

Faraday e a indução unipolar

*André Koch Torres Assis
L. R. F. Guimarães*

Introdução

Michael Faraday (1791-1867) descobriu a indução eletromagnética em 1831, (FARADAY, 1952, §1 a §139; FARADAY, 2011). Em particular, observou que, se variamos a intensidade da corrente elétrica em um circuito primário, induzimos uma corrente em um circuito secundário que não está ligado a uma bateria. Também observou que se pode induzir uma corrente no circuito secundário ao criar um movimento relativo entre este circuito e o circuito primário (aproximando-os ou afastando-os em movimento translacional), mesmo que a intensidade da corrente no circuito primário permaneça constante.

Observou ainda que também poderia substituir o circuito primário com corrente constante por um ímã permanente. Ou seja, constatou que, ainda assim, seria induzida uma corrente no circuito secundário quando houvesse um movimento relativo entre este circuito e o ímã (movimento translacional). Sua interpretação para estes fenômenos era baseada na variação do fluxo magnético através do circuito secundário, fluxo este devido ao circuito primário

ou devido ao ímã. De acordo com Faraday, quando move-mos o circuito primário (ou o ímã) em relação à Terra com velocidade translacional constante, enquanto o circuito está conduzindo corrente constante, então suas linhas de campo magnético também vão deslocar-se em relação à Terra com a mesma velocidade do circuito (ou do ímã).

Em 1832, ele realizou uma experiência em que colocou o ímã em rotação e também obteve indução de corrente. Esta experiência está descrita principalmente nos parágrafos 217 a 230, juntamente com o parágrafo 3090 (datado de 1851), parágrafos estes traduzidos abaixo (FARADAY, 1952, §217 a §230, p. 297-298, e §3090, p. 762).

Apresenta-se, a seguir, a maneira mais simples de pensar nesta experiência e de ver o aparente paradoxo que surge com ela. Coloca-se um ímã cilíndrico na vertical com o polo sul apontando para baixo e o polo norte apontando para cima. Sobre o polo norte, coloca-se um disco condutor com raio igual ao do cilindro e com mesmo eixo de simetria vertical. Coloca-se um galvanômetro sobre o disco, com o galvanômetro ligado ao disco através de fios com contatos deslizantes ligados no centro do disco e em sua periferia.

Há quatro casos principais a considerar: (A) Quando tudo está parado em relação à Terra, o galvanômetro indica corrente nula. (B) Quando apenas o disco gira com velocidade angular constante ω em relação à Terra, o galvanômetro indica corrente constante diferente de zero. (C) Se deixarmos o disco e o galvanômetro com seus fios parados em relação à Terra, mas agora com o ímã girando com velocidade angular constante $-\omega$ em relação à Terra, tal que a velocidade angular relativa entre o disco e o ímã seja a

mesma que no caso anterior, o galvanômetro indica corrente nula. Isto está em contradição aparente com o resultado (B). (D) Finalmente, girando o disco junto com o ímã com velocidade angular constante ω em relação à Terra, o galvanômetro indica a mesma corrente que no caso (B). Isto está em contradição aparente com o caso (A), pois, embora não haja movimento relativo entre o disco e o ímã nos dois casos, a indicação do galvanômetro consegue distinguir entre estes dois casos. Esta foi a descoberta de Faraday.

Em seguida Faraday eliminou o disco e utilizou apenas o ímã, o galvanômetro e fios com contatos deslizantes para fazer a experiência, já que o próprio ímã que utilizou era condutor de corrente elétrica. Para explicar esta aparente falta de simetria entre os casos (A) e (D), ou entre os casos (B) e (C), Faraday supôs que as linhas de campo magnético não giram junto com o ímã quando se gira o ímã em relação à Terra. Isto fica evidente no §3090, traduzido abaixo. Ver ainda (WHITTAKER, 1973, p. 173). Desde então, têm surgido muitos trabalhos na literatura discutindo se as linhas de campo magnético giram ou não junto com o ímã; se há outras explicações que não sejam baseadas em linhas de campo magnético; que outros elementos têm de ser considerados além do disco e do ímã (ou seja, galvanômetro e fios de conexão; Terra; outros corpos) etc. A indução unipolar é um dos temas mais polêmicos e fascinantes de todo o eletromagnetismo clássico. Isto explica a importância da tradução para o português deste texto fundamental de Faraday.

