 1, 4, p. 463-517, 2003b.
- _____. Reticulação metodológica na ciência: o caso da renormalização nas teorias de campo de gauge. In: MARTINS, R. A.; MARTINS, L. A. C. P.; SILVA, C. C. & FERREIRA, J. M. H. (Ed.). *Filosofia e história da ciência no Cone Sul: 3º encontro*. Campinas: AFHIC, 2004a. p. 461-70.
- _____. *Schola quantorum*: progresso, racionalidade e inconsistência na antiga teoria atômica. Parte II: crítica à leitura lakatosiana. *Scientiae Studia*, 2, 2, p. 207-37, 2004b.
- BORK, A. M. Maxwell and the vector potential. *Isis*, 58, 2, p. 210-22, 1967.
- BUNGE, M. Lagrangian formulation and mechanical interpretation. *American Journal of Physics*, 25, 4, p. 211-8, 1957.
- _____. Mach’s critique of Newtonian mechanics. *American Journal of Physics*, 34, p. 585-96, 1966.
- CHALMERS, A. The limitations of Maxwell’s electromagnetic theory. *Isis*, 64, 4, p. 469-83, 1973.
- _____. Maxwell, mechanism, and the nature of electricity. *Physics in Perspective*, 3, p. 425-38, 2001.
- DARRIGOL, O. *Electrodynamics from Ampère to Einstein*. Oxford: Oxford University Press, 2000.

- DORAN, B. G. Origins and consolidation of field theory in nineteenth century Britain: from the mechanical to the electromagnetic view of nature. *Historical Studies in the Physical Sciences*, 6, p. 133-260, 1975.
- DOUGHTY, N. A. *Lagrangian interaction: an introduction to relativistic symmetry in electrodynamics and gravitation*. Sydney/Readwood (CA): Addison-Wesley, 1990.
- EINSTEIN, A. Elektrodynamik bewegter Körper. *Annalen der Physik*, ser. 4, 17, p. 891-921, 1905.
- FRENKEL, J. *Princípios de eletrodinâmica clássica*. São Paulo: Edusp, 1996.
- GOLDSTEIN, H.; POOLE, C. & SAFKO, J. *Classical mechanics*. 3. ed. San Francisco: Addison-Wesley, 2002.
- HESSE, M. B. Action at a distance in classical physics. *Isis*, 46, 4, p. 337-53, 1955.
- HIROSIGE, T. The ether problem, the mechanistic worldview, and the origins of the theory of relativity. *Historical Studies in the Physical Sciences*, 7, p. 3-82, 1976.
- JACKSON, J. D. *Classical electrodynamics*. 3. ed. New York: Wiley, 1999.
- KLEIN, M. J. Mechanical explanation at the end of the nineteenth century. *Centaurus*, 17, p. 58-82, 1972.
- LANCZOS, C. *The variational principles of mechanics*. 4. ed. New York: Dover, 1986 [1970].
- LAUDAN, L. *Science and hypothesis: historical essays on scientific methodology*. Dordrecht: Reidel, 1981.
- _____. *Science and values: the aims of science and their role in scientific debate*. Berkeley: University of California Press, 1984.
- LÉVY-LEBLOND, J. -M. *Opensar e a prática da ciência: antinomias da razão*. Trad. de M. L. Panzoldo. Bauru: Edusc, 2004.
- MARTINS, R. A.; MARTINS, L. A. C. P.; SILVA, C. C. & FERREIRA, J. M. H. (Ed.). *Filosofia e história da ciência no Cone Sul: 3º encontro*. Campinas: AFHIC, 2004.
- MAXWELL, J. C. *A treatise on electricity and magnetism*. New York: Dover, 1954 [1891]. 2 v.
- _____. On Faraday's lines of force. In: NIVEN, W. D. (Ed.). *The scientific papers of James Clerk Maxwell*. Mineola (New York): Dover, 2003a [1856]. v. 1, p. 155-229.
- _____. On physical lines of force. In: NIVEN, W. D. (Ed.). *The scientific papers of James Clerk Maxwell*. Mineola (New York): Dover, 2003b [1861/1862]. v. 1, p. 451-513.
- _____. A dynamical theory of the electromagnetic field. In: NIVEN, W. D. (Ed.). *The scientific papers of James Clerk Maxwell*. Mineola (New York): Dover, 2003c [1864]. v. 1, p. 526-97.
- McMULLIN, E. The origins of the field concept in physics. *Physics in Perspective*, 4, p. 13-39, 2002.
- NIVEN, W. D. (Ed.). *The scientific papers of James Clerk Maxwell*. Mineola (New York): Dover, 2003 [1890]. 2v.
- PATY, M. A gênese da causalidade física. *Scientiae Studia*, 2, 1, p. 9-32, 2004a.
- _____. A noção de determinismo na física e seus limites. *Scientiae Studia*, 2, 4, p. 465-92, 2004b.
- PENROSE, R. *The road to reality: a complete guide to the laws of the universe*. London: Jonathan Cape, 2004.
- PYLE, A. *Atomism and its critics: from Democritus to Newton*. Bristol: Thoemmes Press, 1995.
- ROCHE, J. The present status of Maxwell's displacement current. *European Journal of Physics*, 19, p. 155-66, 1998.
- ROMANO, R. & GIL, F. (Ed.). *Enciclopédia Einaudi: física*. Lisboa: Imprensa Nacional/Casa da Moeda, 1993.
- ROSSI, P. *O nascimento da ciência moderna na Europa*. Trad. de A. Angonese. Bauru: Edusc, 2001.
- SPARZANI, A. Força / campo. Trad. de M. Bragança. In: ROMANO, R. & GIL, F. (Ed.). *Enciclopédia Einaudi: física*. Lisboa: Imprensa Nacional/Casa da Moeda, 1993. v. 24, p. 287-307.
- STEIN, H. On the notion of field in Newton, Maxwell, and beyond. In: STUEWER, R. H. (Ed.). *Minnesota studies in the philosophy of science*. Minneapolis: University of Minnesota Press, 1970. v. 5: Historical and philosophical perspectives of science, p. 264-310.
- STUEWER, R. H. (Ed.). *Minnesota studies in the philosophy of science*. Minneapolis: University of Minnesota Press, 1970.
- THIDÉ, B. *Electromagnetic field theory*. Uppsala: Upsilon Books, 2001.
- TURNER, J. E. The distinction between "mechanics" and "mechanism". *Philosophy of Science*, 7, 1, p. 49-55, 1940.

VIDEIRA, A. L. L. A geometria de Maxwell. In: BARROS, A. L. R. (Ed.). *Perspectivas em física teórica: anais do simpósio de física em homenagem ao 70º aniversário do Prof. Mário Schenberg*. São Paulo: Instituto de Física da USP, 1987. p. 144-69.

WESTFALL, R. S. *The construction of modern science: mechanisms and mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1977.

