
A METODOLOGIA DE J. C. MAXWELL E O DESENVOLVIMENTO DA TEORIA ELETRO-MAGNÉTICA

Paulo C. C. Abrantes
Depto. de Filosofia – UnB
Brasília – DF

Não é somente através de descobertas e do seu registro pelas sociedades eruditas que a ciência avança. O verdadeiro lugar da ciência não é o volume de Transactions, mas a mente viva, e o avanço da ciência consiste em orientar as mentes dos homens por um canal científico; seja isto realizado pelo anúncio de uma descoberta, a formulação de um paradoxo, a invenção de uma frase científica ou a exposição de um sistema de doutrina. Cabe ao historiador da ciência determinar a magnitude e a direção do impulso comunicado ao pensamento humano por cada um desses meios... ⁽¹⁾

J. C. Maxwell

I. Introdução

A relevância **filosófica** da História da Ciência se atesta pela contribuição que ela pode dar a uma análise das condições da cognição científica (ou da imaginação científica). Tal contribuição revela-se, sobretudo, através de estudos de caso envolvendo o trabalho experimental e/ou teórico de cientistas, particularmente daqueles que fizeram avançar de um modo significativo o conhecimento em um determinado domínio⁽²⁾. Tais estudos de caso constituem a “base empírica” indispensável para qualquer teoria da ciência preocupada em compreender a “ciência real”.

O caso do desenvolvimento da teoria eletromagnética por Maxwell é particularmente relevante desse ponto de vista. Esse desenvolvimento aponta para a indissociabilidade, na prática científica criadora, do método e da teoria do método. Em outras palavras, ele mostra a importância da reflexão metodológica para a prática científica, o que coloca em questão a separação estrita que certos filósofos

fos da ciência estabelecem entre “contexto de descoberta” e “contexto de justificação”, entre “ciência” e “meta-ciência”. O trabalho de Maxwell ilustra também, admiravelmente, como as teorias científicas se inserem em uma tradição de pesquisa (ou um programa, na linguagem de Lakatos) ao admitirem pressupostos comuns relativos, por exemplo, à natureza dos fenômenos estudados (pressupostos ontológicos) ou a determinados ideais explicativos (pressupostos epistêmicos), além de conceitos, técnicas matemáticas, instrumentais, etc.

O desenvolvimento do eletromagnetismo no séc. XIX mostra que o avanço científico se faz, freqüentemente, pelo confronto entre tradições de pesquisa distintas: no caso, a tradição britânica iniciada por Faraday, e a tradição continental iniciada por Ampère. Nesse confronto de tradições de pesquisa, seus pressupostos ontológicos e epistêmicos, freqüentemente tácitos e implícitos, se revelam, por exemplo, nas controvérsias entre cientistas.

O trabalho científico de Maxwell é, nesse sentido, bastante especial, pela consciência que demonstra de tais pressupostos e pela análise crítica a que os submete. Essa análise se faz, freqüentemente, comparando os pressupostos de ambas as tradições. Frente aos sucessos da tradição continental – que Maxwell reconhece – sua atitude é a de defender as virtudes do pluralismo metodológico, e de mostrar que a abordagem proposta por Faraday, além de explicar igualmente bem os fenômenos, também pode ser traduzida em linguagem matemática.

Na exposição que se segue, pretendo acompanhar o trabalho de Maxwell ao longo de quase 20 anos, dando ênfase à maneira como ele trata dois pressupostos ontológicos que lhe são particularmente caros:

- a) o de que a ação física, particularmente a eletromagnética, se transmite contiguamente (Maxwell acrescentará “mediatizadamente”) e não à distância;
- b) o ideal de explicação mecânica (compartilhado pela tradição continental e pela tradição britânica a partir de Maxwell, no que se refere ao eletromagnetismo).

Para construir uma teoria matemática com base em tais pressupostos, Maxwell utiliza três métodos distintos. A maneira como ele justifica o emprego desses métodos envolve discussões epistemológicas muito interessantes, que pretendo ressaltar adiante. Esses métodos são: o de analogia física, o hipotético-dedutivo, e o analítico. Eles são empregados consecutivamente nos três primeiros trabalhos de Maxwell no domínio do eletromagnetismo.

II. “On Faraday’s lines of force” (1855)

O primeiro trabalho de Maxwell em eletromagnetismo já é marcado pelo projeto de buscar uma abordagem teórica alternativa dos fenômenos elétricos e magnéticos com base no 1º pressuposto.

Nada mais natural, a partir desta opção, do que se voltar para os trabalhos de Faraday, e, particularmente, para os conceitos de “linha de força” e de “estado eletrotônico”.

A introdução do artigo discute a metodologia a ser empregada para dar “corpo matemático” a tais conceitos de Faraday. Trata-se de relacionar “idéias físicas” a “idéias matemáticas” e, para Maxwell, o método de analogia é o mais adequado para tal fim, em um domínio de fenômenos ainda pouco desenvolvido, teórica e experimentalmente. Deve-se evitar – diz ele – por um lado, uma matematização prematura que venha inibir a intuição física; e, por outro lado, a “explicação parcial” dos fenômenos com base em hipóteses incertas a respeito da sua natureza (ou essência), ou de sua causa. Ao fazer essas ressalvas, Maxwell tem em mente, respectivamente, a física-matemática de Lagrange-Fourier, por um lado, e a Física Laplaciana (juntamente com as teorias eletrodinâmicas continentais), por outro. Estas últimas adotavam hipóteses, como as relativas à natureza da corrente elétrica, o que para Maxwell era, no mínimo, prematuro.

