

Força Magnética Sobre Correntes Elétricas: Um Motor Linear

O magnetismo ou, de maneira mais simples, a ação atrativa e repulsiva originada nas vizinhanças de um material magnético, foi algo que sempre fascinou o homem, desde a sua descoberta na Magnésia, uma região da Ásia Menor. Naquela região foram identificadas algumas rochas, conhecidas como magnetitas e formadas por um óxido de ferro que apresentavam a propriedade de atrair outros materiais constituídos de ferro. A partir daí, passou-se a investigar a ação dessas pedras sobre outros materiais e sobre elas mesmas. Pode-se dizer que a primeira grande descoberta foi a observação de que o ferro e depois o aço adquirem propriedades semelhantes (magnéticas) quando aproximados a um ímã.

Mais fascinante ainda foi a observação feita por Hans C. Oersted em 1820, na qual uma corrente elétrica percorrendo um fio produziu efeitos magnéticos, detectados através de uma bússola.

Neste trabalho, apresentamos uma discussão do efeito de um campo magnético sobre uma corrente elétrica e como isto pode ser utilizado para a obtenção de trabalho mecânico. Também é apresentado um protótipo experimental para a demonstração do efeito acima. A montagem foi realizada com materiais extremamente simples e permite a observação de importantes características apresentadas na teoria.

Corrente Elétrica na Presença de um Campo Magnético

Em muitos textos de Eletromagnetismo, a ação de um campo magnético sobre uma corrente é ilustrada através do estudo do movimento de uma barra metálica (percorrida por uma corrente) sobre trilhos em uma região do espaço onde existe um campo magnético (Nussensveig, 1997; Halliday e Resnick, 1994). Em outros, este exemplo é apresentado como um exercício para os estudantes.

Hans C. Oersted observou, em 1820, que uma corrente elétrica percorrendo um fio produzia efeitos magnéticos, detectados através de uma bússola

Aqui, o exercício foi desenvolvido de maneira prática através da construção de um protótipo e, a partir dele, o

efeito foi estudado.

O campo de indução magnética B exerce uma força sobre cargas em movimento, a qual pode ser verificada experimentalmente e quantificada como proporcional à carga q e à velocidade v da partícula. Além disso, esta força deve ser perpendicular às direções da velocidade e do campo magnético. Ainda, a intensidade da força é proporcional ao seno do ângulo entre a direção do campo magnético e da velocidade. Dessa forma podemos escrever que

$$F = k q v B \sin \phi, \quad (1)$$

na qual k é uma constante positiva e dependente da escolha do sistema de medida (no MKS, $k = 1$).

O estudo do movimento de uma

.....
Reginaldo da Silva, Rodrigo P. Macedo, Marcelo G. de Souza e Adenilson J. Chiquito
 Departamento de Física
 Universidade Federal de São Carlos

Neste artigo é descrita a construção de um motor linear para a demonstração direta da ação de um campo magnético sobre uma corrente elétrica, ilustrando claramente os exemplos discutidos em aulas básicas de eletromagnetismo. Adicionalmente, foi incluída uma sofisticação permitindo que o motor funcione como um oscilador. Além disso, verificou-se a operação do motor como um gerador, como previsto pela Lei de Faraday.

partícula sob a ação de um campo magnético pode ser estendido ao caso de n partículas carregadas (por unidade de volume), por exemplo em um fio condutor. Vamos agora calcular a corrente elétrica e a força à qual estão sujeitos os elétrons neste fio condutor. Para simplificar, vamos estudar o que acontece em uma pequena parte do fio Δl , para depois estender a análise para todo o condutor. Supondo que as cargas percorrem um comprimento muito pequeno (infinitesimal) Δl em um fio cuja seção transversal tenha área A , a densidade de corrente (corrente por unidade de área) pode ser escrita como

$$j = -n q \langle v \rangle, \quad (2)$$

na qual $\langle v \rangle$ é a velocidade média das partículas. Pode-se definir agora uma "densidade de força", exercida sobre cada carga, como

