

O Nascimento do Eletromagnetismo

Prof. Dr. Hugo Franco

Apostila de Evolução dos Conceitos da Física
Publicação IFUSP 1336/98 - 2ª edição 2002

1 Introdução

No final do século XVII, época da publicação dos *Principia* de Newton, não se conheciam conexões entre os fenômenos elétricos, os magnéticos e a ótica. Estes eram então tratados como campos independentes do conhecimento. Nos séculos seguintes, os fenômenos elétricos e magnéticos foram gradualmente sendo relacionados, até a formação de uma nova disciplina – o **eletromagnetismo**. Apenas no final do século XIX, a nova ciência do eletromagnetismo unificou-se, por sua vez, com a ótica, quando Maxwell demonstrou que a luz poderia ser compreendida como uma onda eletromagnética. Discutiremos a seguir as principais etapas deste processo.

Como vimos, Fresnel obteve sucesso em descrever a **refração**, a **difração** e a **interferência** a partir de uma hipótese ondulatória para a luz. Para tanto, precisou postular a existência de um **éter** responsável pela propagação das ondas de luz. Para a maioria dos efeitos práticos, bastava supor um éter compressível como o ar e as ondas luminosas análogas às **ondas acústicas**, com velocidade de propagação e compressibilidade apropriadas. O éter teria, naturalmente, que ser um meio de **baixíssima viscosidade e densidade**, de modo a não modificar sensivelmente as trajetórias planetárias em uma escala de tempo de alguns milhares de anos. Era um modelo puramente mecânico, mas que atendia a seus propósitos.

No entanto, a observação do fenômeno da **polarização** da luz criou, dentro da teoria de Fresnel, certas dificuldades para a caracterização de tal meio material. Para que a luz tivesse este grau de liberdade adicional, a direção de polarização, perpendicular à direção de propagação da onda, seria necessário supor que as ondas seriam **transversais**, e não longitudinais como as ondas de som no ar. Entretanto, conforme já se sabia à época de Fresnel, ondas mecânicas transversais não podem se propagar em fluidos, mas apenas em

sólidos. Um fluido não volta à sua configuração original quando submetido a uma força de cisalhamento. Se levadas às últimas conseqüências, estas reflexões levariam à hipótese de que o **éter** da luz seria ...**sólido!** Portanto, para ser coerente com todas essas propriedades, o éter teria que ser muito diferente de quaisquer substâncias conhecidas.

Houve inúmeros modelos tentativos para a estrutura microscópica do éter da luz, visando construir um modelo mecânico do éter. Foram concebidos modelos inspirados em substâncias pouco usuais, que se comportam como um sólido ou um líquido, dependendo da **escala de tempo**. O vidro, por exemplo, escorre muito lentamente, numa escala de séculos, mas pode propagar ondas elásticas transversais e longitudinais. O mesmo ocorre com o alcatrão, usado para asfaltamento por poder se adaptar ao intemperismo físico. O éter se comportaria, portanto, como um fluido de baixa viscosidade, mas com diferentes regimes, conforme o tipo de perturbação: fluido para perturbações lentas; elástico para perturbações rápidas (como a luz).

Um curioso modelo de éter o imaginava como uma **espuma** tensionada, com vácuo no interior das bolhas. O resultado é um meio que combina uma baixa viscosidade com a possibilidade de transmitir vibrações **transversais**, como uma corda tensionada (convém notar que a tensão da espuma é essencial no modelo, pois, como a corda, uma membrana não tensionada não transmite ondas elásticas transversais).

Por outro lado, para se explicar a refração, era necessário criar-se um mecanismo pelo qual a velocidade da luz no éter varie com a presença de meios materiais (o vidro, por exemplo). Para dar conta dos diferentes índices de refração, os inúmeros modelos mecânicos de éter recorriam a duas classes de explicações:

- variações na **densidade** do éter ou
- variações na **rigidez** do éter (ou “*módulo de elasticidade*” do éter)

Os detalhes de cada teoria eram expressos através de suas **equações diferenciais**, linguagem que se havia gradualmente incorporado à física a partir dos problemas de acústica. No século XIX, um grande número de problemas da física-matemática com condições de contorno já haviam sido resolvidos. Já se sabia como impor condições de contorno na fronteira entre dois meios para dar conta da refração e reflexão das ondas elásticas pela interface. Por outro lado, a ótica é, nesse momento, ainda desvinculada da eletricidade e do magnetismo. Somente se integrarão com Maxwell no fim do século XIX.