O método de analogia visa evidenciar uma “similaridade parcial entre as leis de uma ciência e as de outra, o que faz cada uma delas ilustrar a outra”. Maxwell se refere a semelhanças na forma matemática entre as leis de um domínio de fenômenos e as de um outro domínio, o que, evidentemente, não implica em uma identidade de natureza dos fenômenos estudados. W. Thomson, pouco antes de Maxwell, já havia desenvolvido analogias entre as equações para a propagação do calor nos sólidos e as equações da eletrostática. De toda forma, Maxwell deixa claro que, com tais analogias, não pretende elaborar uma “teoria física”, nem tampouco desvendar a “causa dos fenômenos”.

Maxwell desenvolve, nesse seu primeiro artigo, uma analogia entre o eletromagnetismo e a hidrodinâmica. As equações de movimento de um fluido incompressível através de um meio resistente, são reinterpretadas em termos das grandezas eletrostáticas e, particularmente, em termos do conceito de linha de força. Uma linha de força elétrica será representada por um tubo de corrente do fluido. O potencial elétrico será análogo à pressão do fluido. A velocidade deste corresponderá à intensidade da força elétrica em um ponto. Uma carga positiva e uma carga negativa corresponderão, respectivamente, a uma fonte e a um sumidouro do fluido. A capacidade indutiva dos dielétricos corresponderá à resistência ao movimento do fluido.

Uma interpretação do mesmo tipo pode ser estabelecida com respeito à magnetostática.

O mesmo modelo hidrodinâmico é aplicado por Maxwell à eletrocinética (a corrente elétrica sendo associada à corrente do fluido; a tensão elétrica à pressão do fluido, etc.).

É importante ressaltar que o desenvolvimento de tais analogias reflete já a convicção de que as forças eletromagnéticas se transmitem de forma contígua:

Tem sido comum começar a investigação das leis dessas forças admitindo de imediato que os fenômenos são devidos a forças atrativas e repulsivas agindo entre certos pontos. Nós podemos, entretanto, obter uma visão diferente do assunto, e mais adequada às nossas investigações mais difíceis, representando a magnitude e a direção das forças que tratamos em termos do movimento uniforme de um fluido incompressível (1855, p. 159)⁽³⁾.

Seja como for, a busca de analogias corresponde a uma necessidade de dar “concretude” ao formalismo matemático, de outro modo demasiadamente abstrato:

*... meu objetivo tem sido o de apresentar as idéias matemáticas à mente em uma forma corporificada (**embodied**), como sistemas de linhas ou superfícies, e não com meros símbolos, que nem veiculam as mesmas idéias, nem se adaptam prontamente aos fenômenos a serem explicados (1855, p. 187).*

Justamente é esse ideal que Maxwell não consegue atingir com a teoria do estado eletrotônico, na qual “usa os símbolos matemáticos livremente” (1855, 188).

Mas, insatisfeito, ele já anuncia que perseguirá no futuro esse ideal de uma **embodied mathematics**, na teorização dos fenômenos eletromagnéticos:

Pelo estudo cuidadoso das leis dos sólidos elásticos e dos movimentos dos fluidos viscosos, eu espero descobrir um método de formar uma concepção mecânica deste estado eletrotônico adaptado ao raciocínio em geral (1855, p. 188).

Mais adiante ele dirá: “*Eu espero exibir a teoria do estado eletrotônico numa forma em que todas as suas relações possam ser concebidas distintamente sem referência a cálculos analíticos*” (1855, p. 205).

É difícil não fazer uma aproximação com a necessidade que W. Thomson sentia de inventar modelos mecânicos para fornecer inteligibilidade a uma teoria matematizada.

O artigo “*On Faraday’s lines of force*” conclui-se com uma brilhante expressão de fé nas virtudes do pluralismo metodológico. Maxwell confronta a sua abordagem teórica, ainda incipiente, com uma “*teoria eletrodinâmica professadamente física*” que é – continua – “*inteiramente diferente de tudo o que se encontra nesse artigo*”. Trata-se da eletrodinâmica de Weber, cujos axiomas Maxwell passa então a expor. Desses axiomas pode-se deduzir as leis da eletrodinâmica e da indução eletromagnética. Tais características conferem à teoria de Weber – aos olhos de Maxwell – o estatuto de uma “*real teoria física*”. Como então legitimar as tentativas ainda titubeantes de matematizar idéias tão pouco ortodoxas (e testáveis) quanto às de Faraday?

Qual a importância então de imaginar um estado eletrotônico do qual nós não temos nenhuma concepção física distinta, ao invés de usar uma fórmula de atração que nós podemos compreender prontamente? Eu responderia – prossegue Maxwell – que é uma boa coisa ter duas maneiras de ver um assunto, e admitir que há duas maneiras de encará-lo. Além disso, eu não creio que nós temos no presente qualquer direito de compreender a ação da eletricidade, e eu sustento que o principal mérito de uma teoria nessa fase é que ela sirva para guiar a experimentação sem impedir o progresso de uma verdadeira teoria quando ela surgir (1855, p. 208).

