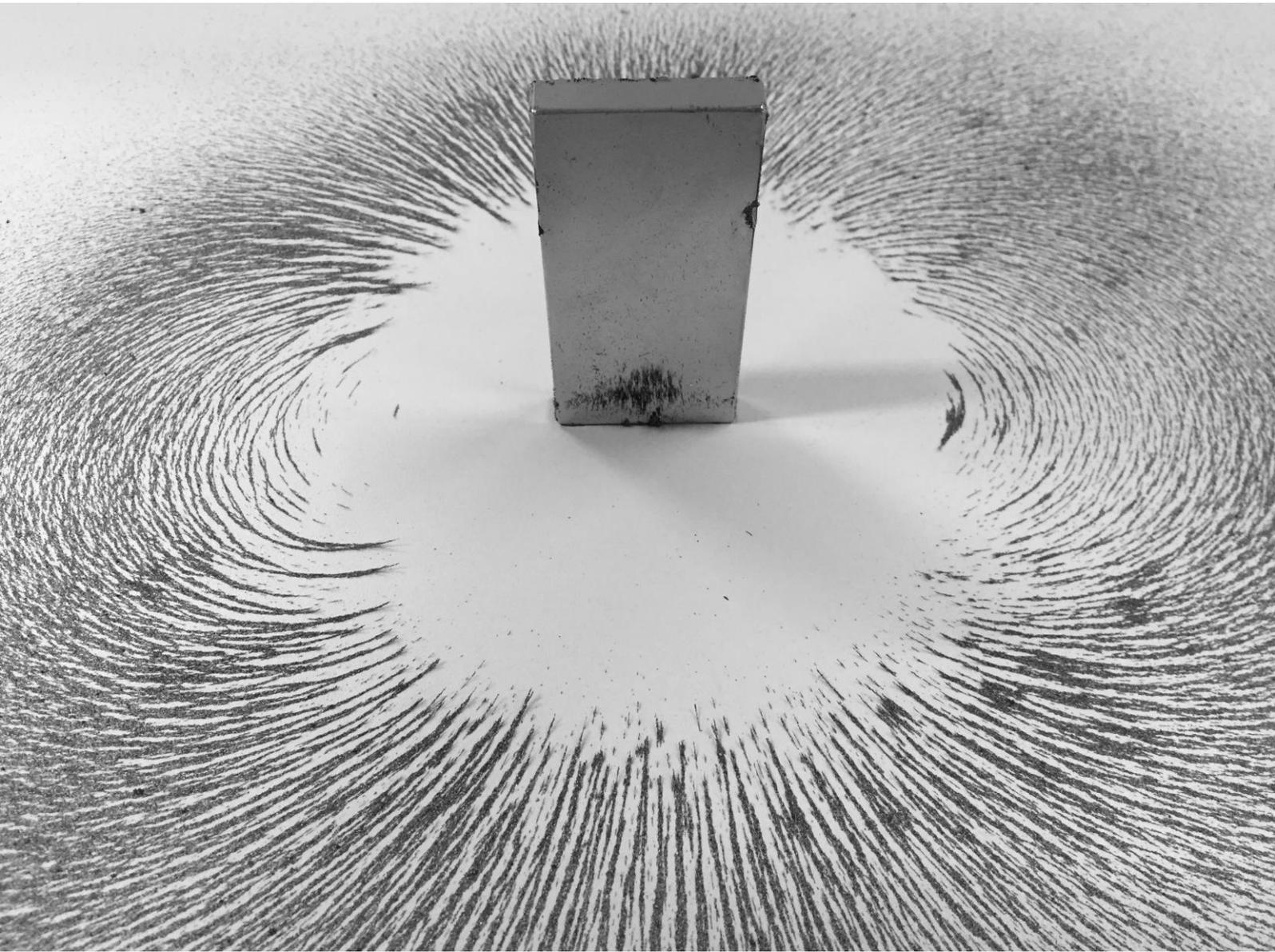


BREVE INTRODUÇÃO AO ELETROMAGNETISMO PARA O ENSINO MÉDIO: MAGNETISMO



VAGNER OLIVEIRA

ELIANE ANGELA VEIT

IVES SOLANO ARAUJO



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE FÍSICA

Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física



**Instituto
de Física**

BREVE INTRODUÇÃO AO ELETROMAGNETISMO PARA O ENSINO MÉDIO: MAGNETISMO

Vagner Oliveira

Eliane Angela Veit

Ives Solano Araujo

Porto Alegre – RS

2015

Ficha catalográfica elaborada pelo Setor de Processamento Técnico da Biblioteca Professora Ruth de Souza Schneider - Instituto de Física/UFRGS

O482p Oliveira, Vagner

Breve introdução ao eletromagnetismo para o Ensino Médio: magnetismo / Vagner Oliveira, Eliane Angela Veit, Ives Solano Araújo. – Porto Alegre: UFRGS - Instituto de Física, 2015.

Modo de acesso:

<http://www.if.ufrgs.br/gpef/textos/eletromagnetismo_oliveira_veit_araujo.pdf>.

ISBN: 978-85-64948-16-7

1. Ensino de Física 2. Ensino médio 3. Eletromagnetismo I. Veit, Eliane Angela. II. Araújo, Ives Solano. III. Título



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE FÍSICA

Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física



Este texto é produto do Mestrado Educacional em Ensino de Física, realizado pelo primeiro autor, na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), e tem como objetivo apresentar os conceitos fundamentais de Eletromagnetismo para que possam ser trabalhados em atividades de ensino-aprendizagem por alunos e professores de Ensino Médio.



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE FÍSICA
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física



ÍNDICE

CAPÍTULO 1: MAGNETISMO	6
CAPÍTULO 2: ORIGEM DO CAMPO MAGNÉTICO	14
CAPÍTULO 3: FORÇA MAGNÉTICA SOBRE CARGAS ELÉTRICAS	21
CAPÍTULO 4: FORÇA MAGNÉTICA SOBRE FIOS	28
CAPÍTULO 5: MAGNETISMO DA MATÉRIA	33
CAPÍTULO 6: INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA	39

CAPÍTULO I

MAGNETISMO

1. INTRODUÇÃO

Provavelmente você já teve a oportunidade de manusear um ímã e perceber que ele possui a propriedade de atrair objetos de ferro ou ligas metálicas compostas por esse material, e também já deve ter notado que ao aproximar dois ímãs, eles interagem e produzem uma força que pode ser atrativa ou repulsiva, dependendo da orientação como estão posicionados. Essa propriedade dos ímãs é decorrente do campo magnético existente em torno deles.

O planeta Terra também possui um campo magnético ao seu redor, sem o qual não seria possível a vida na forma em que a conhecemos. O campo magnético terrestre, chamado de magnetosfera, nos protege como um escudo das partículas de alta energia emitidas pelo Sol, como ilustra a Fig. 1.1.

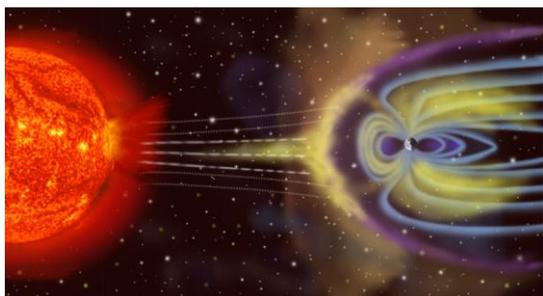


Figura 1.1: O campo magnético criado pela Terra nos protege das partículas de alta energia emitidas pelo Sol, atuando como escudo em relação a essas partículas carregadas pelo vento solar.

Fonte:

http://pt.wikipedia.org/wiki/Cintur%C3%A3o_de_Van_Allen

Em determinadas circunstâncias algumas partículas solares conseguem penetrar nos polos do planeta Terra, atingindo a nossa atmosfera. Quando essas partículas solares colidem com as partículas da atmosfera terrestre, provocam um fenômeno de emissão de luz em diferentes cores, chamado de aurora (boreal no hemisfério norte ou austral no hemisfério sul), que embora seja um dos espetáculos naturais mais bonitos da Terra, mostra a constante batalha entre o seu campo magnético e os ventos solares.

Você sabe desde quando se tem conhecimento das interações magnéticas?

Existem relatos que no século VI a.C. Tales de Mileto percebeu que um minério era capaz de atrair pequenos objetos de ferro. Esse minério foi chamado de magnetita (composto basicamente de óxido de ferro Fe_3O_4), justamente porque foi encontrado em Magnésia, antiga cidade da Grécia Antiga. Contudo, há indícios que os chineses já conheciam os fenômenos magnéticos há mais tempo que os gregos. Foram os chineses que inventaram a bússola, quando perceberam que uma colher de magnetita, suspensa livremente por um eixo, adquiria

naturalmente a direção que hoje conhecemos como norte-sul.

Mais tarde, em 1820, Hans Christian Oersted demonstrou uma relação entre a eletricidade e o magnetismo quando percebeu que a agulha de uma bússola era defletida pelo campo magnético gerado ao redor de um fio percorrido por corrente elétrica.

Os anos seguintes ficaram marcados pela busca do processo inverso, pois se corrente elétrica gera campo magnético (demonstrado por Oersted), seria possível que um campo magnético também gerasse corrente elétrica? Foi em 1831, onze anos depois da publicação de Oersted, que Michael Faraday mostrou que a variação de um campo magnético através de uma superfície condutora fechada gera corrente elétrica.

Esses e outros acontecimentos serão estudados nos capítulos de eletromagnetismo que veremos em algumas aulas.



Figura 1.2: Nos polos de um ímã existe maior concentração de limalhas de ferro porque o campo magnético é mais intenso.

2. ÍMÃS E SUAS CARACTERÍSTICAS

Os ímãs, naturais ou artificiais, podem ser encontrados em diversos formatos: em forma de barra, disco, cilindro, anel e outros.

Os ímãs são utilizados em diversas aplicações tecnológicas, como dinamos, motores e geradores eletromagnéticos, discos rígidos de computadores (HDs), etc. Nos geradores, ímãs macroscópicos giram ao redor de um enrolamento de espiras e variam o campo magnético através delas, produzindo corrente elétrica nesse condutor. Nos HDs de computadores, um disco rígido e metálico é recoberto por uma fina camada de material magnético (ímãs microscópicos). Para efetuar a gravação de uma determinada trilha, um pequeno eletroímã, que faz parte da cabeça de leitura e gravação do HD, aplica seu campo magnético sobre as moléculas de óxido de ferro da superfície de gravação, causando o alinhamento das partículas com esse campo magnético. Dependendo da orientação dos ímãs, temos um bit 0 ou um bit 1, que representam a menor quantidade de informação que pode ser armazenada ou transmitida.

Os ímãs possuem as seguintes propriedades:

2.1 Polos Magnéticos

Quando se aproxima um ímã de pequenos

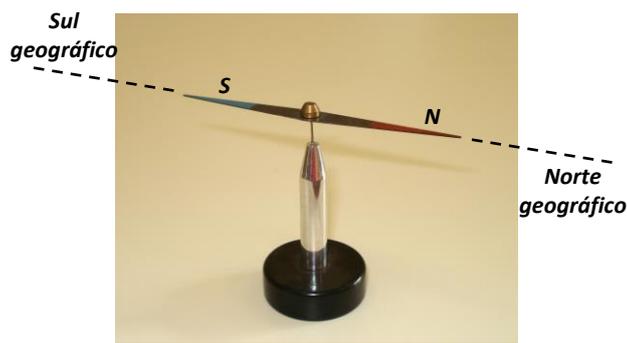


Figura 1.3: A fotografia mostra que uma agulha magnética, quando suspensa pelo seu centro de gravidade, alinha-se com o campo magnético terrestre.



Figura 1.4: A fotografia mostra o polo norte do ímã em barra atraindo o polo sul e repelindo o polo norte da agulha magnética.

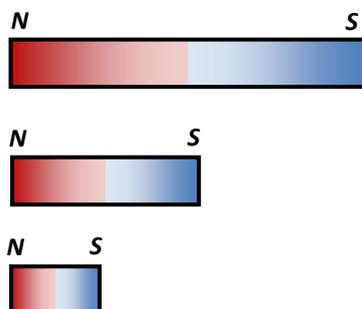


Figura 1.5: Não existe monopolo magnético, pois por mais que se divida um ímã, sempre permanecerá um polo norte e um polo sul.

pedaços de ferro, chamados de limalhas, percebe-se que eles são atraídos mais intensamente pelas extremidades desse ímã, como mostra a Fig. 1.2. Essas extremidades são chamadas de polos magnéticos, sendo uma delas o polo norte e a outra o polo sul.

2.2 Orientação Norte-Sul

Suspendendo um ímã de forma que ele possa girar livremente, percebe-se que ele naturalmente se alinha com a direção norte-sul da Terra. A extremidade que aponta para o Norte geográfico é chamada, por convenção, de polo norte do ímã, e a extremidade que aponta para o Sul geográfico é chamada de polo sul desse ímã. A Fig. 1.3 ilustra essa característica.

2.3 Atração e repulsão

Polos magnéticos de mesmo tipo se repelem, enquanto polos magnéticos de tipos diferentes se atraem. Veja a Fig. 1.4.

A intensidade da força magnética, tanto atrativa como repulsiva, entre dois polos magnéticos, varia com o inverso do quadrado da distância entre eles, de modo semelhante ao que ocorre com a força elétrica entre duas cargas elétricas puntiformes (Lei de Coulomb).

Por exemplo: dois polos magnéticos de diferentes ímãs estão distantes 10 cm um do outro e a interação entre eles produz uma força magnética de intensidade 4 N. Se os polos forem agora afastados para a distância de 20 cm (duas vezes maior que a inicial), a intensidade da força magnética entre eles diminuirá para 1 N, quatro vezes menor que a força anterior, justamente porque ao aumentar a distância entre os polos magnéticos em duas vezes, a intensidade da força deve diminuir com o quadrado da distância (quatro vezes menor que a força inicial).

2.4 Inseparabilidade dos polos

Partindo-se ao meio um ímã em forma de barra, por exemplo, obteremos dois novos ímãs, cada um deles com os polos norte e sul. Se repetirmos o mesmo processo, partindo mais uma vez um dos pedaços, obteremos outra vez dois novos ímãs, apesar de menores que os iniciais, como esquematizado na Fig. 1.5.

Mesmo que continuemos a quebrar esses ímãs em duas partes até o nível microscópico, surgirão dois novos

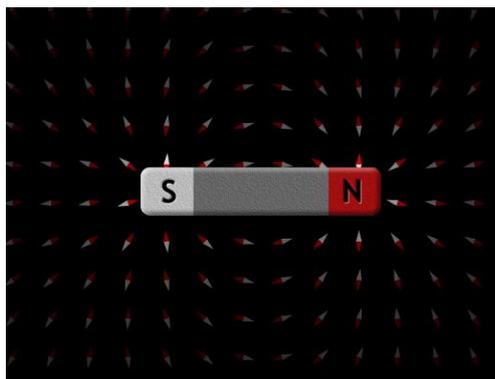


Figura 1.6: As pequenas agulhas magnéticas distribuídas no plano de fundo da figura se alinham com a direção do campo magnético gerado pelo ímã nas posições em que as agulhas se encontram.

¹Obtida a partir da simulação computacional encontrada em:
http://phet.colorado.edu/sims/faraday/magnets-and-electromagnets_pt.jnlp



(a)



(b)

Figura 1.7: (a) As limalhas se distribuem de forma a tangenciar a direção do campo magnético gerado pelo ímã. (b) A orientação da bússola comprova a direção tangente das linhas de indução em relação ao campo magnético.

ímãs com polos norte e sul. Até o momento, nunca foi encontrado um monopolo magnético, ou seja, apenas um polo norte ou apenas um polo sul, isolado na natureza, apesar de existir monopolo elétrico (carga elétrica, positiva ou negativa, isolada).

3. CAMPO MAGNÉTICO

Quando você estudou eletrostática deve ter compreendido a ideia de campo elétrico, como uma região do espaço que se modifica pela presença de uma ou mais cargas elétricas. Teoricamente o campo elétrico tem alcance infinito; na prática, entretanto, podemos nos concentrar numa região de influências elétricas, ou seja, uma carga de prova inserida nessa região do espaço sofre ação de força elétrica não desprezível. Com o campo magnético a situação é bastante semelhante. Qualquer que seja a distância de um objeto de ferro a um ímã haverá interação entre eles, porém somente dentro da chamada “região de influências” do ímã essa interação será relevante, indicando, dessa forma, existência de campo magnético ao seu redor.

A direção do campo magnético gerada por um ímã pode ser revelada com o auxílio de limalhas de ferro ou de uma bússola.