Enquanto se multiplicavam os modelos de éter para a luz, desenvolveram-se separadamente as áreas da eletricidade e do magnetismo. Desde a publicação do *De Magnete*, de William Gilbert, existia a idéia de que o magnetismo fosse ligado ao movimento de algum fluido. Essa noção foi estendida aos fenômenos eletrostáticos, e foi principalmente sob essa ótica que se desenvolveram a eletricidade e o magnetismo. Em certo sentido, podemos dizer que o conceito de campo derivou da idéia dos fluidos de Gilbert, em oposição ao conceito de ação à distância, sem um meio intermediário, que Newton impusera à mecânica. Gradualmente surgiu a necessidade (independente da ótica) de se estabelecer modelos para o **éter** dos fenômenos **elétricos e magnéticos**.

Augustin Coulomb (1736-1806) estabeleceu experimentalmente, usando uma balança de torção por ele inventada, a lei do inverso do quadrado da distância para as forças eletrostáticas. Formulou o bem conhecido modelo de dois **fluidos elétricos** (“vítreo” e “resinoso”), que obedecem às bem familiares regras da eletrostática, se substituirmos a expressão “*dois fluidos*” por “*dois tipos de carga*”. Conforme reporta Coulomb, os fluidos iguais se repelem, opostos se atraem:

“Corpos eletrizados por fluidos iguais repelem-se, corpos eletrizados por fluidos diferentes se atraem”.

“Tais atrações ou repulsões ocorrem na razão direta das densidades dos fluidos elétricos e na razão inversa do quadrado das distâncias”.

“Em um corpo condutor eletrizado o fluido elétrico espalha-se sobre sua superfície, mas não penetra no mesmo.”

A força eletrostática seria, portanto, análoga à gravitacional, com uma lei de força inversamente proporcional ao quadrado da distância, o que foi verificado experimentalmente por Cavendish. Suas leis foram aperfeiçoadas por um aparato matemático devido a Gauss (1777-1855), dando origem ao conceito de **potencial** e de **campo elétrico**. Para Coulomb, as forças eletrostáticas poderiam ser também responsáveis pelos fenômenos químicos.

Benjamin Franklin (1706-90) inventou o **pára-raios**, capaz de conduzir ou “canalizar” o **fluido elétrico** do céu evitando danos. Por outro lado, um médico holandês conseguiu armazenar o fluido elétrico em uma “**garrafa de Leyden**” (de fato, um condensador). Tais dispositivos podem ser ligados em série, produzindo uma “bateria” capaz de produzir elevadas diferenças de potencial.

No que concerne ao magnetismo, para o qual **Anton Brugmans** (1732-89) já postulara anteriormente a existência de dois fluidos, *austral* e *boreal*, Coulomb aventou a hipótese de que ambos existiriam sempre **agrupados** nas moléculas de ferro. Já se sabia que os fluidos magnéticos não podem ser separados, pois um ímã partido forma dois novos ímãs, de modo que um ímã permanente teria sempre os **dois fluidos**, mas concentrados nas superfícies dos seus dois polos. O magnetismo macroscópico seria um efeito de correntes de **superfície** efetivas do ímã.

Em 1790, **Galvani** mostrou que duas placas diferentes metálicas em contato produzem contração numa perna de rã, que funcionou como um “detec-tor biológico” de “*fluido elétrico*”. **Alessandro Volta** (1745-1827), inspirado nas experiências de Galvani, construiu uma *pilha* de discos cobre/papel acidu-lado/zinco (pilha de Volta). O fato de a pilha ter necessariamente **dois polos** reforça a tese de dois fluidos elétricos e dois magnéticos **independentes**.

A primeira especulação documentada a respeito de uma possível relação entre os fenômenos elétricos e os magnéticos data do século XVIII, um episódio isolado em que um raio teria caído em uma casa, atingindo uma caixa cheia de facas. Parte delas fundiram-se, mas as restantes mostraram estar magnetizadas. É duvidoso que a magnetização tenha sido devida ao raio, mas este fato levantou em sua primeira forma, a hipótese de que os dois tipos de fenômenos estivessem vinculados.

Hans Christian Oersted (1777-1851), supondo desde 1813 que todos os tipos de força seriam conversíveis, observou, em 1820, o **desvio da agulha** de uma **bússola** por um fio em que passava **corrente elétrica**. Conquanto esta observação inicial tenha sido qualitativa, serviu como ponto de partida para diversas pesquisas subseqüentes interligando os fenômenos elétricos e magnéticos.