Maxwell não podia suspeitar do caráter profético desta passagem. A sua abordagem teórica, distinta da que se desenvolvia no continente, esteve na origem da teoria do “campo” eletromagnético e da teoria eletromagnética da luz; uma alternativa sem dúvida audaciosa e, para a maioria dos seus contemporâneos, supérflua ou incompreensível.

III. “On physical lines of force” (1861/2)

No seu segundo trabalho em eletricidade e magnetismo, Maxwell se propõe a vencer uma nova etapa teórica, não mais se limitando a investigar simples “ilustrações mecânicas” dos fenômenos eletromagnéticos, como no trabalho de 1855. Ele elabora uma verdadeira teoria mecânica desses fenômenos, com base em uma “hipótese mecânica”. Seu método não é mais analógico, mas “sintético”, para usar o qualificativo de Duhem (1903):

Eu me proponho agora a examinar os fenômenos magnéticos de um ponto de vista mecânico – afirma Maxwell – e a determinar que tensões ou movimentos no meio são capazes de produzir os fenômenos mecânicos observados (1861/2, p. 452).

Como em seu trabalho anterior, a concepção de que as ações elétricas e magnéticas não se transmitem diretamente à distância, conduz Maxwell a atribuir um papel ao meio que separa os corpos eletrizados, magnetizados, ou que transportam correntes elétricas.

Para Maxwell, uma ação que se transmite de forma contígua pressupõe um meio (mecânico) que a suporte. (É curioso confrontar a recusa de Faraday a aceitar a idéia de um éter, e a reintrodução, por Maxwell, dessa idéia no domínio do eletromagnetismo. Em ótica, a hipótese da existência de um éter luminífero já havia se banalizado nessa época.)

Maxwell se preocupa em distinguir os diferentes níveis “ontológicos” a que se refere sua nova teoria:

- 1) o estado mecânico em que se encontra o meio;
- 2) a causa deste estado (movimento turbilhonar);
- 3) o mecanismo que articula os supostos movimentos no meio às correntes elétricas nos condutores.

A cada nível, Maxwell atribui um valor epistemológico distinto à sua teoria.

Faraday havia sugerido a existência de uma tensão ao longo das linhas de força e de uma repulsão (ou pressão) lateral entre essas linhas. Maxwell traduzirá essa sugestão de Faraday em termos de uma “hipótese mecânica”: o meio se encontra em um estado de tensão interna, responsável pelos efeitos mecânicos sobre os corpos eletrizados, magnetizados ou que transportam correntes elétricas. Tais efeitos mecânicos não seriam mais o resultado de uma ação à distância, mas de uma ação contígua do meio sobre os corpos nele imersos. Para tanto, é suposto que o “meio eletromagnético” se encontre em um estado de “tensão” na direção das linhas de força, e de “pressão” perpendicularmente a elas:

Ao apontar as conseqüências mecânicas de uma tal hipótese, eu espero dar uma contribuição àqueles que consideram os fenômenos mecânicos como devidos à ação de um meio; mas encontram-se em dúvida sobre a relação desta hipótese com as leis experimentais já estabelecidas, que geralmente têm sido expressas na linguagem de outras hipóteses (1861/2, p. 452).

Maxwell propõe um sistema de equações exprimindo as componentes do “stress” sobre cada uma das faces de um elemento de volume do meio, em função das componentes da força magnética e da capacidade indutiva do meio. Se o elemento do meio não se encontra em equilíbrio, surgem as forças mecânicas sobre os corpos magnetizados e os corpos que transportam correntes elétricas, imersos no meio (ou no “campo”, tal palavra tendo, no contexto, o simples sentido de uma

região do espaço preenchida por um meio mecânico). Com essa hipótese de um estado de “stress” no meio, Maxwell explica as forças mecânicas que se observam no “campo” através de uma ação contígua do meio sobre os corpos.

O valor explicativo desta hipótese deve ser considerado, segundo Maxwell, independentemente de toda investigação relativa às causas desse estado do meio. E com essa observação ele passa a propor hipóteses a respeito desse segundo “nível ontológico”: quais movimentos internos do meio podem responder por esse estado de “stress”? Há várias respostas possíveis, mas ele dá preferência à hipótese da existência de movimentos turbilhonares microscópicos no meio. A velocidade de rotação dos turbilhões seria proporcional à força magnética. Tais turbilhões teriam seus eixos alinhados conforme as linhas de força. Melhor dizendo, as linhas de força representariam geometricamente a orientação no espaço desses turbilhões. É fácil associar a tensão ao longo das linhas de força e a pressão lateral entre elas aos efeitos mecânicos desse movimento turbilhonar (utilizaremos as palavras “turbilhão” e “vórtice” como sinônimas, no texto).

Rankine havia desenvolvido uma teoria de tais turbilhões, e Maxwell a utiliza agora para deduzir as propriedades do meio eletromagnético, que haviam sido simplesmente postuladas anteriormente. Esta explicação é, no entanto, vista não como certa, mas, cautelosamente, como “provável”.

A explicação não só dos efeitos mecânicos no campo, mas também da indução eletromagnética através de uma ação contígua e mediatizada, exigirá de Maxwell o desenvolvimento da teoria em um outro nível: o da especificação dos detalhes de um **mecanismo** que conecte as correntes aos efeitos magnéticos (que ele associa aos movimentos turbilhonares no meio).