A agulha magnética da bússola, por ser imantada, se alinha com a direção de um campo magnético existente na posição em que for colocada. A Fig. 1.6¹ mostra um ímã em barra e pequenas agulhas magnéticas que adquirem a mesma direção do campo magnético em torno desse ímã, demonstrando o padrão de orientação do campo magnético.

Na Fig. 1.7 (a) vê-se uma fotografia de limalhas de ferro em torno de um ímã. As limalhas se comportam como minúsculas bússolas e também se alinham com a direção do campo magnético. O padrão de distribuição das agulhas e das limalhas de ferro em volta do ímã nos leva a introduzir a ideia de “linhas de campo magnético” ou “linhas de indução magnética”, que são entidades geométricas utilizadas para representar a orientação de um campo magnético.

Para identificar o sentido das linhas de indução pode-se usar uma bússola, como na Fig. 1.7 (b) O norte da agulha magnética indica o sentido do campo gerado pelo ímã em cada posição em que a bússola é colocada.

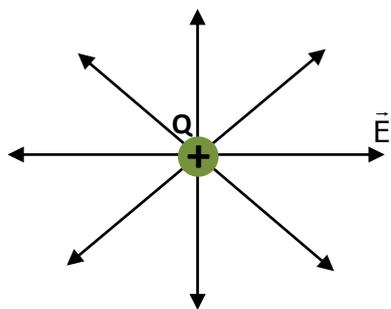


Figura 1.8: As linhas que representam o campo elétrico de uma carga solitária são abertas e radiais, saindo da carga positiva.

A ideia das linhas de campo magnético é muito semelhante a das linhas de campo elétrico (ou linhas de força), que são linhas imaginárias tangentes ao campo elétrico existente em cada ponto da região do espaço representada.

A orientação das linhas de força é estabelecida pela força elétrica que atuaria sobre uma carga de prova positiva que fosse colocada em algum ponto desse campo elétrico. Então, se uma carga de prova positiva for inserida em algum ponto do campo elétrico mostrado na Fig. 1.8, a força elétrica sobre ela estará orientada radialmente e se afastando da carga; as linhas de força, portanto, acompanham essa orientação.

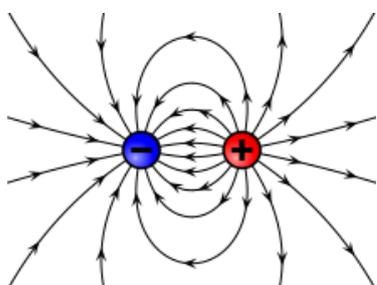


Figura 1.9: As linhas de força de duas partículas com cargas de mesmo módulo e sinais opostos saem da partícula positiva e terminam na partícula negativa.

Dessa forma, fica fácil compreender que se a carga geradora do campo elétrico for negativa, as linhas de força estarão orientadas radialmente se aproximando dela, uma vez que a carga de prova positiva será atraída pela carga geradora, negativa.

As linhas de força para um dipolo elétrico podem ser vistas na Fig. 1.9.

Fonte:

http://en.wikipedia.org/wiki/Electric_field

Como não foram observados monopolos magnéticos, a configuração mais simples que existe para a linha de indução magnética é a mostrada na Fig. 1.10. Por convenção, costuma-se dizer que elas saem do polo Norte e chegam ao polo Sul, na parte externa do ímã, enquanto saem do Sul e chegam ao Norte na parte interna.

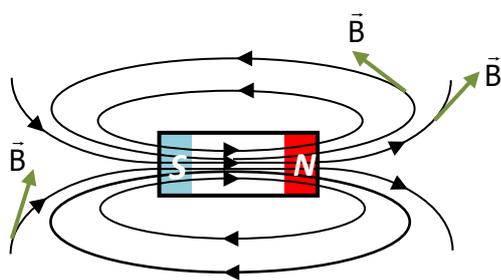


Figura 1.10: As linhas de indução magnética, que representam o campo magnético do ímã, são linhas fechadas que saem do polo norte e vão no sentido do polo sul, na parte externa do ímã. Já na sua parte interna, as linhas saem do polo sul e vão no sentido do polo norte do ímã. \vec{B} é utilizado para representar o campo magnético.

As duas bússolas mostradas na fotografia da Fig. 1.11 possibilitam conhecer em qual extremidade do ímã está o polo norte e o polo sul. Sabendo que a extremidade vermelha das agulhas magnéticas aponta para o norte da Terra na ausência de qualquer outro campo magnético, e lembrando que polos magnéticos de tipos diferentes se atraem, inferimos que a extremidade direita do ímã é o polo sul, uma vez que está atraindo o polo norte magnético da bússola. Consequentemente, na extremidade esquerda do ímã está o seu polo norte. Sendo assim, podemos afirmar que as linhas de indução desse campo magnético saem do polo esquerdo e vão no sentido do polo direito do ímã, em sua parte externa.

3.1 Características das linhas de indução magnética

As quatro características das linhas de indução magnética que serão citadas a seguir estão ilustradas na



Figura 1.11: A distribuição das limalhas de ferro e a orientação da agulha magnética das bússolas evidenciam seus alinhamentos com a direção do campo magnético.

Fig. 1.10.

1ª. Por convenção, na parte externa do ímã as linhas saem do polo norte e vão no sentido do polo sul, enquanto na parte interna elas saem do sul e vão no sentido do norte.

2ª. As linhas de indução magnética tangenciam o campo magnético em cada ponto do espaço.

3ª. A concentração de linhas de indução magnética é maior, onde o campo magnético é mais intenso.

4ª. Duas linhas de indução magnética nunca se cruzam. Se isso fosse possível, haveria no ponto de intersecção duas possíveis direções para o campo magnético. Isso seria o mesmo que dizer que uma bússola colocada nesse ponto, poderia se alinhar em duas diferentes direções de campo magnético.

4. CAMPO MAGNÉTICO UNIFORME

Entre os “braços” de um ímã em forma de “U”, pode-se observar que o vetor campo magnético é uniforme, ou seja, possui mesmo módulo, direção e sentido. Veja a fotografia da Fig. 1.12.

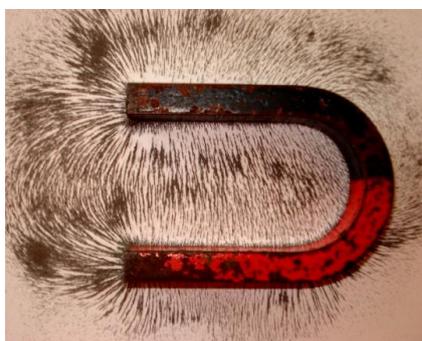


Figura 1.12: Entre os “braços” do ímã o vetor campo magnético é aproximadamente uniforme. Com o alinhamento das limalhas de ferro em relação ao campo magnético, percebemos que, no interior do ímã, as linhas de campo são aproximadamente paralelas e de mesmo sentido; fora do ímã, as linhas mostram que o campo magnético não é uniforme.

5. CAMPO MAGNÉTICO DA TERRA

A Terra se comporta como se fosse um grande ímã. Possui campo magnético que pode ser representado por linhas de indução que saem do polo magnético norte e chegam ao polo magnético sul.

Analisando a Fig. 1.13, percebemos que as linhas de indução saem de uma região próxima ao polo Sul da Terra e entram em outra próxima ao polo norte terrestre. Dessa forma, fica fácil compreender a razão pela qual a extremidade norte da agulha imantada de uma bússola aponta para o norte terrestre: é porque lá encontra-se o polo sul do campo magnético da Terra, e polos magnéticos de tipos diferentes se atraem.

Uma bússola não aponta exatamente para o norte da Terra, mas sim para uma região muito próxima. Isso ocorre pelo fato de que o eixo de rotação da Terra e o eixo magnético não coincidem. O desvio entre o norte geográfico e a orientação da bússola chama-se declinação magnética. Veja Fig. 1.14.

Atualmente, a ideia mais aceita para a existência do campo magnético terrestre é de que há corrente elétrica no centro da Terra e seu campo é semelhante ao

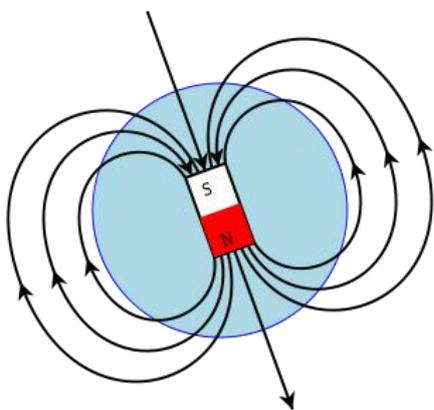


Figura 1.13: Assim como num ímã em barra, as linhas de indução magnética saem do polo norte magnético da Terra e chegam ao polo sul. Logo, o polo sul magnético está em uma região próxima ao polo norte da Terra, enquanto o polo norte magnético está em região próxima ao polo sul terrestre.

Fonte:

http://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_field

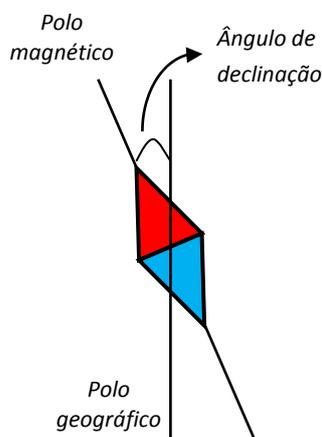


Figura 1.14: O norte de uma bússola não aponta exatamente para o polo norte da Terra (também chamado de polo norte verdadeiro).

gerado por uma espira circular percorrida por corrente elétrica, assunto que será abordado nas próximas aulas.

6. REVISÃO

Através deste texto aprendemos algumas características dos ímãs como existência de polos magnéticos, atração magnética entre polos de tipos diferentes e inseparabilidade entre os polos norte e sul de um ímã.

A representação do campo magnético ao redor de um ímã pode ser feita com o auxílio de uma bússola ou de limalhas de ferro, que se alinham com a direção do campo magnético em cada posição ao redor do ímã.

7. VÍDEOS

Para que você possa se aprofundar nesses assuntos, sugerimos os seguintes vídeos:

- <http://www.youtube.com/watch?v=kdomJQvxPZE>
- <http://www.youtube.com/watch?NR=1&v=QGqnREV7cdc>
- <http://www.youtube.com/watch?v=pBxgCy3hvRE>
- <http://www.youtube.com/watch?v=fVa20c46tN8>
- <http://www.youtube.com/watch?v=dIDWTpLMDYc>
- <http://www.youtube.com/watch?v=1OrPCNVSA4o>
- <http://www.youtube.com/watch?v=tD97Vhna-ic>

8. BIBLIOGRAFIA

BISCUOLA, G. J.; BÔAS, N. V.; DOCA, R. H. *Física*, vol. 3. Ed. 1. São Paulo: Saraiva, 2010.

BÔAS, N. V.; DOCA, R. H.; BISCOOLA, G. J. *Tópicos de Física*, vol. 3. Ed. 16 – reform. e ampl. São Paulo: Saraiva, 2001.

CARRON, W.; GUIMARÃES, O. *As Faces da Física: volume único*. Ed. 3. São Paulo: Moderna, 2006

GASPAR, A. *Compreendendo a Física*, vol. 3: *Eletromagnetismo e Física Moderna*. Ed. 1. São Paulo: Ática, 2010.

GASPAR, A. *Física: Eletromagnetismo e Física Moderna*, vol. 3. Ed. 1. São Paulo: Ática, 2003.

GRF - Grupo de Reelaboração do Ensino de Física. *Física 3: eletromagnetismo*. Ed. 2. São Paulo: Edusp, 1995.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; KRANE, K. *Física*, vol. 3. Ed. 4. Rio de Janeiro: LTC, 1992.

HEWITT, P. G. *Física Conceitual*. Ed. 9 – Porto Alegre: Bookman, 2002.

RAMALHO J, F.; GILBERTO, N.; ANTÔNIO, P. *Os Fundamentos da Física*, vol. 3. Ed. 8 – ver. e ampl. São Paulo: Moderna, 2003

SANT'ANA, B.; MARTINI, G.; REIS, H. C.; SPINELLI, W. *Conexões com a Física*, vol.: *Eletricidade – Física do Século XXI*. Ed. 1. São Paulo: Moderna, 2010.

SHIGEKIYO, C. T.; KAZUHITO, Y.; FUKE, L. F. *Os Alicerces da Física*, vol. 3: *eletricidade*. Ed. 14. São Paulo: Saraiva, 2007.

TIPLER, P. A.; MOSCA, G. *Física para cientistas e engenheiros*, vol. 2: *eletricidade e magnetismo; ótica* Ed. 5. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

CAPÍTULO II

ORIGEM DO CAMPO MAGNÉTICO

1. INTRODUÇÃO

Quando analisamos a matéria em nível microscópico, podemos considerar que um elétron, ao descrever uma órbita circular ao redor do núcleo, gera uma pequena intensidade de corrente elétrica, que cria ao seu redor um campo magnético. Dessa forma, podemos dizer que o movimento orbital do elétron é um dos responsáveis pela origem do campo magnético em alguns materiais. O magnetismo da matéria será estudado mais detalhadamente no capítulo V, mas podemos adiantar que outro fator que origina campo magnético em determinados materiais é uma grandeza chamada momento magnético intrínseco (também denominada spin, que você já deve ter estudado nas aulas de Química).

Um campo magnético também pode ser originado variando o campo elétrico ao longo de uma espira, mas, por ora, vamos considerar apenas a geração de campo magnético ao redor de um fio condutor percorrido por corrente elétrica.

Hans Christian Oersted, em 1820, realizou uma experiência que demonstra uma forte ligação entre eletricidade e magnetismo. Em uma de suas aulas de ciências naturais, enquanto mostrava o aquecimento produzido em um fio condutor devido à passagem de corrente elétrica, percebeu que a agulha de sua bússola, que estava próxima à experimentação, sofria deflexão. Após certo período de estudo, Oersted afirmou que a passagem de corrente elétrica através do fio estava criando um campo magnético no espaço ao seu redor que, associado ao campo magnético da Terra, desviava a agulha da bússola em certa direção. Estudos posteriores levaram à conclusão que sempre que uma corrente elétrica atravessar um condutor, independente do seu formato, cria-se ao seu redor um campo magnético.

Na verdade, basta que haja o movimento de cargas elétricas para que seja criado um campo magnético, sem a necessidade de um condutor. Como corrente elétrica é o movimento ordenado de cargas elétricas, a passagem de corrente em um fio gera campo magnético, como observado por Oersted.

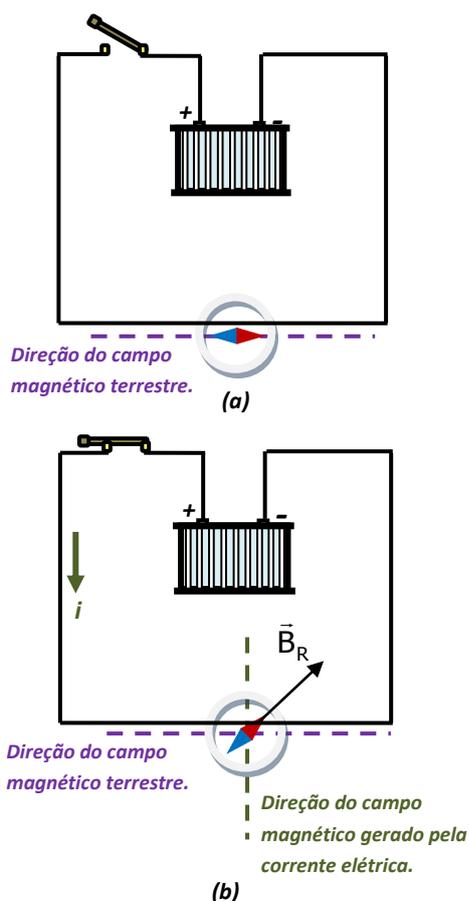


Figura 2.1: (a) Com o circuito aberto, não passa corrente elétrica pelos fios e a agulha da bússola encontra-se alinhada com o campo magnético da Terra. (b) A corrente elétrica que passa pelo circuito gera um campo magnético que, somado ao campo magnético terrestre, desvia a agulha magnética da bússola. B_R é o campo magnético resultante.

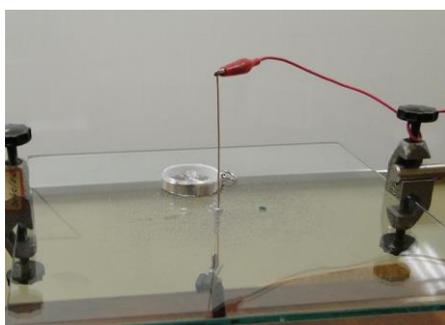


Figura 2.2: A fotografia mostra um fio retilíneo, de cobre, por onde haverá passagem de corrente elétrica. Ele está disposto perpendicularmente ao plano horizontal, no qual foi colocada uma bússola para verificar a existência de campo magnético.

