

Cibelle Celestino Silva
Maria Elice Brzezinski Prestes
Organizadoras

Aprendendo ciência e sobre sua natureza:

abordagens históricas e filosóficas



São Carlos - 2013

MOTOR DE AMPÈRE: ELEMENTOS PARA UM ENSINO CRÍTICO DA FÍSICA

João Paulo Martins Castro Chaib*
André Koch Torres Assis**

Resumo: *Ultimamente tem sido publicada uma série de artigos tratando de experiências com ímãs fortemente imantados. Entre eles destaca-se o motor de Ampère, denominado também de motor homopolar ou unipolar. Este motor pode ser facilmente reproduzido em sala de aula. Ele apresenta um fenômeno de rotação contínua intrigante e sua história carrega um debate a respeito da origem de seu movimento que se estende até a atualidade. Porém, quando se encontra uma descrição da sua história nos artigos recentes, falta coerência com as fontes primárias. Desta maneira, por falta de informação, o debate epistemológico que vem se arrastando por detrás deste fenômeno acaba sendo ignorado, banalizado ou até mesmo distorcido. A história da ciência é uma abordagem necessária para compreender a física como construção humana, entendendo como ela se desenvolveu. Dentro desta perspectiva, descrevemos a explicação deste fenômeno dada por Ampère, a explicação alternativa apresentada por Faraday e a explicação moderna baseada no conceito de campo magnético. Mostramos os aspectos conflitantes entre estas explicações, enfatizando as controvérsias que existem no eletromagnetismo. Com isso esperamos fornecer elementos para um ensino crítico da física.*

Palavras-chave: *motor de Ampère; motor de Faraday; experiências em sala de aula; controvérsias*

AMPÈRE'S MOTOR: ELEMENTS FOR A CRITICAL TEACHING OF PHYSICS

Abstract: *Recently many papers have been published dealing with experiments involving highly magnetized magnets. Ampère's motor is one of these experiments, also called homopolar or unipolar motor. It can be easily reproduced in the classroom. It presents an intriguing phenomenon of continuous rotation and its history shows a debate about the origins of its motion which continues nowadays. But the description of this motor in modern papers lacks coherence with primary sources. Therefore, the epistemological debate related to this phenomenon is ignored, simplified or distorted. The history of science is necessary to comprehend physics as a human construction, understanding its development. Taken this into account, it is presented the explanation of this phenomenon as given by Ampère, the alternative explanation offered by Faraday and the modern explanation based upon the magnetic field*

* Universidade Católica de Brasília, Curso de Física. QS 07 Lote 01 – EPCT Águas Claras 72030-170 - Brasília, DF - Brasil, e-mail: chaib@ucb.br.

** Instituto de Física "Gleb Wataghin", Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, 13083-859 Campinas, SP, Brasil, e-mail: assis@ifi.unicamp.br, homepage: www.ifi.unicamp.br/~assis.

concept. We show the conflicting aspects of these explanations, emphasizing the controversies which exist in electromagnetism. In this way we hope to offer elements for a critical teaching of physics.

Key-words: Ampère's motor; Faraday's motor; classroom experiments; controversies

1. INTRODUÇÃO

Apesar de muitos autores apontarem a importância de se introduzir a história da ciência no ensino de física, existem muitos obstáculos que dificultam a realização deste ideal (Höttecke & Silva, 2011). Este trabalho apresenta uma experiência importante do eletromagnetismo que pode ser utilizada no nível de ensino médio ou de ensino superior. No caso de se utilizar esta experiência no ensino médio, devem-se evitar as fórmulas matemáticas apresentadas aqui, sendo que a demonstração e a discussão devem se concentrar nos aspectos conceituais do fenômeno. Já no ensino superior podem ser utilizadas as fórmulas apresentadas aqui para ilustrar as explicações alternativas deste fenômeno. Também destacamos que, apesar de importantes, nos concentraremos mais nos diferentes argumentos e interpretações que envolvem o fenômeno do que nas motivações filosóficas e epistemológicas que levaram Ampère e Faraday a assumirem diferentes pontos de partida para interpretar a experiência discutida aqui.

Desde que o ímã de neodímio – um ímã com uma magnetização muito grande comparada aos ímãs antigos – passou a ser comercializado em larga escala, os experimentos de eletromagnetismo em sala de aula se tornaram muito mais acessíveis (Featonby, 2005; 2006; Ireson & Twidle, 2008; Monteiro; Germano; Monteiro & Gaspar, 2010).

Entre os experimentos fáceis de serem realizados em sala, destaca-se o chamado motor homopolar ou unipolar, que tem sido amplamente divulgado nos últimos anos (Chiaverina, 2004; Schlichting & Ucke, 2004a; 2004b; Stewart, 2007; Featonby, 2007; Muñoz, 2007; Wong, 2009a; 2009b). Sua construção é tão fácil que ele tem sido chamado de o motor mais simples do mundo (Chiaverina, 2004; Schlichting & Ucke, 2004a).

Este experimento está ilustrado pela Figura 1. Vamos denominar este instrumento como motor de Ampère, já que Ampère foi o primeiro a prever este efeito e também o primeiro a realizar com sucesso esta experiência.

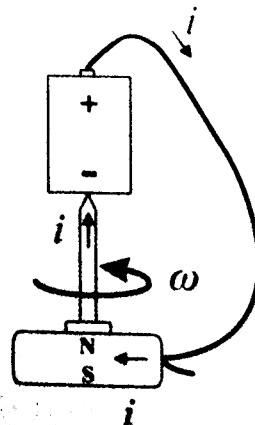


Fig. 1. Motor de Ampère. Quando flui uma corrente constante i pelo circuito, o ímã cilíndrico NS passa a girar juntamente com o parafuso ímãntado com uma velocidade angular constante ω em relação ao solo.

