

História da Física e Ciências Afins

Demonstração didática da interação entre correntes elétricas (*Didactic demonstration of the interaction between electric currents*)

M.P. Souza Filho¹, J.P.M.C. Chaib,² J.J. Caluzi¹ e A.K.T. Assis²

¹Faculdade de Ciências, Universidade Estadual Paulista, Bauru, SP, Brasil

²Instituto de Física 'Gleb Wataghin', Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil

Recebido em 4/4/2007; Aceito em 18/7/2007

Apresentamos a primeira experiência crucial de Ampère mostrando a interação entre dois fios metálicos conduzindo correntes elétricas. Discutimos sua importância na história da física. Descrevemos uma reprodução moderna dos procedimentos e observações de Ampère com materiais de baixo custo.

Palavras-chave: Ampère, força de Ampère, eletrodinâmica, história da física, materiais de baixo custo.

We present the first crucial experiment by Ampère that shows the interaction of two metallic wires carrying steady currents. We discuss its importance in the history of physics. We also present a modern reproduction of the procedures and observations of Ampère with low cost materials.

Keywords: Ampère, Ampère's force, electrodynamics, history of physics, low cost materials.

1. Introdução

Um dos fenômenos mais simples e intrigantes que podemos observar é a interação entre dois ímãs, ou entre um ímã e um material ferromagnético. Estes corpos agem um sobre o outro a uma certa distância entre eles. Esta interação pode ser através de forças de atração e repulsão ou, então, através de torques que tendem a girar ou a orientar estes corpos espacialmente. Este fenômeno já era conhecido desde a antiguidade.

É bem conhecido que Hans Christian Oersted (1777-1851) descobriu em 1820 uma nova classe de fenômenos, a saber, a interação entre um ímã e um fio com corrente constante. O trabalho descrevendo sua descoberta já se encontra traduzido para o português [1]. Uma reprodução didática desta experiência realizada com materiais de baixo custo encontra-se na Ref. [2]. Este foi o início da ciência do eletromagnetismo, ou seja, do ramo que estuda a interação entre condutores conduzindo correntes elétricas e os ímãs.

Também é apresentado nos livros didáticos que André-Marie Ampère (1775-1836) mostrou em 1820, ao explorar a experiência fundamental de Oersted, que dois longos fios retilíneos, paralelos entre si, se atraem (se repelem) caso conduzam correntes constantes no mesmo sentido (em sentidos opostos). Esta montagem é às vezes chamada de balança de corrente. Este novo ramo da física de interação entre correntes elétricas, sem haver necessariamente a presença ou influência de

outros ímãs, foi denominado por Ampère de eletrodinâmica [3]. Por outro lado é bem menos conhecido que a descoberta que levou Ampère a esta nova classe de fenômenos foi a observação inédita de que dois circuitos em forma de duas espirais metálicas, com seus planos paralelos e com seus eixos alinhados, se atraem ou se repelem dependendo das direções das correntes que as atravessam. Neste sentido as espirais se comportam como os ímãs usuais. Neste artigo vamos discutir esta experiência crucial de Ampère e sua relevância histórica.

Já foram propostas na literatura científica algumas sugestões de experiências didáticas visando demonstrar a interação entre correntes elétricas e simulando a balança de corrente também proposta por Ampère. Para estas montagens atingirem seu objetivo, que consiste na observação da interação entre correntes paralelas, usualmente os valores das correntes elétricas têm de ser altos e as massas dos condutores precisam ser baixas. Por isso, geralmente utiliza-se o papel de alumínio como condutor, por ser um material leve. Mesmo assim, o efeito observado não é tão expressivo. Ao se tentar uma reprodução fiel da experiência da balança de corrente de Ampère, só foi possível observar dois fios se atraindo e encostando um no outro com correntes extremamente elevadas, da ordem de 30 ampères [4].

Em vez de trabalhar com a balança de corrente, propomos aqui reproduzir a primeira experiência de Ampère, que tem uma montagem bem mais simples,

¹E-mail: moacir@fc.unesp.br.

na qual podem ser observados os principais fenômenos descritos por ele com suas espirais. Uma das vantagens desta montagem é que os condutores se encontram concentrados em uma pequena região espacial. Isso produz um efeito de atração e repulsão maior, para uma dada corrente elétrica, do que aquele produzido entre fios paralelos.

2. Aspectos históricos

Antes do início do século XIX os fenômenos relacionados com a eletricidade e o magnetismo eram considerados totalmente desconexos. Vários corpos chamados de isolantes podiam ser eletrizados por atrito e, com isto, exibiam os fenômenos de atração e de repulsão elétrica. Outros corpos chamados de condutores permitem o fluxo ou passagem das cargas elétricas, podendo também ser polarizados eletricamente na presença de isolantes carregados em suas proximidades. Além disso, isolantes carregados eletricamente atraem corpos leves de diversas naturezas. Embora os fenômenos magnéticos também sejam caracterizados por atrações e repulsões, eles se restringiam, até aquela época, aos ímãs naturais e aos materiais ferromagnéticos. Já as atrações elétricas eram quase universais. O âmbar atrai quase tudo que é leve e que seja colocado em suas proximidades. E várias substâncias podem ser eletrizadas como o âmbar. Já os fenômenos magnéticos eram observados apenas em uma classe bem restrita de substâncias. Não há equivalente no magnetismo para os isolantes elétricos. Além disso, as cargas podem ser isoladas umas das outras, o que não acontece com os pólos magnéticos. Quando se quebra um ímã, observa-se que cada pedaço apresenta dois pólos: norte e sul. Visto de longe, parecia que os fenômenos magnéticos e elétricos não tinham nenhum vínculo.