Convém notar que a direção da agulha é **perpendicular** à do fio. Isto sugeriu, logo após a observação de Oersted, uma falsa convicção de que a ação do fio sobre a agulha da bússola violaria a 3ª lei de Newton, pois, aparentemente, a força não agiria na reta unindo os dois corpos, como proposto por Newton. Esse falso paradoxo atraiu a atenção para o fenômeno de deflexão da agulha. De fato, as forças estão na linha prevista por Newton, mas agem na forma de um **torque**.

Oersted atribuiu o efeito ao que chamou de “*conflito de eletricidade*”, que “*agiria apenas nas partículas magnéticas da matéria*”. Tal “*conflito*” não se limitaria ao interior do condutor, mas se dispersaria pelas regiões adjacentes, em círculos. Exceto pela forma geométrica das linhas de campo, circulares, sua explicação é qualitativa, não permitindo cálculos de tais efeitos, o que foi conseguido por Biot e Savart no mesmo ano.

André Ampère (1775-1836), contemporâneo de Fresnel, observou pouco

depois da descoberta de Oersted a existência de forças entre dois fios conduzindo corrente elétrica:

“uma corrente elétrica cria no espaço um campo magnético”

“o campo magnético é proporcional à corrente e o seu sentido inverte-se com a corrente”

*“para calcular as ações que se exercem entre um circuito percorrido por uma corrente elétrica e um ímã, pode-se substituir o circuito elétrico por uma **“lâmina magnética apropriada”***

Estas lâminas eram concebidas como um par de folhas paralelas, cada uma contendo uma densidade uniforme de **fluidos magnéticos** opostos. Temos assim uma densidade uniforme de **monopolos magnéticos** de “polaridade magnética” (Norte/Sul) oposta. De fato, uma polarização desse tipo ocorre com cargas **elétricas** nos materiais denominados **eletretos**. No entanto, essa hipótese, mesmo sem realidade física, pode ser útil no cálculo de campos magnéticos em geometrias simples.

Ampère aventou a interessante hipótese de que as moléculas de ferro, bem como as dos ímãs, seriam equivalentes a minúsculos **circuitos elétricos**, e que a magnetização proviria de uma **orientação ordenada** das mesmas. Assim, o magnetismo dos materiais seria redutível, de fato, a um fenômeno de **circulação de carga elétrica** em escala microscópica, um ancestral do momento magnético orbital dos átomos, ou, possivelmente, do *spin*.

Em 1846, **Thompson** demonstrou que o campo vetorial \vec{e} do deslocamento da posição de equilíbrio pode ser assimilado a um *potencial vetor* \vec{A} , “sendo iguais numericamente”:

$$\vec{A} = \vec{e}$$

então o campo elétrico \vec{E} estaria com ele relacionado por:

$$\vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$$

ou seja, seria proporcional à derivada do potencial vetor em relação ao tempo.

O campo magnético \vec{B} seria representado pela rotação do elemento de volume do sólido, em relação à sua situação de equilíbrio, ou seja, seu **rotacional**:

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A}$$

Ainda que sejam válidas em alguns exemplos específicos, essas equações são incorretas no caso geral. Sugerem, entretanto, um esboço formal do que viria a ser a lei de Ampère.

Michael Faraday (1791-1867) estabeleceu uma relação recíproca à proposta por Ampère, ou seja, uma variação no **campo magnético** pode igualmente criar um campo elétrico. Faraday não tinha formação acadêmica, e aprendeu os principais fatos da ciência de sua época através da leitura dos livros que encadernava. Talvez por esta razão tinha uma visão intuitiva e pouco matemática, afastada da formulação dos problemas através de forças e equações diferenciais, mais bem estabelecida.

No âmbito do eletromagnetismo, desenvolveu o conceito de **linhas de força**, que já existia desde o século XVI, a partir da observação da **limalha de ferro**, nas proximidades de um ímã, um traçado das linhas de campo magnético. Faraday emprestava às linhas de força uma realidade mecânica, concebendo-as como “*tubos*” rotatórios, com o produto *intensidade* \times *área da seção* = *constante*. Essa imagem permite, de uma maneira pictórica, estabelecer que o divergente do campo magnético seja nulo. A “densidade de linhas” é portanto uma medida da intensidade local do campo magnético.

Faraday presumia que todo o espaço fosse preenchido por tais linhas de força. Uma região do espaço com campo magnético seria preenchida por um feixe de fibras, filamentos de vórtices. As linhas de força de Faraday trazem, portanto, para o domínio do eletromagnetismo, os **vórtices** anteriormente postulados por Descartes, para descrever o meio interplanetário em forma de turbilhão, que permeia os sistemas planetários arrastando os astros consigo. Ainda sob a ótica de Faraday, as linhas de força teriam uma existência material:

“não posso evitar expressar mais uma vez minha convicção a respeito da realidade da representação proporcionada pelas linhas de força com relação à ação de natureza magnética. Todos os pontos que são experimentalmente estabelecidos – ou seja, que não são hipotéticos – parecem ser completamente representados por elas”.