Para construir este motor¹ são necessários apenas quatro elementos: um ímã de neodímio, um parafuso de ferro, uma pilha e um fio de cobre comum. Em primeiro lugar, magnetiza-se um parafuso ou prego feitos de ferro ou de aço. Para isto basta aproximar a cabeça do parafuso de um ímã com intensa magnetização, como é o caso dos ímãs de neodímio. O parafuso fica então imantado e grudado no ímã. As extremidades de uma pilha comum são ferromagnéticas. Ao aproximar a ponta do parafuso magnetizado do terminal negativo de uma pilha, eles se atraem magneticamente. O parafuso e o ímã podem então ser suspensos verticalmente ao levantarmos a pilha com uma de nossas mãos, com a ponta do parafuso presa à parte inferior da pilha e com o ímã preso abaixo da cabeça do parafuso. Ou seja, seguramos apenas a pilha com uma de nossas mãos, o parafuso e o ímã ficam suspensos no ar presos à parte inferior da pilha. A atração gravitacional terrestre é contrabalançada pela atração magnética entre a extremidade inferior da pilha e a ponta do parafuso. Com isto acaba havendo um atrito muito pequeno entre o parafuso e a pilha. Por fim, fecha-se o circuito com um fio condutor de cobre que encosta no polo positivo da pilha e na lateral do ímã. Isto pode ser feito segurando a pilha no ar com uma mão, enquanto que o dedo indicador desta mão prende uma extremidade desencapada do fio na extremidade positiva da pilha, com a outra mão mantendo a outra extremidade desencapada do fio em contato deslizante com a borda do ímã. Quando isto ocorre o conjunto ímã-parafuso começa a girar ao redor de seu eixo vertical com uma grande velocidade angular em relação ao laboratório. Esta velocidade cresce rapidamente, alcançando um valor constante devido ao atrito. O fenômeno não ocorre caso se encoste a extremidade do fio no centro da parte circular plana inferior do ímã.

2. A EXPLICAÇÃO MODERNA BASEADA NO CONCEITO DE CAMPO MAGNÉTICO

A explicação da origem do movimento do motor de Ampère tem sido alvo de controvérsias (Chiaverina, 2004; Schlichting & Ucke, 2004b; Stewart, 2007).

A explicação usual utiliza o campo magnético \vec{B} produzido pelo ímã. Este campo é essencialmente uniforme dentro do ímã, apontando paralelamente ao seu eixo de simetria. Este campo agiria sobre a corrente radial i fluindo da periferia para o centro do disco. Haveria uma força sobre o ímã atuando ortogonalmente à direção da corrente e também ortogonalmente ao campo magnético. Esta força $d\vec{F}$ é conhecida como força de Lorentz, sendo dada pela seguinte expressão:

$$d\vec{F} = i d\vec{\ell} \times \vec{B} .$$

Nesta expressão a força atua sobre o elemento de corrente $i d\vec{\ell}$, com a direção da força sendo dada pela regra da mão direita, Figura 2 (Chiaverina, 2004; Schlichting & Ucke, 2004b; Stewart, 2007; Monteiro; Germano; Monteiro & Gaspar, 2010).

¹ Pode-se ver uma demonstração em vídeo deste motor na página <http://www.youtube.com/watch?v=KUDIKJ33Fvs> (acessada em 30/08/2013).

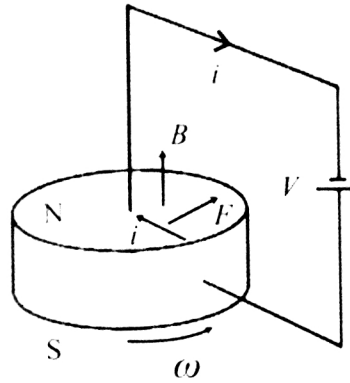


Fig. 2. Explicação do torque sobre o ímã utilizando a força de Lorentz e o campo magnético produzido pelo ímã.

Na Figura 2 temos que um ímã cilíndrico NS é ligado por fios condutores a uma bateria que gera uma tensão V entre seus terminais. Uma extremidade do fio parte da parte central superior do ímã, com sua outra extremidade ligada por contatos deslizantes à lateral do ímã, fazendo com que circule uma corrente i radialmente pelo ímã. O campo magnético B gerado pelo ímã atua sobre esta corrente exercendo uma força tangencial F que exerceria um torque sobre o ímã, fazendo com que ele gire com uma velocidade angular ω em relação ao solo.

De acordo com esta explicação usual, seria esta força tangencial exercida pelo campo magnético devido ao ímã e atuando sobre a corrente radial fluindo no ímã que exerceria um torque sobre o ímã fazendo-o girar ao redor de seu eixo.

3. A DESCOBERTA DESTES MOTORES

Para entender a descoberta do motor de Ampère, é importante falar do primeiro motor elétrico que se tem notícia e que foi apresentado por Michael Faraday (1791-1867) em setembro de 1821 (Faraday, 1821; 1952). Neste artigo, entre vários experimentos que realizou, o cientista inglês documentou pela primeira vez na história a rotação contínua do polo de um ímã ao redor de um fio condutor, assim como a rotação contínua da extremidade de um fio condutor ao redor de um ímã. Estes dois tipos do motor de Faraday aparecem na Figura 3 (Faraday, 1822).

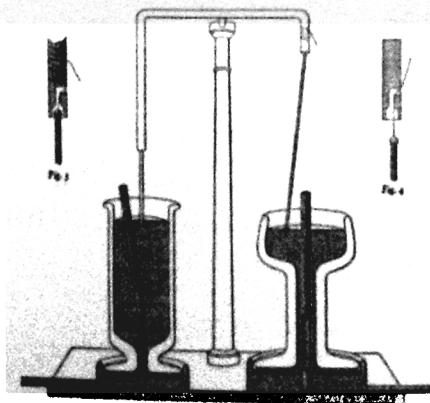


Fig. 3. Motores de Faraday, (Faraday, 1822, na prancha de figuras.).

Nesta Figura 3 temos duas experiências diferentes, sendo que nos dois casos temos copos cheios de mercúrio, os cilindros cinzas espessos representam ímãs, enquanto que os cilindros finos acima do mercúrio representam fios pelos quais passam correntes elétricas constantes. Apresentamos na Figura 4 um esquema destas duas experiências para facilitar sua compreensão.

