

O desenvolvimento da eletrodinâmica como uma teoria de ação a distância no século XIX

The development of electrodynamics as a theory of action at a distance in the nineteenth century

Kevin Chagas Bittencourt¹, Claudio Maia Porto^{*1}

¹Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Departamento de Física, 23851-180, Seropédica, RJ, Brasil.

Recebido em 07 de fevereiro de 2025. Revisado em 12 de junho de 2025. Aceito em 13 de junho de 2025.

Apresentamos a construção, efetuada ao longo de cerca de setenta anos, desde fins do século XVIII até meados do século XIX, de uma teoria de interações eletromagnéticas descritas em termos de forças a distância. Iniciamos a exposição com a formulação eletrostática de Coulomb, destacando a maneira como ele dá os primeiros passos em direção à caracterização da carga elétrica como uma propriedade quantitativa da matéria. Passamos pelos experimentos de Hans Christian Oersted revelando as interrelações entre eletricidade e magnetismo, e, em seguida, pela lei de força proposta por Ampère para descrever ações entre fios percorridos por correntes elétricas. Chegamos, então, aos trabalhos dos alemães Theodor Fechner e Wilhelm Weber, detendo-nos na tentativa deste último de generalizar a obra de Ampère e elaborar uma teoria completa das forças eletromagnéticas que englobasse também os fenômenos indutivos descobertos por Faraday. Enfatizamos ainda a investigação das origens dessas interações a partir da construção de um esboço de teoria da matéria, correlata a toda essa pesquisa.

Palavras-chaves: História da Física, Eletromagnetismo, Eletrodinâmica, Ação a distância.

We present the construction, carried out over about seventy years, from the end of the 18th century to the middle of the 19th century, of a theory of electromagnetic interactions described in terms of forces at a distance. We begin the exposition with Coulomb's electrostatic formulation, emphasizing the way in which he takes the first steps towards the characterization of electric charge as a quantitative property of matter. We pass through Hans Christian Oersted's experiments revealing the connections between electricity and magnetism, and then through the force law proposed by Ampère to describe actions between wires through which flow electric currents. Afterwards, our analysis arrive at the work of the German scientists Theodor Fechner and Wilhelm Weber, focusing on the latter's attempt to generalize Ampère's work and elaborate a complete theory of electromagnetic forces that also encompasses the inductive phenomena discovered by Faraday. We also emphasize the investigation of the origins of these interactions based on the construction of an outline of a theory of matter, correlated to all this research.

Keywords: History of Physics, Electromagnetism, Electrodynamics, Action at a distance.

1. Introdução

A formulação atual do eletromagnetismo envolve, certamente, diversos conceitos que se desenvolveram, sobretudo, no século XIX. Atualmente ancoramos toda a descrição dos fenômenos eletromagnéticos em termos da ideia de campos. No entanto, essa concepção só se consolidou na segunda metade daquele século, prevalecendo sobre a ideia de ações a distância entre elementos de carga elétrica em repouso ou em movimento.

Podemos dizer que a elaboração da teoria eletromagnética reuniu dois aspectos distintos em sua construção: o aspecto mais instrumental da descrição das interações e a própria compreensão das origens dessas interações em termos de uma teoria da matéria. Entretanto, conforme veremos aqui, os dois aspectos estão interligados.

De fato, um elemento interessante que se evidencia nessa história da busca por uma teoria de ação a distância é o da construção da ideia do que seriam as fontes dos fenômenos, primeiramente “elétricos” e “magnéticos”, e, posteriormente, “eletromagnéticos”. Há um primeiro passo, dado por Charles Augustin de Coulomb, na conceitualização das fontes das forças ditas eletrostáticas em termos de “massas elétricas”, em uma clara inspiração newtoniana. Há também a própria separação entre a descrição das interações e a especulação sobre a natureza da matéria se fazendo presente na obra de Ampère, que, ao lado da elaboração, de caráter empírico-indutiva, de uma lei de força entre elementos de correntes onde as analogias experimentais sugeriam que toda força magnética é provocada por correntes, lançou alguns elementos importantes para a formação do conceito moderno corrente elétrica. Observa-se, enfim, um processo de elaboração que, em nosso entendimento, caminha para a adoção final por Lorentz da ideia atomística de unidades básicas de carga elétrica na Natureza.

*Endereço de correspondência: claudio@ufrj.br

Editor-Chefe: Marcello Ferreira

Assim sendo, consideramos que é um tema interessante a ser aprofundado, buscando dar continuidade a excelentes pesquisas já conduzidas no país sobre o assunto [1–8], sempre tendo como foco a intenção de proporcionar aos professores em atuação alguns elementos de discussão que possam ajudar a lançar luz sobre nossas próprias vivências docentes.

Com esse objetivo, logo após essa introdução iniciamos a discussão, na seção dois, com a formulação de Coulomb para as interações estáticas, tanto de natureza elétrica como magnética, enfatizando os paralelos com o paradigma newtoniano proporcionado pela sua Lei da Gravitação.

Em seguida, na seção três, discutimos os primeiros passos em direção a uma concepção unificada dos fenômenos elétricos e magnéticos, por meio da obra de Oersted, que muito influenciou Ampère. Passamos, então, na seção seguinte, à apresentação da própria formulação de Ampère para a interação magnética entre correntes elétricas em termos de uma ação a distância.

Por último, dedicamos um maior espaço – seção cinco – à tentativa de elaboração de uma teoria geral para todas as interações de natureza eletromagnética por parte do alemão Wilhelm Weber, em meados do século XIX. Vemos como Weber obteve vários sucessos na generalização dos resultados já conhecidos, entre os quais os da Lei de Força de Ampère, baseando-se na ideia de forças dependentes das velocidades e acelerações das fontes elétricas. Vemos, ainda, que, seguindo em boa parte as ideias do também alemão Gustav Fechner, a teoria de Weber se fundamenta em hipóteses a respeito da origem dos fenômenos eletromagnéticos e da constituição da matéria.

Registre-se que, em toda essa exposição, as equações são apresentadas em notação matemática moderna, visando a facilitar a compreensão por um público mais amplo.

A essas seções seguem-se as conclusões.

2. Coulomb e os Primórdios Matemáticos da Eletricidade e do Magnetismo

O mecanicismo científico prevalecente nos primórdios da Era Moderna rejeitou fortemente a ideia de ação a distância, extremamente difundida no período renascentista imediatamente anterior, visto como resquício de um pensamento pré-científico. Essa rejeição exigiu a adoção da concepção de fluidos elétricos e magnéticos como agentes intermediadores das interações dessa natureza entre corpos afastados. Por sua vez, a constatação da ocorrência de dois comportamentos elétricos opostos – atração ou repulsão – colocou a questão da existência de apenas um ou de dois fluidos distintos.

Entretanto, o advento da teoria newtoniana da gravitação alterou substancialmente esse cenário. Ainda que Newton (1643–1727) rejeitasse a alegação de que

houvesse proposto uma teoria de ação a distância [9], sua teoria, sobretudo tal como levada adiante por seus sucessores [10], abriu caminho para uma abordagem da descrição da interação diretamente em termos dos dois corpos interagentes e suas respectivas posições, sem qualquer menção a agentes intermediários. A segunda metade do século XVIII assistiu à consolidação desse tratamento para a interação eletrostática, primeiramente por Joseph Priestley (1733–1804) e Henry Cavendish (1731–1810), até a investigação experimental realizada por Coulomb (1736–1806).

De fato, Coulomb se propôs a descrever uma lei matemática para a força entre corpos eletrizados em repouso. Influenciado fortemente pela lei newtoniana da força gravitacional, na mesma linha dos antecessores mencionados, Coulomb propôs que essa força fosse inversamente proporcional ao quadrado das distâncias entre os corpos eletrizados. Por meio dos experimentos relatados em sua primeira memória de 1785, Coulomb conclui:

“A força repulsiva entre duas pequenas esferas carregadas com o mesmo tipo de eletricidade é inversamente proporcional ao quadrado das distâncias entre os centros das duas esferas.” [11, p. 572]

No mesmo ano, ele conclui em outra memória:

“Chegamos portanto, por meio de um método absolutamente diferente do primeiro, a um resultado similar; podemos concluir que a atração mútua do fluido elétrico que é chamado de positivo no fluido elétrico que é ordinariamente chamado de negativo é inversamente proporcional ao quadrado das distâncias; assim como encontramos em nossa primeira memória, que a ação mútua dos fluidos elétricos de mesmo tipo é inversamente proporcional ao quadrado das distâncias” [12, p. 581]

Nesse trecho, observa-se que Coulomb chama os dois tipos de eletricidade de positiva e negativa. Ele se referia aqui aos dois fluidos elétricos chamados por Charles Du Fay (1698–1793) de resinosos e vítreos.

Em sua segunda memória, Coulomb relata novas investigações experimentais, nas quais ele estuda as relações entre a eletrização dos corpos e a força eletrostática. Para designar a grandeza hoje conhecida como carga elétrica, Coulomb usa, pelo que parece ser a primeira vez na história [13], o termo “massa elétrica”

“Se essa força atrativa fosse proporcional à razão inversa do quadrado das distâncias (entre os centros das bolas eletrizadas), como encontramos para a força repulsiva em nossa Primeira Memória, teríamos [...] D igual ao produto da massa elétrica das duas bolas” [12, p. 579], Tradução de [13]

Mais do que qualquer outro, o termo parece evidenciar a influência da concepção newtoniana da gravitação na formulação da lei eletrostática. Além disso, ao final da segunda memória, ao sintetizar o que foi apresentado, Coulomb usa dois novos termos: “moléculas eletrizadas” e “densidade de fluido elétrico”. Diz ele:

“A ação elétrica, seja ela repulsiva ou atrativa, das duas esferas eletrizadas, e, portanto, das duas moléculas eletrizadas, está numa razão entre as densidades do fluido elétrico das duas moléculas eletrizadas e o quadrado das distâncias.” [12, p. 593]

Apesar de ser difícil afirmar com certeza o que Coulomb quis dizer com esses termos, uma vez que ele nunca os explicou explicitamente, alguns estudiosos [5, 13, 14] defendem que a expressão “moléculas eletrizadas” refere-se a supostos corpúsculos de metal (moléculas) carregados eletricamente, enquanto “densidade de fluido elétrico das moléculas” se refere à quantidade de fluido elétrico em cada molécula.

Parece implícito que Coulomb defendia que metais eram compostos pelo que ele chamava de “moléculas”. No entanto, é difícil afirmar qual era a concepção de Coulomb a respeito do que seriam as moléculas, bem como se ela guarda qualquer semelhança com o conceito de molécula adotado pela química moderna, uma vez que, novamente, ele em momento algum apresenta essa concepção de forma explícita. Coulomb parece de fato defender essa ideia, a exemplo de um trecho de sua memória de 1784, traduzida por A.K.T.Assis (2022), sobre a elasticidade de fios de metal: “*As partes integrantes do fio de ferro ou de latão, ou de um metal qualquer, possuem uma elasticidade que podemos considerar como perfeita [...]*” [15, p. 265]¹, onde ele menciona “partes integrantes” do material.

Embora, como dissemos, seja difícil afirmar a real concepção de Coulomb, vamos adotar a hipótese de que, ao dizer que a força eletrostática “está numa razão entre as densidades do fluido elétrico das duas moléculas” [11, p. 593], Coulomb provavelmente está se referindo à quantidade de fluido elétrico em dois corpúsculos de metal. Baseados nos termos usados pelo próprio Coulomb, vamos considerar ainda que, quando ele se refere às “massas elétricas”, está fazendo menção à quantidade de eletricidade presente nesses corpúsculos.

Caso a conjectura anterior esteja certa, surpreendemos aqui a evolução da ideia quantitativa de carga elétrica

em um estágio embrionário, a meio caminho de sua formação. As massas elétricas de Coulomb corresponderiam, ao mesmo tempo, a uma certa quantidade de matéria fluida – como o conceito de massa oriundo da mecânica assim estabelece –, matéria essa, porém, dotada de certa propriedade elétrica quantitativamente determinada, e à própria quantidade de eletricidade aí contida. Em outras palavras, a referência se faz simultaneamente à massa inercial de fluido elétrico e à quantidade de eletricidade que lhe é própria.