Podemos inferir que além de ímãs, movimentos de cargas elétricas (ou correntes elétricas) também podem ser considerados fontes de campo magnético.

A Fig. 2.1(a) mostra esquematicamente um circuito elétrico bastante simples, contendo uma bateria (gerador), fios de ligação e uma chave interruptora aberta, que impede a passagem de corrente elétrica pelo circuito. Uma bússola está posicionada embaixo de um dos fios do circuito e encontra-se alinhada com o campo magnético terrestre. Quando a chave interruptora é fechada, corrente elétrica passa pelo circuito e gera campo magnético perpendicular ao fio condutor que, somado ao campo magnético da Terra, deflete a agulha em determinada direção. Veja a Fig. 2.1(b).

2. CAMPO MAGNÉTICO AO REDOR DE FIO RETILÍNEO

Um fio condutor, retilíneo e longo, está disposto perpendicularmente a um plano horizontal como mostra a Fig. 2.2.

Fazendo corrente elétrica passar pelo fio, criamos campo magnético ao redor desse condutor. A direção do campo magnético gerado pela corrente elétrica pode ser observada com o auxílio de limalhas de ferro distribuídas sobre o plano horizontal. As limalhas se alinharão com a direção do campo magnético em cada posição do plano, e seu padrão de distribuição representará as linhas de campo. O alinhamento das limalhas ocorre porque o ferro, na presença de campo magnético externo razoavelmente forte, se magnetiza e passa a se comportar de forma semelhante à agulha magnética de uma bússola.

Como podemos observar na Fig. 2.3, as linhas de campo magnético são circunferências concêntricas (possuem o mesmo centro) no plano horizontal, estando o fio no centro dessas curvas.

Se uma bússola for movimentada ao redor do fio, a agulha magnética mudará de orientação, indicando que o sentido do campo magnético é diferente em cada posição. Assista ao Vídeo 2.1.

O sentido dessas linhas de campo geradas ao redor do fio pode ser determinado através de uma regra prática, chamada de **regra da mão direita**, em que o polegar aponta no sentido convencional da corrente elétrica e os demais dedos envolvem o condutor, revelando



Figura 2.3: A fotografia mostra a disposição das limalhas de ferro ao redor de um fio retilíneo percorrido por corrente elétrica. Consideramos que a configuração das limalhas forma linhas de campo magnético circulares ao redor do fio.



Vídeo 2.1: Demonstração das linhas de campo magnético ao redor de fio retilíneo.

a orientação das linhas de campo magnético, como mostra a Fig. 2.4.

Usando a regra da mão direita para um fio retilíneo estendido no plano da página, vamos obter o campo magnético entrando nesse plano de um lado do fio e saindo do outro.

Para simbolizar uma grandeza física que está perpendicular a um plano e entrando nele, utilizamos o símbolo \otimes ; e para representar uma grandeza perpendicular a um plano e saindo dele, utilizamos o símbolo \odot . Veja a Fig. 2.5. Vale destacar que essa simbologia é uma maneira de representar uma flecha (representação de um vetor) que entra ou sai perpendicularmente de um plano. A Fig. 2.6 mostra esquematicamente uma flecha e dois observadores, A e B. O observador A enxerga a parte de trás da flecha (com forma de “x”), e a flecha entrando em um plano. Já o observador B enxerga a parte da frente da flecha (com forma de “•”) e saindo do plano.

A determinação da intensidade do campo magnético em um ponto P, afastado de uma distância r do fio condutor, é dada pela Lei de Ampère. A intensidade do campo magnético gerado por um fio longo é proporcional a $(i / 2\pi r)$. A constante de proporcionalidade é a chamada permeabilidade magnética, que depende do meio em que existe o campo magnético. No vácuo, a permeabilidade, μ_0 , tem valor $4\pi \cdot 10^{-7} T \cdot m / A$.

$$B = \frac{\mu_0 \cdot i}{2 \cdot \pi \cdot r} \quad (\text{Eq. 2.1})$$

A unidade de medida de campo magnético, no Sistema Internacional, é o tesla (T), em homenagem a Nikola Tesla, cientista que contribuiu com estudos na área do Eletromagnetismo.

A Tab. 2.1 mostra valores aproximados de campo magnético gerado em diferentes localizações.

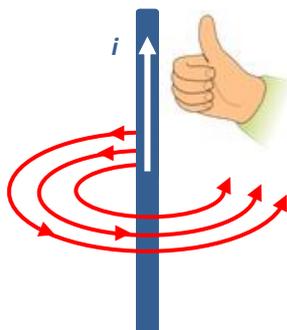


Figura 2.4: Regra da mão direita: fazendo-se o polegar apontar no sentido da corrente elétrica e os demais dedos envolverem o condutor, indicando a orientação das linhas do campo magnético gerado pela corrente elétrica.

Fonte:
<http://en.wikipedia.org/wiki/File:Manoderecha.svg>.

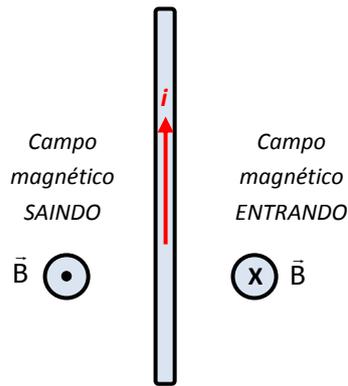


Figura 2.5: Representação do campo magnético entrando e saindo de um plano.

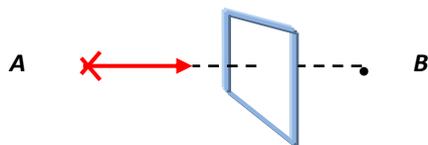


Figura 2.6: Quando a flecha entra no plano da figura, o observador A enxerga “x”, e quando a flecha sai do plano, B enxerga “•”.

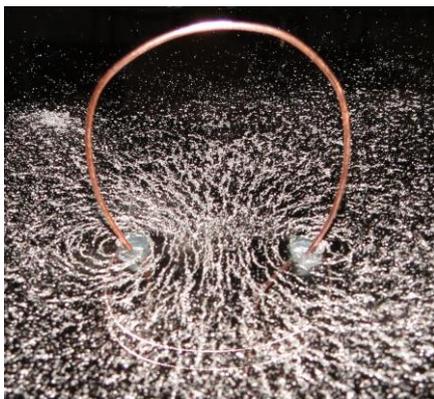


Figura 2.7: A fotografia mostra as linhas de campo magnético geradas ao redor de uma espira circular percorrida por corrente elétrica.

Tabela 2.1: Valores típicos para campos magnéticos.

Fonte de Localização	Valor do campo magnético (Tesla)
Na superfície de uma estrela de nêutrons	10^8
Nas proximidades de um ímã supercondutor	5
Nas proximidades de um grande eletroímã	1
Nas proximidades de uma pequena barra imantada	10^{-2}
Campo magnético terrestre em sua superfície	10^{-4}
No espaço interestelar	10^{-10}

3. CAMPO MAGNÉTICO EM ESPIRAS CIRCULARES

Um fio condutor curvado de modo a formar um anel circular é o que se denomina de espira circular. Quando esse condutor for percorrido por corrente elétrica, certamente será gerado campo magnético no espaço ao seu redor e as linhas de campo magnético tomarão a configuração mostrada na Fig. 2.7.

A orientação das linhas de campo magnético ao redor da espira circular também pode ser determinada através da **regra da mão direita**, como mostra a Fig. 2.8(a) e (b).

A Fig. 2.9 mostra, de perfil, uma espira circular percorrida por corrente elétrica e as linhas de campo magnético geradas. Percebe-se que as linhas descrevem uma trajetória fechada, semelhante às de ímã em forma de barra. Dessa forma, podemos inferir que esse condutor se comporta como se possuísse em uma de suas faces um polo magnético norte, e na outra face, um polo magnético sul.

Na figura considerada, a face direita se comporta como polo norte, uma vez que as linhas de campo magnético saem por essa região, enquanto a face da esquerda é a face sul, já que as linhas de campo entram por essa região.

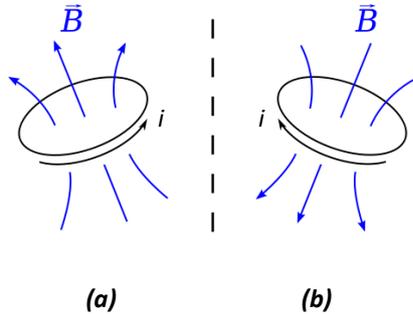


Figura 2.8: (a) polegar aponta no sentido da corrente e os demais dedos, ao envolver o condutor, entram pela face de baixo da espira e saem pela face de cima, indicando o sentido das linhas de campo magnético. (b) ao mudar o sentido da corrente elétrica, inverte o sentido das linhas de campo magnético.

Fonte:

<http://en.wikipedia.org/wiki/File:BlAPseudovecto>

Quando o plano da espira está voltado para o observador, pode-se estabelecer a polaridade magnética das faces da espira analisando o sentido da corrente elétrica. A Fig. 2.10(a) mostra uma espira circular sendo percorrida por corrente elétrica no sentido anti-horário. Utilizando a regra da mão direita, percebemos que as linhas de campo magnético estão saindo por essa face da espira, indicando a existência de um polo magnético norte, pois, como foi estudado no capítulo anterior, as linhas de campo magnético saem do polo norte de um ímã, na parte externa desse condutor.

Já na Fig. 2.10(b), a situação é oposta. Corrente elétrica percorre a espira no sentido horário, gerando linhas de campo que entram pela face da espira voltada para o observador, indicando a existência de um polo magnético sul.

A intensidade do campo magnético no centro da espira circular é diretamente proporcional à intensidade da corrente elétrica e inversamente proporcional ao raio (R) da espira e pode ser determinada por:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot i}{2R} \quad (\text{Eq. 2.2})$$

4. CAMPO MAGNÉTICO EM UM SOLENOIDE

Quando um fio retilíneo for curvado em forma de hélice ou espiral, adotar a forma de um solenoide. Se passar corrente elétrica por este condutor, o campo magnético apresentará a configuração mostrada na Fig. 2.11.

A orientação das linhas de campo magnético também é obtida a partir da regra da mão direita. Ao aplicar a regra, percebe-se que no interior do solenoide as linhas de campo são praticamente paralelas, igualmente espaçadas e de mesmo sentido, caracterizando um campo magnético praticamente uniforme nessa região.

Na parte externa do solenoide, o campo é bastante intenso nas extremidades, o que pode ser confirmado pela concentração de linhas de campo nesta região. Longe das extremidades, o campo magnético é muito fraco se considerarmos um solenoide real; já se estivermos considerando um solenoide ideal (comprimento muito maior que o diâmetro das espiras), o campo magnético é nulo. O comportamento desse condutor, quando percorrido por corrente elétrica é semelhante a um

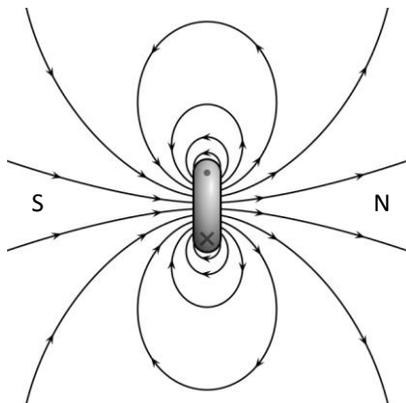


Figura 2.9: A face da espira que possui linhas de campo magnético saindo de seu plano comporta-se como polo magnético norte, enquanto a face que possui linhas entrando, comporta-se como polo magnético sul.

Fonte:

http://en.wikipedia.org/wiki/File:VFPT_dipole_magnetic3.svg

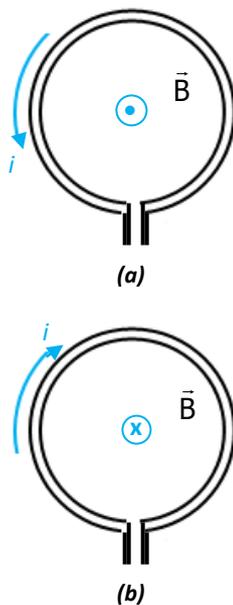


Figura 2.10: (a) A espira percorrida por corrente elétrica no sentido anti-horário, tem a face voltada ao observador comportando-se como polo magnético norte. (b) A espira percorrida por corrente elétrica no sentido horário, tem a face voltada ao observador comportando-se como polo magnético sul.



Figura 2.11: Solenoide percorrido por corrente elétrica e a configuração das linhas de campo magnético no seu interior.

ímã em forma de barra, possuindo em uma de suas extremidades um polo magnético norte, e na outra extremidade, um polo magnético sul. A extremidade do solenoide que possui linhas de campo entrando nessa região se caracteriza por um polo magnético **sul**, enquanto que a extremidade que possui linhas saindo, se comporta como polo magnético **norte**.

A intensidade do campo magnético no interior do solenoide é diretamente proporcional à intensidade da corrente elétrica (i) e ao número (N) de espiras que compõem esse condutor, e ainda inversamente proporcional ao comprimento (ℓ) do solenoide. Pode-se determinar tal intensidade através de:

$$B = \frac{N \cdot \mu_0 \cdot i}{\ell} \quad (\text{Eq.2.3})$$

Podemos, portanto, atingir altos valores de campo magnético com o uso de um solenoide; basta, para isso, utilizar um solenoide com um grande número de espiras e com altos valores de corrente elétrica.

Se no interior de um solenoide for inserido um material ferromagnético (ferromagnetismo será estudado no capítulo V desse curso, mas por ora, podemos considerar um material ferromagnético como um objeto de ferro), constitui-se um eletroímã, e o campo magnético gerado torna-se bem maior.

Um eletroímã é bastante utilizado para o transporte e seleção de sucatas de ferro, em disjuntores, amplificadores de música, caixas de som, fechaduras magnéticas, campainhas elétricas, etc. Veja a Fig. 2.12(a) e (b).

5. REVISÃO

Nesse capítulo discutimos o surgimento de campo magnético ao redor de fios condutores percorridos por corrente elétrica. Em particular, foram abordados três tipos de condutores (fio retilíneo, espira circular e solenoide) e as respectivas configurações do campo magnético ao redor de cada um deles.

6. VÍDEOS

Para que você possa se aprofundar nesses assuntos, sugerimos os seguintes vídeos:

- <http://www.youtube.com/watch?v=axud8v0ThqU>
- <http://www.youtube.com/watch?v=tKxFLH2Nhe4>
- <http://www.youtube.com/watch?v=tD97Vhna-ic>
- <http://www.youtube.com/watch?v=plvIEf7JsKo>



(a)

FONTE:

http://www.sobiologia.com.br/figuras/oitava_serie/eletroima.gif



(b)

FONTE:

http://tekmeke.blogspot.com/2011_04_01_archive.html

Figura 2.12: (a) passagem de corrente elétrica através de um solenoide com núcleo de ferro (eletroímã) aumenta consideravelmente o campo magnético. (b) um eletroímã é capaz de atrair grandes quantidades de sucata de ferro devido ao intenso campo magnético criado por ele.

• http://www.youtube.com/watch?NR=1&v=6_2D3Lh1v74

7. BIBLIOGRAFIA

BISCUOLA, G. J.; BÔAS, N. V.; DOCA, R. H. *Física*, vol. 3. Ed. 1. São Paulo: Saraiva, 2010.

BÔAS, N. V.; DOCA, R. H.; BISCUOLA, G. J. *Tópicos de Física*, vol. 3. Ed. 16 – reform. e ampl. São Paulo: Saraiva, 2001.

CARRON, W.; GUIMARÃES, O. *As Faces da Física: volume único*. Ed. 3. São Paulo: Moderna, 2006

GASPAR, A. *Compreendendo a Física*, vol. 3: *Eletromagnetismo e Física Moderna*. Ed. 1. São Paulo: Ática, 2010.

GASPAR, A. *Física: Eletromagnetismo e Física Moderna*, vol. 3. Ed. 1. São Paulo: Ática, 2003.

GRAF - Grupo de Reelaboração do Ensino de Física. *Física 3: eletromagnetismo*. Ed. 2. São Paulo: Edusp, 1995.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; KRANE, K. *Física*, vol. 3. Ed. 4. Rio de Janeiro: LTC, 1992.

HEWITT, P. G. *Física Conceitual*. Ed. 9 – Porto Alegre: Bookman, 2002.

