

PARTE II

Unidade C

Eletromagnetismo

Capítulo 13 Campos magnéticos, 298

Capítulo 14 Força magnética, 333

Capítulo 15 Indução eletromagnética, 369

Capítulo 16 Noções de corrente alternada, 397

PARTE II



Capítulo 13

Campos magnéticos

O funcionamento de uma bússola é baseado na existência de um campo magnético ao redor da Terra. Se uma bússola for aproximada de um ímã ou de um condutor atravessado por uma corrente elétrica, sua agulha se orienta demonstrando a presença de campos magnéticos em ambas as situações.

13.1 Conceitos iniciais

Os ímãs existentes na Natureza, ou os fabricados pelo homem, apresentam propriedades chamadas fenômenos magnéticos.

13.2 Campo magnético dos ímãs

Os fenômenos magnéticos podem ser descritos considerando-se que um ímã origina um campo magnético na região que o envolve.

13.3 Campo magnético das correntes elétricas

A passagem de corrente elétrica através de condutores gera, ao redor deles, um campo magnético, deixando clara a relação entre os fenômenos elétricos e os fenômenos magnéticos.

13.4 Campo magnético terrestre

A orientação da agulha magnética de uma bússola pode ser explicada como se a Terra fosse um grande ímã.

Voando baixo

A nova geração de trens não vai mais viajar sobre rodas. Eles irão “voar”! O Maglev (do inglês: magnetic levitation), desenvolvido inicialmente na Alemanha, flutua nos trilhos sob a ação de um campo magnético. Uma tecnologia baseada no princípio da atração e repulsão de polos magnéticos.

Mais econômico

Ao eliminar as rodas, economiza-se a energia perdida no atrito com os trilhos, restando como força dissipadora apenas a resistência do ar, minimizada com o formato aerodinâmico do trem.

Sem trepidações

A altura da levitação precisa ser constante, por isso, a corrente elétrica, que gera o campo magnético nos eletroímãs dispostos ao longo da pista é regulada continuamente. Isso garante uma sustentação estável do trem.

Em operação

O Maglev ainda é um sonho para a maioria dos países. Apenas uma linha comercial, de tecnologia alemã, está em operação no mundo, ligando Xangai ao aeroporto de Púdong, na China.

Puxando e empurrando

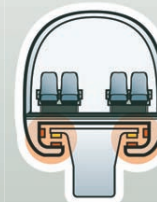
Polos de nomes contrários se atraem, polos de mesmo nome se repelem. A propulsão do trem se baseia nesse princípio.



Ímãs permanentes ou eletroímãs, instalados no trem, são puxados e empurrados pela alternância das polaridades de eletroímãs enfileirados ao longo da pista.

Tecnologias de levitação

Atualmente duas principais tecnologias estão sendo testadas, a alemã e a japonesa. Em ambas o peso do trem é sustentado pela força magnética.



Alemã

Eletroímãs na parte de baixo do trilho atraem os eletroímãs presos ao trem, levantando-o.



Japonesa

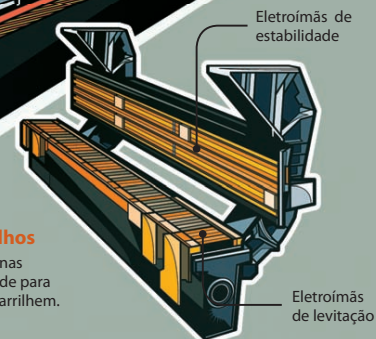
Bobinas supercondutoras na superfície dos trilhos repelem os eletroímãs presos ao trem.

Para pensar

Ao sair da estação, o Maglev chinês atinge 360 km/h em 150 s. Calcule a aceleração escalar média e a distância percorrida nesse trecho, supondo a aceleração escalar constante.

Correndo nos trilhos

Eletroímãs instalados nas laterais dão estabilidade para que os trens não descarriem.



Seção 13.1

Objetivo

- Conhecer os principais fenômenos magnéticos.

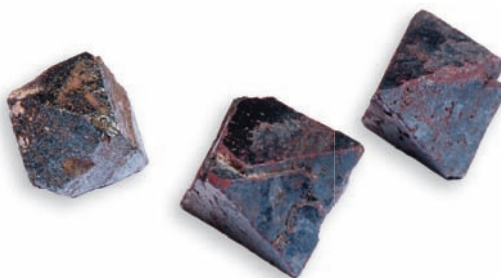
Termos e conceitos

- magnetita
- ímãs artificiais
- bússola

Conceitos iniciais

Há séculos, os seres humanos observaram que determinadas pedras atraíam o ferro ou outras pedras semelhantes. Essas pedras receberam o nome de **ímãs**, e as propriedades que se manifestam espontaneamente na Natureza foram denominadas **fenômenos magnéticos**.

Hoje sabemos que essas pedras contêm um óxido de ferro (Fe_3O_4), a **magnetita**, que é um ímã natural.



◀ Magnetita:
um ímã natural

Atualmente são mais utilizados os **ímãs artificiais**, obtidos a partir de determinados processos (imantação).

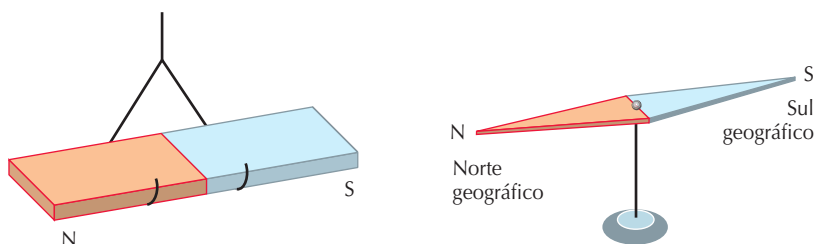
Os principais fenômenos magnéticos são os que veremos a seguir.

- I. Quando se coloca um ímã em contato com fragmentos de ferro (limalha), nota-se que estes não aderem a ele em toda a sua extensão, mas predominantemente em determinadas regiões. No caso de um ímã em forma de barra, essas regiões, próximas das extremidades (fig. 1), são denominadas **polos**. Qualquer ímã possui dois polos.



Figura 1. Um ímã possui dois polos. ▶

- II. Suspendendo-se um ímã de modo que possa girar livremente, ele assume, aproximadamente, a direção norte-sul geográfica do local. Denomina-se **polo norte (N)** do ímã a região que se volta para o norte geográfico, e **polo sul (S)**, a outra (fig. 2). Para que a identificação dos polos seja mais fácil, costuma-se pintar as extremidades dos ímãs com cores diferentes.



▶ Figura 2. Ímãs em forma de barra e de agulha magnética, podendo girar livremente, orientam-se, aproximadamente, na direção norte-sul geográfica do lugar.

Essa propriedade dos ímãs propiciou aos chineses a invenção da bússola, na qual um ímã, em forma de losango (denominado agulha magnética), é apoiado sobre um eixo móvel numa caixa dotada de pontos cardeais, bem como de uma graduação (fig. 3).



Figura 3. Bússola: primeira aplicação prática dos fenômenos magnéticos. ➤

III. Os ímãs exercem, entre si, forças de ação mútua de **atração** ou **repulsão**, conforme a disposição de um em relação ao outro (fig. 4).

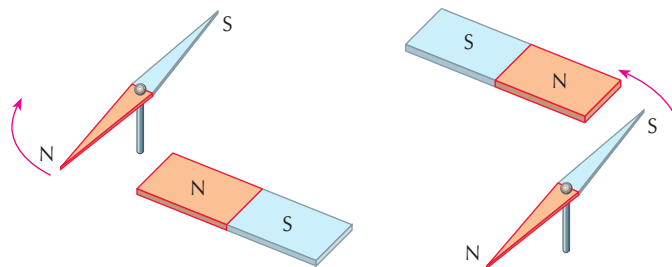


Figura 4. Atração entre polos diferentes e repulsão entre polos iguais.

Verifica-se que:

Polos de mesmo nome se repelem e de nomes diferentes se atraem.

IV. Outra característica importante do ímã é a **inseparabilidade de seus polos**.

Cortemos um ímã em duas partes iguais, que por sua vez podem ser redivididas em outras tantas (fig. 5). Observa-se, então, que cada uma dessas partes constitui um novo ímã que, embora menor, tem sempre dois polos. É possível continuar esse processo de divisão até o nível microscópico, com a obtenção de ímãs elementares.

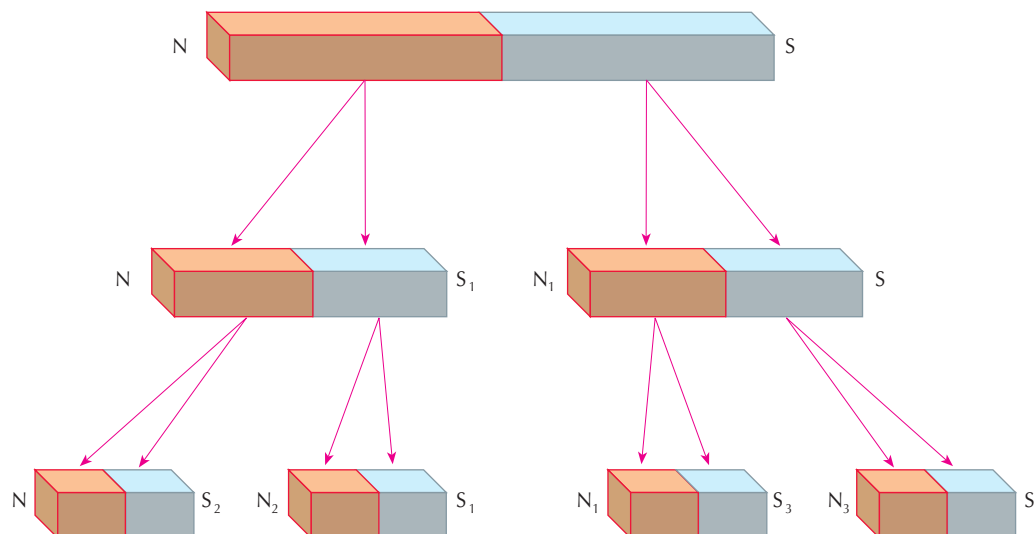


Figura 5. Os polos de um ímã são inseparáveis.



Seção 13.2

Objetivos

- ▶ Analisar as características do vetor indução magnética.
- ▶ Definir linhas de indução.
- ▶ Caracterizar campo magnético uniforme.

Termos e conceitos

- linha de indução

Campo magnético dos ímãs

Vimos na seção anterior que um ímã atrai o ferro e atrai ou repele outros ímãs ou as agulhas magnéticas das bússolas.

Esses fatos podem ser descritos, considerando-se que um ímã origina na região que o envolve um **campo magnético**. Assim, por exemplo, a agulha magnética de uma bússola “sente” a presença do ímã por meio do campo magnético que ele origina. Analogamente, a agulha magnética também produz um campo magnético que age sobre o ímã.

Em Eletrostática, vimos que uma carga elétrica puntiforme fixa origina, no espaço que a envolve, um campo elétrico. A cada ponto P do campo associou-se um vetor campo elétrico $\vec{E}$. Analogamente, a cada ponto de um campo magnético, associaremos um vetor $\vec{B}$, denominado **vetor indução magnética** ou, simplesmente, **vetor campo magnético**.

1 Vetor indução magnética

Direção e sentido de $\vec{B}$

Ao colocarmos uma pequena agulha magnética num ponto P , de um campo magnético originado por um ímã, ela se orienta assumindo uma certa posição de equilíbrio. A **direção de $\vec{B}$** em P é a direção definida pelo eixo NS da agulha magnética. O **sentido de $\vec{B}$** é o sentido para o qual o polo N da agulha magnética aponta (fig. 6).

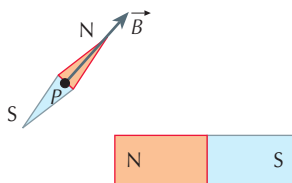


Figura 6. Direção e sentido do vetor indução magnética $\vec{B}$.

Intensidade de $\vec{B}$

A intensidade do vetor indução magnética $\vec{B}$ é determinada através da força magnética que age numa carga elétrica q lançada do ponto P do campo magnético, conforme veremos no capítulo 14.

No Sistema Internacional de Unidades (SI), a unidade de intensidade do vetor indução magnética $\vec{B}$ denomina-se **tesla** (símbolo **T**), em homenagem ao físico croata Nicolas Tesla*.

Uma outra unidade de intensidade do vetor indução magnética é o **gauss** (símbolo **G**). Essa unidade é mais antiga, ainda em uso, e não pertence ao SI. A relação entre tesla e gauss é: $1 \text{ T} = 10^4 \text{ G}$



* **TESLA**, Nicolas (1856-1943), físico croata, é autor de importantes trabalhos sobre máquinas elétricas de correntes contínua e alternada, e sobre oscilações elétricas de alta frequência.

2 Linhas de indução

Em um campo magnético, chama-se **linha de indução** toda linha que, em cada ponto, é tangente ao vetor $\vec{B}$ e orientada no sentido desse vetor (fig. 7). Se limalha de ferro for colocada sob a ação do campo, cada fragmento funciona como uma minúscula agulha magnética, orientando-se na direção desse campo e desenhando as linhas de indução.

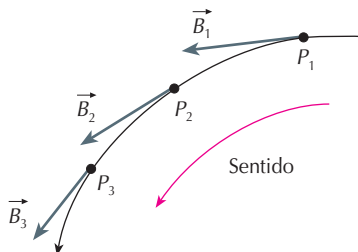


Figura 7.
Linha de indução.

As linhas de indução são uma simples representação gráfica da variação de $\vec{B}$ numa certa região do espaço.

Na figura 8, temos o aspecto do campo de um ímã em forma de barra. A representação é feita em um plano contendo o eixo maior da barra. Se experimentalmente colocarmos limalha de ferro sobre uma cartolina e, sob esta, um ímã em forma de barra, obtemos o desenho das linhas de indução. Convenciona-se que:

As linhas de indução saem do polo norte e chegam ao polo sul externamente ao ímã.

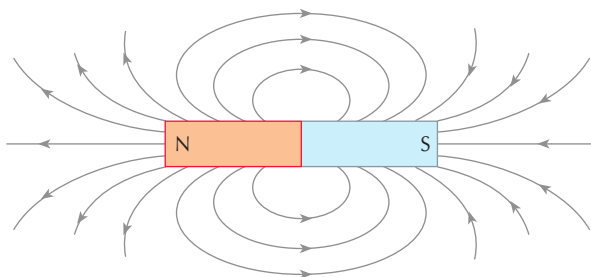


Figura 8. Linhas de indução de um ímã em forma de barra.

No caso de um ímã em forma de U (também conhecido como ímã em ferradura), observamos uma concentração de limalha de ferro ao redor dos polos. Todavia, entre os ramos paralelos do ímã, as linhas de indução se dispõem praticamente paralelas, originando um campo magnético que pode ser considerado uniforme (fig. 9).

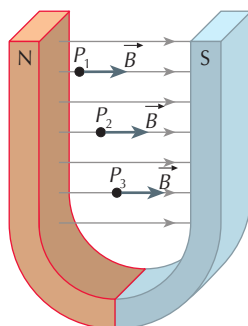
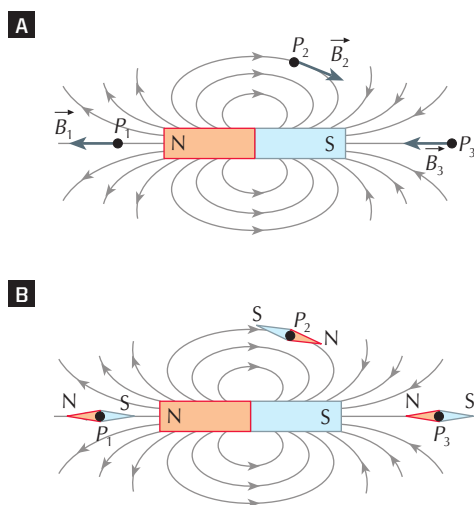


Figura 9. Linhas de indução de um ímã em ferradura.

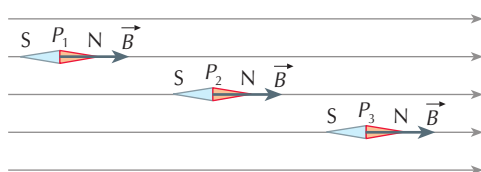
Campo magnético uniforme é aquele no qual, em todos os pontos, o vetor $\vec{B}$ tem a mesma direção, o mesmo sentido e a mesma intensidade. No campo magnético uniforme, as linhas de indução são retas paralelas igualmente espaçadas e orientadas.

Na **figura 10A**, representamos os vetores campo magnético em alguns pontos do campo originado por um ímã em forma de barra e na **figura 10B**, as posições de equilíbrio de pequenas agulhas magnéticas colocadas nesses pontos.

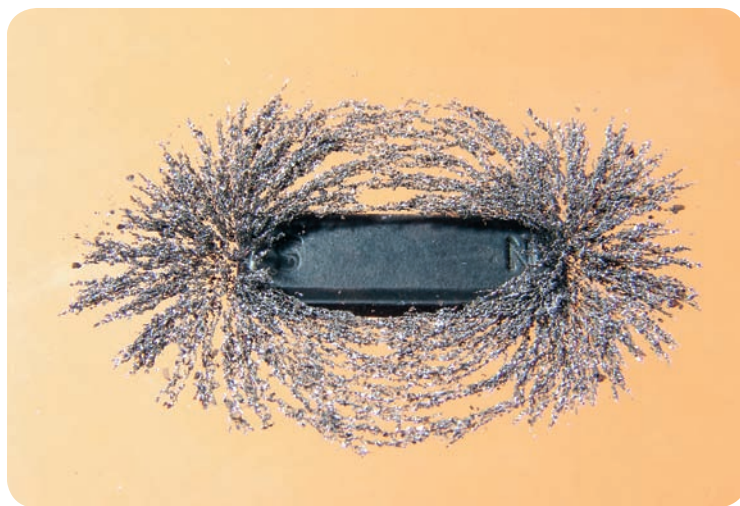
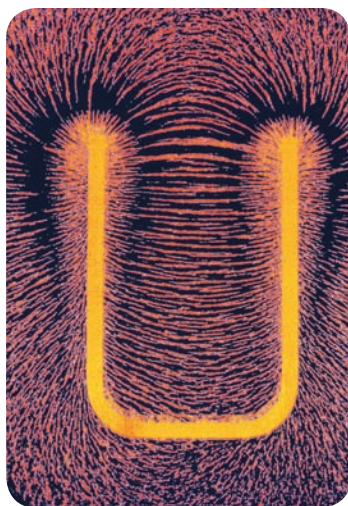


◀ **Figura 10.** (A) Em cada ponto do campo o vetor campo magnético $\vec{B}$ é tangente à linha de indução e tem o sentido dela. (B) As pequenas agulhas magnéticas se orientam na direção do vetor campo magnético $\vec{B}$ e com o polo norte no sentido de $\vec{B}$.

As agulhas magnéticas colocadas num campo magnético uniforme orientam-se de modo a se dispor na direção das linhas de indução e com os polos norte no sentido das linhas. Essas posições são de equilíbrio estável (**fig. 11**).



◀ **Figura 11.** Posições de equilíbrio estável de agulhas magnéticas colocadas num campo magnético uniforme.



▶ Com limalha de ferro, consegue-se visualizar o campo magnético de um ímã. À esquerda, o campo de um ímã em forma de ferradura e, à direita, de um ímã em forma de barra.

Entre na rede Nos endereços eletrônicos <http://www.micro.magnet.fsu.edu/electromag/java/magneticlines/index.html> e <http://www.micro.magnet.fsu.edu/electromag/java/magneticlines2/index.html> (acesso em julho/2009), você pode visualizar as linhas de indução dos campos magnéticos produzidos por ímãs.



Conteúdo digital Moderna PLUS <http://www.modernaplus.com.br>
Atividade experimental: Experimentos com ímãs

Seção 13.3

Objetivos

► Determinar intensidade, direção e sentido do vetor indução magnética com base na lei de Biot-Savart.

► Utilizar a regra da mão direita nº 1 para determinar o sentido do vetor indução magnética gerado por uma corrente elétrica.

► Caracterizar o vetor indução magnética no centro de uma espira circular percorrida por corrente elétrica.

► Conhecer a regra do relógio para determinar a natureza norte ou sul dos polos de uma espira.

► Caracterizar o vetor indução magnética gerado por um condutor reto percorrido por corrente elétrica.

► Compreender a lei de Ampère.

► Caracterizar o vetor indução magnética no interior de um solenoide percorrido por corrente elétrica.

Termos e conceitos

- espira circular
- bobina chata
- solenoide

Campo magnético das correntes elétricas

Durante muito tempo foram estudadas apenas as propriedades dos ímãs, sem considerar que houvesse alguma relação entre os fenômenos magnéticos e os elétricos.

Contudo, em 1820, um fato importante mudou essa situação. Oersted* descobriu que a passagem da corrente elétrica por um fio condutor também produz fenômenos magnéticos, tais como o desvio da agulha de uma bússola colocada nas proximidades de um condutor (fig. 12).

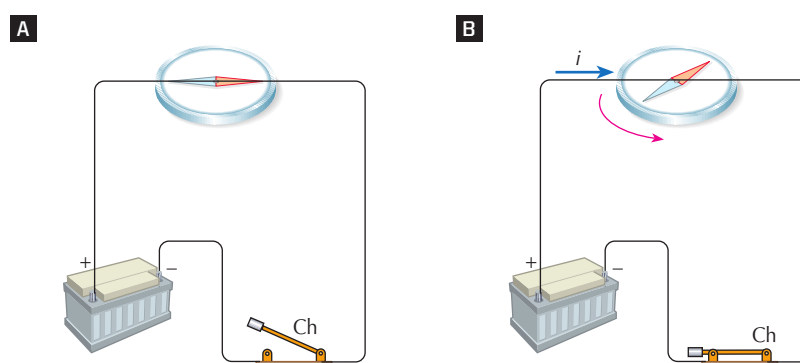


Figura 12. Experiência de Oersted. No caso (A), estando a chave Ch aberta, a agulha está paralela ao fio. No caso (B), fechando-se a chave, a agulha sofre um desvio.

Os fenômenos magnéticos não constituem, portanto, fenômenos isolados; eles têm relação íntima com os fenômenos elétricos.

Concluimos, então, que, além do campo magnético dos ímãs, também a corrente elétrica origina um campo magnético, uma vez que ímãs e correntes produzem os mesmos efeitos. Portanto, **um ímã ou um condutor percorrido por corrente originam na região do espaço que os envolve um campo magnético.**

O campo magnético desempenha o papel de transmissor das interações magnéticas. Na seção 13.2, apresentamos uma visão macroscópica do campo magnético originado por um ímã. É importante ressaltar a visão microscópica, considerando que, no caso dos ímãs, o campo magnético se deve a movimentos particulares que os elétrons executam no interior dos átomos que o constituem, conforme veremos na seção 14.4.

Entre na rede

No endereço eletrônico <http://www.micro.magnet.fsu.edu/electromag/java/compass/index.html> (acesso em julho/2009), você pode simular o desvio sofrido pela agulha magnética de uma bússola ao ser imersa num campo magnético.



Conteúdo digital Moderna PLUS <http://www.modernaplus.com.br>
História da Física: Do Magnetismo ao Eletromagnetismo

* **OERSTED**, Hans Christian (1777-1851), físico dinamarquês, realizou experiências sobre a ação da corrente elétrica sobre uma agulha magnética, o que constituiu a primeira observação do efeito magnético da corrente elétrica. Essas experiências foram estudadas e explicadas por outros cientistas, como Biot, Savart e, sobretudo, Ampère.



À histórica experiência de Oersted seguiram-se trabalhos de inúmeros cientistas, determinando um extraordinário desenvolvimento científico e tecnológico do Eletromagnetismo. Todas as experiências e descobertas nessa área mostraram que não existe diferença alguma entre o campo magnético devido a um ímã e o originado por uma corrente elétrica.

Em particular, para a determinação do campo magnético devido à corrente elétrica, foram estabelecidas várias leis muito importantes na Física.

Uma delas é a denominada **lei de Biot-Savart***, antigamente chamada lei elementar de Laplace.

Considere um condutor com um formato qualquer, no vácuo, percorrido pela corrente elétrica de intensidade i (fig. 13). Seja ΔL um elemento muito pequeno desse condutor e P um ponto da região do espaço próximo ao condutor e à distância r de ΔL . Seja α o ângulo entre ΔL e r . Observe que ΔL e r determinam o plano π .

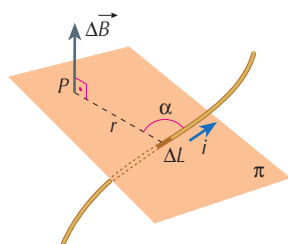


Figura 13. Lei de Biot-Savart: determinação de $\Delta \vec{B}$ no ponto P , devido à corrente elétrica de intensidade i no elemento ΔL de um condutor.

A lei de Biot-Savart estabelece que o vetor indução magnética elementar $\Delta \vec{B}$ no ponto P , originado pela corrente elétrica de intensidade i no elemento ΔL do condutor, tem as seguintes características:

a) direção: perpendicular ao plano π .

b) intensidade: diretamente proporcional a i e a $\Delta L \sin \alpha$ e inversamente proporcional ao quadrado da distância r . Isso pode ser expresso pela seguinte fórmula:

$$\Delta B = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{i \cdot \Delta L \cdot \sin \alpha}{r^2}$$

em que $\frac{\mu_0}{4\pi}$ representa a constante de proporcionalidade, que depende do meio (no caso, o vácuo).

O fator μ_0 é denominado **permeabilidade magnética do vácuo**. Esse fator é uma constante universal análoga à permissividade ϵ_0 do vácuo na Eletrostática e só depende do sistema de unidades adotado. No SI, ela vale:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{T} \cdot \text{m}}{\text{A}}$$

c) sentido: é determinado por uma regra prática que denominamos **regra da mão direita nº 1** (fig. 14).

Coloque a mão direita com os quatro dedos lado a lado no mesmo plano que o da palma da mão e com o polegar levantado nesse plano. Aponte o polegar no sentido da corrente elétrica que está passando ao longo de ΔL , e os demais dedos no sentido de ΔL para o ponto P , onde o campo está sendo determinado. Observe que a palma da mão estará no plano π da figura 13. O sentido do campo será aquele de trás para a frente da mão, isto é, o sentido no qual a mão daria um empurrão.

* **BIOT**, Jean-Baptiste (1774-1862), matemático e físico francês. A Matemática Aplicada foi o seu campo de investigação em várias áreas da Física. Em 1820, com seu colega Félix Savart, deu sua maior contribuição ao Eletromagnetismo com o estudo do campo magnético produzido por fios condutores atravessados por corrente. No campo da Óptica, foi um dos principais promotores da teoria corpuscular da luz.

SAVART, Félix (1791-1841), médico e físico francês. Ensinou Física em Paris e inventou o **aparelho de Savart**, para medição de vibrações sonoras, e o **quartzo de Savart**, para estudar a polarização da luz. A unidade de intervalo logarítmico de frequência chama-se **savart** em sua homenagem.

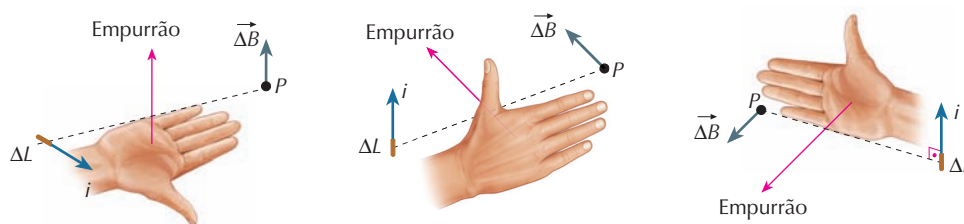


Figura 14. Determinação do sentido de $\Delta \vec{B}$ utilizando a regra da mão direita nº 1.

No ponto P (fig. 13), o vetor $\vec{B}$ originado pela corrente é a soma vetorial de todas as componentes $\Delta \vec{B}$.

Observações

① De $\Delta B = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{i \cdot \Delta L \cdot \sin \alpha}{r^2}$ temos $\mu_0 = \frac{\Delta B \cdot 4\pi r^2}{i \cdot \Delta L \cdot \sin \alpha}$. Portanto, a unidade de μ_0 será:

$$\frac{\text{tesla} \times (\text{metro})^2}{\text{ampère} \times \text{metro}} = \frac{\text{T} \cdot \text{m}}{\text{A}}$$

② As constantes ϵ_0 e μ_0 estão relacionadas através da chamada **relação de concatenação de Maxwell**:

$$\epsilon_0 \cdot \mu_0 \cdot c^2 = 1$$

em que c é a velocidade de propagação da luz no vácuo.

2

Campo magnético de uma espira circular

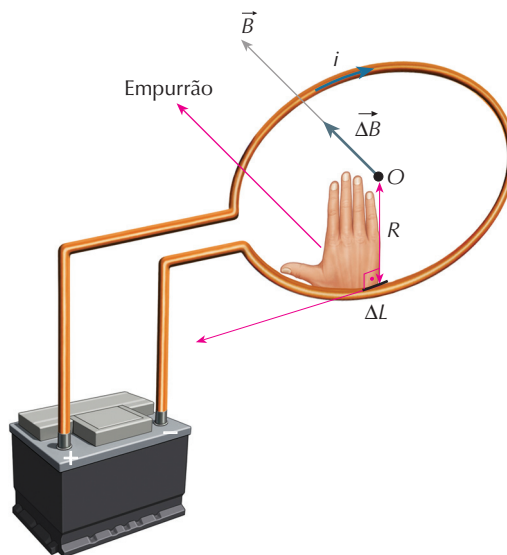
Considere uma espira circular (condutor dobrado segundo uma circunferência) de centro O e raio R (fig. 15).

O vetor indução magnética $\vec{B}$, no ponto O , apresenta as seguintes características:

- a) direção:** perpendicular ao plano da espira;
- b) sentido:** determinado pela regra da mão direita nº 1;
- c) intensidade:** determinada a partir da lei de Biot-Savart:

$$\Delta B = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{i \cdot \Delta L \cdot \sin \alpha}{R^2}$$

Figura 15. Determinação do vetor $\vec{B}$ no centro O de uma espira circular.



Como o ângulo entre R e ΔL é $\alpha = 90^\circ$, temos que: $\Delta B = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{i \cdot \Delta L}{R^2}$

No ponto O , a intensidade de $\vec{B}$ será: $B = \sum \Delta B = \sum \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{i \cdot \Delta L}{R^2} \Rightarrow B = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{i}{R^2} \cdot \sum \Delta L$

Sendo $\sum \Delta L = 2\pi R$ (comprimento da circunferência), obtém-se:

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{i}{R^2} \cdot 2\pi R \Rightarrow B = \frac{\mu_0}{2} \cdot \frac{i}{R}$$



Externamente, as linhas de indução saem do polo norte de um ímã e chegam ao polo sul. Uma espira percorrida por uma corrente elétrica origina um campo magnético análogo ao de um ímã, e então atribui-se a ela um polo norte, do qual as linhas saem, e um polo sul, no qual elas chegam (fig. 16).

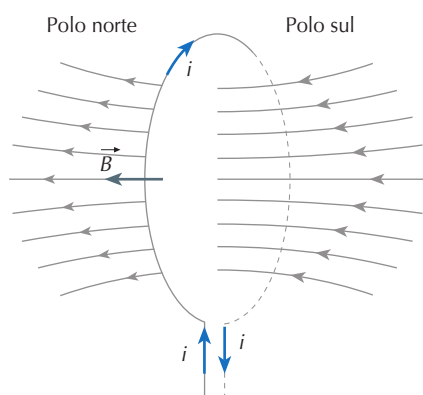


Figura 16. Em uma espira circular, temos um polo norte e um polo sul.



Visualização, com limalha de ferro, de um campo magnético gerado por condutor em forma de espira circular percorrido por corrente elétrica.

Pode-se usar a seguinte regra prática para determinar a natureza norte ou sul de um polo da espira, denominada **regra do relógio**.

Olhando de frente para o centro de uma face da espira, percebemos se esta é um polo norte (fig. 17) ou um polo sul (fig. 18), conforme o sentido da corrente.

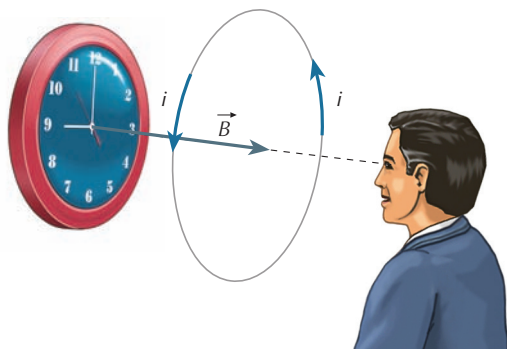


Figura 17. Polo norte: se a corrente for vista no sentido anti-horário.

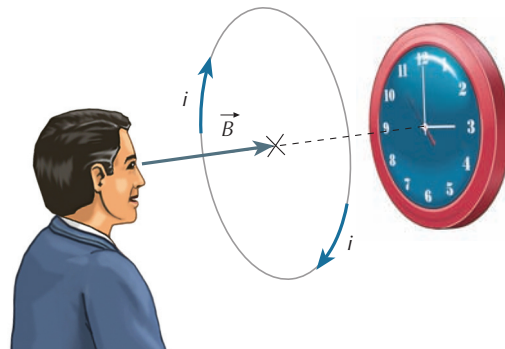


Figura 18. Polo sul: se a corrente for vista no sentido horário.

A espira pode também ser representada no plano da figura, quando então o vetor indução magnética $\vec{B}$ no centro será perpendicular a esse plano. Para representar $\vec{B}$ nessas condições, existem dois símbolos internacionalmente usados para quaisquer vetores, conforme mostrado nas figuras 19 e 20.

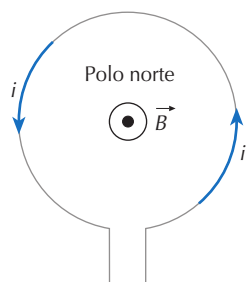


Figura 19. O símbolo $\odot$ representa o vetor orientado do plano para o observador.

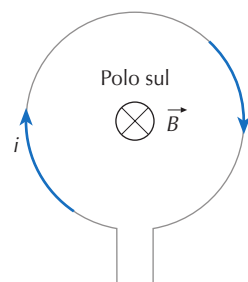


Figura 20. O símbolo $\otimes$ representa o vetor orientado do observador para o plano.

Justapondo-se N espiras iguais, de modo que a espessura do enrolamento seja muito menor que o diâmetro de cada espira, temos a denominada **bobina chata** (fig. 21), na qual a intensidade do vetor indução magnética $\vec{B}$ no centro vale:

$$B_b = N \cdot \frac{\mu_0}{2} \cdot \frac{i}{R}$$

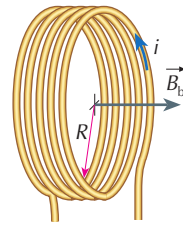


Figura 21. Bobina chata.

Aproximando-se um ímã de uma bobina (fig. 22), verifica-se que o polo norte do ímã atrai o sul e repele o norte da bobina.

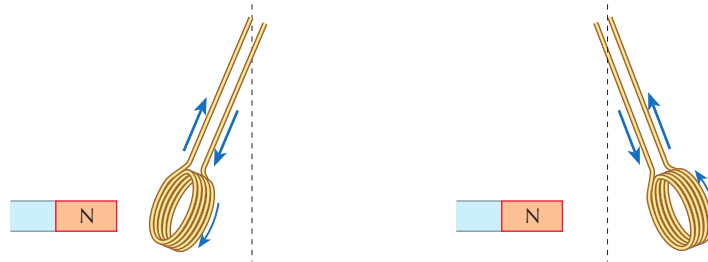


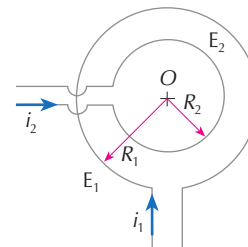
Figura 22. O comportamento de uma bobina é análogo ao de um ímã.

EXERCÍCIO RESOLVIDO

R. 124 Duas espiras circulares E_1 e E_2 , concêntricas e coplanares, de raios $R_1 = 10\pi$ cm e $R_2 = 2,5\pi$ cm, são percorridas pelas correntes elétricas i_1 e i_2 , indicadas na figura.

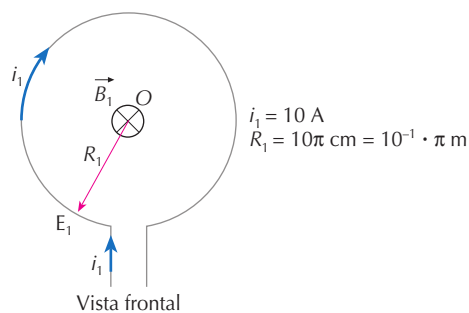
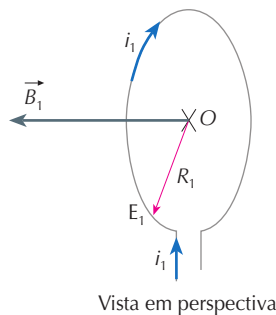
Sendo $i_1 = 10$ A e $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ T · m/A:

- caracterize o vetor indução magnética originado pela corrente elétrica i_1 no centro O;
- determine o valor de i_2 para que o vetor indução magnética resultante no centro seja nulo.



Solução:

- Considerando apenas a espira E_1 , o campo magnético que ela origina no centro O terá as características mostradas na figura:



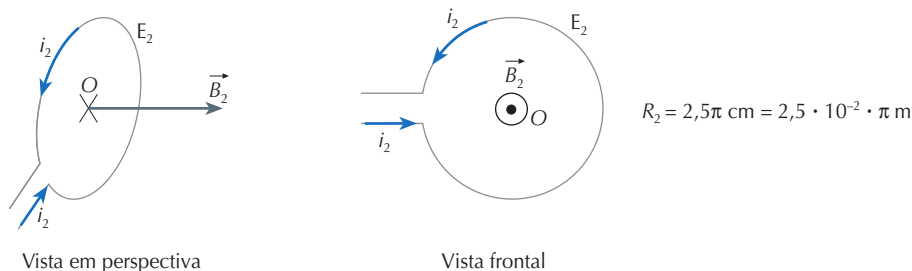
direção: perpendicular ao plano da espira;

sentido: determinado pela regra da mão direita n° 1 ou pela regra do relógio. Na vista frontal, $\vec{B}_1$ está orientado do observador para o plano e representado pela convenção internacional $\otimes$;

intensidade: $B_1 = \frac{\mu_0}{2} \cdot \frac{i_1}{R_1} \Rightarrow B_1 = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2} \cdot \frac{10}{10^{-1}\pi} \Rightarrow B_1 = 2 \cdot 10^{-5}$ T



- b) Considerando apenas a espira E_2 , o campo magnético que ela origina no centro O terá as características indicadas na figura:



direção: perpendicular ao plano da espira;

sentido: na vista frontal, $\vec{B}_2$ está orientado pela convenção internacional $\odot$;

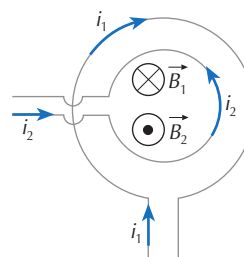
intensidade: $B_2 = \frac{\mu_0}{2} \cdot \frac{i_2}{R_2}$

Para que o vetor indução magnética resultante no centro O seja nulo, como $\vec{B}_1$ e $\vec{B}_2$ têm a mesma direção e sentidos opostos (figura ao lado), eles devem ter a mesma intensidade:

$$B_1 = B_2 \Rightarrow \frac{\mu_0}{2} \cdot \frac{i_1}{R_1} = \frac{\mu_0}{2} \cdot \frac{i_2}{R_2} \Rightarrow \frac{i_1}{R_1} = \frac{i_2}{R_2}$$

Assim, temos:

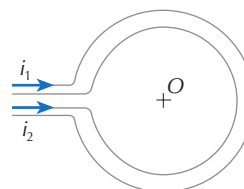
$$\frac{i_1}{R_1} = \frac{i_2}{R_2} \Rightarrow \frac{10}{10^{-1} \cdot \pi} = \frac{i_2}{2,5 \cdot 10^{-2} \cdot \pi} \Rightarrow i_2 = 2,5 \text{ A}$$



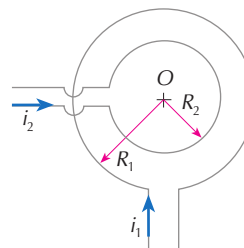
Resposta: a) $\odot \vec{B}_1$ com intensidade $2 \cdot 10^{-5} \text{ T}$; b) 2,5 A

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

- P. 311** Duas espiras circulares, concêntricas e coplanares, de raios praticamente iguais a $2\pi \text{ m}$ são percorridas pelas correntes elétricas $i_1 = 5 \text{ A}$ e $i_2 = 3 \text{ A}$, indicadas na figura. Sendo $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$, caracterize o vetor indução magnética originado no centro O .



- P. 312** Duas espiras circulares, concêntricas e coplanares, de raios R_1 e R_2 , são percorridas pelas correntes elétricas i_1 e i_2 indicadas na figura. Sendo nulo o vetor indução magnética resultante no centro O , determine a relação entre as correntes elétricas $\frac{i_1}{i_2}$.



- P. 313** Uma bobina chata é formada de 50 espiras circulares de raio 10 cm . Sendo $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$, calcule a intensidade da corrente elétrica que deve percorrer a bobina para que o vetor indução magnética, no centro, tenha intensidade $2 \cdot 10^{-3} \text{ T}$.

Campo magnético de um condutor reto

Considere um condutor reto, extenso e vertical percorrido pela corrente elétrica i , atravessando uma cartolina colocada em um plano horizontal (fig. 23). Espalhando-se limalha de ferro sobre a cartolina, observamos que a limalha fica disposta segundo circunferências concêntricas ao condutor.

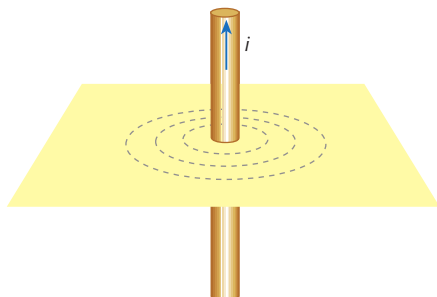
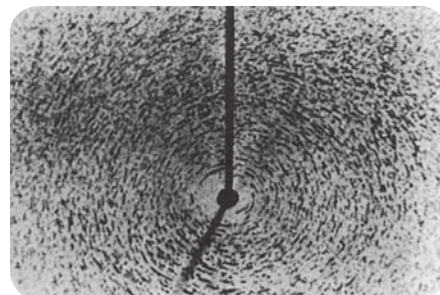


Figura 23. Linhas de indução do campo magnético de um condutor reto e extenso.



Visualização, com limalha de ferro, de um campo magnético gerado por um condutor retilíneo percorrido por corrente elétrica.

As linhas de indução do campo magnético de um condutor reto, percorrido por corrente elétrica, são circunferências concêntricas ao condutor, situadas em planos perpendiculares a ele.

Em um ponto P , à distância r do fio, o vetor indução magnética terá as seguintes características (figs. 24 e 25):

- a) **direção:** tangente à linha de indução que passa pelo ponto P ;
- b) **sentido:** determinado pela regra da mão direita nº 1;
- c) **intensidade:** à distância r do fio a intensidade de $\vec{B}$ será a mesma em todos os pontos. Essa intensidade é dada por:

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{i}{r}$$

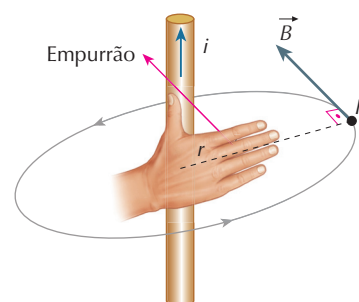


Figura 24. Características do campo magnético de um condutor reto e extenso.

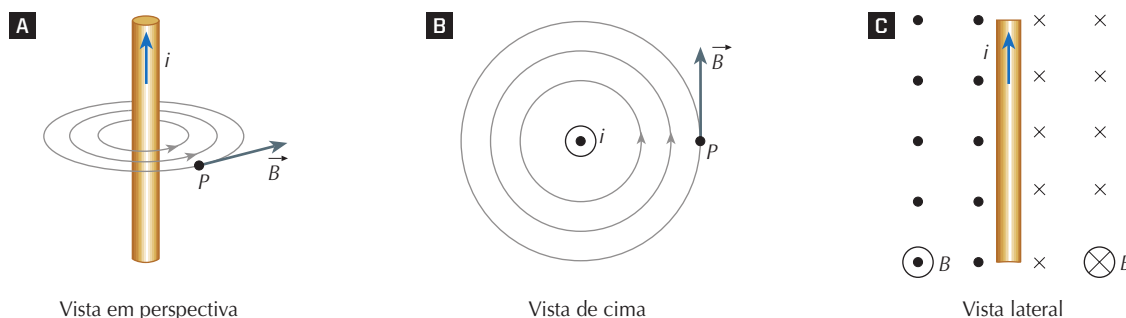


Figura 25. Três vistas do campo magnético originado por um condutor reto e extenso. Nas vistas (B) e (C), utilizamos a convenção internacional apresentada nas figuras 19 e 20 para uma grandeza orientada do plano para o observador $\odot$ e do observador para o plano $\otimes$.