Porém, existiam elementos que levaram vários cientistas a acreditar que havia alguma relação entre o magnetismo e a eletricidade [5, p. 81]. Em particular, estas duas classes de fenômenos eram regidas pela teoria dos dois fluidos (carga vítrea e resinosa, ou positiva e negativa na eletricidade; e pólo austral e boreal, ou norte e sul no magnetismo). Além do mais, as leis de força da eletrostática e da magnetostática eram semelhantes à teoria gravitacional Newtoniana. Isto é, todos estes fenômenos eram caracterizados por forças centrais, que diminuía com o quadrado da distância entre os corpos que estavam interagindo.

No ano de 1820 o cientista dinamarquês e professor da Universidade de Copenhague, Hans Christian Oersted, observou que um longo fio conduzindo uma corrente constante alterava a orientação natural de uma bússola colocada em suas proximidades. Ela deixava de ficar orientada ao longo do meridiano magnético local [1]. Esta descoberta fundamental desencadeou uma série de pesquisas que levou à criação de um novo ramo da física, relacionando a eletricidade e o magnetismo,

ao qual se deu o nome de eletromagnetismo.

Alguns cientistas da época, embora estivessem abertos à possibilidade de uma relação entre as duas ciências, espantaram-se ao ver que a corrente elétrica, tendo uma direção definida, produz um torque na agulha magnética quando essa se encontra paralela ao fio (Fig. 1). Nesta figura o pólo norte da bússola se desvia para oeste quando ela está abaixo do fio com corrente. Caso ela esteja acima do fio com corrente, o pólo norte da agulha se desvia para leste. Sendo assim, os mais renomados cientistas da Europa buscaram a explicação para este estranho fenômeno.

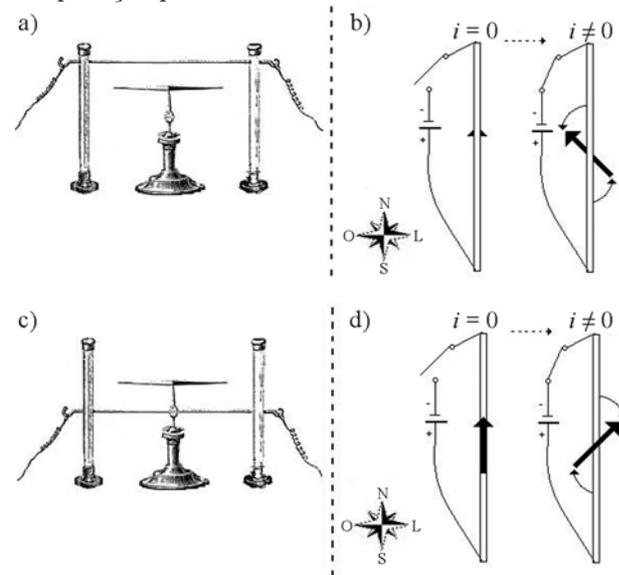


Figura 1 - Deflexão de uma bússola em relação ao meridiano magnético quando se passa uma corrente constante em um longo fio retilíneo colocado paralelamente à agulha imantada na experiência de Oersted. Se o fio está acima da agulha então o pólo da agulha que está mais próximo do terminal negativo da pilha gira para oeste, casos (a) e (b). Caso a agulha esteja sobre o fio, então o pólo da agulha que está mais próximo do terminal negativo da pilha gira para leste, casos (c) e (d).

Oersted considerava a corrente elétrica composta de dois fluxos de cargas positivas e negativas, movendo-se em direções opostas no interior dos fios com corrente. Estas cargas se encontrariam e separariam continuamente, caracterizando o que Oersted chamou de conflito elétrico. Para explicar suas observações, supôs que este conflito elétrico não ficava restrito ao interior do fio, existindo também no espaço ao redor do fio. Como a agulha ficava inclinada em relação ao meridiano magnético quando havia corrente no fio, Oersted supôs que o conflito elétrico no exterior do fio seguia trajetórias helicoidais. Além do mais, ele afirmou que o conflito elétrico interagiria com os pólos do ímã, como que empurrando-os ao longo do fluxo do conflito elétrico no exterior do fio.

Mais tarde Jean-Baptiste Biot (1774-1862) e Félix Savart (1791-1841) interpretaram esta experiência como uma indicação de que a passagem de corrente pelo fio o havia magnetizado [6]. Esperavam então ex-

plicar o fenômeno através de uma interação entre pólos magnéticos. Ou seja, os pólos magnéticos espalhados ao longo da seção reta do fio (que teria sido magnetizado pela passagem da corrente) estariam interagindo com os pólos do ímã.