RAMALHO J, F.; GILBERTO, N.; ANTÔNIO, P. *Os Fundamentos da Física*, vol. 3. Ed. 8 – ver. e ampl. São Paulo: Moderna, 2003

SANT'ANA, B.; MARTINI, G.; REIS, H. C.; SPINELLI, W. *Conexões com a Física*, vol.: *Elettricidade – Física do Século XXI*. Ed. 1. São Paulo: Moderna, 2010.

SHIGEKIYO, C. T.; KAZUHITO, Y.; FUKE, L. F. *Os Alicerces da Física*, vol. 3: *eletricidade*. Ed. 14. São Paulo: Saraiva, 2007.

TIPLER, P. A.; MOSCA, G. *Física para cientistas e engenheiros*, vol. 2: *eletricidade e magnetismo; ótica* Ed. 5. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

CAPÍTULO III

FORÇA MAGNÉTICA SOBRE CARGAS ELÉTRICAS

1. INTRODUÇÃO

Quando uma carga elétrica se move em uma região do espaço onde existe um campo magnético, uma força magnética passa a atuar sobre ela.

A força magnética, assim como todas as forças, só fica completamente especificada quando se conhece sua intensidade e orientação. Ou seja, a força é representada por um vetor e, portanto, possui módulo, direção e sentido.

Como determinar a direção, o sentido e a intensidade da força magnética?

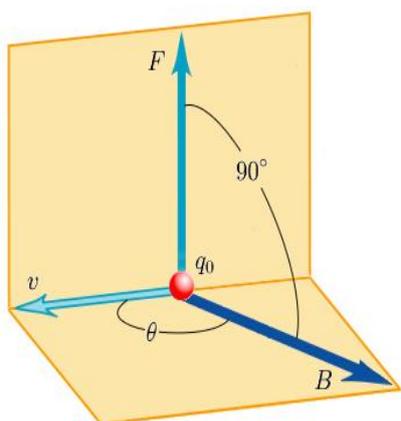


Figura 3.1: A direção da força magnética é sempre perpendicular ao plano formado pelos vetores velocidade e campo magnético.

Fonte: http://pt.encydia.com/es/Campo_magn%C3%A9tico

1.1 DIREÇÃO: considere o vetor campo magnético e o vetor velocidade da partícula num mesmo plano. A força magnética é sempre perpendicular a esse plano, como mostra a Fig. 3.1.

1.2 SENTIDO: o sentido da força magnética pode ser determinado pela regra da mão direita espalmada.

1.2.1 Regra da mão direita espalmada (também chamada de regra do tapa)

Com a mão direita espalmada, o polegar aponta no sentido da velocidade da carga elétrica e os demais dedos, no sentido do campo magnético. O tapa (ou empurrão) com a palma da mão indica o sentido da força magnética sobre uma carga elétrica **positiva**. Já o tapa com o dorso da mão indica o sentido da força magnética sobre uma carga elétrica **negativa**. Veja a Fig. 3.2.

O Vídeo 3.1 apresenta uma explicação mais detalhada sobre a aplicação da regra da mão direita espalmada e como utilizá-la para determinar o sentido da força magnética que atua sobre uma carga elétrica em movimento.

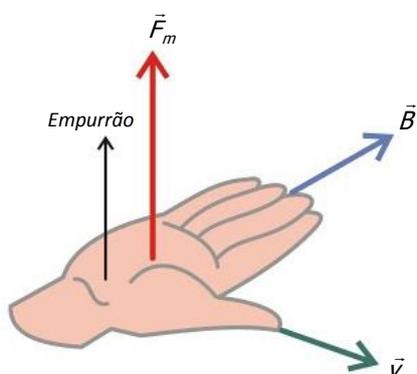


Figura 3.2: O empurrão (ou tapa) com a palma da mão indica o sentido da força magnética sobre cargas positivas. Se a carga elétrica for negativa, a força magnética terá sentido indicado pelo empurrão com o dorso da mão.

Fonte: http://osfundamentosdafisica.blogspot.com/2010/11/cursos-do-bloq_09.html

1.3 INTENSIDADE: a intensidade da força magnética sobre cargas elétricas é dada por:

$$F_m = |q|vB\text{sen}\theta \tag{Eq. 3.1}$$

onde:

|q| - módulo da carga elétrica.

v - módulo da velocidade da carga elétrica.



Vídeo 3.1: Demonstração e aplicação da regra da mão direita espalmada.

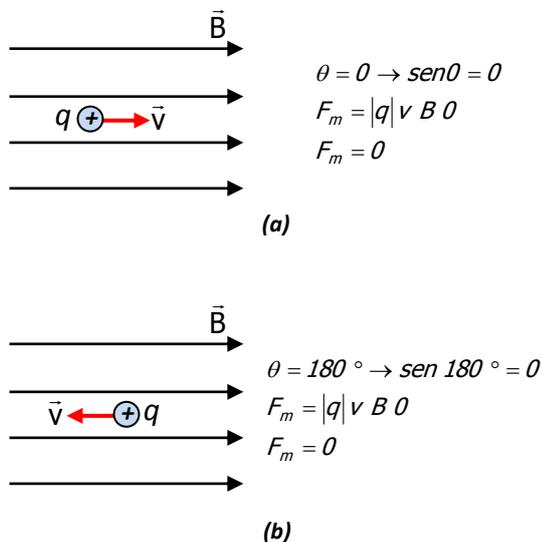


Figura 3.3: (a) e (b) Sempre que uma carga elétrica, positiva ou negativa, se movimentar paralelamente às linhas de campo magnético, seja no mesmo sentido ou em sentido oposto, a força magnética sobre ela será nula.

B - intensidade do campo magnético

θ - ângulo formado entre os vetores campo magnético e velocidade da partícula.

A partir dessa relação, vamos discutir alguns casos particulares.

A Fig. 3.3(a) mostra uma carga elétrica positiva, com velocidade no mesmo sentido das linhas de indução do campo magnético. Dessa forma, o ângulo (θ) entre a velocidade (\vec{v}) e o campo magnético (\vec{B}) é igual a zero. Como sabemos que $\text{sen } 0^\circ = 0$, concluímos que a força magnética sobre a partícula será nula. A Fig. 3.3(b) mostra uma carga elétrica em movimento no sentido contrário às linhas de campo magnético. Com isso, o ângulo θ será igual a 180° e o $\text{sen } \theta$, portanto, será igual a zero. Sendo assim, mais uma vez a força magnética sobre a partícula será nula.

- **Carga elétrica:** somente partículas eletrizadas sofrem ação de força magnética. Um nêutron, por exemplo, lançado em direção a um campo magnético, nunca sofrerá ação de força magnética, pois possui carga elétrica igual a zero.

- **Velocidade:** se as cargas elétricas estão em repouso ou se movem na direção do campo magnético não sofrem ação de força magnética.

- **Campo magnético:** se o campo magnético deixar de atuar sobre a carga elétrica, ou se ele estiver alinhado com a direção do movimento, deixa de existir força magnética sobre ela.

- **Direção de movimento:** se a carga elétrica se movimentar na mesma direção do campo magnético, não haverá força magnética atuando sobre ela.

2. MOVIMENTO DE CARGAS ELÉTRICAS EM CAMPO MAGNÉTICO UNIFORME

Dependendo da direção da velocidade de uma carga elétrica em relação ao campo magnético uniforme, podemos destacar três diferentes trajetórias para o movimento dessas cargas, para valores fixos de q , v e B .

2.1 Velocidade paralela ao campo magnético

Demonstramos anteriormente que uma carga elétrica não sofre ação de força magnética quando sua velocidade for paralela ao campo magnético. Dessa forma,

sem ação de forças sobre a partícula no interior do campo magnético, ela descreverá um movimento retilíneo uniforme.

2.2 Velocidade perpendicular ao campo magnético

Quando a velocidade da carga elétrica for perpendicular ao campo magnético ($\theta = 90^\circ \rightarrow \sin 90^\circ = 1$), a força magnética terá valor máximo, expresso por $F_m = qvB$, impondo à partícula uma trajetória circular.

A força magnética estará sempre voltada para o centro da trajetória curvilínea, por isso se constituirá na força centrípeta do movimento circular uniforme, tendo o papel de alterar a direção do movimento, enquanto que o módulo da velocidade permanecerá constante. Veja Fig. 3.4.

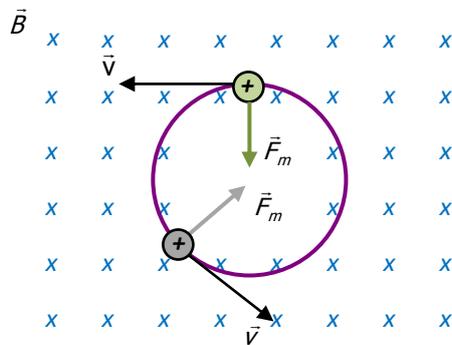


Figura 3.4: Trajetória circular descrita por uma partícula que se move com velocidade de módulo constante e perpendicular ao campo magnético uniforme, que entra perpendicularmente ao plano da página. Portanto, a partícula descreve um movimento circular uniforme em um plano perpendicular ao campo magnético.

Nessas condições, compreendendo que a força magnética será igual à força centrípeta, podemos escrever:

$$F_m = F_c$$

Conhecendo as equações da força magnética sobre cargas elétricas e da força centrípeta, podemos escrever:

$$|q| \cdot v \cdot B = m \cdot \frac{v^2}{R} \quad (\text{Eq. 3.2})$$

Isolando o raio da trajetória circular na Eq. 3.2, obteremos:

$$R = \frac{m \cdot v}{|q| \cdot B} \quad (\text{Eq. 3.3})$$

Portanto, percebemos que o raio da trajetória circular descrita por uma carga elétrica depende diretamente da massa e do módulo da velocidade da partícula, e inversamente do módulo da carga e do módulo do campo magnético em que ela está inserida.

Exemplo:

Um próton e um elétron lançados com a mesma velocidade em direção perpendicular no campo magnético, sofrem desvios em sentidos opostos, já que essas partículas possuem sinais opostos. Em relação ao raio da trajetória circular, o próton apresenta raio bem maior, pois sua massa é 1836 vezes maior do que a massa do elétron.

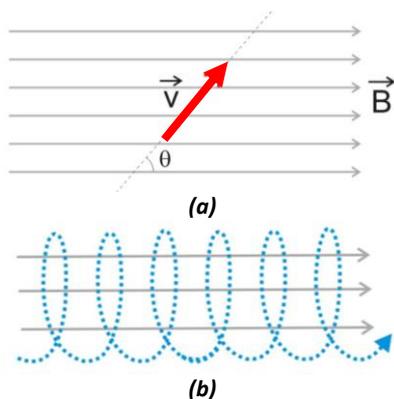


Figura 3.5: (a) representação da velocidade de uma carga elétrica oblíqua às linhas de campo magnético, ou seja, a direção da velocidade e as linhas de campo magnético formam entre si um ângulo θ , sendo $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$. (b) trajetória descrita pela carga elétrica lançada obliquamente ao campo magnético.

Fonte:

<http://osfundamentosdafisica.blogspot.com/>

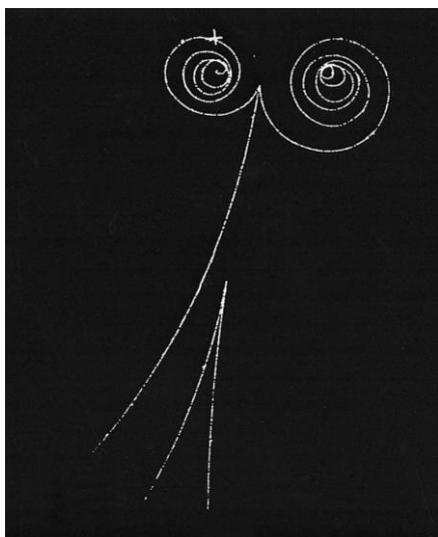


Figura 3.6: A fotografia mostra dois fótons de raios γ penetrando uma câmara de bolhas pela parte superior e formando dois pares elétron-pósitron. O par superior possui menor energia porque o γ perdeu parte de sua energia na colisão com um elétron do átomo de hidrogênio. O elétron atômico deslocado dispara em direção ao canto inferior esquerdo, deixando um rastro visível (linha maior).

Fonte: <http://www.britannica.com/bps/media-view/3048/1/0/0>

O tempo necessário para uma partícula carregada completar uma volta (período do movimento) pode ser encontrado a partir do seguinte raciocínio:

- O módulo da velocidade de uma partícula em movimento circular é dado pela razão entre a distância que ela percorre em uma volta completa ($2\pi R$) e o tempo gasto em percorrê-la, ou seja, seu período T .

$$\text{Logo: } v = \frac{2\pi R}{T} \Rightarrow T = \frac{2\pi R}{v} \quad (\text{Eq.3.4})$$

Substituindo (eq. 3) em (eq. 4), obtém-se:

$$T = \frac{2\pi \cdot m}{|q| \cdot B} \quad (\text{Eq.3.5})$$

Observação:

Percebemos através da Eq. 3.5, que o tempo que uma partícula gasta para completar uma volta em movimento circular num campo magnético uniforme independe de sua velocidade linear. Como você explicaria isso?

2.3 Velocidade oblíqua ao campo magnético.

Quando a partícula eletrizada for lançada obliquamente ao campo magnético uniforme, descreverá uma trajetória helicoidal, como representado na Fig. 5(a) e (b).

3. Exemplos de aplicação

3.1 Câmara de bolhas

Para a detecção e o estudo de raios cósmicos que penetram a atmosfera terrestre, foram desenvolvidas as câmaras de bolhas. Uma câmara de bolhas é um recipiente cheio de líquido (geralmente hidrogênio) transparente, superaquecido, utilizado para detectar partículas eletricamente carregadas que passem através dele. A passagem das partículas provoca vaporização do líquido e formação de bolhas microscópicas, deixando visível um rastro de ionização. (Os raios γ não deixam rastros na câmara de bolhas, pois eles não possuem carga elétrica).

A Fig. 3.6 mostra a criação de dois pares elétron-pósitron a partir de dois raios γ distintos, que penetram uma câmara de bolhas pela parte superior. Historicamente, a câmara de bolhas foi importantíssima para descoberta de partículas cuja existência ajudou a criar

o modelo do quark (quarks são partículas mais fundamentais que os prótons e os nêutrons. Na verdade, um próton é formado por três quarks, dois do tipo up, e um do tipo down, enquanto um nêutron é formado por dois quarks down e um quark do tipo up).

Pósitron é a antipartícula do elétron, ou seja, é uma partícula com as mesmas características do elétron (massa, carga elétrica, etc.), exceto pelo fato de sua carga ser positiva. Podemos dizer simplificadaamente, que o pósitron é um elétron positivo.

Vale citar que as trajetórias espirais não parecem simétricas devido à inclinação da máquina fotográfica em relação ao plano em que o elétron e o pósitron foram formados.

Na câmara de bolhas mostrada na figura, atua um campo magnético uniforme perpendicular ao plano da formação do par elétron-pósitron e as duas partículas são geradas com a mesma velocidade. Dessa forma, é exercida sobre cada uma delas uma força magnética de mesmo módulo, provocando os desvios mostrados. O pósitron e o elétron são desviados em sentidos contrários, já que suas cargas têm sinais opostos.

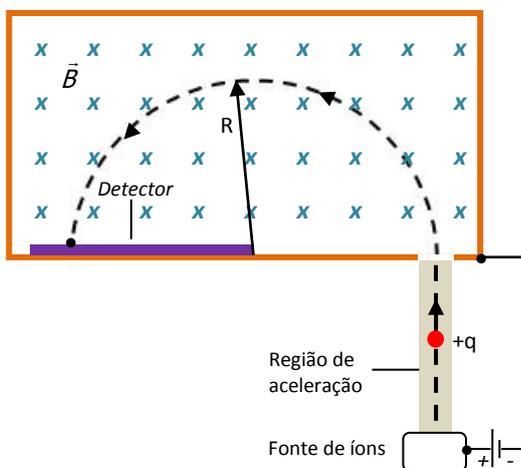


Figura 3.7: Representação esquemática de um espectrógrafo de massa. Com o campo magnético perpendicular ao plano da página e entrando e a velocidade da partícula verticalmente para cima, a deflexão ocorre no sentido anti-horário. Quanto maior a massa da partícula, maior o raio da trajetória semicircular.

3.2 Espectrógrafo de massa

O espectrômetro de massa é atualmente uma das mais valiosas ferramentas analíticas em alguns estudos nas áreas de Ciências Médicas, Biologia e Ciências Tecnológicas. Através dessa tecnologia é possível determinar a massa molecular e quantificar biomoléculas, como proteínas, carboidratos e lipídeos. A espectrometria de massa permite, também, analisar a dinâmica dos constituintes de diversos alimentos, tornando possível, por exemplo, controlar a qualidade do leite e seus derivados. Permite ainda fornecer resultados confiáveis na análise de possíveis resíduos de drogas utilizadas para aumentar a eficiência na produção animal.