Duas observações são ainda pertinentes a respeito do pensamento de Coulomb acerca da eletricidade. Primeiramente, não era seu principal objetivo a criação de uma teoria a respeito dos fluidos elétricos, suas origens ou a origem da força eletrostática, mas, de um modo bem mais instrumental, limitar-se a fornecer uma expressão matemática que pudesse ser usada para descrever tal força de forma quantitativa [13]. Assim, lendo seus trabalhos o vemos empregando os termos “massas elétricas”, “moléculas eletrizadas” e “densidades dos fluidos elétricos” sem precisá-los ou esclarecê-los. Essa abordagem mais instrumental é um ponto de vista comum no desenvolvimento do eletromagnetismo pelos físicos continentais e é consoante à abordagem utilizada por Newton, sendo chamada por [16] de “programa newtoniano”. Este programa consistiria em prosseguir da forma mais puramente matemática possível, fazendo o mínimo possível de hipóteses acerca do fenômeno. Essa inclinação de Coulomb fica evidente na continuação de seu comentário citado anteriormente a respeito de preferir a teoria de dois fluidos à de um fluido único:

“Como essas duas explicações possuem apenas um grau de probabilidade maior ou menor, advirto, para deixar a teoria que vai seguir livre de toda disputa sistemática, que, na suposição de dois fluidos elétricos, tenho apenas a intenção de apresentar com o menor número de elementos possíveis os resultados do cálculo e da experiência, e não de indicar as verdadeiras causas da eletricidade.” [17, p. 673], Tradução de [5]

As semelhanças com a abordagem newtoniana ficam ainda mais evidentes ao se considerar que a força eletrostática proposta por Coulomb tem a mesma direção da reta que liga os corpos eletrizados. Além disso, é também uma ação direta a distância, como a lei de gravitação de Newton.

A segunda observação que devemos fazer é a de que a força eletrostática de Coulomb é uma ação entre os fluidos elétricos imponderáveis que estão contidos nos corpos carregados, não entre os corpos em si. Em outras palavras, é uma força entre elementos imponderáveis mas que, de alguma forma, resulta no movimento dos corpos eletrizados, estes sim ponderáveis. Esse ponto pode parecer, à primeira vista, de pouca relevância. No entanto, ele revela a ideia implícita de que o fluido elétrico e a matéria inercial, que eram considerados dois

¹ Sobre essa tradução, Assis comenta: “Estou traduzindo como ‘partes integrantes’ o que Coulomb denominou aqui de ‘*parties integrantes*’ de um fio. Essa expressão também poderia ser traduzida por ‘partículas integrantes’ ou por ‘elementos integrantes’. Outras possibilidades de tradução seriam ‘partes (ou partículas ou elementos) constituintes’, ‘integrals’, ‘individuais’ ou ‘constitutivas’[...]. Gillmor considera que essas expressões podem ser traduzidas em inglês por ‘*individual particles*’ e ‘*integral particles*’, respectivamente [Gillmor, 1971a, pág. 159]. Ou seja, Coulomb parece ter uma visão corpuscular, atômica ou molecular para a composição de um metal.” [5]

tipos de matéria não necessariamente relacionados, de alguma forma interagiam. Essa ideia será retomada por outros cientistas no século seguinte, conforme veremos adiante.

Por fim, na segunda memória de 1785, Coulomb também tentou descrever a interação entre ímãs, bem como entre ímãs e a Terra. Novamente guiado pelo programa newtoniano, ele propôs uma expressão para a força entre polos magnéticos: “O fluido magnético age por atração ou repulsão em uma razão direta da densidade do fluido e inversamente proporcional ao quadrado da distância de suas moléculas.” [12, p. 593]. Conforme vemos nesse trecho, Coulomb adota um sistema para o magnetismo semelhante àquele adotado para a eletricidade. Existiriam dois fluidos magnéticos, o fluido magnético sul e o fluido magnético norte, de forma que os fluidos semelhantes se repeliriam e os diferentes se atrairiam. Ímãs seriam corpos que possuem fluido magnético sul em seu polo sul e fluido magnético norte em seu polo norte. Vemos também o uso do termo “densidade do fluido” novamente, possivelmente se referindo, assim como no caso anterior, à quantidade de fluido magnético em cada corpúsculo de metal.

A força magnética proposta por Coulomb seria proporcional ao produto das densidades de fluido magnético nos polos, p_1 e p_2 , convencionando-se o sinal positivo para o polo norte e o sinal negativo para o polo sul. Em uma notação moderna, teríamos:

$$F \propto \frac{p_1 p_2}{r^2}. \quad (1)$$

Apesar de ter verificado experimentalmente que a interação entre os ímãs enfraquece com o quadrado da distância, Coulomb não verificou a relação com a densidade de fluido magnético [8].

Concluindo esta seção, observemos que, neste ponto da história, é visível a separação absoluta entre fenômenos elétricos e magnéticos, havendo dois tipos de fluidos imponderáveis: fluido elétrico e fluido magnético. Essa percepção permaneceria inalterada por mais 35 anos, até os experimentos do físico dinamarquês Hans Christian Oersted (1777–1851), na primeira metade do século XIX.

3. O Primeiro Passo em Direção à Unificação Eletromagnética

A invenção da pilha por Alessandro Volta (1745–1827) constituiu um marco decisivo no desenvolvimento experimental e teórico do eletromagnetismo. De fato, pela primeira vez possuía-se um dispositivo capaz de gerar movimentação elétrica de forma continuada e controlável. Até então, os fenômenos elétricos se resumiam à eletrostática e às descargas elétricas, naturais ou artificialmente induzidas – como na garrafa de Leiden. Esse novo recurso proporcionou um grande impulso ao estudo experimental desse ramo mais recente da teoria física.

Nesse cenário, o dinamarquês Hans Christian Oersted desempenhou um papel fundamental. Em 1820, Oersted divulgou os resultados de seus experimentos envolvendo correntes elétricas e ímãs. A motivação para a pesquisa relacionando fenômenos elétricos e magnéticos certamente residia na enorme influência exercida sobre ele por uma corrente de pensamento filosófico – sobretudo alemão – denominado de “Filosofia da Natureza”² ou “*Naturphilosophie*”, caracterizada pela defesa de uma unidade fundamental entre todos os fenômenos da Natureza.

O termo utilizado por Oersted para se referir à corrente elétrica é “conflito de eletricidade”:

“As extremidades opostas da bateria galvânica [pilha de Volta] foram conectadas por um fio metálico, que, para simplificar, chamaremos de condutor unificador ou fio unificador. Ao efeito que ocorre nesse condutor e no espaço circundante, daremos o nome de conflito de eletricidade.” [18, p. 417–418]

Também a concepção de “conflito elétrico” sugere uma forte vinculação à filosofia da Natureza schellingiana, na qual está presente a ideia de conflitos entre princípios opostos como elemento dinâmico essencial da realidade material [19].

A concepção de Oersted sobre os fenômenos elétricos seria, hoje em dia, caracterizada como uma concepção mais próxima à de campo. De acordo com ele, a corrente elétrica não seria um fluxo contínuo dos fluidos elétricos positivo e negativo, mas sim um processo turbulento dinâmico, em que ambos os fluidos se recombinariam e se separariam continuamente, gerando o “conflito elétrico”. Além disso, esse conflito não estaria confinado apenas ao interior dos condutores, causando perturbações ao redor do mesmo [20].

Oersted notou que, ao se aproximar um fio condutor de corrente de uma bússola, ocorria um desvio na agulha da bússola (Figura [1]). Esse desvio dependia do sentido da corrente elétrica e da posição relativa entre a bússola e o fio. Para descrever esse fenômeno, Oersted cunha os termos “eletromagnético” e “eletromagnetismo” [21].

Seus resultados não foram publicados em nenhuma revista científica [21]. Em vez disso, ele enviou um breve relato, de apenas 4 páginas, de seus experimentos para alguns estudiosos da época, com uma breve explicação própria para as causas do fenômeno:

“Consideremos agora a razão de todos esses fenômenos. O conflito elétrico apenas atua sobre as partículas magnéticas da matéria. Todos os corpos não-magnéticos parecem ser

² Não confundir aqui o nome próprio “Filosofia da Natureza” com a denominação que prevaleceu até, essencialmente o século XVIII de um ramo da filosofia voltado à compreensão dos fenômenos naturais, e do qual se emanciparam as ciências específicas da Física, da Química e da Biologia.

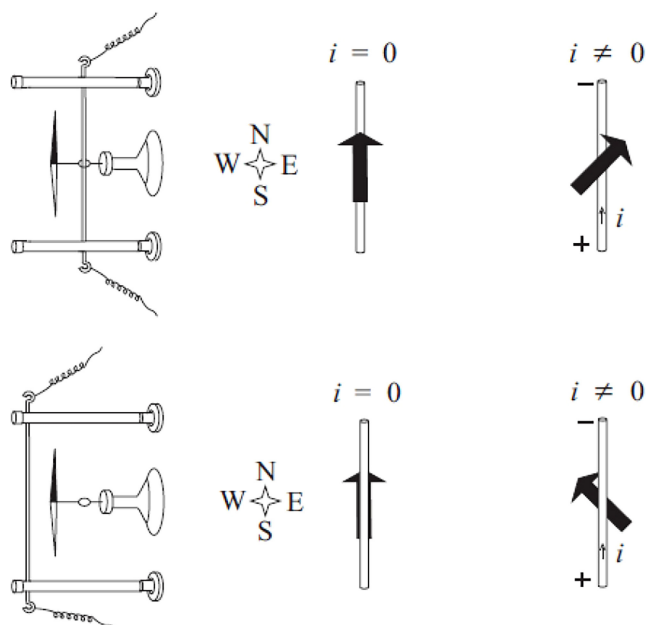


Figura 1: Representação do experimento de Oersted. Fonte: Assis e Chaib, 2015.

permeáveis ao conflito elétrico; no entanto, os corpos magnéticos, ou suas partículas magnéticas, resistem à passagem desse conflito magnético, o que faz com que possam ser movidos pelo ímpeto das forças em luta.” [18, p. 419]

Nesse trecho, vemos que Oersted considera a existência de dois tipos de materiais: materiais magnéticos e materiais não-magnéticos. Essa ideia está diretamente ligada ao conceito anteriormente abordado sobre a forma como o conflito elétrico se dá ao redor dos condutores de corrente. Os materiais magnéticos seriam aqueles materiais que são resistentes à passagem de conflito elétrico, ou seja, quando aproximados de um condutor permeado por corrente elétrica, estariam suscetíveis às perturbações dos fluidos elétricos ao redor do condutor. Por outro lado, os materiais não-magnéticos seriam permeáveis aos conflitos elétricos, ou seja, permitiriam a livre passagem dos fluidos elétricos e portanto não são movidos pelas perturbações neles [22]. Oersted não foi o primeiro a propor teorias sobre forças baseadas em perturbação de fluidos. Teorias semelhantes encontraram defensores muitos anos antes, como Euler e Descartes [23], que rejeitavam a ideia de ação à distância.

Essa concepção de Oersted da forma como a corrente elétrica interage com os ímãs sugere um distanciamento entre sua teoria e aquela que propunha a existência de fluidos magnéticos. Além disso, podemos apontar a teoria de Oersted como uma das primeiras propostas de unificar a eletricidade e o magnetismo.

Entre os estudiosos que receberam o relato de Oersted está o inglês Humphry Davy (1778–1829), que em

1820 havia sido eleito presidente da Royal Society e rapidamente concentrou seus esforços em reproduzir os experimentos de Oersted. Com o auxílio de seu assistente, Michael Faraday (1791–1867), Davy verifica as descobertas de Oersted no mesmo ano [20]. Faraday viria a elaborar uma explicação baseada em campos, como era predominante entre os pensadores britânicos da época.

O relato também foi recebido na academia francesa por André-Marie Ampère (1775–1836), François Arago (1786–1853), Jean-Baptiste Biot (1774–1862), Augustin Fresnel (1788–1827), Pierre-Simon Laplace (1749–1827) e Félix Savart (1791–1841) [20]. Arago, que ocupava o cargo de professor de geometria analítica na École Polytechnique de Paris, se encarregou de reproduzir os experimentos para seus colegas no mesmo ano. Um de seus colegas na mesma instituição era Ampère [21].

4. Os Trabalhos de Ampère

No ano de 1822, Ampère publicou uma memória intitulada *Mémoire sur la Détermination de la Formule qui Représente l'Action Mutuelle de Deux Portions Infinitement Petites de Conducteurs Voltaïques* [Memória sobre a Determinação da Fórmula que Representa a Ação Mútua de Duas Porções Infinitamente Pequenas de Condutores Voltaicos] Nela, apresentava uma nova teoria física, cujo objetivo era encontrar uma expressão matemática para a força entre dois fios percorridos por correntes, fenômeno por ele descoberto em 1820. Ele inicia a memória escrevendo:

“Quando se descobre um novo tipo de ação até então desconhecido, o primeiro objetivo do físico deve ser determinar os principais fenômenos que resultam disso e as circunstâncias em que eles ocorrem. Em seguida, é preciso encontrar maneiras de aplicar o cálculo, representando por meio de fórmulas o valor das forças que as partículas dos corpos exercem umas sobre as outras, onde esse tipo de ação se manifesta. Uma vez que percebi que dois condutores voltaicos agiam um sobre o outro, ora atraindo-se, ora repelindo-se, e descrevi as ações que exerciam em diferentes situações, busquei expressar a força atrativa ou repulsiva de duas de suas partes infinitamente pequenas, a fim de deduzir, por métodos conhecidos de integração, a ação entre duas porções dadas de condutores em termos de forma e situação” [24, p. 75].