$$f = -n q \langle v \rangle B \sin \phi = j B \sin \phi. \quad (3)$$

Levando em conta um volume $A \Delta l$ do fio, a força sobre uma carga neste volume é

$$dF = f A \Delta l = j A \Delta l B \sin \phi, \quad (4)$$

e como

$$i = j A, \quad (5)$$

chegamos à intensidade da força exercida por um campo magnético sobre um corrente, ou seja,

$$dF = i \Delta l B \sin \phi, \quad (6)$$

e a força total sobre a haste móvel será, portanto

$$F = i B \sin \phi (\Delta l_1 + \Delta l_2 + \Delta l_3 + \Delta l_4 \dots \Delta l_n). \quad (7)$$

Um exemplo usual de aplicação freqüentemente utilizado para ilustrar esta equação é aquele em que uma haste metálica móvel, de comprimento L , sobre dois trilhos, é percorrida por uma corrente constante i em uma região do espaço onde há um campo magnético como visto na Figura 1. É interessante notar que um exercício semelhante a este foi proposto na segunda fase da prova de Física do vestibular da Fuvest de 2003 (<http://www.fuvest.br>).

A partir da Eq. (7) pode-se, em princípio, calcular a força exercida por um campo magnético em uma dada corrente elétrica. A aplicação desta equação em nosso caso particular será

descrita juntamente com a análise e discussão dos resultados obtidos em nossos experimentos, dados a seguir.

Montagem e Discussão

Montagem

A idéia da montagem é fielmente baseada no modelo mostrado anteriormente. Assim, nosso interesse concentrou-se na construção de um protótipo que fosse uma "cópia" da Figura 1, evitando complicações de ordem técnica e permitindo ao estudante uma transposição visual direta do que é estudado em um livro-texto para a prática.

Inicialmente, foram dispostos os dois trilhos por onde deve rolar uma haste metálica por ação do campo magnético quando percorrida por uma corrente constante. Os trilhos foram contruídos usando uma cantoneira de alumínio de 1 mm de espessura e com comprimento de 15 cm e foram fixados por meio de parafusos em uma base de acrílico transparente, que serve de sustentação para todo o aparato (Figura 2). A haste metálica móvel foi construída com um tubo de alumínio de 3 mm de diâmetro externo. Vale ressaltar que a barra precisa ser de um material não ferromagnético, alumínio por exemplo, para que os efeitos do campo magnético sejam mais pronunciados sobre a corrente elétrica que flui através da haste. O campo magnético foi obtido usando um ímã circular (ímã de alto-falante) preso na base de

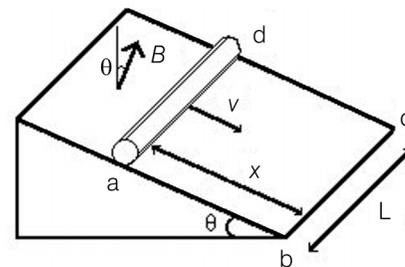


Figura 1. Exemplo de dispositivo no qual pode-se ver facilmente a ação do campo magnético sobre uma haste que conduz corrente elétrica imersa numa região do espaço onde existe um campo magnético.

campo magnético não atrapalha o nosso experimento, mas provoca uma variação da força dada pela Eq. (7), associada à variação do campo.

Na montagem do protótipo, algumas sofisticações, embora simples, foram implementadas com o objetivo de melhorar a visualização do efeito. Foi dada uma pequena inclinação à base, formando com a horizontal um ângulo $\theta = 3,5^\circ$. Não há nada de especial com o valor do ângulo usado, apenas foi escolhido o que apresentou melhores resultados. A inclinação tem um duplo efeito: primeiro, a ação do campo magnético sobre a corrente pode ser usada como uma fonte de trabalho mecânico, e isto pode ser observado claramente, uma vez que para a haste metálica subir a rampa, somente a força magnética está agindo e compensando a força peso; segundo, tem-se uma forma visual de mostrar o efeito sem duplas interpretações (alguém