A produção de polímeros sintéticos, como plásticos, fibras sintéticas e resinas artificiais, requer a utilização de técnicas como a espectrometria. Essa tecnologia é utilizada para identificar as características moleculares e físicas de novos materiais poliméricos.

Um espectrógrafo de massa foi projetado para determinar a massa de isótopos, ou seja, átomos com mesmo número de prótons, mas diferente número de

nêutrons, através da força magnética aplicada em íons. Lembrando, íon é uma molécula ou um átomo que perdeu ou ganhou um ou mais elétrons e se encontra eletrizado. A Fig. 3.7 representa esquematicamente um espectrógrafo de massa, no qual no qual moléculas neutras são bombardeadas por feixes de elétrons para serem desintegrados em íons menores. Através de uma diferença de potencial, esses íons são lançados e penetram com velocidade perpendicular a um campo magnético uniforme, descrevendo uma trajetória semicircular devido à força magnética que passa a ser exercida sobre eles. Na região onde as partículas colidem é colocada uma chapa fotográfica (detector) que, após ser analisada, revela o raio da trajetória.

Como todos os íons são lançados com a mesma energia cinética, o raio da trajetória descrita pela partícula é função apenas de sua massa, ou seja, íons com massas diferentes descrevem trajetórias circulares com raios diferentes. Ao retomarmos a Eq. 3.3,

$$\left(R = \frac{m \cdot v}{|q| \cdot B} \right),$$

percebemos que para o mesmo módulo de velocidade, quanto maior for a massa da partícula, maior será o raio da sua trajetória, já que consideramos o módulo da carga elétrica e do campo magnético constantes.

4. REVISÃO

Nesse capítulo discutimos a ação de forças magnéticas sobre corpos carregados em movimento em regiões do espaço onde existe campo magnético externo.

Também foi abordado que partículas com velocidade perpendicular ao campo magnético, descrevem uma trajetória circular, sendo possível determinar o raio dessa trajetória e o período do movimento.

5. VÍDEOS

Para que você possa se aprofundar nesses assuntos, sugerimos o seguinte vídeo:

- <http://www.youtube.com/watch?v=XWkhUwX4D5s>
- <http://www.youtube.com/watch?v=L4U6ImYSj0>

6. BIBLIOGRAFIA

BISCUOLA, G. J.; BÔAS, N. V.; DOCA, R. H. Física, vol. 3. Ed. 1. São Paulo: Saraiva, 2010.

BÔAS, N. V.; DOCA, R. H.; BISCUOLA, G. J. *Tópicos de Física*, vol. 3. Ed. 16 – reform. e ampl. São Paulo: Saraiva, 2001.

CARRON, W.; GUIMARÃES, O. *As Faces da Física: volume único*. Ed. 3. São Paulo: Moderna, 2006

CARUSO, F.; OGURI, V. *Física Moderna: Origens Clássicas e Fundamentos Quânticos*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2006.

Gamma ray: magnetic field of bubble chamber. Photograph. Encyclopædia Britannica Online. Web. 1 Sep. 2011.

GASPAR, A. *Compreendendo a Física*, vol. 3: *Eletromagnetismo e Física Moderna*. Ed. 1. São Paulo: Ática, 2010.

GASPAR, A. *Física: Eletromagnetismo e Física Moderna*, vol. 3. Ed 1. São Paulo: Ática, 2003.

GREF - Grupo de Reelaboração do Ensino de Física. *Física 3: eletromagnetismo*. Ed. 2. São Paulo: Edusp, 1995.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; KRANE, K. *Física*, vol. 3. Ed. 4. Rio de Janeiro: LTC, 1992.

HEWITT, P. G. *Física Conceitual*. Ed. 9 – Porto Alegre: Bookman, 2002.

RAMALHO J, F.; GILBERTO, N.; ANTÔNIO, P. *Os Fundamentos da Física*, vol. 3. Ed. 8 – ver. e ampl. São Paulo: Moderna, 2003

SANT'ANA, B.; MARTINI, G.; REIS, H. C.; SPINELLI, W. *Conexões com a Física*, vol.: *Eletricidade – Física do Século XXI*. Ed. 1. São Paulo: Moderna, 2010.

SHIGEKIYO, C. T.; KAZUHITO, Y.; FUKE, L. F. *Os Alicerces da Física*, vol. 3: *eletricidade*. Ed. 14. São Paulo: Saraiva, 2007.

TIPLER, P. A.; MOSCA, G. *Física para cientistas e engenheiros*, vol. 2: *eletricidade e magnetismo; ótica* Ed. 5. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

CAPÍTULO IV

FORÇA MAGNÉTICA SOBRE FIOS

1. INTRODUÇÃO

No capítulo III estudamos a força magnética exercida sobre uma carga elétrica em movimento no interior de um campo magnético. Neste capítulo, estenderemos nossos estudos à força magnética exercida sobre um fio condutor percorrido por corrente elétrica.

De estudos anteriores, sabemos que corrente elétrica é formada por cargas elétricas em movimento ordenado num condutor. Sabemos também que cargas elétricas ao se movimentarem no interior de um campo magnético podem sofrer ação de força magnética. Dessa forma, esse raciocínio nos leva a conclusão de que um fio condutor percorrido por corrente elétrica (cargas elétricas em movimento) e imerso numa região onde existe um campo magnético, também poderá sofrer ação de força magnética.

As principais características da força magnética exercida em fios percorridos por corrente elétrica são:

- **DIREÇÃO:** a força magnética exercida sobre fios percorridos por corrente elétrica tem direção perpendicular ao plano formado pela direção do campo magnético e pelo fio que conduz a corrente elétrica, como representado na Fig. 4.1. Essa figura já foi apresentada no capítulo III, mas consideramos anteriormente que para aplicação da regra o polegar deve apontar no sentido da velocidade de uma carga elétrica no interior de um campo magnético, e agora estamos considerando que o polegar deve apontar no sentido convencional da corrente elétrica (sentido contrário ao movimento de cargas elétricas negativas ou sentido igual ao movimento de cargas elétricas positivas).

CUIDADO!

Apesar de atribuímos um sentido para a corrente elétrica e a representarmos por uma seta, ela não é uma grandeza vetorial.

- **SENTIDO:** para determinar o sentido da força magnética, usa-se a regra da mão direita espalmada, ilustrada na Fig. 4.1.

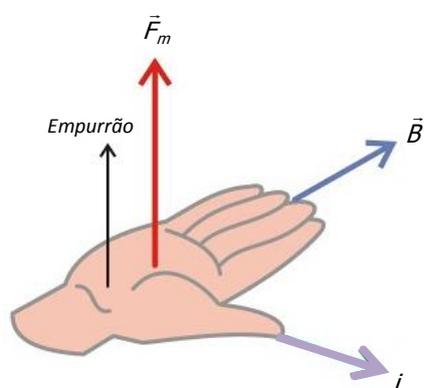


Figura 4.1: Representação da regra da mão direita espalmada. O tapa (ou empurrão) feito com a palma da mão direita indica o sentido da força magnética que é exercida sobre o fio condutor. Para aplicação de tal regra, o polegar deve apontar no sentido convencional da corrente elétrica e os demais dedos, no sentido das linhas de campo magnético¹.

¹ Figura extraída do endereço:

http://osfundamentosdafisica.blogspot.com/2010/10/cursos-do-blog_12.html

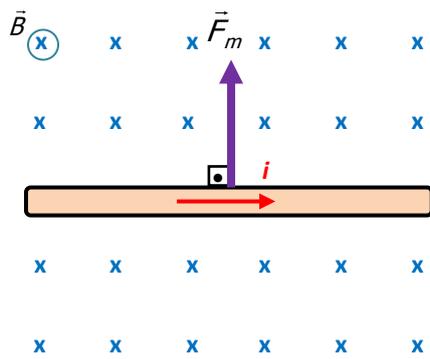


Figura 4.2: Com o polegar apontando no sentido convencional da corrente elétrica (para direita) e os demais dedos no sentido das linhas de campo magnético (entrando perpendicularmente no plano da página), o tapa com a palma da mão será dado para cima, indicando o sentido da força magnética sobre o fio condutor.

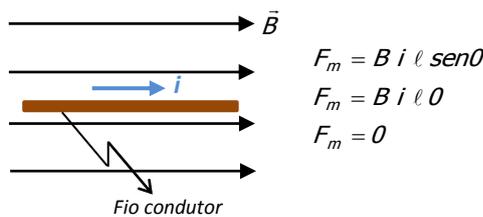


Figura 4.3(a): Quando as linhas de campo magnético estiverem no mesmo sentido da corrente elétrica, o ângulo θ será igual a zero, e como $\text{sen}0^\circ = 0$, a força magnética sobre o fio será, conseqüentemente, nula.

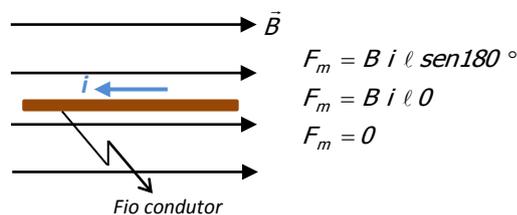


Figura 4.3(b): Quando as linhas de campo magnético estiverem em sentido contrário ao sentido da corrente elétrica, o ângulo θ será igual a 180° , e como $\text{sen}180^\circ = 0$, a força magnética sobre o fio será, conseqüentemente, nula.

A Fig. 4.2 mostra o sentido da força magnética exercida sobre um fio percorrido por corrente elétrica, imerso numa região de campo magnético uniforme e perpendicular ao plano da página. Confira o sentido da força magnética utilizando a regra da mão direita espalmada.

• **INTENSIDADE:** a intensidade da força magnética sobre condutores é expressa por:

$$F_m = B \cdot i \cdot \ell \cdot \text{sen}\theta \quad (\text{Eq. 4.1})$$

onde B é a intensidade do campo magnético, i é a intensidade da corrente elétrica, ℓ é o comprimento do condutor e θ é o ângulo formado entre o campo magnético e a corrente elétrica. É importante ressaltar que B é a intensidade do campo magnético externo, e não a intensidade do campo magnético gerado pela corrente no fio.

OBSERVAÇÃO

Se as linhas de campo magnético estiverem na mesma direção da corrente elétrica, a força magnética sobre o fio será nula, como mostra a Fig. 4.3(a) e (b).

Se o campo magnético for perpendicular à corrente elétrica ($\theta = 90^\circ$), a força magnética sobre o fio condutor terá valor máximo, pois $\text{sen}90^\circ = 1$.

EXEMPLO

Uma barra de metal está apoiada sobre um par de guias condutoras longas, separadas por uma determinada distância e imersas numa região onde existe um campo magnético uniforme, conforme a Fig. 4.4(a).

Quando a chave interruptora for ligada fazendo corrente elétrica percorrer o condutor, a força magnética sobre a barra de metal fará com que ela se movimente para direita ou para a esquerda?

Resposta:

Aplicando a regra da mão direita espalmada, devemos apontar o polegar para baixo (sentido convencional da corrente elétrica) e os demais dedos saindo perpendicularmente do plano da figura (sentido do campo magnético). Com isso, perceberemos que o tapa com a palma da mão é dado para a esquerda, indicando o sentido da força magnética e, conseqüentemente, o

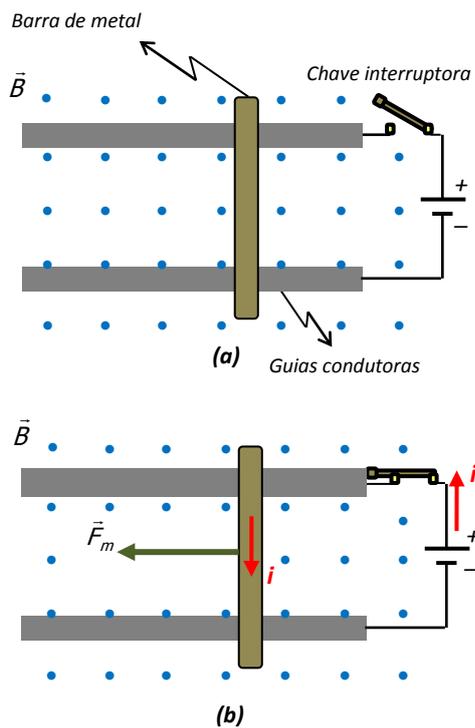


Figura 4.4: (a) Barra de metal apoiada nas guias condutoras que estão ligadas a uma fonte de tensão. (b) Fechando-se a chave interruptora, a barra de metal, imersa numa região com campo magnético uniforme, sofre ação de força magnética cujo sentido pode ser determinado através da regra da mão direita espalmada.

sentido de movimento da barra de metal. Veja a Fig. 4.4(b).

2. EXEMPLO DE APLICAÇÃO: MOTOR ELÉTRICO

Os motores elétricos têm como função transformar energia elétrica em energia mecânica. Possuem diferentes tamanhos, torques, potências, e podem ser encontrados em diversos equipamentos, como furadeiras, ventiladores, secadores de cabelo, eletrodomésticos, etc.

O princípio básico de funcionamento dos motores elétricos se dá pelo fato de que um fio condutor percorrido por corrente elétrica e imerso numa região de campo magnético sofre ação de uma força perpendicular ao plano formado pelo fio e pelo campo magnético. O sentido das forças magnéticas sobre condutores percorridos por corrente elétrica é determinado através da regra da mão direita espalmada, discutida na seção anterior.

Considerando a espira retangular representada na Fig. 4.5, percebemos que as forças exercidas em cada um de seus lados formam um binário, resultando em rotação da espira ao redor de um eixo.

3. FORÇA MAGNÉTICA ENTRE DOIS FIOS PARALELOS

A Fig. 4.6 mostra dois fios retilíneos, longos, paralelos, separados por uma determinada distância e percorridos por corrente elétrica.

Como já estudamos em capítulos anteriores, passagem de corrente elétrica por um condutor gera campo magnético no espaço ao seu redor. Sendo assim, podemos considerar que o campo magnético gerado pela corrente elétrica que passa pelo fio condutor 1 atua sobre o fio 2 e vice-versa.

Se utilizarmos a regra da mão direita, perceberemos que o campo magnético gerado pela corrente que passa pelo fio 1 é perpendicular ao plano da página e entrando ao redor do fio 2. Utilizando o mesmo procedimento para o fio 2, perceberemos que o campo magnético gerado pela corrente que circula por ele é perpendicular ao plano da página e saindo ao redor do fio 1, como representado na Fig. 4.7.

Adotando agora a regra da mão direita espalmada para determinar o sentido da força magnética

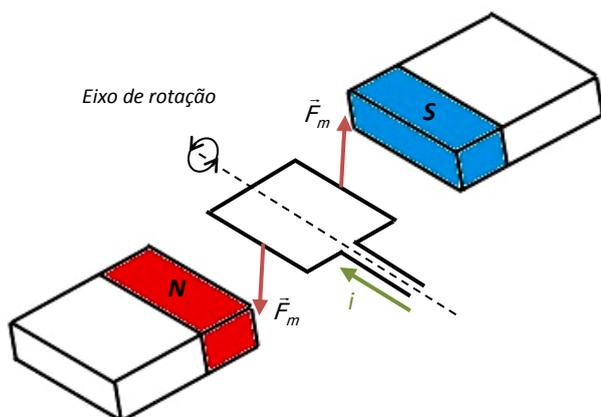


Fig. 4.5: Princípio básico do funcionamento dos motores elétricos. Uma espira imersa num campo magnético e percorrida por corrente elétrica sofre ação de um binário de forças magnéticas, fazendo-a girar em torno de um eixo.

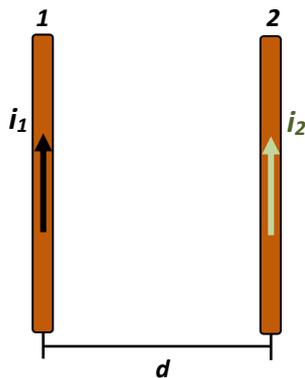


Figura 4.6: Fios condutores paralelos, percorridos por corrente elétrica e separados por uma distância d .

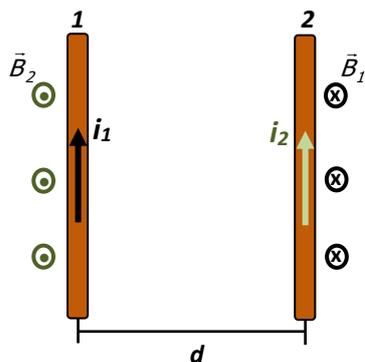


Figura 4.7: A corrente elétrica que percorre o fio 1 cria um campo magnético que atua sobre o fio 2.