A nova grande teoria de Ampère, assim como a de Oersted, também não previa a existência de um fluido magnético, porém, tinha diferenças radicais e fundamentais à concepção do dinamarquês. Em primeiro lugar, a concepção de corrente elétrica de Ampère era

diferente do conceito de “conflito elétrico”, conforme ele mesmo escreve:

“Tais são os novos progressos que um ramo da física acaba de realizar, dos quais não tínhamos a menor ideia há apenas dois anos, e que nos fizeram perceber fatos mais surpreendentes do que qualquer coisa que a ciência nos tinha oferecido até agora em termos de fenômenos maravilhosos. Um movimento que continua sempre no mesmo sentido, apesar dos atritos, apesar da resistência do meio, com esse movimento sendo produzido pela ação mútua entre dois corpos que permanecem constantemente no mesmo estado, é um fato sem precedentes no meio de tudo o que sabemos sobre as propriedades que a matéria inorgânica pode oferecer. Isso prova que a ação que emana dos condutores voltaicos não pode ser atribuída a uma distribuição específica de certos fluidos em repouso dentro desses condutores, como é o caso das atrações e repulsões elétricas comuns. Essa ação só pode ser atribuída a fluidos em movimento dentro dos condutores, movendo-se rapidamente de uma extremidade da pilha para a outra extremidade.” [25, p. 65]

A “ação que emana dos condutores voltaicos” à qual Ampère se refere é a interação entre condutores percorridos por correntes e ímãs. Vemos nesse trecho que Ampère considerava que o fluido elétrico se move apenas dentro dos condutores, diferentemente de Oersted, que defendia que o “conflito elétrico” se dava não só dentro do condutor, mas também ao redor dele – como já salientamos, a concepção de Oersted era mais próxima à ideia de campo do que a de Ampère. Ampère também afirmava que tais interações são diferentes daquelas anteriormente estudadas por Coulomb:

“Vamos considerar agora a que aspecto é devida a diferença desses dois tipos de fenômenos, completamente distintos. Um deles consiste na tensão e nas atrações ou repulsões que são conhecidas há muito tempo, e o outro fenômeno consiste na decomposição da água e de muitas outras substâncias, nas mudanças de direção da agulha [magnetizada], e em um tipo de atrações e repulsões totalmente diferentes das atrações e repulsões elétricas ordinárias, que eu acredito ter sido reconhecido por mim pela primeira vez, e que eu denominei atrações e repulsões voltaicas, para distingui-las dessas últimas [atrações e repulsões elétricas ordinárias].” [26, p. 61–62].

Os termos “atrações e repulsões voltaicas” são posteriormente alterados em uma errata para “atrações e

repulsões de correntes elétricas” [21]. Ele então ressalta: “[...] a corrente galvânica, uma denominação que eu creio que deva ser mudada para corrente elétrica [...]” [27, p. 197].

A respeito da origem da corrente elétrica a partir da pilha de Volta, Ampère escreve:

“Mas quando os dois corpos, ou dois sistemas de corpos, entre os quais ocorre a ação eletromotriz [por exemplo, os terminais da pilha], estão em contato por meio de corpos condutores [por exemplo fios] nos quais a ação eletromotriz não é igual e oposta à primeira, de modo a manter o estado de equilíbrio elétrico e, portanto, as tensões, essas tensões desaparecem, ou pelo menos se tornam muito pequenas, e ocorrem fenômenos característicos [eletrodinâmicos]. Uma vez que a disposição dos corpos entre os quais ocorre a ação eletromotriz é a mesma, a ação certamente continua, e uma vez que a atração mútua das duas eletricidades, medida pela diferença entre as tensões elétricas que se tornou zero, ou é consideravelmente diminuída, não pode mais equilibrar essa ação, geralmente se aceita que ela continua a transportar as duas eletricidades em dois sentidos como antes; assim, um duplo fluxo resulta, uma corrente positiva e outra corrente negativa, movendo-se em sentidos opostos dos pontos onde a ação eletromotriz ocorre para se encontrarem novamente na parte do circuito oposta a esses pontos.” [26, p. 63].

Apesar de a escrita de Ampère não ser suficientemente clara, vemos nesse trecho que ele concebia que a corrente elétrica não era um único fluxo de fluido elétrico, mas um fluxo duplo e oposto dos dois tipos de eletricidade. A Figura 2 mostra um esquema de como seria a corrente elétrica.

Ampère convencionou, então, que o sentido da corrente elétrica é o sentido do movimento do fluido positivo. Apesar de que, no caso de metais condutores, hoje se saiba que a corrente elétrica é devida ao movimento de elétrons do polo negativo ao positivo, a convenção de Ampère ainda é adotada nos dias atuais e, ao que tudo indica, tem nele a sua origem [21].

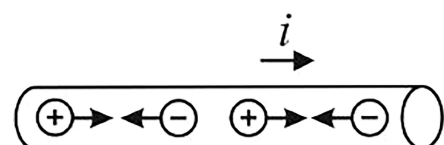


Figura 2: Representação de como Ampère concebia a corrente elétrica. Fonte: Assis e Chaib (2015).

Um trecho de um manuscrito de 1820 mostra explicitamente que Ampère considera a corrente elétrica como sendo o movimento dos fluidos elétricos dentro do condutor:

“*g* e *h* dependem apenas da quantidade de eletricidade fluindo [através da seção transversal do condutor] em tempos iguais, a quantidade compensando a velocidade. Isso é [proporcional à] quantidade de movimento, desde que o caminho seja completamente livre, ou seja, desde que o condutor seja suficientemente espesso.” [28].

No contexto do manuscrito, *g* e *h* se referiam a intensidades de corrente elétrica. De acordo com Assis e Chaib (2015), Ampère parece ter sido o primeiro estudioso a definir a intensidade de corrente elétrica da forma como a definimos atualmente.

De acordo com a teoria de Ampère, não apenas os fenômenos que Oersted chamava de eletromagnéticos eram explicados por interações entre correntes elétricas, mas também os fenômenos puramente magnéticos, incluindo o funcionamento das bússolas:

“Quando pela primeira vez desejei encontrar as causas dos novos fenômenos descobertos pelo Sr. Oersted, refleti que, uma vez que a ordem em que dois fatos são descobertos não afeta de forma alguma quaisquer conclusões que podem ser tiradas das analogias que eles apresentam, poderia ter sido primeiro conhecido, antes de sabermos que uma agulha magnetizada aponta constantemente do Sul para o Norte, que uma agulha magnetizada tem a propriedade de ser influenciada por uma corrente elétrica e se posicionar perpendicularmente à corrente, de tal forma que o polo austral do ímã é desviado para a esquerda da corrente. E então, posteriormente, poderia ter sido descoberto que a extremidade da agulha que é desviada para a esquerda da corrente aponta constantemente para o Norte. Não seria a ideia mais simples, e aquela que imediatamente ocorreria a qualquer pessoa que quisesse explicar a direção constante do Sul para o Norte, postular uma corrente elétrica na Terra em uma direção tal que o Norte estivesse à esquerda de um homem que, deitado na sua superfície de frente para a agulha, recebesse essa corrente na direção dos seus pés para a sua cabeça, e tirar a conclusão de que ela ocorre de Leste para Oeste em uma direção perpendicular ao meridiano magnético?” [27, p. 202–203].

Nesse trecho, vemos a ideia central da teoria de Ampère: o que daria aos ímãs suas propriedades magnéticas seriam correntes elétricas permanentes em seus

interiores. Partindo dessa teoria, Ampère previu e observou um fenômeno que ainda não era conhecido até o momento: a força entre dois condutores percorridos por correntes elétricas.

De 1820 a 1822 Ampère realizou uma série de experimentos para deduzir uma expressão para a força entre fios percorridos por correntes. Ele utilizou de quatro casos de equilíbrio, ou seja, casos em que as forças eletrodinâmicas resultantes nos fios são nulas, conforme ele descreve em sua obra prima de 1826 *Théorie mathématique des phénomènes électro-dynamiques: uniquement déduite de l'expérience* [Teoria matemática dos fenômenos eletrodinâmicos: deduzida unicamente da experiência] [29].

O primeiro caso é o do equilíbrio entre fios ortogonais, que ele verificou que não interagiam. O segundo caso é o equilíbrio entre um fio reto e um fio sinuoso, no qual ele verificou que a força sobre os fios pode ser obtida somando-se as contribuições de segmentos dos fios. No terceiro caso, há o equilíbrio de um semicírculo percorrido por corrente elétrica, em que Ampère verificou que a força entre os fios não possuía componente tangencial a eles [21]. No quarto e último caso, chamado por ele de “lei da equivalência”, Ampère verificou uma relação entre equilíbrio entre segmentos de tamanhos proporcionais à distância entre eles. Por exemplo, Ampère verificou que, ao se triplicar o tamanho de dois fios, quando também era triplicada a distância entre eles a interação era a mesma de antes [21].

Em 1822, Ampère chegou a uma expressão para a força entre dois elementos infinitesimais de fio percorridos por correntes elétricas:

$$d^2F \propto \frac{i ds i' ds'}{r^2} \left(\cos \varepsilon - \frac{3}{2} \cos \theta \cos \theta' \right), \quad (2)$$

Nessa expressão, *i* e *i'* são as intensidades das correntes elétricas nos dois elementos de fio e *ds* e *ds'* são elementos de comprimento infinitesimais dos elementos de fio. Ampère chamava os produtos *i ds* de “elementos de corrente”. Além disso, *r* é a distância entre os centros dos elementos de corrente, ε é o ângulo entre as retas que contêm os elementos de fio, enquanto θ e θ' são os ângulos entre a reta que liga os elementos e as retas que os contêm. A Figura 3 fornece uma ilustração desses ângulos.

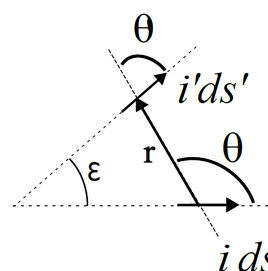


Figura 3: Força entre dois elementos de corrente. Fonte: autoria própria.

Do ponto de vista de Ampère, o termo “eletromagnetismo” estava agora defasado. Ele cunhou, então, um novo termo: “eletrodinâmica” [21]. Conforme ele mesmo explica:

“Desde que descobri a ação mútua entre dois condutores voltaicos, que evidentemente tem a mesma natureza que a ação de um condutor sobre uma barra magnetizada e que atua sem a assistência de qualquer ímã, o nome de ação eletromagnética, que utilizo aqui apenas para me conformar com o uso comum, já não seria conveniente para designar esse tipo de ação. Acredito que ela deva ser conhecida pelo nome de ação eletrodinâmica.” [30, p. 200].

Em outro trabalho, Ampère explica melhor a escolha do nome, cunhando também o termo “eletrostática”, usado até hoje com o mesmo sentido [21]. Segundo ele:

“A palavra eletromagnética, atribuída aos fenômenos produzidos pelo fio condutor da pilha de Volta, só poderia descrever convenientemente esses fenômenos na época em que eram conhecidos apenas os fenômenos descobertos por M. Oersted entre uma corrente elétrica e um ímã. Eu acredito que devo utilizar a denominação eletrodinâmica, a fim de combinar em uma única palavra todos esses fenômenos e, especialmente, para designar aqueles fenômenos que eu descobri entre dois condutores voltaicos. Esse nome expressa a propriedade característica desses fenômenos, ou seja, serem produzidos pela eletricidade em movimento; enquanto as atrações e repulsões conhecidas há muito tempo são os fenômenos eletrostáticos produzidos pela distribuição desigual de eletricidade em repouso nos corpos nos quais esses fenômenos são observados.” [31, p. 60]

A lei de força de Ampère – como essa expressão é muitas vezes chamada – trata da interação entre dois elementos infinitesimais de fio. No entanto, ela é capaz de descrever a interação entre dois fios finitos, já que, conforme verificado na segunda observação de Ampère, a força entre dois fios pode ser obtida somando-se as contribuições de todos os seus elementos de corrente. Sendo assim, é possível calcular a força entre fios finitos efetuando uma integração dupla na expressão acima. Uma diferença radical entre a percepção de Ampère e a de Oersted é que essa força proposta por Ampère é uma força de ação a distância, radial e instantânea, estando consoante com o programa newtoniano e se afastando da ideia de que é necessário um mediador para as ações elétricas. Em sua obra de 1873, James Maxwell (1831–1879) se refere a Ampère como “o Newton da eletricidade.” [32, p. 162]

Outro fato importante a destacar é uma diferença crucial entre a força proposta por Ampère e a forma

como era concebida a força eletrostática. Enquanto a força eletrostática partia da ideia de que os próprios fluidos elétricos (imponderáveis) interagiriam – os fluidos iguais se repeliriam enquanto os diferentes se atrairiam – a força de Ampère descrevia a interação direta entre elementos de fios (ponderáveis) percorridos por correntes elétricas, ou seja, Ampère não fala a respeito de efeitos que uma corrente elétrica exerceria na outra, apenas dos efeitos que um fio exerce no outro.