A expressão “indução unipolar” com que o fenômeno ficou conhecido não é devida a Faraday, mas, sim, a W.

Weber. Ele a utilizou em dois artigos publicados em 1839 e 1841, nos quais descreve diversas experiências sobre o assunto (WEBER, 1839; WEBER, 1841).

As palavras entre colchetes na tradução são de nossa autoria, para facilitar a compreensão de alguns trechos.

Tradução do texto de Faraday

§217

Outro ponto que me esforcei por averiguar foi se era essencial ou não [para a geração de corrente elétrica] que a parte móvel do fio deveria, ao cortar as curvas magnéticas, passar por posições de maior ou menor força magnética [isto é, posições de maior ou menor intensidade do campo magnético]; ou se, cruzando sempre curvas de intensidade magnética igual, o simples movimento seria suficiente para a produção de corrente. A veracidade deste último ponto já foi comprovada em vários experimentos de indução eletromagnética terrestre. Dessa forma, a eletricidade desenvolvida a partir da placa de cobre (§149), as correntes produzidas no globo em rotação (§161, etc.) e aquelas passando através do fio em movimento (§171) são todas produzidas sob circunstâncias nas quais a força magnética [ou seja, a intensidade do campo magnético] só poderia ser a mesma durante todos os experimentos.

§218

Para provar a tese utilizando um ímã ordinário, um disco de cobre foi cimentado sobre a extremidade de um ímã cilíndrico, com um papel entre ambos; o ímã e o disco

foram girados juntos e fios condutores (ligados ao galvanômetro) foram postos em contato com a circunferência e a parte central do disco de cobre. A agulha do galvanômetro moveu-se como em casos anteriores, e a *direção* do movimento foi a *mesma*²² que teria resultado se somente o cobre estivesse girando e o ímã fosse fixo. Não houve, outrossim, nenhuma diferença aparente na deflexão [da agulha do galvanômetro]. Portanto, girar o ímã não causa nenhuma diferença nos resultados, pois um ímã em rotação ou fixo produz o mesmo efeito sobre o cobre em movimento.

§219

Um cilindro de cobre, vedado em uma das extremidades, foi, então, posto acima do ímã, cobrindo metade do ímã como uma tampa; ele foi firmemente fixado [ao ímã], e preveniu-se o contato do cilindro com o ímã em qualquer ponto por papel interposto. O arranjo foi posto a flutuar em um pote estreito de mercúrio, de tal maneira que a extremidade mais baixa do cilindro de cobre tocasse o metal fluido. Um fio do galvanômetro foi mergulhado no mercúrio e o outro dentro de uma pequena cavidade central da extremidade da tampa de cobre. Ao girar o ímã e seu cilindro incluso, uma abundante quantidade de eletricidade passou através do galvanômetro, e na mesma direção como se apenas o cilindro tivesse girado sozinho, estando o ímã imóvel. Os resultados, portanto, foram os mesmos que aqueles com o disco (§218).

22 Todos os grifos presentes nesta tradução são de responsabilidade do autor.

§220

Que o metal do ímã poderia ser substituído pelo cilindro móvel, pelo disco ou pelo fio, parecia uma consequência inevitável e, contudo, uma que exibiria os efeitos da indução eletromagnética de forma surpreendente. Destarte, em um ímã cilíndrico, foi feito um pequeno orifício no centro de cada extremidade para receber uma gota de mercúrio, e foi então colocado flutuando com o polo para cima no mesmo metal, contido em um recipiente estreito. Um fio do galvanômetro foi mergulhado no mercúrio do recipiente e o outro na gota contida no orifício na extremidade superior do eixo [do ímã]. O ímã foi, então, posto a girar por um pedaço de barbante enrolado nele e a agulha do galvanômetro imediatamente indicou uma forte corrente elétrica. Ao inverter o sentido da rotação, a corrente foi invertida. A direção da eletricidade foi a mesma, como se o cilindro de cobre (§219) ou um fio de cobre tivesse sido [posto a] girar ao redor do ímã fixo na mesma direção que aquela direção seguida pelo próprio ímã. Assim, torna-se evidente uma *singular independência* do magnetismo e da barra no qual este reside.

