

"Uma Teoria Dinâmica do Campo Eletromagnético",

James Clerk Maxwell,

Philosophical Transactions, vol. 155. , p. 459 (1865)

(1) Nos experimentos elétricos e magnéticos, o fenômeno mecânico mais óbvio é a ação mútua, através da qual alguns corpos, em determinados estados, colocam em movimento outros corpos, mesmo havendo uma distância sensível entre uns e outros. O primeiro passo, portanto, na descrição de forma científica destes fenômenos, é estabelecer o tamanho e a direção da força que age entre os corpos; se verificamos que esta força depende de alguma forma da posição relativa dos corpos e de sua condição magnética e elétrica, parece natural, à primeira vista, supor, para explicar estes fatos, que há algo, em repouso ou em movimento, em cada corpo, que determina seu estado elétrico ou magnético, e que [este algo] é capaz de agir à distância de acordo com certas leis matemáticas. As teorias matemáticas da eletricidade estática, do magnetismo, da ação mecânica entre condutores que carregam correntes, e a indução de correntes, foram criadas desta forma. Nestas teorias, a força que age entre os dois corpos é referida apenas à condição dos corpos e à sua posição relativa, sem que nenhuma consideração explícita sobre o meio no entorno seja feita. Estas teorias pressupõem, mais ou menos explicitamente, a existência de substâncias cujas partículas têm a propriedade de agir umas sobre as outras através de repulsão ou atração. O desenvolvimento mais completo de uma teoria deste tipo foi feito pelo Sr. W. Weber, que fez a mesma teoria incluir fenômenos eletrostáticos e eletromagnéticos. Ao fazê-lo, no entanto, ele teve que supor que a força entre duas partículas elétricas depende de sua velocidade relativa, assim como de sua distância. Essa teoria, na forma desenvolvida pelos Senhores W. Weber e C. Neumann, é extremamente engenhosa e maravilhosamente abrangente, em sua aplicação aos fenômenos da eletricidade estática, das atrações magnéticas, da indução de correntes e dos fenômenos diamagnéticos; e [a teoria] ganha ainda mais autoridade, por ter guiado as especulações de quem produziu tão grande avanço na parte prática da ciência elétrica, ao introduzir um sistema consistente de unidades na medida elétrica, e por, de fato, determinar quantidades elétricas com uma precisão até há pouco desconhecida.

(2) As dificuldades mecânicas envolvidas na suposição de que as partículas agem à distância através de forças que dependem de suas velocidades são tamanhas, que me impedem de considerar esta teoria como definitiva, embora [ela] tenha sido, e pode ainda ser, útil para a organização dos fenômenos. É assim que preferi procurar uma explicação para os fatos em outra direção, e supus que [os fatos] sejam produzidos por

ações que ocorrem tanto no meio em torno quanto nos corpos excitados, e imaginei que a explicação da ação à distância entre os corpos pode dispensar a hipótese da existência de forças capazes de agir a distâncias sensíveis.

(3) A teoria que proponho pode portanto ser chamada de uma teoria do Campo Eletromagnético, porque tem a ver com o espaço nas vizinhanças dos corpos elétricos ou magnéticos; e pode ser também chamada de uma Teoria Dinâmica, porque nela supõe-se que no espaço há matéria em movimento, através do qual são produzidos os fenômenos eletromagnéticos.

(4) O campo eletromagnético é a parte do espaço que contém e envolve os corpos em condição elétrica ou magnética. Pode estar preenchido com qualquer tipo de matéria, ou podemos imaginá-lo vazio de toda matéria bruta, como no caso dos tubos de Geissler, e outros assim chamados vácuos. No entanto, há sempre matéria suficiente para receber e transmitir as ondulações da luz e do calor, e é porque a transmissão destas radiações é muito pouco alterada quando se substitui o vácuo por corpos transparentes de densidade mensurável é que somos obrigados a admitir que as ondulações são ondulações de uma substância etérea, e não da matéria bruta, cuja presença apenas modifica de algum modo o movimento do éter. Temos, portanto, algumas razões para acreditar, a partir dos fenômenos da luz e do calor, que há um meio etéreo preenchendo todo o espaço e permeando os corpos, que é capaz de ser colocado em movimento e de transmitir o movimento de uma parte a outra, e de comunicar este efeito à matéria bruta de forma a aquecê-la e atingi-la de várias maneiras.