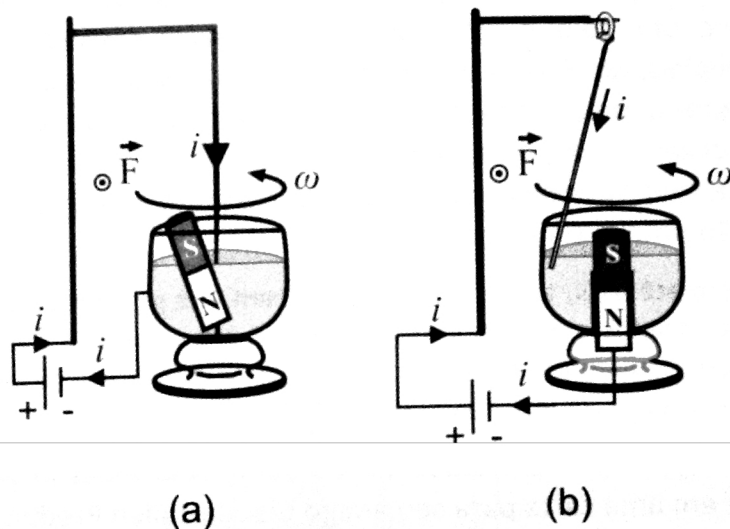


Fig. 4. Esquemas simplificados dos motores de Faraday. A situação (a) representa o lado esquerdo da Figura 3, enquanto que (b) representa o lado direito da Figura 3.

Na Figura 4 (a) temos que a extremidade superior do ímã gira ao redor do fio vertical parado no laboratório. A força sobre o polo Sul do ímã está saindo do papel nesta configuração. Já na Figura 4 (b) é a extremidade inferior do fio inclinado que gira ao redor do ímã vertical que está fixo em relação ao solo. A força sobre o fio está saindo do papel nesta configuração. Recentemente foram feitas algumas reproduções históricas e didáticas do motor de Faraday (Höttecke, 2000; Silva & Laburú, 2009).²

Faraday considerava como aspectos fundamentais da interação eletromagnética os fenômenos de revolução de um polo magnético ao redor de um longo fio com corrente, assim como a revolução da extremidade de um fio com corrente ao redor de um polo magnético. Em 1821, por exemplo, expressou-se da seguinte maneira (Faraday, 1821, p. 79; Faraday, 1952, p. 799): "O círculo descrito pelo fio ou pelo pólo um ao redor do outro pode ser considerado como um caso simples de movimento magnético."

Em uma carta a De la Rive de 12 de setembro de 1821, Faraday enfatizou este ponto da seguinte forma:

Considero as atrações e repulsões usuais da agulha magnética pelo fio conjuntivo como enganosas [*deceptions*], não sendo os movimentos atrações ou repulsões, nem o resultado de quaisquer forças atrativas ou repulsivas, mas o resultado de uma força no fio que, em vez de aproximar o polo da agulha

² Pode-se ver uma demonstração em vídeo destas experiências na página <http://www.youtube.com/watch?v=Myy9tPs7H58> (acessada em 30/08/2013).

ou de afastá-lo do fio, tenta fazer com que ele [o polo] gire ao redor dele [do fio] em um movimento circular interminável enquanto a bateria permanece atuando. Fui bem sucedido não apenas em mostrar a existência deste movimento teoricamente, mas [também] experimentalmente, e tenho sido capaz de fazer à vontade o fio [com corrente] girar ao redor de um polo magnético, ou um polo magnético [girar] ao redor do fio. A lei de revolução, para a qual podem ser reduzidos todos os outros movimentos da agulha e do fio, é simples e bonita. (Jones, 1870, p. 316)

Para Faraday as interações eletromagnéticas mais básicas ou elementares seriam estas ações giratórias entre um polo magnético e um fio com corrente. Estas ações seriam transversais ou tangenciais, isto é, não estariam ao longo da reta que une o polo magnético ao fio com corrente. Futuramente Faraday viria a desenvolver a ideia de linhas de força circulares ou tangenciais ao redor de um longo fio com corrente.

Faraday também tentou fazer com que tanto o ímã quanto o fio girassem ao redor de seus próprios eixos, mas não obteve sucesso:

Tendo tido sucesso até aqui, tentei fazer um fio e um ímã girarem ao redor de seus próprios eixos fazendo com que fosse evitada a rotação em um círculo ao redor deles, mas não fui capaz de obter as menores indicações de que isto ocorre; nem isto parece provável ao refletir sobre o assunto. (Faraday, 1821, p. 79; Faraday, 1952, p. 798)

Logo após a publicação dos resultados de Faraday, André-Marie Ampère (1775-1836) mencionou o seguinte em uma carta para seu amigo Claude-Julien Bredin:

Chegando aqui [em Paris], a metafísica preenchia a minha cabeça; mas, desde que foi publicada a memória do Sr. Faraday, eu só sonho com correntes elétricas. Esta memória contém fatos eletromagnéticos muito singulares, que confirmam perfeitamente a minha teoria, embora o autor procure combatê-la para substituí-la [por] uma que inventou. (Launay, 1936, pp. 576-577)

Diferente de Faraday, Ampère considera como fenômenos fundamentais ou elementares as forças de atração e repulsão entre dois elementos de corrente, sempre ocorrendo ao longo da reta que os une. Para Ampère os polos magnéticos não eram entidades reais, sendo que interpretava todos os fenômenos magnéticos, eletromagnéticos e eletrodinâmicos em termos da interação entre correntes elétricas. Ampère foi o primeiro a observar em outubro de 1820 forças e torques entre dois condutores com corrente, sem a presença de qualquer ímã (Ampère, 1820; Chaib & Assis, 2007). Para Ampère a interação entre entidades heterogêneas (como um ímã e uma corrente elétrica) deve ter uma composição "mais complicada" do que a interação entre entidades homogêneas (Launay, 1936, pp. 570-572). Em 1822, por exemplo, ele insiste neste ponto em uma carta a Auguste de la Rive:

Não é evidente que é na ação entre duas coisas de mesma natureza como os dois condutores e não naquela [ação] entre duas coisas heterogêneas como um condutor e um ímã que se deve procurar o fato primitivo? (Launay, 1936, p. 605; Blondel, 1982, p. 112)

Ele justificou este ponto de vista em sua obra principal ao criticar a teoria de Biot, embora seus pontos de vista também pudessem ser aplicados à teoria de Faraday, com as seguintes palavras:

Além disso, embora o Sr. Biot tenha denominado de força elementar àquela [força] cujo valor e direção ele determinou para o caso em que um elemento de fio condutor age sobre cada uma das partículas de um ímã, está claro que não se pode considerar como verdadeiramente

elementar, nem uma força que se manifesta na ação entre dois elementos que não são da mesma natureza, nem uma força que não age ao longo da linha reta que une os dois pontos entre os quais ela se exerce. (Ampère, 1826, pp. 108-109)

Desta maneira, entendia a interação magnética ou eletromagnética apenas como resultados mais complexos de uma interação eletrodinâmica entre condutores com corrente. Por isso, via o ímã como um conjunto de correntes microscópicas fechadas de maneira que “um circuito fechado infinitamente pequeno pode ser sempre substituído por um ímã muito pequeno [...]” (Ampère, 1887, p. 198).

Deste modo e ao contrário de Faraday, Ampère não via problemas na possibilidade da rotação de um ímã ao redor de seu eixo. Assim, à luz de sua teoria, Ampère foi o primeiro a prever a existência deste fenômeno. E também foi o primeiro a observá-lo experimentalmente. Na Figura 5 apresentamos a montagem original de Ampère (Ampère, 1822a).

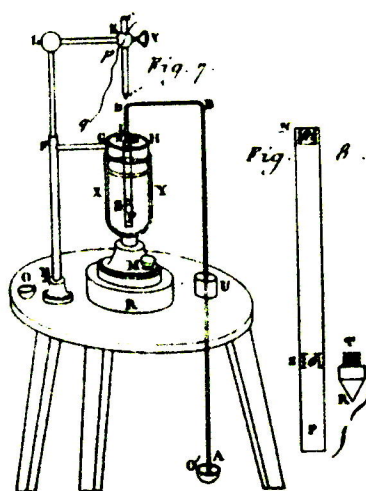


Fig. 5. Motor de Ampère original (Ampère, 1822a, na prancha de figuras).

Na Figura 6 temos um esquema simplificado deste motor (Blondel, 1982, p. 115).

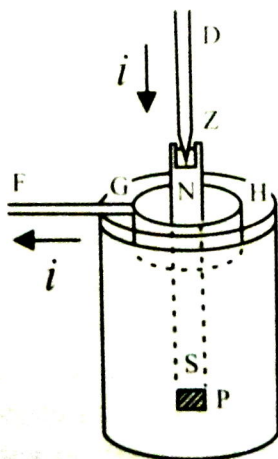


Fig. 6. Elementos principais do motor de Ampère (Blondel, 1982, p. 115).

O ímã cilíndrico NS flutua verticalmente no mercúrio com a ajuda de um contrapeso P na sua extremidade inferior. Na extremidade superior do ímã há uma cavidade Z preenchida com mercúrio. Uma corrente constante i desce verticalmente pelo condutor DZ , saindo lateralmente através de GF . Há um anel metálico GH flutuando no mercúrio. Nesta configuração o ímã gira ao redor do seu eixo.

Esta experiência foi realizada entre novembro e dezembro de 1821. Deste modo, Ampère foi o primeiro cientista a conseguir o efeito positivo da rotação de um ímã ao redor de seu eixo. Apresentou este resultado à Academia de Ciências de Paris em 7 de janeiro de 1822 (Ampère, 1822a; Ampère, 1822b; Ampère, 1885).

4. A EXPLICAÇÃO DE AMPÈRE

A concepção eletrodinâmica de Ampère era baseada em uma força que descrevia diretamente a interação entre os elementos de corrente ao longo da linha reta que os unia, sempre obedecendo à terceira lei de Newton na forma forte (Blondel, 1982; Assis, 1995; Hofmann, 1996; Bueno & Assis, 1998).

Para explicar o funcionamento de seu motor, Ampère considerou como essencial a interação entre a corrente microscópica do ímã (responsável por suas propriedades magnéticas) e a corrente macroscópica devida à bateria e fluindo externamente ao ímã.

Na Figura 7 apresentamos uma versão simplificada do motor de Ampère.

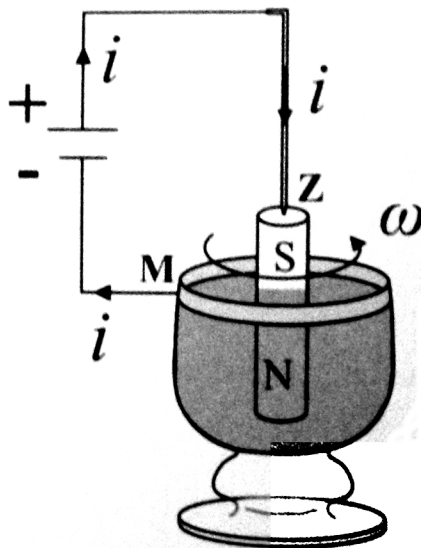


Fig. 7. Representação esquemática do motor de Ampère.

A essência da explicação de Ampère é apresentada na Figura 8 (Ampère, 1822a). O círculo interno $mn'Tn$ representa uma seção reta do ímã cilíndrico como vista de cima. A corrente i' ao longo do círculo nmn' representa a corrente interna ao ímã responsável por suas propriedades magnéticas. Ou seja, é a resultante das chamadas "correntes microscópicas" ou "correntes moleculares" de Ampère. A região entre os círculos interno e externo é preenchida com mercúrio. O círculo externo $Mcfc'$ representa o anel metálico flutuando no mercúrio ao redor do ímã. A corrente radial i ao longo do raio ZmM é a corrente elétrica macroscópica fluindo ao longo do circuito quando ele está ligado a uma bateria. Ela entra no ímã por sua extremidade superior, saindo radialmente do ímã para o mercúrio no qual o ímã flutua.