Ampère propõe uma explicação bem diferente da proposta por seus contemporâneos. Em particular não segue o ponto de vista sugerido por Oersted de que “alguma coisa” gira ao redor do fio quando passa uma corrente por ele (seja esta “alguma coisa” o “conflito elétrico”, como defendido por Oersted, ou o “campo magnético” de hoje em dia). Ampère defende o princípio newtoniano de ação e reação direta entre o fio e o ímã. Também se diferencia de Biot ao defender a existência de correntes elétricas no interior da agulha magnetizada, explicando a observação de Oersted por uma interação direta entre a corrente no fio e as correntes elétricas na agulha imantada. Sua motivação parece ter sido perceber uma analogia entre a orientação das bússolas devido ao magnetismo terrestre e a observação de Oersted de que um fio com corrente pode alterar esta orientação. Isto lhe sugeriu que a orientação magnética terrestre poderia ser devida a correntes elétricas na terra [7], nossas palavras entre colchetes:

A primeira reflexão que fiz quando desejei procurar as causas dos novos fenômenos descobertos pelo Sr. Oersted, foi que a ordem pela qual se descobrem dois fatos não interfere em quaisquer conclusões a que se possa chegar a partir das analogias que eles apresentam. Podíamos supor que antes de saber que a agulha imantada assume uma direção constante do sul ao norte - [devido à presença do magnetismo terrestre] - tivéssemos conhecido inicialmente a propriedade de que a agulha é girada por uma corrente elétrica [retilínea] em uma situação [em que o eixo desta agulha fica] perpendicular a esta corrente, de modo que o pólo austral da agulha fosse levado à esquerda da corrente, e que se descobrisse posteriormente a propriedade que ela tem de girar constantemente em direção ao norte [geográfico terrestre, devido ao magnetismo terrestre] a sua extremidade que era levada para o lado esquerdo da corrente. [Se esta fosse a seqüência histórica das descobertas,] a idéia mais simples e que se apresentaria imediatamente a quem quisesse explicar a direção constante do sul ao norte, não seria supor [a existência] na terra uma corrente elétrica, [fluindo] em uma direção tal que o norte [geográfico terrestre] se encontrasse à esquerda de um homem que, deitado sobre a superfície da terra de modo a

ter a face voltada para a agulha, recebesse esta corrente indo na direção dos seus pés à sua cabeça, concluindo disto que [esta corrente terrestre] ocorre de leste para oeste, em uma direção perpendicular ao meridiano o magnético?

Ele então faz uma analogia entre a terra e um ímã cilíndrico [7]:

Agora, se as correntes elétricas são a causa da ação diretriz da terra, as correntes elétricas serão também a causa da ação diretriz de um ímã sobre um outro ímã. Segue que um ímã deve ser considerado como um conjunto de correntes elétricas que ocorrem no plano perpendicular ao seu eixo, direcionadas de modo que o pólo austral do ímã, que se vira para o norte [geográfico devido à ação magnética da terra], encontra-se à direita destas correntes, dado que ele está sempre à esquerda de uma corrente disposta fora do ímã, e que lhe faz face em uma direção paralela. Ou melhor, estas correntes se estabelecem primeiramente no ímã, seguindo as curvas fechadas mais curtas, seja da esquerda para a direita, seja da direita para a esquerda, e então a linha perpendicular aos planos destas correntes torna-se o eixo do ímã, e suas extremidades formam os dois pólos. Assim, em cada um dos pólos de um ímã, as correntes elétricas em que se compõem são dirigidas ao longo de curvas fechadas concêntricas.

Para testar suas idéias, Ampère tentou reproduzir as atrações e repulsões entre pólos magnéticos através de fios conduzindo correntes constantes. Para isso, enrolou um fio na forma de uma espiral plana. Colocou o eixo desta espiral alinhado com o eixo norte sul de um ímã na forma de barra. Ao passar uma corrente constante no fio, observou uma atração ou uma repulsão entre a espiral e o ímã. A atração era convertida em uma repulsão quando ele invertia o pólo do ímã que estava mais próximo da espiral, ou quando invertia a direção da corrente elétrica que fluía através da espiral. Desta maneira, conseguiu simular a atração e a repulsão entre dois pólos magnéticos. A diferença principal desta experiência em relação à experiência de Oersted é que Ampère observou atrações e repulsões entre a espiral e o ímã, enquanto que Oersted observou uma deflexão lateral da agulha imantada, devido a um torque exercido pelo fio com corrente.

E, dando seqüência ao seu raciocínio, substituiu o ímã em forma de barra por uma segunda espiral [7], ver uma descrição de sua experiência na Fig. 2. Embora ele não tenha justificado esta passagem, ela não parece ter sido fruto do acaso. Aparentemente ele estava apenas

dando continuidade à verificação experimental de sua hipótese inicial de que todos os efeitos magnéticos são devidos a correntes no interior dos ímãs. Logo deveria ser possível reproduzir as atrações e repulsões entre ímãs trabalhando apenas com condutores conduzindo correntes constantes. E foi exatamente isto que Ampère verificou ao realizar a experiência com duas espirais. Com isto observou, pela primeira vez na história, uma interação direta entre dois condutores conduzindo correntes constantes. Neste caso tinha duas espirais em planos paralelos com seus eixos colineares. Observou a atração ou repulsão entre elas, dependendo do sentido das correntes. A atração podia ser convertida em uma repulsão ao inverter a direção de uma das duas correntes. Caso invertesse a direção das duas correntes, a atração continuava a existir. Citamos aqui sua descrição desta experiência crucial [7, p. 207-208], nossas palavras entre colchetes:

Agora, se as correntes elétricas são a causa da ação diretriz da terra, as correntes elétricas serão também a causa da ação diretriz de um ímã sobre um outro ímã. Segue que um ímã deve ser considerado como um conjunto de correntes elétricas que ocorrem no plano perpendicular ao seu eixo, direcionadas de modo que o pólo austral do ímã, que se vira para o norte [geográfico devido à ação magnética da terra], encontra-se à direita destas correntes, dado que ele está sempre à esquerda de uma corrente disposta fora do ímã, e que lhe faz face em uma direção paralela. Ou melhor, estas correntes se estabelecem primeiramente no ímã, seguindo as curvas fechadas mais curtas, seja da esquerda para a direita, seja da direita para a esquerda, e então a linha perpendicular aos planos destas correntes torna-se o eixo do ímã, e suas extremidades formam os dois pólos. Assim, em cada um dos pólos de um ímã, as correntes elétricas em que se compõem são dirigidas ao longo de curvas fechadas concêntricas. Imitei esta disposição tanto quanto era possível com uma corrente elétrica, curvando o fio condutor em espiral. Esta espiral era formada com um fio de latão e terminada por duas porções retilíneas deste mesmo fio, que eram envolvidas dentro de dois tubos de vidro para que não entrassem em contato entre elas, e pudessem ser unidas às duas extremidades da pilha.

De acordo com o sentido no qual faz-se passar a corrente em tal espiral, ela é fortemente atraída ou repelida pelo pólo de um ímã que é colocado [diante da espiral] de modo que a direção do seu eixo seja per-

pendicular ao plano da espiral, conforme as correntes elétricas da espiral e do pólo do ímã estejam no mesmo sentido ou em sentido contrário. Substituindo o ímã por outra espiral, cuja corrente esteja no mesmo sentido que o seu [do ímã], tem-se as mesmas atrações e repulsões. Foi assim que descobri que duas correntes elétricas se atraíam quando fluíam no mesmo sentido, e se repeliam no caso contrário.

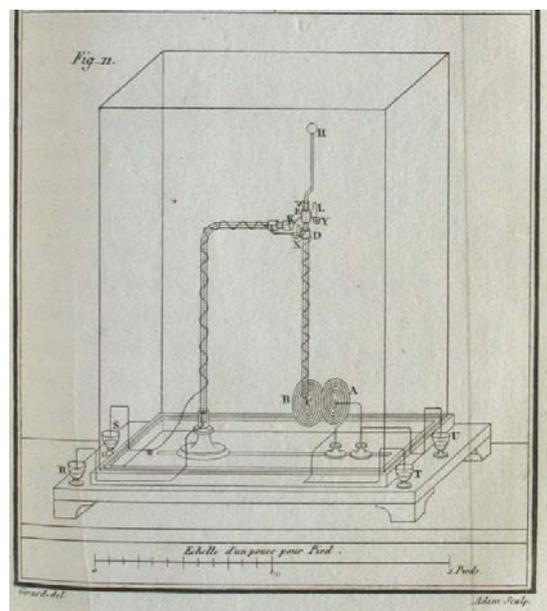


Figura 2 - Experiência original de Ampère com a qual observou pela primeira vez a interação entre dois condutores conduzindo correntes constantes [7].

Esta última frase é muito importante. Ela indica o caminho seguido por Ampère e o fato de sua descoberta da atração e repulsão entre condutores retilíneos ter vindo depois da observação da atração e repulsão entre espirais, inspirada por este último fato.

Alguns cientistas alegaram que o resultado desta experiência era uma consequência direta da observação de Oersted. Ampère não concorda com isto e apresenta um contra-exemplo bem claro ilustrando a importância de sua descoberta inédita. Para ver seu ponto de vista citamos aqui um trecho de sua obra mais importante publicada em 1826, *Teoria Matemática dos Fenômenos Eletrodinâmicos Deduzida Unicamente da Experiência* [8, p. 285-286]:

Quando o Sr. Oersted descobriu a ação que o fio condutor exerce sobre um ímã, devia-se, na verdade, ser levado a supor que poderia haver uma ação mútua entre dois fios condutores. Porém, esta não seria uma consequência necessária da descoberta deste célebre físico, já que uma barra de ferro doce age também sobre uma agulha imanada e, contudo, não existe qualquer ação

mútua entre duas barras de ferro doce. Enquanto que somente se conhecia o fato da deflexão da agulha imantada pelo fio condutor, não se poderia supor que a corrente elétrica somente comunicava a este fio a propriedade de ser influenciado pela agulha, de uma maneira análoga à maneira em que o ferro doce é [influenciado] por esta mesma agulha – o que seria suficiente para que ele agisse sobre ela – sem que, para isso, resultasse alguma ação entre dois fios condutores quando eles se encontrassem fora de influência de qualquer corpo imantado? Somente a experiência podia decidir esta questão. Realizei-a no mês de setembro de 1820 e foi demonstrada a ação mútua entre os condutores voltaicos.