(5) Agora, a energia comunicada ao corpo para seu aquecimento deve ter estado previamente no meio em movimento, uma vez que as ondulações deixaram a fonte de calor algum tempo antes de atingir o corpo, e, neste intervalo de tempo, a energia deve ter estado metade em forma de movimento do meio, e metade em forma de resistência elástica. A partir destas considerações, o Professor W. Thomson argumentou que este meio deve possuir uma densidade semelhante à da matéria bruta, e até estabeleceu um limite inferior para esta densidade.

(6) Devemos então aceitar [um fato] proveniente de um ramo da ciência independente deste com que vamos tratar, [que é] a existência de um meio penetrante, de densidade pequena mas real, capaz de ser colocado em movimento, e de transmitir movimento de uma parte a outra, com velocidade grande mas não infinita. Assim, as partes deste meio devem estar conectadas de tal maneira que o movimento de uma parte depende de alguma forma do movimento do resto; e, ao mesmo tempo, estas conexões devem ser capazes de algum tipo de resposta elástica, pois a comunicação do movimento não é instantânea, mas leva algum tempo. O meio é, portanto, capaz de receber e armazenar dois tipos de energia, a energia "atual", que depende do movimento de suas partes, e energia "potencial", que consiste do trabalho a ser efetuado pelo meio, na recuperação dos deslocamentos associados à sua elasticidade. A propagação das ondulações consiste em uma transformação contínua de uma dessas formas de energia na outra, alternadamente; e, em cada instante, a quantidade de energia do meio como um todo está dividida de tal forma que metade é energia de movimento

e metade é energia elástica.

(7) Um meio que tenha tal constituição é capaz de outros tipos de movimento e de deslocamento, diferentes daqueles que produzem luz e calor, e alguns destes podem tornar-se evidentes aos nossos sentidos, através dos efeitos que produzem.

(8) Sabemos agora que o meio luminífero sofre a ação do magnetismo, em algumas circunstâncias; pois Faraday descobriu que quando um raio de polarização plana atravessa um meio transparente diamagnético na direção das linhas de força magnética, produzidas por ímãs ou correntes, em sua vizinhança, o plano de polarização [da luz] é girado. Essa rotação é sempre na direção em que a eletricidade positiva deve ser girada no corpo diamagnético de forma a produzir a magnetização do campo. M. Verdet descobriu, mais tarde, que se substituirmos o corpo diamagnético por um corpo paramagnético, tal como uma solução de perclorito de ferro no éter, a rotação é no sentido oposto. Bem, o Professor W. Thomson chamou a atenção para o fato de que estes fenômenos não podem ser explicados a partir das forças que agem entre as partes do meio cujo único movimento é o das vibrações luminosas; temos que admitir a existência de um movimento no meio que depende da magnetização, além daquele movimento vibratório que constitui a luz. É verdade que a rotação do plano de polarização por magnetismo só foi observada em meios de densidade considerável; mas as propriedades do campo magnético não sofrem alteração substancial quando se troca uma substância por outra, ou pelo vácuo, o que nos permite supor que tudo que o meio denso faz é apenas modificar o movimento do éter. Temos assim bases que justificam a investigação da existência de movimento do meio etéreo sempre que são observados efeitos magnéticos, e há razões para supor que este movimento é de rotação, com eixo na direção da força magnética.