Maxwell supõe então a existência de uma camada de partículas separando os turbilhões e em contato não deslizante com estes, o que as faz girar em sentido contrário a eles. O fluxo dessas partículas constituiria uma corrente elétrica (através de um corpo condutor imerso no meio) e seu movimento translacional colocaria os turbilhões contíguos em movimento (gerando, portanto, efeitos magnéticos) que, por sua vez, fazem girar outros turbilhões, e assim sucessivamente, propagando o efeito por todo o “campo” (ver figura).

As partículas entre os vórtices exercem, portanto, o papel de “eletricidade”. Mas Maxwell considera tal hipótese com muita prudência:

A concepção de uma partícula tendo seu movimento conectado com o do turbilhão por um contato de rolamento perfeito pode parecer um tanto embaraçosa. Eu não a proponho como um modo de conexão existindo na natureza, ou mesmo com uma hipótese elétrica digna desse nome. Ela prevê, entretanto, um modo de conexão concebível mecanicamente e de fácil investigação, e ela serve para representar as conexões mecânicas re-

ais entre os fenômenos eletromagnéticos conhecidos... (1861/2, p. 486).

Além de permitir visualizar (ou conceber) a conexão entre correntes elétricas constantes e efeitos magnéticos, Maxwell utiliza o mecanismo para estudar a indução eletromagnética.

O “estado eletrotônico”, que ele investigara matematicamente em 1855, é agora visto como a expressão do regime rotacional dos vórtices no “campo”. Toda mudança nesse regime (como resultado, por exemplo, de uma variação na corrente elétrica) origina um impulso sobre o eixo dos vórtices, impulso este que se transmite de forma contígua e que age sobre as partículas elétricas como uma força eletromotriz. Caso essas partículas possam se deslocar livremente – como em um condutor – teremos uma corrente elétrica induzida, em resposta a uma variação no estado eletrotônico.

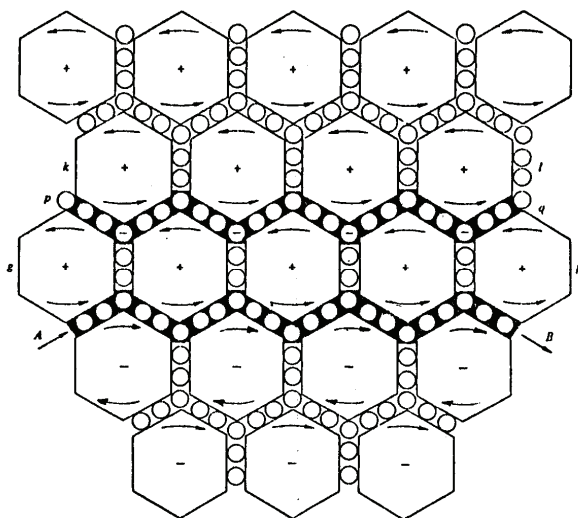


Diagrama que aparece no artigo “On physical lines of force” para representar o modelo proposto por Maxwell para o meio eletromagnético. Os hexágonos representam os turbilhões no “campo”, que surgem como resultado da passagem de uma corrente elétrica (na figura, a corrente A-B). O sentido de rotação dos turbilhões depende do sentido da corrente e da sua posição relativa (as flechas e os sinais indicam os sentidos na configuração ilustrada). As partículas esféricas representam a “eletricidade” disseminada pelo “campo”. O deslocamento irreversível dessas partículas, de turbilhão a turbilhão, constitui uma corrente elétrica. O deslocamento reversível, por sua vez, constitui o que Maxwell

denominou “deslocamento elétrico”. A corrente $p-q$, na figura, é uma corrente induzida pela variação da corrente $A-B$. Todos os fenômenos que ocorrem no “campo” (ou meio eletromagnético) são explicados, neste artigo, pelo agenciamento entre os turbilhões e a “eletricidade”. Este mecanismo não voltou a ser utilizado nos trabalhos subsequentes de Maxwell.

Ao admitir que os vórtices podem também se deslocar, e que o meio se comporta como um fluido incompressível, Maxwell possibilita uma explicação em termos de ação contígua para outros fenômenos que ocorrem no campo, como, por exemplo, as correntes induzidas em um condutor que se desloca no campo, ou as forças mecânicas que atuam sobre condutores nos quais se desloca uma corrente elétrica (forças eletrodinâmicas). Essas forças eletromotrizes e eletrodinâmicas, respectivamente, surgem como resultado das deformações que ocorrem nos elementos do meio fluido, deformações estas que afetam o regime rotacional dos vórtices no elemento, gerando, em consequência, tais forças.

IV. Em direção a uma teoria eletromagnética da luz

A terceira parte do artigo “*On physical lines of force*” é a que aponta para a consequência mais espetacular da abordagem de Maxwell: a unificação do eletromagnetismo e da ótica. Tudo indica que tal resultado não era esperado nem mesmo por Maxwell, pois essa terceira parte foi pensada e escrita após as duas primeiras, nas quais não há qualquer referência a tais desenvolvimentos. Para alcançar esse resultado revolucionário, Maxwell teve que introduzir novos elementos no mecanismo de vórtices moleculares e partículas, que ele passa a aplicar aos fenômenos eletrostáticos.

Maxwell supõe, agora, que o meio é composto por células esféricas dotadas de nova propriedade: elasticidade. As forças de interação entre partículas e células poderão agora ser tanto tangenciais quanto normais, e estas últimas produzem deformações na célula (que, em virtude da sua elasticidade, exerce uma força restauradora de mesma magnitude, e sentido contrário, sobre a camada de partículas).