De posse dos dados obtidos experimentalmente, Ampère unifica os fenômenos observados de torque e de força resultante entre ímãs e condutores através de um único princípio, a saber, a atração e a repulsão entre elementos de corrente ao longo da reta que os une. Foi por isto que afirmou o seguinte em seu primeiro artigo sobre eletrodinâmica [9, p. 74]: “Daqui segue que na ação mútua de duas correntes elétricas, a ação diretriz e a ação atrativa ou repulsiva dependem de um mesmo princípio, e são apenas efeitos diferentes devidos a uma única e mesma ação.”

Para caracterizar os fenômenos de interação direta entre correntes elétricas, sem que haja necessariamente a presença de ímãs, Ampère criou uma nova palavra, “eletrodinâmica” [3]:

O nome de *eletro-magnético*, dado aos fenômenos produzidos pelos fios condutores da pilha de Volta, só podia designar convenientemente estes fenômenos na época em que apenas se conheciam entre estes fenômenos aqueles que o Sr. Oersted descobriu entre uma corrente elétrica e um ímã. Creio que devo empregar a denominação *eletro-dinâmico*, para reunir em um nome comum todos estes fenômenos, e especialmente para designar os fenômenos que observei entre dois condutores voltaicos. Ela exprime a característica própria destes fenômenos. A saber: de serem produzidos pela eletricidade em movimento; enquanto que as atrações e repulsões elétricas conhecidas há muito tempo são os fenômenos *eletro-estáticos* produzidos pela distribuição desigual da eletricidade em repouso nos corpos onde se observam estes fenômenos.

Propomos a seguir uma montagem didática simples que é análoga a esta experiência crucial de Ampère com as espirais. Ela ilustra os fenômenos observados por

Ampère com uma material facilmente acessível nos dias de hoje.

3. Procedimento de montagem

3.1. Materiais utilizados

- 1 tábua de madeira de 15 cm × 20 cm;
- 2 bobinas enroladas com cerca de 2,50 m de fio esmaltado 26 AWG;
- 4 grampos de latão (colchetes);
- 2 molas de caneta esferográfica;
- 1 canudinho de refresco dobrável de boa qualidade;
- 1 espetinho de madeira para churrasco;
- 16 percevejos (tachinhas);
- 4 pilhas grandes de 1,5 V alcalinas;
- 2 ímãs de geladeira ou 2 pequenos ímãs cilíndricos;
- Diversos: folha de papel de alumínio, cola, prego, isqueiro, martelo, estilete ou um material com ponta plana e firme, e linha de costura resistente.

3.2. Construção das espirais

Fixe o prego em uma tábua de madeira, batendo com um martelo. Este prego servirá de suporte à construção da espiral que será enrolada ao redor dele. Deixe o prego fixo, porém não “grudado,” de modo que fique fácil de retirá-lo com a mão. Prenda com uma fita adesiva uma das pontas do fio sobre a tábua, a uns 15 cm do prego. Em seguida, enrole o fio no prego em sentido horário. Cada volta deve sobrepor a precedente, acompanhando o plano da madeira e tendo um raio um pouco maior do que o raio da volta anterior. Se houver dificuldade de manter a espiral no plano da madeira, segure-a sempre com a ponta do estilete (ou de qualquer material com ponta plana, fina e firme) conforme indicado na Fig. 3. Execute estes procedimentos sucessivamente até que sobre um comprimento de aproximadamente 15 cm na outra ponta do fio. Feito isso, retire o prego da madeira. As espiras da espiral tenderão a sair do plano em que foram enroladas. Para mantê-las sempre unidas no mesmo plano, envolva cada espiral com 3 pedaços de fios radiais, saindo do centro da espiral e formando um ângulo de aproximadamente 120 graus entre eles e, em seguida, com o mesmo propósito, passe cola pela espiral e espere secar.



Figura 3 - Construção da espiral.

As duas extremidades, com 15 cm de comprimento, são torcidas entre si próximas à espiral, mantidas no mesmo plano da espiral. Após torcer, deixa-se duas pontas espaçadas uma da outra, por cerca de 2 cm. As camadas de verniz isolante destas pontas devem ser queimadas com um isqueiro, ou fósforo, para permitir o contato elétrico. Cuidado nesta operação: Segure o fio, mantendo a mão distante da parte que será queimada, lembrando que o cobre também é um bom condutor de calor. Lixe as pontas incineradas, deixando o fio de cobre limpo, para que haja um bom contato entre a espiral e o circuito.

Em sua forma final, cada espiral terá a forma de um desenho infantil de uma pessoa sem braços e com uma grande cabeça. A cabeça será a espiral, o corpo da pessoa será composta pelas extremidades enroladas dos fios, e os pés serão as pontas sem verniz dos fios. Para realizar as experiências, cada espiral estará em um plano vertical, com a cabeça acima, o corpo descendo verticalmente pelo centro da cabeça, e com os pés afastados em direções opostas em relação ao corpo, uma ponta para a direita e outra para a esquerda, sendo que estes pés estarão no mesmo plano vertical da cabeça.

3.3. As pilhas

Cada espiral vai ser conectada em duas pilhas tipo D, ligadas em série. Uma possibilidade prática para conectar as pilhas é utilizar os chamados “porta-pilhas”, vendidos em lojas de materiais elétricos. Apresentamos aqui uma alternativa de baixo custo.