Esse ponto de vista estava longe de ser partilhado pelos seus contemporâneos, como o físico-matemático George Airy, que afirmou em 1837:

“declaro que dificilmente posso imaginar alguém para quem, conhecendo o acordo entre cálculo e ação à distância, possa hesitar entre ação pura e simples . . . contra algo tão vago e impreciso como as linhas de força”.

Faraday, ao postular a existência de um éter, na forma de uma **matéria fibrosa** de turbilhões filamentosos, permeando todo o espaço, afasta-se da concepção de Newton da **ação à distância** (que prescindia de um éter para propagar as interações). Com sua hipótese, Faraday reintroduziu na mecânica a existência de um **meio contínuo em todo o espaço**. Seu material filamentosos é sucessor do **éter cartesiano**, considerando indispensável na interação o **meio** entre os objetos para a transmissão das forças elétricas e magnéticas. Em certa medida, como veremos, Maxwell inspirou-se na hipótese de Faraday das linhas de força em parte de seus estudos do eletromagnetismo.

No campo da experimentação, Faraday estabeleceu uma conexão inequívoca entre **cargas elementares** e **átomos**, através de experiências em **eletrólise**, estabelecendo o primeiro elo entre fenômenos elétricos e estrutura da matéria. Células eletrolíticas com diferentes eletrólitos foram ligadas em série, de modo que a mesma quantidade de “fluido elétrico” atravessasse todas as cubas. Faraday constatou uma relação estequiométrica simples nas quantidades das espécies depositadas. Se a matéria fosse composta por átomos, os experimentos eletroquímicos de Faraday implicariam que a eletricidade também teria uma unidade fundamental, indivisível, átomos de eletricidade (os elétrons, em última análise).

Retornando ao modelo de Faraday de linhas de força, a forma de vórtices tubulares implica na existência de uma unidade elementar o fluxo magnético. É interessante notar que tal unidade fundamental de fato existe, e se manifesta quando um campo magnético atravessa um supercondutor tipo II, ou penetra em um anel supercondutor, que permite a entrada de linhas de força magnética. Neste caso, o **fluxo do campo magnético é quantizado**, e os vórtices vêm a ser os quanta de fluxo de campo magnético, que podem ser visualizados individualmente através do processo conhecido como “*decoração magnética*”, utilizando uma limalha microscópica de material ferromagnético. A quantização do fluxo magnético permite a medida precisa de campos magnéticos e suas variações através da **contagem de quanta de fluxo magnético** nos dispositivos denominados *SQUIDS*.

Ainda no âmbito da experimentação, Faraday realizou uma observação capital para o desenvolvimento subsequente do eletromagnetismo. Faraday verificou que uma **variação de campo magnético** induz **corrente elétrica** em fios. A corrente induzida é proporcional ao número de linhas de campo que atravessam a seção do circuito por unidade de tempo. Nas palavras de Faraday:

“... quer o fio se mova diretamente, ou obliquamente através das linhas de força [magnéticas], numa direção ou em outra, se

obtém o mesmo total de forças [elétrica] representado pelas linhas que o fio cruzou ... [de modo que] ... a quantidade de eletricidade movida como corrente é proporcional ao número de linhas cruzadas”.

Enfim, experimentos mostram que variações de campos elétricos geram campos magnéticos e vice-versa. O estreito vínculo constatado entre os campos elétricos e magnéticos mostra que o éter eletromagnético precisa conter, de maneira inseparável, vinculada, os dois campos.

James Clerck Maxwell (1831-79) estudou desde cedo os problemas conhecidos da luz (refração, difração etc) e publicou a partir destas um trabalho original sobre a composição das cores visíveis, tema então em voga. Maxwell encontrou os fundamentos experimentais do eletromagnetismo bem consolidados. Retomou a idéia de **linhas de força** de Faraday e procurou um **modelo mecânico** e matemático para ligar eletricidade e magnetismo, concebendo um complicado modelo mecânico do éter.

O éter do eletromagnetismo possuiria *turbilhões* com eixos paralelos às linhas de força do campo magnético. Numa região do espaço com um campo magnético, haveria muitos turbilhões girando. Maxwell tenta produzir um vínculo mecânico que ligaria os campos elétrico e magnético. Imagina para este fim camadas separando os turbilhões como engrenagens tipo *pinhão*, que agem como “rolamentos”. Esta camada de rolamentos representaria o fluxo de corrente elétrica.