Entre na rede No endereço eletrônico <http://br.geocities.com/saladefisica3/laboratorio/maodireita/maodireita.htm> (acesso em julho/2009), você pode simular a aplicação da regra da mão direita nº 1. É possível inverter o sentido da corrente e movimentar a bússola colocada próxima do condutor.



Conteúdo digital Moderna PLUS <http://www.modernaplus.com.br>
Atividade experimental: *Experiência de Oersted*



4 Lei de Ampère

Introduzindo o conceito de **circulação** (ou **circuitação**) de um vetor, podemos apresentar uma das leis mais importantes do Eletromagnetismo: a lei de Ampère. Essa lei permite calcular, de maneira simples, alguns campos magnéticos.

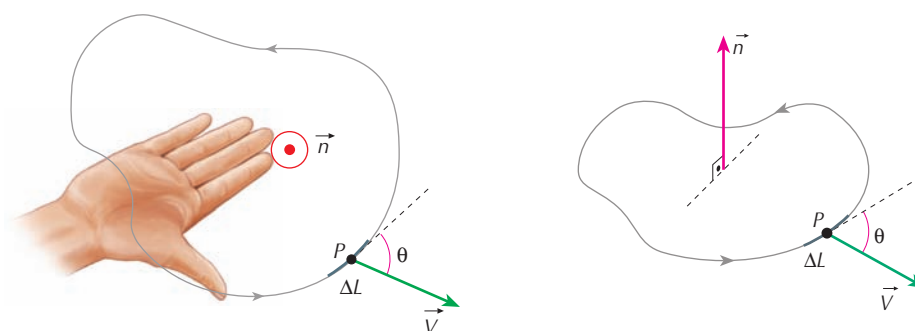
Considere um percurso plano fechado, de formato qualquer, representado em perspectiva e no plano da figura. Adotando um sentido para o percurso, tracemos a normal $\vec{n}$ ao plano pela regra da mão direita nº 1, dispondo o polegar no sentido do percurso.

No ponto P , seja $\vec{V}$ um vetor no plano do percurso, formando ângulo θ com um elemento $\Delta\vec{L}$ de deslocamento qualquer. Define-se elemento de circulação do vetor $\vec{V}$ em $\Delta\vec{L}$ a grandeza

$$\Delta C(\vec{V}) = V \cdot \Delta L \cdot \cos \theta$$

A circulação de $\vec{V}$, no percurso fechado, é a soma dos elementos de circulação de $\vec{V}$:

$$C(\vec{V}) = \sum \Delta C(\vec{V})$$



Considere o percurso fechado e orientado enlaçando as correntes elétricas i_1 , i_2 e i_3 (fig. 26). Essas correntes elétricas determinam, em todos os pontos do percurso, vetores $\vec{B}$.

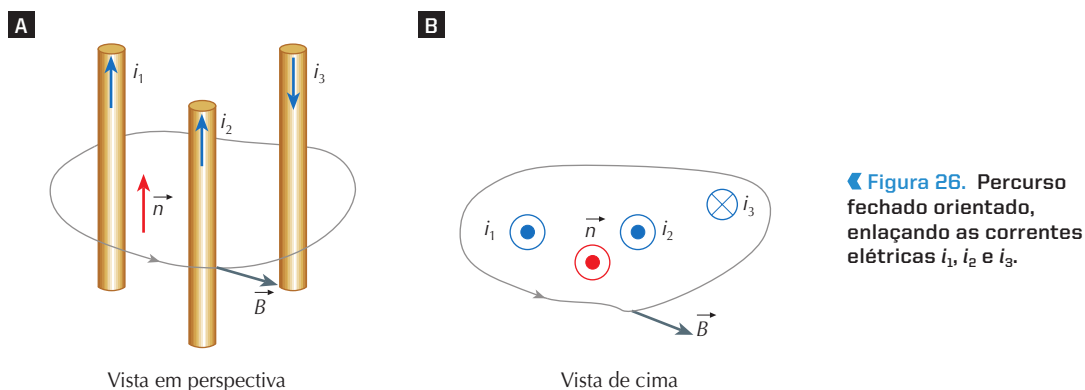


Figura 26. Percurso fechado orientado, enlaçando as correntes elétricas i_1 , i_2 e i_3 .

A lei de Ampère afirma que:

A circulação do vetor $\vec{B}$ em um percurso fechado é proporcional à soma algébrica das intensidades das correntes elétricas enlaçadas pelo percurso:

$$C(\vec{B}) = \mu_0 \cdot \sum i$$

em que μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo.

Ao aplicar essa lei, consideram-se positivas as correntes elétricas que atravessam o percurso **no sentido da normal** ao plano do percurso e negativas, **no caso contrário**. Assim, na figura 26, tem-se:

$$C(\vec{B}) = \mu_0 \cdot (+i_1 + i_2 - i_3)$$

Seja o condutor reto e extenso do item anterior percorrido pela corrente elétrica i . Calculemos a intensidade do vetor $\vec{B}$ em um ponto P qualquer, à distância r do condutor (fig. 27). Consideremos um percurso fechado coincidente com a linha de indução e no mesmo sentido. Determinemos o sentido da normal $\vec{n}$ ao plano de percurso, de acordo com a regra da mão direita $\vec{n} \propto \vec{I}$.

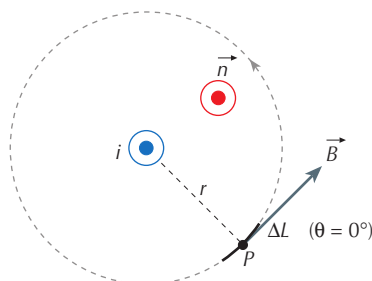


Figura 27. Esquema para o cálculo do campo magnético de um condutor reto, utilizando a lei de Ampère.

A circulação do vetor $\vec{B}$ ao longo desse percurso é dada por:

$$C(\vec{B}) = \sum B \cdot \Delta L \cdot \cos \theta$$

Sendo $\theta = 0^\circ$ e B constante, decorre que:

$$C(\vec{B}) = B \cdot \sum \Delta L$$

Como o percurso é uma circunferência de raio r , tem-se $\sum \Delta L = 2\pi r$, resultando:

$$C(\vec{B}) = B \cdot 2\pi r$$

Pela lei de Ampère:

$$C(\vec{B}) = \mu_0 \cdot i$$

Então, $B \cdot 2\pi r = \mu_0 \cdot i$, de onde se chega à fórmula do item anterior:

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{i}{r}$$

O campo magnético de um condutor reto foi um dos primeiros estudados experimentalmente no Eletromagnetismo. Sua existência foi constatada na experiência de Oersted e, mais tarde, serviu de base para o estudo de muitos fenômenos do Eletromagnetismo.

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

R. 125 Um fio de cobre reto e extenso é percorrido por uma corrente elétrica de intensidade $i = 1,5$ A. Sabe-se que $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ T · m/A. Calcule a intensidade do vetor indução magnética originado num ponto à distância $r = 0,25$ m do fio.

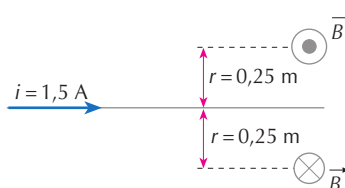
Solução:

Na figura, o fio é representado em vista lateral, adotando-se um sentido para a corrente elétrica $i = 1,5$ A. Se o ponto estiver acima do fio, o vetor indução magnética será perpendicular ao plano da figura orientado para o observador; se estiver abaixo do fio, será orientado para o plano. A intensidade vale:

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{i}{r} \Rightarrow B = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \cdot \frac{1,5}{0,25} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow B = 12 \cdot 10^{-7} \Rightarrow \boxed{B = 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ T}}$$

Resposta: $1,2 \cdot 10^{-6}$ T



R. 126 Na figura, têm-se as seções transversais de dois condutores retos, A e B, paralelos e extensos. Cada condutor é percorrido por uma corrente elétrica de intensidade 5,0 A no sentido indicado. Determine a intensidade do vetor indução magnética, resultante no ponto P, que dista $r = 0,20$ m de cada condutor. Como se orienta uma pequena agulha magnética colocada em P? (É dado $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{T} \cdot \text{m}}{\text{A}}$.)

Solução:

Cada corrente elétrica determina em P, no plano da figura, um vetor indução magnética perpendicular a r , com sentidos determinados pela regra da mão direita nº 1. Os vetores indução magnética $\vec{B}_A$ e $\vec{B}_B$ têm mesma intensidade:

$$B_A = B_B = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{i}{r} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \cdot \frac{5,0}{0,20} \Rightarrow B_A = B_B = 5,0 \cdot 10^{-6} \text{ T}$$

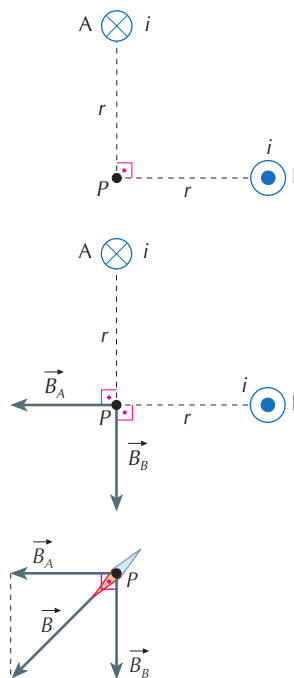
O vetor indução magnética resultante em P será $\vec{B} = \vec{B}_A + \vec{B}_B$ obtido pela regra do paralelogramo.

O vetor $\vec{B}$ tem intensidade:

$$B = B_A \cdot \sqrt{2} \Rightarrow B = 5,0 \cdot \sqrt{2} \cdot 10^{-6} \text{ T} \Rightarrow B \approx 7,1 \cdot 10^{-6} \text{ T}$$

A agulha colocada em P se orienta na direção do vetor indução magnética resultante $\vec{B}$, com o polo norte no sentido de $\vec{B}$.

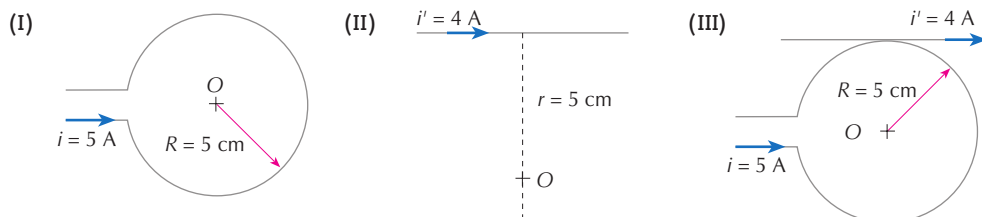
Resposta: $\approx 7,1 \cdot 10^{-6} \text{ T}$



EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 314 Um condutor reto e extenso é percorrido por uma corrente elétrica constante de intensidade $i = 2$ A. Calcule a intensidade do vetor indução magnética $\vec{B}$ originado num ponto à distância $r = 1$ m do condutor. (Dado: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{T} \cdot \text{m}}{\text{A}}$)

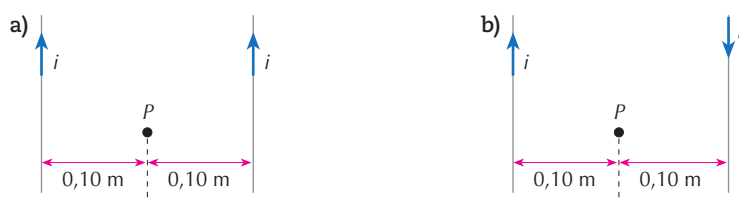
P. 315 Determine a intensidade do vetor indução magnética $\vec{B}$ originado pela corrente elétrica no ponto O, nos casos a seguir. (Dado: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{T} \cdot \text{m}}{\text{A}}$)



P. 316 Dois condutores retos paralelos e extensos são percorridos por corrente elétrica de mesma intensidade $i = 10$ A.

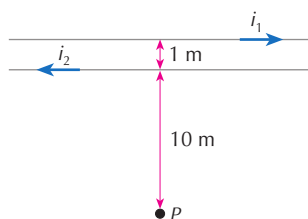
Determine a intensidade do vetor indução magnética $\vec{B}$, no ponto P, nos casos indicados a seguir.

(É dado $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{T} \cdot \text{m}}{\text{A}}$.)

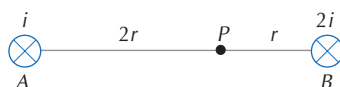


P. 317 Dois condutores retos, paralelos e extensos conduzem correntes elétricas de sentidos opostos e intensidade $i_1 = i_2 = 100$ A. Determine a intensidade do vetor indução magnética no ponto P.

(Dado: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{T} \cdot \text{m}}{\text{A}}$)



P. 318 A figura representa as seções transversais de dois condutores retos, A e B, paralelos e extensos, percorridos por correntes elétricas de intensidades i e $2i$, respectivamente. O vetor indução magnética originado em P pela corrente elétrica i tem intensidade $2 \cdot 10^{-6}$ T.



Determine a intensidade do vetor indução magnética resultante que i e $2i$ originam em P. Como se orienta uma pequena agulha magnética colocada em P?

5 Campo magnético de um solenoide

Denomina-se **solenóide** (do grego: *solen* = tubo) ou **bobina longa** um fio condutor enrolado segundo espiras iguais, uma ao lado da outra, igualmente espaçadas.

Na **figura 28**, o solenoide passa pelos furos de uma cartolina, sobre a qual colocamos limalha de ferro. Quando uma corrente elétrica i circula pelo solenoide, a limalha de ferro se dispõe segundo as linhas de indução do campo magnético originado.

Conforme mostra a **figura 28**, no **interior do solenoide**, o **campo é praticamente uniforme** e tem a direção de seu eixo geométrico; **externamente**, o **campo é praticamente nulo**.

As extremidades do solenoide denominam-se polos: norte, de onde saem as linhas de indução; sul, por onde entram.

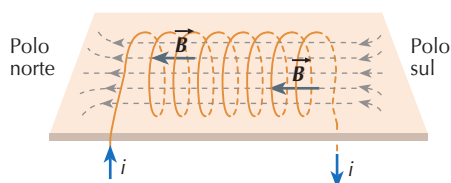
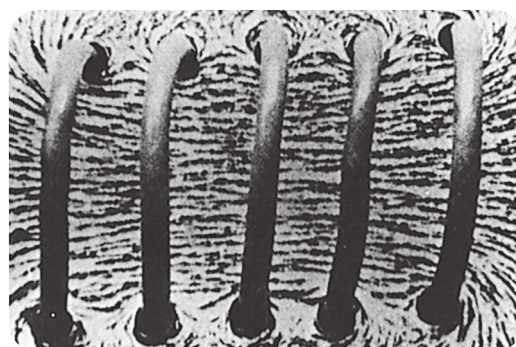


Figura 28. Campo magnético de um solenoide.



Visualização, com limalha de ferro, de um campo magnético gerado por um solenoide percorrido por corrente elétrica.

No interior do solenoide, o vetor indução magnética $\vec{B}$ tem as seguintes características:

- a) direção:** do eixo geométrico do solenoide;
- b) sentido:** determinado pela regra da mão direita nº 1;
- c) intensidade:** pode ser obtida aplicando-se a lei de Ampère e calculando-se a circulação do vetor $\vec{B}$.



Para esse cálculo, considere o solenoide representado no plano da **figura 29** e imagine, como percurso fechado, o retângulo cujos lados de comprimento L sejam paralelos ao eixo do solenoide. Oriente o percurso de modo que o sentido da normal $\vec{n}$ ao plano de percurso coincida com o sentido das correntes enlaçadas. Sendo i a corrente no solenoide e N o número de espiras enlaçadas pelo percurso, tem-se:

$$\Sigma i = N \cdot i$$

A lei de Ampère permite concluir que:

$$C(\vec{B}) = \mu_0 \cdot \Sigma i \Rightarrow C(\vec{B}) = \mu_0 \cdot N \cdot i$$

No comprimento L interno, tem-se o elemento de circulação: $\Delta C_1(\vec{B}) = B \cdot L \cdot \cos 0^\circ = B \cdot L$

No exterior, como $\vec{B} = \vec{0}$, $\Delta C_2(\vec{B}) = 0$, e nos lados perpendiculares ao eixo do solenoide, e internos a ele, os elementos de circulação valem: $\Delta C_3(\vec{B}) = \Delta C_4(\vec{B}) = 0$, pois $\cos 90^\circ = 0$.

Assim, no percurso fechado, a circulação do vetor $\vec{B}$ valerá:

$$C(\vec{B}) = \Delta C_1(\vec{B}) + \Delta C_2(\vec{B}) + \Delta C_3(\vec{B}) + \Delta C_4(\vec{B}) \Rightarrow C(\vec{B}) = B \cdot L$$

$$\text{Assim: } B \cdot L = \mu_0 \cdot N \cdot i \Rightarrow B = \mu_0 \cdot \frac{N}{L} \cdot i$$

Nessa fórmula, N é o número de espiras existentes num comprimento L de solenoide. Logo, $\frac{N}{L}$ representa a densidade linear de espiras, isto é, o número de espiras por unidade de comprimento.

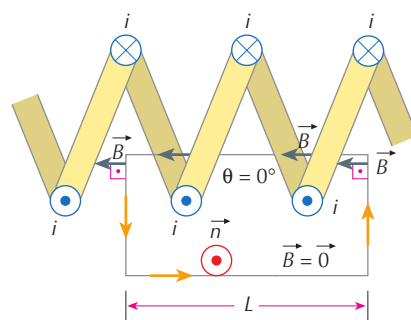


Figura 29. Esquema para calcular a intensidade do campo de um solenoide.



Conteúdo digital Moderna PLUS <http://www.modernaplus.com.br>
Atividade experimental: *Campo magnético de um solenoide*

EXERCÍCIO RESOLVIDO

R. 127 Um solenoide compreende 10.000 espiras por metro. Sendo $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$, calcule a intensidade do vetor indução magnética originado na região central pela passagem da corrente elétrica de intensidade $i = 0,4 \text{ A}$.

Solução:

Para esse solenoide, no comprimento $L = 1 \text{ m}$, o número de espiras é $N = 10.000$. Sendo $i = 0,4 \text{ A}$, tem-se:

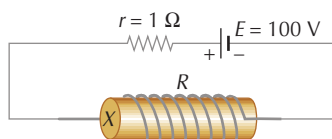
$$B = \mu_0 \cdot \frac{N}{L} \cdot i \Rightarrow B = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{10.000}{1} \cdot 0,4 \Rightarrow B = 1,6\pi \cdot 10^{-3} \text{ T}$$

Resposta: $1,6\pi \cdot 10^{-3} \text{ T}$

EXERCÍCIO PROPOSTO

P. 319 No circuito ao lado, o gerador mantém uma corrente elétrica no solenoide de resistência $R = 9 \Omega$. O solenoide possui 10 espiras por centímetro e sabe-se que $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$.

- Determine a intensidade do vetor indução magnética no interior do solenoide.
- A extremidade X do solenoide é um polo norte ou um polo sul?



Campo magnético terrestre

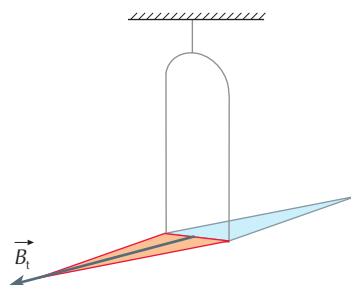
Objetivos

- Conhecer as principais características do campo magnético terrestre.
- Compreender os conceitos de inclinação magnética e declinação magnética.
- Compreender as cartas magnéticas.

Termos e conceitos

- polos magnéticos
- vetor geomagnético
- linha agônica
- linha isogônica

Suspendendo-se uma agulha magnética de modo que possa girar livremente, como na **figura 30**, ela sempre se orienta em uma direção definida. Esse comportamento leva-nos a admitir a existência do **campo magnético terrestre**. A cada ponto desse campo fica associado um vetor $\vec{B}_t$.



◀ **Figura 30.** Com o auxílio de uma agulha magnética, constatamos a existência do campo magnético terrestre.

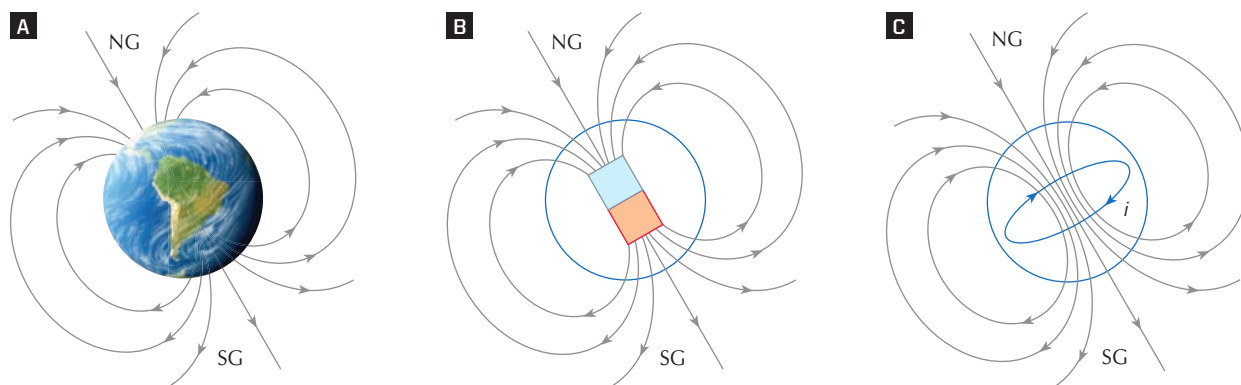
Na **figura 31A**, mostramos as linhas de indução do campo magnético observado nas proximidades da Terra. Essas observações são explicadas com base na ideia de que a Terra é um grande ímã (**fig. 31B**), indo as linhas de indução do **Sul Geográfico (SG)** para o **Norte Geográfico (NG)**.

Assim, deve-se assumir que o ímã Terra tem o polo sul magnético próximo ao norte geográfico e o polo norte magnético próximo ao sul geográfico.

Modernamente, determinações do campo magnético da Terra mostraram que ele é semelhante ao campo magnético originado por uma espira circular percorrida por corrente muito intensa.

Na **figura 31C**, é representado o equivalente moderno da antiga teoria do “ímã Terra”. O centro dessa espira está a algumas centenas de quilômetros do centro da Terra e pertence a um plano inclinado de $11,5^\circ$ em relação ao plano do equador. Com base em pesquisas geológicas, considera-se que o núcleo da Terra é constituído de vários metais pesados, entre eles o níquel e o ferro. As correntes elétricas existentes nesse núcleo seriam as principais responsáveis pelo campo magnético terrestre.

O vetor campo magnético terrestre (vetor campo geomagnético) $\vec{B}_t$ está sujeito a variações. Uma das causas dessas variações são as correntes elétricas na ionosfera. Outra é a atividade magnética do Sol.



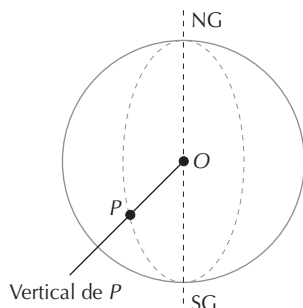
▶ **Figura 31.** Campo magnético terrestre: (A) campo observado; (B) ímã Terra; (C) explicação moderna da origem de $\vec{B}_t$.



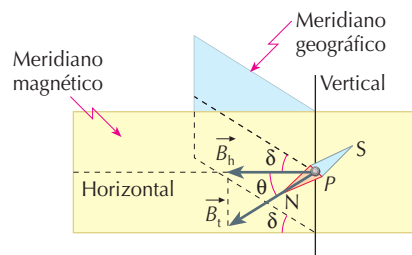
Elementos do campo magnético terrestre

O vetor campo magnético $\vec{B}_t$ pode ser determinado para qualquer ponto P na superfície da Terra. Considere, de início, o meridiano geográfico que passa pelo ponto P (fig. 32). Esse meridiano é um plano que corta perpendicularmente a superfície terrestre segundo um círculo que passa pelo ponto P e pelos polos geográficos.

Coloque uma agulha magnética que possa girar livremente no ponto P , de modo que seu centro de gravidade coincida com P (fig. 33). A direção vertical do lugar e o eixo da agulha (suporte do vetor $\vec{B}_t$) determinam um plano denominado **meridiano magnético** do lugar.

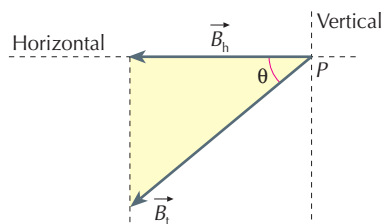


► **Figura 32.** Meridiano geográfico. Considerando a Terra uma esfera, o meridiano que passa pelo ponto P é o plano do grande círculo, passando por P e pelos polos geográficos NG e SG.



► **Figura 33.** Campo magnético terrestre: $\vec{B}_t$ = vetor indução magnética terrestre
 $\vec{B}_h$ = componente horizontal
 θ = inclinação magnética
 δ = declinação magnética

Denomina-se **inclinação magnética** do lugar o ângulo θ formado entre o vetor $\vec{B}_t$ e a direção horizontal do lugar (fig. 34).



► **Figura 34.** Inclinação magnética e componente horizontal de $\vec{B}_t$.

Os **polos magnéticos** da Terra são pontos nos quais a inclinação magnética é igual a 90° .

Equador magnético é a linha que liga todos os pontos cuja inclinação magnética é nula.

A **componente horizontal** do campo magnético terrestre em qualquer ponto P é a projeção $\vec{B}_h$ do vetor $\vec{B}_t$ sobre a horizontal nesse ponto (fig. 34). Essa componente é facilmente determinada de forma experimental.

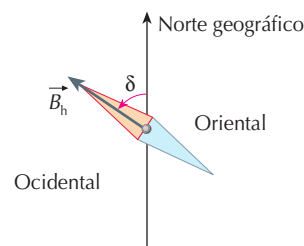
Do triângulo destacado na **figura 34**, obtemos: $\cos \theta = \frac{B_h}{B_t} \Rightarrow B_t = \frac{B_h}{\cos \theta}$

Denomina-se **declinação magnética** do lugar o ângulo δ formado pelos meridianos magnético e geográfico ou, como se indica na **figura 35**, entre a componente horizontal $\vec{B}_h$ e a direção do norte geográfico da Terra.

A declinação é chamada **oeste** (W, do inglês *west*) quando o polo norte da agulha está na parte ocidental do meridiano geográfico (caso da **figura 35**).

A declinação é chamada **leste** (E, do inglês *east*) quando o polo norte da agulha está na parte oriental do meridiano geográfico. Os pontos cujas declinações magnéticas são iguais a zero constituem uma linha denominada **linha agônica**.

A declinação oeste também é chamada negativa e a declinação leste, positiva.



► **Figura 35.** Declinação magnética.

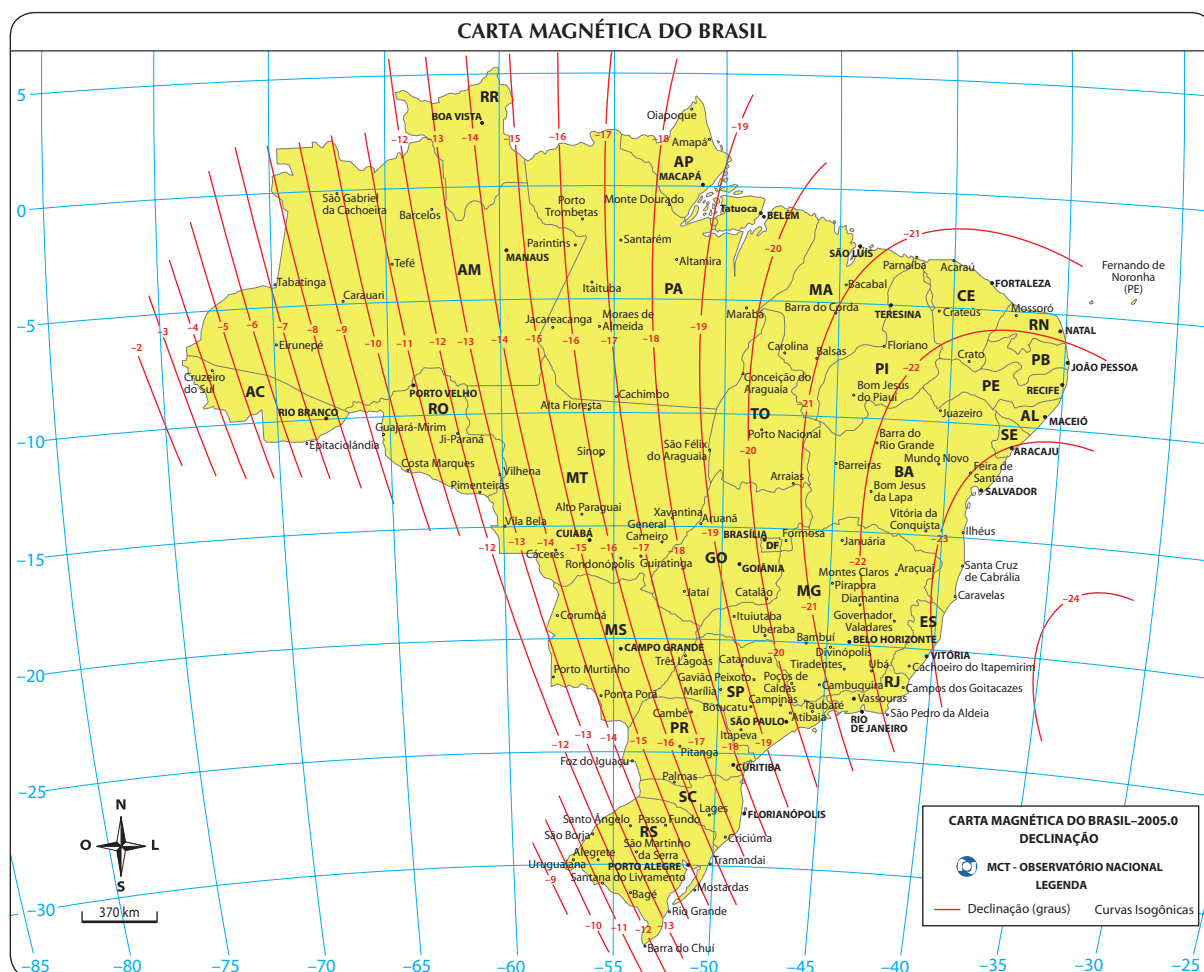
As **cartas magnéticas** traduzem o comportamento geomagnético da superfície terrestre em vários pontos de uma mesma região. Essas cartas são importantes para inúmeras atividades, como a navegação aérea e marítima, as comunicações, as pesquisas espaciais etc.

Existem três tipos de carta magnética: a de declinação, a de inclinação e a de intensidade total. A **carta de declinação** apresenta as **linhas isógonas** ou **isogônicas**, que unem os pontos que têm mesma declinação magnética. A **carta de inclinação** apresenta as **linhas isóclinas** ou **isoclínicas**, que unem os pontos que têm mesma inclinação magnética. Na **carta de intensidade total**, as linhas unem os pontos que apresentam o mesmo valor de intensidade total do campo geomagnético.

O magnetismo terrestre não permanece estacionário. As características geomagnéticas de cada ponto da superfície da Terra mudam constantemente com o passar do tempo. As mudanças mais notáveis ocorrem por efeito da variação do “campo principal”, que tem origem no interior do planeta, a uma profundidade aproximada de 2.900 km. Esse “campo principal” é determinado pela circulação de correntes de elétrons livres, representando mais de 95% do valor medido na superfície de uma região. Os outros 5% devem-se a efeitos da radiação solar. As cartas magnéticas representam apenas o valor do “campo principal”.

Na confecção de cartas magnéticas das diferentes regiões do globo terrestre, essas oscilações têm de ser levadas em conta. No nosso país, a cada cinco anos, em média, as cartas são atualizadas com base em medidas realizadas em 150 estações distribuídas em todo o território brasileiro.

A carta de declinação a seguir é a mais recente, do ano de 2005, e foi elaborada pelo Grupo de Geomagnetismo do Observatório Nacional.

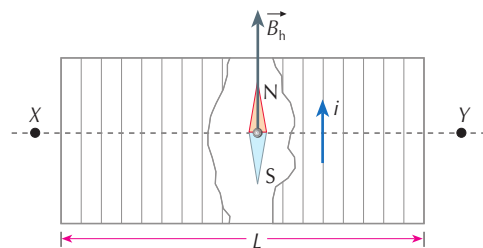


Fonte: Grupo de Geomagnetismo do Observatório Nacional

Essa carta de linhas isogônicas nos mostra a declinação magnética de vários pontos do país. Pela análise da carta, podemos concluir, por exemplo, que, em 2005, a declinação magnética de Natal era igual a 21,8° W e a de Goiânia, 19,5° W. Em São Paulo, obtemos 19,8° W.

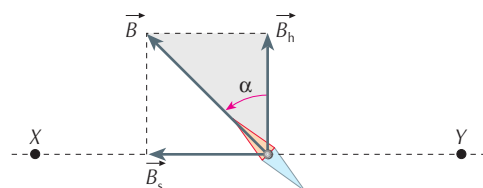
EXERCÍCIO RESOLVIDO

R. 128 Uma agulha magnética móvel, em torno de um eixo vertical, está colocada no interior de um solenoide de eixo horizontal XY . A componente horizontal do vetor indução magnética terrestre é $\vec{B}_h$ e o solenoide tem N espiras no comprimento L . O eixo do solenoide é disposto perpendicularmente à direção da agulha. Calcule o ângulo α descrito pela agulha quando o solenoide é percorrido pela corrente elétrica de intensidade i , com o sentido indicado na figura.



Solução:

A passagem da corrente elétrica i no solenoide, com o sentido indicado, determina, na direção $\overline{XY}$, o vetor indução magnética de intensidade $B_s = \mu_0 \cdot \frac{N}{L} \cdot i$, cujo sentido é obtido pela regra da mão direita nº 1. A agulha descreve o ângulo α , de modo a se orientar na direção do vetor indução magnética resultante $\vec{B} = \vec{B}_s + \vec{B}_h$.



Do triângulo destacado: $\text{tg } \alpha = \frac{B_s}{B_h} \Rightarrow \text{tg } \alpha = \mu_0 \cdot \frac{N}{L} \cdot \frac{i}{B_h}$

Resposta: α é o ângulo cuja tangente é: $\mu_0 \cdot \frac{N}{L} \cdot \frac{i}{B_h}$

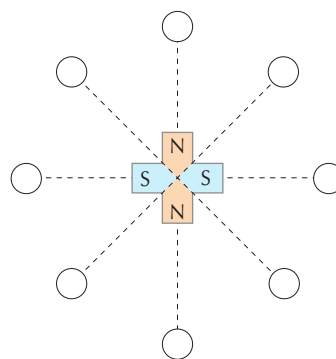
EXERCÍCIO PROPOSTO

P. 320 Em um ponto de São Paulo, o vetor indução magnética terrestre tem intensidade $B_t = 8\pi \cdot 10^{-6} \text{ T}$. Nesse ponto coloca-se um solenoide de modo que seu eixo seja paralelo ao campo $\vec{B}_t$. O comprimento do solenoide é 0,25 m e ele possui 500 espiras. Calcule a intensidade da corrente elétrica do solenoide para que seja nulo o campo magnético resultante no seu interior (dado: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{T} \cdot \text{m}}{\text{A}}$).

EXERCÍCIOS PROPOSTOS DE RECAPITULAÇÃO

P. 321 (Fuvest-SP) A figura esquematiza um ímã permanente, em forma de cruz de pequena espessura, e oito pequenas bússolas, colocadas sobre uma mesa. As letras N e S representam, respectivamente, os polos norte e sul do ímã, e os círculos representam as bússolas nas quais você irá representar as agulhas magnéticas. O ímã é simétrico em relação às retas NN e SS. Despreze os efeitos do campo magnético terrestre.

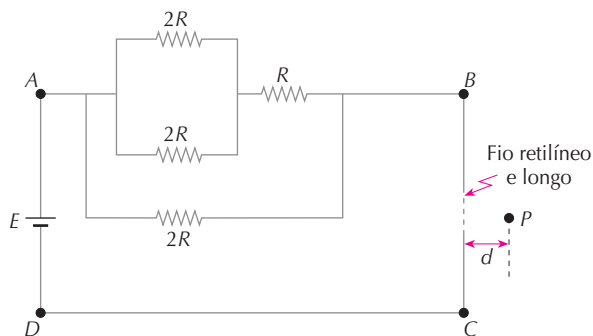
- Reproduza a figura no caderno e desenhe algumas linhas de força que permitam caracterizar a forma do campo magnético criado pelo ímã, no plano da figura.
- Desenhe nos oito círculos da figura reproduzida a orientação da agulha da bússola em sua posição de equilíbrio. A agulha deve ser representada por uma flecha ($\rightarrow$) cuja ponta indica o seu polo norte.



P. 322 (UFG-GO) Considere o circuito abaixo.

(Dados: $R = 3,0 \, \Omega$, $E = 12 \, \text{V}$, $d = 1,0 \, \text{cm}$ e

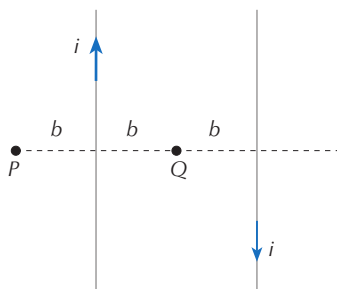
$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{T} \cdot \text{m}}{\text{A}})$$



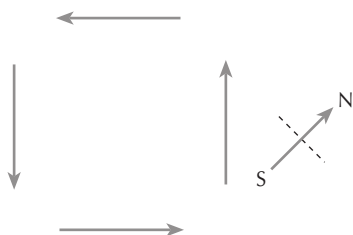
- Calcule a corrente total no circuito.
- Admita que o comprimento do fio no trecho BC seja muito maior que a distância d entre o fio e o ponto P, ou seja, em relação ao ponto P, o fio pode ser considerado como retilíneo e longo. Calcule o campo magnético nesse ponto, devido somente ao trecho BC.

P. 323 (UFPE) Dois longos fios paralelos transportam correntes iguais e de sentidos opostos, e estão separados por uma distância igual a $2b$. Determine

a relação $\frac{B_Q}{B_P}$ entre os módulos do vetor indução magnética no ponto Q, equidistante e coplanar aos dois fios, e no ponto P, coplanar aos fios e situado a uma distância b do fio da esquerda.

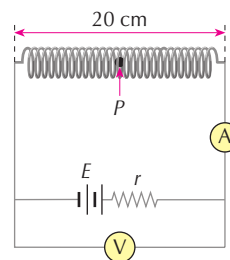


P. 324 (Fuvest-SP) A figura indica quatro bússolas que se encontram próximas a um fio condutor percorrido por uma intensa corrente elétrica.



- Represente a posição do condutor e o sentido da corrente.
- Caso a corrente cesse de fluir, qual será a configuração das bússolas? Faça a figura correspondente.

P. 325 (Unifesp) A figura representa uma bateria, de força eletromotriz E e resistência interna $r = 5,0 \, \Omega$, ligada a um solenoide de 200 espiras. Sabe-se que o amperímetro marca 200 mA e o voltímetro marca 8,0 V, ambos supostos ideais.



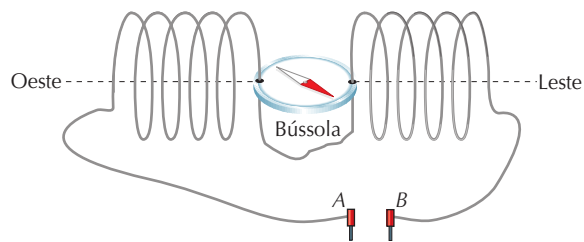
- Qual o valor da força eletromotriz da bateria?
- Qual a intensidade do campo magnético gerado no ponto P, localizado no meio do interior vazio do solenoide?

Dados:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$$

$$B = \mu_0 \cdot \frac{N}{L} \cdot i \text{ (módulo do campo magnético no interior de um solenoide)}$$

P. 326 (Fuvest-SP) Com auxílio de uma pequena bússola e de uma bobina, é possível construir um instrumento para medir correntes elétricas. Para isso, a bobina é posicionada de tal forma que seu eixo coincida com a direção leste-oeste da bússola, sendo esta colocada em uma região em que o campo magnético B da bobina pode ser considerado uniforme e dirigido para leste. Assim, quando a corrente que percorre a bobina é igual a zero, a agulha da bússola aponta para o norte. À medida que, ao passar pela bobina, a corrente I varia, a agulha da bússola se move, apontando em diferentes direções, identificadas por θ , ângulo que a agulha faz com a direção norte. Os terminais A e B são inseridos no circuito onde se quer medir a corrente. Uma medida inicial de calibração indica que, para $\theta_0 = 45^\circ$, a corrente $I_0 = 2 \, \text{A}$.



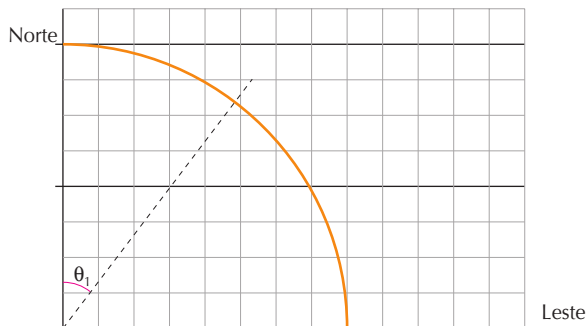
Note e adote:

- A componente horizontal do campo magnético da Terra, $B_T \approx 0,2 \, \text{gauss}$.
- O campo magnético B produzido por esta bobina, quando percorrida por uma corrente I , é dado por $B = k \cdot I$, em que k é uma constante de proporcionalidade.
- A constante $k = \mu_0 \cdot N$, em que μ_0 é uma constante e N , o número de espiras por unidade de comprimento da bobina.



Para essa montagem:

- Determine a constante k de proporcionalidade entre B e I , expressa em gauss por ampère.
- Estime o valor da corrente I_1 , em ampères, quando a agulha indicar a direção θ_1 , representada no esquema abaixo. Utilize, para isso, uma construção gráfica.



- Indique, no esquema dado, a nova direção θ_2 que a bússola apontaria, para essa mesma corrente I_1 , caso a bobina passasse a ter seu número N de espiras duplicado, sem alterar seu comprimento.

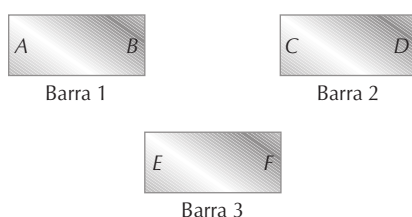
P. 327 (Unicamp-SP) A corrente elétrica contínua em uma dada linha de transmissão é de 4.000 A. Um escoteiro perdido, andando perto da linha de transmissão, tenta se orientar utilizando uma bússola. O campo magnético terrestre é de $B_t = 5,0 \cdot 10^{-5} \text{ T}$ perto da superfície da Terra. A permeabilidade magnética é $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$.

- Se a corrente está sendo transmitida no sentido leste para oeste, qual é o sentido do campo magnético gerado pela corrente perto do chão? Justifique sua resposta.
- A que distância do fio o campo gerado pela corrente terá o módulo igual ao do campo magnético terrestre?

P. 328 Uma bobina chata, formada de 10 espiras circulares de raio $5\pi \text{ cm}$, é colocada no plano do meridiano magnético de um lugar. A componente horizontal do vetor indução magnética terrestre tem intensidade $2 \cdot 10^{-5} \text{ T}$ e $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$. Uma pequena agulha magnética, móvel em torno do eixo vertical, é colocada no centro da bobina. A bobina é ligada a um circuito, sendo percorrida por corrente. Nota-se que a agulha descreve um ângulo de 45° . Calcule a intensidade i da corrente na bobina.

TESTES PROPOSTOS

T. 288 (UFSCar-SP) Um menino encontrou três pequenas barras homogêneas e, brincando com elas, percebeu que, dependendo da maneira como aproximava uma da outra, elas se atraíam ou se repeliam. Marcou cada extremo das barras com uma letra e manteve as letras sempre voltadas para cima, conforme indicado na figura.



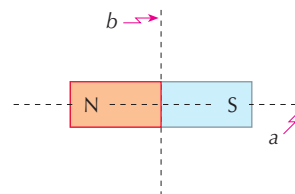
Passou, então, a fazer os seguintes testes:

- aproximou o extremo B da barra 1 com o extremo C da barra 2 e percebeu que ocorreu atração entre elas;
- aproximou o extremo B da barra 1 com o extremo E da barra 3 e percebeu que ocorreu repulsão entre elas;
- aproximou o extremo D da barra 2 com o extremo E da barra 3 e percebeu que ocorreu atração entre elas.