Ainda assim, a maior diferença está na concepção de Ampère dos fenômenos até então conhecidos apenas como magnéticos. Para Oersted a força entre dois ímãs era fruto da interação entre os polos magnéticos de ambos – denominada força magnética – enquanto isso, a força entre um ímã e um fio portador de corrente decorria da interação entre os polos magnéticos do ímã e o “conflito elétrico” – por isso denominada força eletromagnética. Enquanto isso, para Ampère, ambas as forças eram consequência da interação entre correntes elétricas, não sendo necessária a existência de uma característica como o polo magnético, hipótese que o levou a chamar as duas forças de eletrodinâmicas.

Por conta de todas essas radicais diferenças, o trabalho de Ampère não foi bem recebido pela maioria da comunidade científica. Mesmo que ele tenha usado de métodos experimentais para obter a lei, seus contemporâneos consideraram que sua validade nunca foi confirmada de forma satisfatória por Ampère, e que seu trabalho fala muito pouco dos métodos por ele utilizados. Um comentário feito por James Clerk Maxwell em seu *A Treatise of Electricity and Magnetism* [Tratado sobre Eletricidade e Magnetismo] fornece uma boa ilustração da situação:

“O método de Ampère, no entanto, embora tenha sido moldado em uma forma indutiva, não nos permite rastrear a formação das ideias que o guiaram. Mal podemos acreditar que Ampère tenha realmente descoberto a lei de ação por meio dos experimentos que ele descreve. Somos levados a suspeitar, como ele mesmo nos diz, que ele descobriu a lei por algum processo que não nos mostrou e que, quando posteriormente construiu uma demonstração perfeita, removeu todas as pistas da estrutura que havia erguido.” [32, p. 162–163]

Seja como for, o trabalho de Ampère foi importantíssimo para os desenvolvimentos posteriores relacionados a uma teoria das interações a distância entre objetos dotados de propriedades elétricas.

5. A Eletrodinâmica de Weber

As principais contribuições à formulação de uma teoria eletromagnética de ações a distância vieram da Alemanha, com os nomes de Theodor Fechner (1801–1887) e, principalmente, Wilhelm Weber (1804–1891).

5.1. As contribuições de Theodor Fechner

Gustav Theodor Fechner foi professor da Universidade de Leipzig. Entre seus muitos interesses científicos estava a teoria eletrodinâmica.

Fechner relacionou, assim como Ampère, a corrente elétrica ao movimento do hipotético fluido elétrico, porém tem uma concepção diferente de como ocorre a interação entre fios permeados por corrente elétrica. Ele defendia que a interação eletrodinâmica não tinha como protagonistas os fios em si, mas sim os fluidos elétricos em movimento no interior dos fios, de forma que a força eletrodinâmica agiria nos próprios fluidos, que, por sua vez, moveriam os fios [33].

Podemos observar que esta é uma semelhança entre a teoria de Fechner e as concepções vigentes sobre a eletrostática, segundo as quais a força agiria sobre os fluidos dentro dos corpos carregados, que, por sua vez, moveriam os corpos. De fato, a principal proposta de Fechner é a de que haveria uma lei universal da eletricidade, capaz de explicar tanto os fenômenos eletrostáticos quanto eletrodinâmicos.

Outro aspecto destacável de Fechner é o fato de que era um defensor de uma teoria atomística da eletricidade, sustentando que os fluidos elétricos seriam compostos por partículas indivisíveis fundamentais. Em seus trabalhos, Fechner retoma a expressão “massas elétricas” para se referir a tais partículas [34].

O tratamento proposto por Fechner para a força entre fios constatada por Ampère era a de uma força entre as massas elétricas presentes nesses condutores. Essa força possuía duas componentes: uma paralela aos fios e outra perpendicular a eles [33].

Consideremos, por exemplo, dois fios paralelos, e suponhamos que em um deles seja criada uma corrente elétrica que aumente com o tempo, enquanto que no outro fio não haja inicialmente corrente. De acordo com as observações de Faraday, já conhecidas na época em que Fechner desenvolveu suas ideias eletrodinâmicas, uma corrente induzida de mesmo sentido surgiria no segundo fio. Fechner explicou que as massas elétricas em movimento no primeiro fio interagem com as massas elétricas inicialmente em repouso no segundo fio por meio de uma força elétrica. Sua componente paralela seria responsável por mover as massas elétricas inicialmente em repouso no segundo, gerando assim a corrente induzida. Além disso, de acordo com as observações de Ampère, haveria uma força atrativa entre os dois fios, já que são agora dois fios portadores de corrente em mesmo sentido. De acordo com Fechner, a componente perpendicular da força elétrica seria a responsável por essa atração.

De 1840 até 1845, Fechner buscou desenvolver sua teoria e a discutiu com seus colegas. Contudo, uma vez que não tinha o conhecimento matemático suficiente para levá-la adiante e encontrar uma fórmula para a força universal da eletricidade, sua teoria permaneceu puramente qualitativa. No entanto, um de seus colegas

era Wilhelm Weber, que, na época, também se ocupava de estudar eletrodinâmica. Em 1845, Fechner publica seu trabalho como precursor à publicação de Weber do ano seguinte [35].

5.2. As hipóteses de Weber

Em 1846, Weber publicou sua obra “*Ueber ein allgemeines Grundgesetz der elektrischen Wirkung*” [Sobre Uma Lei Fundamental das Ações Elétricas] [36], dividida em duas partes. Na primeira parte, Weber apresenta uma série de experimentos detalhados e sofisticados para confirmar a lei de Ampère de uma forma que ele considerasse satisfatória e pudesse servir de referência para estudos futuros. Na segunda parte, ele se ocupa de desenvolver as ideias de Fechner, obtendo uma lei que ele chama de “lei universal da ação elétrica”.

Weber, porém, julga que tal unificação não constituiria a essência do progresso da eletrodinâmica: “[...]O progresso essencial para a eletrodinâmica em si não seria alcançado ao reduzir seus fundamentos aos fundamentos da eletrostática, por mais importante e interessante que tal redução possa ser em outros aspectos.” [37, p. 81]. Ainda assim, ele nota que, se fosse demonstrado que a teoria eletrodinâmica vigente não era capaz de descrever todos os fenômenos conhecidos, poderia ser frutífero buscar uma nova teoria mais geral, partindo da unificação entre eletrodinâmica e eletrostática:

“E nesse caso, poderia muito bem ocorrer que essa lei definitiva fosse alcançada ao buscar, primeiro, reduzir a lei de Ampère a uma mais geral, que abrangesse a eletrostática. Ou seja, seria possível que, sob diferentes condições, a lei dos restantes fenômenos eletrodinâmicos, que não podem ser diretamente atribuídos à lei de Ampère, emergisse das mesmas fontes das quais tanto a lei eletrostática quanto a lei de Ampère foram derivadas. E assim, a base da eletrodinâmica em sua maior generalidade seria representada, não isoladamente em si, mas como dependente da lei mais geral da eletricidade, englobando os fundamentos da eletrostática.” [37, p. 81]

De fato, existia, agora, uma nova classe de fenômenos que não eram descritos pela lei de Ampère, como Weber nota:

“Na verdade, existe uma classe de fenômenos eletrodinâmicos que, como assumimos ao longo deste tratado, dependem das ações recíprocas que as cargas elétricas exercem umas sobre as outras à distância, e que não estão incluídos na lei de Ampère e não podem ser explicados por ela, ou seja, os fenômenos de indução de Volta descobertos por Faraday. Isso se refere à geração de uma corrente

em um fio condutor através da influência de uma corrente à qual ele é aproximado, ou à geração de uma corrente em um fio condutor quando a intensidade da corrente em outro fio condutor próximo aumenta ou diminui.” [37, p. 81]

Conforme Weber nota, a incapacidade da lei de força de Ampère de descrever a indução de Volta – hoje, chamaríamos de indução de Faraday –, ou seja, a indução de uma corrente elétrica por meio da variação de outra corrente elétrica, se devia ao fato de esta lei tratar de correntes constantes e condutores em repouso, sendo, portanto, apenas um caso particular de uma lei geral ainda a ser descoberta.

“A lei de Ampère não deixa nada a desejar quando lida com as ações recíprocas de fios condutores cujas correntes possuem uma intensidade constante e que estão fixos em suas posições em relação uns aos outros. No entanto, assim que ocorrem mudanças na intensidade da corrente ou os fios condutores são movidos em relação uns aos outros, a lei de Ampère não oferece uma explicação completa e suficiente. Nesse caso, ela apenas informa as ações que ocorrem no elemento ponderável do fio, mas não as ações que ocorrem na eletricidade imponderável contida nele. Portanto, disso decorre que essa lei é válida apenas como uma lei particular e só pode ser temporariamente considerada como uma lei fundamental; ainda é necessária uma lei definitiva com validade verdadeiramente geral, aplicável a todos os fenômenos eletrodinâmicos, para substituí-la.” [37, p. 82]

Com isso, Weber justifica de forma prática a busca por descrever os fenômenos eletrodinâmicos partindo da eletrostática, e afirma que essa relação poderia permitir realizar previsões sobre a indução observada por Faraday:

“Portanto, se abordarmos a conexão entre os fenômenos eletrostáticos e eletrodinâmicos, não precisamos apenas nos deixar guiar pelo interesse científico geral para aprofundar as relações existentes entre as várias áreas da física. Além disso, podemos estabelecer um objetivo mais precisamente definido, relacionado à medição da indução de Volta por meio de uma lei mais geral da teoria elétrica pura. Essas medições da indução de Volta então, fazem parte das medições eletrodinâmicas que constituem o principal tema deste tratado e, quando estiverem completas, devem incluir também os fenômenos de indução de Volta. No entanto, é evidente que o estabelecimento dessas medições está profundamente

conectado com o estabelecimento das leis às quais os fenômenos em questão estão sujeitos, de forma que um não pode ser separado do outro.” [37, p. 82]

Após fazer essas considerações, Weber inicia seu desenvolvimento visando a obter tal lei universal. Para isso, ele parte de três pressupostos que, de acordo com ele, “[...] são, em parte, baseadas indiretamente em observações e, em parte, contidas diretamente na lei de Ampère, a qual é confirmada por todas as medições” [37, p. 82]. Ele prossegue: “O primeiro fato é que dois elementos de corrente dispostos em uma linha reta que coincide com suas direções se repelem ou se atraem, dependendo se a eletricidade flui através deles na mesma direção ou em direções opostas [respectivamente].” [37, p. 82]

O fato de que fios paralelos cujas correntes têm mesmo sentido se atraem, enquanto fios paralelos cujas correntes têm sentidos opostos se repelem, já era conhecido no tempo de Weber. Esse primeiro fato apontado por ele, no entanto, é relacionado não a fios paralelos, mas a dois elementos de corrente distintos colineares. Ao contrário de fios paralelos, ele afirmava que esses dois elementos colineares se repeliam caso as correntes tivessem o mesmo sentido e se atraíam caso as correntes tivessem sentidos opostos. Essa afirmação, um tanto menos conhecida, era obtida em decorrência da lei de Ampère apresentada na equação (2).

Voltemos à Lei de força de Ampère (2). Caso os dois elementos de corrente sejam colineares, o ângulo ε seria zero. Além disso, o vetor $\vec{r}$ que liga os dois segmentos tem a mesma direção que a linha na qual eles estão contidos, de modo que os ângulos entre eles e $\vec{r}$, θ e θ' , são também nulos. Desta forma, substituindo em (2) obtemos como resultado uma força proporcional a

$$-\frac{ii'dsds'}{2r^2} \quad (3)$$

Isso vale para correntes no mesmo sentido. Como para Ampère i e i' são ambos positivos, essa força tem sinal negativo – o que, para ele, indicava uma repulsão. Assim, os dois elementos vão se repelir. Caso as correntes fluam em sentidos opostos, teremos $\varepsilon = 180^\circ$, $\theta = 0^\circ$, e $\theta' = 180^\circ$. Nesse caso a força de Ampère tem o valor $+\frac{ii'dsds'}{2r^2}$. Essa força é positiva – o que, para Ampère, indicava uma atração –, os dois elementos vão se atrair. Assim, obtém-se o primeiro fato destacado por Weber.