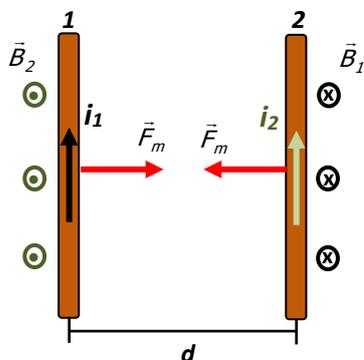


Figura 4.8: Condutores paralelos percorridos por corrente elétrica de sentidos iguais provoca força magnética de atração entre eles.

que é exercida em cada um dos fios, percebemos que ocorre atração entre eles, como mostra a Fig. 4.8.

Sendo assim, podemos concluir que:

QUANDO DOIS FIOS PARALELOS FOREM PERCORRIDOS POR CORRENTE ELÉTRICA DE MESMO SENTIDO, SURGIRÁ ENTRE ELES FORÇA MAGNÉTICA ATRATIVA. JÁ SE OS SENTIDOS DAS CORRENTES ELÉTRICAS FOREM CONTRÁRIOS, SURGIRÁ ENTRE OS FIOS FORÇA MAGNÉTICA REPULSIVA.

As forças magnéticas exercidas nos fios 1 e 2 formam par ação-reação, já estudado nas leis de Newton. Portanto, a força magnética exercida sobre o fio 1 sempre possui a mesma intensidade, mesma direção, porém sentido contrário à força magnética exercida sobre o fio 2.

4. REVISÃO

Nesse capítulo discutimos a ação de força magnética sobre um fio condutor percorrido por corrente elétrica e inserido numa região com campo magnético. Para determinar a orientação da força magnética utiliza-se a regra da mão direita espalmada.

Abordamos, ainda, a interação magnética entre fios condutores paralelos percorridos por corrente elétrica.

5. VÍDEOS

Para que você possa se aprofundar nesses assuntos, sugerimos os seguintes vídeos:

- <http://www.youtube.com/watch?v=43AeuDvWc0k>
- <http://www.youtube.com/watch?v=3HNpAw15t7Y>
- <http://www.youtube.com/watch?v=2F8LChqcV8E>
- <http://www.youtube.com/watch?v=tUCtCYty-ns>

Para que você possa visualizar e interagir mais com os conceitos de força magnética em fios condutores percorridos por corrente elétrica, discutidos nesse capítulo, sugerimos que acesse a simulação computacional, cujo endereço está colocado abaixo. Nessa simulação, você poderá alterar o sentido da corrente elétrica e o sentido do campo magnético, e analisar a força magnética que irá atuar sobre o fio condutor. Não esqueça que para determinar o sentido da força magnética sobre o condutor, utilizamos a regra da mão direita espalmada.

http://www.walter-fendt.de/ph14br/lorentzforce_br.htm

6. BIBLIOGRAFIA

BISCUOLA, G. J.; BÔAS, N. V.; DOCA, R. H. Física, vol. 3. Ed. 1. São Paulo: Saraiva, 2010.

BÔAS, N. V.; DOCA, R. H.; BISCUOLA, G. J. *Tópicos de Física*, vol. 3. Ed. 16 – reform. e ampl. São Paulo: Saraiva, 2001.

CARRON, W.; GUIMARÃES, O. *As Faces da Física: volume único*. Ed. 3. São Paulo: Moderna, 2006

GASPAR, A. *Compreendendo a Física*, vol. 3: *Eletromagnetismo e Física Moderna*. Ed. 1. São Paulo: Ática, 2010.

GASPAR, A. *Física: Eletromagnetismo e Física Moderna*, vol. 3. Ed 1. São Paulo: Ática, 2003.

GRAF - Grupo de Reelaboração do Ensino de Física. *Física 3: eletromagnetismo*. Ed. 2. São Paulo: Edusp, 1995.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; KRANE, K. *Física*, vol. 3. Ed. 4. Rio de Janeiro: LTC, 1992.

HEWITT, P. G. *Física Conceitual*. Ed. 9 – Porto Alegre: Bookman, 2002.

RAMALHO J, F.; GILBERTO, N.; ANTÔNIO, P. *Os Fundamentos da Física*, vol. 3. Ed. 8 – ver. e ampl. São Paulo: Moderna, 2003

SANT'ANA, B.; MARTINI, G.; REIS, H. C.; SPINELLI, W. *Conexões com a Física*, vol.: *Eletricidade – Física do Século XXI*. Ed. 1. São Paulo: Moderna, 2010.

SHIGEKIYO, C. T.; KAZUHITO, Y.; FUKE, L. F. *Os Alicerces da Física*, vol. 3: *eletricidade*. Ed. 14. São Paulo: Saraiva, 2007.

TIPLER, P. A.; MOSCA, G. *Física para cientistas e engenheiros*, vol. 2: *eletricidade e magnetismo; ótica* Ed. 5. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

CAPÍTULO V

MAGNETISMO DA MATÉRIA

1. INTRODUÇÃO

Para compreender profundamente o magnetismo da matéria são necessários conhecimentos de Física Quântica, que fogem aos objetivos desse curso. Contudo, conseguiremos abordar algumas características do magnetismo considerando o modelo clássico de um átomo (modelo de Bohr), no qual ele é composto pelo núcleo, região central onde estão localizados os prótons e os nêutrons, e pela eletrosfera, por onde elétrons giram ao redor do núcleo, como representado na Fig. 5.1. Nesse modelo as propriedades magnéticas do átomo resultam da rotação do elétron em torno do núcleo e em torno de si mesmo. A rotação em torno do núcleo é chamada de movimento orbital e a rotação em torno de si mesmo, de "spin". ("To spin" é um verbo da língua inglesa que significa girar). O spin é uma propriedade do elétron, assim como são a massa e a carga elétrica.

Estudamos no capítulo I, que ao quebrar um ímã em duas partes, surgem dois novos ímãs, cada um com os polos magnéticos norte e sul. Se voltarmos a quebrar um dos ímãs, novos polos norte e sul irão surgir. Agora imagine que possamos quebrar esses ímãs até o nível de um único átomo. O que percebemos é que o dipolo magnético, ou seja, o polo norte e o polo sul magnético, surge devido ao movimento orbital do elétron. Esse movimento, em trajetória supostamente circular, estabelece uma pequena intensidade de corrente elétrica que cria um campo magnético, semelhante ao campo criado por uma espira circular percorrida por corrente elétrica. Chamaremos de **momento de dipolo magnético orbital**, o campo magnético devido ao movimento do elétron em torno do núcleo.

Também o movimento de rotação do elétron em torno do seu próprio eixo (spin) contribui para o magnetismo da matéria, pois sendo o elétron carregado, essa rotação provoca o surgimento de um momento magnético, denominado **momento magnético intrínseco**, já que é uma propriedade intrínseca do elétron.

Sendo assim, podemos dizer, de forma bastante resumida, que o magnetismo dos materiais é um

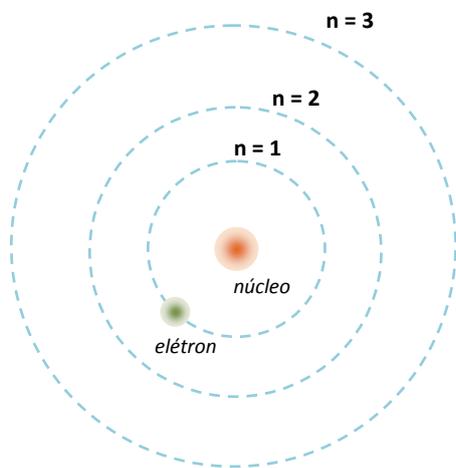


Figura 5.1: Representação de órbitas possíveis para um elétron em torno do núcleo de um átomo de hidrogênio, segundo o Modelo de Bohr.

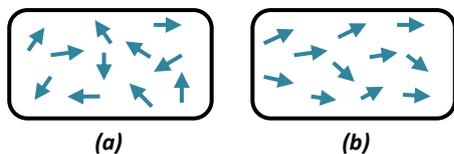


Figura 5.2: As setas representam o momento magnético total dos átomos e podem ser pensadas como ímãs elementares. (a) o material não apresenta magnetização. (b) o material apresenta magnetização.

somatório das influências do spin do elétron e de seu movimento em torno do núcleo, ou seja, do momento magnético total. No caso deste não ser nulo, os átomos se comportam como ímãs bem pequenos, chamados de ímãs elementares.

Em muitos materiais, o momento magnético total dos átomos se anula, porque os elétrons se juntam aos pares de tal forma que o spin total dos elétrons se anula com o momento de dipolo magnético orbital. Esses materiais não apresentam magnetização associada ao movimento dos elétrons, mas ainda assim poderão apresentar uma fraca magnetização, que denominamos de diamagnetismo, e discutiremos brevemente na seção 2.3. Exemplos de substâncias diamagnéticas são bismuto, cobre, diamante e silicene.

Entretanto, se o momento de dipolo magnético orbital total e o spin total dos elétrons forem não-nulos, os materiais formados por esses átomos serão magnetizados.

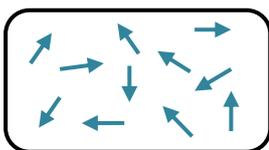


Figura 5.3: As setas representam o momento magnético total de cada átomo. Em materiais paramagnéticos, elas estão orientadas aleatoriamente, como na figura. (No caso de materiais diamagnéticos, não é possível esse tipo de representação, pois o momento magnético total de cada átomo é nulo).

A Fig. 5.2(a) representa uma amostra de um material não magnetizado, que se for inserido numa região onde já existe um campo magnético, pode magnetizar-se, já que o material reage a esse campo externo criando um campo magnético próprio, cujas características (intensidade e orientação) dependem do campo magnético da região e das propriedades do próprio material. Veja a Fig. 5.2(b). O momento magnético total de cada átomo é representado por pequenas setas e, dependendo da orientação dessas setas, o material apresentará diferente magnetização.

A suscetibilidade magnética é um número puro que expressa a capacidade de um material se magnetizar devido à ação de um campo magnético externo. A Tab. 5.1 mostra a suscetibilidade magnética de alguns materiais.



Figura 5.4: Na presença de campo magnético externo, o momento magnético total (ou ímãs elementares) de cada átomo tende a se alinhar com o campo magnético externo.

2. TIPOS DE MATERIAIS MAGNETIZADOS

Quanto à magnetização, os materiais podem ser classificados em: paramagnéticos, diamagnéticos e ferromagnéticos.

2.1. Materiais Paramagnéticos

Nos materiais paramagnéticos existe um grande número de ímãs elementares orientados aleatoriamente, em todas as direções e sentidos, totalizando um campo magnético nulo para o material, como mostrado na Fig. 5.3.

Tabela 5.1: Suscetibilidade magnética de alguns materiais à temperatura ambiente (25°C).

Material	Suscetibilidade Magnética a temperatura ambiente
Alumínio	$2,2 \times 10^{-5}$
Tungstênio	$6,8 \times 10^{-5}$
Magnésio	$1,2 \times 10^{-5}$
Titânio	$7,06 \times 10^{-5}$
Prata	$- 2,6 \times 10^{-5}$
Mercúrio	$- 3,2 \times 10^{-5}$
Cobre	$- 9,7 \times 10^{-6}$
Diamante	$- 2,2 \times 10^{-5}$
Ferro doce	$5,5 \times 10^3$ (a temperatura de 300 K)

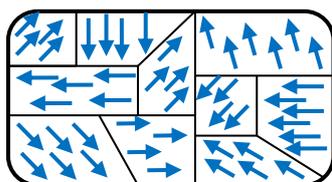


Figura 5.5: Na região de domínio magnético, os ímãs elementares encontram-se alinhados uns com os outros. Na ausência de campo magnético externo, a orientação dos ímãs elementares de um domínio para o outro é tão aleatória, que a soma dos momentos magnéticos torna-se nula. Consequentemente, o material estará não magnetizado.

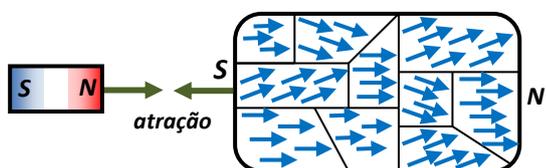


Figura 5.6: Magnetização de materiais ferromagnéticos através da tendência de alinhamento dos ímãs elementares de cada domínio magnético, em relação ao campo magnético externo.

Quando for exposto a um campo magnético externo, como representado na Fig. 5.4, os ímãs elementares tendem a se alinhar paralelamente ao campo, magnetizando o material, de forma que ele passa a ser atraído pelo campo externo com uma força de pequena intensidade. O grau de alinhamento dos ímãs elementares com o campo magnético externo depende da intensidade desse campo e da temperatura. Em elevadas temperaturas, o alto grau de agitação térmica dificulta o alinhamento dos ímãs elementares. Dessa forma, para aumentar a magnetização do material paramagnético, podemos diminuir a temperatura ou aumentar a intensidade do campo magnético externo.

Após a retirada do campo magnético externo, os ímãs elementares retornam à configuração inicial, desmagnetizando o material.

Como a força de atração entre o material paramagnético e o campo magnético externo a ele é de pequena intensidade, constatamos que esses materiais possuem pequena suscetibilidade magnética, e analisando a Tab. 5.1 podemos destacar alguns exemplos desses materiais: alumínio, tungstênio, magnésio, titânio, etc.

2.2. Materiais Ferromagnéticos

Nos materiais ferromagnéticos, os ímãs elementares estão dispostos em pequenas regiões chamadas de **domínio magnético**. Dentro de cada domínio os ímãs elementares estão alinhados uns com os outros, muito embora a orientação de cada domínio magnético seja diferente da orientação dos domínios vizinhos. Analisando uma amostra macroscópica de um material ferromagnético que não se encontra magnetizada, constatamos que o sentido dos ímãs elementares de um domínio para o outro é tão aleatório que ocorre anulamento dos campos. A Fig. 5.5 representa um material ferromagnético não magnetizado.

Quando exposta a um campo magnético externo, os ímãs elementares de cada domínio magnético tendem a se alinhar com ele, produzindo magnetização nesse material e uma força de atração entre ele e o campo magnético externo, como representado na Fig. 5.6.

Existe ainda a possibilidade de que o material ferromagnético, quando exposto ao campo magnético externo, se magnetize pelo deslocamento das fronteiras dos domínios. Ocorre, então, o favorecimento do aumento

da região onde os ímãs elementares já estavam alinhados com o campo magnético do ímã. Veja a Fig. 5.7.

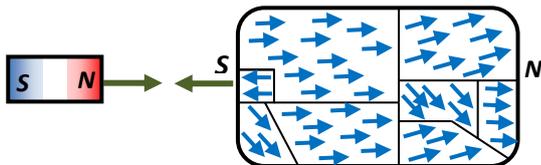


Figura 5.7: A magnetização do material ferromagnético pode ocorrer devido ao deslocamento das fronteiras de domínio magnético.

Se o campo magnético externo for intenso, a força de atração entre ele e o material ferromagnético será de grande intensidade. No momento em que a amostra do material for retirada da ação do campo externo, muitos ímãs elementares não retornarão à configuração inicial, deixando o material magnetizado. A esse fenômeno damos o nome de histerese magnética, que será representada, em parte, pela Fig. 5.8.

O gráfico mostra a relação entre a intensidade do campo magnético externo \vec{B}_0 e a intensidade da magnetização do material ferromagnético (\vec{M}) exposto a esse campo externo. Inicialmente, aumenta-se a intensidade do campo externo e a amostra vai se magnetizando (curva **ab**). Em determinado momento, por mais que se aumente o campo externo, a magnetização do material permanecerá a mesma, já que os ímãs elementares atingiram o maior poder de alinhamento possível com o campo \vec{B}_0 . A esse maior valor possível de magnetização do material damos o nome de campo de saturação.

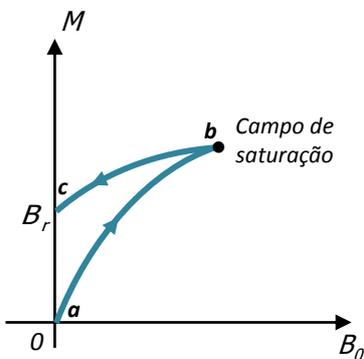


Figura 5.8: Representação gráfica do campo magnético remanescente (M) em uma substância ferromagnética, depois de exposta a um campo magnético externo (B_0).