Verificou, ainda, que, nos casos em que ocorreu atração, as barras ficaram perfeitamente alinhadas. Considerando que, em cada extremo das barras representado por qualquer uma das letras, possa existir um único polo magnético, o menino concluiu, corretamente, que:

- as barras 1 e 2 estavam magnetizadas e a barra 3 desmagnetizada.
- as barras 1 e 3 estavam magnetizadas e a barra 2 desmagnetizada.
- as barras 2 e 3 estavam magnetizadas e a barra 1 desmagnetizada.
- as barras 1, 2 e 3 estavam magnetizadas.
- necessitaria de mais um único teste para concluir sobre a magnetização das três barras.

T. 289 (Vunesp) A figura representa um ímã em forma de barra, que vai ser cortado em duas partes.



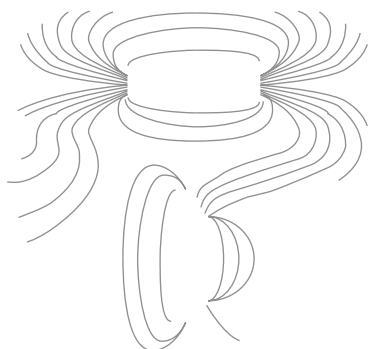
Logo em seguida ao corte, pode-se observar que os pedaços resultantes:

- se repelem, se o corte for na linha a ou na linha b.
- se atraem, se o corte for na linha a ou na linha b.
- se repelem, se o corte for na linha a, e se atraem, se o corte for na linha b.
- se atraem, se o corte for na linha a, e se repelem, se o corte for na linha b.
- não interagem, se o corte for na linha a, e se atraem, se o corte for na linha b.

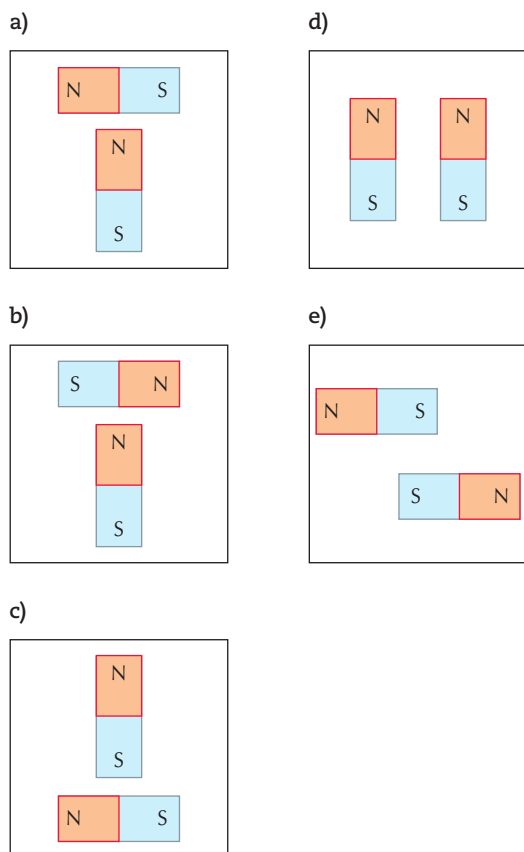
T. 290 (Mackenzie-SP) As linhas de indução de um campo magnético são:

- o lugar geométrico dos pontos, onde a intensidade do campo magnético é constante.
- as trajetórias descritas por cargas elétricas num campo magnético.
- aquelas que em cada ponto tangenciam o vetor indução magnética, orientadas no seu sentido.
- aquelas que partem do polo norte de um ímã e vão até o infinito.
- nenhuma das anteriores é correta.

T. 291 (FMTM-MG) Pulverizando-se limalha de ferro sobre uma folha de papel posicionada horizontalmente, obteve-se a figura esquematizada a seguir.



Sabe-se que sob a folha estão rigidamente colocados dois ímãs em forma de barra, com seus polos localizados nos extremos mais afastados. Das disposições indicadas, aquela que produzirá a distribuição da limalha de ferro tal qual foi obtida é:



T. 292 (UFMG) Fazendo uma experiência com dois ímãs em forma de barra, Júlia colocou-os sob uma folha de papel e espalhou limalhas de ferro sobre essa folha. Ela colocou os ímãs em duas diferentes orientações e obteve os resultados mostrados nas figuras I e II.

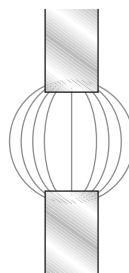


Figura I

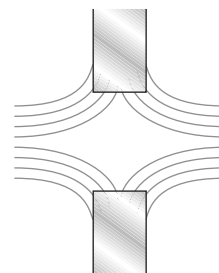


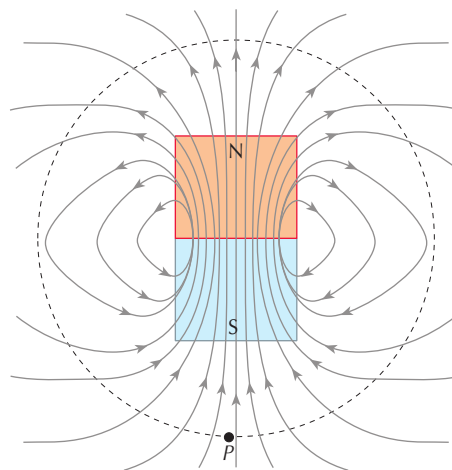
Figura II

Nessas figuras, os ímãs estão representados pelos retângulos.

Com base nessas informações, é correto afirmar que as extremidades dos ímãs voltadas para a região entre eles podem corresponder às seguintes polaridades:

- norte e norte na figura I e sul e norte na figura II.
- norte e norte na figura I e sul e sul na figura II.
- norte e sul na figura I e sul e norte na figura II.
- norte e sul na figura I e sul e sul na figura II.

T. 293 (Fuvest-SP) Sobre uma mesa plana e horizontal, é colocado um ímã em forma de barra, representado na figura, visto de cima, juntamente com algumas linhas de seu campo magnético.



Uma pequena bússola é deslocada, lentamente, sobre a mesa, a partir do ponto P, realizando uma volta circular completa em torno do ímã. Ao final desse movimento, a agulha da bússola terá completado, em torno de seu próprio eixo, um número de voltas igual a:

- $\frac{1}{4}$ de volta
- $\frac{1}{2}$ de volta
- 1 volta completa
- 2 voltas completas
- 4 voltas completas

Nessas condições, desconsidere o campo magnético da Terra.

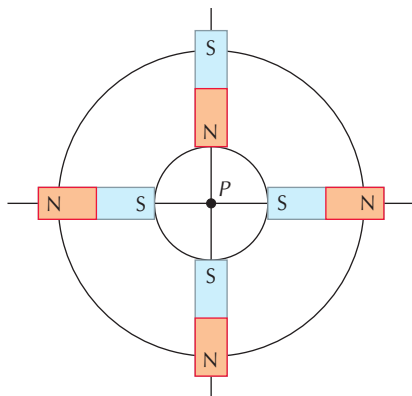
T. 294 (Uerj) As linhas de indução de um campo magnético uniforme são mostradas abaixo.



Designando por N o polo norte e por S o polo sul de um ímã colocado no mesmo plano da figura, é possível concluir que o ímã permanecerá em equilíbrio estável se estiver na seguinte posição:

- a) b) c) d)

T. 295 (Fuvest-SP) Quatro ímãs iguais em forma de barra, com as polaridades indicadas, estão apoiados sobre uma mesa horizontal, como na figura, vistos de cima.



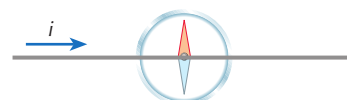
Uma pequena bússola é também colocada na mesa, no ponto central P, equidistante dos ímãs, indicando a direção e o sentido do campo magnético dos ímãs em P. Não levando em conta o efeito do campo magnético terrestre, a figura que melhor representa a orientação da agulha da bússola é:

- a) b) c) d) e)

T. 296 (Fuvest-SP) Três ímãs iguais, em forma de barra de pequena espessura, estão sobre um plano. Três pequenas agulhas magnéticas podem girar nesse plano e seus eixos de rotação estão localizados nos pontos A, B e C. Despreze o campo magnético da Terra. A direção assumida pelas agulhas, representadas por , é melhor descrita pelo esquema:

- a) b) c) d) e)

T. 297 (UFRGS-RS) A figura representa uma vista superior de um fio retilíneo, horizontal, conduzindo corrente elétrica i no sentido indicado. Uma bússola, que foi colocada abaixo do fio, orientou-se na direção perpendicular a ele, conforme também indica a figura.



Imagine, agora, que se deseje, sem mover a bússola, fazer sua agulha inverter a orientação indicada na figura. Para obter esse efeito, considere os seguintes procedimentos.

- I. Inverter o sentido da corrente elétrica i , mantendo o fio na posição em que se encontra na figura.
- II. Efetuar a translação do fio para uma posição abaixo da bússola, mantendo a corrente elétrica i no sentido indicado na figura.
- III. Efetuar a translação do fio para uma posição abaixo da bússola e, ao mesmo tempo, inverter o sentido da corrente elétrica i .

Desconsiderando-se a ação do campo magnético terrestre, quais desses procedimentos conduzem ao efeito desejado?

- a) apenas I
- b) apenas II
- c) apenas III
- d) apenas I e II
- e) I, II e III

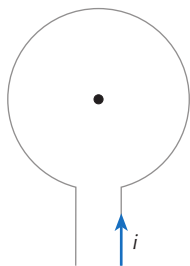
T. 298 (PUC-MG) No centro de uma espira circular de raio R percorrida por uma corrente de intensidade i , o vetor indução magnética:

- I. tem módulo independente do meio que envolve a espira.
- II. é perpendicular ao plano da espira.
- III. tem módulo diretamente proporcional à razão $\frac{i}{R}$.

Com relação às afirmações I, II e III, é correto afirmar que:

- a) só a I e a III são corretas.
- b) só a II e a III são corretas.
- c) só a II é correta.
- d) todas são corretas.
- e) todas são falsas.

T. 299 (Uniupe-MG) Uma espira circular de raio 10 cm, conforme a figura, é percorrida por uma corrente de intensidade 6 A.



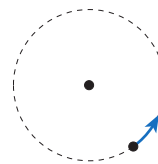
Considerando-se $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$, as características do vetor indução magnética no centro da espira são:

- a) $1,2\pi \cdot 10^{-5} \text{ T}$; $\otimes$
- b) $1,2\pi \cdot 10^{-5} \text{ T}$; $\odot$
- c) $1,2\pi \cdot 10^{-7} \text{ T}$; $\odot$
- d) $1,2\pi \cdot 10^{-7} \text{ T}$; $\otimes$
- e) $0,5\pi \cdot 10^{-5} \text{ T}$; $\odot$

T. 300 (Uema) Duas espiras circulares, concêntricas e coplanares, de raios R_1 e R_2 , sendo $R_1 = \frac{2R_2}{5}$, são percorridas, respectivamente, pelas correntes i_1 e i_2 ; o campo magnético resultante no centro das espiras é nulo. A razão entre as correntes i_1 e i_2 é igual a:

- a) 0,4
- b) 1,0
- c) 2,0
- d) 2,5
- e) 4,0

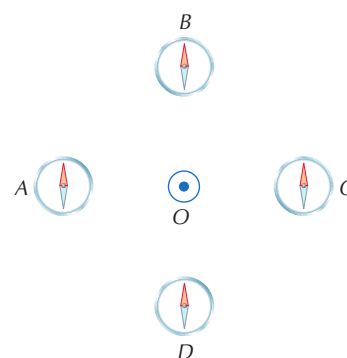
T. 301 (UFU-MG) Considere o elétron, em um átomo de hidrogênio, como sendo uma massa pontual, girando, no plano da folha, em uma órbita circular, como mostra a figura.



O vetor campo magnético criado no centro da circunferência por esse elétron é representado por:

- a) $\otimes$
- b) $\rightarrow$
- c) $\odot$
- d) $\leftarrow$
- e) $\uparrow$

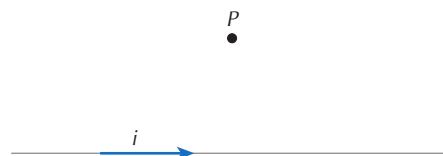
T. 302 (Funrei-MG) Quatro bússolas, dispostas como na figura abaixo, apontam inicialmente para o polo Norte terrestre.



Pelo ponto O, perpendicularmente ao plano do papel, passa-se um fio condutor retilíneo e longo. Ao se fazer passar pelo condutor uma corrente elétrica contínua e intensa, no sentido do plano do papel para a vista do leitor, permanece praticamente inalterada, em equilíbrio estável:

- a) a posição da bússola C.
- b) a posição das bússolas B e D.
- c) a posição das bússolas A, C e D.
- d) a posição das bússolas A e C.
- e) a posição da bússola A.

T. 303 (FMTM-MG) A figura representa um ponto P junto a um condutor retilíneo, muito extenso, percorrido por uma corrente elétrica contínua i , cujo sentido está indicado pela seta.



O vetor campo de indução magnética, $\vec{B}$, no ponto P:

- a) está contido no plano da figura, é paralelo ao condutor e tem o mesmo sentido da corrente.
- b) está contido no plano da figura, é paralelo ao condutor e tem sentido oposto ao da corrente.
- c) está contido no plano da figura, é perpendicular ao condutor e orientado para ele.
- d) é perpendicular ao plano da figura e está orientado para dentro.
- e) é perpendicular ao plano da figura e está orientado para fora.



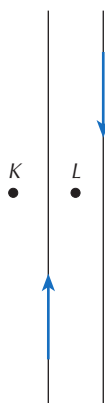
T. 304 (UEPB) Na segunda década do século XIX, o físico dinamarquês Hans Christian Oersted (1777-1851) constatou que, ao aproximar uma bússola de um fio percorrido por uma corrente elétrica, sua agulha sofria um desvio. Daí, concluiu: “toda corrente elétrica gera no espaço que a envolve um campo magnético”. Considere a permeabilidade magnética para o vácuo, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$. Sobre o Eletromagnetismo é correto afirmar que:

- a intensidade do campo magnético no centro de uma espira circular de raio $2,5\pi \text{ cm}$, quando percorrida por uma corrente de $4,0 \text{ A}$, é de $2 \cdot 10^{-5} \text{ T}$.
- a intensidade do campo magnético produzido por uma corrente elétrica de $3,0 \text{ A}$ que percorre um fio metálico reto e extenso, distante $0,25 \text{ m}$, é de $1,2 \cdot 10^{-6} \text{ T}$.
- a direção do campo magnético no centro de uma espira circular é perpendicular ao plano da espira.
- um condutor percorrido por uma corrente i tem num ponto P um vetor indução magnética $\vec{B}$ com o sentido mostrado na figura abaixo.



- a lei de Ampère estabelece que a intensidade do campo magnético em um ponto P , situado a uma distância d de um fio percorrido por uma corrente elétrica, aumenta com o distanciamento do fio ao ponto P .

T. 305 (UFMG) Nesta figura, estão representados dois fios, percorridos por correntes elétricas de mesma intensidade e de sentidos contrários, e dois pontos, K e L .

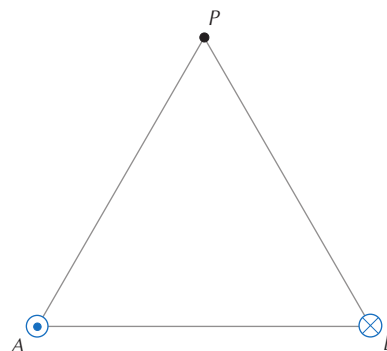


Os fios e os pontos estão no mesmo plano. O ponto L é equidistante dos dois fios e o ponto K está à esquerda deles.

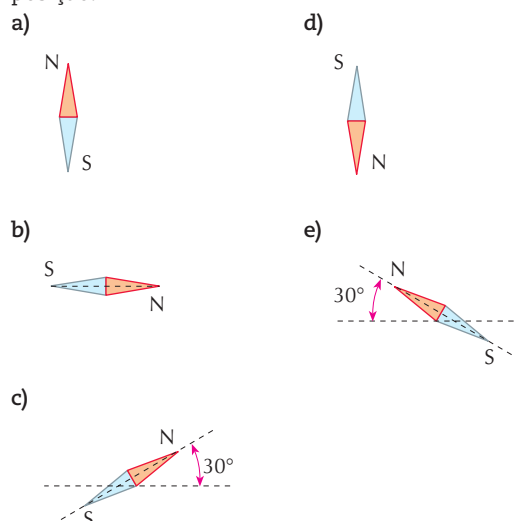
Considerando-se essas informações, é correto afirmar que o campo magnético:

- em K , é nulo e, em L , está entrando no papel.
- em K , está entrando no papel e, em L , está saindo dele.
- em K , está saindo do papel e, em L , é nulo.
- em K , está saindo do papel e, em L , está entrando nele.

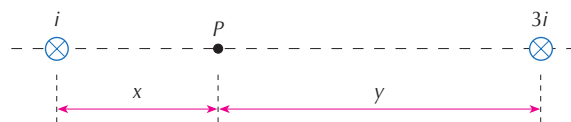
T. 306 (Ufla-MG) A figura abaixo, em corte, mostra dois condutores A e B colocados nos vértices inferiores de um triângulo equilátero.



Ambos os condutores são percorridos por correntes elétricas de mesma intensidade e sentido convencional. No condutor A a corrente “sai” $\odot$ do plano horizontal, e no B , “entra” $\otimes$. Colocando-se no vértice superior, ponto P , uma agulha imantada com possibilidade de girar, essa agulha assumirá a posição:



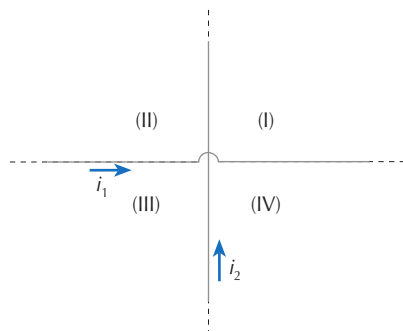
T. 307 (Fatec-SP) Dois fios metálicos retos, paralelos e longos são percorridos por correntes i e $3i$ de sentidos iguais (entrando no papel, no esquema). O ambiente é vácuo.



O campo magnético resultante produzido por essas correntes é nulo no ponto P , tal que:

- $\frac{y}{x} = 3$
- $\frac{y}{x} = \frac{1}{3}$
- $\frac{y}{x} = 9$
- $\frac{y}{x} = \frac{1}{9}$
- nenhuma das anteriores

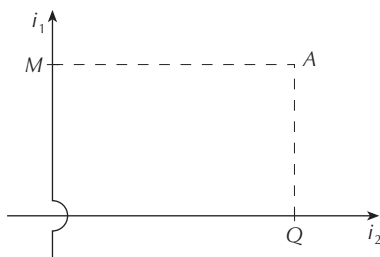
- T. 308** (UEL-PR) Dois fios longos e retilíneos são dispostos perpendicularmente entre si e percorridos por correntes elétricas de intensidades i_1 e i_2 como mostra a figura a seguir.



O módulo do campo magnético resultante, gerado pelas correntes nos dois fios, pode ser nulo somente em pontos dos quadrantes:

- a) I e II c) I e IV e) II e IV
b) I e III d) II e III

- T. 309** (Unisa-SP) Dois condutores retilíneos e infinitamente longos estão no mesmo plano e são perpendiculares entre si, como mostra a figura.

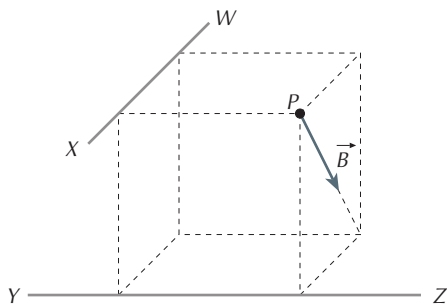


As distâncias são $AM = 4,0$ cm e $QA = 2,0$ cm, e as intensidades das correntes, $i_1 = 8$ A e $i_2 = 7$ A. O módulo do vetor indução magnética no ponto A é de:

- a) $1,0 \cdot 10^{-5}$ T d) $12,5 \cdot 10^{-5}$ T
b) $3,0 \cdot 10^{-5}$ T e) $15,0 \cdot 10^{-5}$ T
c) $10,6 \cdot 10^{-5}$ T

(Dado: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{T \cdot m}{A}$)

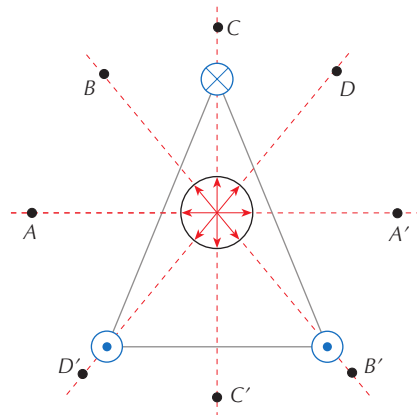
- T. 310** (UFMG) Dois fios condutores WX e YZ, retos e longos, estão dispostos sobre duas arestas de um cubo imaginário, como mostra a figura.



Correntes elétricas iguais estão presentes nos dois fios. O campo magnético $\vec{B}$ resultante de tais correntes, no ponto P, é indicado na figura. Nessas condições, as correntes elétricas nos fios têm os sentidos:

- a) de X para W e de Y para Z.
b) de X para W e de Z para Y.
c) de W para X e de Y para Z.
d) de W para X e de Z para Y.

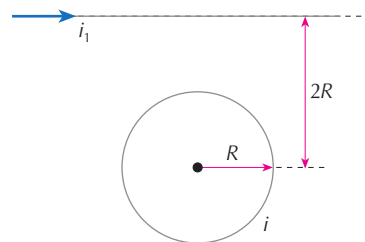
- T. 311** (Fuvest-SP) Três fios verticais e muito longos atravessam uma superfície plana e horizontal, nos vértices de um triângulo isósceles, como na figura abaixo desenhada no plano.



Por dois deles $\odot$, passa uma mesma corrente que sai do plano do papel e pelo terceiro $\otimes$, uma corrente que entra nesse plano. Desprezando-se os efeitos do campo magnético terrestre, a direção da agulha de uma bússola, colocada equidistante deles, seria melhor representada pela reta:

- a) $\overline{AA'}$ d) $\overline{DD'}$
b) $\overline{BB'}$ e) perpendicular ao plano do papel
c) $\overline{CC'}$

- T. 312** (ITA-SP) Uma espira circular de raio R é percorrida por uma corrente i . A uma distância $2R$ de seu centro encontra-se um condutor retilíneo muito longo que é percorrido por uma corrente i_1 (conforme a figura).



As condições que permitem que se anule o campo de indução magnética no centro da espira são, respectivamente:

- a) $\frac{i_1}{i} = 2\pi$ e a corrente na espira no sentido horário.
b) $\frac{i_1}{i} = 2\pi$ e a corrente na espira no sentido anti-horário.
c) $\frac{i_1}{i} = \pi$ e a corrente na espira no sentido horário.
d) $\frac{i_1}{i} = \pi$ e a corrente na espira no sentido anti-horário.
e) $\frac{i_1}{i} = \pi$ e a corrente na espira no sentido horário.

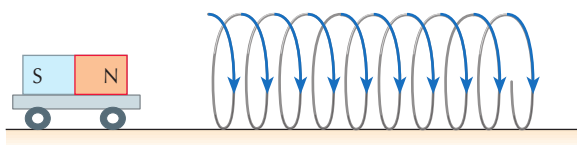


- T. 313** (FEI-SP) A intensidade do campo magnético produzido no interior de um solenoide muito comprido, percorrido por corrente, depende basicamente:
- só do número de espiras do solenoide.
 - só da intensidade da corrente.
 - do diâmetro interno do solenoide.
 - do número de espiras por unidade de comprimento e da intensidade da corrente.
 - do comprimento do solenoide.

- T. 314** (Unisa-SP) Um solenoide possui 20.000 espiras por metro. A intensidade do vetor indução magnética originado na região central do solenoide, devido à passagem de uma corrente de intensidade 0,5 A, é de:
- $4\pi \cdot 10^{-3} \text{ T}$
 - $5\pi \cdot 10^{-4} \text{ T}$
 - $6\pi \cdot 10^{-2} \text{ T}$
 - $4 \cdot 10^{-3} \text{ T}$
 - $6 \cdot 10^{-3} \text{ T}$

(Dado: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{T} \cdot \text{m}}{\text{A}}$)

- T. 315** (UFSCar-SP) A figura representa um solenoide, sem núcleo, fixo a uma mesa horizontal. Em frente a esse solenoide está colocado um ímã preso a um carrinho que se pode mover facilmente sobre essa mesa, em qualquer direção.



Estando o carrinho em repouso, o solenoide é ligado a uma fonte de tensão e passa a ser percorrido por uma corrente contínua cujo sentido está indicado pelas setas na figura. Assim, é gerado no solenoide um campo magnético que atua sobre o ímã e tende a mover o carrinho:

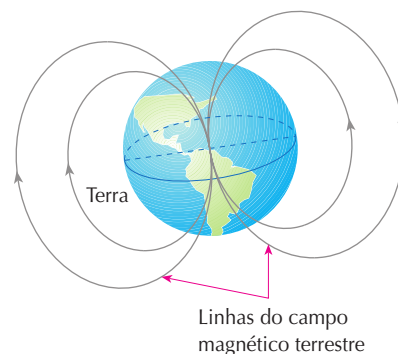
- aproximando-o do solenoide.
- afastando-o do solenoide.
- de forma oscilante, aproximando-o e afastando-o do solenoide.
- lateralmente, para dentro do plano da figura.
- lateralmente, para fora do plano da figura.

- T. 316** (UEL-PR) Não há registro concreto de quando o ímã foi utilizado pela primeira vez na navegação. Há referências de que por volta do ano 1150 era obrigatória, para os viajantes chineses, em suas viagens tanto terrestres como marítimas, a utilização de uma caixa contendo uma agulha, uma pedra de magnetita (ímã) e uma linha. Pode-se considerar esse simples aparato como sendo o embrião das atuais bússolas, que são úteis à navegação, pois orientam-se na direção norte-sul terrestre. Em relação ao campo magnético terrestre, é correto afirmar:

- A Terra, ao girar, provoca uma distorção do campo gravitacional na direção norte-sul, dando origem ao campo magnético.
- Existem cargas em movimento no interior da Terra que fazem com que a Terra se comporte como um enorme ímã.
- A Terra, ao girar, cria uma aceleração centrípeta em sua superfície, que faz com que a agulha de uma bússola alinhe-se ao longo do seu eixo de rotação, como se a Terra fosse um enorme ímã em movimento.

- Os polos terrestres estão repletos de gelo, que cria um excesso de carga elétrica nessas regiões, fazendo com que a Terra se comporte como um enorme ímã.
- As correntes marítimas transportam cargas elétricas que polarizam os continentes no sentido norte-sul, fazendo com que a Terra se comporte como um enorme ímã.

- T. 317** (Unirio-RJ) Os antigos navegantes usavam a bússola para orientação em alto-mar, devido a sua propriedade de se alinhar de acordo com as linhas do campo geomagnético.



Analisando a figura onde estão representadas essas linhas, podemos afirmar que:

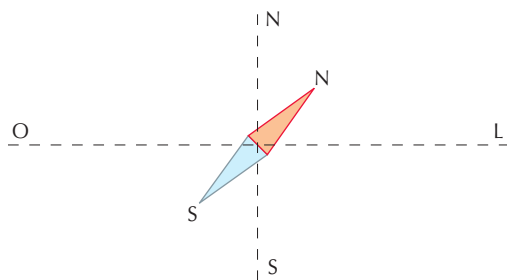
- o pólo sul do ponteiro da bússola aponta para o pólo Norte geográfico porque o Norte geográfico corresponde ao Sul magnético.
- o pólo norte do ponteiro da bússola aponta para o pólo Norte geográfico porque as linhas do campo magnético não são fechadas.
- o pólo sul do ponteiro da bússola aponta para o pólo Sul geográfico porque o Sul geográfico corresponde ao Sul magnético.
- o pólo norte do ponteiro da bússola aponta para o pólo Sul geográfico porque o Norte geográfico corresponde ao Norte magnético.
- o pólo sul do ponteiro da bússola aponta para o pólo Sul geográfico porque o Norte geográfico corresponde ao Sul magnético.

- T. 318** (UFRN) Um escoteiro recebeu do seu instrutor a informação de que a presença de uma linha de alta tensão elétrica pode ocasionar erro na direção que é fornecida, para o norte da Terra, por uma bússola.

Supondo-se que a linha de alta tensão seja de corrente elétrica contínua, pode-se afirmar que o erro na direção fornecida pela bússola será maior quando:

- a distância da bússola à linha for pequena, a corrente que passa na linha for intensa e a linha estiver orientada na direção norte-sul.
- a distância da bússola à linha for grande, a corrente que passa na linha for intensa e a linha estiver orientada na direção leste-oeste.
- a distância da bússola à linha for pequena, a corrente que passa na linha for fraca e a linha estiver orientada na direção leste-oeste.
- a distância da bússola à linha for grande, a corrente que passa na linha for fraca e a linha estiver orientada na direção norte-sul.

T. 319 Num dado momento, no laboratório de Física, a bússola assumiu a posição representada na figura, acusando a presença de um campo magnético $\vec{B}$, além do terrestre.



Uma das orientações possíveis do campo $\vec{B}$ é:

- a) d) b) e) c)

T. 320 (UEL-PR) Nos anos 40 tiveram início as investigações sobre a possibilidade da utilização do campo magnético da Terra como mecanismo de orientação e navegação animal. Hoje, sabe-se que algumas espécies de organismos (pombos, tubarões, abelhas, tartarugas etc.) e também micro-organismos (bactérias, algas etc.) fazem uso do campo magnético da Terra, cuja intensidade é de aproximadamente $0,5 \text{ gauss} = 0,5 \cdot 10^{-4} \text{ tesla}$ para se orientarem. Existe uma espécie de bactéria que apresenta no interior de seu citoplasma uma cadeia de cristais de magnetita (óxido magnético de ferro Fe_3O_4). Como essa bactéria está em suspensão na água, essa cadeia de magnetita funciona como uma bússola. Suponha que durante uma tempestade, um relâmpago libere uma corrente elétrica da ordem de 10.000 ampères e incida sobre uma haste metálica encravada perpendicularmente ao solo na beira de uma lagoa que contenha esse tipo de bactéria. No instante em que o relâmpago incidir, as bactérias, que se comportam como pequenas bússolas, situadas próximas a um ponto que se encontra a 1 m de distância do lugar por onde ocorreu a descarga:

- a) se alinharão na direção da linha que liga esse ponto ao ponto de incidência da descarga, paralelamente à superfície da água, pois a intensidade do campo magnético criado pela corrente é, nesse ponto, mais intenso que o campo magnético terrestre.
- b) se alinharão na direção perpendicular à linha que liga esse ponto ao ponto de incidência da descarga, paralelamente à superfície da água, pois a intensidade do campo magnético criado pela corrente é, nesse ponto, mais intenso que o campo magnético terrestre.
- c) se alinharão na direção paralela à direção de incidência da descarga, pois a intensidade do campo magnético criado pela corrente é, nesse ponto, mais intenso que o campo magnético terrestre.
- d) se alinharão na direção do campo magnético da Terra, pois a essa distância o campo magnético criado pela descarga tem pouca intensidade.
- e) se alinharão aleatoriamente no ponto em que se encontram, pois a intensidade do campo magnético criado pela corrente é, nesse ponto, menos intenso que o campo magnético terrestre.

T. 321 (UFRGS-RS) Em certa localidade, a componente horizontal do campo magnético terrestre tem módulo B_h . Uma agulha de bússola, que só pode se mover no plano horizontal, encontra-se alinhada com essa componente. Submetendo a bússola à ação de um campo magnético adicional, dirigido horizontalmente na direção perpendicular a $\vec{B}_h$, a agulha assume nova posição de equilíbrio, ficando orientada a 45° em relação à direção original. Pode-se concluir que o módulo do campo adicional é:

- a) $\frac{B_h}{\sqrt{2}}$ c) B_h e) $2B_h$
b) $\frac{B_h}{2}$ d) $\sqrt{2} \cdot B_h$

(Dado: $\sin 45^\circ = \cos 45^\circ = \frac{\sqrt{2}}{2}$)

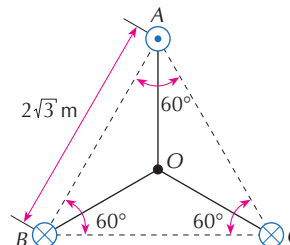
T. 322 (Cesgranrio-RJ) Uma agulha magnética gira livremente em torno de um eixo horizontal. Quando colocada num ponto do globo terrestre situado próximo do polo Norte, ela forma com a horizontal um ângulo, em radianos, igual a:

- a) 7π
b) 2π
c) $\frac{\pi}{4}$
d) $\frac{\pi}{2}$
e) um valor diferente desses

EXERCÍCIOS ESPECIAIS de campo magnético

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

R. 129 Na figura, têm-se as seções transversais de três condutores retos, A, B e C, paralelos e extensos. Cada condutor é percorrido por uma corrente elétrica de intensidade 10 A no sentido indicado. Adote $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$. Determine o vetor indução magnética resultante no ponto O, equidistante dos três condutores.



Solução:

No triângulo equilátero ABC (fig. I), a distância do centro O aos pontos A, B e C vale:

$$r = \frac{L\sqrt{3}}{3} \Rightarrow r = 2 \text{ m}$$

Cada corrente elétrica determina em O, no plano da figura, um campo magnético perpendicular a r, com sentidos determinados pela regra da mão direita nº 1. Como $i_A = i_B = i_C$, as intensidades dos vetores indução magnética serão iguais. Para o vetor $\vec{B}_A$, tem-se:

$$B_A = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{i}{r} \Rightarrow B_A = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \cdot \frac{10}{2} \Rightarrow B_A = 10^{-6} \text{ T}$$

Então: $B_A = B_B = B_C = 10^{-6} \text{ T}$

O vetor indução magnética resultante em O será $\vec{B} = \vec{B}_A + \vec{B}_B + \vec{B}_C$ (fig. II), que pode ser obtido da seguinte forma: os segmentos orientados que representam os vetores devem ser deslocados por translação até que se tornem consecutivos; o vetor indução magnética resultante $\vec{B}$ é representado pelo segmento orientado cuja origem é a do primeiro e cuja extremidade é a do último. Como o triângulo destacado da figura é um triângulo equilátero, o lado tracejado será igual a:

$$B_B = B_C = 10^{-6} \text{ T}$$

$$\text{Assim: } B = B_A + B_B = 10^{-6} + 10^{-6} \Rightarrow B = 2 \cdot 10^{-6} \text{ T}$$

Resposta: O vetor indução magnética em O é paralelo ao lado $\overline{BC}$, seu sentido vai de O para o lado $\overline{AC}$ e sua intensidade é $2 \cdot 10^{-6} \text{ T}$.

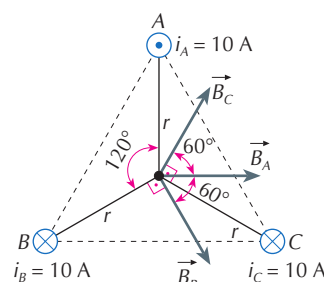


Figura I.

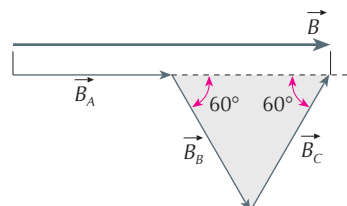


Figura II.

R. 130 Um fio condutor homogêneo tem a forma de uma circunferência de raio $R = 10\pi \text{ cm}$. Uma corrente elétrica de intensidade $i = 6 \text{ A}$ chega por um fio retilíneo ao ponto A e sai pelo ponto B por outro fio retilíneo, conforme a figura.

Determine:

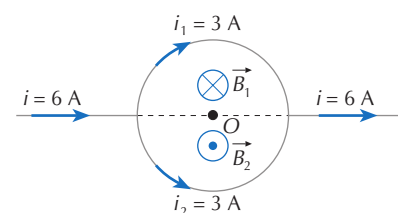
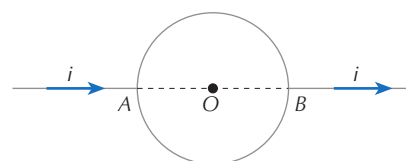
- a intensidade do vetor indução magnética que cada semiespira origina no ponto O;
 - a intensidade do vetor indução magnética resultante em O.
- (Dado: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$)

Solução:

- Cada semiespira é percorrida por uma corrente elétrica de intensidade 3 A, isto é: $i_1 = i_2 = 3 \text{ A}$. De acordo com a lei de Biot-Savart, concluímos que o vetor indução magnética que cada semiespira origina no centro O tem intensidade igual à metade do que seria originado por uma espira completa, percorrida pela mesma corrente elétrica.

Sendo B_1 a intensidade do campo magnético produzido por i_1 , temos:

$$B_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{\mu_0}{2} \cdot \frac{i_1}{R} \Rightarrow B_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2} \cdot \frac{3}{10^{-1}\pi} \Rightarrow B_1 = 3 \cdot 10^{-6} \text{ T}$$



O vetor indução $\vec{B}_2$ que a semiespira percorrida por corrente elétrica i_2 origina em O tem a mesma intensidade de B_1 :

$$B_2 = B_1 = 3 \cdot 10^{-6} \text{ T}$$

b) Os sentidos de $\vec{B}_1$ e $\vec{B}_2$, determinados pela regra da mão direita n° 1, são opostos. Isso significa que o vetor indução resultante $\vec{B}_R$ em O é nulo:

$$B_R = 0$$

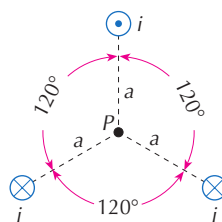
Observação:

O prolongamento do fio retilíneo, por passar pelo ponto O, não origina campo em O.

Resposta: a) $B_1 = B_2 = 3 \cdot 10^{-6} \text{ T}$; b) zero

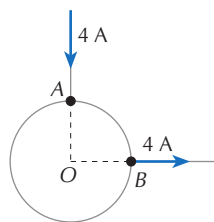
EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 329 (Vunesp) Três fios condutores elétricos paralelos e muito longos são perpendiculares ao papel. A figura mostra um corte transversal do arranjo em que $\otimes$ e $\odot$ indicam, respectivamente, a corrente que entra e a que sai em relação à página. A corrente $i = 10 \text{ A}$ é igual para todos os condutores. Sendo $a = 2,0 \text{ cm}$, calcule o módulo do campo magnético de indução $\vec{B}$ no ponto P e indique seu sentido. (Dado: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$)

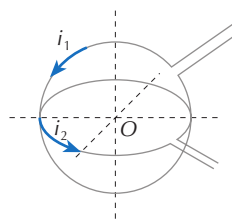


P. 330 (Unicamp-SP) Um condutor homogêneo de resistência 8Ω tem a forma de uma circunferência. Uma corrente $I = 4 \text{ A}$ chega por um fio retilíneo ao ponto A e sai pelo ponto B por outro fio retilíneo perpendicular, conforme a figura. As resistências dos fios retilíneos podem ser consideradas desprezíveis.

- Calcule a intensidade das correntes nos dois arcos de circunferência compreendidos entre A e B.
- Calcule o valor da intensidade do campo magnético B no centro O da circunferência.



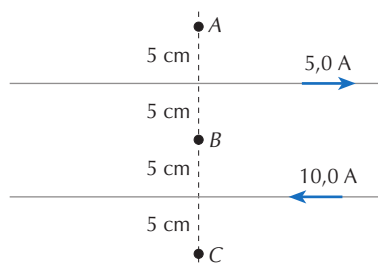
P. 331 Duas espiras iguais, cada uma de raio $2\pi \text{ cm}$, são colocadas com centros coincidentes em planos perpendiculares. Sendo percorridas pelas correntes elétricas $i_1 = 4 \text{ A}$ e $i_2 = 3 \text{ A}$, caracterize o vetor indução magnética resultante no seu centro O. (Dado: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$)



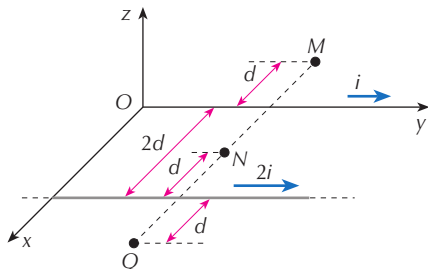
TESTES PROPOSTOS

T. 323 (Fatec-SP) Dois condutores retos, paralelos, longos, separados por distância igual a 10 cm , são percorridos por correntes opostas e de intensidades $5,0 \text{ A}$ e $10,0 \text{ A}$. Como são dirigidos os campos de indução que eles produzem nos pontos A, B e C?

	A	B	C
a)	$\odot$	$\otimes$	$\otimes$
b)	$\odot$	$\otimes$	$\odot$
c)	$\odot$	$\odot$	$\odot$
d)	$\otimes$	$\otimes$	$\otimes$
e)	$\otimes$	$\otimes$	$\odot$



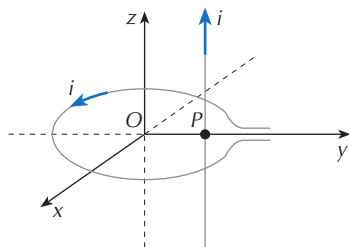
T. 324 (PUC-SP) Dois condutores retílicos, paralelos, muito longos, percorridos por correntes de intensidades respectivamente iguais a i e $2i$ estão situados no plano xy e separados por uma distância $2d$. O campo de indução magnética $\vec{B}$, criado nos pontos M , N e Q do plano xy , é representado por vetores paralelos ao eixo z .



Assinale a alternativa que representa os sentidos do vetor $\vec{B}$ nos pontos M , N e Q , respectivamente:

- a) b) c) d) e)

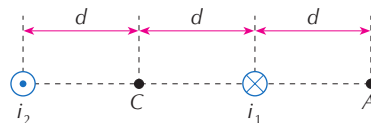
T. 325 (Vunesp) A figura representa uma espira condutora por onde circula uma corrente $i = \text{constante}$, no sentido indicado. O plano da espira coincide com o plano xy e o seu centro está na origem do referencial cartesiano. Um fio condutor, retílico e muito longo, por onde passa também uma corrente $i = \text{constante}$, é paralelo ao eixo z , furando o plano da espira no ponto P .



Escolha a seguir a opção que melhor representa o vetor indução magnética resultante no ponto O .

- a) b) c) d) e)

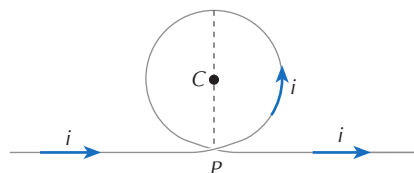
T. 326 (Unip-SP) Considere dois condutores retílicos muito longos, percorridos por correntes elétricas de intensidades constantes, dispostas perpendicularmente ao plano do papel com os sentidos de corrente indicados na figura a seguir.



O condutor percorrido pela corrente elétrica i_1 produz em A um campo magnético cujo vetor indução magnética tem intensidade B_1 . O campo magnético resultante em A , pela ação i_1 e i_2 , é nulo. O campo magnético resultante em C , pela ação de i_1 e i_2 , tem um vetor indução magnética de intensidade:

- a) zero c) $2B_1$ e) B_1
b) $3B_1$ d) $4B_1$

T. 327 (ITA-SP) Um fio condutor é dobrado na forma de uma circunferência de raio R , de modo que não haja contato elétrico no ponto P . O fio encontra-se num meio de permeabilidade magnética μ_0 e através dele circula uma corrente i .



Nessas condições, pode-se afirmar que:

- a) o campo de indução magnética no centro C da espira é nulo.
b) o fio retílico cria no ponto C um campo entrando na folha de papel cuja intensidade vale $\frac{\mu_0 \cdot i}{2R}$.
c) o campo resultante no ponto C vale $\frac{\mu_0 \cdot i}{2R} \cdot \left(1 - \frac{1}{\pi}\right)$ e é perpendicular ao plano da espira.
d) o campo resultante no ponto C vale $\frac{\mu_0 \cdot i}{2R} \cdot \left(\frac{1}{\pi} - 1\right)$ e é perpendicular ao plano da espira.
e) o campo magnético resultante no ponto C é a soma dos módulos dos campos de indução magnética devidos ao fio retílico e à espira percorridos pela corrente i e vale $\frac{\mu_0 \cdot i}{2R} \cdot \left(\frac{1}{\pi} + 1\right)$.

T. 328 Duas espiras circulares iguais são dispostas com centros comuns, segundo planos perpendiculares entre si, sendo percorridas por correntes constantes de intensidades iguais. No centro das espiras, o vetor campo magnético resultante:

- a) forma ângulo de 45° com os planos das espiras.
b) está contido em um dos planos das espiras.
c) não tem direção constante.
d) é nulo.
e) nada do que se afirmou é correto.