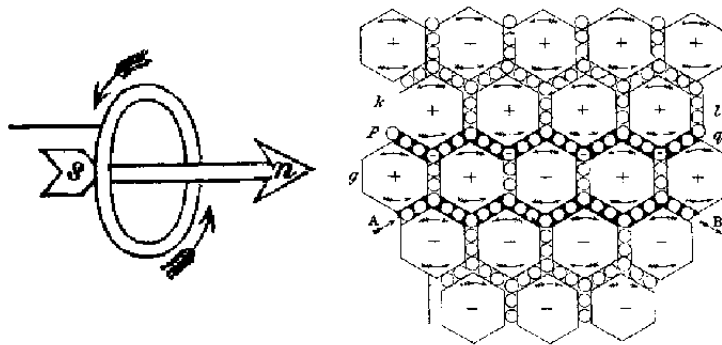


Figura 1: Modelo mecânico bidimensional proposto por Maxwell para o éter eletromagnético.

Numa região de campo magnético constante, não existe um “*fluxo de rolamentos*” (ou seja, não existem **correntes elétricas**). No entanto, a introdução de um fio com corrente elétrica movimenta os rolamentos, provocando a criação de duas regiões com diferentes **velocidades de rotação dos**

turbilhões e, portanto, diferentes intensidades de campo magnético. No interior de uma espira pela qual flui uma corrente elétrica haveria sempre uma velocidade de rotação dos turbilhões diferente da existente ao seu redor. Por outro lado, os turbilhões acoplados por esta camada giram em um mesmo sentido, dando origem a uma região de campo uniforme.

O éter de Maxwell mostrado na figura traduziu as leis de Ampère em um acoplamento mecânico entre os campos elétricos e magnéticos. Trata-se de uma versão, mais sofisticada em seu formalismo, do éter fibroso de turbilhões originalmente proposto por Faraday. O modelo acima é exclusivamente bidimensional. Um modelo ainda mais complicado foi criado por Maxwell para campos no espaço. No entanto, gradualmente, esses complexos modelos mecânicos foram abandonados em favor do uso de **equações diferenciais**, não necessariamente envolvidas com ações mecânicas de um éter intermediário. Em um período posterior à suas hipóteses envolvendo turbilhões, Maxwell defende de forma incisiva um retorno da noção newtoniana de **ação a distância**:

“... aqueles que preenchem todo o espaço três ou quatro vezes com éteres de diferentes tipos, ... porque não se pronunciam sobre seus escrúpulos em admitir a ação à distância como superior?”

Maxwell notou que um meio no qual são obedecidas as leis de Ampère e Faraday seria capaz de **propagar perturbações**. Maxwell calculou, a partir das equações diferenciais, a **velocidade de propagação** de tais perturbações encontrando a **velocidade da luz**, que ele postula então ser composta de **ondas eletromagnéticas**. Estas ondas, segundo suas previsões, seriam **transversais**, como as que havia proposto Fresnel para as ondas de luz. Isto o leva a identificar o éter do eletromagnetismo com o éter da luz, ou *éter luminífero*, como o chamou:

“a elasticidade do meio magnético ... é a mesma que a do meio portador da luz, ... não poderiam estes serem apenas um único e mesmo meio?”

“não nos é difícil concluir que a luz é constituída por ondas transversais cruzando o mesmo meio que produz os fenômenos elétricos e magnéticos”

Maxwell publicou, de 1864 a 1873, um extenso **tratado**, estudando a propagação das hipotéticas **ondas eletromagnéticas** em meios transparentes, refletores e opacos em função de **condições de contorno** de suas fronteiras. No entanto, Maxwell morreu antes da verificação experimental da

existência dessas ondas, que somente seria confirmada, em 1885, por **Hertz**, que produziu ondas eletromagnéticas (“*hertzianas*”) e mediu sua velocidade, obtendo a velocidade da luz, $c = 300\,000$ km/s.

2 Referências

- Uma detalhada descrição da evolução dos modelos de éter, com suas formulações analíticas, pode ser encontrado na obra:
Whittaker, E. (1951), “*A History of the Theories of Aether and Electricity*”, volume I, Thomas Nelson and Sons Ltd., Londres, 1951.
- Uma narrativa resumida das principais etapas do eletromagnetismo se encontra em:
Maitte, B., “*La Lumière*”, *Editions du Seuil*, Paris 1981.
- Uma introdução à história do eletromagnetismo na língua portuguesa pode ser encontrada na obra:
Gibert, A., “*Origens Históricas da Física Moderna*”, Fund. Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1982.