Diminuindo a intensidade do campo magnético externo \vec{B}_0 até zero, a magnetização do material \vec{M} não retorna a zero, atinge um valor B_r (campo remanescente), justamente porque o material se mantém magnetizado (curva **bc**).

A histerese magnética é imprescindível nos casos de armazenamento de informações em fitas magnéticas e na memória de um computador, por exemplo. Em transformadores elétricos, o núcleo é formado por um material ferromagnético, que é responsável por intensificar e transferir a variação do campo magnético do primário para o secundário. O princípio básico de funcionamento e os elementos principais de um transformador serão discutidos no capítulo VI.

O ferro doce (denominação dada ao ferro puro), o níquel e o cobalto são exemplos de materiais ferromagnéticos, assim como qualquer liga metálica composta por esses materiais, que possuem alto valor de suscetibilidade magnética.

À medida que a temperatura de uma amostra

ferromagnética aumenta, torna-se mais difícil magnetizá-la, devido ao aumento da agitação térmica. A temperatura acima da qual um material ferromagnético perde suas características e se torna paramagnético é chamada de **ponto de Curie**. Cada substância tem o seu ponto de Curie, sendo o do ferro doce, por exemplo, 770 °C.

2.3. Materiais Diamagnéticos

O diamagnetismo foi descoberto em 1847 por Michael Faraday, quando percebeu que um pedaço de bismuto era repelido pelos dois polos de um ímã. Essa é a principal característica dos materiais diamagnéticos; cada átomo desses materiais possui magnetização nula, ao contrário dos materiais paramagnéticos e ferromagnéticos, em que cada átomo do material possui magnetização permanente. Quando exposto a um campo magnético externo, surge no material uma magnetização oposta ao campo, provocando força de repulsão entre ele e a amostra do material.

O fenômeno do diamagnetismo ocorre em todos os tipos de materiais, mas por ser um efeito de baixa intensidade, só evidencia-se em materiais que não sejam paramagnéticos nem ferromagnéticos.

Nos materiais diamagnéticos a suscetibilidade magnética é negativa, remetendo ao fato de que esses materiais são repelidos por um campo magnético externo. A Tab. 5.1 mostra alguns exemplos de substâncias diamagnéticas. Ex.: prata, mercúrio, cobre, diamante, etc.

3. REVISÃO

Neste capítulo descrevemos, usando um modelo clássico, como o movimento orbital dos elétrons em torno do núcleo e em torno do seu próprio eixo geram momento de dipolo magnético orbital e momento magnético intrínseco (spin), respectivamente, contribuindo para o magnetismo dos materiais.

De acordo com a magnetização, os materiais podem ser classificados em diamagnéticos, paramagnéticos e ferromagnéticos. Após exposição a um campo magnético externo de intensidade considerável, os materiais ferromagnéticos permanecem magnetizados, fenômeno que denominamos de **histerese magnética**.

4. VÍDEOS

Para que você possa se aprofundar nesses assuntos, sugerimos os seguintes vídeos:

- <http://www.youtube.com/watch?v=VD8AG84dvXc>
- <http://www.youtube.com/watch?v=yiXqYq17N0o>
- <http://www.youtube.com/watch?v=6BBx8BwLhqq>
- <http://www.youtube.com/watch?v=GDNixeBCW8>
- <http://www.youtube.com/watch?v=5RYi3m0NkqY>

5. BIBLIOGRAFIA

BISCUOLA, G. J.; BÔAS, N. V.; DOCA, R. H. *Física*, vol. 3. Ed. 1. São Paulo: Saraiva, 2010.

BÔAS, N. V.; DOCA, R. H.; BISCUOLA, G. J. *Tópicos de Física*, vol. 3. Ed. 16 – reform. e ampl. São Paulo: Saraiva, 2001.

CARRON, W.; GUIMARÃES, O. *As Faces da Física: volume único*. Ed. 3. São Paulo: Moderna, 2006

CARUSO, F.; OGURI, V. *Física Moderna: Origens Clássicas e Fundamentos Quânticos*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2006.

GASPAR, A. *Compreendendo a Física*, vol. 3: *Eletromagnetismo e Física Moderna*. Ed. 1. São Paulo: Ática, 2010.

GASPAR, A. *Física: Eletromagnetismo e Física Moderna*, vol. 3. Ed 1. São Paulo: Ática, 2003.

GREF - Grupo de Reelaboração do Ensino de Física. *Física 3: eletromagnetismo*. Ed. 2. São Paulo: Edusp, 1995.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; KRANE, K. *Física*, vol. 3. Ed. 4. Rio de Janeiro: LTC, 1992.

HEWITT, P. G. *Física Conceitual*. Ed. 9 – Porto Alegre: Bookman, 2002.

LEMBO, A. *Química*, vol. 1: *Realidade e Contexto*. Ed. 3. São Paulo: Ática, 2004.

RAMALHO J, F.; GILBERTO, N.; ANTÔNIO, P. *Os Fundamentos da Física*, vol. 3. Ed. 8 – ver. e ampl. São Paulo: Moderna, 2003

SANT'ANA, B.; MARTINI, G.; REIS, H. C.; SPINELLI, W. *Conexões com a Física*, vol.: *Eletricidade – Física do Século XXI*. Ed. 1. São Paulo: Moderna, 2010.

SHIGEKIYO, C. T.; KAZUHITO, Y.; FUKE, L. F. *Os Alicerces da Física*, vol. 3: *eletricidade*. Ed. 14. São Paulo: Saraiva, 2007.

TIPLER, P. A.; MOSCA, G. *Física para cientistas e engenheiros*, vol. 2: *eletricidade e magnetismo; ótica* Ed. 5. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

CAPÍTULO VI

INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA

1. INTRODUÇÃO

Após Oersted descobrir que corrente elétrica gera campo magnético, os cientistas passaram a se questionar se o inverso seria possível, ou seja, se campo magnético poderia gerar corrente elétrica. Em 1831, Michael Faraday descobriu que esse fenômeno era possível. Ele conseguiu estabelecer corrente elétrica em um condutor com a variação do campo magnético através de sua superfície.

A Fig. 6.1 mostra esquematicamente uma das experiências realizadas por Faraday. Uma espira está conectada a um galvanômetro (equipamento destinado a medição de baixas intensidades de corrente elétrica), e como não há nenhuma fonte para criar força eletromotriz espera-se que o medidor não detecte nenhuma corrente elétrica no condutor. No entanto, movimentando um dos polos de um ímã em relação à espira, seja aproximando ou afastando, verifica-se que ocorre deflexão do ponteiro do amperímetro, o que indica que corrente elétrica surgiu no condutor. No momento em que o ímã é colocado em repouso em relação à espira, o galvanômetro não indica mais existência de corrente elétrica.

Percebe-se ainda que ao aproximar da espira o polo norte do ímã em forma de barra, por exemplo, o ponteiro do galvanômetro é defletido num sentido, e quando o polo norte se afasta da espira, o ponteiro é defletido no sentido contrário. Quanto mais rápida for a aproximação ou o afastamento entre ímã e espira, mais intensidade de corrente elétrica é gerada. Esse fenômeno é chamado de indução eletromagnética, e as correntes e força eletromotriz geradas, são chamadas de **corrente elétrica induzida e força eletromotriz induzida**.

A seguir, discutiremos mais detalhadamente o fenômeno da indução eletromagnética.

2. FLUXO MAGNÉTICO

O fluxo magnético é uma grandeza que está relacionada ao número de linhas de campo magnético que atravessam a área de uma superfície, como representado na Fig. 6.2. Isso significa dizer que quanto maior for o número de linhas que atravessam essa superfície, maior

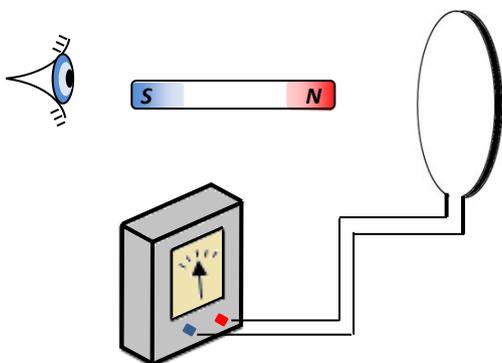


Figura 6.1: Aproximando da espira circular um dos polos de um ímã em forma de barra, o ponteiro do galvanômetro deflete num sentido, e afastando da espira o mesmo polo magnético, o ponteiro deflete no sentido contrário. Quando cessar o movimento relativo entre o ímã e a espira, o ponteiro do galvanômetro ficará em repouso.

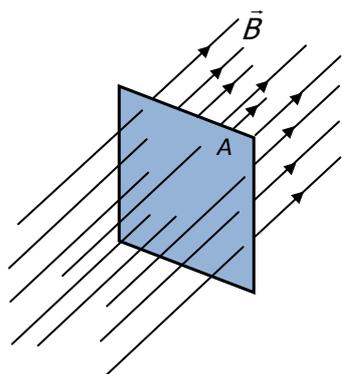


Figura 6.2: O fluxo magnético através de uma superfície está associado ao número de linhas de campo magnético que a atravessa.

será o fluxo magnético através dela.

A Fig. 6.3 mostra uma espira circular inserida numa região com campo magnético. O vetor \vec{N} , que chamaremos de normal, é perpendicular à superfície da espira e forma um ângulo θ com as linhas de campo magnético. Matematicamente, podemos definir fluxo magnético como:

$$\phi = B.A.\cos \theta \quad (\text{Eq. 6.1})$$

Onde B é a intensidade do campo magnético, A é a área da superfície e θ é o ângulo entre as linhas de campo magnético e o vetor normal.

A unidade de fluxo magnético no Sistema Internacional é $T.m^2$, que recebe o nome de weber, cujo símbolo é Wb .

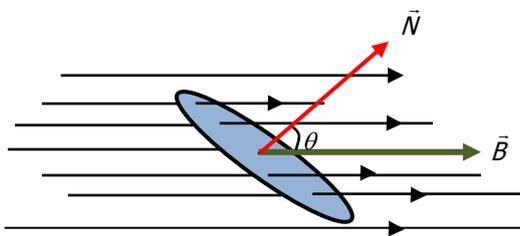


Figura 6.3: Representação do fluxo magnético e do ângulo entre as linhas de campo e o vetor normal. Se as linhas de campo magnético forem paralelas à superfície, o fluxo magnético será nulo, uma vez que θ será 90° e como já sabemos, o cosseno de 90° é igual a zero.

2.1 Variação do fluxo magnético

O fluxo magnético através de uma superfície pode variar de acordo com:

Intensidade do campo magnético: quanto mais intenso se torna um campo magnético, mais linhas de campo atravessam a área de uma superfície, aumentando o fluxo magnético através dela.

Um aumento de fluxo magnético pode ser atingido aproximando-se de uma espira circular o polo norte de um ímã em forma de barra, por exemplo, pois durante a aproximação, cada vez mais linhas de campo magnético, que saem do polo norte, atravessam na área de superfície da espira.

Se agora afastarmos da espira o polo norte do ímã haverá diminuição do fluxo magnético, já que o número de linhas de campo magnético que atravessam a área de superfície da espira torna-se cada vez menor.

Área da superfície: quanto maior a área da superfície de uma espira, por exemplo, maior será o número de linhas de campo magnético que a atravessa, aumentando, dessa forma, o fluxo magnético.

Ângulo: toda vez que houver variação no ângulo entre as linhas de campo magnético e o vetor normal, o fluxo magnético sofrerá variação. Isso pode ser alcançado girando-se uma espira no interior de um campo magnético constante.

3. LEI DE FARADAY

Michael Faraday constatou através de experimentos que uma força eletromotriz é induzida, gerando corrente elétrica induzida, mediante variação do fluxo magnético por entre a superfície da espira, ou seja, sempre que o número de linhas de campo magnético através da superfície do condutor variar (aumentando ou diminuindo), uma força eletromotriz (que simbolizaremos por **fem** e que é responsável pela geração de corrente elétrica) será induzida nesse condutor.

A Fig. 6.4 mostra uma espira circular e um ímã em forma de barra. Aproximando-se da espira o polo norte do ímã, por exemplo, aumentará o fluxo magnético através de sua superfície e poderá ser verificado o surgimento de corrente elétrica induzida na espira, justamente porque houve variação do número de linhas de campo magnético. Se o polo norte do ímã agora fosse afastado da espira, também ocorreria variação do fluxo magnético e uma corrente elétrica induzida, uma vez que o afastamento entre ímã e espira provoca diminuição do número de linhas de campo magnético que atravessam a área da espira (variação do fluxo magnético). O que difere de uma situação para outra é que no movimento de aproximação do polo norte, a corrente elétrica induzida é gerada num determinado sentido, enquanto no seu movimento de afastamento, a corrente elétrica induzida é gerada no sentido contrário.

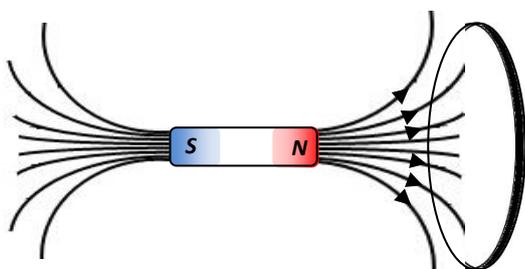


Figura 6.4: O movimento relativo entre o ímã e a espira varia o número de linhas de campo magnético que atravessam a área da espira, variando o fluxo magnético e gerando corrente elétrica.

É importante que fique claro que não é apenas aproximando ou afastando um ímã de uma espira condutora que ocorre geração de corrente elétrica induzida. Basta que ocorra variação de fluxo magnético através da área da superfície da espira, o que pode ser conseguido de várias maneiras, conforme foi discutido na seção anterior, para que corrente elétrica induzida seja gerada num condutor.

O Vídeo 6.1 mostra uma experiência em que os polos de um ímã em forma de barra são aproximados e afastados de um conjunto de espiras (bobina) ligado a um amperímetro (equipamento destinado à medição de corrente elétrica). O objetivo do experimento é mostrar que tanto no movimento de aproximação quanto de afastamento do polo norte ou do polo sul do ímã, ocorre geração de corrente elétrica induzida nas espiras, constatada através da deflexão do ponteiro do amperímetro. Entretanto, quando não há movimento

relativo entre ímã e bobina, o ponteiro do amperímetro não acusa existência de corrente elétrica, já que não há variação de fluxo magnético através da área das espiras.

A lei da indução eletromagnética de Faraday afirma que:

A INTENSIDADE DA FEM INDUZIDA EM UMA ESPIRA CONDUTORA É PROPORCIONAL À VARIAÇÃO DO NÚMERO DE LINHAS DE CAMPO MAGNÉTICO QUE ATRAVESSA A ESPIRA EM FUNÇÃO DO TEMPO.

Isso significa dizer que:

1º. Quanto maior for a variação do fluxo magnético, maior será a intensidade da fem induzida.

2º. Quanto mais rápida for a variação do fluxo magnético (menor intervalo de tempo), maior será a intensidade da fem induzida e, conseqüentemente, maior a intensidade da corrente elétrica induzida. Atingimos essa situação, por exemplo, aproximando ou afastando rapidamente uma espira de um polo magnético de um ímã.

Matematicamente a lei de Faraday é representada por:

$$\varepsilon = \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \quad (\text{Eq. 6.2})$$

Onde ε representa a fem induzida, $\Delta\phi$ representa a variação do fluxo magnético e Δt representa o intervalo de tempo.

Para uma bobina com n espiras, o fluxo magnético é diretamente proporcional ao número de espiras. Portanto, uma bobina com 800 espiras, por exemplo, terá o dobro de fluxo magnético e de corrente elétrica induzida do que uma bobina com 400 espiras.

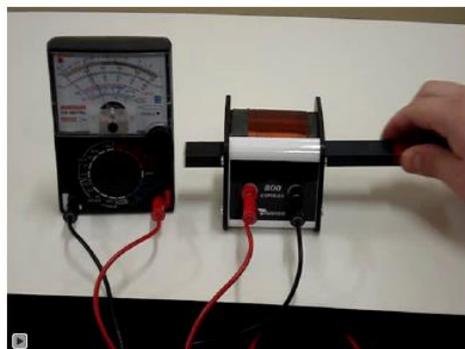
No Sistema Internacional, a unidade de fem é volt (V).

4. LEI DE LENZ

A lei de Lenz nos permite determinar o sentido da corrente elétrica induzida num condutor. Ela afirma que:

A FORÇA ELETROMOTRIZ INDUZIDA NUM CONDUTOR É NUM SENTIDO TAL QUE SE OPÕE À VARIAÇÃO QUE A INDUZIU.

A Fig. 6.5 mostra mais uma vez um ímã em forma de barra e uma espira circular. Aproximando-se da espira o



Vídeo 6.1: O movimento de um ímã em relação a uma bobina gera corrente elétrica induzida, medida através de um amperímetro, com o zero da escala na parte esquerda do visor.