Força magnética

O conhecimento das forças magnéticas que atuam sobre partículas eletrizadas ou que agem em condutores percorridos por correntes elétricas permite a explicação do funcionamento dos motores elétricos e o estudo das propriedades magnéticas da matéria.

▶ 14.1 Força sobre uma carga móvel em um campo magnético uniforme

As forças magnéticas que agem em uma carga elétrica são resultantes das interações entre o campo magnético no qual a carga está inserida e o campo gerado pela carga elétrica em movimento.

▶ 14.2 Força sobre um condutor reto em um campo magnético uniforme

Um condutor percorrido por corrente elétrica e imerso em um campo magnético fica sob a ação de força magnética.

▶ 14.3 Força magnética entre condutores paralelos

A força magnética entre condutores paralelos pode ser de atração ou repulsão, dependendo do sentido das correntes elétricas que os percorrem.

▶ 14.4 Explicação dos fenômenos magnéticos

Todos os fenômenos magnéticos podem ser explicados pelo movimento de cargas elétricas.



Um pequeno ímã flutuando sobre um supercondutor, devido ao campo magnético criado pela corrente elétrica induzida no supercondutor em consequência da aproximação do ímã.

Objetivos

► Caracterizar a força magnética que atua sobre uma carga elétrica em movimento em um campo magnético uniforme.

► Utilizar a regra da mão direita nº 2 para determinar o sentido e a direção da força magnética.

► Analisar os tipos de movimento de uma carga em um campo magnético uniforme.

Termos e conceitos

- força magnética sobre uma carga móvel
- movimento retilíneo uniforme
- movimento circular uniforme
- movimento helicoidal uniforme

Força sobre uma carga móvel em um campo magnético uniforme

Cargas elétricas em movimento originam campo magnético, como foi visto no capítulo anterior. Estando a carga elétrica em movimento em um campo magnético, há uma interação entre esse campo e o campo originado pela carga. Essa interação manifesta-se por forças que agem na carga elétrica, denominadas **forças magnéticas**.

Considere uma carga puntiforme q positiva, movendo-se com velocidade $\vec{v}$ em um campo magnético uniforme. Verifica-se, experimentalmente, que:

I. se a carga se deslocar na direção paralela $\vec{B}$, ela não ficará sujeita à ação de força (fig. 1);

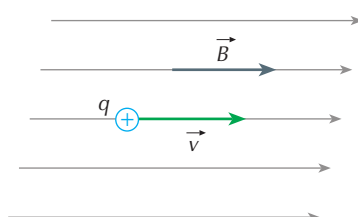


Figura 1. Quando $\vec{v}$ é paralela a $\vec{B}$, nenhuma força age na carga.

II. se a carga se deslocar em uma direção perpendicular à do vetor $\vec{B}$, ela ficará sujeita à ação da força magnética $\vec{F}_m$ (fig. 2). A direção dessa força é perpendicular ao plano formado pelos vetores $\vec{B}$ e $\vec{v}$. Utilizando medidas experimentais, verifica-se que a intensidade dessa força (F_m) é diretamente proporcional a q e a v , ou seja, $F_m = K \cdot |q| \cdot v$. A constante de proporcionalidade K caracteriza o ponto do campo magnético de onde a carga foi lançada. Por definição, essa constante é a intensidade do vetor $\vec{B}$. Assim:

$$F_m = B \cdot |q| \cdot v \text{ ou } B = \frac{F_m}{|q| \cdot v}, \text{ com } \vec{v} \text{ perpendicular a } \vec{B};$$

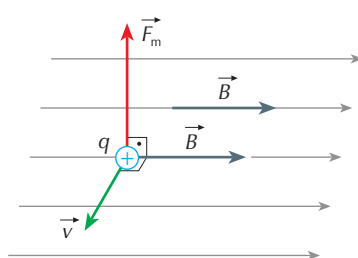


Figura 2. Quando $\vec{v}$ é perpendicular a $\vec{B}$, a força magnética $\vec{F}_m$ age perpendicularmente ao plano formado pelos vetores $\vec{v}$ e $\vec{B}$.

III. se a carga se desloca em outra direção, como a da figura 3, em que $\vec{v}$ forma um ângulo θ com a direção de $\vec{B}$, a força magnética continuará perpendicular ao plano formado por $\vec{v}$ e $\vec{B}$.

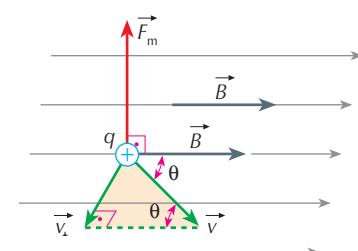


Figura 3. A carga se desloca formando um ângulo θ com a direção de $\vec{B}$.

Nesse caso, para o cálculo da intensidade da força magnética, devemos considerar a componente da velocidade na direção perpendicular ao campo magnético. No triângulo destacado da **figura 3**, temos:

$$v_{\perp} = v \cdot \sin \theta$$

De modo geral, pode-se concluir que a intensidade da força magnética vale $F_m = B \cdot |q| \cdot v_{\perp}$ ou, sendo $v_{\perp} = v \cdot \sin \theta$:

$$F_m = B \cdot |q| \cdot v \cdot \sin \theta$$

O sentido da força magnética depende do sinal da carga q em movimento. Para determinar o sentido de $\vec{F}_m$, quando a carga for positiva, utiliza-se uma regra prática que denominaremos **regra da mão direita nº 2** (fig. 4).

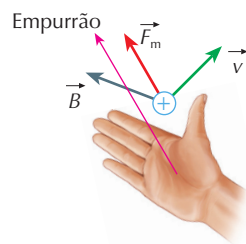


Figura 4. Com a mão direita, como na regra nº 1, aponte o polegar na direção e sentido em que a carga está se movendo, isto é, ao longo de $\vec{v}$, e os dedos na direção e sentido do vetor $\vec{B}$. O sentido de $\vec{F}_m$ é aquele no qual a mão daria um empurrão.

Se a carga for negativa, o sentido será contrário àquele dado por essa regra (**fig. 5**). Para não confundir com a regra nº 1, observe que, nas duas regras, o polegar aponta no sentido do movimento da carga (ou da corrente elétrica). O empurrão fornece o sentido de $\vec{B}$ na regra nº 1 e o sentido de $\vec{F}_m$ na regra nº 2.

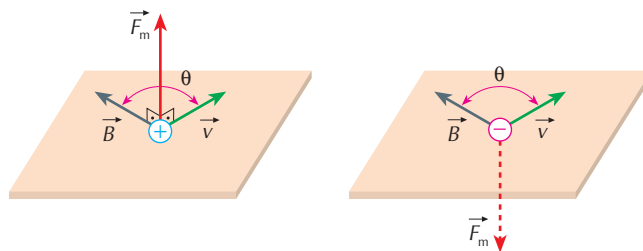
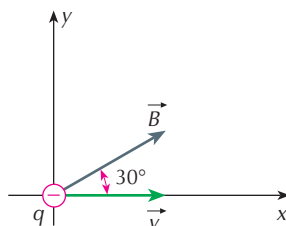


Figura 5. Sentido da força magnética quando a carga móvel é positiva e quando é negativa.

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

- R. 131** Uma carga elétrica $q = -3 \mu\text{C}$ desloca-se com velocidade $v = 4 \cdot 10^2 \text{ m/s}$ na direção do eixo x da figura, formando um ângulo de 30° com o vetor campo magnético $\vec{B}$ de intensidade $5 \cdot 10^{-2} \text{ T}$. Os vetores $\vec{v}$ e $\vec{B}$ estão no plano xy .



- Caracterize a força magnética que agirá sobre a carga.
- Mantendo-se fixo o vetor $\vec{B}$, a carga é lançada com a mesma velocidade na direção do eixo y , em vez de na do eixo x . Caracterize a nova força magnética.



Solução:

a) A força magnética $\vec{F}_m$ apresentará as seguintes características:

direção: perpendicular ao plano de $\vec{B}$ e $\vec{v}$ (plano xy);

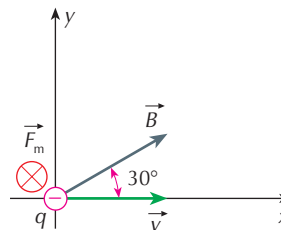
sentido: determinado pela regra da mão direita n° 2. Como q é negativa, $\vec{F}_m$ é orientada do observador para o plano $\otimes$;

intensidade:

$$F_m = B \cdot |q| \cdot v \cdot \sin \theta$$

$$F_m = 5 \cdot 10^{-2} \cdot 3 \cdot 10^{-6} \cdot 4 \cdot 10^2 \cdot \sin 30^\circ$$

$$F_m = 3 \cdot 10^{-5} \text{ N}$$



b) Lançando-se q na direção do eixo y , a nova força magnética $\vec{F}'_m$ terá:

direção: perpendicular ao plano xy ;

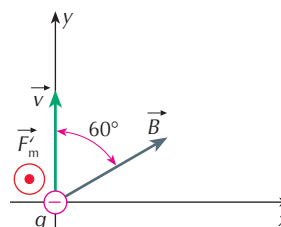
sentido: orientado do plano para o observador $\odot$;

intensidade:

$$F'_m = B \cdot |q| \cdot v \cdot \sin \theta$$

$$F'_m = 5 \cdot 10^{-2} \cdot 3 \cdot 10^{-6} \cdot 4 \cdot 10^2 \cdot \sin 60^\circ$$

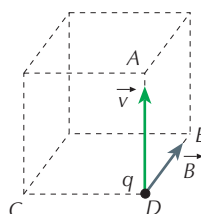
$$F'_m \approx 5,2 \cdot 10^{-5} \text{ N}$$



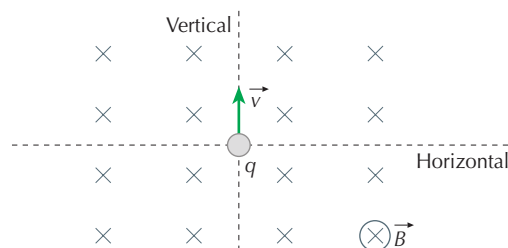
Resposta: a) $\otimes$; $F_m = 3 \cdot 10^{-5} \text{ N}$; b) $\odot$; $F'_m \approx 5,2 \cdot 10^{-5} \text{ N}$

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 332 Uma partícula α , cuja carga elétrica é $q = 3,2 \cdot 10^{-19} \text{ C}$, move-se com velocidade $v = 3,0 \cdot 10^5 \text{ m/s}$ em uma região de campo magnético $\vec{B}$ de intensidade $2,5 \cdot 10^5 \text{ T}$, conforme a figura. Caracterize a força magnética que atua na partícula.

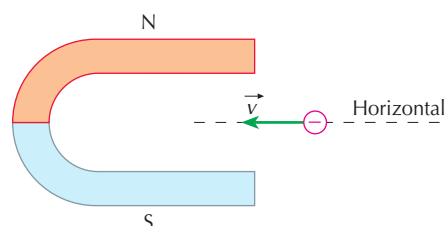


P. 333 Uma partícula de carga elétrica $q = 2,0 \cdot 10^{-6} \text{ C}$ é lançada num campo magnético uniforme de intensidade $B = 4,0 \cdot 10^3 \text{ T}$ com velocidade $v = 20 \text{ m/s}$, sendo $\vec{v}$ perpendicular a $\vec{B}$, conforme a figura. Determine a intensidade, a direção e o sentido da força magnética que atua na partícula.



P. 334 Um elétron de carga elétrica $-1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ é lançado entre os polos de um ímã com velocidade $2,0 \cdot 10^5 \text{ m/s}$, conforme mostra a figura. Admitindo-se que o campo magnético entre os polos do ímã é uniforme, o elétron fica sujeito a uma força magnética de intensidade $8,0 \cdot 10^{-14} \text{ N}$. Determine:

- a intensidade, a direção e o sentido do vetor indução magnética entre os polos N e S;
- a direção e o sentido da força magnética que age no elétron, no instante em que penetra no campo.



Movimento de uma carga em um campo magnético uniforme

Considere uma carga puntiforme q lançada em um campo magnético $\vec{B}$ uniforme. Essa carga poderá descrever diversos tipos de movimentos, conforme a direção de sua velocidade $\vec{v}$ e, consequentemente, da força magnética que nela atua.

1º caso: $\vec{v}$ é paralela a $\vec{B}$

Nesse caso, $\theta = 0^\circ$ ou 180° , logo $\sin \theta = 0$ e, portanto, $F_m = B \cdot |q| \cdot v \cdot \sin \theta = 0$. Como a força magnética é nula, decorre que a velocidade permanece constante (aceleração nula) e a carga segue em **movimento retilíneo uniforme** (MRU) (fig. 6).

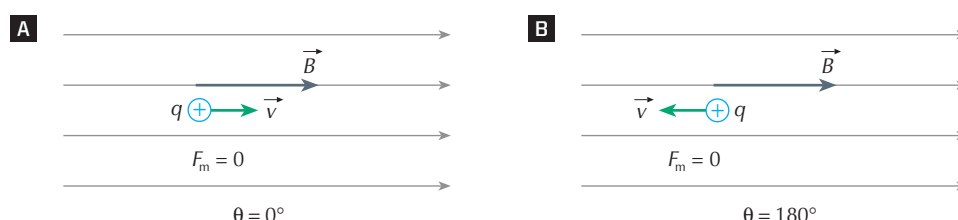


Figura 6. Quando $\vec{v}$ é paralela a $\vec{B}$, a carga segue em MRU.

2º caso: $\vec{v}$ é perpendicular a $\vec{B}$

Na figura 7, com $\theta = 90^\circ$, temos que $\sin \theta = 1$ e, portanto, $F_m = B \cdot |q| \cdot v$, ou seja, a força magnética $\vec{F}_m$ não é nula. Sendo $\vec{F}_m$ perpendicular a $\vec{v}$, decorre que a força magnética é a **resultante centrípeta, alterando apenas a direção da velocidade**. Assim, o módulo de $\vec{v}$ permanece constante e o **movimento é circular e uniforme** (MCU). Esse movimento é descrito em um plano que contém os vetores $\vec{v}$ e $\vec{F}_m$, sendo perpendicular ao vetor $\vec{B}$.

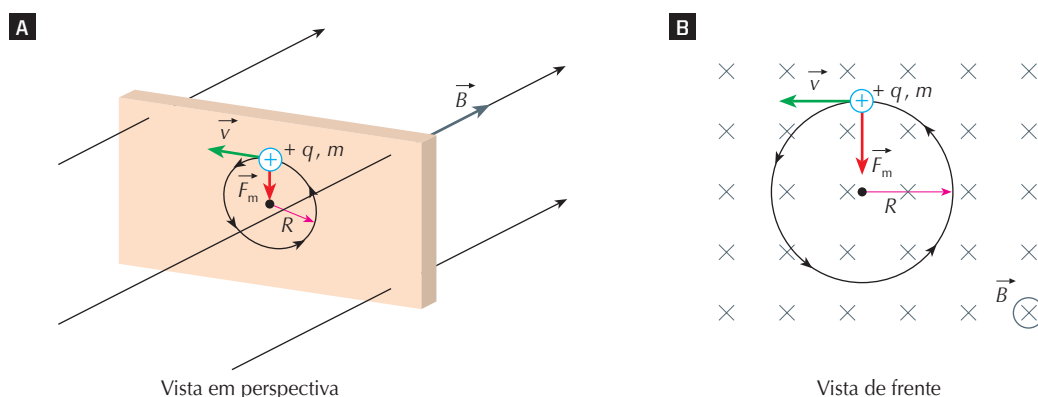


Figura 7. Quando $\vec{v}$ é perpendicular a $\vec{B}$, a carga executa MCU em plano perpendicular ao vetor $\vec{B}$.

a) Cálculo do raio da trajetória

Sendo m a massa da partícula e R o raio de sua trajetória, temos:

$$F_m = m \cdot a_{cp} = m \cdot \frac{v^2}{R}$$

Assim:

$$B \cdot |q| \cdot v = \frac{m \cdot v^2}{R} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow R = \frac{m \cdot v}{B \cdot |q|}$$



A emissão de elétrons, num tubo de raios catódicos, produz ionização do gás nele contido, com consequente emissão de luz. A presença do ímã desvia a trajetória dos elétrons.

b) Cálculo do período

Sendo T o período, isto é, o intervalo de tempo que corresponde a uma volta completa, temos:

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} \Rightarrow v = \frac{2\pi \cdot R}{T} \Rightarrow T = \frac{2\pi \cdot R}{v} \Rightarrow T = \frac{2\pi}{v} \cdot \frac{m \cdot v}{B \cdot |q|} \Rightarrow T = \frac{2\pi \cdot m}{B \cdot |q|}$$

Observe que o período não depende da velocidade v .

3º caso: $\vec{v}$ é oblíqua a $\vec{B}$

A velocidade $\vec{v}$ pode ser decomposta segundo as direções de uma paralela a $\vec{B}$ ($\vec{v}_1$) e de uma perpendicular a $\vec{B}$ ($\vec{v}_2$), ou seja: $\vec{v} = \vec{v}_1 + \vec{v}_2$ (fig. 8A).

Segundo a componente $\vec{v}_1$, a carga tende a executar MRU na direção de $\vec{B}$ (1º caso) e, segundo $\vec{v}_2$, tende a executar MCU em um plano perpendicular a $\vec{B}$ (2º caso). O resultado da composição desses dois movimentos uniformes é um **movimento helicoidal uniforme**. A trajetória descrita é uma **hélice cilíndrica** (fig. 8B).

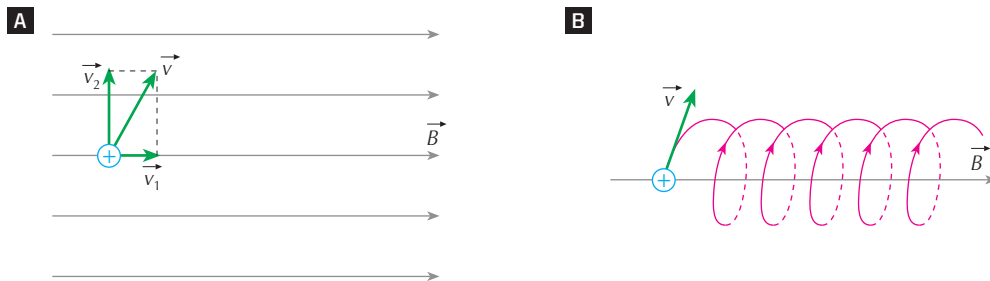


Figura 8. (A) $\vec{v} = \vec{v}_1 + \vec{v}_2$. (B) Quando $\vec{v}$ é oblíqua a $\vec{B}$, a trajetória é uma hélice cilíndrica.

De modo geral, como $\vec{F}_m$ é sempre perpendicular a $\vec{v}$, isto é, **a força magnética é a resultante centrípeta, o movimento é sempre uniforme**; a trajetória da carga depende do ângulo θ entre $\vec{v}$ e $\vec{B}$.



Conteúdo digital Moderna PLUS <http://www.modernaplus.com.br>
A Física em nosso Mundo: O televisor de tubo catódico

Reprodução proibida. Art. 184 do Código Penal e Lei 9.610 de 19 de fevereiro de 1998.

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

R. 132 Um elétron com energia cinética 10 eV (elétron-volt) penetra perpendicularmente em um campo magnético uniforme de intensidade 10^{-4} T. (Dados do elétron: módulo da carga $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C e massa $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg; 1 eV = $1,6 \cdot 10^{-19}$ J.)

- Calcule, em joules, a energia cinética do elétron, depois que ele penetra no campo magnético.
- Caracterize a trajetória descrita pelo elétron no campo.

Solução:

- Consideremos que o campo magnético uniforme seja perpendicular ao plano da figura e orientado do plano para o observador: $\odot$. No elétron, agirá a força magnética com as seguintes características:

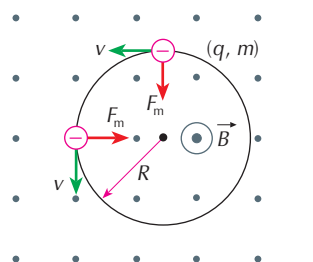
direção: perpendicular a $\vec{v}$ e a $\vec{B}$ e, portanto, contida no plano da figura;

sentido: determinado pela regra da mão direita nº 2 (ver figura);

intensidade: $F_m = B \cdot |q| \cdot v \cdot \sin 90^\circ \Rightarrow F_m = B \cdot |q| \cdot v$

Essa força muda apenas a direção da velocidade v do elétron.

A força magnética é perpendicular à trajetória e não realiza trabalho.



Portanto, pelo teorema da energia cinética, a energia cinética do elétron, ao penetrar no campo, permanece constante: $E_c = 10 \text{ eV}$

Como $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$, temos: $E_c = 1,6 \cdot 10^{-18} \text{ J}$

- b) O elétron descreve uma trajetória circular de raio R , cuja velocidade pode ser determinada, já que $E_c = \frac{mv^2}{2}$, em que $E_c = 1,6 \cdot 10^{-18} \text{ J}$ e $m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$.

$$\text{Assim: } v^2 = \frac{2E_c}{m} \Rightarrow v^2 = \frac{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-18}}{9,1 \cdot 10^{-31}} \Rightarrow v^2 = 3,5 \cdot 10^{12} \Rightarrow v \approx 1,9 \cdot 10^6 \text{ m/s}$$

$$\text{O raio } R \text{ da trajetória é dado por: } R = \frac{m \cdot v}{B \cdot |q|} \Rightarrow R = \frac{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 1,9 \cdot 10^6}{10^{-4} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} \Rightarrow R \approx 0,11 \text{ m}$$

Resposta: a) $1,6 \cdot 10^{-18} \text{ J}$; b) MCU de raio aproximadamente igual a $0,11 \text{ m}$

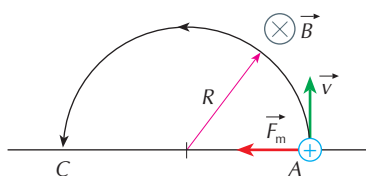
R. 133 Um próton é lançado pelo orifício A do anteparo, com velocidade $v = 7,5 \cdot 10^5 \text{ m/s}$ perpendicularmente ao campo magnético uniforme (conforme a figura) de intensidade $B = 0,5 \text{ T}$. É dada a relação massa-carga do próton $\approx 10^{-8} \text{ kg/C}$. Determine:

- a) a posição do ponto C sobre a qual o próton incide no anteparo;
b) o intervalo de tempo decorrido desde o instante em que ele penetra no orifício A até atingir o ponto C.



Solução:

- a) A força magnética $\vec{F}_m$ que atua no próton, sendo perpendicular a $\vec{F}$ e a $\vec{v}$, está contida no plano da figura e seu sentido é determinado pela regra da mão direita nº 2.



Como $\vec{B}$ é perpendicular a $\vec{v}$, o próton descreve uma semicircunferência de raio:

$$R = \frac{m \cdot v}{B \cdot |q|} \Rightarrow R = \frac{v}{B} \cdot \frac{m}{|q|}$$

Sabendo que $\frac{m}{|q|} = 10^{-8} \text{ kg/C}$, a igualdade acima fica:

$$R = \frac{7,5 \cdot 10^5}{0,5} \cdot (10^{-8}) \Rightarrow R = 15 \cdot 10^{-3} \text{ m} \Rightarrow R = 15 \text{ mm}$$

A posição C sobre a qual o próton incide no anteparo estará a uma distância: $AC = 30 \text{ mm}$

- b) O próton descreve a semicircunferência $\widehat{AC}$ em MU, com velocidade $v = 7,5 \cdot 10^5 \text{ m/s}$. Então, a medida de $\widehat{AC}$ equivale ao produto vt , em que t é o intervalo de tempo decorrido desde o instante em que o próton penetra em A até atingir C.

$$t = \frac{\pi R}{v} \Rightarrow t = \frac{\pi \cdot 15 \cdot 10^{-3}}{7,5 \cdot 10^5} \Rightarrow t = 2\pi \cdot 10^{-8} \text{ s}$$

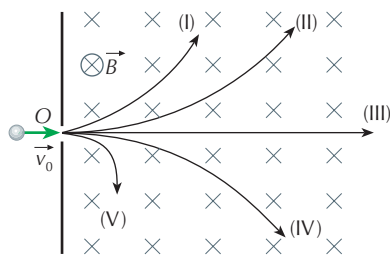
Outra maneira de se calcular esse intervalo de tempo é observar que ele corresponde à metade do período:

$$t = \frac{T}{2} = \frac{\pi}{B} \cdot \frac{m}{|q|} \Rightarrow t = \frac{\pi}{0,5} \cdot (10^{-8}) \Rightarrow t = 2\pi \cdot 10^{-8} \text{ s}$$

Resposta: a) 30 mm distante de A; b) $2\pi \cdot 10^{-8} \text{ s}$



- R. 134** Na região da figura, tem-se um campo magnético uniforme de indução $\vec{B}$. Cinco partículas são lançadas nesse campo no ponto O, todas com velocidade inicial $\vec{v}_0$. As partículas são: próton, átomo neutro de sódio, elétron, dêuteron e íon negativo de flúor. Caracterize as trajetórias descritas pelas partículas. (Dados: o dêuteron é uma partícula constituída de um próton e um nêutron; a massa do íon negativo de flúor é maior que a do elétron e tem a mesma carga.)



Solução:

Nas partículas positivas, próton (massa m_p) e dêuteron (massa m_d), a força magnética agirá para cima, conforme a figura, sendo que elas também serão desviadas para cima. Como a carga do próton é igual à do dêuteron

$$(q_p = q_d), m_d > m_p \text{ e os raios da trajetória são } R_p = \frac{m_p \cdot v_0}{B \cdot |q_p|} \text{ e } R_d = \frac{m_d \cdot v_0}{B \cdot |q_d|}$$

temos $R_d > R_p$.

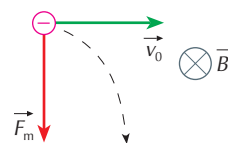
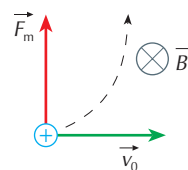
Portanto, a trajetória (I) corresponde ao próton, e a (II), ao dêuteron.

No átomo neutro de sódio ($q_{Na} = 0$), não agirá força magnética e ele não sofrerá desvio; sua trajetória será (III).

Nas partículas negativas, elétron (massa m_e) e íon negativo de flúor (massa m_F), a força magnética agirá para baixo e as partículas serão desviadas para baixo. Sendo $q_e = q_F$, $m_F > m_e$, $R_e = \frac{m_e v_0}{B \cdot |q_e|}$ e $R_F = \frac{m_F v_0}{B \cdot |q_F|}$,

resulta $R_F > R_e$. Então, a trajetória (IV) corresponde ao íon negativo de flúor, e a (V) ao elétron.

Resposta: (I) próton; (II) dêuteron; (III) átomo neutro de sódio; (IV) íon negativo de flúor; (V) elétron

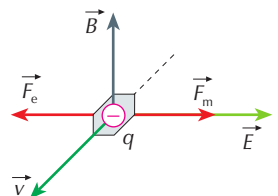


- R. 135** Determine a velocidade de um elétron que não sofre desvio em sua trajetória quando submetido à ação simultânea de um campo elétrico $\vec{E}$ e um campo magnético de indução $\vec{B}$. Esses campos têm intensidades $E = 34 \cdot 10^2 \text{ V/m}$ e $B = 2 \cdot 10^{-4} \text{ T}$, e são perpendiculares entre si e à direção do movimento do elétron.

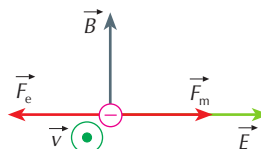
Solução:

O campo elétrico $\vec{E}$ aplicará, no elétron, a força elétrica $\vec{F}_e$, de mesma direção e sentido oposto a $\vec{E}$. A força magnética $\vec{F}_m$, aplicada pelo campo magnético $\vec{B}$, será perpendicular ao plano formado por $\vec{B}$ e pela velocidade $\vec{v}$ do elétron.

Para que o elétron não sofra desvio em sua trajetória, $\vec{F}_m$ deve ter a mesma intensidade, mesma direção e sentido oposto a $\vec{F}_e$.



Trajетória vista em perspectiva



Vista de frente: o elétron está indo do plano para o observador

Como $F_e = |q| \cdot E$ e $F_m = B \cdot |q| \cdot v \cdot \sin 90^\circ = B \cdot |q| \cdot v$ e $F_e = F_m$, segue:

$$|q| \cdot E = B \cdot |q| \cdot v \Rightarrow v = \frac{E}{B} \Rightarrow v = \frac{34 \cdot 10^2}{2 \cdot 10^{-4}} \Rightarrow$$

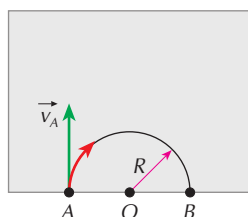
$$\Rightarrow v = 17 \cdot 10^6 \text{ m/s} \Rightarrow \boxed{v = 1,7 \cdot 10^7 \text{ m/s}}$$

Resposta: $1,7 \cdot 10^7 \text{ m/s}$

EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 335 Uma pequena esfera eletrizada com carga $3 \mu\text{C}$ penetra em um campo magnético com quantidade de movimento $10^{-2} \text{ N} \cdot \text{s}$ e direção perpendicular ao vetor $\vec{B}$. Verifica-se que ela passa a executar uma trajetória circular de raio 50 cm . Calcule a intensidade do vetor $\vec{B}$.

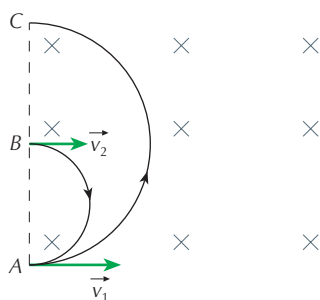
P. 336 (UFMG) Um elétron entra na região sombreada da figura, onde existe um campo magnético uniforme. No ponto A, a velocidade do elétron é $v_A = 3,52 \cdot 10^7 \text{ m/s}$. O raio da trajetória é $R = 1,0 \cdot 10^{-2} \text{ m}$ e a razão carga-massa do elétron é, em valor absoluto, $\frac{e}{m} = 1,76 \cdot 10^{11} \text{ C/kg}$.



Determine:

- a intensidade, a direção e o sentido do campo de indução magnética $\vec{B}$;
- o tempo gasto pelo elétron para percorrer a semicircunferência $\widehat{AB}$.

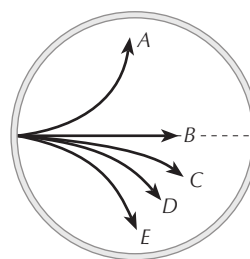
P. 337 (Fuvest-SP) A figura representa as trajetórias de duas partículas eletrizadas que penetram numa câmara de bolhas onde há um campo magnético uniforme, orientado perpendicularmente para dentro do plano do papel. A partícula P_1 penetra na câmara no ponto A e sai em C. A partícula P_2 penetra em B e sai em A.



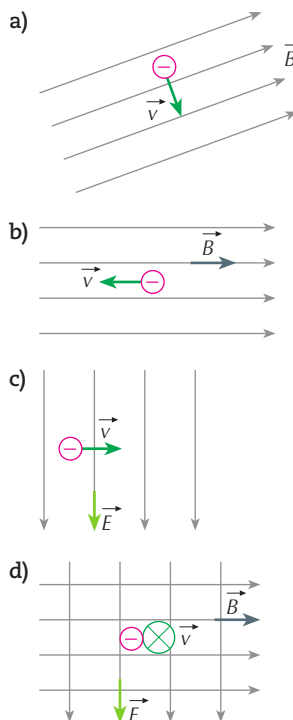
- Quais os sinais das cargas q_1 e q_2 das partículas?
- Sendo $|q_1| = |q_2|$, $v_1 = v_2$ e $AB = BC$, qual a relação entre as massas m_1 e m_2 das partículas?

P. 338 Um próton (massa m e carga e) e um dêuteron (massa $2m$ e carga e), com mesma velocidade $\vec{v}$, são lançados perpendicularmente a um campo magnético uniforme de indução $\vec{B}$. Sendo R_d e R_p , respectivamente, os raios das órbitas do dêuteron e do próton, calcule a relação entre eles.

P. 339 (ITA-SP) A figura representa a seção transversal de uma câmara de bolhas utilizada para observar a trajetória de partículas atômicas. Um feixe de partículas, todas com a mesma velocidade, contendo elétrons, pósitrons (elétrons positivos), prótons, nêutrons e dêuterons (partículas formadas por um próton e um nêutron), penetra nessa câmara, à qual está aplicado um campo magnético perpendicularmente ao plano da figura. Identifique a trajetória de cada partícula.



P. 340 Determine a direção e o sentido das forças magnética e elétrica que atuam em um elétron movendo-se em campos diferentes, de acordo com os seguintes esquemas:



P. 341 (Efei-MG) Um próton atravessa uma região em que existem dois campos uniformes, um magnético e outro elétrico, perpendiculares entre si e à direção do movimento da partícula. Sendo E a intensidade do campo elétrico e B a do campo magnético, calcule a velocidade do próton.



Seção 14.2

Objetivos

- Caracterizar a força magnética que atua sobre um condutor reto em um campo magnético uniforme.
- Utilizar a regra da mão direita nº 2 para encontrar a direção e o sentido da força magnética que atua sobre um condutor reto em um campo magnético uniforme.
- Conhecer aplicações práticas da força magnética sobre condutores.

Termos e conceitos

- roda de Barlow
- rotor
- comutador
- escovas
- amperímetro analógico

Força sobre um condutor reto em um campo magnético uniforme

Considere um condutor reto, de comprimento L , percorrido por uma corrente elétrica i em um campo magnético uniforme de indução $\vec{B}$, e seja θ o ângulo entre $\vec{B}$ e a direção do condutor (fig. 9). Se Δq é a carga transportada pela corrente elétrica i , no intervalo de tempo Δt , ao longo do condutor de comprimento L , temos $i = \frac{\Delta q}{\Delta t}$ e, portanto:

$$\Delta q = i \cdot \Delta t \quad (1)$$

A força magnética resultante que atua na carga Δq e, portanto, no condutor terá intensidade:

$$F_m = B \cdot \Delta q \cdot v \cdot \sin \theta \quad (2)$$

De (1) em (2) podemos concluir que: $F_m = B \cdot i \cdot \Delta t \cdot v \cdot \sin \theta$

Por outro lado, $v = \frac{L}{\Delta t} \Rightarrow \Delta t \cdot v = L$. Substituindo esse resultado na fórmula anterior, temos:

$$F_m = B \cdot i \cdot L \cdot \sin \theta$$

Como o sentido convencional da corrente elétrica é o mesmo do movimento das cargas positivas, pode-se utilizar, para determinar o sentido de $\vec{F}_m$, a regra da mão direita nº 2, trocando-se $\vec{v}$ por i (fig. 9). Observe que a força magnética tem direção perpendicular ao plano determinado por $\vec{B}$ e pela direção de i .

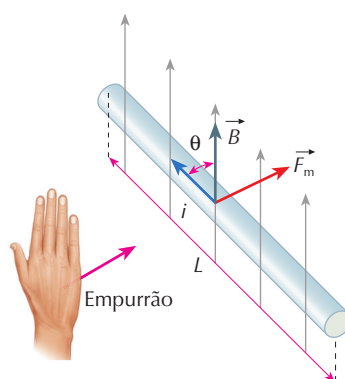


Figura 9. Força em condutor reto percorrido por corrente elétrica em um campo magnético uniforme.

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

- R. 136** Um condutor reto, de comprimento $L = 50$ cm, é percorrido por uma corrente de intensidade $i = 2,0$ A. O condutor está totalmente imerso em um campo magnético uniforme de intensidade $B = 2,0 \cdot 10^{-3}$ T e forma com a direção do campo um ângulo de 30° . Caracterize a força magnética que atua sobre o condutor.

Solução:

A força magnética que atua no condutor terá as seguintes características:

direção: perpendicular ao plano formado por $\vec{B}$ e i ;

sentido: determinado pela regra da mão direita nº 2 (ver figura ao lado);

intensidade:

Dados:

$$B = 2,0 \cdot 10^{-3} \text{ T}$$

$$i = 2,0 \text{ A}$$

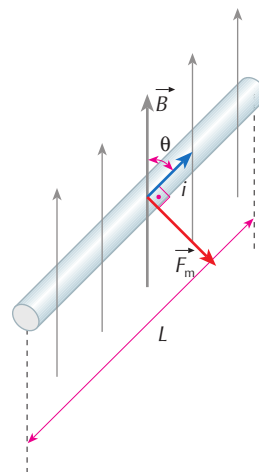
$$\theta = 30^\circ$$

$$L = 50 \text{ cm} \Rightarrow L = 0,50 \text{ m}$$

vem:

$$F_m = B \cdot i \cdot L \cdot \sin 30^\circ = 2,0 \cdot 10^{-3} \cdot 2,0 \cdot 0,50 \cdot \frac{1}{2} \Rightarrow F_m = 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ N}$$

Resposta: $F_m = 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ N}$; direção e sentido dados pela figura

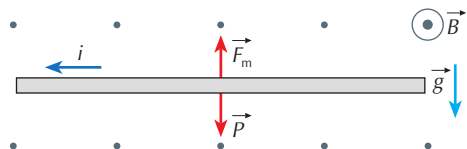


- R. 137** Um condutor reto e horizontal de comprimento $L = 0,20 \text{ m}$ e massa $m = 60 \text{ g}$, percorrido por uma corrente de intensidade $i = 15 \text{ A}$, encontra-se em equilíbrio sob as ações de um campo magnético de indução $\vec{B}$ e do campo gravitacional $\vec{g}$, conforme a figura. Adote $g = 10 \text{ m/s}^2$. Determine a intensidade de $\vec{B}$ e o sentido de i .

**Solução:**

As forças que atuam no condutor são o peso $\vec{P}$ e a força magnética $\vec{F}_m$. Estando o condutor em equilíbrio, concluímos que $\vec{F}_m$ tem a mesma direção de $\vec{P}$, sentido contrário e mesma intensidade:

$$F_m = P \Rightarrow B \cdot i \cdot L \cdot \sin \theta = mg$$



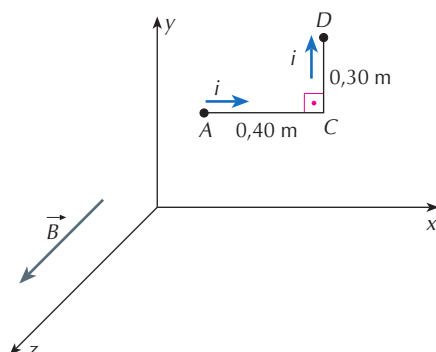
Sendo $i = 15 \text{ A}$, $L = 0,20 \text{ m}$, $\theta = 90^\circ$, $m = 60 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$ e $g = 10 \text{ m/s}^2$, temos:

$$B \cdot 15 \cdot 0,20 = 60 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \Rightarrow B = 0,20 \text{ T}$$

Conhecidos os sentidos de $\vec{B}$ e $\vec{F}_m$, determinamos pela regra da mão direita nº 2 o sentido de i : da direita para a esquerda.

Resposta: $B = 0,20 \text{ T}$; sentido de i : da direita para a esquerda

- R. 138** Um fio condutor com a forma mostrada na figura, situado no plano xy , é percorrido por uma corrente elétrica de intensidade $3,0 \text{ A}$. Sobre ele atua o campo magnético uniforme de indução $\vec{B}$ no sentido do eixo z . Sabe-se que $B = 1,0 \text{ T}$. Determine a intensidade da força magnética resultante que atua no fio.



Solução:

Determinamos, de acordo com a regra da mão direita nº 2, os sentidos das forças magnéticas $\vec{F}_{AC}$ e $\vec{F}_{CD}$ sobre os trechos AC e CD, respectivamente.

Para o cálculo das intensidades dessas forças, temos:

$$F_{AC} = B \cdot i \cdot L_{AC} \cdot \sin \theta = 1,0 \cdot 3,0 \cdot 0,40 \cdot \sin 90^\circ \Rightarrow$$

$$\Rightarrow F_{AC} = 1,2 \text{ N}$$

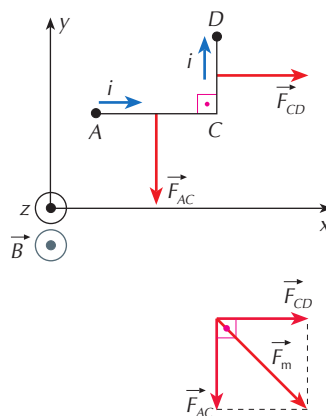
$$F_{CD} = B \cdot i \cdot L_{CD} \cdot \sin \theta = 1,0 \cdot 3,0 \cdot 0,30 \cdot \sin 90^\circ \Rightarrow$$

$$\Rightarrow F_{CD} = 0,90 \text{ N}$$

A força magnética resultante $\vec{F}_m$ tem intensidade:

$$F_m^2 = F_{AC}^2 + F_{CD}^2 \Rightarrow F_m^2 = (1,2)^2 + (0,90)^2 \Rightarrow \boxed{F_m = 1,5 \text{ N}}$$

Resposta: 1,5 N



- R. 139** O quadro condutor da figura (de 2 m por 1 m) está imerso no campo magnético uniforme de intensidade $B = 3 \cdot 10^{-2} \text{ T}$. Se nesse quadro circula uma corrente de 2 A, calcule o momento de rotação a que ele fica submetido.

Solução:

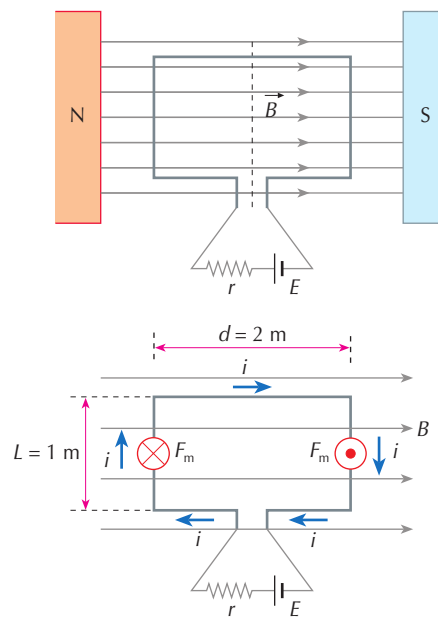
Determinamos, de acordo com a regra da mão direita nº 2, os sentidos das forças magnéticas. Observe que, nos condutores paralelos a $\vec{B}$, as forças magnéticas são nulas. O quadro fica sujeito a um binário de momento:

$$M = F_m d \Rightarrow M = B \cdot i \cdot L \cdot \sin \theta \cdot d$$

Sendo $\theta = 90^\circ$ e $\sin 90^\circ = 1$, temos:

$$M = 3 \cdot 10^{-2} \cdot 2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 2 \Rightarrow \boxed{M = 12 \cdot 10^{-2} \text{ N} \cdot \text{m}}$$

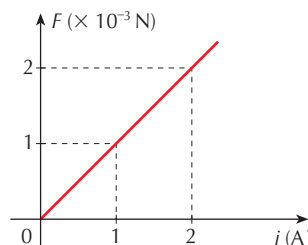
Resposta: $12 \cdot 10^{-2} \text{ N} \cdot \text{m}$



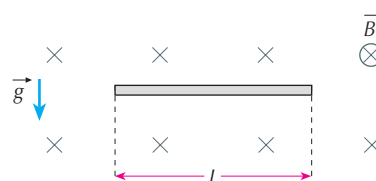
EXERCÍCIOS PROPOSTOS

- P. 342** (Efe-MG) Calcule a intensidade da força magnética que age em um condutor de 20 cm, percorrido por corrente elétrica de 10 A, colocado perpendicularmente às linhas de indução de um campo magnético de intensidade 1 T. Indique, em um esquema, a direção e o sentido da força.

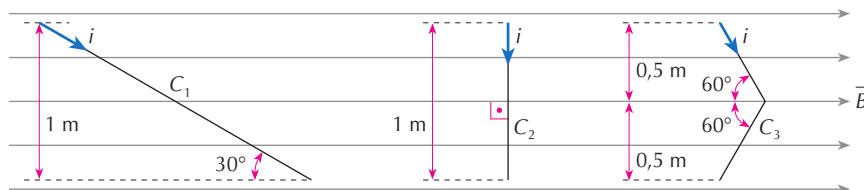
- P. 343** (UFRGS-RS) Uma das maneiras de se obter o valor de um campo magnético uniforme é colocar um fio condutor perpendicularmente às linhas de indução e medir a força que atua sobre o fio para cada valor da corrente que o percorre. Em uma dessas experiências, utilizando-se um fio de 0,1 m, obtiveram-se dados que permitiram a construção do gráfico, onde F é a intensidade da força magnética e i é a corrente elétrica. Determine a intensidade do vetor campo magnético.