O argumento que Maxwell utiliza para dar plausibilidade a essa nova hipótese é uma comparação do suposto meio magnético como o meio luminífero, cuja existência era indiscutível para a comunidade científica da época:

A teoria ondulatória da luz requer que admitamos esse tipo de elasticidade no meio luminífero, de modo a responder pelas vibrações transversais. Nós não precisamos então nos surpreender se o meio magneto-elétrico possuir a mesma propriedade (1861, p. 489).

É a primeira vez que Maxwell aproxima a teoria éter-elástica da luz da teoria do “meio magneto-elétrico” que ele se propôs a desenvolver.

Com este argumento de plausibilidade, Maxwell já antecipa o resultado central dessa terceira parte do seu artigo: a identificação entre o éter luminífero e o “meio magneto-elétrico”.

Limitar-me-ei a indicar, em seguida, as principais etapas do desenvolvimento teórico.

Primeiramente, Maxwell introduz a idéia central de um “deslocamento elétrico” tendo lugar nos dielétricos. Um corpo carregado provoca no “campo” um deslocamento das partículas elétricas, polarizando os elementos do meio. Esse deslocamento é local e reversível, se distinguindo, portanto, das correntes elétricas nos meios condutores.

As variações no deslocamento elétrico constituem “correntes de deslocamento”, mas Maxwell ainda não supõe que tais correntes produzem efeitos eletromagnéticos análogos às “correntes de condução”. Esta hipótese é central para o desenvolvimento de uma teoria eletromagnética da luz. Mas em 1861/2 ainda não se encontra desenvolvida tal teoria.

O que faz Maxwell é dar uma dupla interpretação, mecânica e elétrica, à constante de proporcionalidade E , entre força eletromotriz e deslocamento elétrico:

$$R = -4\pi E^2 h,$$

no qual h é o deslocamento e R é a força eletromotriz.

Maxwell mostra que E pode ser expresso em termos dos coeficientes de elasticidade do meio eletromagnético, o que confere a este a possibilidade de transmitir vibrações transversais com uma velocidade V . Desse modo, ele obtém uma relação entre E , V e o coeficiente de indução magnética μ (que é suposto que tenha uma relação constante com a densidade média da substância dos vórtices):

$$E = V\sqrt{\mu}$$

Por outro lado, Maxwell mostra que o mesmo coeficiente E é igual à relação entre as unidades eletrostática e eletromagnética de carga. Weber e Kohlrausch haviam medido em 1857 essa relação, que possui a dimensão de uma velocidade:

$$E = 310.740 \times 10^6 \text{ mm} / \text{s}.$$

Como no ar $\mu = 1$, encontra-se que:

$$V = E = 310.740 \times 10^6 \text{ mm} / \text{s}.$$

Maxwell compara então esse valor com a medida realizada por Fizeau para a velocidade da luz no ar, e conclui:

A velocidade das ondulações transversais em nosso meio hipotético (...) concorda tão exatamente com a velocidade da luz (...) que dificilmente podemos evitar a inferência que a luz consiste em ondulações transversais do mesmo meio que é a causa dos fenômenos elétricos e magnéticos (1861/2, p. 500).

Notar que Maxwell não afirma ser a luz uma onda eletromagnética – o que de fato não foi provado – mas somente que os dois meios na verdade constituem um único meio.

V. “A dynamical theory of the electromagnetic field” (1864)

Nós só encontramos desenvolvida uma teoria eletromagnética da luz nesse terceiro artigo. Para tanto, Maxwell teve que realizar uma guinada metodológica importantíssima, que hoje nós temos condição de avaliar como um passo no sentido de uma desmecanização da teoria eletromagnética. Maxwell, porém, não o viu dessa maneira, como trataremos de mostrar.

Em dezembro de 1861, à época em que publicava seu segundo artigo, ele escrevia a um amigo: “*Eu estou tentando formar uma expressão matemática exata de tudo o que é conhecido sobre o eletromagnetismo sem a ajuda de hipótese*”. (BROMBERG, 1967, p. 229; CAMPBELL; GARRETT, 1882, p. 238)

Maxwell não estava, de fato, satisfeito, sobretudo com a hipótese das partículas de “eletricidade” articulando os vórtices, hipótese que ele considerava por demais artificial. Ela desaparece a partir do artigo de 1864, bem como qualquer referência a um “mecanismo”. Em outubro de 1864, em uma carta a Stokes, ele anuncia o sucesso de suas investigações:

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. (HEIMANN, 1969/70, p. 198; BROMBERG, 1967)

Não mais encontramos, efetivamente, qualquer resquício do “*mecanismo*” de 1861/2. A teoria proposta não é mais apresentada como uma “*teoria mecânica*”, mas como uma “*teoria dinâmica*”. A “*teoria dinâmica do campo eletromagnético*” – como ele a denomina – constitui o resultado da aplicação ao eletromagnetismo dos métodos emprestados à Mecânica Analítica, particularmente

o formalismo lagrangeano, e do uso preponderante do conceito de energia, ao invés do conceito de força.

Essa guinada metodológica não deve, entretanto, ser vista como o abandono do projeto de obter uma “*teoria mecânica completa*” dos fenômenos eletromagnéticos. Maxwell reafirmará esse objetivo até o seu grande **Tratado**.