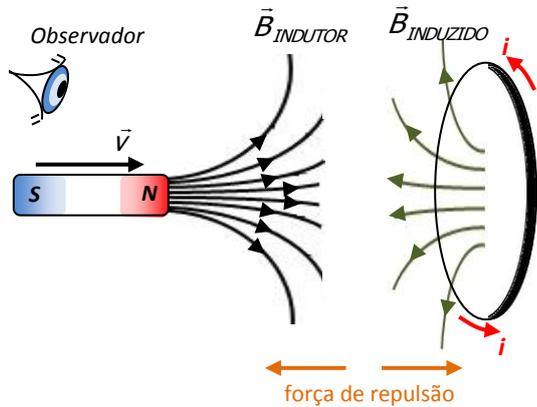


Figura 6.5: Aproximando-se de uma espira o polo norte de um ímã, ocorre geração de corrente elétrica no sentido anti-horário em relação ao observador.

polo norte do ímã aumenta o fluxo magnético através da superfície da espira. A variação do fluxo magnético na espira induz nesta uma corrente elétrica. O sentido dessa corrente é tal que o campo magnético da espira sempre fará oposição ao movimento do ímã, repelindo-o quando ele se aproxima e atraindo-o quando ele se afasta.

Um agente externo realiza um trabalho para empurrar o ímã em direção à espira e vencer a força de repulsão que surge entre o ímã e a espira. Essa energia fornecida pelo agente da força na aproximação entre ímã e espira se converte em fem induzida e, conseqüentemente, em corrente elétrica.

A Fig. 6.6 mostra agora o polo norte do ímã em forma de barra se afastando da espira circular. Podemos imaginar que o número de linhas de campo magnético que atravessam a área da espira diminui, provocando diminuição do fluxo magnético. Da mesma forma que no exemplo anterior, a corrente elétrica induzida é gerada num sentido tal que se opõe a essa variação. Surge entre o ímã e a espira, força de atração, com a face da espira voltada para o ímã comportando-se como polo magnético sul. Para isso, é preciso que a corrente elétrica induzida esteja no sentido horário.

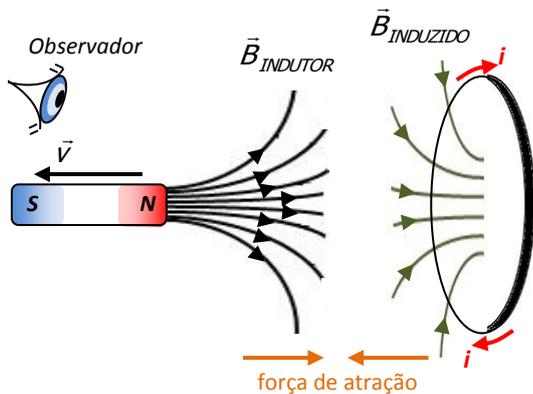


Figura 6.6: Afastando-se de uma espira o polo norte de um ímã, ocorre geração de corrente elétrica no sentido horário em relação ao observador.

Portanto, aproximando da espira o polo norte do ímã, a corrente induzida tem sentido anti-horário. Se aproximássemos da espira o polo sul do ímã, o sentido da corrente induzida seria contrário: horário. Da mesma forma, afastando da espira o polo norte do ímã, o sentido da corrente induzida é horário. Se afastássemos da espira o polo sul do ímã, o sentido da corrente seria anti-horário.

Com o auxílio da Fig. 6.7(a) e (b) apresentaremos uma forma alternativa de discutirmos a lei de Lenz. Uma haste condutora está em contato e pode deslizar sobre guias metálicas, imersas numa região com campo magnético uniforme, entrando perpendicularmente no plano da figura.

Empurrando a haste para a direita, aumenta o número de linhas de campo magnético que atravessam a área formada pelas guias metálicas e pela haste, variando, assim, o fluxo magnético através dessa superfície. Com a variação do fluxo magnético, aparece uma corrente elétrica induzida, que por sua vez, gera um campo magnético induzido, que se opõe à variação do campo magnético indutor.

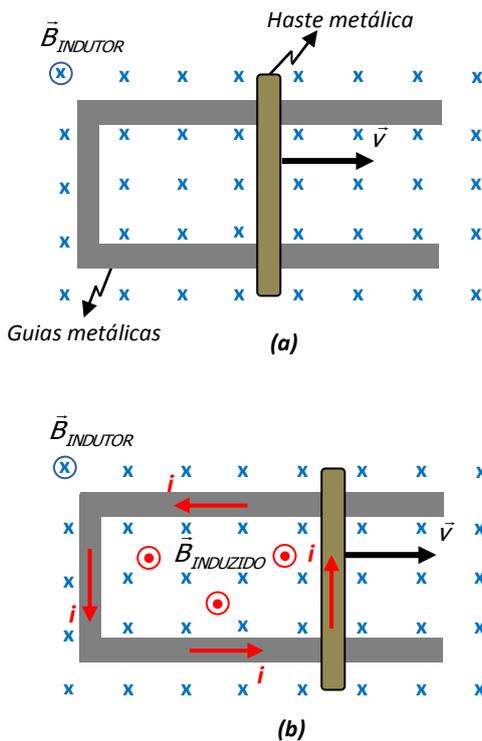


Figura 6.7: (a) A área formada pela haste e pelas guias metálicas é atravessada por linhas de campo magnético perpendiculares ao plano da figura. (b) O movimento da haste de metal aumenta o fluxo magnético, gerando corrente elétrica em sentido tal que produz um campo induzido que se opõe à variação do fluxo magnético indutor.

Considere o seguinte exemplo: inicialmente 9 linhas de campo magnético atravessam a área da superfície formada pela haste e pelas guias metálicas. Aumentando a área da superfície com o deslocamento da haste para a direita, mais 3 linhas de campo magnético passam a atravessar a superfície, totalizando 12. A corrente induzida é gerada num sentido tal que cria um campo magnético induzido com 3 linhas de campo magnético saindo do plano da página, com o “objetivo” de anular a variação do fluxo magnético. Utilizando a regra da mão direita podemos verificar que a corrente elétrica induzida possui sentido anti-horário nessa situação.

Portanto, outra forma de enunciar a lei de Lenz é:

A CORRENTE ELÉTRICA INDUZIDA POSSUI SENTIDO TAL QUE GERA UM CAMPO MAGNÉTICO INDUZIDO QUE SE OPÕE À VARIAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO INDUTOR.

5. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

A indução eletromagnética possui diversas aplicações em áreas de engenharia, indústria e suas tecnologias. A seguir, discutiremos dois desses exemplos de aplicação.

5.1 Transformador

Transformador é um dispositivo cuja função é transformar um valor de força eletromotriz alternada em outro.

A Fig. 6.8 representa esquematicamente as principais partes de um transformador. O enrolamento de espiras N_p , chamado de primário, é conectado a uma fonte de força eletromotriz alternada (a fem alternada gera corrente elétrica alternada). Primeiramente, devemos lembrar que a intensidade e o sentido da corrente elétrica alternada variam com o tempo. Enquanto a corrente elétrica no primário aumenta sua intensidade, até um valor máximo, aumenta também o campo magnético gerado ao seu redor e ainda o fluxo magnético desse campo através do enrolamento de espiras N_s , chamado de secundário. A variação do fluxo magnético em N_s faz com que apareça uma fem induzida e, conseqüentemente, uma corrente elétrica induzida nesse enrolamento de espiras. A partir da diminuição da intensidade da corrente elétrica no primário, diminui o fluxo magnético no secundário, gerando fem induzida e corrente elétrica induzida, uma vez que houve variação do fluxo magnético.

É importante destacar que a variação do fluxo magnético também é causada pela mudança de sentido da corrente elétrica variável, e não só pela variação de sua intensidade.

Se o primário for conectado a uma fonte de fem contínua, como por exemplo, uma pilha ou uma bateria, não haverá variação do fluxo magnético através do secundário e, conseqüentemente não surgirá nenhuma fem induzida neste último enrolamento de espiras.

Para maior rendimento do transformador, utiliza-se um núcleo de material ferromagnético, a fim de concentrar o campo magnético nos dois enrolamentos e influenciar que praticamente todo o campo magnético gerado no primário vá para o secundário.

Embora fosse desejável que não houvesse perdas de energia eletromagnética nos transformadores, alguma perda sempre há. Por isso, dizemos que é ideal um transformador em que não há perdas de energia. Para um transformador ideal, é válida a seguinte relação:

$$\frac{N_p}{N_s} = \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_s} \tag{Eq. 6.3}$$

Onde N_p é o número de espiras do primário, N_s é o número de espiras do secundário, ε_p é a fem do primário e ε_s é a fem induzida no secundário.

Quando o número de espiras no primário for maior que no secundário ($N_p > N_s$), dizemos que o transformador é rebaixador de tensão, pois a fem induzida no secundário (ε_s) torna-se menor que a fem do primário (ε_p). Já se N_p for menor do que N_s , dizemos que o transformador é elevador de tensão, já que a fem induzida no secundário (ε_s) torna-se maior que a fem do primário.

Para o transformador ideal, consideramos que a potência de entrada do gerador ($i_p \cdot \varepsilon_p$) é igual à potência de saída ($i_s \cdot \varepsilon_s$). Portanto, é válida a seguinte relação:

$$i_p \cdot \varepsilon_p = i_s \cdot \varepsilon_s \tag{Eq. 6.4}$$

5.2. Geração de energia elétrica

No Brasil, a maior parte da energia elétrica é gerada em usinas hidrelétricas, devido à grande quantidade de rios em todo país.

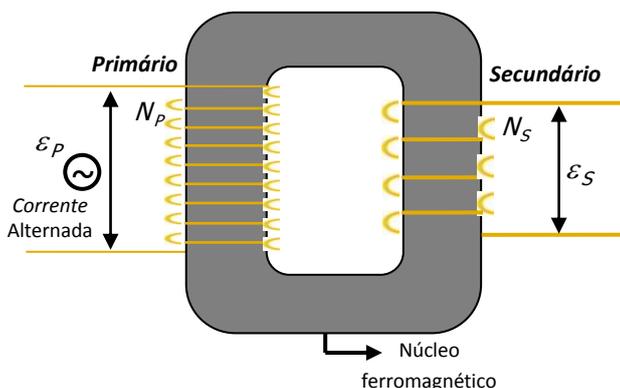


Figura 6.8: Força eletromotriz alternada entra pelo primário, gerando variação de fluxo magnético e força eletromotriz induzida no secundário.

A Fig. 6.9 representa esquematicamente algumas partes importantes de uma usina hidrelétrica. A água represada em um reservatório flui através de um duto com uma determinada vazão, transformando energia potencial gravitacional da água em energia cinética. Ao final do duto, o movimento da água causa a rotação de uma turbina, que está acoplada a um gerador.

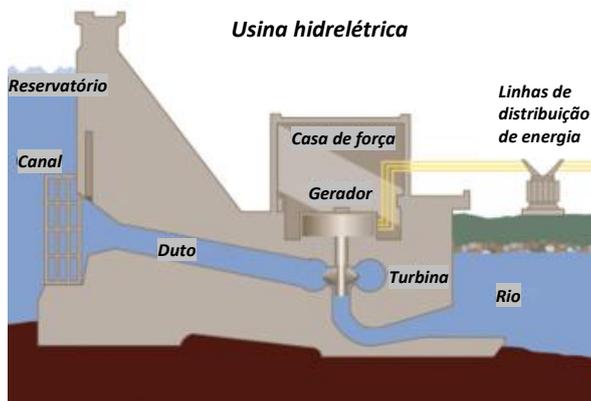


Figura 6.9: Representação esquemática de uma usina hidrelétrica

Fonte:
http://pt.wikipedia.org/wiki/Usina_hidrel%C3%A9trica

O gerador utilizado em uma hidrelétrica pode ser parecido com o gerador elétrico representado na Fig. 6.10 (também chamado de alternador quando a corrente elétrica gerada for alternada). Ele é formado por bobinas (conjunto de enrolamento de espiras) que constituem a armadura e um ímã gerando um campo magnético no local. Em geradores de hidrelétricas, os ímãs naturais são substituídos por eletroímãs, e as turbinas podem ser ligadas aos eletroímãs ou às armaduras.

O movimento de rotação da turbina provoca, portanto, movimento relativo entre a armadura e o eletroímã, variando o fluxo magnético através das espiras e gerando corrente elétrica induzida, conforme discutido pela lei da indução eletromagnética de Faraday. A cada meia volta da armadura ocorre alteração no sentido da corrente elétrica induzida, acarretando, com isso, geração de corrente elétrica alternada.

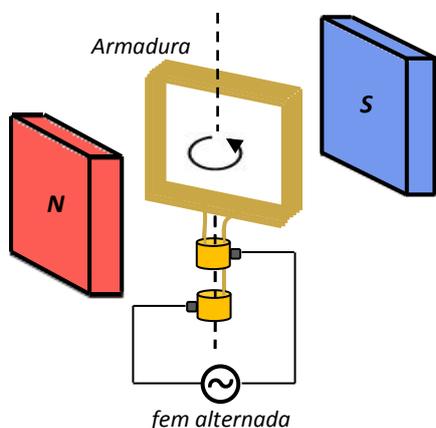


Figura 6.10: O movimento de rotação da armadura no interior de um campo magnético constante varia o fluxo magnético, gerando corrente elétrica alternada.

Nas usinas hidrelétricas são utilizados transformadores para elevar a tensão e a energia é transportada para as cidades a alta tensão. Os transformadores que se vê nos postes de luz das cidades são do tipo rebaixadores de tensão, baixando a alta voltagem para 220V, em Pelotas, por exemplo, e para 127V em Porto Alegre.

6. REVISÃO

Neste capítulo descrevemos as leis de Faraday e Lenz para o eletromagnetismo. Foi abordado que se pode gerar corrente elétrica induzida através de um condutor, desde que ocorra variação do campo magnético através de sua superfície. Para determinar o sentido da corrente elétrica induzida, utiliza-se a lei de Lenz.

Apresentamos, ao final, dois exemplos em que os conceitos de indução eletromagnética se aplicam diretamente.

7. VÍDEOS

Para que você possa se aprofundar nesses

assuntos, sugerimos os seguintes vídeos:

- <http://www.youtube.com/watch?v=b-PpUjLZvIY>
- <http://www.youtube.com/watch?v=KGTZPTnZBFE>
- <http://www.youtube.com/watch?v=ZyG7q3SaDD0>
- <http://www.youtube.com/watch?v=M7d7pB0oeLw>

8. BIBLIOGRAFIA

BISCUOLA, G. J.; BÔAS, N. V.; DOCA, R. H. *Física*, vol. 3. Ed. 1. São Paulo: Saraiva, 2010.

BÔAS, N. V.; DOCA, R. H.; BISCUOLA, G. J. *Tópicos de Física*, vol. 3. Ed. 16 – reform. e ampl. São Paulo: Saraiva, 2001.

CARRON, W.; GUIMARÃES, O. *As Faces da Física: volume único*. Ed. 3. São Paulo: Moderna, 2006

GASPAR, A. *Compreendendo a Física*, vol. 3: *Eletromagnetismo e Física Moderna*. Ed. 1. São Paulo: Ática, 2010.

GASPAR, A. *Física: Eletromagnetismo e Física Moderna*, vol. 3. Ed 1. São Paulo: Ática, 2003.

GRF - Grupo de Reelaboração do Ensino de Física. *Física 3: eletromagnetismo*. Ed. 2. São Paulo: Edusp, 1995.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; KRANE, K. *Física*, vol. 3. Ed. 4. Rio de Janeiro: LTC, 1992.

HEWITT, P. G. *Física Conceitual*. Ed. 9 – Porto Alegre: Bookman, 2002.

RAMALHO J, F.; GILBERTO, N.; ANTÔNIO, P. *Os Fundamentos da Física*, vol. 3. Ed. 8 – ver. e ampl. São Paulo: Moderna, 2003

SANT'ANA, B.; MARTINI, G.; REIS, H. C.; SPINELLI, W. *Conexões com a Física*, vol.: *Eletricidade – Física do Século XXI*. Ed. 1. São Paulo: Moderna, 2010.

SHIGEKIYO, C. T.; KAZUHITO, Y.; FUKE, L. F. *Os Alicerces da Física*, vol. 3: *eletricidade*. Ed. 14. São Paulo: Saraiva, 2007.

TIPLER, P. A.; MOSCA, G. *Física para cientistas e engenheiros*, vol. 2: *eletricidade e magnetismo; ótica* Ed. 5. Rio de Janeiro: LTC, 2006.