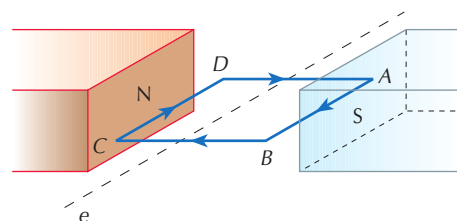
- P. 344** Um segmento de condutor reto e horizontal, tendo comprimento $L = 20 \text{ cm}$ e massa $m = 40 \text{ g}$, percorrido por corrente elétrica de intensidade $i = 5,0 \text{ A}$, apresenta-se em equilíbrio sob as ações exclusivas da gravidade $\vec{g}$ e de um campo magnético $\vec{B}$ horizontal. Determine B e o sentido de i . Adote $g = 10 \text{ m/s}^2$.



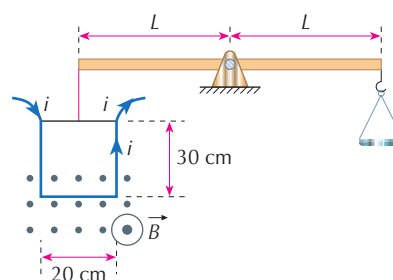
- P. 345** (FEI-SP) Os condutores C_1 , C_2 e C_3 , representados na figura abaixo, são percorridos por correntes iguais de intensidade $i = 10$ A. Esses condutores estão situados no interior de um campo magnético uniforme de intensidade $B = 0,05$ T. Determine a intensidade da força magnética exercida nos condutores.



- P. 346** (FEI-SP) Uma espira retangular ABCD de dimensões $AB = 2$ cm e $BC = 1$ cm localiza-se entre os polos N e S de um ímã permanente conforme a figura: o campo de indução pode ser considerado uniforme nessa região, com intensidade $B = 0,8$ T. A bobina pode girar em torno do eixo de simetria e , e é percorrida pela corrente $i = 5$ A.
- Calcule o momento de rotação da espira, na posição indicada.
 - Indique o sentido em que a espira irá girar e qual a posição de equilíbrio.



- P. 347** Na figura, o campo magnético uniforme existente tem intensidade $B = 0,1$ T. A balança fica em equilíbrio horizontal, quando o quadro condutor de 30 cm $\cdot$ 20 cm ligado a ela por um fio isolante não é percorrido por corrente. Faz-se passar pelo quadro uma corrente de 10 A em sentido anti-horário. Calcule a massa que deve ser colocada no prato, para que a balança volte ao equilíbrio horizontal. (É dado $g = 10$ m/s².)



Aplicações práticas da força magnética sobre condutores

Uma das primeiras aplicações da força magnética sobre condutores foi na construção do motor elétrico rudimentar: a **roda de Barlow*** (fig. 10).

Um disco vertical de cobre pode mover-se em torno de um eixo horizontal O e sua extremidade inferior A está em contato com uma cuba contendo mercúrio. Perpendicularmente ao plano do disco, na região entre O e A , estabelecemos o campo magnético de indução $\vec{B}$. Ligando os terminais de um gerador ao eixo do disco e ao mercúrio, estabelecemos entre A e O uma corrente elétrica i , e, conseqüentemente, a força magnética $\vec{F}_m$, que age sobre o disco. Devido ao momento de rotação dessa força, em relação ao eixo O , o disco se põe a girar continuamente.

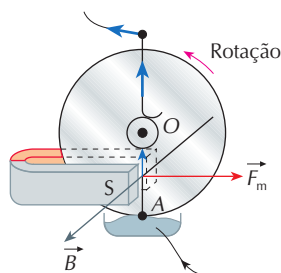
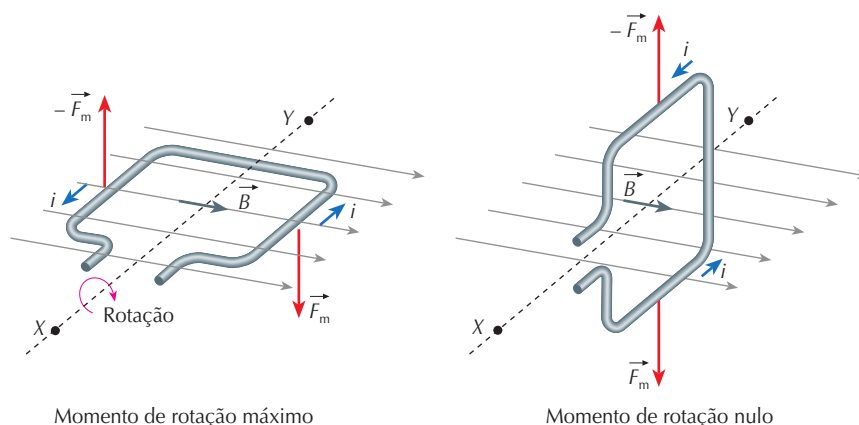


Figura 10.
Funcionamento da
roda de Barlow.

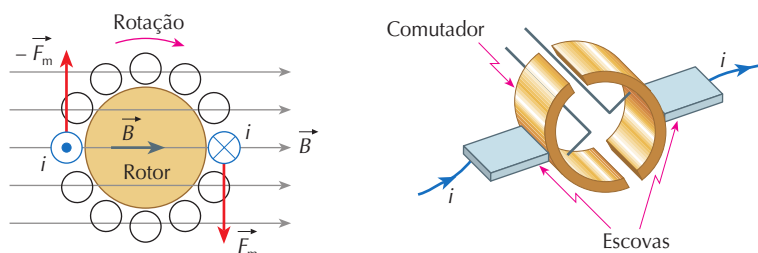
* **BARLOW**, Peter (1776-1862), matemático e físico britânico. Em 1828 apresentou à comunidade científica o motor elétrico rudimentar que leva seu nome.

Nos **motores elétricos atuais**, um quadro móvel em torno do eixo XY e percorrido pela corrente elétrica i é colocado em um campo $\vec{B}$ (fig. 11). Esse quadro fica sujeito a um binário, cujo momento é máximo quando o quadro está paralelo a $\vec{B}$ e nulo quando perpendicular ao campo.



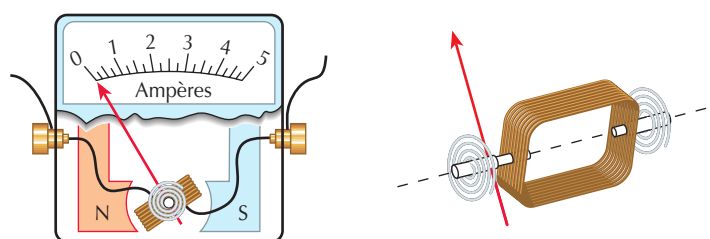
« Figura 11.
Funcionamento
dos motores
elétricos atuais.

Nesses motores, utilizam-se inúmeros quadros montados sobre um cilindro (**rotor**) e dotados de ligações elétricas (**comutador e escovas**) (fig. 12). A utilização desses vários quadros é importante não apenas para intensificar os binários, pela soma de seus efeitos, mas também para possibilitar o aproveitamento de cada quadro no melhor instante, isto é, quando este for paralelo a $\vec{B}$. Ao atingir a posição de momento de rotação nulo, o sentido da corrente no quadro é invertido pelo comutador, garantindo uma rotação contínua no mesmo sentido.



« Figura 12.
Rotor, comutador
e escovas.

Outra importante aplicação da força magnética sobre condutores ocorre nos **amperímetros analógicos** (fig. 13). Nesses aparelhos, o quadro móvel é ligado a um eixo ao qual se adaptam duas molas e um ponteiro.



« Figura 13.
Amperímetro
analógico.

O eixo é disposto perpendicularmente ao campo $\vec{B}$ e, quando não passa corrente elétrica no quadro, as molas mantêm o ponteiro na graduação zero da escala.

Ao se estabelecer a corrente elétrica i no circuito, o binário, originado pelas forças magnéticas, fará o quadro girar e o ponteiro deslocar-se ao longo da escala. As molas serão comprimidas simultaneamente, reagindo com um binário contrário, que equilibra o das forças magnéticas. Nessas condições, o ponteiro para na graduação correspondente ao valor da corrente elétrica i que atravessa o amperímetro. Interrompendo-se a corrente, as forças magnéticas deixam de agir sobre o quadro, seu binário se anula e as molas fazem o conjunto retornar à posição inicial.

Seção 14.3

Objetivos

- Caracterizar a força magnética entre condutores paralelos.
- Relacionar o sentido da corrente nos condutores ao sentido da força que age entre eles.
- Conhecer a definição oficial de ampère.

Força magnética entre condutores paralelos

Considere dois condutores retos e extensos, percorridos por correntes elétricas i_1 e i_2 , separados por uma distância r e situados no vácuo (fig. 14). A corrente elétrica i_1 origina o vetor indução magnética $\vec{B}_1$, de intensidade $B_1 = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{i_1}{r}$, nos pontos em que está o outro condutor. Neste, sendo $\vec{B}_1$ perpendicular a i_2 , a força magnética, ao longo de um comprimento L , terá intensidade $F_m = B_1 \cdot i_2 \cdot L$ e, substituindo-se B_1 em F_m , vem:

$$F_m = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{i_1 \cdot i_2}{r} \cdot L$$

Observe que a corrente i_2 não origina campo magnético no condutor que ela está percorrendo.

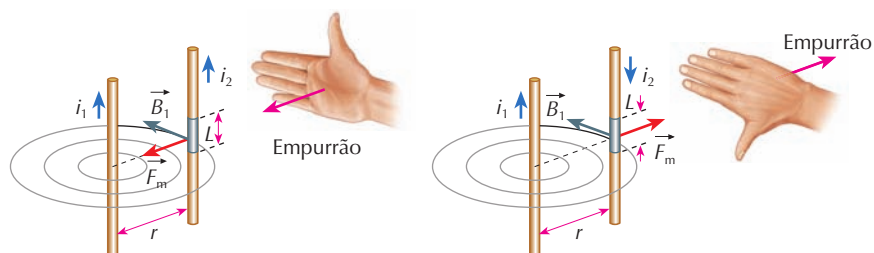


Figura 14. Força entre condutores paralelos.

Chega-se à conclusão de que a força magnética tem a mesma intensidade, considerando o vetor $\vec{B}_2$, originado por i_2 , agindo sobre um comprimento L do condutor percorrido por i_1 , como na figura 15, em que as correntes elétricas estão perpendiculares ao plano da figura.

A figura 15 destaca que, **se as correntes têm o mesmo sentido, a força entre os condutores é de atração e, se elas têm sentidos opostos, a força é de repulsão.**

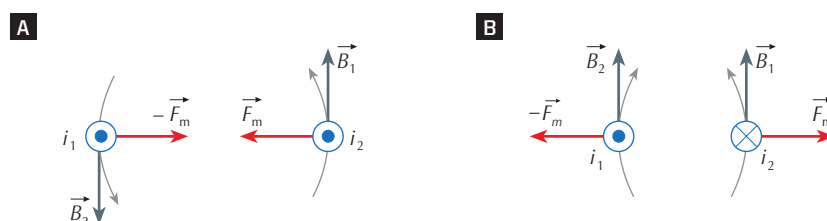


Figura 15. Vista de cima de dois condutores retos e extensos, paralelos e percorridos por corrente elétrica. Em (A) temos correntes no mesmo sentido, em (B) temos correntes de sentidos opostos.

Portanto:

Entre dois condutores retos e extensos, paralelos e percorridos por correntes, a força magnética será de atração, se as correntes tiverem o mesmo sentido, e será de repulsão, se tiverem sentidos opostos.

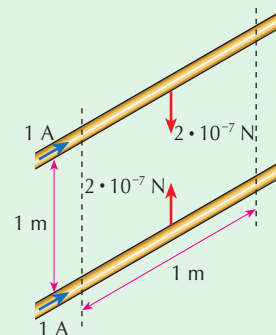
Em ambos os casos, a intensidade da força que um condutor extenso exerce sobre um comprimento L do outro será:

$$F_m = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{i_1 \cdot i_2}{r} \cdot L$$

Nessa última fórmula baseia-se a definição oficial de **ampère** (A), unidade elétrica fundamental do Sistema Internacional de Unidades (SI), apresentada no quadro que segue.

Definição oficial de ampère

Um ampère é a intensidade de corrente constante que, mantida em dois condutores retos, longos, paralelos e de seção transversal desprezível e a 1 m de distância um do outro, origina mutuamente entre eles força de intensidade igual a $2 \cdot 10^{-7}$ N em cada metro de comprimento do condutor, no vácuo.



EXERCÍCIO RESOLVIDO

R. 140 Dois condutores retos e extensos, paralelos, distanciados de 1 m, situados no vácuo ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$), são percorridos por correntes elétricas $i_1 = 2 \text{ A}$ e $i_2 = 5 \text{ A}$.

- Se i_1 e i_2 têm o mesmo sentido, caracterize a força magnética nos condutores por metro de comprimento.
- Invertendo o sentido de i_1 e dobrando sua intensidade, caracterize a nova força magnética em cada metro do condutor.

Solução:

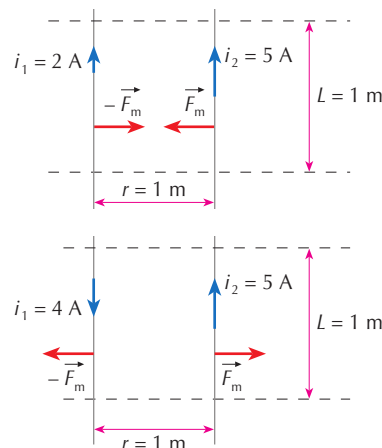
- Como as correntes têm o mesmo sentido, a força magnética será de atração e, em cada metro de comprimento dos condutores, terá intensidade:

$$F_m = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{i_1 \cdot i_2}{r} \cdot L = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \cdot \frac{2 \cdot 5}{1} \cdot 1 \Rightarrow F_m = 2 \cdot 10^{-6} \text{ N}$$

- Nessa nova condição, a força magnética passa a ser de repulsão e, em cada metro de comprimento dos condutores, terá intensidade:

$$F'_m = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{i_1 \cdot i_2}{r} \cdot L = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \cdot \frac{4 \cdot 5}{1} \cdot 1 \Rightarrow F'_m = 4 \cdot 10^{-6} \text{ N}$$

Resposta: a) $2 \cdot 10^{-6} \text{ N}$; b) $4 \cdot 10^{-6} \text{ N}$



EXERCÍCIOS PROPOSTOS

P. 348 Dois condutores retos e extensos, paralelos, são separados por $r = 1 \text{ m}$ e percorridos por correntes iguais de 1 A e de mesmo sentido. Se ambos estão no vácuo ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$), caracterize a força magnética entre eles por centímetro de comprimento.

P. 349 (EEM-SP)

- Qual é a unidade fundamental para a definição das unidades das grandezas elétricas no Sistema Internacional?
- Descreva o fenômeno físico em que se baseia a definição dessa unidade.



Explicação dos fenômenos magnéticos

Objetivos

- ▶ Relacionar os fenômenos magnéticos ao movimento de cargas elétricas.
- ▶ Definir substâncias diamagnéticas, paramagnéticas e ferromagnéticas.
- ▶ Compreender o fenômeno da histerese magnética.
- ▶ Conhecer o funcionamento e as aplicações de um eletroímã.
- ▶ Conhecer os fenômenos e as aplicações da supercondutividade.

Termos e conceitos

- *spin*
- ímã elementar
- domínios de Weiss
- ponto de Curie

Todos os fenômenos magnéticos podem ser explicados pelo movimento de cargas elétricas. As propriedades magnéticas de um ímã são determinadas pelo comportamento de alguns de seus elétrons. Um elétron pode originar um campo magnético de dois modos diferentes: girando em torno do núcleo de um átomo (**fig. 16A**); efetuando um movimento de rotação em torno de si mesmo – *spin* (**fig. 16B**).

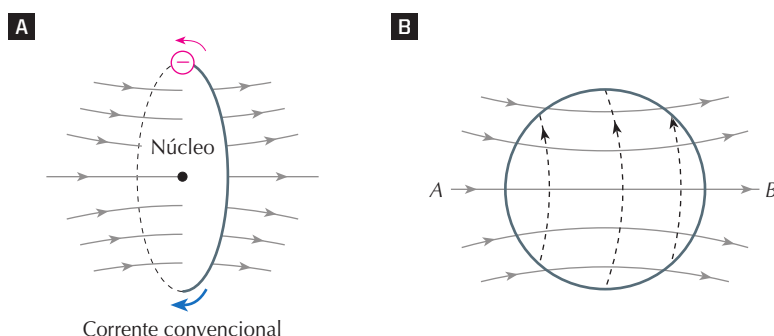


Figura 16. Modos de um elétron originar um campo magnético.

No caso **A**, o movimento do elétron é equivalente a uma espira circular percorrida por corrente; esse movimento origina um campo magnético semelhante ao da espira. Essa espira possui polos norte e sul equivalentes a um pequeno ímã denominado **ímã elementar** (**fig. 16A**).

No caso **B**, o elétron pode ser visualizado como uma pequena nuvem esférica de carga negativa, girando ao redor de um eixo, tal como o eixo **AB** na **figura 16B**. Esse efeito determina um campo magnético novamente semelhante ao de uma espira circular percorrida por corrente, equivalendo também a um ímã elementar.

A maioria das substâncias não apresenta fenômenos magnéticos externos, porque, para cada elétron girando ao redor de um núcleo em determinado sentido, existe outro elétron efetuando giro idêntico em sentido oposto, o que determina a anulação dos efeitos magnéticos. Por outro lado, para cada elétron com o *spin* em determinado sentido, há um outro com *spin* em sentido oposto, de modo que os efeitos magnéticos são novamente anulados.

Uma espira percorrida por corrente elétrica e colocada em posição qualquer, dentro de um campo magnético uniforme de indução $\vec{B}$, fica sujeita a um binário que a dispõe perpendicularmente ao campo, conforme vimos na seção 14.2. O mesmo ocorre com a espira circular da **figura 17A**.

Coloquemos um ímã em forma de barra em posição qualquer num campo magnético uniforme. Os elétrons responsáveis pelas propriedades magnéticas do ímã constituem pequenas espiras sujeitas à ação de um binário semelhante ao que age numa espira circular percorrida por corrente elétrica e colocada no campo (**fig. 17B**). Por isso, o ímã fica paralelo ao vetor indução magnética $\vec{B}$ com o polo norte no mesmo sentido do campo. Se olharmos no sentido do polo sul para o polo norte, notamos que os elétrons estão girando no sentido anti-horário, sendo equivalentes à corrente elétrica convencional que passa pela espira circular, no sentido horário.

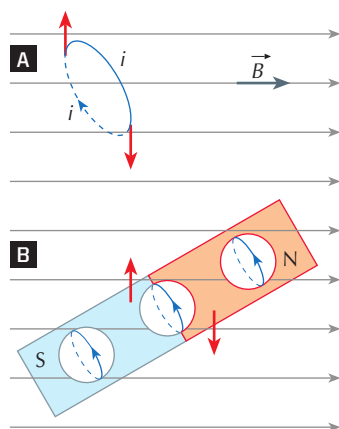


Figura 17. A disposição de um ímã em forma de barra em um campo magnético uniforme é semelhante à de uma espira percorrida por corrente. Os sentidos de rotação indicados no ímã são os dos elétrons.

Quando o polo norte de um ímã é aproximado do polo sul de outro ímã, os elétrons dos dois ímãs giram no mesmo sentido (**fig. 18**).

A força que se manifesta entre os polos é, portanto, consequência da atração entre condutores percorridos por correntes de mesmo sentido.

Por outro lado, quando se aproximam os polos norte de dois ímãs, os elétrons desses ímãs giram em sentidos opostos (**fig. 19**). A força que se manifesta entre os polos é, portanto, consequência da repulsão entre condutores percorridos por correntes de sentidos contrários.

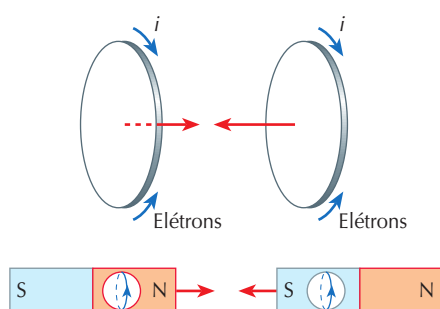


Figura 18. O polo norte atrai o polo sul de modo semelhante à atração entre condutores percorridos por correntes de mesmo sentido.

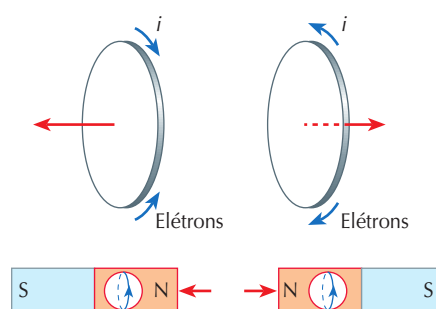


Figura 19. A repulsão entre dois polos norte é semelhante à repulsão entre condutores percorridos por correntes de sentidos contrários.

Um dos fenômenos magnéticos é a atração de objetos de ferro pelo ímã. Os elétrons responsáveis pelas propriedades magnéticas do prego de ferro são facilmente orientados.

Quando o polo norte de um ímã é aproximado de um prego (**fig. 20**), os elétrons desse prego adquirem uma certa orientação sob a ação do campo magnético do ímã: passam a girar no sentido anti-horário, do ponto de vista de um observador que está olhando no sentido do campo magnético do ímã. A extremidade do prego que está mais próxima do polo norte do ímã passa a ser o polo sul do prego, sendo atraído pelo ímã. Dizemos, pois, que o prego **se imantou ou se magnetizou por influência do ímã**.

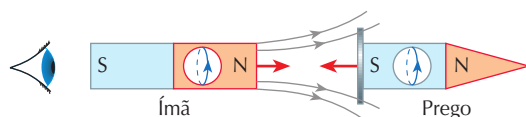


Figura 20. Atração de um prego de ferro por um ímã.

1 Substâncias magnéticas

Considere três solenoides idênticos, S_1 , S_2 e S_3 , ligados em série aos terminais de um gerador e próximos a pregos de ferro colocados em um plano horizontal (**fig. 21**). Quando a chave Ch é fechada, a passagem da corrente elétrica i origina, no interior dos solenoides, o campo magnético $\vec{B}_0$. Como o campo magnético externo dos solenoides é de fraca intensidade, ele não é suficiente para atrair pregos de ferro.

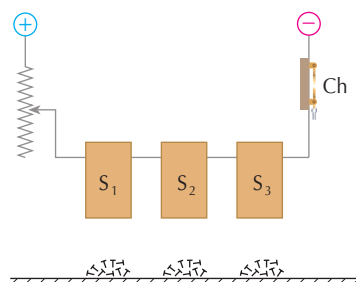


Figura 21. O campo magnético externo dos solenoides não atrai os pregos de ferro.

Colocando no interior de S_1 , S_2 e S_3 , respectivamente, barras de ferro, de aço temperado e de cobre, chamadas núcleos dos solenoides, observa-se que apenas o ferro e o aço atraem os pregos de ferro (fig. 22A). Abrindo-se a chave Ch, os pregos se desprendem do núcleo de ferro, mas ficam retidos no núcleo de aço (fig. 22B).

Em seguida, invertendo os terminais do gerador e fazendo a intensidade de corrente aumentar lentamente, a partir de zero, em sentido contrário, em pouco tempo, os pregos retidos no núcleo de aço irão se desprender (fig. 22C).

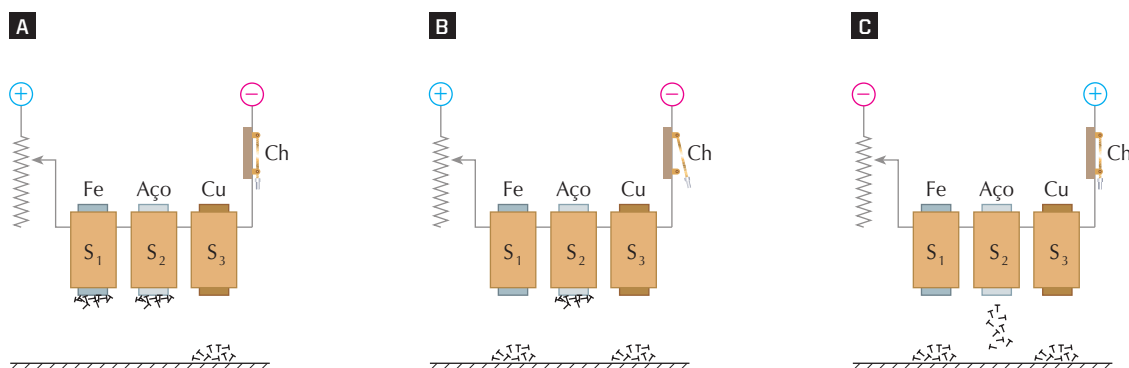


Figura 22. (A) Apenas o ferro e o aço atraem os pregos de ferro. (B) Cessando a corrente, os pregos ficam retidos no aço. (C) Invertendo a corrente e aumentando-a lentamente, os pregos se desprendem do aço.

Pode-se calcular a intensidade do vetor indução magnética $\vec{B}$, resultante no interior dos solenoides da experiência anterior, com núcleos de diferentes substâncias. Comparando-se a intensidade B do campo resultante com a intensidade B_0 do campo sem os núcleos, as substâncias podem ser classificadas em três grupos como veremos a seguir.

1ª) Diamagnéticas: substâncias em que B é ligeiramente menor que B_0 . Essas substâncias, como, por exemplo, o cobre da experiência analisada e o bismuto, contribuem para o enfraquecimento do campo originado pelo solenoide.

Em nível microscópico, considera-se que o diamagnetismo é devido ao movimento orbital dos elétrons. Quando uma substância diamagnética é submetida a um campo magnético externo de intensidade B_0 , os movimentos orbitais dos elétrons são tais que criam um campo de polaridade oposta, de modo que o campo resultante tem intensidade $B < B_0$.

2ª) Paramagnéticas: substâncias em que B é apenas um pouco maior que B_0 . Elas contribuem muito pouco para o valor do campo. É o caso da maioria das substâncias, como, por exemplo, manganês, cromo, estanho, alumínio, ar, platina etc.

O paramagnetismo é devido aos *spins* dos elétrons. Normalmente existem elétrons não emparelhados que produzem campos magnéticos em todos os sentidos, de modo que o efeito magnético total é nulo (fig. 23A). Quando uma substância paramagnética é submetida a um campo magnético externo de intensidade B_0 , ocorre o ordenamento dos *spins* eletrônicos, gerando um campo magnético com a mesma direção e sentido de $\vec{B}_0$ (fig. 23B). Em consequência, o campo resultante tem intensidade $B > B_0$. Nessas substâncias existe também o efeito diamagnético, mas ele é pouco acentuado em comparação com o efeito paramagnético e pode ser desconsiderado.

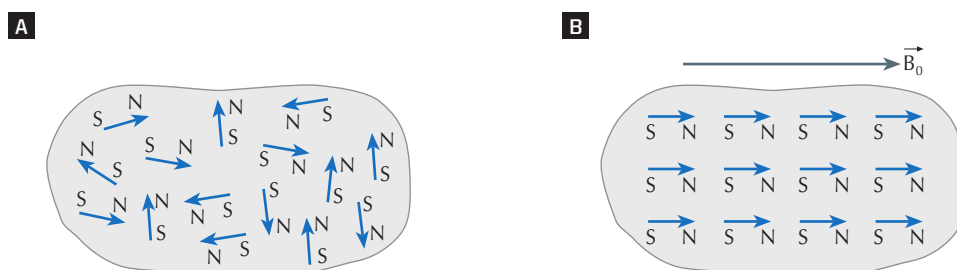
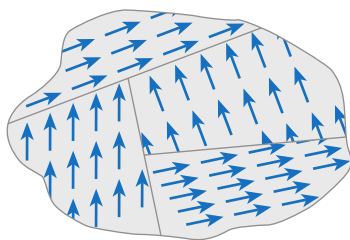


Figura 23. Comportamento de uma substância paramagnética.

3º) Ferromagnéticas: substâncias em que B é muito maior que B_0 . São elas: ferro, cobalto, níquel, gadolínio, disprósio e ligas especiais, em particular o aço temperado da experiência descrita anteriormente. Essas substâncias, quando imantadas, contribuem enormemente para o aumento da intensidade do campo, verificando-se que B pode ser aumentado muitas vezes.

O ferromagnetismo pode ser considerado um paramagnetismo acentuado. Nas substâncias ferromagnéticas há regiões onde, mesmo na ausência de um campo externo, os *spins* estão espontaneamente orientados. Tais regiões são denominadas **domínios de Weiss*** (fig. 24). Quando uma substância ferromagnética é submetida a um campo magnético externo de intensidade B_0 , os domínios giram para se dispor na direção e no sentido de $\vec{B}_0$. Isso faz com que o campo resultante seja bem mais intenso que o campo original (B muitas vezes maior do que B_0).

Trataremos apenas das substâncias ferromagnéticas daqui em diante, em razão de suas importantes aplicações.



◀ **Figura 24.**
Domínios de Weiss.

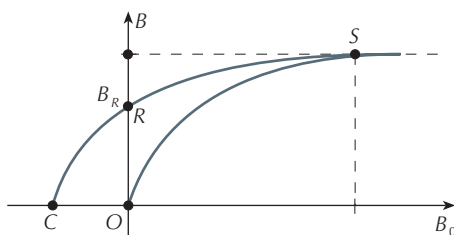
2

Histerese magnética

Um fenômeno importante apresentado pelas substâncias ferromagnéticas é a **histerese magnética** (do grego *hysteresis* = atraso). Imantando-se uma substância ferromagnética, ela poderá permanecer imantada, ainda que seja retirada a causa da imantação. Um exemplo importante é o aço temperado da experiência descrita no item 1 desta seção.

No gráfico da **figura 25** mostramos a intensidade do vetor indução magnética resultante B de um solenoide com núcleo de substância ferromagnética, em função da intensidade B_0 no solenoide sem núcleo. Aumentando-se a partir de zero a intensidade de corrente elétrica no solenoide, tanto B_0 como B também aumentarão. Isso ocorre até ser atingido o ponto S (imantação de saturação), em que todos os elétrons estão orientados. Diminuindo-se a corrente elétrica, B_0 também diminui; porém, B se mantém com valores maiores do que aqueles que apresentava quando B_0 aumentou. Portanto, o processo de desimantação está atrasado em relação ao de imantação. Anulando-se a corrente elétrica, B_0 se anula, mas a substância permanece imantada com um valor B_R , que corresponde ao ponto R (imantação residual) do gráfico, pois muitos elétrons não voltaram a ter seu movimento desorientado. Para desimantar a substância, deve-se aplicar um campo magnético de sentido contrário. Isso significa inverter o sentido da corrente até atingirmos o ponto C , tal como foi feito com o aço temperado da experiência do item 1 desta seção.

Determinadas substâncias ferromagnéticas, como o aço temperado, o alnico (liga de alumínio, níquel, cobalto, cobre e ferro) e o permalloy (liga de ferro e níquel), caracterizam-se por manter um alto valor da imantação após a remoção do campo externo. Tal comportamento se deve ao fato de os domínios manterem sua orientação. Por isso essas substâncias se prestam à construção de ímãs permanentes. Por outro lado, há substâncias ferromagnéticas que praticamente não mantêm imantação alguma, como é o caso do ferro da experiência do item 1 desta seção.



◀ **Figura 25.**
Curva de imantação
de uma substância
ferromagnética.

* **WEISS**, Pierre (1865-1940), físico francês que se dedicou intensivamente ao estudo das propriedades magnéticas da matéria.

3 Eletroímã

Denominamos **eletroímã** um aparelho constituído de ferro doce (ferro que foi inicialmente aquecido e, em seguida, esfriado lentamente), ao redor do qual é enrolado um condutor ou bobinas (fig. 26). Quando há passagem de corrente elétrica, o ferro se imanta; quando cessa a corrente elétrica, este se desimanta; e, quando se inverte o sentido da corrente elétrica, o ferro também inverte sua polaridade. O material que é atraído pelo eletroímã denomina-se **armadura**.

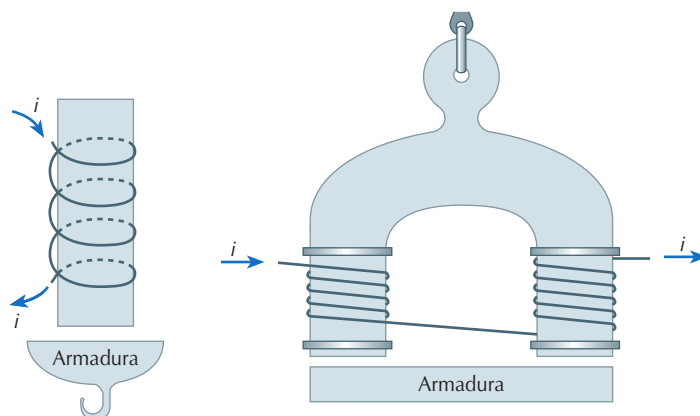


Figura 26. Esquemas de eletroímãs.

O eletroímã tem várias aplicações importantes: uma delas é o **guindaste eletromagnético**, utilizado para levantar peças pesadas de ferro, como lingotes ou sucatas; outra é a **campainha elétrica** (fig. 27), descrita a seguir.

A armadura A do eletroímã possui um martelo M e está presa a um eixo por meio de uma lâmina elástica L . Ao apertarmos o botão, fechamos o circuito: a armadura é atraída pelo eletroímã e o martelo bate no sino S . Mas essa atração desfaz o contato em C e o circuito se abre. A armadura não é mais atraída e a lâmina retorna elasticamente à posição inicial; então, fecha-se novamente o circuito e repete-se a sequência.



Guindaste eletromagnético sendo usado para levantar sucata metálica.

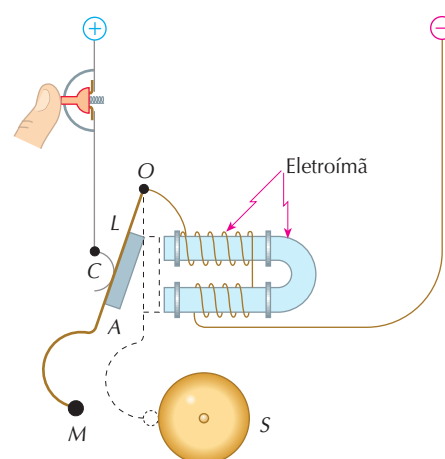


Figura 27. Esquema do funcionamento de uma campainha elétrica.



O fenômeno da supercondutividade é conhecido desde 1911, quando o físico holandês HEIKE KAMERLINGH-ONNES (prêmio Nobel de Física de 1913) observou que o mercúrio conduzia a corrente elétrica sem perda energética em temperaturas próximas do ponto de liquefação do hélio ($-269\text{ }^{\circ}\text{C}$), tornando-se um supercondutor. Embora o fenômeno tenha sido verificado para vários outros metais, a aplicação prática dos supercondutores era proibitiva, por ser extremamente dispendioso manter temperaturas tão baixas.

Em 1972, os físicos norte-americanos JOHN BARDEEN, LEON COOPER e ROBERT SCHRIEFFER conseguiram explicar teoricamente o fenômeno da supercondutividade, merecendo por isso o prêmio Nobel de Física desse ano. Eles mostraram que a supercondutividade não está necessariamente relacionada à diminuição da agitação dos átomos e moléculas com a temperatura, como se supunha. Então, compreendeu-se a possibilidade de haver supercondutores em temperaturas mais elevadas, mas todas as experiências feitas com condutores metálicos fracassaram. Em 1980, cientistas franceses obtiveram a supercondutividade com um composto orgânico a $-272\text{ }^{\circ}\text{C}$. Desde então, físicos de todo o mundo passaram a pesquisar o fenômeno em substâncias não metálicas.

Em setembro de 1986, aconteceu uma descoberta notável que, por suas aplicações tecnológicas, muitos compararam com a invenção do transistor em 1948. O suíço KARL ALEXANDER MÜLLER e o alemão JOHANNES GEORG BEDNORZ, físicos da IBM em Zurique, conseguiram a supercondutividade a 35 K ($-238\text{ }^{\circ}\text{C}$), com um material cerâmico composto de bário, lantânio, cobre e oxigênio. Por suas pesquisas e conclusões, esses físicos foram agraciados com o prêmio Nobel de Física de 1987, num rápido reconhecimento da comunidade científica internacional à importância da descoberta.

A partir da descoberta de Müller e Bednorz, progressos notáveis estão sendo obtidos em todo o mundo, inclusive no Brasil, no sentido de se obterem materiais supercondutores em temperaturas cada vez mais elevadas. Merecem destaque as pesquisas do físico PAUL CHING-WU CHU, da Universidade de Houston (EUA), que desenvolveu uma cerâmica supercondutora a 92 K ($-181\text{ }^{\circ}\text{C}$). Em 1993, esse mesmo cientista conseguiu supercondutividade a 160 K ($-113\text{ }^{\circ}\text{C}$). Substâncias como o diboreto de magnésio (MnB_2), cuja propriedade supercondutora foi descoberta em 2001 pelo cientista japonês JUN AKIMITSU, o monoboreto de lítio (LiB), cuja característica de supercondutor data de 2006, e outras têm dado resultados ainda melhores que as ligas cerâmicas, no sentido de apresentarem supercondutividade em temperaturas ainda maiores. E não existe impedimento teórico algum para que se consigam materiais supercondutores em temperaturas ambientes.

Aplicações da supercondutividade

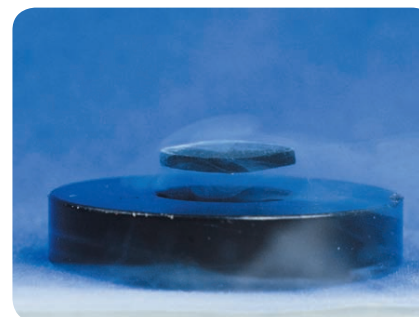
Não é só na economia energética, ao se conduzir a eletricidade, que está a importância da supercondutividade. Várias outras aplicações têm revolucionado o mundo. A seguir, citamos algumas:

- Nos computadores, com fios supercondutores, os *chips* poderão ser ainda menores, diminuindo o tempo processamento e permitindo maior velocidade de cálculo, além de tornarem mais compactos os aparelhos.
- Automóveis do futuro poderão ter motores elétricos leves e potentes, acionados por acumuladores em que a energia elétrica será armazenada em bobinas supercondutoras, substituindo as baterias de hoje e os tanques de combustível.
- A construção de magnetos supercondutores, que geram campos magnéticos extremamente fortes sem

grande gasto de energia, possibilitará extraordinário desenvolvimento das pesquisas com aceleradores de partículas, visando à obtenção da energia nuclear, num processo sem risco ou poluição, pela fusão de átomos leves.

- Todos os aparelhos que funcionam à base de eletricidade, como os eletrodomésticos, poderão sofrer uma radical mudança, com a redução drástica das dimensões dos motores elétricos e a eliminação da perda energética na condução da corrente.
- A propriedade de os supercondutores “flutuarem” sobre ímãs, quando percorridos por corrente elétrica, possibilitou a idealização e construção dos trens de levitação magnética (Maglev, do inglês *magnetic levitation*). Esses veículos podem desen-

volver velocidades superiores a 500 km/h , levando sobre trilhos magnetizados. Embora esse meio de transporte coletivo tenha muitas vantagens, a viabilidade comercial esbarra nos altos custos do empreendimento. Entretanto, muitos países, principalmente Japão, Alemanha e Estados Unidos, estão investindo nessa tecnologia, de modo que se pode prever que nas próximas décadas muitas linhas de trens Maglev possam estar em operação. Atualmente já existem algumas em funcionamento, como a que liga a cidade de Xangai ao Aeroporto Internacional de Pundung, na China: com a utilização de trens Transrapid de origem alemã, um percurso de pouco mais de 30 km é coberto em apenas 7 minutos.



Ímã levitando sobre um supercondutor.



Trem Maglev deixando uma estação de Xangai.

Entre na rede No endereço eletrônico <http://www.searadaciencia.ufc.br/especiais/fisica/supercondutividade/supercondutividade5.htm> (acesso em julho/2009), você pode obter outras informações sobre o fenômeno da supercondutividade.

4 Influência da temperatura sobre a imantação

Por meio de um ímã permanente, atraímos um prego de ferro que se imanta por influência. Aquecendo-se o prego, ele continuará atraído pelo ímã, enquanto sua temperatura não se elevar em demasia (fig. 28). Acima de certa temperatura (no caso do ferro, $770\text{ }^{\circ}\text{C}$), o prego deixa de ser atraído pelo ímã. Essa temperatura é denominada **ponto de Curie***, e pode ser definida como **a temperatura na qual o material perde todas as suas propriedades ferromagnéticas**.

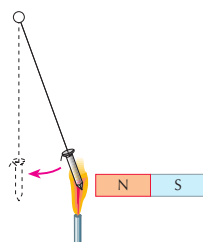
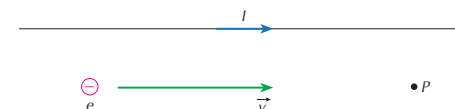


Figura 28. Aquecimento de um prego de ferro até atingir seu ponto de Curie.

* **CURIE**, Pierre (1859-1906), físico e químico francês, estudou as propriedades magnéticas dos corpos a diversas temperaturas. Em colaboração com sua esposa Marie Curie (1867-1934), também física e química de origem polonesa, realizou notáveis trabalhos sobre a radioatividade. O casal foi agraciado com o prêmio Nobel de 1903, junto do cientista francês Antonie Henri Becquerel. Em 1911, após a morte do marido, Marie Curie voltaria a receber um prêmio Nobel, dessa vez na área de Química.

EXERCÍCIOS PROPOSTOS DE RECAPITULAÇÃO

P. 350 (Fuvest-SP) Considere um fio muito longo, percorrido pela corrente contínua I , como indicado na figura. O elétron e , no instante t , tem velocidade $\vec{v}$ paralela ao fio.

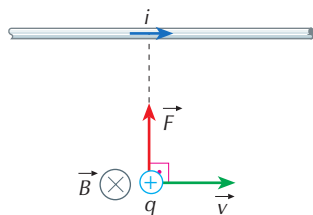


- Qual a direção e o sentido do campo magnético no ponto P?
- Faça um desenho indicando a direção e o sentido da força que atua sobre o elétron no instante t .

P. 351 (Vunesp) Uma pequena esfera metálica eletricamente carregada com carga $q = 6 \mu\text{C}$ desloca-se, com velocidade constante e igual a 10 m/s , paralelamente a um condutor retilíneo e longo, que é percorrido por uma corrente de intensidade $i = 20 \text{ A}$. Se a distância da esfera metálica ao condutor é 20 cm , calcule:

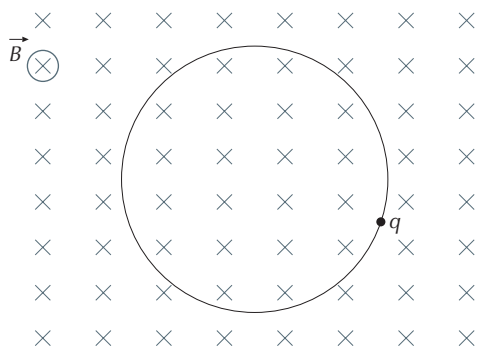
- a intensidade do campo de indução magnética $\vec{B}$ criado pela corrente i , no ponto indicado;
- a intensidade da força magnética exercida sobre a esfera metálica.

(Dado: $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$)



P. 352 (Covest-PE) Partículas de massa $m = 1,6 \cdot 10^{-26} \text{ kg}$ e carga $q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$, após serem aceleradas desde o repouso por uma diferença de potencial de 2.000 V , entram em um campo magnético de $0,5 \text{ T}$, perpendicular à direção de seus movimentos. Qual o raio de suas trajetórias em milímetros?

P. 353 (EEM-SP) Uma partícula de massa m e carregada com carga q penetra em uma região do espaço onde existe um campo magnético uniforme de indução $\vec{B}$, de módulo $5,0 \cdot 10^{-2} \text{ T}$.



Conforme a figura, o campo é perpendicular ao plano do papel. A partícula desloca-se em trajetória circular em um plano perpendicular a $\vec{B}$. A velocidade da partícula na região do campo magnético é $1,0 \cdot 10^6 \text{ m/s}$. A relação $\frac{|q|}{m}$ da partícula é

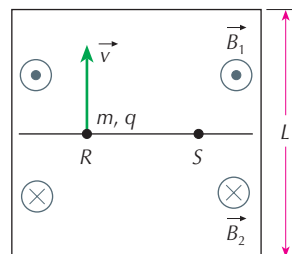
$1,0 \cdot 10^9 \text{ C/kg}$. Determine:

- o tempo necessário para a partícula completar uma volta;
- o sentido do movimento da partícula (horário ou anti-horário), se o sinal da carga for positivo.