Para melhorar o contato da pilha com o circuito a ser construído, realiza-se o seguinte procedimento: Na saída positiva da pilha encaixa-se um percevejo com a ponta para fora. Ele é fixado com fita isolante, ou com qualquer outra fita adesiva, como na Fig. 4. Na saída negativa da pilha também é encaixado um percevejo com a ponta para fora. A ponta vai passar pelo centro de um pedaço de uma mola de caneta esferográfica e pelo centro perfurado da perna de um grampo de latão. Fixe tudo com fita isolante. Agora, encaixe as duas pilhas em série. Fica a critério do leitor dispor ou não uma mola entre as pilhas para melhorar o contato.

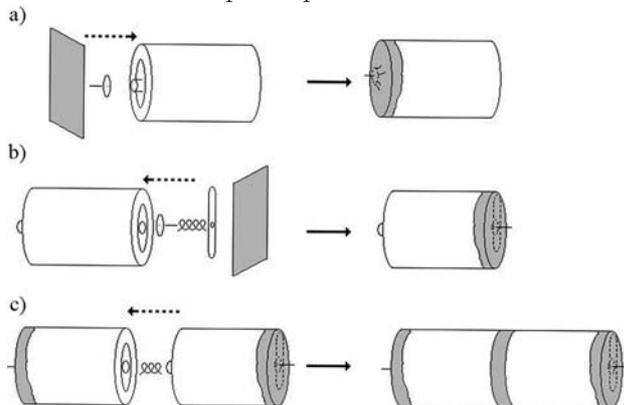


Figura 4 - Contatos para as pilhas.

3.4. O circuito elétrico

Na tábua de madeira devem ser esquematizados e construídos dois circuitos elétricos idênticos, um para cada espiral. Eles devem ser posicionadas faceando um ao outro, como indicado na Fig. 5. Cada circuito será composto de duas pilhas com os respectivos suportes, um interruptor (que normalmente vai estar aberto para evitar que as pilhas se gastem), trilhas de ligação feitas com papel de alumínio, além da própria espiral.

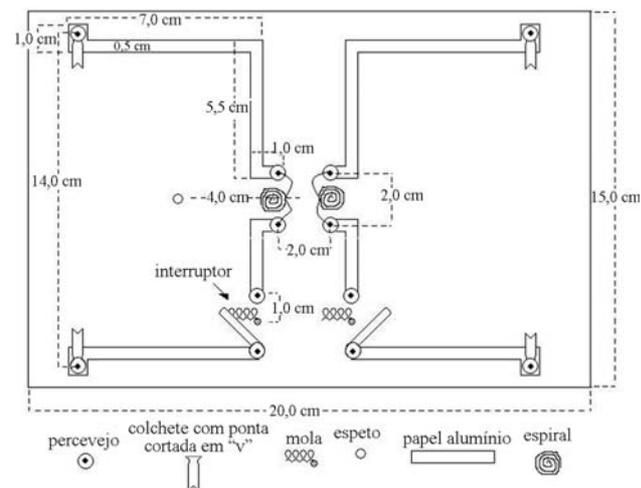


Figura 5 - Circuito elétrico e suas dimensões espaciais.

Primeiro monte as trilhas com papel de alumínio, como indicado na Fig. 6, colando o papel de alumínio na base de madeira. Note que o espaço sem papel de alumínio, que corresponde à parte do interruptor, vai depender do tamanho do colchete utilizado como chave.

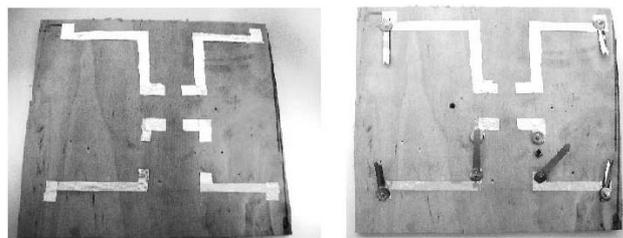


Figura 6 - Trilhas de papel de alumínio sobre o suporte de madeira.

Os suportes para as pilhas devem ser feitos com grampos de latão dobrados convenientemente. Os grampos fazem contato com as trilhas de papel de alumínio por meio de percevejos, Fig. 7. Desta forma, os terminais das pilhas se ligam ao circuito. Corte as pontas dos grampos que entrarão em contato com a pilha em forma de “V,” para facilitar o contato. Lembre que o pino do percevejo preso à pilha deve tocar na base do “V,” como mostra a Fig. 8. Na parte do inter-

ruptor, faça com um prego um pequeno furo na tábua a uma distância de cerca de 1 cm de uma das extremidades do espaço sem alumínio e coloque um pedaço de uma molinha de caneta esferográfica. Esta mola vai manter o interruptor normalmente aberto. Para fechar o circuito bastará pressionar com um dedo o colchete que estará sobre esta mola. Coloque percevejos nas extremidades livres das trilhas de papel de alumínio próximas à molinha, para facilitar o contato elétrico quando o interruptor for fechado, Fig. 7. Um percevejo fará a fixação do interruptor de grampo de latão

com o outro lado da trilha.