Ele, então, prossegue: “O segundo fato é que dois elementos de corrente paralelos, que formam ângulos retos com uma linha que os conecta, se atraem ou se repelem, dependendo se a eletricidade flui através deles na mesma ou em direções opostas [respectivamente].” [37, p. 82]. Trata-se do fato já conhecido e mencionado anteriormente a respeito da atração e repulsão de fios paralelos. Esse fato, além de demonstrado experimentalmente por Ampère, é também afirmado por sua lei de força.

De fato, considere dois portadores de corrente paralelos, conectados por uma linha imaginária que faz um ângulo reto com suas direções. Nesse caso, o vetor que os liga está sobre esta linha imaginária, formando, também, um ângulo reto com ambos os portadores. Caso as duas correntes fluam no mesmo sentido, teremos $\varepsilon = 0^\circ$ e $\theta = \theta' = 90^\circ$. De acordo com a lei de força de Ampère, a força entre eles se reduz a

$$\frac{ii' ds ds'}{r^2}, \quad (4)$$

prevendo, portanto, uma atração quando as correntes têm mesmo sentido. No caso de correntes fluindo em sentidos opostos, ortogonais à linha reta que os une, temos $\varepsilon = 180^\circ$, $\theta = \theta'$, ambos iguais a 90° . De acordo com a lei de força de Ampère, a força entre eles se reduz a

$$\frac{-ii' ds ds'}{r^2}, \quad (5)$$

prevendo, portanto, uma repulsão quando as correntes fluem em sentidos opostos, estando os dois elementos ortogonais à linha reta que os une.

O terceiro fato de Weber, o único não explicado pela lei de Ampère, trata da indução de Volta (Faraday):

“O terceiro fato é que um elemento de corrente, que está alinhado com um elemento de fio em uma linha reta coincidindo com as direções de ambos os elementos, induz uma corrente no mesmo sentido ou sentido oposto no elemento de fio, dependendo se a intensidade de sua própria corrente diminui ou aumenta [respectivamente].” [37, p. 82]

A seguir, Weber faz a distinção entre a forma como ele considera esses fenômenos em relação à forma como Ampère os considerava:

“Os três fatos apresentados são considerados como elétricos, ou seja, consideramos as forças indicadas como ações de massas elétricas entre si. No entanto, a lei elétrica desta ação recíproca ainda é desconhecida. Mesmo que os dois primeiros fatos sejam compreendidos sob a lei de Ampère, ainda assim, mesmo à parte do terceiro fato, que não é compreendido por ela, a lei de Ampère em si, no sentido estrito, não é uma lei elétrica, pois não identifica nenhuma força elétrica que uma massa elétrica exerça sobre a outra. A lei de Ampère apenas fornece uma maneira de identificar uma força que atua sobre a massa ponderável do condutor. Ampère não tratou das forças elétricas que os fluidos elétricos que fluem através do condutor exercem uns sobre os outros, embora ele tenha expressado repetidamente a esperança de que fosse possível explicar o

efeito recíproco dos condutores ponderáveis identificados por sua lei, em termos das ações recíprocas dos fluidos elétricos neles contidos.” [37, p. 83]

Já nesse trecho é visível que Weber pretende adotar as hipóteses de Fechner, ou seja, atribuir a origem das forças eletrodinâmicas à interação entre as massas elétricas contidas nos fios portadores de corrente e não a uma interação entre os fios portadores de corrente em si. Além disso, apesar de Weber não dizer explicitamente o que seriam as massas elétricas, é provável que ele estivesse se referindo exatamente à mesma ideia de Coulomb: massa elétrica seria a quantidade de fluido elétrico dentro de um condutor. Já em outros trechos, Weber usa a expressão “partículas elétricas”, como, por exemplo: “Além da mudança na velocidade das partículas elétricas enquanto se movem de uma molécula do condutor ponderável para a próxima, também devemos considerar as mudanças de direção pelas quais as partículas em aproximação evitam umas às outras.” [37, p. 138]

Nesse trecho vemos claramente que a ideia à qual se refere a expressão “partícula elétrica” de Weber difere daquela à qual Coulomb se referia através de “molécula eletrizada”, já que Weber fala que as partículas elétricas se movem de uma molécula do condutor ponderável para outra. Para Coulomb, uma molécula eletrizada era um corpúsculo ponderável e permeado por fluido elétrico; para Weber, partículas elétricas são corpúsculos do próprio fluido, que têm a capacidade de se mover entre corpúsculos ponderáveis. Vemos, portanto, que a ideia de partícula elétrica de Weber provavelmente se refere à mesma ideia que Fechner se referia por massas elétricas.

Além disso, Weber adota a hipótese de Ampère sobre o fluxo dos fluidos elétricos: “Se agora direcionarmos nossa atenção aos fluidos elétricos nos dois elementos de corrente, temos neles quantidades iguais de eletricidade positiva e negativa, que, em cada elemento, estão em movimento de forma oposta.” [37, p. 83]. Weber assume que há no interior dos fios iguais quantidades de partículas elétricas positivas e negativas e usa a expressão “elementos de corrente” ou “portadores de corrente”, para se referir a elementos de fio nos quais as massas elétricas encontram-se em movimento. Com isso, deveria haver quatro pares de forças recíprocas entre dois portadores de corrente: dois repulsivos entre as massas elétricas iguais e dois atrativos entre as massas elétricas diferentes de ambos os portadores.

Considere o esquema apresentado na Figura 4, representando a disposição das cargas em dois portadores de corrente. Caso a lei de Coulomb se aplicasse a essa situação, Weber afirma que a resultante sobre as massas elétricas deveria ser nula, já que a distância r entre as cargas de um mesmo portador seria desprezível quando comparada com a distância d entre os portadores. Sendo assim, a atração sofrida por uma massa elétrica devido à massa de sinal oposto deveria ser igual à repulsão

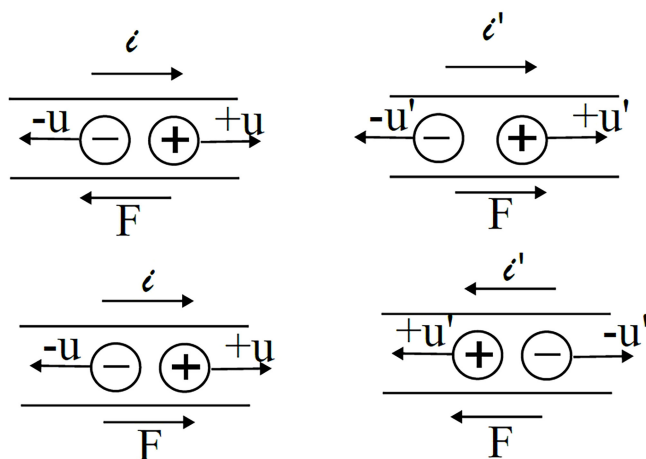


Figura 4: Portadores de corrente em um condutor, segundo Weber. Fonte: autoria própria.

sofrida por ela devido à massa de mesmo sinal. Sobre a aplicabilidade a lei eletrostática, ele então afirma:

“Se as leis eletrostáticas reconhecidas encontram uma aplicação incondicional ao nosso caso, não pode ser decidido a priori, porque essas leis se referem principalmente a massas elétricas que estão em equilíbrio e em repouso umas em relação às outras, enquanto nossas massas elétricas estão em movimento em relação umas às outras. Portanto, apenas a experiência pode decidir se essa lei eletrostática permite uma aplicação ampliada também ao nosso caso.” [37, p. 83]

Para se falar da força eletrostática como responsável pelo movimento dos portadores de corrente seria necessário falar sobre a forma como a força elétrica é transmitida aos portadores. Weber, assim como Fechner, afirmava que a força que age sobre os portadores ponderáveis deveria ser a resultante das forças agindo sobre as massas elétricas imponderáveis:

“Os dois primeiros fatos mencionados acima referem-se, é claro, principalmente a forças que atuam nos portadores de corrente ponderáveis; no entanto, podemos considerar essas forças como resultantes das forças que atuam nas massas elétricas contidas no portador ponderável. Estritamente falando, essa forma de considerar essas forças só é permitida quando essas massas elétricas estão ligadas ao seu portador ponderável comum de tal forma que não podem ser postas em movimento sem ele.” [37, p. 83]

Weber conclui que é necessário assumir que as massas elétricas não poderiam se mover de forma independente de seus portadores ponderáveis. Essa suposição sugere não só que quando o fio se move, a corrente se move

junto dele, mas também a recíproca: quando a corrente se move, o fio se move junto dela. A primeira afirmação não apresenta problemas, já que, de fato, quando um fio é movido, a corrente se move em conjunto, e, portanto, movem-se também as massas elétricas nele contidas. Já a segunda situação, podemos dividir em dois casos: o movimento das massas elétricas paralelo à direção do fio e o movimento das massas perpendicular à direção do fio. Caso as massas elétricas fossem se mover em direção perpendicular à do fio, então o fio deveria se mover junto, na mesma direção. Essa proposta de Weber é semelhante àquela das forças perpendiculares de Fechner. O problema está no caso do movimento das massas elétricas na mesma direção do fio, pois quando há corrente elétrica, as massas se moveriam, mesmo quando o fio permanece em repouso. Weber deveria, então, explicar de que forma o movimento da corrente elétrica é transmitido ao fio.

Para resolver essa questão, Weber considera uma propriedade das correntes elétricas: elas cessam a partir do momento que não há força eletromotriz.

“Embora as massas elétricas sejam suscetíveis a serem deslocadas na direção do fio condutor, elas de forma alguma são livremente móveis nessa direção; caso contrário, elas teriam que persistir no movimento uma vez que fosse transmitido a elas nessa direção, sem um novo impulso externo (ou seja, sem uma força eletromotriz contínua), o que não é o caso. Pois nenhuma corrente galvânica persiste por si só, mesmo com o circuito continuamente fechado. Ao invés disso, a intensidade de qualquer corrente em um determinado momento corresponde apenas à força eletromotriz existente, conforme determinado pela lei de Ohm; assim, a corrente para por si só assim que essa força desaparece.” [37, p. 84]

Com isso, Weber propõe que há, de fato, uma interação entre os portadores de corrente e as massas elétricas em seus movimentos paralelos, caso contrário, as massas elétricas continuariam em movimento mesmo sem força eletromotriz. Dessa forma, Weber aponta a interação das massas elétricas com o fio como responsáveis por fazer a corrente elétrica cessar.

Podemos entender melhor essa ideia de Weber por meio de uma analogia com a resistência do ar. Considere um corpo posto em queda livre na atmosfera terrestre. A partir do momento em que o corpo é solto, ele sofre a ação de duas forças: o peso e a resistência do ar, esta segunda sendo proporcional à velocidade do corpo. Num primeiro momento, a força peso supera a resistência do ar e o corpo acelera para baixo. Conforme sua velocidade aumenta, a resistência do ar também aumenta, diminuindo a aceleração do corpo até que ela seja nula, no momento em que a resistência do ar se iguala à força peso. Essa velocidade máxima do corpo

é chamada de velocidade terminal, e o corpo mantém essa velocidade até atingir o solo. Suponha agora, que, de alguma forma, a força peso cesse de existir. O corpo adquiriria uma aceleração para cima, de forma que, eventualmente, sua velocidade chegaria a zero.

Para Weber, algo semelhante ocorreria num fio percorrido por corrente elétrica. Ao conectar o fio à bateria, a corrente aumentaria, por conta da força eletromotriz, ao longo de um intervalo de tempo imensuravelmente curto, até um limite máximo, determinado pela resistência elétrica. Assim que cessasse a força eletromotriz, a corrente elétrica diminuiria, por conta da resistência elétrica, até cessar completamente, em um intervalo de tempo também muito pequeno.

Weber explica, portanto, que a interação entre as massas elétricas e os elementos de fio se dá por meio da resistência elétrica:

“A ação direta das forças paralelas ao fio condutor consiste, com certeza, simplesmente em um movimento das massas elétricas nessa direção; no entanto, o efeito desse movimento é uma resistência no portador ponderável, por meio da qual, em um tempo imensuravelmente curto, ele é neutralizado novamente. Através dessa resistência, durante o intervalo de tempo em que esse movimento é neutralizado, todas as forças que haviam anteriormente induzido esse movimento são transmitidas indiretamente aos corpos ponderáveis que exercem a resistência.” [37, p. 84]

Ao fazer isso, Weber não apenas soluciona um problema com sua teoria, mas também engloba nela a primeira lei de Ohm, apresentada em 1826 pelo alemão Georg Simon Ohm, que afirma que a intensidade da corrente elétrica é diretamente proporcional à força eletromotriz – ou seja, à diferença de potencial elétrico – e inversamente proporcional a uma característica do condutor chamada de resistência elétrica [38].