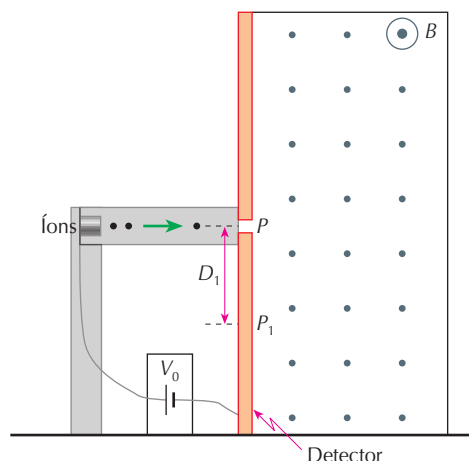
Adote $\pi = 3$.

P. 354 (ITA-SP) A figura mostra uma região de superfície quadrada de lado L na qual atuam campos magnéticos B_1 e B_2 orientados em sentidos opostos e de mesma magnitude B . Uma partícula de massa m e carga $q > 0$ é lançada do ponto R com velocidade perpendicular às linhas dos campos magnéticos.

Após um certo tempo de lançamento, a partícula atinge o ponto S e a ela é acrescentada outra partícula em repouso, de massa m e carga $-q$ (choque perfeitamente inelástico). Determine o tempo total em que a partícula de carga $q > 0$ abandona a superfície quadrada.



P. 355 (Fuvest-SP) Um espectrômetro de massa foi utilizado para separar os íons I_1 e I_2 , de mesma carga elétrica e massas diferentes, a partir do movimento desses íons em um campo magnético de intensidade B , constante e uniforme. Os íons partem de uma fonte, com velocidade inicial nula, são acelerados por uma diferença de potencial V_0 e penetram, pelo ponto P , em uma câmara, no vácuo, onde atua apenas o campo B (perpendicular ao plano do papel), como na figura.



Dentro da câmara, os íons I_1 são detectados no ponto P_1 , a uma distância $D_1 = 20 \text{ cm}$ do ponto P , como indicado na figura. Sendo a razão $\frac{m_2}{m_1}$ entre as massas dos íons I_2 e I_1 , igual a $1,44$, determine:

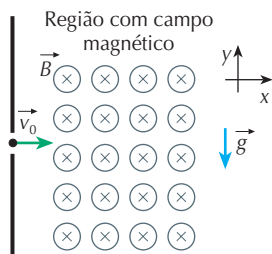
- a razão entre as velocidades $\frac{v_1}{v_2}$ com que os íons I_1 e I_2 penetram na câmara, no ponto P ;
- a distância D_2 , entre o ponto P e o ponto P_2 , onde os íons I_2 são detectados.

(Nas condições dadas, os efeitos gravitacionais podem ser desprezados).

Note e adote:

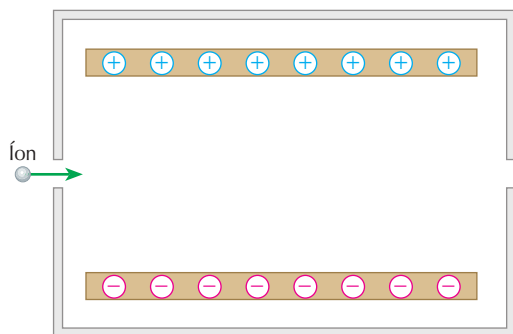
Uma partícula com carga Q , que se move em um campo B , com velocidade v , fica sujeita a uma força de intensidade $F = Qv_n B$, normal ao plano formado por B e v_n , sendo v_n a componente da velocidade v normal a B .

P. 356 (UFG-GO) Uma partícula de massa igual a 20 mg (miligramas) com carga de $100 \mu\text{C}$ ($1 \mu = 10^{-6}$), deslocando-se com velocidade de $1,0 \text{ cm/s}$ ao longo da direção x , entra em uma região com campo magnético uniforme, de intensidade igual a 10 T , apontando na direção perpendicular ao plano do papel e sentido indicado na figura.



- Qual seria a trajetória descrita pela partícula, se, na região de campo magnético, os efeitos da aceleração gravitacional fossem desprezados?
- Determine o módulo, a direção e o sentido da força magnética exercida sobre a partícula, no instante em que ela penetra na região de campo magnético.
- Considerando, agora, que a partícula esteja também sujeita a uma aceleração gravitacional de intensidade $g = 10 \text{ m/s}^2$, no sentido indicado na figura, calcule a aceleração resultante sobre a partícula, no exato instante em que ela penetra na região com campo magnético.

P. 357 (UFMG) Seletores de velocidade são utilizados em alguns aparelhos para permitir a passagem somente de íons que têm uma determinada velocidade. Nesses seletores, um campo elétrico e um campo magnético são aplicados de tal forma, que apenas íons com uma velocidade específica o atravessam sem serem desviados. O campo elétrico é produzido por duas placas metálicas paralelas, nas quais é aplicada uma diferença de potencial, como representado na figura abaixo.



O campo magnético, constante e uniforme, é produzido por um eletroímã, **não** mostrado nessa figura. Considere que o peso dos íons é desprezível.

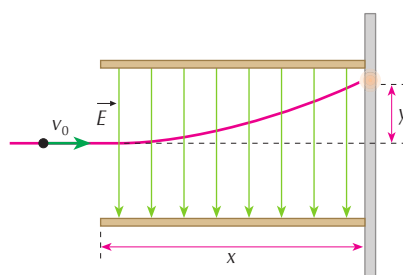
- Indique, na figura acima, as direções e os sentidos que os campos elétrico e magnético devem ter, na região entre as placas, a fim de que íons **positivos** atravessem o seletor de velocidades sem serem desviados. Justifique sua resposta.
- Considere que, no seletor representado, a distância entre as placas é de $5,0 \text{ mm}$ e a diferença de potencial aplicada é de $5,0 \text{ kV}$, e que se deseja que apenas íons com velocidade de $1,0 \times 10^6 \text{ m/s}$ sejam selecionados. Calcule o módulo do campo magnético que deve ser aplicado nessa situação.

P. 358 (UFJF-MG) J. J. Thomson, o descobridor do elétron, em 1897 realizou experimentos com um tubo de raios catódicos. Thomson notou que os raios catódicos podiam ser desviados por campos elétricos e magnéticos e, por isso, deveriam ser constituídos de partículas carregadas.

Com esse experimento, Thomson concluiu que todas as partículas que compõem os raios catódicos

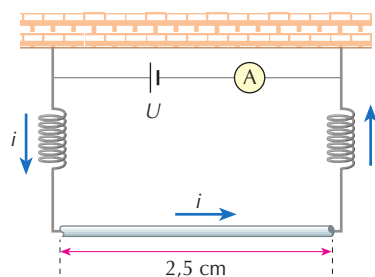
tinham a mesma razão $\frac{q}{m}$ entre a carga e a massa, e as denominou elétrons.

Considere o tubo de raios catódicos na figura, onde um campo elétrico uniforme de módulo $E = 1,0 \times 10^3 \text{ V/m}$ é gerado entre duas placas metálicas planas e paralelas de comprimento $x = 10 \text{ cm}$. Ao atravessar a região entre as placas, as partículas são defletidas, atingindo uma tela fosforescente a uma distância $y = 3,5 \text{ cm}$ da direção de incidência.



- Calcule a razão $\frac{q}{m}$ da partícula, em função da deflexão y , da velocidade inicial v_0 , da distância x e do módulo do campo elétrico E .
- Realizando a experiência, Thomson verificou que a introdução de um campo magnético uniforme de módulo $B = 2,0 \times 10^{-4} \text{ T}$ entre as placas, perpendicularmente ao campo elétrico, fazia a deflexão y tornar-se zero. Calcule a velocidade v_0 das partículas com essas informações.
- Usando os resultados dos itens anteriores, calcule o valor numérico da razão $\frac{q}{m}$ entre a carga q e a massa m da partícula.

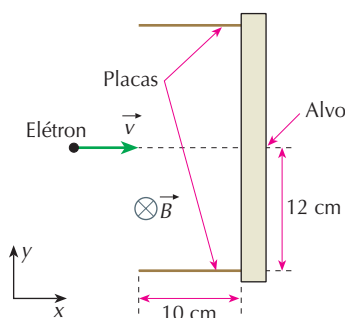
P. 359 (UFG-GO) Para medir a intensidade de um campo magnético uniforme, utiliza-se o aparato ilustrado na figura abaixo.



O fio condutor tem comprimento $2,5 \text{ cm}$ e massa $1,0 \text{ g}$; as molas, condutoras de eletricidade, têm constante elástica $5,0 \text{ N/m}$. Quando a tensão elétrica está desligada, as molas apresentam deformação de $2,0 \text{ mm}$. Com a tensão ajustada para produzir uma corrente de $1,0 \text{ A}$ as molas retornam ao estado natural. Dado que o campo magnético é perpendicular ao plano da figura, determine a sua magnitude e o seu sentido. Despreze os efeitos da corrente e do campo sobre as molas.

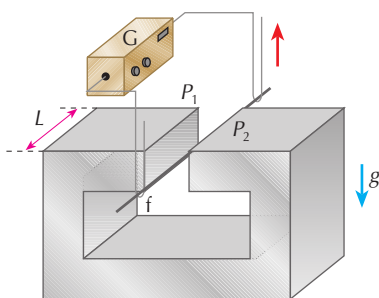


P. 360 (Unicamp-SP) A utilização de campos elétrico e magnético cruzados é importante para viabilizar o uso da técnica híbrida de tomografia de ressonância magnética e de raios X. A figura mostra parte de um tubo de raios X, onde um elétron, movendo-se com velocidade $v = 5,0 \cdot 10^5$ m/s ao longo da direção x , penetra na região entre as placas onde há um campo magnético uniforme $\vec{B}$, dirigido perpendicularmente para dentro do plano do papel. A massa do elétron é $m_e = 9 \cdot 10^{-31}$ kg e a sua carga elétrica é $q = -1,6 \cdot 10^{-19}$ C. O módulo da força magnética que age sobre o elétron é dado por $F = q \cdot v \cdot B \cdot \sin \theta$, onde θ é o ângulo entre a velocidade e o campo magnético.



- Se o módulo do campo magnético $B = 0,010$ T, qual é o módulo do campo elétrico que deve ser aplicado na região entre as placas para que o elétron se mantenha em movimento retilíneo uniforme?
- Numa outra situação, na ausência de campo elétrico, qual é o máximo valor de B para que o elétron ainda atinja o alvo? O comprimento das placas é de 10 cm.

P. 361 (Fuvest-SP) O ímã representado na figura, com largura $L = 0,20$ m, cria, entre seus polos, P_1 e P_2 , um campo de indução magnética B , horizontal, de intensidade constante e igual a 1,5 T. Entre os polos do ímã, há um fio condutor f , com massa $m = 6,0 \cdot 10^{-3}$ kg, retilíneo e horizontal, em uma direção perpendicular à do campo B . As extremidades do fio, fora da região do ímã, estão apoiadas e podem se mover ao longo de guias condutores, verticais, ligados a um gerador de corrente G . A partir de um certo instante, o fio f passa a ser percorrido por uma corrente elétrica constante $I = 50$ A. Nessas condições, o fio sofre a ação de uma força F_0 , na direção vertical que o acelera para cima. O fio percorre uma distância vertical, $d = 0,12$ m, entre os polos do ímã e, em seguida, se desconecta dos guias, prosseguindo em movimento livre para cima, até atingir uma altura máxima H .



Determine:

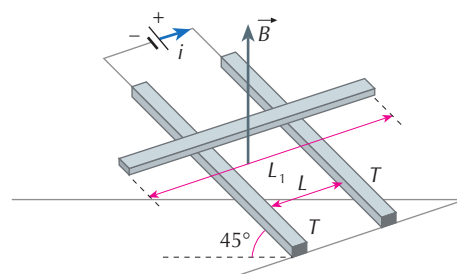
- o valor da força eletromagnética F_0 , em newtons, que age sobre o fio.

- o trabalho total Z , em joules, realizado pela força F_0 .
- a máxima altura H , em metros, que o fio alcança, medida a partir de sua posição inicial.

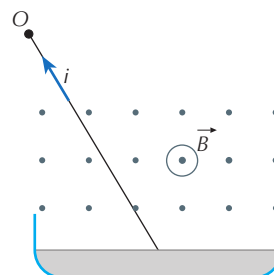
Note e adote:

- Um fio condutor retilíneo, de comprimento C , percorrido por uma corrente elétrica I , totalmente inserido em um campo de indução magnética de módulo B , perpendicular à direção do fio, fica sujeito a uma força F , de módulo igual a $B \cdot I \cdot C$, perpendicular à direção de B e à direção do fio.
- Aceleração da gravidade $g = 10$ m $\cdot$ s $^{-2}$.
- Podem ser desprezados os efeitos de borda do campo B , o atrito entre o fio e os guias e a resistência do ar.

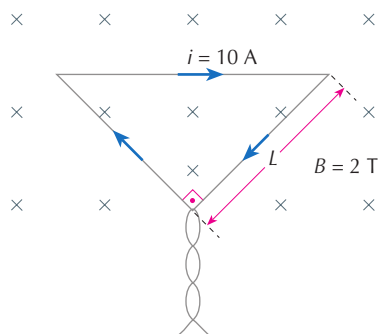
P. 362 Uma barra condutora metálica, de comprimento $L_1 = 2$ m e peso $P = 2$ N, apoia-se sobre dois trilhos T , também condutores, que formam com a horizontal o ângulo de 45° . A distância L entre os trilhos vale 1 m. As extremidades superiores dos trilhos estão ligadas a uma bateria e, nessa região do espaço, existe um campo magnético uniforme e vertical, orientado de baixo para cima, definido em cada ponto pelo vetor $\vec{B}$, de intensidade igual a 0,5 tesla, conforme indica a figura. O atrito é nulo. Calcule o valor da corrente i para que a barra permaneça em equilíbrio.



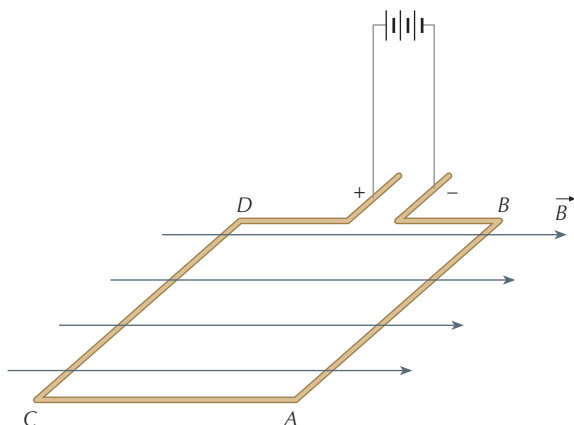
P. 363 Um fio reto, homogêneo, de massa 8 g e comprimento 25 cm, está suspenso por sua extremidade superior a um ponto O em torno do qual pode girar livremente; sua extremidade inferior está em contato com mercúrio contido em uma pequena cuba. O fio é percorrido por uma corrente de 5 A, no sentido mostrado na figura. Na região compreendida entre 19 cm e 21 cm, medidos a partir de O , estabelece-se um campo magnético uniforme, perpendicular ao plano da figura, dirigido para fora, e de intensidade 0,05 T. Adotando-se $g = 10$ m/s 2 , determine o ângulo que o fio forma com a vertical.



P. 364 (UFBA) Uma espira, em forma de um triângulo retângulo isósceles, encontra-se imersa em um campo magnético uniforme, $|\vec{B}| = 2 \text{ T}$, que é perpendicular ao seu plano, conforme a figura. Sabendo-se que o lado menor do triângulo tem comprimento $L = 1 \text{ m}$ e que pela espira passa uma corrente $i = 10 \text{ A}$, determine o módulo da força magnética resultante que age sobre a espira.



P. 365 (Unifesp) A figura mostra uma espira retangular imersa em um campo magnético uniforme, elemento básico de um motor elétrico de corrente contínua.



O plano da espira é paralelo ao vetor indução magnética $\vec{B}$. A extremidade da espira junto ao ponto D está ligada ao polo positivo da bateria e a extremidade B, ao polo negativo; a corrente percorre o circuito no sentido de D para B.

São dados:

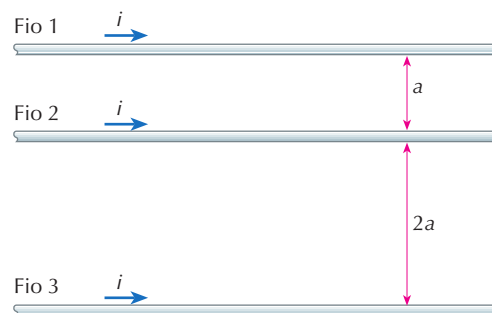
- intensidade da corrente que percorre a espira:
 $i = 0,80 \text{ A}$
- resistência do fio no trecho DCAB:
 $R = 2,5 \Omega$
- módulo do vetor campo magnético:
 $B = 0,50 \text{ T}$
- comprimento dos lados da espira:
 $AB = CD = 0,050 \text{ m}$

Determine:

- a diferença de potencial entre os pontos D e B;
- o módulo da força magnética que atua em um dos lados, $\overline{AB}$ ou $\overline{CD}$.

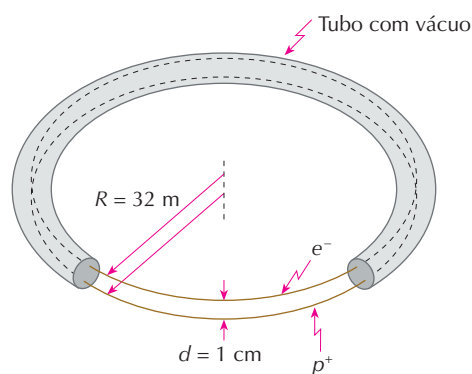
P. 366 (UFPE) Três longos fios paralelos, de tamanhos iguais e espessuras desprezíveis, estão dispostos como mostra a figura e transportam correntes iguais e de mesmo sentido. Se as forças exercidas pelo fio 1

sobre o fio 2 e o fio 3 forem representadas por F_{12} e F_{13} , respectivamente, qual o valor da razão $\frac{F_{12}}{F_{13}}$?



P. 367 (Fuvest-SP) No anel do Lab. Nac. de Luz Síncrotron em Campinas, SP, representado simplificada-mente na figura, elétrons (e^-) se movem com velocidade $v \approx c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$, formando um feixe de pequeno diâmetro, numa órbita circular de raio $R = 32 \text{ m}$. O valor da corrente elétrica, devido ao fluxo de elétrons através de uma seção transversal qualquer do feixe, vale $0,12 \text{ A}$.

- Calcule o número total n de elétrons contidos na órbita.
- Considere um feixe de pósitrons (p^+), movendo-se em sentido oposto no mesmo tubo, em órbita a 1 cm da dos elétrons, tendo velocidade, raio e corrente iguais aos dos elétrons. Determine o valor aproximado da força de atração $\vec{F}$, de origem magnética, entre os dois feixes, em N.



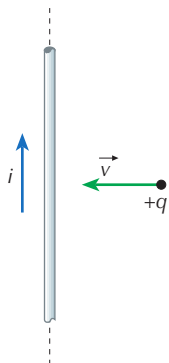
Note e adote:

- Pósitrons são partículas de massa igual à dos elétrons com carga positiva igual em módulo à dos elétrons.
- Como R é muitas vezes maior que d , no cálculo de $\vec{F}$ considere que o campo produzido por um feixe pode ser calculado como o de um fio retilíneo.
- Carga de 1 elétron:
 $q = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ coulomb}$
- Módulo do vetor indução magnética B , criado a uma distância r de um fio retilíneo percorrido por uma corrente i , é:

$$B = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{i}{r}, \text{ sendo } B \text{ em tesla (T), } i \text{ em ampère (A) e } r \text{ em metro (m).}$$

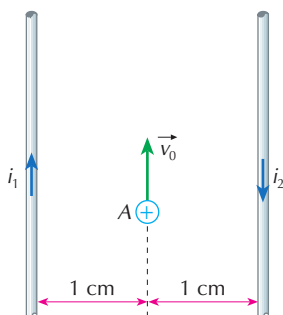
TESTES PROPOSTOS

- T. 329** (UFPI) Na figura abaixo, o fio retilíneo longo transporta uma corrente elétrica de intensidade i . Uma partícula carregada com carga $+q$ se move com velocidade v perpendicular ao fio.



Sobre essa situação, é correto afirmar que, na posição da partícula indicada na figura:

- a força magnética atuante sobre a partícula e o campo magnético produzido pela corrente têm direções paralelas.
 - a corrente e o campo magnético por ela produzido têm direções paralelas e o mesmo sentido.
 - a corrente e a força magnética sobre a partícula têm direções paralelas e sentidos contrários.
 - a aceleração da partícula, causada pela força magnética, é paralela ao vetor $\vec{v}$.
 - o movimento da partícula não é afetado pela presença da corrente.
- T. 330** (Mackenzie-SP) Dispõe-se de dois condutores infinitos, retilíneos e paralelos, percorridos pelas correntes i_1 e i_2 de intensidades iguais a 10 A e de sentidos contrários. Um próton ($q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C) é “disparado” do ponto A com uma velocidade $v_0 = 1,0 \cdot 10^6$ m/s, segundo uma direção paralela aos condutores e sobre o plano que os contém.

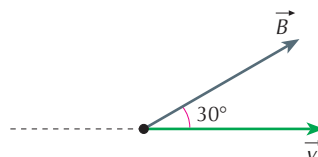


A intensidade da força a que esse próton fica sujeito no instante do disparo é:

- zero
 - $3,2 \cdot 10^{-17}$ N
 - $6,4 \cdot 10^{-17}$ N
 - $1,6 \cdot 10^{-17}$ N
 - $4,8 \cdot 10^{-17}$ N
- (Dado: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ T · m/A)

O enunciado a seguir refere-se aos testes T.331, T.332 e T.333.

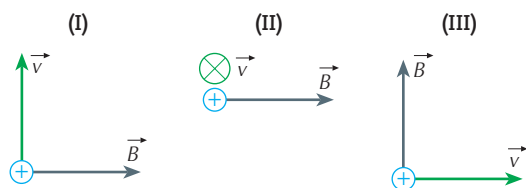
(UFBA) Em um campo magnético de intensidade 10^2 T, uma partícula com carga $2,0 \cdot 10^{-14}$ C é lançada com velocidade $2,0 \cdot 10^5$ m/s, em uma direção que forma um ângulo de 30° com a direção do campo magnético, conforme a figura.



- T. 331** Sobre a partícula lançada atua uma força que tem:
- a mesma direção e o mesmo sentido de $\vec{B}$.
 - a mesma direção e o mesmo sentido de $\vec{v}$.
 - a mesma direção, mas sentido contrário ao de $\vec{v}$.
 - direção perpendicular ao plano de $\vec{B}$ e $\vec{v}$, e sentido para cima.
 - direção perpendicular ao plano de $\vec{B}$ e $\vec{v}$, e sentido para baixo.
- T. 332** A intensidade da força que atua sobre a partícula é:
- $4,0 \cdot 10^{-11}$ N
 - $5,0 \cdot 10^{-8}$ N
 - $2,0 \cdot 10^{-7}$ N
 - $1,4 \cdot 10^{-7}$ N
 - $6,0 \cdot 10^{-6}$ N
- T. 333** A força magnética terá máxima intensidade se o ângulo formado entre $\vec{v}$ e $\vec{B}$ for igual a:
- zero
 - 30°
 - 60°
 - 90°
 - 180°

- T. 334** (UFMA) Uma abelhinha trabalhava transportando elétrons em malotes sob as asas. Muito distraída, voou através de um campo magnético que protegia uma colmeia inimiga.
- A abelhinha não sentiu influência do campo magnético, pois voava formando um ângulo de 90° com as linhas do campo.
 - A abelhinha não sentiu influência do campo magnético, pois voava formando um ângulo de 0° com as linhas do campo.
 - A abelhinha, quando parou seu voo momentaneamente, sentiu uma forte repulsão no campo magnético.
 - A abelhinha, quando parou seu voo momentaneamente, sentiu uma forte atração no campo magnético.
 - A abelhinha sofre uma força no campo magnético independentemente do ângulo que sua velocidade forma com as linhas do campo.

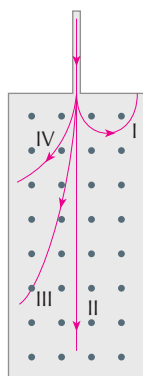
T. 335 (UFU-MG) Um próton é lançado com velocidade $\vec{v}$ num campo magnético $\vec{B}$, nos casos:



A força magnética $\vec{F}_m$ é, respectivamente, mais bem representada por:

- | | (I) | (II) | (III) |
|----|-----|------|-------|
| a) | | | |
| b) | | | |
| c) | | | |
| d) | | | |
| e) | | | |

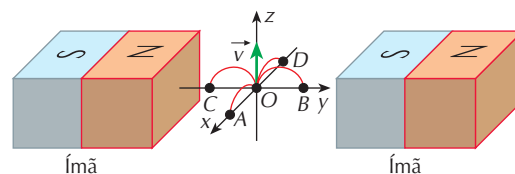
T. 336 (UEL-PR) Na figura abaixo estão representadas as trajetórias de quatro partículas que foram lançadas em uma região onde atua um campo magnético perpendicular ao plano da figura e com sentido saindo da página. Em função da análise dessas trajetórias, pode-se identificar cada uma das partículas. Escolha a alternativa que identifica as partículas.



- I. elétron; II. próton; III. partícula neutra; IV. partícula α
- I. partícula α ; II. elétron; III. partícula neutra; IV. próton
- I. próton; II. partícula neutra; III. elétron; IV. partícula α
- I. partícula neutra; II. próton; III. elétron; IV. partícula α
- I. elétron; II. partícula neutra; III. partícula α ; IV. próton

T. 337 (Mackenzie-SP) Os radioisótopos são hoje largamente utilizados em diversas pesquisas científicas e aplicados inclusive em medicina terapêutica. Seu decaimento radioativo pode se dar por emissão de partículas, como a alfa (α) e a beta (β), ou então

por emissão de ondas eletromagnéticas, como os raios gama (γ). Uma pequena amostra radioativa foi colocada sobre uma superfície plana, numa região onde existe um campo de indução magnética uniforme, conforme ilustra a figura, e dela são emitidas partículas alfa, partículas beta e raios gama.



Radiação	Massa de repouso	Carga elétrica
alfa (α)	$6,7 \cdot 10^{-27}$ kg	$+3,2 \cdot 10^{-19}$ C
beta (β)	$9,1 \cdot 10^{-31}$ Kg	$-1,6 \cdot 10^{-19}$ C
gama (γ)	não possui	não possui

O referencial cartesiano adotado possui sua origem supostamente na amostra do material. Considerando apenas o tipo de trajetória e a direção orientada de $\vec{v}$ como sendo a da emissão, podemos dizer que a partícula alfa deve atingir o ponto _____, a partícula beta deve atingir o ponto _____ e o raio gama, _____.

Assinale a alternativa em que constam as afirmações que preenchem corretamente as lacunas do texto, na ordem de leitura.

- A e B devem seguir a direção orientada de $\vec{v}$.
- A e C devem seguir a direção orientada de $\vec{v}$.
- D e A devem seguir a direção do eixo z, mas com sentido contrário ao de $\vec{v}$.
- D e A devem seguir a direção orientada de $\vec{v}$.
- A e C devem seguir a direção do eixo z, mas com sentido contrário ao de $\vec{v}$.

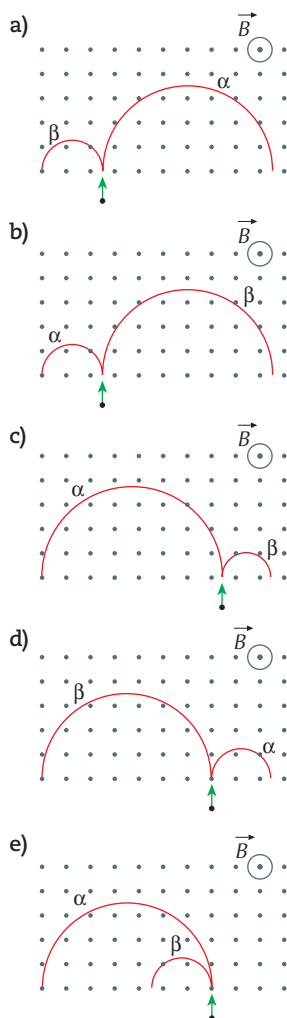
T. 338 (UEL-PR) O Sol emite, continuamente, um conjunto de partículas que se propagam no espaço e formam o vento solar. Essas partículas são emitidas em grandes velocidades e são, em sua maioria, elétrons e prótons. O movimento de partículas carregadas no espaço próximo do Sol é dominado pelo campo magnético solar. Considere que na região próxima ao Sol o campo magnético seja constante, o campo elétrico inexistente, e que só prótons e elétrons sejam emitidos. Nessas condições, e desprezando a força gravitacional, é correto afirmar a respeito do movimento de um próton nesse campo magnético:

- Se a velocidade do próton for perpendicular ao campo magnético, o seu movimento será retilíneo uniforme.
- Se a velocidade do próton for paralela ao campo magnético, ele estará sujeito a uma aceleração.
- Um próton em movimento jamais poderá sofrer influência ao entrar numa região onde há um campo magnético.
- Dependendo da direção do movimento do próton em relação ao campo magnético, o movimento poderá ser circular uniforme e seu raio será inversamente proporcional à sua carga.
- Dependendo da direção do movimento do próton em relação ao campo magnético, o movimento poderá ser circular uniforme e seu raio será inversamente proporcional à sua velocidade.

T. 339 (Mackenzie-SP) Em trabalhos de Física Nuclear, são utilizadas diversas partículas elementares com inúmeras finalidades. Duas dessas partículas são:

- partícula alfa
 $q = +3,2 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ e $m = 6,7 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
- partícula beta
 $q = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ e $m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$

Quando uma partícula alfa e uma partícula beta são disparadas separadamente com a mesma velocidade, perpendicularmente às linhas de indução de um mesmo campo magnético uniforme, a figura que melhor representa as trajetórias distintas dessas partículas é:



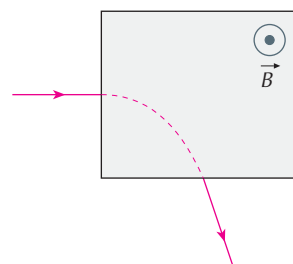
T. 340 (FMTM-MG) Duas partículas de massas m_1 e $m_2 = 2m_1$, e cargas q_1 e $q_2 = 2q_1$ são lançadas, com a mesma velocidade, perpendicularmente à direção das linhas de indução de um campo magnético uniforme. Desprezando-se atritos e ações gravitacionais, essas partículas passam a descrever trajetórias circulares de raios r_1 e r_2 e períodos T_1 e T_2 , que estão assim relacionados:

- $r_1 = r_2$ e $T_1 \neq T_2$
- $r_1 = r_2$ e $T_1 = T_2$
- $r_2 = 2r_1$ e $T_1 = 2T_2$
- $r_1 = 2r_2$ e $T_1 = \frac{T_2}{2}$
- $r_1 = \frac{r_2}{2}$ e $T_1 = \frac{T_2}{2}$

T. 341 (ITA-SP) Numa experiência inédita, um pesquisador dirigiu um feixe de partículas desconhecidas para dentro de uma região em que existe um campo magnético uniforme $\vec{B}$. Ele observou que todas as partículas descreveram trajetórias circulares de diferentes raios (R), mas todas com mesmo período. Poderá ele afirmar **com certeza** que o feixe é constituído:

- de partículas iguais e com mesma velocidade inicial, pois todas as partículas descrevem órbitas circulares de mesmo período.
- de partículas diferentes, mas todas com mesma velocidade inicial, pois todas as partículas descrevem órbitas circulares de mesmo período.
- de partículas que apresentam o mesmo quociente entre o módulo da carga elétrica (q) e massa (m), independentemente de sua velocidade inicial.
- de partículas que apresentam o mesmo quociente entre carga elétrica (q) e massa (m) e mesma velocidade inicial, pois todas as partículas descrevem órbitas circulares de mesmo período.
- nenhuma das afirmações acima está correta.

T. 342 (Unifesp) Uma partícula eletricamente carregada, inicialmente em movimento retilíneo uniforme, adentra uma região de campo magnético uniforme $\vec{B}$, perpendicular à trajetória da partícula. O plano da figura ilustra a trajetória da partícula, assim como a região de campo magnético uniforme, delimitada pela área sombreada.



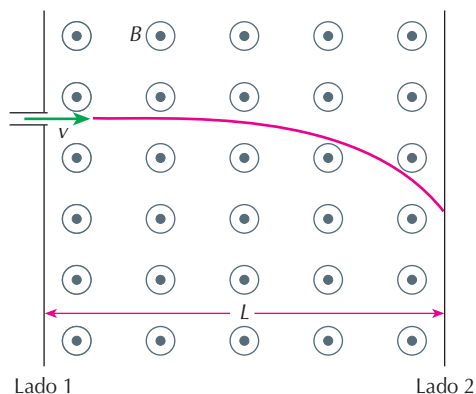
Se nenhum outro campo estiver presente, pode-se afirmar corretamente que, durante a passagem da partícula pela região de campo uniforme, sua aceleração é:

- tangente à trajetória, há realização de trabalho e a sua energia cinética aumenta.
- tangente à trajetória, há realização de trabalho e a sua energia cinética diminui.
- normal à trajetória, não há realização de trabalho e a sua energia cinética permanece constante.
- normal à trajetória, há realização de trabalho e a sua energia cinética aumenta.
- normal à trajetória, não há realização de trabalho e a sua energia cinética diminui.

T. 343 (UFMA) Uma partícula de carga elétrica $q = 4 \cdot 10^{-18} \text{ C}$ e massa $m = 2 \cdot 10^{-26} \text{ kg}$ penetra perpendicularmente em uma região de campo magnético uniforme de indução $B = 1 \cdot 10^{-3} \text{ T}$, com velocidade $v = 1 \cdot 10^5 \text{ m/s}$. O valor do raio da órbita descrita pela partícula, em metros, é:

- $5 \cdot 10^{-1}$
- $5 \cdot 10^{-2}$
- $5 \cdot 10^{-3}$
- $5 \cdot 10^0$
- $5 \cdot 10^1$

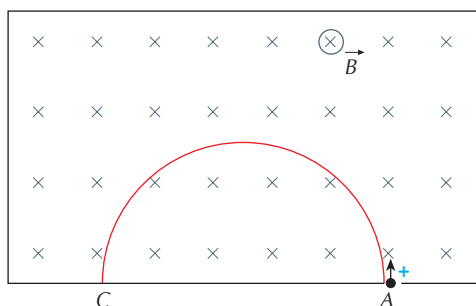
T. 344 (UFC-CE) Duas partículas, P_1 e P_2 , com massas m_1 e m_2 , possuem cargas elétricas q_1 e q_2 , respectivamente. Ambas as partículas são lançadas, simultaneamente, com a mesma velocidade inicial, de módulo v , em uma região na qual existe um campo magnético $\vec{B}$, perpendicular ao plano da página e apontando para fora dela, de acordo com a figura abaixo. Uma possível trajetória das partículas é mostrada na figura. Considere que os raios das trajetórias de ambas as partículas são maiores que a distância L que separa o lado 1 do lado 2, conforme a figura.



Sendo $m_1 = 2m$, $m_2 = m$, $q_1 = \frac{q}{4}$ e $q_2 = q$, determine a partícula que atinge primeiro o lado 2 e o raio R da trajetória descrita por essa partícula. (Desconsidere qualquer efeito da gravidade.)

- partícula P_1 ; $R = \frac{8mv}{qB}$
- partícula P_2 ; $R = \frac{mv}{qB}$
- partícula P_1 ; $R = \frac{mv}{qB}$
- partícula P_2 ; $R = \frac{8mv}{qB}$
- P_1 e P_2 chegam juntas; $R = \frac{mv}{qB}$

T. 345 (Mackenzie-SP) Um íon de massa $8,0 \cdot 10^{-27}$ kg e carga $1,6 \cdot 10^{-19}$ C “entra” na câmara de um espectrômetro de massa com uma energia cinética de $1,6 \cdot 10^{-16}$ J, após ter sido acelerado por uma ddp.



Após descrever a trajetória ilustrada na figura, o íon atinge o ponto C de uma chapa fotográfica, distante de A:

- 0,10 cm
 - 1,0 cm
 - 2,0 cm
 - 10 cm
 - 20 cm
- (Dado: $B = 1,0 \cdot 10^{-1}$ T)

T. 346 (Uece) Campos magnéticos são frequentemente usados para curvar um feixe de elétrons em televisor. O campo magnético, uniforme, aplicado perpendicularmente a um feixe de n elétrons, que se movem a $1,3 \cdot 10^6$ m/s, para fazer com que os elétrons percorram uma trajetória circular de raio igual a 0,35 m é, aproximadamente:

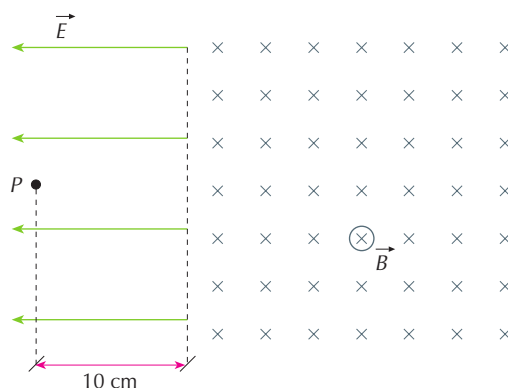
- $22n \mu\text{T}$
- 22 T
- $22 \mu\text{T}$
- $22n^2 \mu\text{T}$

(Dados do elétron: módulo da carga $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C e massa $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg)

T. 347 (UEL-PR) Segundo as leis da Mecânica Clássica, a observação de mudança no estado de movimento de um corpo implica, necessariamente, a existência de interações desse corpo com seu ambiente. Diz-se, genericamente, que tais interações definem campos de forças cuja natureza é determinada pelas características do ambiente onde o corpo está. Por exemplo, um campo gravitacional produz a aceleração da gravidade. No entanto, a existência de campos de força na região onde se encontra uma partícula não implica, necessariamente, a observação de acelerações. Com base nessas afirmações e nos conhecimentos sobre campos elétricos e magnéticos, analise a situação em que uma carga elétrica atravessa uma certa região do espaço com uma velocidade constante v sem sofrer deflexão. Sobre esse fenômeno é correto afirmar:

- A carga elétrica se movimenta numa direção perpendicular aos campos magnético e elétrico.
- Nessa região o campo elétrico tem sentido contrário ao do campo magnético.
- Nessa região o campo magnético é perpendicular à velocidade da partícula e paralelo ao campo elétrico.
- Nessa região, se houver apenas campo elétrico, este tem direção perpendicular à velocidade da partícula.
- Nessa região, se houver apenas campo magnético, este tem a mesma direção e o mesmo sentido da velocidade da partícula.

T. 348 (E. Naval-RJ) O esquema representa uma região onde existem dois campos uniformes, um elétrico $\vec{E}$, de intensidade 10^2 N/C, e um magnético de indução $\vec{B}$, de intensidade 10^{-4} T. Um elétron é abandonado em repouso no ponto P.

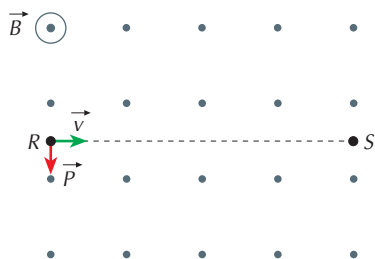


Calcule o raio da trajetória circular que descreverá o elétron na região de campo magnético. Considere (para o elétron) o quociente entre o módulo de sua

carga e de sua massa $\frac{q}{m} = 2 \cdot 10^{11}$ C/kg.

- 50 cm
- 40 cm
- 20 cm
- 10 cm
- 1,0 cm

- T. 349** (UFBA) Uma partícula de peso $\vec{P}$ e carga elétrica negativa q é lançada, no vácuo, com velocidade $\vec{v}$, perpendicularmente ao campo magnético $\vec{B}$, conforme indica a figura.



A partícula descreve movimento retilíneo uniforme entre os pontos R e S; após o ponto S, fica sujeita apenas à ação do campo gravitacional.

Os vetores $\vec{P}$, $\vec{v}$ e $\vec{B}$ têm intensidades iguais a P, v e B, respectivamente.

Nessas condições, pode-se afirmar:

- (01) O módulo da velocidade da partícula, entre R e S, é $v = \frac{P}{|q| \cdot B}$.
- (02) A força magnética realiza trabalho sobre a partícula, igual a $qvBd$, sendo d a distância entre R e S.
- (04) Após o ponto S, a partícula descreve uma trajetória parabólica.
- (08) A energia mecânica da partícula se conserva durante todo o seu movimento.
- (16) Se o campo magnético fosse tão intenso, a ponto de considerar-se o peso da partícula desprezível, ela descreveria uma trajetória circular na região do campo magnético.
- (32) Se a carga q fosse positiva, ainda assim a partícula atingiria o ponto S.

Dê como resposta a soma dos números que precedem as afirmativas corretas.

- T. 350** (PUC-MG) Um guerreiro do futuro dispara, horizontalmente, seu canhão de prótons em direção a uma fortificação inimiga, mas um sistema de defesa faz acionar a criação de um campo uniforme de direção e módulo constantes, de tal forma que o feixe se desvia para a direita em relação ao guerreiro e não atinge a fortificação. Escolha, entre as opções abaixo, a que corresponda àquele campo capaz de produzir o efeito mencionado:

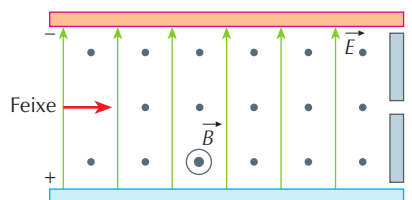
- a) Um campo magnético vertical para cima, se a trajetória após a aplicação do campo for um arco de parábola.
- b) Um campo elétrico horizontal para a esquerda em relação ao guerreiro, se a trajetória após a aplicação do campo for um arco de circunferência.
- c) Qualquer campo elétrico que seja perpendicular a um campo magnético.
- d) Um campo elétrico horizontal para a direita em relação ao guerreiro, se a trajetória após a aplicação do campo for um arco de circunferência.
- e) Um campo magnético vertical para cima, se a trajetória após a aplicação do campo for um arco de circunferência.

- T. 351** (Fuvest-SP) Um feixe de elétrons, todos com mesma velocidade, penetra em uma região do espaço onde há um campo elétrico uniforme entre duas placas condutoras, planas e paralelas, uma delas carregada positivamente e a outra, negativamente.

Durante todo o percurso, na região entre as placas, os elétrons têm trajetória retilínea, perpendicular ao campo elétrico. Ignorando efeitos gravitacionais, esse movimento é possível se entre as placas houver, além do campo elétrico, também um campo magnético, com intensidade adequada e:

- a) perpendicular ao campo elétrico e à trajetória dos elétrons.
- b) paralelo e de sentido oposto ao do campo elétrico.
- c) paralelo e de mesmo sentido que o do campo elétrico.
- d) paralelo e de sentido oposto ao da velocidade dos elétrons.
- e) paralelo e de mesmo sentido que o da velocidade dos elétrons.

- T. 352** (UFBA) Um feixe de partículas eletricamente carregadas é lançado horizontalmente numa região, entre duas placas planas e paralelas, que contém campo elétrico e campo magnético uniformes, dispostos conforme a figura.

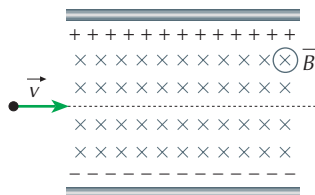


Desprezando-se a ação do campo gravitacional sobre o feixe de partículas, é correto afirmar:

- (01) A força elétrica que atua nas partículas de carga negativa é perpendicular ao campo magnético.
- (02) As partículas de carga negativa não sofrem a ação da força magnética.
- (04) Quando as partículas de carga positiva entram na região, a força magnética que atua sobre elas aponta no sentido contrário ao do campo elétrico.
- (08) A força elétrica atuante em cada partícula se mantém constante.
- (16) As partículas de carga positiva passarão pela fenda f, qualquer que seja a velocidade do lançamento.
- (32) As partículas de carga negativa serão aceleradas, ao atravessarem a região entre as placas, qualquer que seja a velocidade do lançamento.

Dê como resposta a soma dos números que precedem as afirmativas corretas.

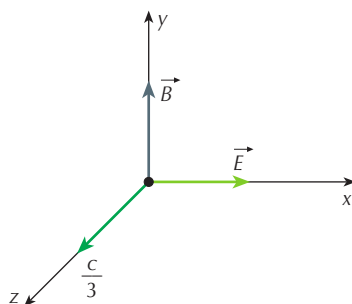
- T. 353** (Mackenzie-SP) No estudo da Física de altas energias, duas partículas são bem conhecidas: a partícula alfa (α), de carga elétrica $+2e$ e massa 4 unidades de massa atômica, e o elétron ($-e$), de carga elétrica $-e$ e massa $5 \cdot 10^{-4}$ unidades de massa atômica. Num equipamento de laboratório, temos entre as placas de um condensador plano a existência simultânea de um campo elétrico e de um campo de indução magnética, ambos uniformes e perpendiculares entre si, conforme mostra a figura ao lado.