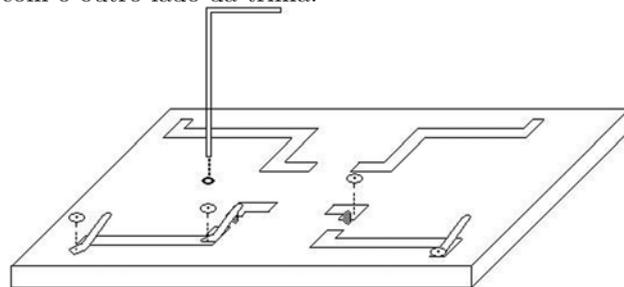


Figura 7 - Prendendo os contatos com percevejos.

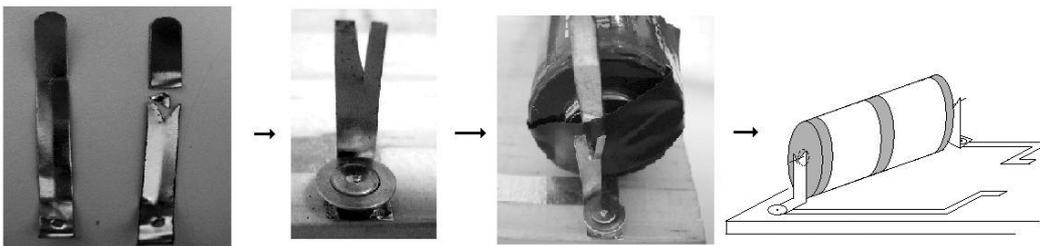


Figura 8 - Suporte para as pilhas.

3.5. Fixação das espirais

Introduza o lado pontiagudo de um espetinho para churrasco no interior de um canudinho de refresco pela extremidade dobrável, deixando aproximadamente 1 cm de sobra para fixação na madeira. Dobre o canudinho, quebrando o espetinho (mas não totalmente), de maneira a formar um “L” invertido. Corte em seguida a sobra de madeira. Faça um pequeno furo na tábua com um prego próximo ao local da espirais e fixe a extremidade pontiaguda do espetinho neste furo, colando-o na tábua.

As espirais devem ser amarradas com linha de costura ao canudinho, ficando suspensas para se moverem com facilidade. Elas devem facear uma a outra em planos verticais, com seus eixos colineares. Os contatos entre as espirais e a trilhas do circuito devem ser feitos com percevejos.

O resultado final encontra-se nas Figs. 9 e 10.

Esta montagem experimental permite a demonstração imediata de três classes de fenômenos. A interação magnética é caracterizada pela atração e repulsão entre ímãs. Isto é facilmente realizado pendurando, em duas linhas de costura, ímãs de geladeira ou ímãs cilíndricos, como se fossem pêndulos, com um deles em cada linha. Vamos supor que colocamos dois desses ímãs na mesma altura, alinhados com o meridiano magnético local. Os eixos norte e sul de cada um estão alinhados, sendo que as extremidades mais próximas entre si possuem polaridades opostas, uma sendo um pólo norte e outra um pólo sul. Ao aproximarmos as

duas linhas de costura, observa-se que eles se atraem quando a distância entre eles é pequena, sendo que o valor desta distância, em que a atração é perceptível, vai depender das intensidades dos ímãs. Segurando um deles com a mão e aproximando-o de um outro, suspenso na forma de um pêndulo, é fácil perceber a atração ou repulsão entre eles, dependendo de suas polaridades.

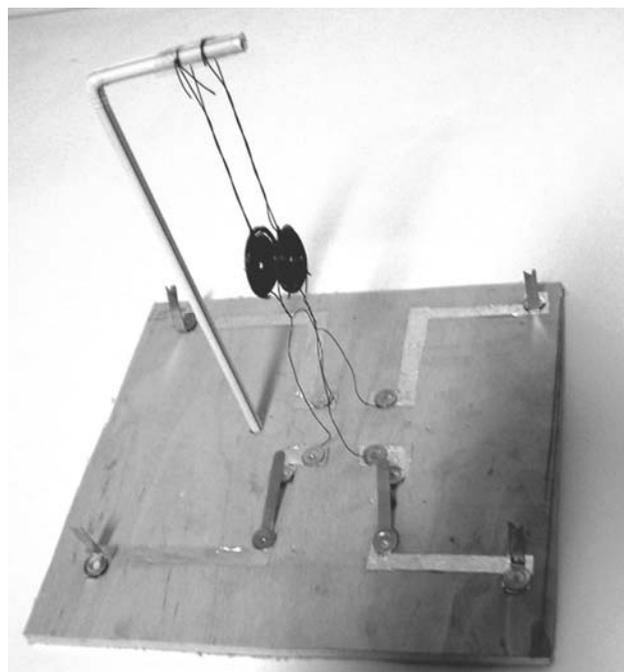


Figura 9 - Montagem final sem as pilhas.