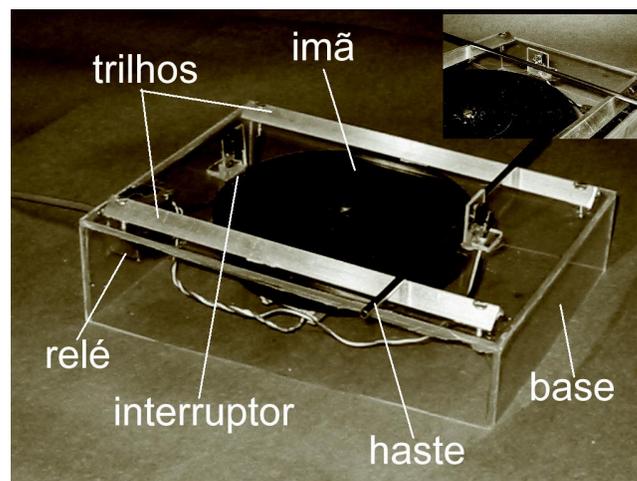


Figura 2. Montagem completa do aparato. Vê-se a base de acrílico com uma pequena inclinação, os trilhos e a haste. Preso no acrílico está o ímã circular. Em detalhe está um dos interruptores e a haste em repouso na posição mais baixa do trilho.

poderia sugerir que é o operador do sistema que inicia o movimento da haste sobre os trilhos!). Além da inclinação, um circuito elétrico baseado em um relé e em dois interruptores (retirados dos botões de leitores de disquetes 1,44 Mb usados) foram usados, como aparece na Figura 3. Este circuito tem a finalidade de interromper a corrente através da haste assim que esta atinge o ponto mais alto do plano inclinado. Neste caso, $F_{\text{mag}} = 0$, e a força peso faz a haste rolar até o ponto mais baixo dos trilhos, onde uma nova chave religa a corrente através da haste, fazendo $F_{\text{mag}} = i L B$, sendo L a distância entre os trilhos. Assim, temos uma oscilação aparente no movimento da haste (ver detalhes na Figura 2).

A alimentação do circuito de chaveamento e o fornecimento da corrente para a haste foram conseguidos com uma fonte de um computador antigo, mas nada impede a utilização de outras fontes de energia.

Discussão

Dada a Eq. (7) e de acordo com a Figura 1, percebe-se que na haste o fluxo de elétrons tem velocidade cuja direção é perpendicular ao campo B e assim $\sin \phi = \sin(90^\circ) = 1$, e a força resultante tem o sentido mostrado na figura anterior. Com isso, somando todos os termos Δl na Eq. (7), teremos a força resultante sobre o comprimento total (L) da haste:

$$F = i L B.$$

Devido à inclinação da rampa, a força resultante durante a subida agindo no sistema pode ser escrita como

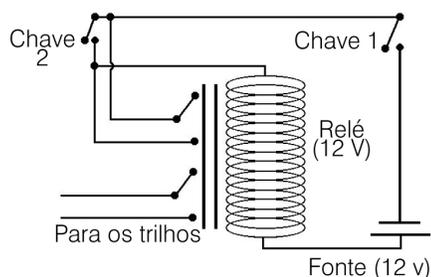


Figura 3. Detalhe do circuito elétrico que permite que a haste suba e desça a rampa automaticamente. A tensão de 12 V é retirada da fonte usada para alimentar os trilhos. O relé é do tipo comercial usado em circuitos eletrônicos. As chaves foram retiradas de leitoras de disquetes antigos.