(9) Podemos agora considerar outro fenômeno observado no campo eletromagnético. Quando um corpo é movido através das linhas de força magnética ele experimenta aquilo que chamamos de força eletromotiva; as duas extremidades do corpo tendem a ficar eletrificadas em opostos, e uma corrente tende a surgir através do corpo. Quando a força eletromotriz é suficientemente poderosa, e é colocada para agir sobre certos corpos compostos, ela os decompõe, e faz com que um dos componentes vá na direção de uma extremidade do corpo, e o outro em direção oposta. Temos, aqui, evidência de uma força que causa corrente elétrica, apesar da resistência; a eletrificação das extremidades de um corpo em opostos, uma condição que se sustenta apenas pela ação da força eletromotriz, e que, assim que a força é retirada, tende, com força igual e oposta, a produzir uma contra-corrente através do corpo e a restaurar o estado elétrico original do corpo; e finalmente, se suficientemente forte, quebra em pedaços os compostos químicos e carrega seus componentes em direções opostas, ao passo que sua tendência natural seria combinar-se, e combinar com uma força que pode gerar uma força eletromotriz na direção inversa. Esta é, então, uma força, que age em um corpo, causada pelo seu próprio movimento através do campo eletromagnético, ou por mudanças que ocorrem no próprio campo; e o efeito é o de produzir uma corrente e aquecer o corpo, ou o de decompor o corpo, ou ainda, quando não consegue obter nenhum dos dois [efeitos], coloca o corpo em um estado de polarização elétrica, - um estado

forçado, no qual extremidades opostas são eletrizadas com opostos, e do qual o corpo tende a relaxar, assim que a força perturbadora é retirada.

(10) De acordo com a teoria que me proponho a explicar, esta "força eletromotriz" é a força que entra em jogo durante a comunicação de movimento de uma parte do meio para outra, e é através dessa força que o movimento de uma parte causa movimento em outra parte. Quando a força eletromotriz age sobre um circuito condutor, ela produz corrente que, ao encontrar resistência, produz uma transformação contínua de energia elétrica em calor, [energia] que não pode ser recuperada na forma de energia elétrica por nenhum tipo de processo inverso.

(11) Mas quando a força eletromotriz age sobre um dielétrico, ela produz um estado de polarização de suas partes, semelhante à distribuição de polaridade das partes de uma massa de ferro sob influência de um ímã; e assim como a polarização magnética, pode ser descrita como um estado em que cada partícula tem seus polos opostos em condições opostas. Em um dielétrico sob a ação de uma força eletromotriz, podemos imaginar que a eletricidade de cada molécula está deslocada de forma que um lado torna-se eletricamente positivo e o outro eletricamente negativo, mas que a eletricidade permanece ligada à molécula, e não passa de uma molécula para outra. O efeito dessa ação na massa dielétrica como um todo é o de produzir um deslocamento geral da eletricidade em uma certa direção. Este deslocamento não constitui uma corrente, pois quando atinge um certo valor, permanece constante; mas [o deslocamento] é um início de corrente, e suas variações constituem correntes na direção positiva ou negativa, a depender se o deslocamento está aumentando ou diminuindo. No interior do dielétrico não há sinal de eletrificação, pois as eletrizações da superfície de qualquer molécula é neutralizada pela eletrização oposta das moléculas em contato com ela; mas na superfície limite do dielétrico, onde não há neutralização, encontramos fenômenos que indicam a eletrificação positiva ou negativa. A relação entre a força eletromotriz e a quantidade de deslocamento elétrico que ela produz depende da natureza do dielétrico, sendo que a mesma força eletromotriz produz, em geral, um deslocamento maior em dielétricos sólidos, como o vidro e o enxofre, do que no ar.

(12) Percebemos aqui um outro efeito da força eletromotriz, ou seja, o deslocamento elétrico, que, de acordo com nossa teoria, é um tipo de entrega elástica à ação da força, semelhante àquele que ocorre em estruturas e máquinas que sofrem de imperfeições na rigidez de suas conexões.

(13) A investigação prática da capacidade indutiva dos dielétricos torna-se difícil devido a dois efeitos perturbadores. O primeiro [efeito] é a condutividade do dielétrico, que, embora excessivamente pequena em muitos casos, não é de todo insensível. O segundo é o fenômeno chamado de absorção elétrica, devido ao qual o deslocamento elétrico do dielétrico aumenta gradualmente, quando [o dielétrico] é exposto a uma força eletromotriz; e ainda, quando a força eletromotriz é retirada, o dielétrico não retorna instantaneamente ao seu estado original, mas descarrega apenas parte de sua eletrização, e, quando deixado por si mesmo, adquire paulatinamente eletrificação em sua superfície, à medida que o interior se despolariza. Quase todos os dielétricos exibem este fenômeno, que leva a uma carga residual na garrafa de Leyden, e a vários fenômenos

em cabos elétricos, descritos pelo Sr. F. Jenkin.