Existem correntes análogas saindo de Z e indo para todos os pontos da periferia do círculo cfc' . O principal aspecto a ser enfatizado é que a porção Zm desta corrente radial i passa dentro do ímã, enquanto que a porção mM flui no mercúrio externamente ao ímã.

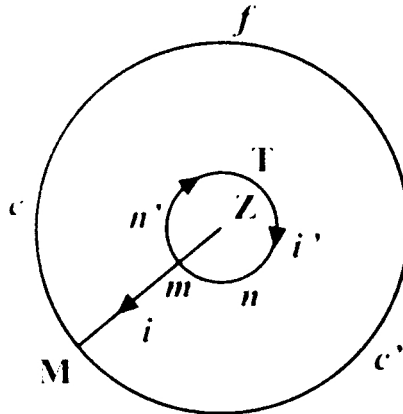


Fig. 8. A corrente macroscópica i saindo radialmente do ímã e interagindo com a corrente microscópica i' .

Palavras de Ampère com sua explicação desta experiência:

Seja ZM uma destas correntes, a porção Zm não age, de acordo com o que foi dito anteriormente, sobre as correntes elétricas do ímã; a porção mM atrai mn' e repele mn . Estas duas forças reunidas tendem a fazer o ímã girar ao redor dele mesmo no sentido $n'mn$. Forças semelhantes são exercidas simultaneamente sobre todos os pontos do ímã, [logo] ele gira ao redor de si mesmo indefinidamente. (Ampère 1822a, pp. 70-71; Ampère, 1822b, pp. 247-248; Ampère, 1885, pp. 201-202)

Na Figura 9 representamos estas forças indicadas por Ampère. Ou seja, as forças exercidas pela corrente macroscópica i fluindo no mercúrio de m para M atuando sobre as porções da corrente microscópica i' internas ao ímã, cuja resultante flui no sentido nmn' . A corrente externa em mM atrai a porção da corrente microscópica em mn' e repele a porção em mn . A resultante destas duas forças vai gerar um torque sobre o ímã fazendo com que ele gire ao redor de seu eixo no sentido $n'mn$.

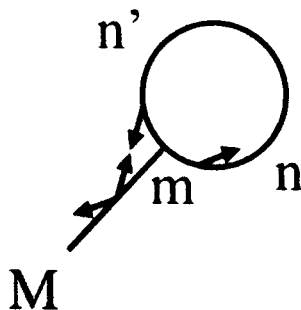


Fig. 9. As setas indicam as forças. A porção mM atrai $n'm$ e repele mn . Apresentamos também as forças de reação sobre mM .

Por ação e reação vem que as correntes moleculares do ímã vão exercer forças contrárias sobre as correntes macroscópicas que estão fluindo no mercúrio externamente ao ímã. Com isto o mercúrio tenderia a girar no sentido oposto à rotação do ímã de acordo com Ampère.

Pode-se perceber qualitativamente o sentido das interações representadas na Figura 9 utilizando a força de Ampère entre elementos de corrente. Para facilitar a compreensão dos

leitores modernos, esta força é apresentada aqui em linguagem vetorial e no Sistema Internacional de Unidades (Assis, 1995, p. 70; Bueno & Assis, 1998, p. 12):

$$d^2\vec{F}_{21}^A = -\frac{\mu_0}{4\pi} i_1 i_2 \frac{\hat{r}_{12}}{r_{12}^2} \left[2(\vec{d}\vec{\ell}_1 \cdot \vec{d}\vec{\ell}_2) - 3(\hat{r}_{12} \cdot \vec{d}\vec{\ell}_1)(\hat{r}_{12} \cdot \vec{d}\vec{\ell}_2) \right] = -d^2\vec{F}_{12}^A.$$

Nesta expressão $d^2\vec{F}_{21}^A$ é a força de Ampère exercida pelo elemento de corrente $i_2 d\vec{\ell}_2$ localizado em \vec{r}_2 atuando sobre o elemento de corrente $i_1 d\vec{\ell}_1$ localizado em \vec{r}_1 , a constante $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ kgmC}^{-2}$ é chamada de permeabilidade do vácuo, $r_{12} = |\vec{r}_1 - \vec{r}_2|$ é a distância entre os dois elementos de corrente, enquanto que $\hat{r}_{12} = (\vec{r}_1 - \vec{r}_2)/r_{12}$ é o vetor unitário que aponta de $i_2 d\vec{\ell}_2$ para $i_1 d\vec{\ell}_1$.

É importante salientar que além de satisfazer ao princípio de ação e reação, $d^2\vec{F}_{21} = -d^2\vec{F}_{12}$, esta força sempre aponta ao longo da reta que une os dois elementos de corrente, ou seja, está ao longo de \hat{r}_{12} . Diz-se então que ela satisfaz ao princípio de ação e reação na forma forte, como acontece com a força gravitacional ou com a força eletrostática entre duas cargas.

5. A EXPLICAÇÃO DE FARADAY

Embora os aparatos das Figuras 1 e 3 sejam conceitualmente diferentes, Faraday considerava que eles funcionavam devido aos mesmos princípios físicos.

Ampère escreveu uma carta a Faraday informando-o de sua descoberta, carta esta atualmente perdida (Blondel, 1982, p. 116). Faraday respondeu em 2 de fevereiro de 1822. Ele não aceitava os princípios básicos da eletrodinâmica de Ampère. O modelo de Faraday se baseava na interação revolutiva ou giratória entre polo e corrente. Baseou sua explicação do motor de Ampère em sua própria experiência na qual a extremidade de um fio girava ao redor de um ímã, como representado no lado direito da Figura 3. Apresentamos um esquema simplificado deste motor de Faraday na Figura 4 (b).

Para explicar seu próprio motor Faraday considerava que o polo do ímã gerava uma força transversal ou tangencial \vec{F} sobre o fio com corrente. No caso da Figura 4 (b) esta força exercida pelo polo Sul sobre a corrente i que estava descendo pelo fio à esquerda do ímã estaria saindo do papel.