Vários historiadores vêm no emprego dos métodos analíticos um simples recuo estratégico, dado o caráter por demais provisório das hipóteses avançadas no segundo artigo. A importância da unificação do eletromagnetismo e da ótica solicitava bases teóricas mais sólidas. Além disso, Maxwell considerava prematuro avançar hipóteses sobre a natureza da corrente elétrica, embora o tenha feito no segundo artigo. (KLEIN, 1973, p. 69)

A nova teoria proposta em 1864, embora não especifique qualquer “mecanismo”, ainda é interpretada por Maxwell em termos mecanicistas:

*A teoria que eu proponho – diz ele – pode, portanto, ser chamada de uma teoria do **Campo Eletromagnético** porque trata do espaço na vizinhança dos corpos elétricos ou magnéticos; e pode ser chamada uma teoria dinâmica porque supõe que neste espaço há matéria em movimento, pela qual os fenômenos eletromagnéticos observados são produzidos.* (1864, p. 527)

Mantém-se, portanto, o mesmo objetivo dos artigos anteriores: o de construir uma teoria dos fenômenos eletromagnéticos que constitua uma alternativa às teorias de ação à distância, como a de Weber, por exemplo. O “*campo*” continuará sendo, na nova teoria, o “*locus*” da energia eletromagnética, energia esta que continua sendo entendida como energia **mecânica** (nas suas formas potencial e cinética).

Em um trecho que merece ser citado na íntegra, Maxwell deixa claro esse ponto:

*Em uma ocasião anterior eu tentei descrever um tipo particular de movimento e um tipo particular de tensão (**strain**) de tal forma a responder pelos fenômenos. No presente artigo, eu evito qualquer hipótese desse gênero; e, ao usar tais palavras, como momentum elétrico e elasticidade elétrica, com referência aos fenômenos conhecidos de indução de correntes e de polarização de dielétricos, eu pretendo meramente direcionar a mente do leitor para fenômenos mecânicos que irão assisti-lo na compreensão dos fenômenos elétricos. Todas essas frases no presente artigo devem ser consideradas como ilustrativas e não como exploratórias.*

*Ao falar da Energia do campo, entretanto, eu desejo ser entendido literalmente. Toda energia é o mesmo que energia mecânica, esteja ela existindo na forma de movimento ou na elasticidade, ou em qualquer outra forma. A energia dos fenômenos eletromagnéticos é energia mecânica. A única questão é: onde ela reside? Nas velhas teorias ela reside nos corpos eletrizados, correntes de condução e magnetos, sob a forma de uma qualidade desconhecida chamada energia potencial, ou no poder de produzir certos efeitos à distância. Em nossa teoria, ela reside no campo eletromagnético, no espaço circundando os corpos eletrizados e magnetizados, bem como nos próprios corpos, e existe de duas formas diferentes, que podem ser descritas sem uso de hipóteses como polarização magnética e polarização elétrica, ou, de acordo com uma hipótese muito provável, como o movimento e a tensão (**strain**) de um mesmo meio. (1864, p. 563-564)*

É importante também ter em mente que, na época em que Maxwell trabalhava, a possibilidade de aplicar o formalismo lagrangeano a um determinado domínio de fenômenos era vista como uma prova da essência mecânica desses fenômenos. (POINCARÉ, 1890, p. 16-17; BUNGE, 1957).

Enquanto que em uma “teoria mecânica” parte-se da especificação de um mecanismo subjacente aos fenômenos, em uma “teoria dinâmica” os agenciamentos das partes do mecanismo não são mais explicitados. A única condição imposta é a de que este agenciamento obedeça a leis gerais, no caso, às leis da mecânica.

Maxwell ilustra o que vem a ser tal teoria dinâmica, no caso da interação eletromagnética entre duas correntes elétricas. Ele supõe que a forma da equação entre grandezas eletromagnéticas é a mesma da equação entre grandezas mecânicas em um sistema mecânico apresentando conexões (vínculos) internas que nos são desconhecidas. Às forças mecânicas, em uma equação, corresponderão forças eletromotrizes. Às velocidades, corresponderão correntes. À “quantidade de movimento reduzida”, corresponderá a “quantidade de movimento eletromagnética” ou “estado eletrotônico”. Às forças de atrito, corresponderá a resistência elétrica, e assim por diante.

Esse uso de analogias nos faz lembrar as analogias desenvolvidas por Maxwell em seu primeiro artigo, e serão muito utilizadas no seu **Tratado**. A diferença é que, em 1855, o uso de analogias não supunha uma identidade de natureza entre os fenômenos cujas leis eram comparadas. Em 1864, Maxwell supõe que os fenômenos eletromagnéticos são essencialmente fenômenos mecânicos mesmo não os conhecendo em seus detalhes, enquanto mecanismo.

Daí a importância heurística do formalismo lagrangeano, que dispensa o conhecimento dos vínculos mecânicos internos.

Em 1864, quando Maxwell não utiliza tais metáforas mecânicas para obter suas equações, ele simplesmente as postula, à maneira axiomática. Várias dessas equações já haviam sido obtidas nos artigos anteriores.