(14) Temos aqui dois outros tipos de entrega, além daquela que ocorre no dielétrico perfeito, que comparamos com um corpo perfeitamente elástico. A entrega devido à condutividade pode ser comparada à de um fluido viscoso (isto é um fluido com grande atrito interno), ou um sólido mole, que, sob efeito da menor força, se deforma de maneira permanente, crescente com o tempo, durante a vigência da ação da força. A entrega devido à absorção elétrica pode ser comparada à de um corpo celular elástico que contém um fluido espesso em suas cavidades. Se submetemos tal corpo a uma pressão, ele sofrerá compressão em vários graus devido à entrega gradual do fluido espesso; e se retiramos a pressão, ele não retoma imediatamente sua forma, porque a elasticidade da substância do corpo tem que superar gradualmente a tenacidade do fluido antes de recuperar completamente o equilíbrio. Vários corpos sólidos parecem possuir uma característica mecânica deste tipo, sem que possamos encontrar neles uma estrutura semelhante à que descrevemos; e parece plausível que as mesmas substâncias, se dielétricas, podem apresentar a propriedade elétrica análoga, e, se magnéticas, propriedades correspondentes reativas à aquisição, retenção e perda de polaridade magnética.

(15) Parece, portanto, que certos fenômenos da eletricidade e do magnetismo levam à mesma conclusão que [os fenômenos] da óptica, isto é, que há um meio etéreo que permeia todos os corpos, e que é modificado em pequeno grau pela presença dos mesmos; que as partes deste meio podem ser colocadas em movimento por correntes elétricas e por ímãs; que este movimento é transmitido de uma parte a outra do meio através de forças que surgem nas interligações de suas partes; que sob a ação destas forças há uma certa entrega que depende da elasticidade destas conexões; e que portanto a energia pode existir de duas formas no meio, sendo uma forma a da energia real de movimento de suas partes, e a outra, a de energia potencial armazenada nas conexões, em virtude de sua elasticidade.

(16) Somos, assim, levados à concepção de um mecanismo complicado, capaz de uma vasta variedade de movimentos, mas ao mesmo tempo conectado de tal forma que o movimento de uma parte depende do movimento de outras partes, de acordo com certas relações definidas, sendo estes movimentos transmitidos por forças que surgem do deslocamento relativo das partes ligadas, devido à sua elasticidade. Tal mecanismo deve sujeitar-se às leis gerais da Dinâmica, e devemos ser capazes de deduzir todas as consequências de seu movimento, dado que saibamos a forma da relação entre os movimentos das partes.

(17) Sabemos que, quando se estabelece uma corrente elétrica em um circuito, a parte vizinha do campo se caracteriza por certas propriedades magnéticas, e que, se há dois circuitos no campo, as propriedades magnéticas do campo devido às duas correntes se combinam. Assim cada parte do campo está ligada às duas correntes, e as duas correntes são interligadas em virtude de sua conexão com a magnetização do campo. O primeiro resultado desta ligação [das correntes através do campo] que me proponho a examinar é a indução de uma corrente por outra e pelo movimento dos condutores no campo. O segundo resultado, que é dedutível disto, é a ação mecânica entre dois condutores que carregam correntes. O fenômeno da indução de correntes foi deduzido a partir de sua ação mecânica por Helmholtz e Thomson. Eu segui a ordem inversa, e deduzi

a ação mecânica a partir das leis da indução. Eu então descrevi métodos experimentais para determinação das quantidades L, M, N das quais estes fenômenos dependem.

(18) Eu então utilizo os fenômenos de indução e atração de correntes para explorar o campo eletromagnético e estabelecer os sistemas de linhas de força magnética que indicam suas propriedades magnéticas. Explorando este campo com um ímã, eu mostro as superfícies equipotenciais magnéticas que cortam as linhas de força em ângulos retos. Para mostrar estes resultados com o poder do cálculo simbólico, vou expressá-los na forma das Equações Gerais do Campo Eletromagnético. Estas equações expressam