Faraday utilizou o mesmo modelo teórico para explicar o funcionamento do motor de Ampère. Só que agora passou a supor que o polo magnético agiria sobre correntes fluindo internamente ao ímã. Descreveu esta explicação em uma carta para Ampère datada de 2 de fevereiro de 1822. Na Figura 10 vem o desenho original de Faraday (Launay, 1943, p. 910):

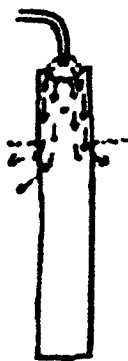


Fig. 10. Ilustração de Faraday para explicar o motor de Ampère, (Launay, 1943, p. 910).

Explicação dada por Faraday, nossas palavras entre colchetes:

A rotação do ímã [ao redor do seu eixo] para mim parece acontecer em consequência das diferentes partículas das quais ele é composto serem colocadas no mesmo estado pela passagem da corrente de eletricidade assim como [o estado em que é colocado] o fio de comunicação entre os polos voltaicos, e a posição relativa do polo magnético em relação a elas [isto é, em relação a estas partículas]. Assim as pequenas setas podem representar o progresso da eletricidade. Então qualquer linha de partículas paralela a elas – exceto aquela linha que passa como um eixo através do polo (representado por um ponto) – estará na situação do fio girante e tentará girar ao redor do polo. E como todas as linhas agem na mesma direção ou tendem em um sentido único ao redor do polo, todo o ímã gira [ao redor de seu próprio eixo]. (Launay, 1943, p. 913)

Na Figura 11 ilustramos com setas estas forças supostas por Faraday.

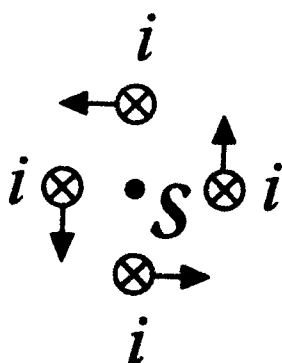


Fig. 11. As setas indicam as forças que o polo Sul estaria exercendo sobre as correntes que estariam descendo internamente ao ímã.

Na Figura 11 temos uma vista superior do motor de Ampère. O ponto central S indica o polo Sul do ímã. As correntes estão descendo pelo ímã (entrando no papel nesta Figura). As setas indicam as forças que Faraday supunha estarem atuando sobre estas correntes, sendo exercidas pelo polo Sul. Estas forças gerariam um torque sobre o ímã que faria com que ele girasse ao redor de seu eixo.

6. AMPÈRE CONTRA FARADAY

Ampère viu imediatamente que a explicação de Faraday violava a lei de ação e reação de Newton. Ampère mencionou isto a Faraday em sua resposta de 10 de julho de 1822 e também em suas publicações:

Um princípio fundamental e evidente na física é o de que, sendo a ação sempre igual à reação, é impossível que um corpo rígido seja movido de qualquer maneira, por uma ação mútua entre duas de suas partículas, já que esta ação produz sobre as duas partículas duas forças iguais que tendem a mover o corpo em sentidos opostos. De onde segue que, quando as partículas de um ímã atravessadas por uma corrente elétrica que as coloca no mesmo estado que o fio condutor age sobre o polo ou sobre qualquer outra parte do ímã, não pode resultar disto qualquer movimento neste corpo, [...] A partir desta observação, a rotação ao redor de seu eixo de um ímã fluando [no mercúrio] só pode ser explicada como o fiz na Memória inserida no caderno de maio dos *Annales de Chimie et de Physique*, e que te enviei recentemente. (Ampère, 1885, p. 298; Launay, 1936, p. 586)

A explicação de Faraday para a rotação do ímã ao redor de seu próprio eixo é baseada apenas na interação de forças giratórias ou revolutivas atuando internamente ao ímã, criando um torque interno e uma aceleração angular de todo o sistema com relação a um observador externo. Isto é, o polo dentro do ímã faz uma ação giratória sempre no mesmo sentido (por exemplo, no sentido anti-horário quando o ímã é visto de cima para baixo ao longo do seu eixo de simetria) sobre as correntes elétricas internas ao próprio ímã.

Para Ampère esta explicação de Faraday não fazia sentido, pois violava a lei de ação e reação de Newton. Para Ampère a única interpretação possível para o seu motor era a que ele próprio havia fornecido em que as correntes elétricas macroscópicas fluindo externamente ao ímã exerciam um torque sobre as correntes microscópicas fluindo internamente ao ímã. Por ação e reação viria que estas correntes microscópicas exerceriam um torque oposto sobre as correntes macroscópicas fluindo no mercúrio externamente ao ímã.

Da mesma forma que Ampère rejeitou a explicação de Faraday, Ampère certamente também rejeitaria a explicação moderna baseada no conceito de campo magnético. Afinal de contas, também nesta explicação ocorre o chamado efeito *bootstrap*. Ou seja, o campo magnético devido ao próprio ímã estaria exercendo um torque sobre as correntes elétricas radiais fluindo internamente ao ímã, fazendo com que o ímã girasse sobre seu próprio eixo. Ampère jamais aceitaria esta explicação de um corpo gerando um torque sobre si mesmo.