Por fim, resta discutir o efeito dessa interação nos próprios portadores de corrente, uma vez que, se eles fornecem uma resistência às massas elétricas, pela terceira lei de Newton deveria haver uma força das massas elétricas sobre os portadores de corrente, fazendo com que se movessem de forma paralela à corrente. Sobre isso, Weber prossegue:

“Por fim, uma vez que estamos lidando com os efeitos de forças que têm a capacidade de comunicar uma velocidade mensurável ao próprio portador ponderável, então, por outro lado, aqueles efeitos de [reação das] forças que perturbam apenas momentaneamente as massas imponderáveis podem ser desprezados com a mesma justificativa com a qual desprezamos a massa da eletricidade

em comparação com a massa do seu portador ponderável.” [37, p. 84]

Isto é, esses efeitos, além de momentâneos, poderiam ser considerados negligenciáveis. Uma vez solucionadas as questões relacionadas ao movimento paralelo das massas elétricas, Weber afirma, finalmente: “A partir disso, no entanto, conclui-se que a força que atua no portador da corrente age, como mencionado acima, como a resultante de todas as forças que atuam nas massas elétricas contidas no portador da corrente.” [37, p. 84]. Tem-se, portanto, assim como assumido por Fechner, duas componentes de força elétrica sobre as massas, uma paralela e outra perpendicular; a perpendicular sendo a responsável pela atração e repulsão de portadores de corrente em condutores diferentes e a paralela sendo responsável não só pela indução de Volta, mas também pela resistência elétrica.

5.3. Dependência da força em relação às velocidades dos objetos interagentes

Feitas essas hipóteses, Weber retorna ao caso prévio em que dois portadores de corrente interagem por meio de quatro pares de forças entre massas elétricas. Como mencionado anteriormente, caso fosse aplicável a lei de Coulomb, não haveria força resultante sobre essas massas.

Observe, no entanto, os dois primeiros fatos apontados por Weber e suas deduções da lei de força de Ampère: as forças entre os portadores de corrente sempre aumentam com a intensidade da corrente; segundo, a hipótese de que a força entre os portadores é a resultante das forças entre as massas elétricas neles contidas. Isso implica que as forças elétricas entre as massas elétricas também aumentam com a intensidade da corrente. Com isso, Weber conclui:

“Isso pressupõe, como mostrado pelos dois primeiros fatos mencionados acima, que o resultado daquelas quatro ações recíprocas das massas elétricas contidas nos dois elementos de corrente em questão, que, de acordo com as leis eletrostáticas, deveria ser zero, se afasta mais de zero quanto maior a velocidade com que as massas elétricas fluem através de ambos os elementos de corrente, ou seja, quanto maior as intensidades de corrente.” [37, p. 84]

Uma suposição extremamente importante é feita explicitamente nesse trecho: a intensidade da corrente elétrica estaria relacionada à velocidade com que as massas elétricas fluem. Assim, Weber atribui à velocidade das massas elétricas o fato de as forças entre portadores de corrente aumentarem com a intensidade da corrente.

Dentro das hipóteses levantadas, a lei de Coulomb de fato não encontraria aplicação incondicional, conforme Weber explica:

“Desta forma, segue que as leis eletrostáticas não têm aplicação incondicional em massas elétricas que estão em movimento em relação umas às outras. Pelo contrário, essas leis fornecem apenas um valor limite para as forças que essas massas reciprocamente exercem uma sobre a outra, e o verdadeiro valor dessas forças se aproxima mais do valor limite quanto menores forem os movimentos recíprocos das massas, enquanto se afasta mais do valor limite quanto maiores forem os movimentos recíprocos.” [37, p. 84]

Ou seja, a lei eletrostática fornecida por Coulomb oferece apenas um valor limite superior para quando as massas elétricas estão em repouso, e o verdadeiro valor da força elétrica diminui quanto maior forem as velocidades das mesmas. Isso implica que uma lei universal para a eletricidade deve depender dos movimentos entre as massas elétricas. Assim, Weber dá início a essa nova investigação:

“Para determinar corretamente a força exercida por duas massas elétricas uma sobre a outra, além dos valores fornecidos pelas leis eletrostáticas, deve ser adicionado um complemento dependente de seu movimento recíproco. Isso é necessário para obter uma determinação correta da força não apenas no caso de repouso e equilíbrio mútuo, mas universalmente, incluindo qualquer movimento arbitrário das duas massas em relação uma à outra. Esse complemento, que conferiria às leis eletrostáticas uma aplicabilidade mais geral do que possuem atualmente, será agora buscado.” [37, p. 84]

Weber começa buscando uma forma de satisfazer o primeiro fato: dois portadores de corrente colineares se repelem se tiverem mesmo sentido e se atraem se tiverem sentidos opostos. Ambos os casos são ilustrados na Figura 5, considerando-se desprezíveis as distâncias entre as cargas de um mesmo portador.

É importante observar que Weber se refere à velocidade relativa de uma forma diferente daquela atualmente utilizada, conforme vemos no trecho: “A velocidade relativa de duas massas elétricas pode, se r denota a distância entre as duas massas, ser expressada como dr/dt , e é positiva ou negativa, de acordo com se as duas massas estão se afastando ou se aproximando uma da outra (respectivamente)” [37, p. 85]. Em outros termos, o que Weber chama de velocidade relativa é a derivada temporal da distância entre os objetos interagentes.

A partir de agora, as massas do primeiro portador, cuja corrente é i , serão denotadas por $+e$ e $-e$, para a positiva e negativa, respectivamente. As velocidades das massas no primeiro portador serão chamadas de u , com a convenção de que o sentido positivo é da esquerda para

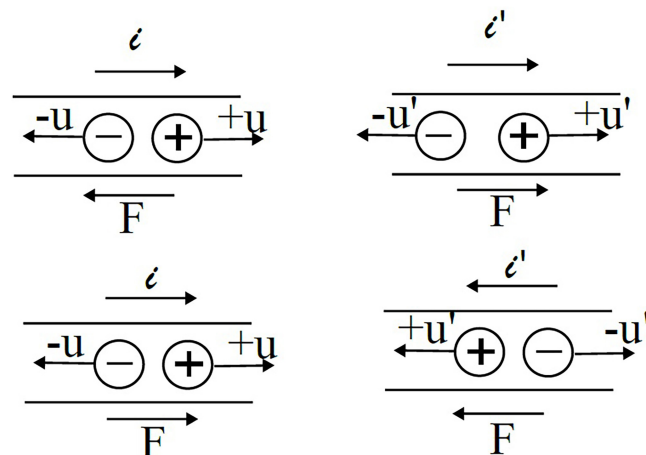


Figura 5: Velocidades relativas entre massas elétricas de portadores de corrente colineares de mesmo sentido (esquerda) e sentidos opostos (direita). Fonte: autoria própria.

a direita. Já para o segundo portador, de corrente i' , as respectivas grandezas serão denotadas por $+e'$, $-e'$ e u' .

No caso em que ambos têm mesmo sentido – caso de cima na Figura (5) – temos as seguintes “velocidades relativas” (conforme a denominação de Weber) para as massas de mesmo sinal:

$$\text{entre } +e \text{ e } +e': \quad \frac{dr}{dt} = u - u' \quad (6)$$

$$\text{entre } -e \text{ e } -e': \quad \frac{dr}{dt} = -u + u' = -(u - u'), \quad (7)$$

enquanto para as massas de sinais opostos:

$$\text{entre } +e \text{ e } -e': \quad \frac{dr}{dt} = \pm(u + u'). \quad (8)$$

Os dois casos de mesmo sinal podem ser condensados numa única sentença:

$$\left(\frac{dr}{dt}\right)^2 = (u - u')^2, \quad (9)$$

enquanto os casos de sinal oposto, por sua vez, podem ser condensados na expressão:

$$\left(\frac{dr}{dt}\right)^2 = (u + u')^2, \quad (10)$$

Note, portanto, que as velocidades relativas entre massas de sinais opostos são maiores do que entre as de mesmo sinal, já que as primeiras consistem na adição de velocidades enquanto as últimas consistem na diferença de velocidades. Como nesse caso os portadores devem se repelir, as interações elétricas entre as massas de sinal oposto, ou seja, atrativas, devem ser mais fracas do que entre as massas de mesmo sinal, ou seja, repulsivas, de forma que a resultante sobre os elementos de corrente deve ser atrativa. Weber conclui:

“O primeiro fato, ao qual a declaração acima se refere, permite ainda a adição da seguinte determinação mais precisa: duas massas elétricas (repulsivas ou atrativas, dependendo se são iguais ou diferentes) agem de forma mais fraca uma sobre a outra, quanto maior for o quadrado de sua velocidade relativa.” [37, p. 85]

Weber propõe que a forma matematicamente mais simples de representar esta conclusão é pela multiplicação da lei eletrostática pelo fator

$$1 - a^2 \left(\frac{dr}{dt} \right)^2, \quad (11)$$

que se reduz a 1 no caso em que as massas elétricas se encontram em repouso. Na expressão, o termo a^2 é uma constante a ser determinada.

Podemos observar que se espera que o termo de velocidade relativa na expressão deve ser menor do que 1, caso contrário a velocidade relativa poderia ser responsável por alterar o sentido da força. Isso implica a existência de uma velocidade relativa máxima para as massas elétricas, na qual o fator é nulo. Nesse caso limite, obtém-se:

$$a^2 \left(\frac{dr}{dt} \right)_{max}^2 = 1 \iff |a| = \frac{1}{\left| \frac{dr}{dt} \right|_{max}} \quad (12)$$

ou seja, o valor da constante deve ser o inverso da velocidade relativa máxima. Podemos intuir, com os conhecimentos atuais, que essa constante deve ter alguma relação com a velocidade da luz. De fato, tal desenvolvimento é realizado posteriormente por Weber, que encontra um valor para a constante como sendo equivalente a $\sqrt{2}c$. De todo modo, é interessante notar o surgimento, a partir de uma hipótese simples, de consequências profundas e que viriam a ser confirmadas posteriormente.

Ao se multiplicar a lei eletrostática pelo fator proposto por Weber, obtém-se que a força elétrica universal entre uma “massa elétrica” e e outra, e' , deve ter a forma

$$-\frac{ee'}{r^2} \left(1 - a^2 \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 \right). \quad (13)$$

Para cumprir a proposta buscada por Weber, ao se somarem todas as forças entre as massas elétricas, o resultado deve ser semelhante ao da lei de Ampère, uma vez que a força sobre o elemento de corrente deve ser a resultante das forças entre as massas elétricas. Substituindo as expressões para as velocidades relativas acima obtidas, obtém-se, somando as repulsões para as duas massas de mesmo sinal:

$$-2 \frac{ee'}{r^2} (1 - a^2(u - u')^2). \quad (14)$$

Já para as massas de sinais opostos, a soma das atrações é:

$$-2 \frac{ee'}{r^2} (1 - a^2(u + u')^2). \quad (15)$$

A resultante entre todas as massas elétricas é a soma das expressões acima:

$$\begin{aligned} & -2 \frac{ee'}{r^2} (1 - a^2(u - u')^2) - 2 \frac{ee'}{r^2} (1 - a^2(u + u')^2) \\ & = -8 \frac{ee'}{r^2} a^2 uu'. \end{aligned}$$

Essa é uma expressão muito próxima daquela obtida pela lei de força de Ampère, (2).

Na expressão de Weber, os sentidos das correntes são expressos pelos sinais das velocidades: sinais iguais correspondem ao mesmo sentido, mantendo a expressão negativa e indicando repulsão, conforme o esperado; sinais opostos correspondem a sentidos opostos de corrente, tornando a expressão positiva e indicando atração, novamente, como era esperado. Sobre esses resultados, Weber comenta:

“Dessa forma, segue que essa força, em completa concordância com a lei de Ampère, é diretamente proporcional à intensidade da corrente em ambos os elementos de corrente e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre os dois elementos de corrente.” [37, p. 86]

Ao compararmos as equações (2) e (16), vemos que, se $i = aeu$, elas serão idênticas, a menos de uma constante. Ao afirmar que seu resultado está em completa concordância com a lei de Ampère, Weber parece assumir implicitamente a validade dessa relação.

5.4. Dependência da força de Weber em relação às acelerações das massas elétricas

O fator desenvolvido por Weber até agora é capaz de explicar o primeiro fato por ele proposto. Contudo, o mesmo não vale para o segundo fato: que dois portadores de corrente paralelos, que formam um ângulo reto com a linha que os conecta, se atraem ou se repelem dependendo de se as correntes têm mesmo sentido ou sentidos opostos respectivamente.