A grande novidade é que Maxwell supõe agora que as correntes de deslocamento produzem efeitos eletromagnéticos idênticos às correntes de condução. É preciso lembrar, contudo, que tal hipótese não possuía, na época, qualquer fundamento empírico. Sua plausibilidade é defendida unicamente pela associação que Maxwell estabelece entre “deslocamento elétrico” e “polarização dielétrica”. Mas tal “argumento” não estava presente no seu artigo anterior.

A consequência mais importante que Maxwell obtém a partir dessas equações é a de que a luz é uma onda eletromagnética. Em seu terceiro artigo vemos pela primeira vez elaborada uma teoria eletromagnética da luz. A equação de propagação das ondas eletromagnéticas é obtida diretamente a partir das equações do campo eletromagnético, sem que qualquer referência seja feita a ondas mecânicas se propagando em um meio elástico (como é o caso em seu artigo anterior).

Maxwell obtém o mesmo resultado, de que a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas é igual à razão entre as unidades de carga, e conclui:

Esta velocidade é tão próxima à da luz que parece termos uma forte razão para concluir que a luz ela mesma (incluindo o calor radiante e outras radiações, se houver) é um distúrbio eletromagnético na forma de ondas propagadas através do campo eletromagnético de acordo com leis eletromagnéticas. (1864, p. 535)

É evidente que o simples acordo entre as velocidades de propagação não é suficiente para provar uma identidade de natureza entre os vários tipos de ondulações. É preciso comparar as propriedades das ondas eletromagnéticas com as propriedades das ondas luminosas, e mostrar que são idênticas. Maxwell o faz, só parcialmente, em 1864.

Maxwell prova, por exemplo, a transversalidade das ondas eletromagnéticas. Ele deduz também uma relação entre a capacidade indutiva específica do meio e o índice de refração; e uma relação entre a condutividade elétrica e a transparência do meio. Maxwell tenta também desenvolver uma teoria preliminar da propagação de ondas eletromagnéticas em um meio cristalino (isto é, não isotrópico), supondo que o eixo de indução magnética coincide com o eixo de elasticidade elétrica.

Tais conseqüências da teoria eletromagnética da luz necessitavam de um controle experimental que só viria muitos anos depois. Somente com as experiências de Hertz, realizadas nos anos 80, a comunidade científica admitiu, definitivamente, que a luz é uma onda eletromagnética. Porém, a mesma unanimidade no que se refere à abordagem de ação contígua precisou muito mais tempo para ser conseguida. E isto pelo fato de Helmholtz ter conseguido chegar a resultados análogos (mas não idênticos) aos de Maxwell, sem abandonar o pressuposto de que as ações elétricas e magnéticas se transmitem à distância. Mesmo após as experiências de Hertz, físicos de renome, como P. Duhem, continuaram a dar preferência à abordagem “continental”.

VI. “A treatise on electricity and magnetism” (1873)

No seu **Tratado**, Maxwell consolida o importante movimento metodológico de 1864 em direção a uma “teoria dinâmica” do eletromagnetismo. A parte IV, dedicada ao eletromagnetismo, constitui indubitavelmente o coroamento dessa obra: é nela que Maxwell nos oferece suas reflexões mais maduras sobre a “teoria dinâmica”.

O ponto de partida da teoria é uma “hipótese dinâmica” bastante geral a respeito da “natureza” da corrente elétrica. Após apresentar diversos argumentos a favor da idéia de que a corrente elétrica é um “fenômeno cinético”, que não se restringe espacialmente ao que ocorre no interior do condutor, Maxwell formula sua hipótese:

O que eu me proponho agora a fazer é examinar as conseqüências do pressuposto de que os fenômenos da corrente elétrica são os de um sistema em movimento, o movimento sendo comunicado de uma parte do sistema a outra por forças, cuja natureza nós não tentamos ainda nem mesmo definir, porque nós podemos eliminar essas forças das equações de movimento pelo método desenvolvido por Lagrange para qualquer sistema com vínculos. (1873, II, p. 198)

Percebemos, neste trecho, por um lado, a clara opção em favor da abordagem de Faraday de uma ação se transmitindo de maneira contígua através de um “sistema”: o meio eletromagnético ou “campo”. Por outro lado, o “método de Lagrange”, aplicável a todo sistema mecânico com vínculos, possibilita o trabalho teórico apesar de nossa ignorância a respeito dos agenciamentos internos do sistema.

Maxwell dedica todo um capítulo à discussão do formalismo lagrangeano, em que justamente essa qualidade é valorizada:

Eu apliquei este 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 (1873, II, p. 200).

Quanto à “hipótese dinâmica” relativa à natureza da corrente elétrica, é preciso ressaltar que ela abre uma via completamente diferente da seguida pela eletrodinâmica continental, de Ampère a Weber.

Nas teorias eletrodinâmicas continentais, a ação entre correntes elétricas se faz à distância e as forças de Ampère são derivadas de um “potencial eletrodinâmico”. Nessas teorias podemos, portanto, falar de uma energia potencial associada a um sistema de correntes elétricas.