Sabe-se que uma partícula alfa descreve a trajetória tracejada, com velocidade $\vec{v}$, quando a intensidade do campo elétrico é E e a do campo de indução magnética é B . As ações gravitacionais são desprezadas. Para que um elétron descreva a mesma trajetória, separadamente da partícula alfa, com a mesma velocidade $\vec{v}$, deveremos:

- inverter o sentido do campo elétrico e conservar as intensidades E e B .
- inverter o sentido do campo magnético e conservar as intensidades E e B .
- conservar os sentidos dos campos e mudar suas intensidades para $2E$ e $4B$.
- conservar os sentidos dos campos e mudar suas intensidades para $4E$ e $2B$.
- conservar os sentidos dos campos, bem como suas respectivas intensidades.

T. 354 (UFU-MG) Conforme representado na figura abaixo, em uma região do espaço há um campo elétrico uniforme, $\vec{E}$, de $1,0 \cdot 10^6$ V/m na direção x ; nessa região também há um campo magnético uniforme, $\vec{B}$, na direção y . Um feixe de partículas eletricamente carregadas, conhecidas como mésons, desloca-se com velocidade $\frac{c}{3}$ (c é a velocidade da luz no vácuo, cujo valor é $3,0 \cdot 10^8$ m/s), e passa nessa região em linha reta na direção z .



Considerando as informações acima, analise as seguintes afirmativas e responda de acordo com o código:

- O campo magnético tem módulo $1,0 \cdot 10^{-2}$ T.
 - Com esse experimento pode-se dizer que a carga do méson é positiva.
 - Se desligarmos o campo elétrico ($E = 0$), o feixe descreverá uma trajetória circular contida no plano xz .
- Apenas I é correta.
 - I e III são corretas.
 - I e II são corretas.
 - Apenas II é correta.

T. 355 (UFPI) Um tipo de seletor de velocidades para partículas carregadas pode ser simplesmente uma região do espaço onde estejam presentes, simultaneamente, um campo elétrico e um campo magnético adequadamente ajustados, de modo que uma partícula, com a velocidade desejada, atravesse a região com aceleração nula. Considere um tal seletor constituído de duas placas metálicas paralelas separadas por uma distância $d = 2,0 \cdot 10^{-3}$ m, tendo entre elas um campo magnético uniforme de intensidade $B = 1,2$ T. Nosso objetivo é selecionar íons cuja

velocidade é $v = 3,5 \cdot 10^6$ m/s. Para produzir o campo elétrico correto, temos de aplicar entre as placas uma diferença de potencial ΔV igual a:

- $2,4 \cdot 10^3$ volts
- $4,2 \cdot 10^3$ volts
- $7,0 \cdot 10^3$ volts
- $8,4 \cdot 10^3$ volts
- $9,2 \cdot 10^3$ volts

T. 356 (UFRN) O trilho eletromagnético é um dispositivo em que a força magnética acelera intensamente um projétil, fazendo-o atingir uma grande velocidade num pequeno intervalo de tempo. A base de funcionamento desse trilho é mostrada nas figuras abaixo. Na figura I, um projétil está bem encaixado entre os trilhos quando uma corrente elétrica muito intensa circula por eles, passando por um fusível, conforme a ilustração. Essa corrente, quase que instantaneamente, derrete e vaporiza o fusível, transformando-o num gás condutor. A circulação de corrente, nesse sistema, produz um campo magnético $\vec{B}$ capaz de originar uma força magnética $\vec{F}$ no gás, fazendo com que este impulsione o projétil (figura II).

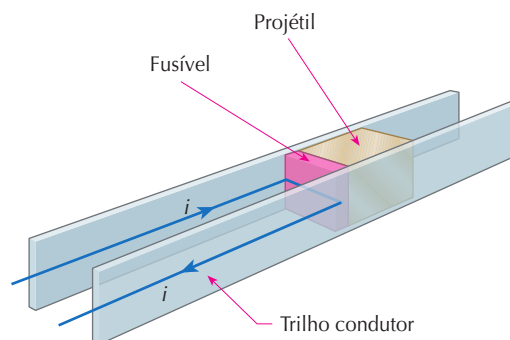


Figura I. Representação esquemática de um trilho eletromagnético percorrido por corrente elétrica.

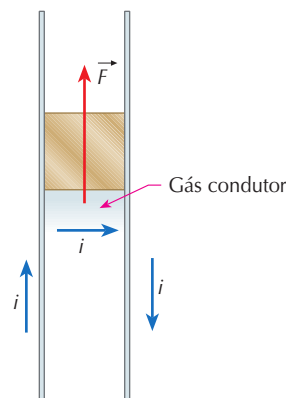
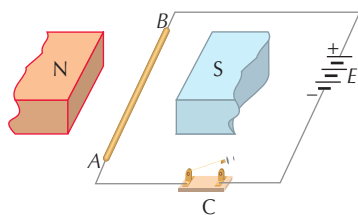


Figura II. Corte transversal do trilho, mostrando como o gás, atravessado pela corrente i , impulsiona o projétil.

Tomando como referência a figura II, pode-se afirmar que o vetor indução magnética $\vec{B}$ está:

- na mesma direção e no mesmo sentido da força magnética.
- saindo perpendicularmente ao plano da página.
- entrando perpendicularmente ao plano da página.
- na mesma direção e no sentido oposto da força magnética.

T. 357 (Ufla-MG) Um condutor retilíneo AB é alimentado por uma bateria de força eletromotriz E , conforme mostra a figura.



Colocando-se esse condutor entre os polos norte e sul de um ímã e fechando-se a chave C, o condutor AB:

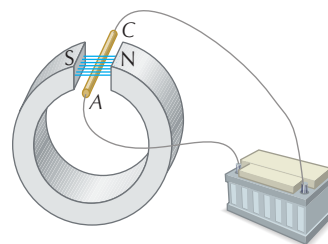
- será atraído pelo polo norte.
- será atraído pelo polo sul.
- irá se deslocar para cima.
- irá se deslocar para baixo.
- será atraído e repellido de forma alternada.

T. 358 (UFMT) Suponha um condutor elétrico retilíneo longo (fio elétrico) sendo percorrido por uma corrente elétrica de 500 mA. Um determinado trecho do condutor, de comprimento 1 m, está sob a ação de um campo magnético externo de 2 teslas. Nessa situação, podemos afirmar que:

- se o campo magnético aplicado no trecho do condutor tem a mesma direção e o mesmo sentido da corrente que o percorre, então a força resultante de origem eletromagnética nesse trecho do fio tem valor nulo.
- o vetor campo magnético produzido pela corrente que percorre o condutor, nas proximidades deste, tem sempre a direção ortogonal à direção do comprimento do fio, ao longo de uma circunferência centrada no fio.
- se o campo magnético externo for aplicado em uma direção perpendicular à direção do comprimento do fio, a força de origem eletromagnética aplicada ao fio será máxima e terá um valor em módulo igual a 1 N.
- se o sentido da corrente que percorre o condutor for invertido, mantendo-se a mesma direção, sentido e módulo do campo magnético externo, o sentido da força eletromagnética aplicada sobre o fio será invertido e o módulo dessa força será alterado.
- se invertermos simultaneamente os sentidos do vetor do campo magnético externo e da corrente que percorre o condutor e mantivermos os seus módulos e direções constantes, o vetor força eletromagnética aplicado ao condutor não se alterará.

Dê como resposta a soma dos números que precedem as afirmativas corretas.

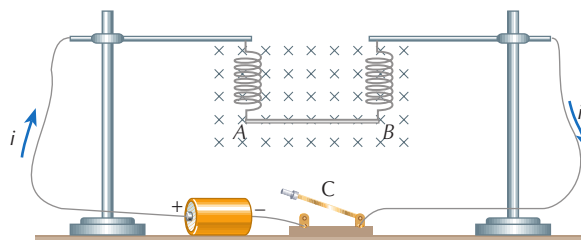
T. 359 (UEPB) Um professor de Física resolve fazer um experimento de eletromagnetismo que objetiva determinar o valor do campo magnético entre os polos do ímã. Para isso, ele utiliza um ímã, uma bateria que fornece 4,8 V a um condutor cilíndrico AC com massa 5 g, comprimento de 10 cm e resistência elétrica igual a 0,10 Ω . Ao ligar a bateria ao circuito, mostrado na figura, o condutor cilíndrico fica suspenso em equilíbrio.



Considerando-se que as linhas do campo são perpendiculares ao condutor, que a resistência elétrica dos fios é 0,02 Ω , que a massa dos fios é desprezível e adotando $g = 10 \text{ m/s}^2$, o professor concluiu que o campo magnético, em teslas, tem valor igual a:

- $12,5 \cdot 10^{-3}$
- 125
- $1,25 \cdot 10^{-4}$
- $12,5 \cdot 10^{-2}$
- 1.250

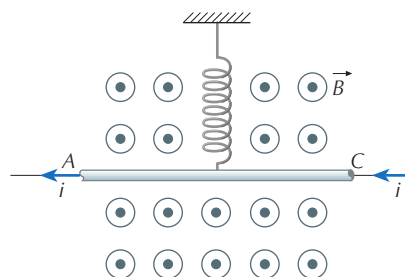
T. 360 (UEA-AM) Considere um condutor retilíneo AB, de 10 cm de comprimento, sustentado por duas molas e colocado perpendicularmente a um campo magnético uniforme de 0,5 T, conforme a figura.



O condutor está ligado a uma pilha e a uma chave interruptora C, aberta. Ao fecharmos a chave C, circulará uma corrente elétrica de 2 A. Acerca da força magnética, podemos afirmar que terá valor de:

- 0,10 N e irá suspender o condutor AB.
- 5,0 N e irá suspender o condutor AB.
- 5,0 N e irá esticar as molas.
- 1,5 N e irá esticar as molas.
- 0,10 N e deslocará lateralmente o condutor AB.

T. 361 (UFSCar-SP) Um fio AC, de 20 cm de comprimento, está posicionado na horizontal, em repouso, suspenso por uma mola isolante de constante elástica k , imerso num campo magnético uniforme horizontal $B = 0,5 \text{ T}$, conforme mostra a figura.

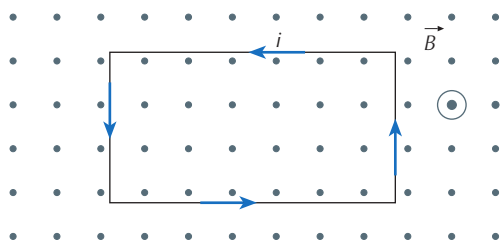


Sabendo-se que a massa do fio é $m = 10 \text{ g}$ e que a constante da mola é $k = 5 \text{ N/m}$, a deformação sofrida pela mola, quando uma corrente $i = 2 \text{ A}$ passar pelo fio, será de:

- 3 mm
- 4 mm
- 5 mm
- 6 mm
- 20 mm

Adote $g = 10 \text{ m/s}^2$.

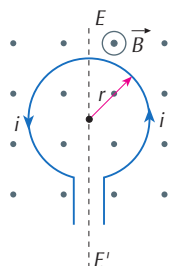
T. 362 (ITA-SP) Uma espira retangular é colocada em um campo magnético com o plano da espira perpendicular à direção do campo, conforme mostra a figura.



Se a corrente elétrica flui no sentido mostrado, pode-se afirmar em relação à resultante das forças, e ao torque total em relação ao centro da espira, que:

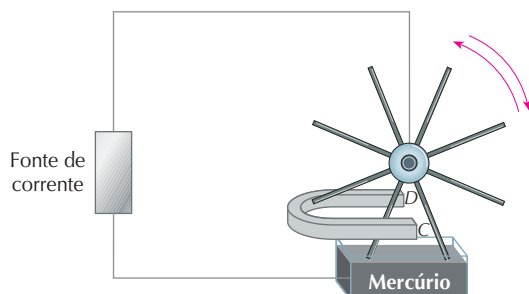
- a resultante das forças não é zero, mas o torque total é zero.
- a resultante das forças e o torque total são nulos.
- o torque total não é zero, mas a resultante das forças é zero.
- a resultante das forças e o torque total são nulos.
- o enunciado não permite estabelecer correlações entre as grandezas consideradas.

T. 363 (ITA-SP) Um campo magnético $\vec{B}$ é perpendicular ao papel e orientado do papel para o observador. Uma corrente i passa na espira circular de raio r , cujo plano coincide com o do papel. As forças que agem sobre a espira são tais que tendem a produzir nela:



- um encolhimento.
- um alargamento.
- uma rotação no sentido horário em torno de um eixo vertical, pelo seu centro.
- uma rotação no sentido anti-horário em torno do eixo vertical, pelo centro.
- uma rotação em torno do eixo EE' do plano da espira.

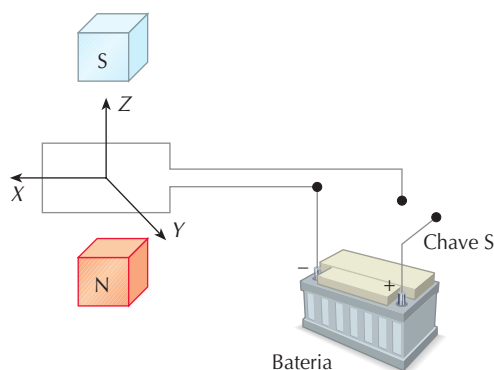
T. 364 (UFG-GO) Peter Barlow (1776-1862), cientista e engenheiro inglês, foi um dos primeiros a inventar um motor de corrente contínua, esquematizado na figura.



O circuito elétrico fecha-se no encontro da ponta de um raio da roda com o mercúrio. Devido ao campo magnético produzido pelo ímã, de polos C e D, a roda gira, mantendo sempre um raio em contato com o mercúrio. Assim, vê-se a roda girando no sentido:

- horário, se C for polo norte e a corrente flui, no contato, do raio para o mercúrio.
- anti-horário, se C for polo sul e a corrente flui, no contato, do raio para o mercúrio.
- horário, se C for polo norte e a corrente flui, no contato, do mercúrio para o raio.
- anti-horário, se C for polo norte e a corrente flui, no contato, do mercúrio para o raio.
- horário, se C for polo sul e a corrente flui, no contato, do mercúrio para o raio.

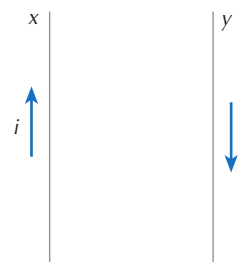
T. 365 (UFSM-RS) A figura representa uma espira ligada a uma bateria por meio de uma chave S e imersa numa região de campo magnético.



Ao se ligar a chave S, a espira tende a:

- girar ao redor do eixo X, no sentido $Y \rightarrow Z$.
- girar ao redor do eixo X, no sentido $Z \rightarrow Y$.
- se deslocar, sem girar, na direção do eixo Z.
- escapar da região de campo ao longo do eixo X.
- escapar da região de campo ao longo do eixo Y.

T. 366 (UFPel-RS) Dois condutores metálicos x e y são percorridos por correntes de mesma intensidade e sentidos opostos, como mostra a figura.

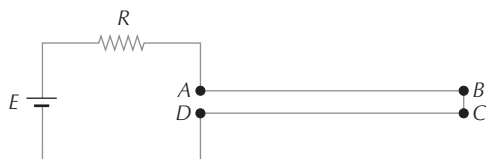


Com relação à força magnética exercida pelo condutor x sobre o condutor y, podemos afirmar que é:

- de repulsão, porque o vetor indução magnética em y aponta para dentro do plano do papel.
- nula, porque a soma dos vetores indução magnética em y é nula.
- de atração, porque o vetor indução magnética em y aponta para dentro do plano do papel.
- de atração, porque o vetor indução magnética em y aponta para fora do plano do papel.
- de repulsão, porque o vetor indução magnética em y aponta para fora do plano do papel.



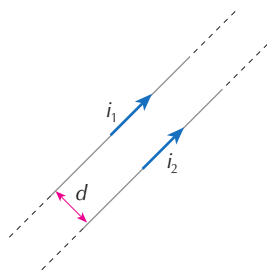
- T. 367** (UFPI) No circuito da figura abaixo, composto de uma bateria, um resistor e um fio condutor longo, existe uma corrente elétrica.



Podemos afirmar que, devido à corrente:

- haverá uma força de atração, entre cargas, que tende a aproximar os segmentos de fio $\overline{AB}$ e $\overline{CD}$.
- haverá uma força magnética, que tende a separar os segmentos de fio $\overline{AB}$ e $\overline{CD}$.
- haverá uma força magnética, que tende a aproximar os segmentos de fio $\overline{AB}$ e $\overline{CD}$.
- haverá uma força de repulsão, entre cargas, que tende a separar os segmentos de fio $\overline{AB}$ e $\overline{CD}$.
- não haverá qualquer tipo de força eletromagnética entre os segmentos $\overline{AB}$ e $\overline{CD}$.

- T. 368** (PUC-Campinas-SP) Dois condutores retos, extensos e paralelos, estão separados por uma distância $d = 2,0$ cm e são percorridos por correntes elétricas de intensidades $i_1 = 1,0$ A e $i_2 = 2,0$ A, com os sentidos indicados na figura.



(Dado: permeabilidade magnética do vácuo $= 4\pi \cdot 10^{-7}$ T $\cdot$ m/A)

Se os condutores estão situados no vácuo, a força magnética entre eles, por unidade de comprimento, no Sistema Internacional, tem intensidade de:

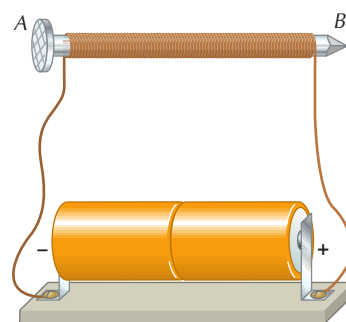
- $2 \cdot 10^{-5}$, sendo de repulsão.
- $2 \cdot 10^{-5}$, sendo de atração.
- $2\pi \cdot 10^{-5}$, sendo de atração.
- $2\pi \cdot 10^{-5}$, sendo de repulsão.
- $4\pi \cdot 10^{-5}$, sendo de repulsão.

- T. 369** (Cefet-BA) Dois fios longos e paralelos, A e B, estão no vácuo, a 2 cm de distância um do outro. Os fios são percorridos por correntes de sentidos opostos, valendo 4 A e 5 A, respectivamente. Considerando a permeabilidade magnética do vácuo igual a $4\pi \cdot 10^{-7}$ T $\cdot$ m/A, a força por unidade de comprimento que um fio exerce sobre o outro é de:
- repulsão e vale $2 \cdot 10^{-4}$ N/m.
 - repulsão e vale $4 \cdot 10^{-4}$ N/m.
 - repulsão e vale $8 \cdot 10^{-4}$ N/m.
 - atração e vale $2 \cdot 10^{-4}$ N/m.
 - atração e vale $4 \cdot 10^{-4}$ N/m.

- T. 370** (ITA-SP) No colégio de Patópolis, a sineta era controlada por um grande relógio de pêndulo colocado na entrada do corredor principal. A bola do pêndulo do relógio era de ferro. Dois alunos, Zezinho e Luisinho, costumavam pregar peça no professor Ludovico do seguinte modo: eles tinham um ímã muito forte que, ao entrarem às 8 h, colocavam perto do relógio, para que ele se adiantasse. Às 12 h, ao saírem, mudavam a posição do ímã, para que o relógio se atrasasse. Em que lugar eles colocavam o ímã?

- Na frente do relógio, pela manhã, e atrás dele, à tarde.
- Atrás do relógio, pela manhã, e na frente, à tarde.
- Atrás do número 8 do mostrador, pela manhã, e atrás do número 12, à tarde.
- Embaixo do relógio, pela manhã, e em cima, à tarde.
- Em cima do relógio, pela manhã, e embaixo, à tarde.

- T. 371** (PUC-SP) A figura mostra um prego de ferro envolto por um fio fino de cobre esmaltado, enrolado muitas vezes ao seu redor. O conjunto pode ser considerado um eletroímã quando as extremidades do fio são conectadas aos polos de um gerador, que, no caso, são duas pilhas idênticas, associadas em série.



A respeito do descrito, fazem-se as seguintes afirmações:

- Ao ser percorrido por corrente elétrica, o eletroímã apresenta polaridade magnética. Na representação da figura, a extremidade A (cabeça do prego) será um polo norte e a extremidade B será um polo sul.
- Ao aproximar-se um prego de ferro da extremidade A do eletroímã e outro da extremidade B, um deles será atraído e o outro será repelido.
- Ao substituir-se o conjunto de duas pilhas por outro de 6 pilhas idênticas às primeiras, também associadas em série, a intensidade do vetor indução magnética no interior e nas extremidades do eletroímã não sofrerá alteração, uma vez que esse valor independe da intensidade da corrente elétrica que circula no fio.

Está correto apenas o que se afirma em:

- I e II
- II e III
- I e III
- I
- III

Capítulo
15**Indução
eletromagnética**

Toda vez que o fluxo magnético varia através de um circuito, surge nesse circuito uma fem induzida. Esse fenômeno, denominado indução eletromagnética, explica o funcionamento de aparelhos e dispositivos de uso comum em nosso cotidiano. Entre eles estão os detectores de metais e as máquinas leitoras de cartões magnéticos.

▶ **15.1 Corrente induzida.**
Fem induzida

Quando há movimento relativo entre uma espira e um campo magnético no qual ela está imersa, surge na espira uma corrente elétrica induzida.

▶ **15.2 Fluxo magnético**

O fluxo magnético através de uma espira, imersa em um campo magnético, pode ser interpretado como uma grandeza que mede o número de linhas de indução que atravessam a superfície da espira.

▶ **15.3 Indução eletromagnética.**
Lei de Lenz

Toda vez que o fluxo magnético varia, através de um circuito, surge nesse circuito uma fem induzida.

▶ **15.4 Lei de Faraday-Neumann**

A fem induzida média em um circuito é a relação entre a variação do fluxo magnético e o intervalo de tempo em que ocorre, com sinal trocado.

O s captadores das guitarras elétricas são constituídos por ímãs permanentes enrolados por bobinas. O trecho da corda que fica acima do ímã magnetiza-se. A percussão da corda faz o fluxo magnético variar através da bobina, induzindo uma corrente elétrica. A medida que a corda oscila, a corrente induzida muda de intensidade e de sentido com a mesma frequência com que a corda vibra, transmitindo o sinal elétrico ao alto falante.



Seção 15.1

Objetivos

- Compreender como ocorre a geração da corrente induzida em um condutor em movimento em relação a um campo magnético.
- Relacionar a força eletromotriz induzida à intensidade do vetor indução magnética, ao comprimento do condutor e à sua velocidade.

Termos e conceitos

- fem induzida no condutor móvel

Corrente induzida. Fem induzida

Considere um condutor reto, de comprimento L , movendo-se com velocidade $\vec{v}$, em um campo $\vec{B}$ uniforme, originado, por exemplo, por um ímã (fig. 1). Como os elétrons acompanham o movimento do condutor, eles ficam sujeitos à força magnética $\vec{F}_m$, cujo sentido é determinado pela regra da mão direita nº 2. Elétrons livres deslocam-se para a extremidade inferior do condutor da figura, ficando a outra extremidade eletrizada com cargas positivas. As cargas dos extremos originam o campo elétrico $\vec{E}$ e os elétrons ficam sujeitos, também, a uma força elétrica $\vec{F}_e$, de sentido contrário ao da magnética.

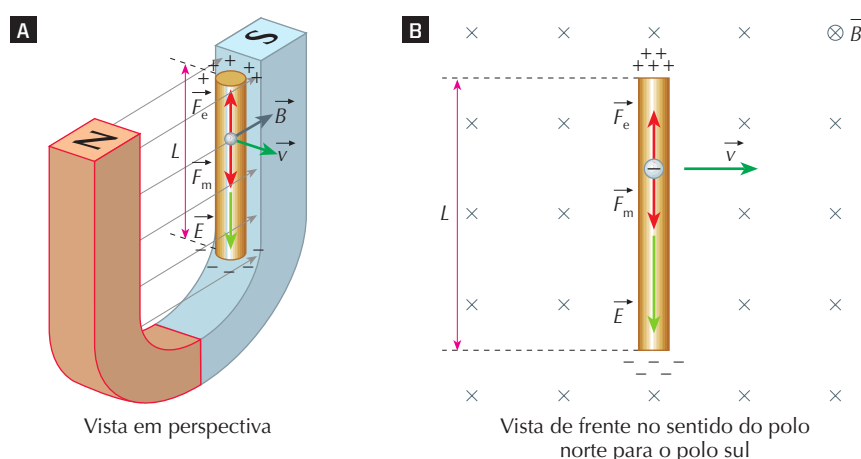


Figura 1. Condutor movendo-se perpendicularmente ao campo magnético.

A separação de cargas no condutor ocorrerá até que essas forças se equilibrem. Como no interior do condutor o campo elétrico não é nulo, tem-se uma ddp entre seus terminais.

Façamos esse condutor deslizar sobre outro, fixo, dobrado em forma de **U**, onde se adapta um amperímetro A de zero central, para indicar o sentido da corrente (fig. 2). Desse modo tem-se um circuito fechado, e a ddp entre os terminais do condutor móvel determinará a passagem de uma corrente denominada **corrente induzida**. Esse fenômeno é semelhante àquele que ocorre no interior de um gerador elétrico.

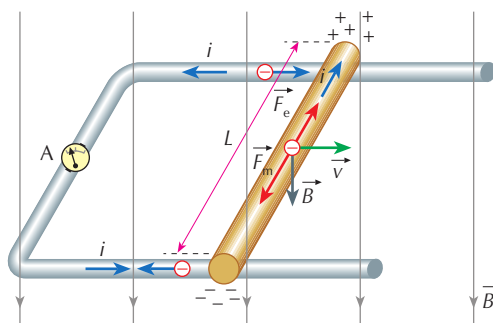


Figura 2. Quando o condutor desliza sobre outro, de modo a formar um circuito fechado, o amperímetro A indica a passagem de corrente induzida. Indicamos o sentido do movimento dos elétrons livres e o sentido da corrente elétrica convencional (i).

A ddp estabelecida corresponde a uma força eletromotriz que, nesse caso, é chamada **fem induzida** ($\mathcal{E}$), relacionada com a intensidade do vetor indução magnética $\vec{B}$, como mostraremos a seguir.

Da Eletrostática (capítulo 3), $U = Ed$ e, portanto, o vetor campo elétrico $\vec{E}$ no interior do condutor móvel terá intensidade $E = \frac{U}{d}$, em que $U = e$ (fem induzida) e $d = L$.

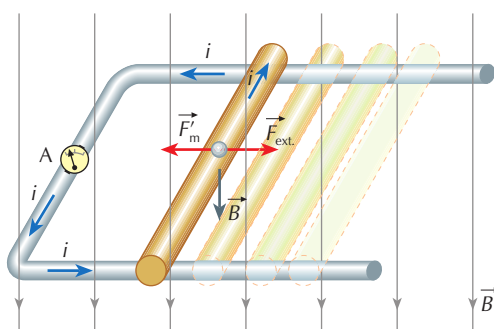
Portanto, $E = \frac{e}{L}$. Sendo $F_m = F_e$ e como $F_m = B \cdot |q| \cdot v$ e $F_e = |q| \cdot E$, vem:

$$B \cdot |q| \cdot v = |q| \cdot E \Rightarrow B \cdot v = E \Rightarrow B \cdot v = \frac{e}{L} \Rightarrow e = B \cdot L \cdot v$$

A fem induzida e é medida em volt (V) no Sistema Internacional de Unidades.

Para manter a corrente induzida, devemos manter a velocidade $\vec{v}$. A passagem da corrente i pelo condutor móvel no campo magnético $\vec{B}$ determina neste a força magnética $\vec{F}_m$ (fig. 3). Para manter a velocidade constante (aceleração nula, força resultante nula), devemos aplicar, no condutor, uma força externa $\vec{F}_{ext.}$ que equilibrará a força magnética $\vec{F}_m$. Portanto:

A energia elétrica é gerada pelo trabalho realizado por um agente externo.



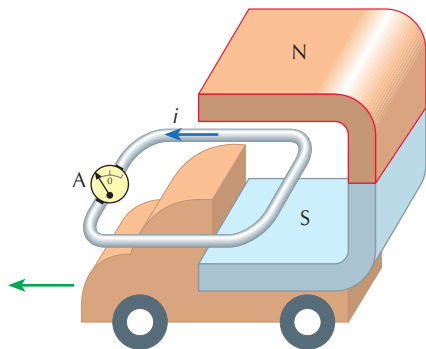
▲ Figura 3. A corrente induzida só é mantida se aplicarmos, no condutor, a força externa $\vec{F}_{ext.}$ que equilibrará $\vec{F}_m$.

Observe que, se invertermos o sentido da velocidade $\vec{v}$ do condutor, inverteremos o sentido da corrente induzida.

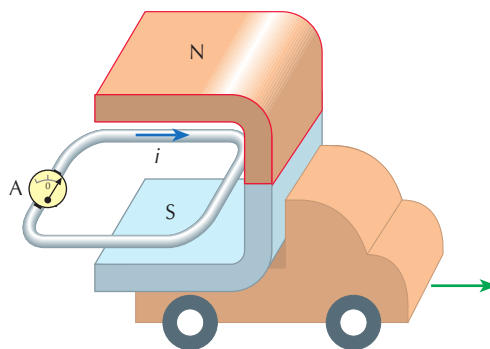


Movimento relativo

Vamos considerar, agora, a situação em que uma espira retangular é mantida fixa e imersa entre os polos de um ímã. Um amperímetro A é intercalado na espira. Deslocando-se o ímã, verificamos que também nesse caso o amperímetro indica a passagem de corrente elétrica, que cessa quando o ímã para (fig. 4). Invertendo-se o sentido do deslocamento do ímã, invertemos o sentido de corrente induzida (fig. 5).



▲ Figura 4. Quando o ímã se desloca, o amperímetro indica corrente elétrica em um sentido...



▲ Figura 5. ... e, em sentido contrário, quando se inverte o sentido de deslocamento do ímã.

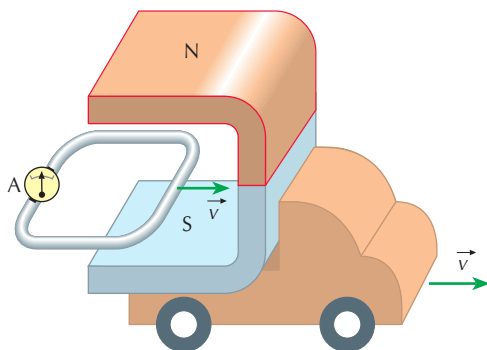


Tudo ocorre como se no circuito, constituído pela espira e pelo amperímetro, existisse um gerador de fem $\mathcal{E}$.

Essas experiências destacam que, para se obter **corrente induzida** num condutor, é importante o **movimento relativo** entre o circuito e o campo magnético.

Pode-se provar essa afirmação, observando-se que o amperímetro não indicará corrente elétrica se o circuito e o ímã se deslocarem com a mesma velocidade $\vec{v}$ (fig. 6).

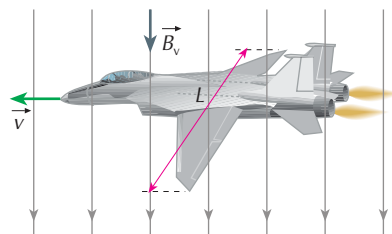
Note que as experiências analisadas permitem obter correntes elétricas que mudam de sentido, assim que se inverte o deslocamento do circuito ou do ímã.



◀ **Figura 6.** Quando não há movimento relativo entre o circuito e o ímã, não se obtém corrente induzida.

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

- R. 141** Um avião inteiramente metálico, com $L = 25$ m de largura, voa horizontalmente com velocidade $v = 540$ km/h em uma região onde a componente vertical do vetor indução magnética terrestre vale $B_v = 4 \cdot 10^{-5}$ T. Calcule a ddp existente entre as extremidades das asas.



Solução:

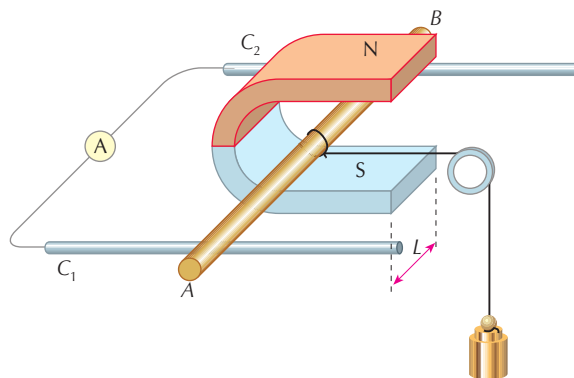
Tem-se $B_v = 4 \cdot 10^{-5}$ T, $L = 25$ m e $v = 540$ km/h = 150 m/s. Como a fem induzida entre os extremos de um condutor móvel, em um campo magnético, vale $\mathcal{E} = B_v \cdot L \cdot v$, tem-se:

$$\mathcal{E} = 4 \cdot 10^{-5} \cdot 25 \cdot 150 \Rightarrow \boxed{\mathcal{E} = 0,15 \text{ V}}$$

Resposta: 0,15 V

- R. 142** Um condutor de cobre AB, cuja resistividade vale $\rho_{Cu} = 1,6 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, reto, horizontal, com seção transversal de área $A = 0,5 \text{ cm}^2$, pode mover-se, sem atrito, apoiado sobre dois condutores C_1 e C_2 , também horizontais e paralelos. Esses condutores têm resistência elétrica desprezível e estão ligados por um amperímetro ideal A. O condutor AB está imerso entre as faces de um ímã em forma de ferradura, de largura $L = 20$ cm e cujo campo de indução magnética tem intensidade $B = 10^{-5}$ T. Enquanto está entre as faces do ímã, o condutor AB tem velocidade $v = 32$ m/s. Considere o trecho do condutor AB, entre C_1 e C_2 , de comprimento igual a L . Determine:

- a intensidade da corrente elétrica indicada pelo amperímetro e seu sentido convencional;
- o peso P do corpo ligado por um fio ideal ao condutor AB que mantém a velocidade v constante.



Solução:

- a) A fem induzida entre os extremos do condutor, durante seu movimento entre as faces do ímã, vale $\mathcal{E} = BLv$. Sendo $B = 10^{-5} \text{ T}$, $L = 20 \text{ cm} = 0,2 \text{ m}$ e $v = 32 \text{ m/s}$, resulta:

$$\mathcal{E} = BLv = 10^{-5} \cdot 0,2 \cdot 32 \Rightarrow \mathcal{E} = 6,4 \cdot 10^{-5} \text{ V}$$

A resistência elétrica do condutor pode ser obtida

$$\text{pela fórmula: } R_{\text{Cu}} = \rho_{\text{Cu}} \cdot \frac{L}{A}$$

Sendo $\rho_{\text{Cu}} = 1,6 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, $L = 20 \text{ cm}$ e $A = 0,5 \text{ cm}^2$, temos:

$$R_{\text{Cu}} = \frac{1,6 \cdot 20}{0,5} \Rightarrow R_{\text{Cu}} = 64 \mu\Omega \Rightarrow R_{\text{Cu}} = 6,4 \cdot 10^{-5} \Omega$$

Pela lei de Ohm, vem:

$$i = \frac{\mathcal{E}}{R} \Rightarrow i = \frac{6,4 \cdot 10^{-5}}{6,4 \cdot 10^{-5}} \Rightarrow i = 1 \text{ A}$$

Pela regra da mão direita nº 2, podemos determinar o sentido do movimento dos elétrons no interior do condutor. O sentido convencional da corrente elétrica é contrário ao do movimento dos elétrons e, no caso, será o indicado na **figura I** (anti-horário).

- b) Enquanto o condutor se desloca percorrido pela corrente i , o campo magnético exerce a força $\vec{F}'_m$, de sentido determinado pela regra da mão direita nº 2 (**fig. II**). Sua intensidade é:

$$F'_m = BiL = 10^{-5} \cdot 1 \cdot 0,2 \Rightarrow F'_m = 2 \cdot 10^{-6} \text{ N}$$

Para manter a velocidade v constante, o peso P do corpo, ligado por um fio ideal ao condutor, deverá ser:

$$P = F'_m \Rightarrow P = 2 \cdot 10^{-6} \text{ N}$$

Resposta: a) 1 A, sentido anti-horário; b) $2 \cdot 10^{-6} \text{ N}$

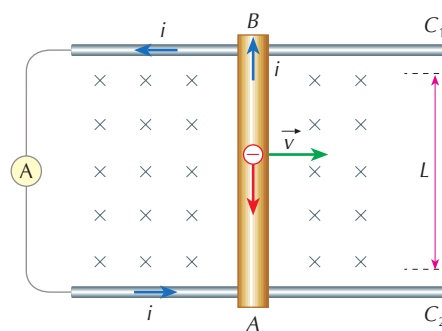


Figura I.

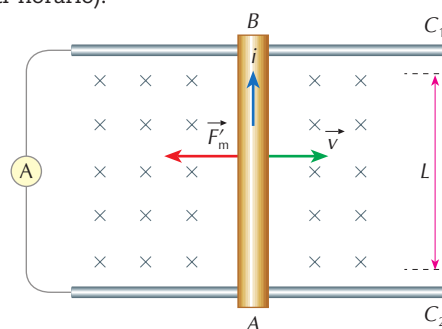


Figura II.

- R. 143** Duas barras metálicas fixas, separadas pela distância L , determinam um plano, o qual forma ângulo θ com a horizontal. Na região existe um campo de indução magnética uniforme, normal ao plano e sentido conforme indica a figura. Outra barra metálica, de massa m , pode deslocar-se sobre as fixas, sem atrito. A resistência elétrica das barras é desprezível, sendo as fixas ligadas entre si por um condutor de resistência R . A aceleração da gravidade no local vale g . Abandonando-se a barra móvel, determine a velocidade limite que ela atinge.

Solução:

Na figura, representamos a componente do peso da barra na direção do plano inclinado ($P \cdot \sin \theta$) e a força magnética (F_m) que o campo exerce sobre a barra em virtude da passagem da corrente induzida. Note que essa força tem sentido oposto ao do deslocamento. A componente do peso da barra na direção normal ao plano inclinado ($P \cdot \cos \theta$) é anulada pela reação normal (F_N).

Atingida a velocidade limite, tem-se:

$$F_m = P \cdot \sin \theta \Rightarrow BiL = mg \cdot \sin \theta \quad (1)$$

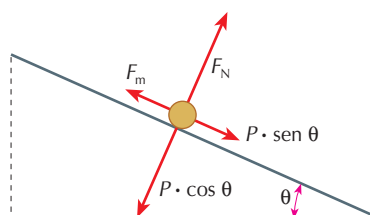
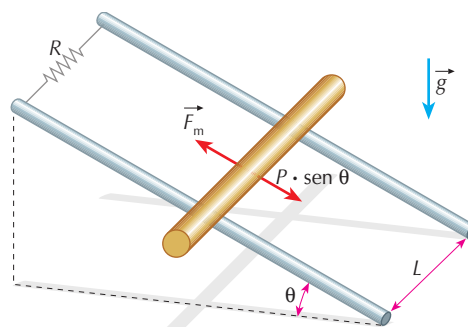
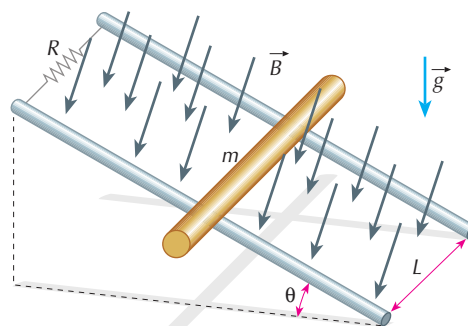
Sendo $\mathcal{E}$ a fem induzida, vem:

$$i = \frac{\mathcal{E}}{R} \Rightarrow i = \frac{BLv}{R} \quad (2)$$

Substituindo (2) em (1) resulta:

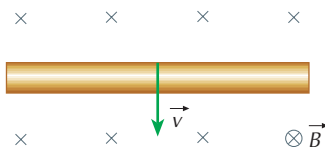
$$B \cdot \frac{BLv}{R} \cdot L = mg \cdot \sin \theta \Rightarrow v = \frac{mg \cdot \sin \theta \cdot R}{B^2 \cdot L^2}$$

$$\text{Resposta: } v = \frac{mg \cdot \sin \theta \cdot R}{B^2 \cdot L^2}$$

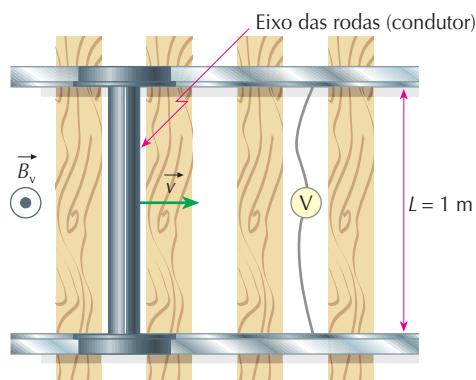


EXERCÍCIOS PROPOSTOS

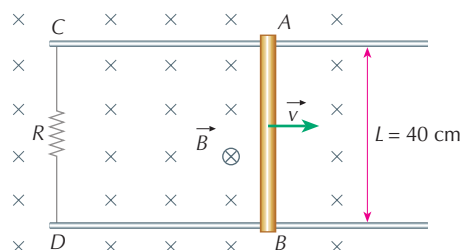
- P. 368** O campo magnético uniforme de indução $\vec{B}$, em uma região, tem intensidade 0,5 T. Calcule a fem induzida em um condutor retilíneo de 10 cm de comprimento, que se desloca com velocidade de 1 m/s.



- P. 369** Os dois trilhos de uma linha férrea estão isolados entre si e do solo por meio de dormentes de madeira. A distância entre eles é de 1 m e a componente vertical B_v , devida ao campo magnético terrestre, vale $15 \cdot 10^{-6}$ T. Um volúmetro V, sensível, é ligado entre os dois trilhos, conforme a figura. Determine sua indicação quando um trem passar com velocidade $v = 72$ km/h.



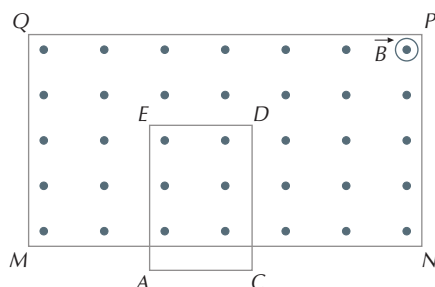
- P. 370** Uma barra condutora AB, de resistência desprezível, está em contato com as guias metálicas CA e DB, também de resistências nulas. A resistência R vale $0,6 \Omega$ e o circuito encontra-se em um campo magnético uniforme $B = 1,5$ T perpendicular ao plano da figura.



Quando a barra se desloca para a direita, com velocidade $v = 2$ m/s constante, calcule:

- a fem induzida;
- a intensidade de corrente elétrica que se estabelece no circuito e o seu sentido.

- P. 371** A espira retangular ACDE (AC = 10 cm e CD = 20 cm) é abandonada na posição indicada na figura, perpendicularmente a um campo magnético uniforme de indução $\vec{B}$, horizontal e limitado pelo contorno MNPQ. Sabe-se que o peso da espira é $P = 0,2$ N e que sua resistência elétrica é $R = 5 \cdot 10^{-3} \Omega$. A intensidade da indução magnética é $B = 2$ T. Ao atravessar o campo magnético, a espira atinge uma velocidade limite. Determine a velocidade limite que a espira atinge com base nos dados do problema.



Seção 15.2

Objetivos

- Perceber que temos fem induzida numa espira apenas quando varia o número de linhas de indução que atravessam sua superfície.
- Compreender a definição de fluxo magnético e conhecer sua unidade no SI

Termos e conceitos

- linhas de indução
- vetor normal

Fluxo magnético

Analisando as experiências anteriores, Faraday* verificou que **somente temos fem induzida numa espira, imersa num campo magnético, se ocorrer variação do número de linhas de indução que atravessam a superfície da espira** (fig. 7 e fig. 8).

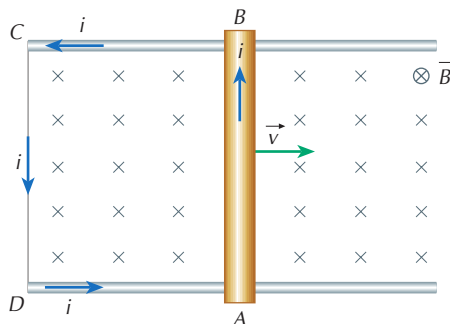


Figura 7. Deslocando-se o condutor AB, varia o número de linhas de indução que atravessam a espira ABCD.