(lembre-se, o ímã está preso na placa de acrílico inclinada, como mostrado na Figura 2)

$$F = i L B - m g \sin \theta, \quad (8)$$

e em uma situação de equilíbrio, o valor do campo magnético B local pode ser determinado, uma vez que a força resultante é nula:

$$B = \frac{m g \sin \theta}{i L}. \quad (9)$$

A Eq. (9) tem validade quando a haste fica imóvel em uma posição da rampa, onde a força magnética é contrabalanceada pela componente da força peso. O campo magnético não é uniforme sobre toda a superfície do ímã, e assim não podemos usar a medida da corrente como uma forma confiável de determinação da intensidade do campo, permitindo apenas uma aproximação para o valor de B . Em nosso experimento observamos que a haste mantinha-se em equilíbrio quando $i = 0,8$ A, $L = 1,47$ mm e $m = 6,78$ g. Usando estes valores e a Eq. (9) obtivemos $B = 35$ mT. Apesar de desconsiderarmos as forças dissipativas, como o atrito e a variação do campo magnético ao longo do trilho, o valor obtido está razoável se comparado com o medido pelo gaussímetro comercial (erro aproximado de 20%). A rigor, outro fator que deveria ser considerado como fonte de erro é a corrente induzida pelo movimento da barra na região com campo magnético, como explicado pela Lei da Indução de Faraday (Nussensveig, 1997).

Lembrando desta mesma Lei, durante o movimento de descida da haste, o nosso motor transforma-se em um gerador de corrente, pois a área varrida pela haste produz uma variação do fluxo de campo magnético, induzindo uma corrente nos trilhos! Esta corrente pode ser facilmente calculada: o fluxo do campo magnético através do retângulo 'abcd' (Figura 1) pode ser escrito como

$$\phi_B = B x L, \quad (10)$$

em que x é a distância percorrida pela haste durante o movimento, e o produto $x L$ indica a área que está sendo varrida pela haste ao mover-se. Para percorrer toda a distância x , a haste deve levar um tempo T com uma velocidade média x/T . Podemos dividir

a distância x em tamanhos Δx que podem ser tão pequenos quanto desejarmos. Neste caso, a haste leva um tempo Δt para deslocamento Δx , portanto com velocidade $\Delta x/\Delta t$. Usando este procedimento na Eq. (10), ou seja, calculando a variação do fluxo em função da velocidade, teremos

$$\frac{\Delta \phi_B}{\Delta t} = B L \frac{\Delta x}{\Delta t} = B L v.$$

O produto $B L v$ é exatamente a tensão (que chamaremos de ϵ) que aparece entre os trilhos devido ao movimento da haste sobre os mesmos. A corrente total que atravessa o circuito devida à diferença de potencial ϵ é simplesmente

$$i = \frac{\epsilon}{R} = \frac{B L v}{R}, \quad (11)$$

na qual R é a resistência do retângulo. Assim, basta determinar a velocidade e medir a resistência do circuito para calcular a corrente induzida pelo movimento da haste. Em 50 tomadas do tempo de descida, obtivemos $v \sim 1,5$ cm/s. Como o contato elétrico entre a haste e os trilhos não é bom durante o movimento, a resistência do circuito pode chegar a valores elevados (às vezes, da ordem de M Ω). Para determinar aproximadamente o valor da resistência do nosso circuito, conectamos um ohmímetro nos trilhos e fizemos 50 lançamentos da haste, obtendo $R \sim 17$ k Ω . Usando estes valores na Eq. (11) com $B = 35$ mT, encontramos $i = 8 \times 10^{-8}$ A, que é um valor relativamente pequeno.

Para verificar este valor de corrente, utilizamos um amperímetro de alta precisão, conhecido como eletrômetro (modelo Keithley 610C). Assim, medimos uma corrente induzida $i \approx 10^{-8}$ A, verificando assim que o movimento relativo entre um condutor e um campo magnético produz uma corrente elétrica e em bom acordo com nossos cálculos. O pulso de corrente no medidor, detectado durante a descida da haste pela rampa, não foi observado quando repetimos o mesmo procedimento sem o ímã sob a base, como é obviamente esperado pela Lei de Faraday.

Referências

- Nussensveig, H.M. *Física 3 - Eletromagnetismo*. São Paulo: Edgard Büchler, 1997.
Halliday, D. e Resnick, R. *Física 3*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1994.