§221

No experimento acima, o mercúrio alcançou cerca de metade da altura do ímã; mas, quando essa quantidade foi aumentada até um oitavo de polegada do topo, ou diminuído até chegar igualmente tão próximo do fundo, ainda foram obtidos os mesmos efeitos e a *mesma direção* da corrente. Mas, nessas proporções extremas, os efeitos não apareceram tão fortes como no caso em que a superfície do

mercúrio estava próxima da metade [do ímã], ou entre esta metade e uma polegada de cada extremidade. O ímã tinha oito polegadas e meia de comprimento e três quartos de polegada de diâmetro.

§222

Com a inversão do ímã, e causando rotação na mesma direção, isto é, sempre como parafuso ou sempre no sentido inverso, então era produzida uma corrente elétrica contrária. Mas, quando o movimento do ímã era contínuo em uma direção constante em relação ao seu *próprio eixo*, então eletricidade do mesmo tipo foi coletada em ambos os polos, e eletricidade oposta no equador ou em sua vizinhança, ou nas partes correspondentes a ela. Se o ímã fosse mantido paralelamente ao eixo da Terra, com o seu polo não marcado²³ direcionado à Estrela Polar, e então, girado de forma que as partes correspondentes ao seu lado sul passassem do oeste para o leste em concordância com o movimento da Terra, então podia ser coletada eletricidade positiva nas extremidades do ímã e eletricidade negativa ao meio de seu corpo.

§223

Quando o galvanômetro era muito sensível, a simples rotação do ímã no ar, enquanto um dos fios do galvanômetro tocava a extremidade, e o outro [tocava] a região equatorial, era suficiente para produzir uma corrente elétrica e defletir a agulha [do galvanômetro].

23 N. T. No parágrafo 44, Faraday especificou que, “para evitar qualquer confusão em relação aos polos do ímã, designarei o polo apontando para o norte por polo marcado” (FARADAY, 1952 p. X). Logo, o polo não marcado mencionado aqui é aquele que aponta para o sul geográfico da Terra.

§224

Foram feitos então experimentos com um ímã similar, com o propósito de averiguar se poderia ocorrer algum retorno de corrente elétrica nas partes central ou axial [do ímã], tendo elas a mesma velocidade angular de rotação que as outras partes (§259); acreditando-se [inicialmente] que este efeito não poderia ocorrer.

§225

Foi feito um orifício na direção do eixo de um ímã cilíndrico, de sete polegadas de comprimento e três quartos de polegada de diâmetro, a partir de uma das extremidades, com um quarto de polegada no diâmetro e três polegadas de profundidade. Um cilindro de cobre, envolvido em papel e amalgamado²⁴ em ambas as extremidades, foi introduzido [no orifício] de tal modo a estar em contato metálico no fundo do orifício por um pouco de mercúrio, com o meio do ímã isolado nas laterais pelo papel; e projetando-se cerca de um quarto de polegada acima da extremidade do aço [ímã]. Um cálamo [caule oco] de pena foi colocado sobre a haste de cobre, que alcançou o papel e formou uma taça para receber mercúrio para fechar o circuito. Uma grande borda de papel foi também elevada ao redor daquela extremidade



Fig. 5

24 N. T. Amalgamated: liga (ou mistura) de mercúrio ao cobre.

do ímã e mercúrio foi nele colocado, que, no entanto, não tinha conexão metálica com o mercúrio no cálcamo de pena, exceto através do próprio ímã e da haste de cobre (*Placa III, Figura 5*). Os fios A e B do galvanômetro foram mergulhados nessas duas porções de mercúrio; portanto, qualquer corrente através deles poderia apenas descer pelo ímã em direção à sua região equatorial e, então, subir pela haste de cobre; ou vice-versa.

§226

Quando assim arrumado, [o sistema de ímã e cilindro de cobre] foi girado como parafuso; a extremidade marcada da agulha do galvanômetro foi para o oeste, indicando a ocorrência de uma corrente através do instrumento de A para B e, conseqüentemente, de B através do ímã e da haste de cobre para A (*Figura 5*).