- (A) A relação entre o deslocamento elétrico, a condução verdadeira e a corrente total, composta dos dois.
 - (B) A relação entre as linhas de força magnética e os coeficientes indutivos de um circuito, deduzidos a partir da lei da indução.
 - (C) A relação entre a intensidade da corrente e seus efeitos magnéticos, de acordo com o sistema eletromagnético de medida.
 - (D) O valor da força eletromotriz em um corpo, decorrente do movimento do corpo no campo, da alteração do próprio campo, e da variação do potencial elétrico de uma parte do campo para outra.
 - (E) A relação entre deslocamento elétrico e a força eletromotriz que o produz.
 - (F) A relação entre corrente elétrica e a força eletromotriz que a produz.
 - (G) A relação entre a quantidade de eletricidade livre em qualquer ponto, e os deslocamentos elétricos nas vizinhanças.
 - (H) A relação entre o aumento e a diminuição da eletricidade livre e as correntes elétricas da vizinhança.
- Há ao todo vinte destas equações, envolvendo vinte quantidades diferentes.

(19) Vou expressar em termos destas quantidades a energia intrínseca do Campo Eletromagnético, dependente em parte de sua polarização magnética, e em parte de sua polarização elétrica, a cada ponto. A partir disto posso determinar a força mecânica que age, em primeiro lugar, em um condutor móvel que carrega uma corrente elétrica; em segundo lugar, em um polo magnético; e em terceiro lugar, em um corpo eletrificado. O último resultado, isto é, a força mecânica que age em um corpo eletrificado, dá origem a um método independente de medidas elétricas, baseado nos efeitos eletrostáticos. Demonstra-se que a relação entre as unidades empregadas nos dois métodos, que depende daquilo que chamei de "elasticidade elétrica" do meio, é uma velocidade, que foi determinada experimentalmente pelos Srs. Weber e Kohlrausch. Mostro então como calcular a capacidade eletrostática de um condensador e a capacidade indutiva específica de um dielétrico. Examinamos a seguir o caso do condensador composto de camadas paralelas de substâncias de resistências

elétricas diferentes, e então mostramos que geralmente deve ocorrer o fenômeno chamado absorção elétrica, isto é, se o condensador é descarregado subitamente, mostrará sinais, depois de um tempo curto, de carga residual. (20) A seguir, as equações gerais serão aplicadas ao caso de uma perturbação magnética que se propaga através de um campo não condutor, e mostra-se que as únicas perturbações que podem se propagar desta forma são as perturbações transversas à direção de propagação, e que a velocidade de propagação é a velocidade v encontrada nos experimentos como os de Weber, que expressam o número de unidades eletrostáticas de eletricidade que estão contidas em uma unidade eletromagnética. Essa velocidade é tão próxima da velocidade da luz que parece que temos razão suficientemente forte para concluir que a própria luz (incluindo o calor radiante, e qualquer outra radiação que exista) é uma perturbação eletromagnética na forma de ondas que se propagam no campo eletromagnético, de acordo com as leis eletromagnéticas. Assim sendo, o acordo entre a elasticidade do meio, calculada a partir das rápidas alternâncias de vibrações luminosas, ou a partir dos processos lentos dos experimentos elétricos, mostra quão perfeitas e regulares devem ser as propriedades elásticas do meio, quando não estão sobrecarregadas com matéria mais densa do que o ar. Se as mesmas características da elasticidade permanecem em corpos transparentes densos, parece que o índice de refração ao quadrado é igual ao produto da capacidade dielétrica específica e a capacidade magnética específica. Verifica-se que os meios condutores absorvem tais radiações rapidamente, e são portanto geralmente opacos.

.....

.....

Segundo E. Segrè, em "From Falling Bodies to Radio Waves", Freeman, 1984, as equações propostas por Maxwell, no trabalho de 1864, em notação moderna seriam,

$$\vec{j} = \vec{i} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \tag{1}$$

$$\vec{B} = \text{rot } \vec{A} \tag{2}$$

$$4\pi \vec{j} = \text{rot } \vec{H} \tag{3}$$

$$\vec{E} = \vec{\nabla} \times \vec{B} - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \text{grad} \psi \tag{4}$$

$$\vec{D} = k \vec{E} \tag{5}$$

$$\vec{E} = -\rho \vec{i} \quad (6)$$

$$e - \text{div} \vec{D} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial e}{\partial t} + \text{div} \vec{i} = 0 \quad (8)$$