7. EXISTE O CONTRA-TORQUE?

Mas afinal de contas, existe ou não o contra-torque exercido pelo ímã sobre as correntes macroscópicas fluindo externamente ao ímã? Esta é uma consequência necessária da explicação de Ampère que utiliza o princípio de ação e reação. Na sua época Ampère mencionou o movimento do mercúrio observado em experiências análogas feitas por H. Davy como sendo uma evidência deste contra-torque (Ampère, 1822c). Hoje em dia isto pode ser facilmente visualizado em sala de aula utilizando uma experiência análoga ao de motor de Ampère com um ímã de neodímio. Basta que se deixe a bateria e o ímã fixos em relação ao laboratório, enquanto que se permite que o condutor que fecha o circuito gire ao redor do

eixo do sistema. Por exemplo, pode-se visualizar o fio de cobre girando ao redor da bateria e do ímã (Schlichting & Ucke, 2004b; Featonby, 2006; Muñoz, 2007; Wong, 2009a; Monteiro; Germano; Monteiro & Gaspar, 2010). Uma alternativa ainda mais simples e interessante utiliza um simples cilindro de alumínio para fechar o circuito. Este cilindro pode ser feito, por exemplo, com o papel de alumínio utilizado na cozinha (Wong, 2009b). Vamos supor que na experiência original com o motor de Ampère o ímã gira no sentido horário quando visto de cima. Quando o ímã fica fixo no laboratório e quando se permite o giro do circuito externo, o que se observa é que este circuito gira no sentido anti-horário, comprovando a existência do contra-torque previsto na explicação original de Ampère.

8. APLICAÇÕES NO ENSINO DE FÍSICA

Existem muitas vantagens de se utilizar o motor de Ampère nas aulas de física em nível de ensino médio ou superior. Citamos aqui algumas delas:

- É muito simples construir este motor. Ele gira rapidamente, surpreendendo as pessoas.
- É um instrumento de baixo custo. Os ímãs de neodímio são facilmente encontráveis hoje em dia em diversas escolas e no comércio.
- Ele tem uma história extremamente interessante, ligada aos nomes de Ampère e de Faraday no período entre 1821 e 1822. Tudo isto pode motivar os estudantes a ler os textos originais. Isto é sempre uma atividade enriquecedora.
- Existe uma controvérsia fascinante envolvendo Ampère e Faraday sobre o funcionamento deste motor. Estes dois paradigmas podem ser comparados e explorados em sala de aula.
- Existem explicações diferentes para o funcionamento deste motor. A interpretação de Ampère é baseada na ação e reação entre as correntes microscópicas internas ao ímã e as correntes macroscópicas fluindo externamente ao ímã. Já a explicação de Faraday e a explicação moderna baseadas no conceito de campo, por outro lado, são baseadas no chamado efeito *bootstrap*. Ou seja, o ímã (seu polo ou seu próprio campo magnético) agindo sobre correntes internas ao ímã e gerando um torque sobre o próprio ímã.
- Mesmo hoje em dia existem muitas publicações discutindo o mecanismo de funcionamento do motor de Ampère (Stewart, 2007; Schlichting & Ucke, 2004b; Wong, 2009a).

Acreditamos que a execução do experimento não apenas por parte do professor, mas também pelos alunos, pode auxiliá-los a analisar o fenômeno observado e a contextualizar o debate sobre os mecanismos de seu funcionamento. O motor de Ampère é ideal para isto devido não apenas à sua simplicidade de operação, mas também ao seu baixo custo.

A existência de diferentes explicações para o fenômeno pode fomentar uma visão mais crítica sobre a ciência, explicitando seus aspectos humanos e subjetivos. Ao se explicitar que existem diferentes pontos de vista de como a natureza funciona (divergências em relação às interações fundamentais), diminui-se a tendência de se tornar trivial, óbvio e "lógico" o pensamento científico. É fundamental para um ensino crítico da física mostrar as divergências de opinião e os debates saudáveis que ocorreram ao longo da investigação científica.

9. CONCLUSÃO

Ampère foi o primeiro a prever, observar e explicar o giro contínuo de um ímã ao redor de seu eixo. Estes fatos e mais a busca pelo resgate histórico da origem deste experimento justificam que se denomine este tipo de aparelho como “motor de Ampère”.

Vimos que o próprio Faraday tinha uma explicação baseada somente na interação entre o polo do ímã e a corrente interna ao ímã, sem usar o conceito de linhas de força ou de campo magnético.

Ampère tinha uma posição epistemológica defendendo a interação entre elementos de corrente obedecendo à lei de ação e reação de Newton ao longo da reta que unia os elementos (Blondel, 1982; Assis, 1995; Hofmann, 1996; Bueno & Assis, 1998). Desta forma, usou destes conceitos para encontrar e explicar a rotação contínua de um ímã ao redor de seu eixo. Para ele o ímã não podia causar uma rotação em si mesmo. Este torque teria de ser causado por algum agente externo ao ímã. Para ele este agente externo era a corrente elétrica fluindo no mercúrio. Por ação e reação concluiu que o ímã teria de exercer um torque oposto sobre o mercúrio.

Para Faraday, ao contrário, o ímã podia causar uma rotação sobre si mesmo devido apenas a interações ocorrendo entre grandezas internas ao próprio ímã (seu polo e as correntes fluindo pelo ímã).

Consta nos Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio (PCNEM) que a história da ciência é uma abordagem necessária para “compreender as ciências como construções humanas, entendendo (sic) como elas se desenvolveram por acumulação, continuidade ou ruptura de paradigmas, relacionando o desenvolvimento científico com a transformação da sociedade” (Brasil, 2000). Esperamos com este trabalho contribuir nessa direção, apesar dos vários obstáculos que existem na introdução da história da ciência no ensino de física (Höttecke & Silva, 2011).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP e ao Comitê Organizador da *Primeira Conferência Latinoamericana do International History, Philosophy, and Science Teaching Group (1ª IHPST-LA)* pelo apoio financeiro para a participação nesta Conferência. Agradecem também ao assessor pelas sugestões relativas à primeira versão deste artigo, assim como a diversas pessoas por comentários e referências que enriqueceram este trabalho: C. Blondel, J. R. Hofmann, J. J. Lunazzi, T. E. Phipps Jr., F. L. d. Silveira, F. Steinle e B. Wolff.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMPÈRE, André-Marie. Mémoire présenté à l'Académie royale des Sciences, le 2 octobre 1820, où se trouve compris résumé de ce qui a été lu à la même Académie les 18 et 25 septembre 1820, sur les effets des courans électriques. *Annales de Chimie et de Physique* **15**: 59-76, 1820.
- . Expériences relatives à de nouveaux phénomènes électro-dynamiques. *Annales de Chimie et de Physique* **20**: 60-74, 1822 (a).