§227

O ímã foi, então, colocado dentro de um recipiente com mercúrio (*Placa III, Figura 6*) como antes (§219), o fio A deixado em contato com o eixo do cobre, mas o fio B foi mergulhado no mercúrio do recipiente e, portanto, deixado em comunicação metálica com as partes equatoriais do ímã, ao invés de [ficar em contato com] sua extremidade polar. Ao girar o ímã como parafuso, a agulha do galvanômetro foi defletida na mesma direção que antes, porém de forma muito mais forte. Ainda assim, é evidente



que as partes do ímã desde o equador até o polo estavam fora do circuito elétrico.

§228

Então, o fio A foi conectado ao mercúrio que estava na extremidade do ímã; o fio B ainda permanecendo em contato com o mercúrio no recipiente (Placa III, Figura 7), de tal maneira que o eixo de cobre estivesse completamente fora do circuito. O ímã foi de novo girado como um parafuso e novamente causou a mesma deflexão da agulha, sendo a corrente tão forte quanto foi na última tentativa (§227), e muito mais forte que na primeira (§226).



§229

Dessa forma, é evidente que não há descarga de corrente no centro do ímã, pois a corrente, agora evoluindo livremente, flui de maneira ascendente pelo ímã; mas, na primeira experiência (§226), fluía de maneira descendente [pelo ímã]. De fato, na primeira experiência, só era eficiente a parte de metal móvel igual a um pequeno disco se estendendo da extremidade do fio B no mercúrio até o fio A, isto é, movendo-se com uma velocidade angular diferente do restante do circuito (§258); e, para esta porção, a direção da corrente é consistente com os outros resultados.

§230

Nos dois experimentos subsequentes [o segundo e o terceiro descritos acima, §§227 e 228, Figuras 6 e 7], as partes *laterais* do ímã ou da haste de cobre são aquelas que se

movem relativas às outras partes do circuito, isto é, aos fios do galvanômetro; e sendo mais extensas, intersectam mais curvas, ou movendo-se com velocidade maior, produzem o efeito maior. Para a parte condizente ao disco, a direção da corrente elétrica induzida é a mesma em todos os casos, a saber: da circunferência em direção ao centro.

§3090

Quando se diz que as *linhas de força* [linhas de campo magnético] cruzam um circuito condutor (§3087), deve-se considerar [este movimento] como causado pela *translação* de um ímã. A mera rotação de um ímã de barra ao redor de seu eixo não produz qualquer efeito de indução em circuitos exteriores a ele; pois, então, as condições acima descritas (§3088) não são satisfeitas. O sistema de potência [conjunto das linhas de campo magnético] ao redor do ímã não precisa ser considerado como necessariamente girando [junto] com o ímã, não mais do que os raios de luz que emanam do sol supõe-se girarem com o sol. O ímã pode até, em certos casos (§3097), ser considerado como girando entre suas próprias forças [linhas de campo magnético], e produzindo um efeito elétrico completo perceptível ao galvanômetro.

Agradecimentos: Os tradutores agradecem ao Dr. J. J. Lunazzi pelo apoio e estímulo.

Referências

FARADAY, M. Experimental Researches in Electricity. In: **Great Books of The Western World** (Encyclopaedia Britannica, Chicago), vol. 45, 1952.

_____. Pesquisas experimentais em eletricidade. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Vol. 28, p. 152-204 (2011). Tradução de A. K. T. Assis e L. F. Haruna.

WEBER, W. Unipolare Induktion. Resultate aus den Beobachtungen des magnetischen Vereins, 1839, III, p. 63-90. Artigo reproduzido em W. Weber's **Werke**, v. 2: Magnetismus (Springer, Berlin, 1892), editado por E. Riecke, p. 153-175.

_____. Unipolare Induktion. *Annalen der Physik und Chemie*, V. 52, p. 353-386 (1841). Artigo reproduzido em W. Weber's **Werke**, V. 2: Magnetismus (Springer, Berlin, 1892), editado por E. Riecke, p. 176-179.

WHITTAKER, E. A History of the Theories of Aether and Electricity. **The Classical Theories**, V. 1 (Humanities Press, New York, 1973).