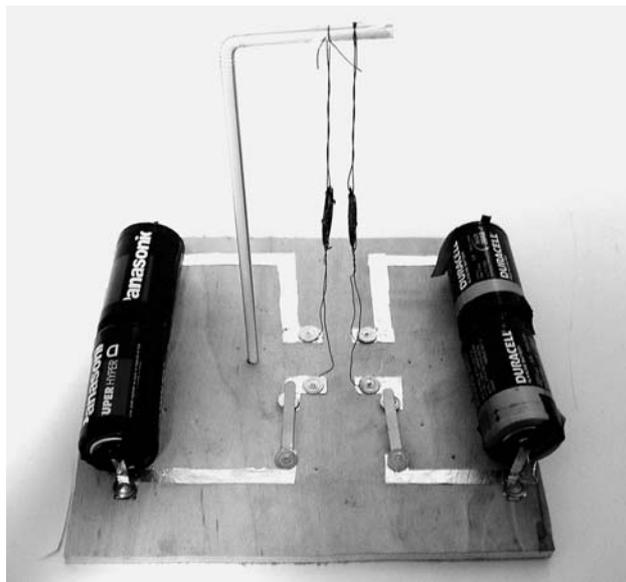


Figura 10 - Montagem final com as pilhas.

4. Demonstrando as interações magnéticas, eletromagnéticas e eletrodinâmicas

Já a interação eletromagnética é caracterizada pela atração e repulsão entre um ímã e um fio com corrente. Para observar esta interação na montagem proposta aqui, utiliza-se apenas uma espiral e seu circuito correspondente, juntamente com um ímã de geladeira. Aproxima-se o ímã da primeira espiral e nada acontece caso não passe corrente pela espiral. Agora pressiona-se o interruptor e mantém-se o circuito fechado. Observa-se uma atração ou repulsão da espiral, dependendo do sentido da corrente elétrica e da polaridade do ímã que faceia a espiral. Caso isto não aconteça, verifique se o circuito não está interrompido. Se invertermos a polaridade do ímã, teremos um efeito contrário. Também pode-se inverter o efeito mantendo sua polaridade, mas trocando a direção da corrente. Caso o efeito inicial seja de atração, ele continuará sendo de atração, caso se inverta tanto a polaridade do ímã quanto a direção da corrente. Para dar uma idéia das ordens de grandeza, medimos a corrente fluindo pelo circuito com um amperímetro e encontramos 1,3 A. Como a voltagem das duas pilhas em série era de 3 V, vem pela lei de Ohm que a resistência total de um circuito era de 2,3 Ω . Esta resistência era composta pela resistência interna das duas pilhas, mais a resistência da trilha de papel de alumínio, juntamente com a resistência de uma espiral em nosso circuito.

A eletrodinâmica é caracterizada por uma interação entre correntes. Isto é facilmente demonstrado com nossa montagem, utilizando os dois circuitos com as espirais em planos paralelos e eixos colineares, mas agora sem a utilização de qualquer ímã. Para que haja interação entre as espirais é necessário que circule cor-

rente elétrica por elas. Pressione simultaneamente os interruptores formados pelos grampos de latão. As espirais devem se unir ou se afastar, dependendo do sentido das correntes elétricas. Com esta montagem observa-se facilmente que correntes elétricas de mesmo sentido se atraem, enquanto que correntes opostas se repelem. Invertendo a polaridade de uma das pilhas, tem-se um efeito contrário. Isto é, se o efeito inicial era de atração, ele agora passa a ser de repulsão. Por outro lado, caso se inverta a direção da corrente nos dois circuitos, observa-se que o efeito inicial continua a existir, seja ele de atração ou de repulsão.

5. Considerações finais

Foi exatamente com esta experiência que Ampère observou pela primeira vez uma nova classe de fenômenos físicos, a interação entre correntes elétricas, que denominou de *eletrodinâmica*. Com este artigo e com a montagem aqui proposta, esperamos tornar a obra fundamental de Ampère mais conhecida pelos cientistas e estudantes.

Agradecimentos

JPMCC agradece à PRPG-Unicamp pelo apoio financeiro concedido através de uma bolsa de doutorado.

Referências

- [1] H.C. Oersted, *Cadernos de História e Filosofia da Ciência* **10**, 115 (1986).
- [2] J.P.M.C. Chaib e A.K.T. Assis, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **29**, 41 (2007).
- [3] A.-M. Ampère. *Annales de Chimie et de Physique* **20**, 60 (1822).
- [4] J. Lühr, *Im Labor der Physikgeschichte - Zur Untersuchung historischer Experimentalpraxis*, edited by P. Heering, F. Rießand C. Sichau (BIS der Carl von Ossietzky, Oldenburg, 2000), p. 135-156.
- [5] E.T. Whittaker, *A History of the Theories of Aether and Electricity, v. 1: The Classical Theories* (Humanities Press, Nova Iorque, 1973).
- [6] J.B. Biot and F. Savart, *Annales de Chimie et de Physique* **15**, 222 (1820).
- [7] A.-M. Ampère, *Annales de Chimie et de Physique* **15**, 170 (1820). Available at <http://www.ampere.cnrs.fr/>.
- [8] A.-M. Ampère, *Théorie Mathématique des Phénomènes Electro-dynamiques Uniquement Déduite de l'Expérience* (Éditions Jacques Gabay, Sceaux, 1990). Réimpression du Mémoire fondamental d'André-Marie Ampère paru en 1827 dans les, *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences de l'Institut de France, année 1823*, Tome VI, p. 175-388.
- [9] A.-M. Ampère, *Annales de Chimie et de Physique* **15**, 59 (1820). Available at: <http://www.ampere.cnrs.fr/>.