Maxwell, contrariamente aos físicos continentais, vai reduzir toda a energia de um sistema de correntes (e ímãs) à sua forma cinética. Essa redução parece atender a um ideal explicativo mais amplo, como indica a passagem seguinte:

O primeiro tipo de energia, a de movimento, é chamada de energia cinética, e uma vez compreendida ela parece um fato da natureza, tão fundamental que nós podemos dificilmente conceber a possibilidade de resolvê-la em termos de qualquer outra coisa. O segundo tipo de energia, que depende da posição, é chamada de energia potencial e é devida à ação daquilo que nós chamamos forças, o que equivale a dizer tendências à mudança na posição relativa. Com respeito a essas forças, embora nós possamos aceitar sua existência como um fato demonstrado, nós sempre sentimos, contudo, que toda explicação do mecanismo pelo qual os corpos são colocados em movimento constitui um acréscimo real ao nosso conhecimento. (1873, p. 211)

A única energia que se mantém potencial é a associada às ações eletrostáticas. Mas a sede dessa energia é o “campo”, enquanto que nas teorias de ação à distância essa energia mantém-se localizada nos corpos que portam as cargas elétricas.

A carga elétrica é, aliás, para Maxwell, um epifenômeno, ou seja, um efeito dos processos ocorrendo no campo (e não a causa desses efeitos).

Do mesmo modo, a “hipótese dinâmica”, que Maxwell admite na sua teoria do eletromagnetismo, é compatível com sua abordagem de ação contígua – que implica em localizar a energia eletromagnética também no “campo”, sob a forma de energia cinética.

Uma última observação, de caráter metodológico, concerne ao uso do formalismo lagrangeano. A sua aplicação, como já dissemos, não deve ser vista como o abandono do projeto de Maxwell de chegar a uma “teoria completa” dos fenômenos eletromagnéticos:

Em uma tal teoria, nós devemos ver a ação elétrica não como neste tratado, como um fenômeno devido a uma causa desconhecida sujeita somente às leis gerais da dinâmica, mas como o resultado de movimentos conhecidos de porções conhecidas de matéria, na qual não somente os efeitos totais e resultados finais são tomados como objetos de estudo, mas também o conjunto do mecanismo intermediário e os detalhes do movimento.
(1873, II, p. 218)

Neste sentido, Maxwell não pode ser visto como um “instrumentalista” – como queria Poincaré – mas como um “essencialista” – como bem percebera P. Duhem (POPPER, 1963). De toda forma, Duhem tinha razão em vê-lo como um mecanicista.

O que nenhum deles podia, entretanto, saber, é que a aplicação do formalismo lagrangeano não se restringe ao domínio da mecânica, e o seu uso por Maxwell foi um passo em direção à desmecanização do eletromagnetismo.

Com este trabalho pretendi mostrar como os dois pressupostos básicos, que Maxwell admitira a princípio, orientaram seu trabalho em eletromagnetismo, cristalizando as intuições de Faraday em um programa de pesquisas que chegou a rivalizar (e suplantando) o desenvolvimento pelos físicos continentais⁽⁴⁾.

VII. Notas

1. Maxwell, Grove's Correlation...
2. O trabalho científico infértil pode, porém, contribuir tanto ou mais que aquele fértil, para a compreensão da cognição científica.
3. As obras de Maxwell citadas neste artigo estão indicadas apenas pelo ano de publicação (ver bibliografia ao final do artigo) e página.
4. Para mais detalhes sobre a eletrodinâmica continental e a recepção das teorias de Maxwell no continente, consultar Abrantes (1985).

VIII. Referências Bibliográficas

1. ABRANTES, P. C. C. **La réception em France dès théories de Maxwell concernant l'électricité et le magnétisme**. 1985. Tese (Doutorado) – Paris.
2. BROMBERG, J. Maxwell's displacement current and his theory of light. **Archives Hist. Exact Sci.**, v. 4, p. 218-34, 1967.
3. BUNGE, M. Lagrangian formulation and mechanical interpretation. **Am. J. Phys.**, v. 25, p. 211-8, 1957.
4. CAMPBELL, L.; GARNETT, W. **The life of J. C. Maxwell**. Londres, 1882.
5. DUHEM, P. **L'évolution de la mécanique**. Paris: A. Joanin, 1903.
6. HEIMANN, P. M. Maxwell and the modes of consistent representation. **Archives Hist. Exact Sci.**, v. 6, p. 171-213, 1969/70.
7. KLEIN, M. J. Mechanical explanation at the end of the nineteenth century. **Centaurus**, v. 17, p. 58-82, 1973.
8. MAXWELL, J. C. On Faraday's lines of force (1855). In: NOVEN, W. D. **The scientific papers of James Clerk Maxwell**. Cambridge: Cambridge University Press, 1890. v. 1, p. 155-229.
9. MAXWELL, J. C. On physical lines of force (1861/2). In: NOVEN, W. D. **The scientific papers of James Clerk Maxwell**. Cambridge: Cambridge University Press, 1890. v. 1, p. 451-513.
10. MAXWELL, J. C. A dynamical theory of the electromagnetic field (1864). In: NOVEN, W. D. **The scientific papers of James Clerk Maxwell**. Cambridge: Cambridge University Press, 1890. v. 1, p. 526-97.
11. MAXWELL, J. C. Grove's correlation of physical forces. In: NOVEN, W. D. **The scientific papers of James Clerk Maxwell**. Cambridge: Cambridge University Press, 1890. v. 2.
12. MAXWELL, J. C. **A treatise on electricity and magnetism (1873)**. New York: Dover, 1954. v. 2.
13. POINCARÉ, H. **Electricité et optique**. Paris: Georges Carré, 1890/1. v. 2.

14. POPPER, K. Três pontos de vista sobre o conhecimento humano. In: **Conjeturas e Refutações**. Brasília: Editora da UnB, 1972.