Consideremos o caso de correntes de mesmo sentido. Duas massas elétricas se movem ao longo de fios paralelos, conforme indicado pela Figura 6.

A distância entre as massas elétricas dentro do portador é mínima no instante em que a linha que os conecta é perpendicular aos portadores. Antes desse instante, a distância diminuía, a velocidade relativa – no sentido weberiano – sendo negativa; já após esse instante, a distância passa a aumentar, a velocidade relativa sendo positiva. Com isso, observa-se que a velocidade relativa exatamente no instante descrito pelo segundo fato é nula,

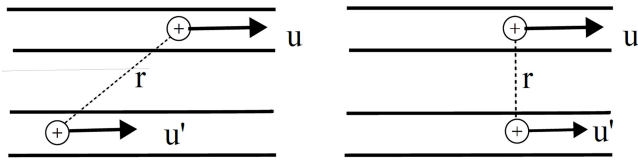


Figura 6: Variação da distância relativa entre as massas elétricas de correntes de mesmo sentido em fios paralelos entre si. Fonte: autoria própria.

e, assim sendo, a força desenvolvida anteriormente se reduz à lei eletrostática. Torna-se necessário, pois, fazer mais alguma modificação ao que foi encontrado até o momento. Weber observa o seguinte:

“É facilmente comprovado, no entanto, que para essa segunda classe de casos, onde o valor da velocidade relativa dr/dt desaparece, o valor da aceleração relativa $\frac{d^2r}{dt^2}$ se destaca ainda mais significativamente, enquanto para a primeira classe, onde o último valor $\frac{d^2r}{dt^2}$ desaparece, o primeiro $\frac{dr}{dt}$ se destaca ainda mais significativamente” [37, p. 87].

Em outras palavras, é nesse instante, no qual a velocidade relativa é nula, que a aceleração relativa – analogamente, denotando a derivada temporal segunda da distância entre os objetos que interagem – é responsável por desviar a força elétrica da força eletrostática. Weber propõe, portanto, uma modificação no termo obtido anteriormente, passando a incluir um termo dependente da aceleração relativa entre as massas elétricas

$$\left(1 - a^2 \left(\frac{dr}{dt}\right)^2 + b^2 \frac{d^2r}{dt^2}\right). \quad (16)$$

com a constante b a determinar. A expressão para a força elétrica passa a ser, portanto:

$$-\frac{ee'}{r^2} \left(1 - a^2 \left(\frac{dr}{dt}\right)^2 + b^2 \frac{d^2r}{dt^2}\right). \quad (17)$$

Para o caso particular ilustrado acima, é possível encontrar uma expressão simples para a aceleração relativa – tal como designada por Weber. Seja R a distância entre os dois elementos de corrente. Em um intervalo de tempo t , as massas elétricas se distanciam de uma distância $(u - u')t$. A distância entre as massas será dada, portanto, por

$$r^2 = R^2 + (u - u')^2 t^2. \quad (18)$$

Derivando implicitamente a expressão em função do tempo, e considerando que as velocidades das massas são constantes, obtém-se

$$\frac{dr}{dt} = \frac{(u - u')^2}{r} t. \quad (19)$$

Tomando-se, novamente, a derivada implícita da expressão em função do tempo, encontra-se

$$\frac{d^2r}{dt^2} = \frac{(u - u')^2}{r} \left(1 - \frac{t}{r} \frac{dr}{dt}\right). \quad (20)$$

Para se obter a expressão relativa à interação entre massas elétricas que se movem em sentidos opostos, basta alterar o sinal de u para $-u$ em (20), obtendo-se,

$$\frac{d^2r}{dt^2} = \frac{(u + u')^2}{r} \left(1 - \frac{t}{r} \frac{dr}{dt}\right). \quad (21)$$

No caso em que a velocidade relativa é nula, temos simplesmente

$$\frac{d^2r}{dt^2} = \frac{(u - u')^2}{r}. \quad (22)$$

É possível, agora, proceder de forma análoga ao caso anterior, calculando a soma das forças entre as massas iguais e as massas diferentes. A partir de (20), a soma das forças entre as massas elétricas iguais, e que, portanto, se movem no mesmo sentido, é

$$-2 \frac{ee'}{r^2} \left(1 + \frac{b}{r} (u - u')^2\right), \quad (23)$$

enquanto a soma para as massas elétricas diferentes, que, portanto, se movem em sentidos opostos, é

$$-2 \frac{ee'}{r^2} \left(1 + \frac{b}{r} (u + u')^2\right). \quad (24)$$

A resultante entre todas as massas elétricas é obtida então como a soma das duas equações anteriores, (23) e (24), fornecendo, no momento em que $\frac{dr}{dt} = 0$:

$$-2 \frac{ee'}{r^2} \frac{b}{r} ((u + u')^2 - (u - u')^2). \quad (25)$$

Expandindo e simplificando os termos, obtém-se, finalmente, que a força entre os portadores de corrente deve ser

$$8 \frac{ee' b}{r^2} \frac{1}{r} uu'. \quad (26)$$

Assim como no caso anterior, os sinais das velocidades indicam os sentidos das correntes: sentidos iguais de corrente correspondem a sinais iguais das velocidades, mantendo a expressão positiva e indicando, conforme esperado, uma atração; sentidos opostos de corrente correspondem a sinais opostos das velocidades, tornando a expressão negativa e indicando, conforme esperado, uma repulsão.

Weber observa que a expressão obtida pela lei de Ampère (2) para o caso de fios paralelos, $\frac{ii' ds ds'}{r^2}$, é, em módulo, precisamente o dobro do resultado obtido para fios colineares:

$$-\frac{ii' ds ds'}{2r^2}. \quad (27)$$

Ele imaginava obter uma expressão generalizada da Lei de de força de Ampère. Desta forma, para que as expressões obtidas a partir de sua lei nos dois casos analisados mantivessem a mesma proporção obtida pela lei de Ampère, era necessário que as constantes b e a estivessem relacionadas por

$$b = 2ra^2. \quad (28)$$

Substituindo esse valor encontrado para b na expressão para a força elétrica universal (17), obtém-se, por fim,

$$-\frac{ee'}{r^2} \left(1 - a^2 \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 + 2ra^2 \frac{d^2r}{dt^2} \right). \quad (29)$$

Essa fórmula já é capaz, por si só, de descrever o primeiro e o segundo caso, assim como o caso eletrostático. Logo, pode-se dizer que, com a obtenção de tal expressão, teria sido feita a unificação entre a eletrostática de Coulomb e a eletrodinâmica de Ampère, com a expressão da lei de força de Ampère sendo apenas um caso particular dessa lei mais geral. Para garantir que essa nova força desenvolvida por Weber seria capaz de explicar todos os fenômenos elétricos conhecidos até o momento de sua criação, bastaria apenas investigar sua capacidade de descrever a indução de Volta observada por Faraday.

5.5. O problema da indução de corrente

O terceiro fato apontado por Weber dizia respeito ao fenômeno da indução de corrente. Weber considerava dois elementos de fio colineares, com a diferença de que no interior do primeiro as massas elétricas encontram-se em movimento – portanto, há corrente – enquanto no interior do segundo as massas elétricas encontram-se em repouso. Os experimentos de Faraday demonstraram que, com o aumento da corrente elétrica no portador de corrente, surge uma corrente induzida no elemento de fio no sentido oposto, ao passo que com a diminuição da corrente no portador há indução de corrente no elemento de fio, no mesmo sentido da corrente original.

Diferentemente dos anteriores, o terceiro fato apontado por Weber não encontra explicação na lei de força de Ampère. Weber explica:

“O terceiro fato mencionado acima é, em última análise, baseado, ao contrário dos dois anteriores, em forças que agem diretamente nas massas elétricas em si e as movem no seu portador, buscando separar massas diferentes; isto é, em forças eletromotrizes, que são exercidas por massas elétricas em movimento dentro de um condutor galvânico sobre a eletricidade em repouso.” [37, p. 89]

Em resumo, enquanto os outros dois fatos podem ser reduzidos ao efeito das forças agindo sobre os portadores

de corrente ponderáveis, conforme é feito na lei de força de Ampère, este terceiro fato é baseado nas forças que agem diretamente nas massas elétricas dentro de seus portadores.

Outra diferença entre este caso e os anteriores é que, enquanto nas outras situações as forças surgem da interação entre massas elétricas em movimento, agora a força surge da interação entre massas elétricas em movimento e massas elétricas em repouso, de tal modo que as primeiras põem as segundas em movimento.

Conforme o trecho acima, Weber supõe a existência de forças que buscam separar as massas diferentes, ou seja, as positivas das negativas, e chama tais forças de eletromotrizes. Apesar de tratar-se do mesmo nome utilizado por Volta e outros autores, há uma diferença significativa na percepção de Weber sobre a origem da força eletromotriz. Enquanto para Volta a força eletromotriz era algo fornecido pela pilha para mover fluidos elétricos [39], para Weber essa força é resultado da interação entre as próprias massas elétricas dentro do condutor. Weber propunha, portanto, uma definição mais geral de força eletromotriz.

Weber nota que o surgimento de forças eletromotrizes nas massas em repouso não pode se dever à interação eletrostática, pois, se fosse esse o caso, novamente, as resultantes nas massas elétricas seriam nulas. Assim, ele escreve:

“Entretanto, essas forças não são apenas não determinadas pela lei eletrostática, mas também não são determinadas pela lei eletrodinâmica de Ampère, pois esta última se relaciona apenas às forças transmitidas ao portador de corrente e a primeira, mesmo que aplicável, resultaria em um valor de força eletromotriz igual a 0. Portanto, essas forças constituem uma classe essencialmente nova, da qual a descoberta de Faraday nos trouxe o primeiro conhecimento.” [37, p. 89–90]

Para que haja uma separação entre as massas positivas e negativas, as forças agindo sobre eles devem, necessariamente, ser diferentes, conforme afirma Weber:

“Agora, a partir do fato de que uma corrente é produzida no elemento onde anteriormente não havia corrente, devemos concluir que outra força, diferente da que atua sobre a massa elétrica negativa, deve estar atuando sobre a massa elétrica positiva nesse elemento, na direção desta última, porque a massa elétrica negativa só pode adquirir esse movimento oposto por meio de tal diferença nas forças que atuam sobre ela, e é esse movimento oposto que essencialmente constitui a corrente que se manifesta. Expressamos, portanto, o fato inicialmente da seguinte maneira.” [37, p. 90]

Uma vez feitas essas considerações, Weber expressa o terceiro fato de outra forma:

“Assim, expressamos o fato inicialmente da seguinte maneira: A soma das duas forças exercidas pelas massas elétricas positiva e negativa no elemento de corrente sobre a massa positiva em repouso no elemento sem corrente, na direção deste último, é diferente da soma das duas forças que essas massas [positiva e negativa em movimento] exercem [de] dentro do elemento de corrente citado sobre a massa negativa em repouso no elemento sem corrente, na direção desta última; no entanto, a diferença das duas somas, ou seja, a própria força eletromotriz, depende da mudança de velocidade das duas massas elétricas no elemento de corrente dado e aumenta ou diminui e desaparece com essa mudança.” [37, p. 90]

Dito de outra forma, a força sofrida pela massa negativa em repouso, em decorrência do movimento das massas elétricas no interior do primeiro elemento, deve ser diferente da força sofrida pela massa positiva em repouso em decorrência do mesmo movimento. A diferença entre essas duas forças seria a força eletromotriz.

A força elétrica universal deveria diferir da força eletrostática por meio de termos dependentes dos movimentos das massas elétricas. Tais adições à lei eletrostática já haviam sido feitas a partir dos fatos anteriores. Weber conclui que deve ser possível explicar esse terceiro fato com os resultados já obtidos anteriormente:

“Portanto, somos levados por este terceiro fato, também, a acrescentar às forças elétricas determinadas pela lei eletrostática um suplemento dependente de seu movimento, e a questão é apenas se isso justifica exatamente o mesmo suplemento estabelecido com base nos dois primeiros fatos. Este terceiro fato, portanto, proporciona um critério para testar os resultados já obtidos e é especialmente adequado para sua rejeição ou sua confirmação mais sólida.” [37, p. 90]

O próximo passo é, portanto, estudar esse caso particular à luz da lei obtida até o momento. Para estudar o movimento relativo entre as massas elétricas em movimento e as massas elétricas em repouso, será adotado um sistema de coordenadas segundo a Figura 7.