- . Expériences relatives aux nouveaux phénomènes électro-dynamiques que j'ai obtenus au mois de décembre 1821. Pp. 237-250, in: AMPÈRE, André-Marie (ed.). *Recueil d'Observations Électro-dynamiques*. Paris: Crochard, 1822 (b).
- . Nouvelles expériences électro-magnétiques de M.M. Faraday, Ampère, H. Davy, et De La Rive. *Bulletin des Sciences de la Société Philomatique de Paris* Vol. 9, pp. 21-23, 1822 (c).
- . *Théorie des Phénomènes Électro-dynamiques, Uniquement Déduite de l'Expérience*. Paris: Méquignon-Marvis, 1826.
- . Expériences relatives aux nouveaux phénomènes électro-dynamiques que j'ai obtenus au mois de décembre 1821. Vol. 2, pp. 192-204, in: JOUBERT, J. (ed.). *Collection de Mémoires relatifs a la Physique: Mémoires sur l'Électrodynamique*. Paris: Gauthier-Villars, 1885.
- . Mémoire communiqué à l'Académie royale des Sciences dans sa Séance du 21 novembre 1825, faisant suite au Mémoire lu dans la Séance du 12 septembre. Vol. 3, pp. 194-202, in: JOUBERT, J. (ed.). *Collection de Mémoires relatifs a la Physique: Mémoires sur l'Électrodynamique*. Paris: Gauthier-Villars, 1887.
- ASSIS, André Koch Torres. *Eletrodinâmica de Weber – Teoria, Aplicações e Exercícios*. Campinas: UNICAMP, 1995.
- BLONDEL, Christine A.-M. *Ampère et la Création de l'Électrodynamique (1820-1827)*. Paris: Bibliothèque Nationale, 1982.
- BRASIL. *Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio, Parte III: Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias*. Brasília: Ministério da Educação do Brasil, 2000.
- BUENO, Marcelo; Assis, André Koch Torres. *Cálculo de Indutância e de Força em Circuitos Elétricos*. Florianópolis: Editora da UFSC, 1998. Maringá: Editora da UEM, 1998.
- CHAIB, João Paulo Martins Castro; Assis, André Koch Torres. Sobre os efeitos das correntes elétricas – Tradução comentada da primeira obra de Ampère sobre eletrodinâmica. *Revista da Sociedade Brasileira de História da Ciência* 5: 85-102, 2007.
- CHIAVERINA, Christopher. The Simplest Motor? *The Physics Teacher* 42 (9): 553, 2004.
- FARADAY, Michael. On some new electro-magnetical motions, and on the theory of magnetism. *The Quarterly Journal of Science Literature, and the Arts* 12: 74-96, 1821.
- . Description of an electro-magnetical apparatus for the exhibition of rotatory motion. *The Quarterly Journal of Science, Literature, and the Arts* 12: 283-285, 1822.
- . On some new electro-magnetical motions and on the theory of magnetism. Vol. 45: Lavoisier, Fourier, Faraday, pp. 795-807, in: HUTCHINS, R. M. (ed.). *Great Books of the Western World*. Chicago: Encyclopaedia Britannica, 1952. 45 vols.
- FEATONBY, D. Experiments with neodymium magnets. *Physics Education* 40 (6): 505-508, 2005.
- . Inspiring experiments exploit strong attraction of magnets. *Physics Education* 41 (4): 292-295, 2006.
- . An even simpler version of the neodymium motor. *Physics Education* 42 (3): 236, 2007.
- HOFMANN, James R. *André-Marie Ampère, Enlightenment and Electrodynamics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.
- HÖTTECKE, Dietmar. How and what can we learn from replicating historical experiments? A case study. *Science & Education* 9: 343-362, 2000.

- HÖTTECKE, Dietmar & Silva, Cibelle Celestino. Why implementing history and philosophy in school science education is a challenge: an analysis of obstacles. *Science & Education* **20**: 293-316, 2011.
- IRESON, Gren; TWIDLE, John. Magnetic braking revisited: activities for the undergraduate laboratory. *European Journal of Physics* **29**: 745-751, 2008.
- JONES, Bence. *Faraday's Life and Letters*. London: Longmans, Green, and Co., 2a edição, 1870. 1 vol.
- LAUNAY, Louis de (ed.). *Correspondance du Grand Ampère*. Paris: Gauthier-Villars, 1936. 2 vols.
- . *Correspondance du Grand Ampère*. Paris: Gauthier-Villars, 1943. 3 vols.
- MONTEIRO, Marco Aurélio Alvaranga; GERMANO, José Silvério Edmundo; MONTEIRO, Isabel Cristina de Castro; GASPAR, Alberto. As atividades de demonstração e a teoria de Vigotski: um motor elétrico de fácil construção e de baixo custo. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **27** (2): 371-384, 2010.
- MUÑOZ, Agustín Martín. Motor homopolar. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias* **4** (2): 352-354, 2007.
- SCHLICHTING, H. Joachim; UCKE, Christian. Der einfachste Elektromotor der Welt. *Physik in unserer Zeit* **35**: 272-273, 2004 (a).
- . A fast, high-tech, low cost electric motor construction. Trad. de J. Williams para o inglês do artigo Der einfachste Elektromotor der Welt. *Physik in unserer Zeit* **35**: 272-273, 2004
Disponível em: < http://users.physik.tu-muenchen.de/cucke/ftp/lectures/Unipolarmotor_English.pdf >. Acesso em: 30/08/2013 data. :
- SILVA, Osmar Henrique Moura de; LABURÚ, Carlos Eduardo. Motor elétrico de Faraday: uma montagem para museus e laboratórios didáticos. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **26**: 478-491, 2009.
- STEWART, Seán M. Some simple demonstration experiments involving homopolar motors. *Revista Brasileira de Ensino de Física* **29** (2): 275-281, 2007.
- WONG, H. K. Motional mechanisms of homopolar motors & rollers. *The Physics Teacher* **47** (7): 463-465, 2009 (a).
- . Levitated homopolar motor. *The Physics Teacher* **47** (2): 124, 2009 (b).