Considerando as massas em repouso $+e'$ e $-e'$ como estando na origem e a velocidade absoluta das cargas no portador de corrente como u , a posição de uma carga positiva no elemento de fio à direita será

$$r = R + \int_0^t u dt', \quad (30)$$

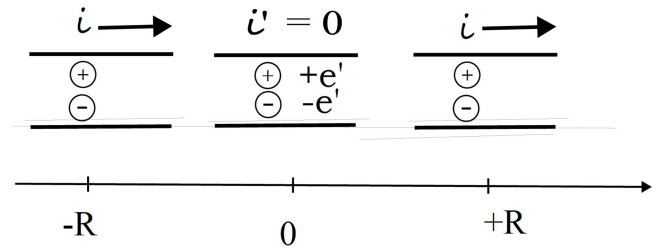


Figura 7: Sistema de coordenadas com o elemento de fio sem corrente estando na origem. A posição de um portador de corrente à esquerda assume valor negativo e à direita assume valor positivo. Fonte: autoria própria.

ao passo que a posição de uma carga positiva no elemento de fio à esquerda será

$$r = -R + \int_0^t u dt'. \quad (31)$$

A velocidade relativa, $\frac{dr}{dt}$, de ambas as massas é u , variável no tempo, enquanto a aceleração relativa será $\frac{du}{dt}$.

Por sua vez, as expressões para a posição da carga negativa podem ser obtidas trocando-se u por $-u$.

Denotando como u_0 e $\frac{du_0}{dt}$ os valores da velocidade relativa e da aceleração relativa no instante $t = 0$ e substituindo em (29), obtêm-se para a força entre as massas elétricas $+e'$ e $-e$:

$$-\frac{ee'}{r^2} \left(1 - a^2 u_0^2 + 2a^2 r \frac{du_0}{dt} \right), \quad (32)$$

e para a força entre $+e'$ e $-e$

$$\frac{ee'}{r^2} \left(1 - a^2 u_0^2 - 2a^2 r \frac{du_0}{dt} \right), \quad (33)$$

A força resultante sobre $+e'$ é, portanto,

$$-4 \frac{ee'}{r} a^2 \frac{du_0}{dt}. \quad (34)$$

Já a força entre $-e'$ e $+e$ é

$$\frac{ee'}{r^2} \left(1 - a^2 u_0^2 + 2a^2 r \frac{du_0}{dt} \right), \quad (35)$$

enquanto a força entre $-e'$ e $-e$ é

$$-\frac{ee'}{r^2} \left(1 - a^2 u_0^2 - 2a^2 r \frac{du_0}{dt} \right), \quad (36)$$

Assim, a resultante sobre $-e'$ é

$$4 \frac{ee'}{r} a^2 \frac{du_0}{dt}. \quad (37)$$

Weber continua: “a diferença entre elas [as somas das forças sobre as massas positiva e negativa] resulta na força eletromotriz, que busca separar as massas positivas

e negativas no elemento sem corrente.” [37, p. 91]. Tomando a diferença entre a força sobre a massa positiva e a força sobre a massa negativa obtém-se, finalmente, a força resultante

$$-8 \frac{ee'}{r} a^2 \frac{du_0}{dt}. \quad (38)$$

Em uma das seções posteriores, Weber escreve: “uma vez que de acordo com a página 94, $i = aeu$, portanto u é variável, e $ae \cdot du = di$ ” [37, p. 121]. Logo, a expressão acima pode ser escrita como

$$-8 \frac{ae'}{r} \frac{di}{dt}. \quad (39)$$

Apesar da grande discrepância entre a concepção moderna de força eletromotriz e a concepção de Weber, sua teoria prevê que a força eletromotriz seria proporcional à variação da corrente elétrica, em concordância com a teoria moderna.

Finalizemos essa exposição com uma observação a respeito da repercussão do trabalho de Weber. Para muitos físicos da época, a ideia da existência de uma força a distância radial que fosse dependente das velocidades e acelerações gerava muita resistência. James Clerk Maxwell fala explicitamente que esse fato o motivou a buscar uma teoria própria:

“As dificuldades mecânicas [...] que estão envolvidas na suposição de partículas agindo à distância com forças que dependem de suas velocidades são tais que me impedem de considerar essa teoria como definitiva, embora possa ter sido, e ainda possa ser, útil para conduzir à coordenação dos fenômenos. Portanto, preferi buscar uma explicação dos fatos em outra direção, supondo que eles são produzidos por ações que ocorrem no meio ambiente, fora dos corpos excitados, e tentando explicar a ação entre corpos distantes sem assumir a existência de forças agindo diretamente em distâncias sensíveis.” [40, p. 460].

Maxwell Naquela época, entre 1855 e 1865, Maxwell acreditava que a teoria de Weber não era compatível com a conservação da energia, mas estava errado. Em 1848 Weber mostrou que sua força era derivável de um potencial, e demonstrou novamente em 1871 que sua lei satisfazia à conservação da energia. Posteriormente Maxwell reconheceu no seu livro *A Treatise of Electricity and Magnetism* (ver o Capítulo 23 do Volume 2 da referência [32]), que a eletrodinâmica de Weber era, de fato, compatível com a lei de conservação de energia [36].

Em 1865, Maxwell publica seu trabalho *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field* [Uma Teoria Dinâmica do Campo Eletromagnético], onde são apresentadas pela primeira vez as equações hoje conhecidas com o seu nome, que relacionavam entidades propostas por ele, o campo elétrico e o campo magnético. Essa formulação se tornou a abordagem definitiva sobre o assunto.

6. Conclusão

Toda nossa descrição a respeito dos fenômenos eletromagnéticos se baseia na ideia de campos. No entanto, essa formulação é do século XIX e sua consolidação só ocorreu na segunda metade daquele século. Antes disso, e mesmo durante boa parte daquele período, se desenvolveu uma busca por uma teoria de interações a distância, inspiradas no paradigma gravitacional. Na terceira década dos anos 1800, quando Oersted fez a descoberta dos efeitos magnéticos de um circuito elétrico, Ampère tentou generalizar a tradição eletrostática culminante em Coulomb para descrever as novas interações entre os fios portadores de eletricidade em termos de uma ação a distância. Duas décadas depois essa tentativa foi aprofundada por Wilhelm Weber, que visava, além disso, a incorporar em uma teoria completa de ações diretas entre elementos materiais eletricamente positivos e negativos a descrição dos processos de indução descobertos por Faraday.

Essa elaboração em direção a uma teoria geral para a descrição de interações eletromagnéticas como ações a distância foi acompanhada do aprofundamento da compreensão das origens dessas próprias interações a partir do esboço de construção de uma teoria da matéria. Vimos Coulomb inaugurar a expressão “massas elétricas” para descrever elementos materiais dotados de propriedades elétricas, em clara inspiração newtoniana. Vimos Ampère também lançar hipóteses sobre a natureza dos movimentos elétricos no interior dos materiais, chamando-os de correntes elétricas, inclusive atribuindo a pequenas correntes no interior dos ímãs a causa dos efeitos magnéticos a eles associados. Essa consideração foi muito importante para sua suposição sobre a existência de uma força entre condutores percorridos por correntes. Por fim, vimos Weber centrar sua formulação de uma teoria eletromagnética geral em termos dos movimentos relativos e das interações recíprocas entre unidades elétricas presentes no interior da matéria, uma concepção que caminharia até a atomização final da eletricidade, baseada na existência de cargas elétricas fundamentais, proposta por Hendrik Lorentz, já ao final do mesmo século.

Por último, vimos que a formulação eletromagnética de ações a distância proposta por Weber teve alguns sucessos teóricos, mas que a resistência que despertou em físicos como Maxwell contribuiu fortemente para que este último, na linha de pensamento semeada por Faraday, desenvolvesse sua própria teoria, baseada em entidades hoje chamadas campos eletromagnéticos, que viria a superar as concepções vinculadas à ação direta a distância entre elementos de carga.

Disponibilidade de Dados

Este estudo não gerou nem analisou dados passíveis de compartilhamento.

Referências

- [1] A.K.T. Assis e J.P.M.C. Chaib, *Eletrodinâmica de Ampère: Análise do significado e da evolução da força de Ampère, juntamente com a tradução comentada de sua principal obra sobre eletrodinâmica* (Editora Unicamp, Campinas, 2011).
- [2] A.K.T. Assis, *Os Fundamentos Experimentais e Históricos da Eletricidade* (Apeiron, Montreal, 2010).
- [3] A.K.T. Assis, *Eletrodinâmica de Weber: Teoria, Aplicações e Exercícios* (Editora Unicamp, Campinas, 2015).
- [4] A.K.T. Assis, *Os Fundamentos Experimentais e Históricos da Eletricidade* (Apeiron, Montreal, 2018).
- [5] A.K.T. Assis, *Tradução Comentada das Principais Obras de Coulomb sobre Eletricidade e Magnetismo* (Apeiron, Montreal, 2022).
- [6] J.P.M.C. Chaib, *Physicae Organum* **4**, 59 (2018).
- [7] J.P.M.C. Chaib e F.M.S. Lima, *Annales de la Fondation Louis de Broglie* **45**, 19 (2020).
- [8] C.P. Magnaghi e A.K.T. Assis, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **25**, 118 (2008).
- [9] I. Newton, *Original letter from Isaac Newton to Richard Bentley*, disponível em: <https://www.newtonproject.ox.ac.uk/view/texts/normalized/THEM00258>.
- [10] L.C. Soares, *Revista Brasileira de História da Ciência* **2**, 82 (2009).
- [11] C.A. Coulomb, *Mémoires de l'Académie royale des Sciences de l'Institut de France* **88**, 569 (1785).
- [12] C.A. Coulomb, *Mémoires de l'Académie royale des Sciences de l'Institut de France* **88**, 578 (1785).
- [13] C.S. Gillmor, *Coulomb and the evolution of physics and engineering in eighteenth-century France* (Princeton University Press, Princeton, 1971).
- [14] C. Blondel e B. Wolff, *La proportionnalité de la force électrique aux charges: définition ou loi expérimentale?*, disponível em: <https://web.archive.org/web/20240925231640/https://www.ampere.cnrs.fr/histoire/parcours-historique/lois/proportionnalite>.
- [15] C.A. Coulomb, *Mémoires de l'Académie royale des Sciences* **8**, 229 (1787).
- [16] A.E. Woodruff, *Isis* **53**, 439 (1962).
- [17] C.A. Coulomb, *Mémoires de l'Académie royale des Sciences* **91**, 617 (1791).
- [18] H.C. Oersted, *Cadernos de História e Filosofia da Ciência* **10**, 115 (1986).
- [19] E. Bréhier, *Schelling* (Librairie Félix Alcan, Paris, 1912).
- [20] K. Reich, *Sudhoffs Archiv* **99**, 120 (2015).
- [21] A.K.T. Assis e J.P.M.C. Chaib, *Ampère's Electrodynamics* (Apeiron, Montreal, 2015).
- [22] J.P.M.C. Chaib e A.K.T. Assis, *Revista Brasileira de História da Ciência* **2**, 118 (2009).
- [23] T.H. Martin, *La foudre, l'électricité et la magnétisme chez les anciens* (Didier, Paris, 1866).
- [24] A.M. Ampère, *Annales de Chimie et de Physique* **20**, 398 (1822).
- [25] A.M. Ampère, *Journal de Physique, de Chimie, d'Histoire Naturelle et des Arts* **94**, 61 (1822).
- [26] A.M. Ampère, *Annales de Chimie et de Physique* **15**, 59 (1820).
- [27] A.M. Ampère, *Annales de Chimie et de Physique* **15**, 170 (1820).
- [28] A.M. Ampère, *carton 8, chemise 162* (Archives de l'Académie des Sciences de Paris, Paris, 1820).
- [29] A.M. Ampère, *Théorie des Phénomènes Électrodynamiques* (Mequignon-Marvis, Paris, 1826).
- [30] A.M. Ampère, *Mémoires de l'Académie des Sciences* **6** (1822).
- [31] A.M. Ampère, *Annales de Chimie et de Physique* **20**, 60 (1822).
- [32] J.C. Maxwell, *A Treatise of Electricity and Magnetism* (Clarendon Press, Oxford, 1873).
- [33] G.T. Fechner, em: *On the connection between Faraday's induction phenomena and Ampère's electrodynamic phenomena*, editado por A.K.T. Assis (Apeiron, Montreal, 2021).
- [34] C. Jungnickel e R. McCormmach, *Intellectual Mastery of Nature* (University of Chicago Press, Chicago, 1990).
- [35] T.M. Brown, *Historical Studies in the Physical Sciences* **1**, 61 (1969).
- [36] A.K.T. Assis, *Wilhelm Weber's Main Works on Electrodynamics Translated into English* (Apeiron, Montreal, 2024).
- [37] W.E. Weber, *Prince Jablonowski Society* **3**, 211 (2007).
- [38] T. Atherton, *Electronics and Power* **32**, 467 (1986).
- [39] R.N. Varney e L.H. Fisher, *American Journal of Physics* **48**, 405 (1980).
- [40] J.C. Maxwell, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* **155**, 459 (1865).