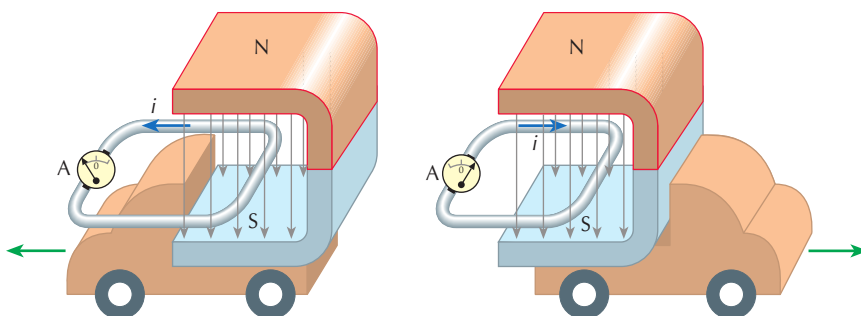


Figura 8. Deslocando-se o ímã, varia o número de linhas de indução que atravessam a espira suposta fixa.

A grandeza escalar que mede o número de linhas de indução que atravessam a área A de uma espira imersa num campo magnético de indução $\vec{B}$ (fig. 9) é chamada **fluxo magnético****, sendo definida por:

$$\Phi = BA \cdot \cos \theta$$

em que θ é o ângulo entre o vetor $\vec{B}$ e a normal $\vec{n}$ à área da espira.

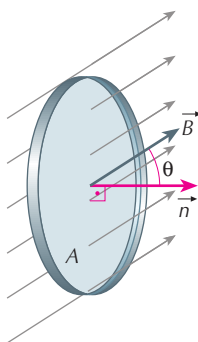


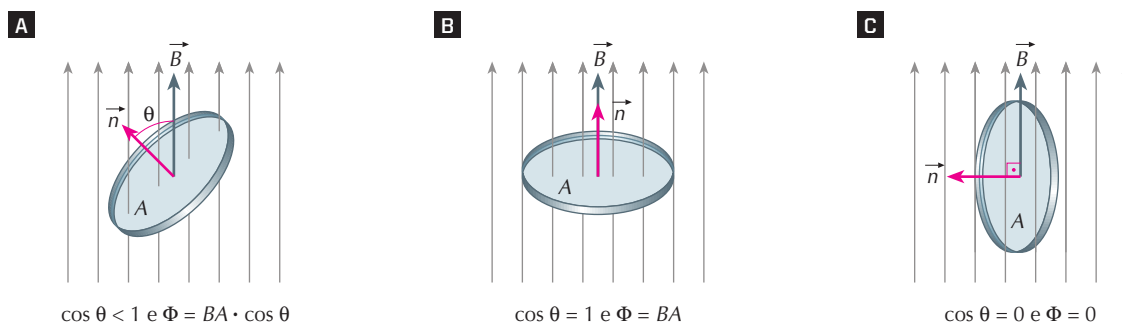
Figura 9. Fluxo magnético através de uma espira qualquer.

* FARADAY, Michael (1791-1867), físico e químico inglês. Descobriu o benzeno, estabeleceu as leis da eletrólise e, em 1831, descobriu a indução eletromagnética.

** O fluxo magnético de um campo uniforme, através de uma superfície plana, será o único caso discutido neste livro.

Na **figura 10**, observamos que, se estiver inclinada em relação ao vetor $\vec{B}$ (**fig. 10A**), a espira será atravessada por um número de linhas de indução menor do que aquele que a atravessa quando ela é perpendicular a $\vec{B}$ (**fig. 10B**), sendo o fluxo conseqüentemente menor. Quando a espira for paralela ao campo, não será atravessada por linhas de indução e o fluxo será nulo (**fig. 10C**).

Denomina-se **fluxo magnético através de um circuito** o fluxo que atravessa uma superfície cujo contorno é o próprio circuito.



▲ **Figura 10.** Valores particulares do fluxo magnético através de uma espira plana em um campo magnético uniforme.

No Sistema Internacional de Unidades, a unidade de fluxo magnético denomina-se **weber** (símbolo Wb), em homenagem ao físico alemão Wilhelm Weber*.

Seção 15.3

Indução eletromagnética. Lei de Lenz

Objetivos

- Compreender o fenômeno da indução eletromagnética.
- Verificar as diversas maneiras de se variar o fluxo magnético.
- Enunciar a lei de Lenz.

Termos e conceitos

- circuito induzido
- circuito indutor

Após estudar todos os casos de aparecimento de fem induzida, Faraday concluiu:

Toda vez que o fluxo magnético, através de um circuito, varia, surge, nesse circuito, uma fem induzida.

Esse fenômeno é chamado **indução eletromagnética**, e o circuito onde ele ocorre é chamado **circuito induzido**.

Para exemplificar a variação do fluxo magnético $\Phi = BA \cdot \cos \theta$, consideramos, como circuito induzido, uma espira ligada a um amperímetro que indica o sentido da corrente (**fig. 11**). No caso I, um ímã ou um solenoide S, percorrido por corrente elétrica, se aproxima ou se afasta (variação de B) da espira e, no caso II, a espira gira em torno de um eixo (variação de θ). No caso III, o solenoide S' está fixo. Deslocando o cursor C do reostato ligado ao circuito que o alimenta, variamos a corrente elétrica e, em conseqüência, o campo magnético no interior do solenoide. Poderíamos, também, como no caso IV, manter o ímã ou o solenoide S' fixo e aumentar ou diminuir a área do circuito induzido.

* **WEBER**, Wilhelm (1804-1891), físico alemão, tem trabalhos sobre o Magnetismo Terrestre e o Eletromagnetismo. Foi colaborador do físico e matemático alemão Carl Friedrich Gauss (1777-1855), com o qual construiu um telégrafo baseado em efeitos magnéticos.



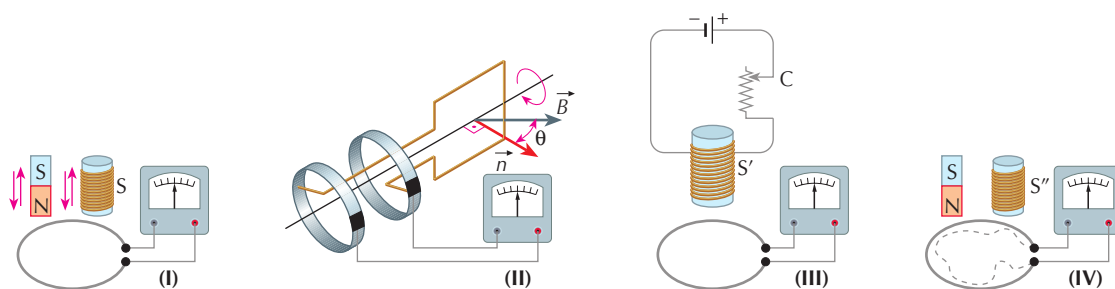


Figura 11. Indução eletromagnética: variação de B (casos I e III), variação de θ (caso II) e variação da área A (caso IV).

Em todos os casos, observamos, no amperímetro, uma corrente induzida que cessa quando cessa a variação do fluxo magnético.

É muito grande a importância da indução eletromagnética: a maior parte da energia elétrica é produzida atualmente por meio de processos baseados nesse fenômeno.

Entre na rede Nos endereços eletrônicos <http://www.micro.magnet.fsu.edu/electromag/java/faraday/index.html> e <http://www.micro.magnet.fsu.edu/electromag/java/faraday2/index.html> (acessos em julho/2009), você pode simular a obtenção de corrente induzida.

Sentido da corrente induzida. Lei de Lenz

Para determinarmos o sentido da corrente induzida, utilizamos a lei de Lenz*, que enunciamos a seguir.

O sentido da corrente induzida é tal que, por seus efeitos, opõe-se à causa que lhe deu origem.

Assim, na **figura 12A**, consideramos como circuito induzido uma espira ligada a um amperímetro de zero central. Enquanto o polo norte do ímã se aproxima da espira, a corrente induzida tem um sentido tal que origina, na face da espira voltada para o ímã, um polo norte. Esse polo opõe-se à aproximação do ímã e, portanto, à variação do fluxo magnético, que é a causa da fem induzida. Ao se afastar o ímã, a corrente induzida origina, na face da espira voltada para o ímã, um polo sul, que se opõe ao afastamento do ímã (**fig. 12B**). Na **figura 12A**, em relação ao observador O , a corrente induzida tem sentido anti-horário e, na **figura 12B**, horário.

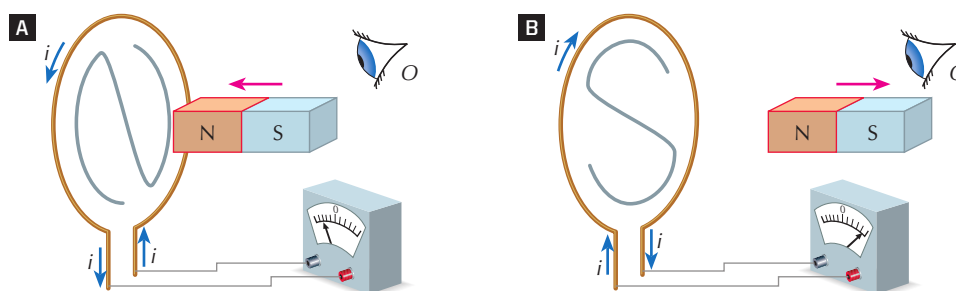


Figura 12. Sentido da corrente induzida.

A energia elétrica gerada no circuito induzido é obtida graças a um consumo de energia no trabalho realizado ao aproximarmos ou afastarmos o ímã.

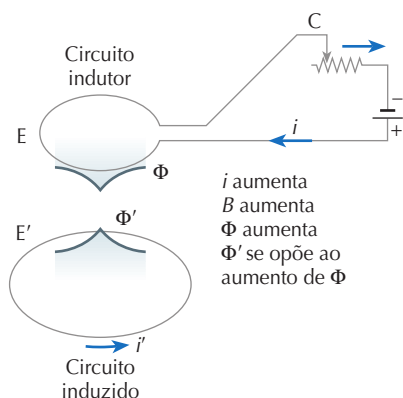
Há, ainda, uma outra maneira de apresentar a lei de Lenz:

O sentido da corrente induzida é tal que ela origina um fluxo magnético induzido que se opõe à variação do fluxo magnético denominado indutor.

* **LENZ**, Heinrich (1804-1865), físico russo, conhecido por seus trabalhos de Física Experimental, sobretudo pela lei que permite determinar o sentido da corrente induzida.

Na **figura 13**, o circuito, chamado **indutor**, é formado pela espira E, onde passa a corrente, que é mantida pelo gerador em série com o reostato. Este é munido de um cursor C, sendo que o circuito induzido é formado pela espira E'. Deslocando-se o cursor no sentido indicado, a corrente i é aumentada, o que determina, por sua vez, aumento na intensidade do vetor $\vec{B}$, devido à espira E. Consequentemente, há, também, aumento do fluxo magnético Φ , originado por $\vec{B}$, denominado indutor, através da espira E'. A corrente induzida i' tem um sentido que origina, em E', o fluxo magnético induzido Φ' , que se opõe ao aumento de Φ .

Entretanto, se o cursor C é deslocado para a esquerda, Φ diminui e a corrente induzida em E' muda de sentido para que Φ' se oponha à diminuição de Φ .



« **Figura 13.** Outra maneira de determinar o sentido da corrente induzida.

Entre na rede No endereço eletrônico <http://www.micro.magnet.fsu.edu/electromag/java/lenzlaw/index.html> (acesso em julho/2009), você pode analisar o sentido da corrente induzida (lei de Lenz).



Conteúdo digital Moderna PLUS <http://www.modernaplus.com.br>
Atividade experimental: *O fenômeno da indução eletromagnética*
Animação: *Indução eletromagnética - Indução*

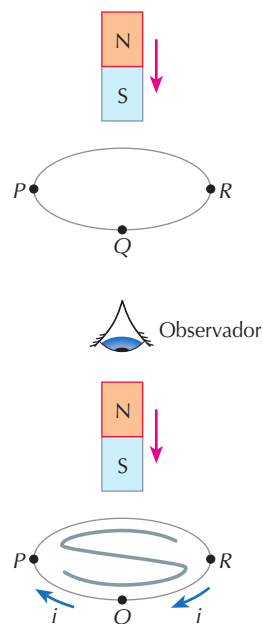
EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

- R. 144** Aproxima-se um ímã de uma espira circular PQR, perpendicularmente ao plano da espira, como mostra a figura. Determine o sentido da corrente induzida na espira, enquanto o ímã se aproxima.

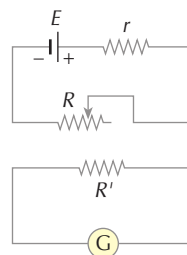
Solução:

Enquanto o polo sul do ímã se aproxima da espira, de acordo com a lei de Lenz ela será percorrida por uma corrente, de modo a se opor à aproximação do ímã. Portanto, a corrente deve circular de tal forma que a face voltada para o polo sul do ímã seja um polo sul. Assim, para o observador da figura, a corrente deve passar no sentido horário, isto é, de $R \rightarrow Q \rightarrow P$ (regra do relógio).

Resposta: $R \rightarrow Q \rightarrow P$ (sentido horário)



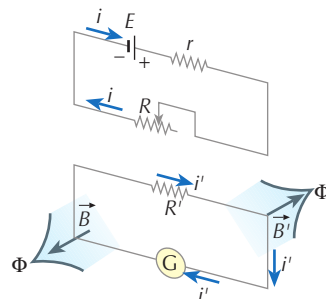
- R. 145** Na figura, o circuito formado pela bateria (E, r) e pelo reostato R constitui o circuito indutor. Próximo desse circuito e abaixo encontra-se um resistor de resistência R' , formando, com um galvanômetro G de zero central, o circuito induzido. Determine o sentido da corrente no galvanômetro quando a resistência R diminui.



Solução:

A passagem da corrente elétrica i no circuito superior (indutor), em sentido mostrado na perspectiva da figura, determina o campo $\vec{B}$, perpendicular ao plano do circuito induzido. Assim, no circuito induzido, tem-se o fluxo magnético indutor Φ . Quando a resistência elétrica R diminui, i , B e Φ aumentam. Pela lei de Lenz, surge, no circuito induzido, o fluxo induzido Φ' opondo-se ao aumento de Φ . Portanto, o campo $\vec{B}'$, que origina Φ' , terá o sentido mostrado na figura. A corrente elétrica i' responsável por esse campo circula no galvanômetro no sentido horário (regra do relógio).

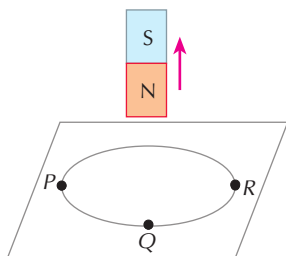
Resposta: sentido horário



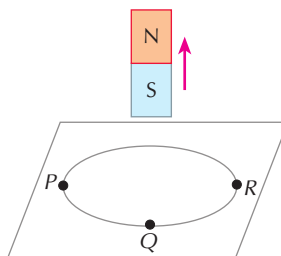
EXERCÍCIOS PROPOSTOS

- P. 372** Determine o sentido da corrente elétrica induzida na espira nos casos abaixo:

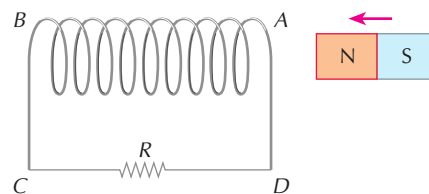
a)



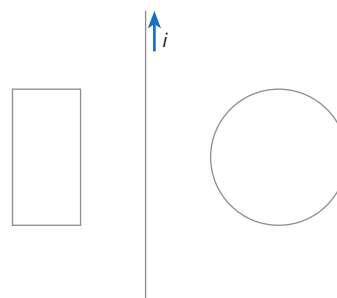
b)



- P. 373** Aproxima-se um ímã de um solenoide de extremidades A e B, conforme indica a figura. O solenoide está ligado a um resistor R . Qual o sentido da corrente induzida que atravessa o resistor? De C para D ou de D para C?



- P. 374** Considere duas espiras, uma circular e outra retangular, situadas num mesmo plano. Um fio longo e situado no plano das espiras é percorrido por corrente elétrica de intensidade i conforme a figura. Determine o sentido da corrente elétrica induzida nas espiras quando:
- i cresce com o tempo;
 - i decresce com o tempo.



Seção 15.4

Objetivos

- Enunciar a lei de Faraday-Neumann.
- Definir o conceito de indutância de um circuito e conhecer sua unidade de medida no SI.
- Compreender o fenômeno da autoindução.
- Compreender como se dá o surgimento das correntes de Foucault em condutores maciços.
- Compreender o funcionamento das bobinas de indução.

Termos e conceitos

- fluxo autoinduzido

Lei de Faraday-Neumann

No instante t , seja Φ o fluxo magnético através de uma espira e, em um instante posterior $t + \Delta t$, seja $\Phi + \Delta\Phi$ o fluxo magnético. Portanto, no intervalo de tempo Δt , o fluxo magnético varia de $\Delta\Phi$, e a lei de Faraday-Neumann* afirma que a fem induzida média vale:

$$e_m = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Isso significa que:

A fem induzida média em um circuito é igual ao quociente da variação do fluxo magnético pelo intervalo de tempo em que ocorre, com sinal trocado.

Observe que o sinal de menos $(-)$ que aparece na lei de Faraday-Neumann decorre da lei de Lenz, pois a força eletromotriz induzida se opõe à variação do fluxo que a origina.

A fem e instantânea é obtida pelo limite da expressão anterior quando Δt tende a zero:

$$e = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

R. 146 Uma espira retangular, de dimensões 6 cm e 10 cm, é colocada perpendicularmente às linhas de indução de um campo magnético uniforme de intensidade 10^{-3} T. A intensidade do campo magnético é reduzida a zero em 3 s. Determine a fem induzida média nesse intervalo de tempo.

Solução:

Cálculo da área A :

$$A = 6 \cdot 10 \Rightarrow A = 60 \text{ cm}^2 \Rightarrow A = 6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Através da área A , no intervalo de tempo $\Delta t = 3$ s, a intensidade do campo magnético vai de

$$B_{\text{inicial}} = 10^{-3} \text{ T} \text{ a } B_{\text{final}} = 0.$$

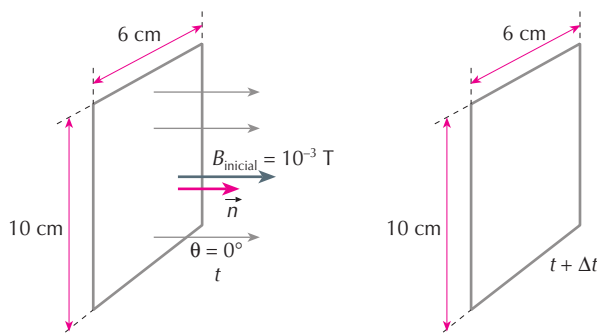
$$\text{Assim: } \Delta B = B_{\text{final}} - B_{\text{inicial}} \Rightarrow \Delta B = -10^{-3} \text{ T}$$

A variação do fluxo magnético é:

$$\begin{aligned} \Delta\Phi &= \Delta B \cdot A \cdot \cos 0^\circ \Rightarrow \\ \Rightarrow \Delta\Phi &= (-10^{-3}) \cdot (6 \cdot 10^{-3}) \cdot 1 \Rightarrow \\ \Rightarrow \Delta\Phi &= -6 \cdot 10^{-6} \text{ Wb} \end{aligned}$$

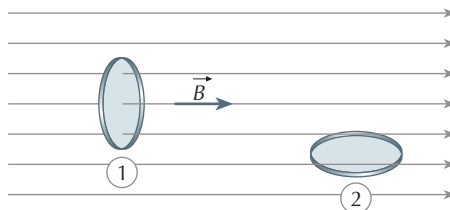
$$\text{A fem induzida média é: } e_m = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \Rightarrow e_m = -\frac{(-6 \cdot 10^{-6})}{3} \Rightarrow e_m = 2 \cdot 10^{-6} \text{ V}$$

Resposta: $2 \cdot 10^{-6} \text{ V}$



* **NEUMANN**, Franz Ernst (1798-1895), físico alemão. Além do Eletromagnetismo, estudou a propagação da luz nos meios anisótropos. Deixou ainda importantes trabalhos em Cristalografia.

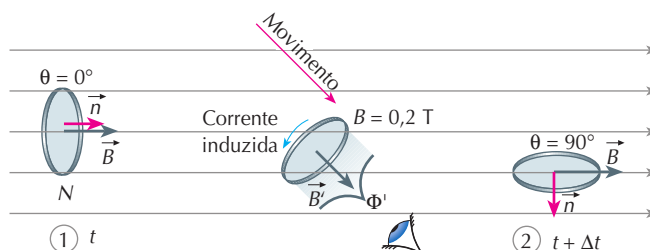
- R. 147** Uma bobina chata, formada de 100 espiras circulares idênticas, de raio 10 cm, está em posição perpendicular às linhas de indução de um campo magnético uniforme de intensidade 0,2 T, conforme a situação ① da figura. Em 0,5 s, a bobina é levada para a posição ②. Calcule a fem induzida média nesse intervalo de tempo e determine o sentido da corrente induzida.



Solução:

Como a bobina tem $N = 100$ espiras, sua área total será:

$$A = N\pi r^2 \Rightarrow A = 100 \cdot 3,14 \cdot 0,1^2 \Rightarrow A = 3,14 \text{ m}^2$$



Na posição inicial, ①, instante t , o fluxo magnético através da bobina será:

$$\Phi_1 = BA \cdot \cos 0^\circ \Rightarrow \Phi = 0,2 \cdot 3,14 \cdot 1 \Rightarrow \Phi_1 = 0,628 \text{ Wb}$$

Na posição final, ②, instante $t + \Delta t$, tem-se: $\Phi_2 = BA \cdot \cos 90^\circ \Rightarrow \Phi_2 = 0$

Portanto, no intervalo de tempo $\Delta t = 0,5$ s, a variação do fluxo será:

$$\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1 \Rightarrow \Delta\Phi = -0,628 \text{ Wb}$$

$$\text{A fem induzida média vale: } e_m = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{(-0,628)}{0,5} \Rightarrow e_m \approx 1,26 \text{ V}$$

Pela lei de Lenz, o fluxo induzido Φ' surge conforme mostra a posição intermediária da bobina na figura. O fluxo induzido se opõe à diminuição do fluxo indutor, sendo anti-horário o sentido da corrente elétrica na bobina em relação ao observador da figura (regra do relógio).

Resposta: $\approx 1,26$ V, sentido anti-horário

- R. 148** Uma espira de área $A = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$ e resistência elétrica $R = 4,0 \Omega$ está disposta perpendicularmente às linhas de indução de um campo magnético uniforme de indução $B = 2,0$ T. Sabendo-se que num certo intervalo de tempo o campo é reduzido a zero, determine a quantidade de carga elétrica induzida que circula pela espira nesse intervalo de tempo.

Solução:

Através da área $A = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$, num certo intervalo de tempo Δt , a intensidade do campo passa de $B_{\text{inicial}} = 2,0$ T a $B_{\text{final}} = 0$.

Então $\Delta B = B_{\text{final}} - B_{\text{inicial}} = -2,0$ T, e a variação do fluxo magnético é:

$$\begin{aligned} \Delta\Phi &= \Delta B \cdot A \cdot \cos 0^\circ = -2,0 \cdot 1,5 \cdot 10^{-2} \Rightarrow \\ \Rightarrow \Delta\Phi &= -3,0 \cdot 10^{-2} \text{ Wb} \end{aligned}$$

$$\text{A fem média é dada pela lei de Faraday-Neumann: } e_m = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

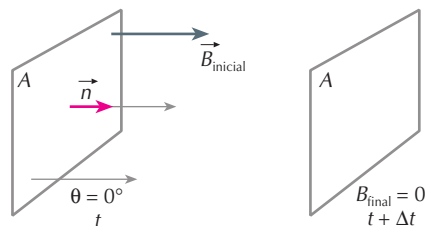
Sendo R a resistência elétrica da espira, podemos calcular a intensidade média da corrente elétrica que circula pela espira:

$$i = \frac{e}{R} = -\frac{\Delta\Phi}{R \cdot \Delta t}$$

$$\text{Mas } i = \frac{\Delta q}{\Delta t}, \text{ logo: } \frac{\Delta q}{\Delta t} = -\frac{\Delta\Phi}{R \cdot \Delta t} \Rightarrow \Delta q = -\frac{\Delta\Phi}{R}$$

$$\text{Como } R = 4,0 \Omega \text{ e } \Delta\Phi = -3,0 \cdot 10^{-2} \text{ Wb, vem: } \Delta q = -\frac{(-3,0 \cdot 10^{-2})}{4,0} \Rightarrow \Delta q = 7,5 \cdot 10^{-3} \text{ C}$$

Resposta: $7,5 \cdot 10^{-3}$ C



EXERCÍCIOS PROPOSTOS

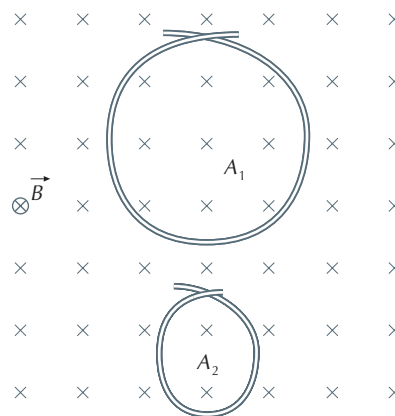
P. 375 (EEFFE São Carlos-SP) Uma espira circular de área 1 m^2 é colocada em um campo magnético. O campo mantém-se perpendicular ao plano da espira, porém sua intensidade diminui uniformemente à razão de 2 T por segundo. Calcule a intensidade de corrente que circula pela espira se sua resistência elétrica vale 4Ω .

P. 376 Uma bobina chata é formada de 200 espiras de 4 cm de raio e está colocada em um campo magnético uniforme. Determine a fem induzida nessa bobina se a intensidade do campo perpendicular ao plano das espiras varia de $0,01 \text{ T}$ a 0 em 1 segundo.

P. 377 Uma espira de área $6,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ e resistência elétrica $2,0 \cdot 10^{-2} \Omega$ é disposta perpendicularmente a um campo magnético uniforme de indução $B = 5,0 \cdot 10^{-3} \text{ T}$.

- Calcule o fluxo magnético através da espira.
- Se a intensidade do campo diminuir uniformemente para $2,0 \cdot 10^{-3} \text{ T}$, num certo intervalo de tempo, calcule a quantidade de carga elétrica induzida que circula pela espira nesse intervalo de tempo.

P. 378 (Efei-MG) Na figura abaixo, tem-se um campo magnético uniforme, de intensidade $0,40 \text{ T}$, perpendicular ao plano do papel. Nesse plano, está uma espira cujo comprimento pode aumentar ou diminuir. Em $0,10 \text{ s}$, verifica-se que a área passa do valor $A_1 = 1,20 \text{ cm}^2$ para o valor $A_2 = 0,30 \text{ cm}^2$. Calcule a fem induzida na espira e indique, em um esquema, o sentido da corrente induzida.



1 Autoindução

Considere o circuito da **figura 14**, onde circula a corrente elétrica i , que origina o campo $\vec{B}$. Esse campo determina o fluxo magnético Φ_a através da espira, denominado **fluxo autoinduzido**. Verifica-se, experimentalmente, que Φ_a é diretamente proporcional à intensidade de corrente i :

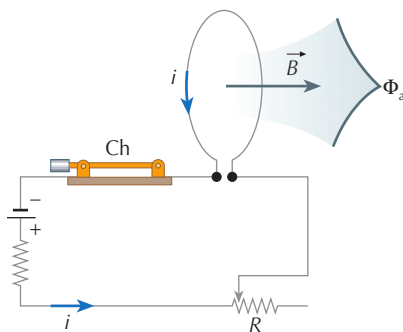


Figura 14. A corrente elétrica, em um circuito, determina um fluxo autoinduzido no próprio circuito.

$$\Phi_a = L \cdot i$$

O coeficiente L depende da configuração do circuito e do meio no qual ele se encontra. Esse coeficiente é denominado **indutância** do circuito.

Na **figura 14**, mudando-se a posição do cursor no reostato, variamos i e, por conseguinte, Φ_a . Então, aparece uma fem induzida e_a no próprio circuito, que, por sua vez, é ao mesmo tempo circuito indutor e circuito induzido. Esse é o fenômeno da **autoindução**.

No intervalo de tempo Δt , tem-se $\Delta \Phi_a = L \cdot \Delta i$ e, pela lei de Faraday-Neumann, a fem autoinduzida média é dada por:

$$e_{a(m)} = - \frac{\Delta \Phi_a}{\Delta t} \Rightarrow e_{a(m)} = -L \cdot \frac{\Delta i}{\Delta t}$$

No Sistema Internacional de Unidades, a unidade de indutância L denomina-se **henry** (símbolo **H**), em homenagem ao físico Joseph Henry*.

Pela lei de Lenz, a **fem autoinduzida** age sempre em sentido oposto ao da variação da própria corrente elétrica no circuito. Por isso, ao se fechar a chave Ch do circuito da **figura 14**, a corrente elétrica não se estabelece imediatamente com a intensidade prevista pela lei de Ohm, mas cresce gradativamente, conforme o gráfico da **figura 15**. O intervalo de tempo para a intensidade da corrente elétrica se manter constante depende da indutância L e da resistência elétrica do circuito. Ao se abrir a chave Ch, a corrente elétrica não cai imediatamente para zero, mas verifica-se, nos terminais da chave, uma faísca que ainda mantém uma circulação de corrente elétrica por breve intervalo de tempo.

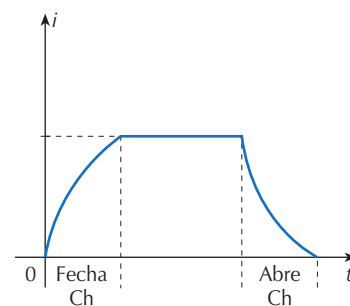


Figura 15. Variação da intensidade da corrente elétrica ao se fechar e abrir um circuito.

EXERCÍCIO RESOLVIDO

R. 149 Tem-se um solenoide, cujo meio é o ar, de comprimento $x = 40$ cm, constituído de $N = 1.000$ espiras de raio 2 cm. Calcule sua indutância, sendo $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$.

Solução:

A indutância vale $L = \frac{\Phi_a}{i}$. No solenoide de $N = 1.000$ espiras, com $x = 40$ cm = 0,4 m de comprimento, percorrido pela corrente elétrica i , o vetor indução magnética tem intensidade:

$$B = \mu_0 \cdot \frac{N}{x} \cdot i$$

A área de cada espira é:

$$A = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot (2 \cdot 10^{-2})^2 \Rightarrow A = 4\pi \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

O fluxo magnético nas N espiras será dado por:

$$\Phi_a = NBA \Rightarrow \Phi_a = N \cdot \mu_0 \cdot \frac{N}{x} \cdot i \cdot A \Rightarrow \frac{\Phi_a}{i} = \mu_0 \cdot N^2 \cdot \frac{A}{x}$$

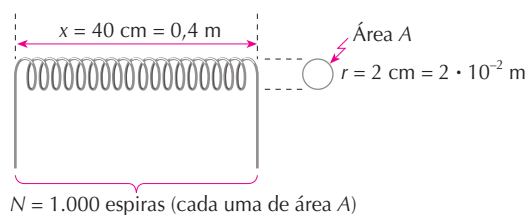
Assim:

$$L = \mu_0 \cdot N^2 \cdot \frac{A}{x} \Rightarrow L = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot (10^3)^2 \cdot \frac{4\pi \cdot 10^{-4}}{0,4} \Rightarrow L \approx 4 \cdot 10^{-3} \text{ H}$$

Resposta: $4 \cdot 10^{-3} \text{ H}$

Observação:

Note, neste exercício, que o henry é uma unidade muito grande. A indutância, na prática, é frequentemente medida em milihenry ($1 \text{ mH} = 10^{-3} \text{ H}$) ou mesmo em microhenry ($1 \mu\text{H} = 10^{-6} \text{ H}$).



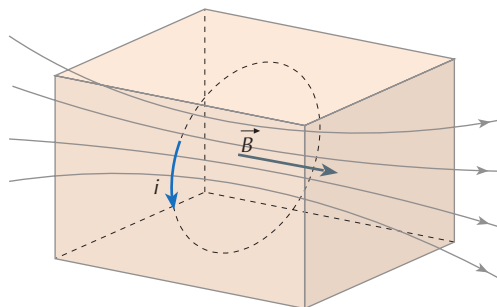
EXERCÍCIO PROPOSTO

P. 379 Uma bobina tem indutância de 0,25 H. Calcule a fem induzida média na bobina quando a corrente decresce de 2,0 A a zero em 10 s.

* **HENRY**, Joseph (1797-1878), físico norte-americano que continuou os trabalhos de Faraday sobre a indução eletromagnética. Descobriu o fenômeno da autoindução e analisou as correntes de abertura e fechamento de um circuito.

2 Correntes de Foucault

Até agora consideramos apenas condutores em forma de fio, mas podemos obter também correntes induzidas em condutores maciços. Consideremos um cubo de cobre fixo (**fig. 16**), submetido a um campo magnético variável. Dentro desse cubo podemos encontrar grande número de percursos fechados, como o que se destaca na figura. Em cada percurso fechado, o fluxo magnético varia com o tempo e, portanto, f.e.m.s induzidas fazem circular, no interior do cubo, correntes induzidas, chamadas **correntes de Foucault***.

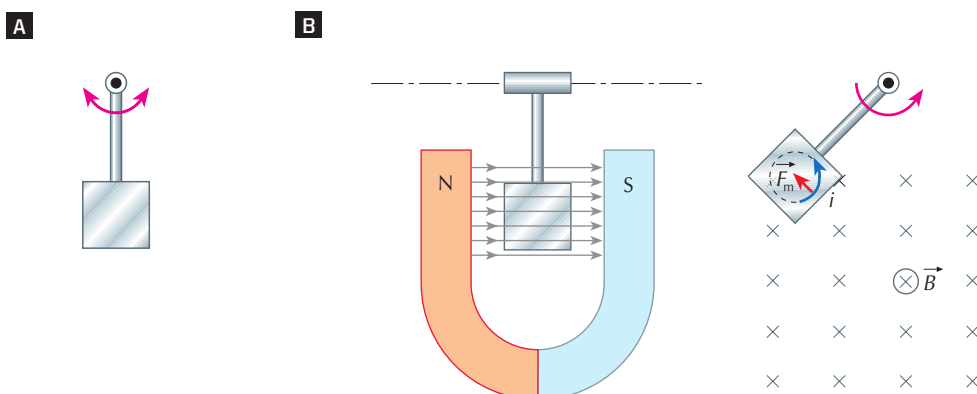


▲ **Figura 16.** Quando um cubo de cobre fixo é submetido a um campo magnético variável, surgem as correntes de Foucault.

Se considerarmos que um condutor maciço tem resistência elétrica muito pequena, as correntes de Foucault podem atingir intensidades muito elevadas. Quando isso ocorre, há dissipação de consideráveis quantidades de energia, causando o aquecimento do condutor.

A principal aplicação desse fenômeno é na construção dos **fornos de indução**, em que uma peça metálica se funde devido ao efeito Joule originado pelas correntes de Foucault.

Podem-se obter também correntes de Foucault quando o condutor maciço se move em um campo magnético uniforme. Na **figura 17**, a variação do fluxo magnético é devida à variação da área do pêndulo que atravessa o campo.



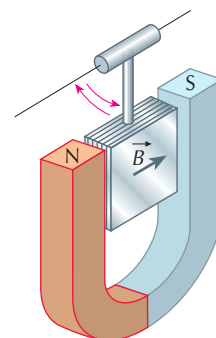
▲ **Figura 17.** (A) Pêndulo oscilando livremente. (B) Pêndulo oscilando entre as faces de um ímã em forma de ferradura.

O condutor é ligado por meio de um cabo isolante a um eixo, formando um pêndulo que, de início, oscila livremente (**fig. 17A**).

Colocando-se um ímã em forma de ferradura perpendicularmente ao plano de oscilação do pêndulo, verificamos que as oscilações são acentuadamente amortecidas. As forças magnéticas, agindo sobre as correntes de Foucault, freiam o pêndulo (**fig. 17B**).

* **FOUCAULT**, Léon (1819-1868), físico francês. Imaginou o método do espelho giratório para a medida de velocidade da luz e demonstrou a existência das correntes induzidas em corpos maciços condutores.

Algumas vezes, as correntes de Foucault são indesejáveis e, para reduzi-las, o condutor é constituído de lâminas, isoladas umas das outras por meio de um esmalte especial e dispostas paralelamente às linhas de indução (**fig. 18**). Essa disposição das lâminas aumenta a resistência elétrica e diminui a intensidade das correntes de Foucault. Utiliza-se esse esquema em muitas máquinas elétricas, como o transformador (como veremos na seção 16.2), nas quais é necessário diminuir a dissipação de energia elétrica.



► **Figura 18.** Para reduzir as correntes de Foucault, o condutor maciço é laminado e as lâminas são isoladas.

3 Bobina de indução

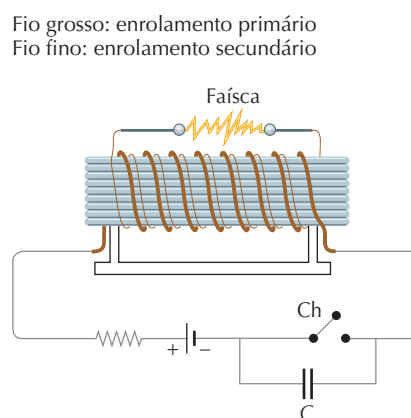
Uma importante aplicação da indução eletromagnética é a **bobina de indução**, destinada à obtenção de elevadas ddp's.

Considere um solenoide de fio de cobre grosso (**fig. 19**) ligado a um gerador de corrente contínua por meio de uma chave Ch. Esse solenoide denomina-se **enrolamento primário**. No seu interior, é colocado um núcleo cilíndrico, formado por um feixe de arames de ferro justapostos, mas isolados entre si, a fim de se reduzirem as correntes de Foucault. Observe também o conjunto de espiras de fio de cobre fino em circuito aberto, chamado **enrolamento secundário**. O **enrolamento secundário é totalmente independente do primário**.

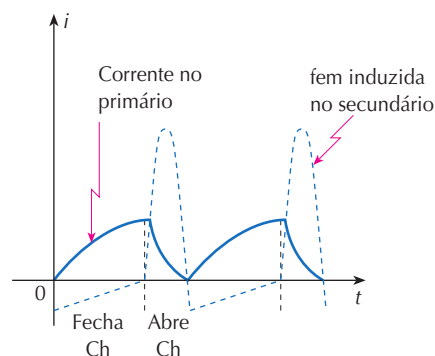
Interrompendo-se periodicamente a corrente no enrolamento primário (fechando e abrindo Ch), o fluxo magnético é variável. Originam-se, então, no enrolamento secundário, fems induzidas que podem assumir valores bastante elevados, como mostra o gráfico da **figura 20**. Normalmente, o ar é um isolante, mas, quando há uma grande ddp entre dois terminais próximos, o circuito pode ser fechado momentaneamente pela ionização das moléculas do ar. Quando isso ocorre nos terminais do enrolamento secundário, salta a faísca destacada na **figura 19**.

A eficiência da bobina é aumentada pela ligação do capacitor (**fig. 19**). Sem o capacitor, o faiscamento na chave retardaria a interrupção do circuito, o que diminuiria a fem induzida no secundário.

Uma importante utilização prática da bobina de indução é no circuito de ignição dos motores a explosão. Nesse circuito devem-se obter altas ddp's, a fim de provocar, no interior dos cilindros, a faísca que originará a combustão da mistura ar-combustível. A interrupção da corrente no circuito primário é feita eletronicamente pelo **sistema de ignição transistorizada**.



► **Figura 19.** Bobina de indução.



► **Figura 20.** Gráfico da corrente no primário e da fem induzida no secundário de uma bobina de indução em função do tempo.

Entre na rede No endereço <http://www.micro.magnet.fsu.edu/electromag/java/speaker> (acesso em julho/2009), você pode verificar o funcionamento de um alto-falante.

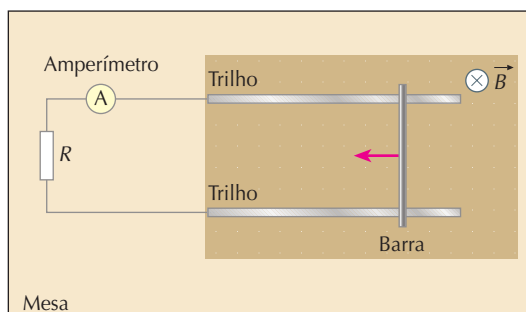


Conteúdo digital Moderna PLUS <http://www.modernaplus.com.br>
A Física em nosso Mundo: Aplicações práticas dos fenômenos magnéticos



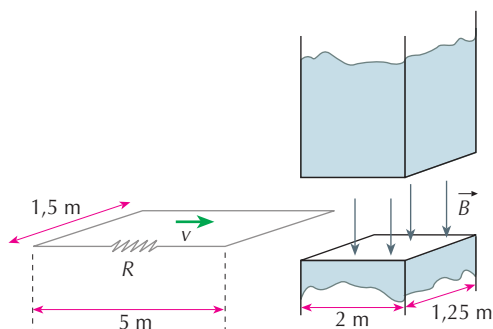
EXERCÍCIOS PROPOSTOS DE RECAPITULAÇÃO

- P. 380** (UFMG) Em uma aula de eletromagnetismo, o professor Emanuel faz a montagem mostrada, esquematicamente, na figura. Nessa montagem, uma barra de metal não magnético está em contato elétrico com dois trilhos metálicos paralelos e pode deslizar sobre eles, sem atrito. Esses trilhos estão fixos sobre uma mesa horizontal, em uma região onde há um campo magnético uniforme, vertical e para baixo, que está indicado, na figura, pelo símbolo $\otimes$. Os trilhos são ligados em série a um amperímetro e a um resistor R . Considere que, inicialmente, a barra está em repouso. Em certo momento, Emanuel empurra a barra no sentido indicado pela seta e, em seguida, solta-a. Nessa situação, ele observa uma corrente elétrica no amperímetro.



- Com base nessas informações, indique, na figura, o sentido da corrente elétrica observada por Emanuel. Justifique sua resposta.
- Após a barra ser solta, sua velocidade **diminui**, **permanece constante** ou **aumenta** com o tempo? Justifique sua resposta.

- P. 381** (Fuvest-SP) Uma espira condutora ideal, com 1,5 m por 5,0 m, é deslocada com velocidade constante, de tal forma que um de seus lados atravessa uma região onde existe um campo magnético $\vec{B}$, uniforme, criado por um grande eletroímã. Esse lado da espira leva 0,5 s para atravessar a região do campo. Na espira está inserida uma resistência R com as características descritas. Em consequência do movimento da espira, durante esse intervalo de tempo, observa-se uma variação de temperatura, em R , de 40°C . Essa medida de temperatura pode, então, ser utilizada como uma forma indireta para estimar o valor do campo magnético $\vec{B}$.



Assim, determine:

- a energia E , em joules, dissipada no resistor sob a forma de calor;
- a corrente I , em ampères, que percorre o resistor durante o aquecimento;
- o valor do campo magnético $\vec{B}$, em teslas.

Características do resistor R :

massa = 1,5 g

resistência = $0,40\ \Omega$

calor específico = $0,33\ \text{cal/g} \cdot ^\circ\text{C}$

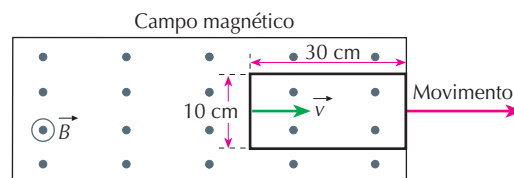
Note e adote:

$1\ \text{cal} \approx 4\ \text{J}$

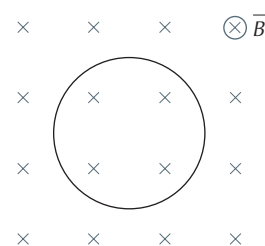
$F = I \cdot B \cdot L$ é a intensidade da força $\vec{F}$ que age sobre um fio de comprimento L , percorrido por uma corrente I , em um campo magnético $\vec{B}$.

$|\text{fem}| = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$, ou seja, o módulo da força eletromotriz induzida é igual à variação do fluxo magnético Φ por unidade de tempo. $\Phi = B \cdot S$, onde B é a intensidade do campo através de uma superfície de área S , perpendicular ao campo.

- P. 382** Uma espira retangular, de dimensões 30 cm por 10 cm e resistência de 10 ohms, move-se com velocidade de 5 cm/s, perpendicularmente ao campo magnético uniforme de indução 2 T. Qual é a intensidade e o sentido da corrente elétrica induzida na espira, 2 s após a situação indicada na figura?



- P. 383** Uma espira está imersa num campo magnético de indução $\vec{B}$, conforme indica a figura.



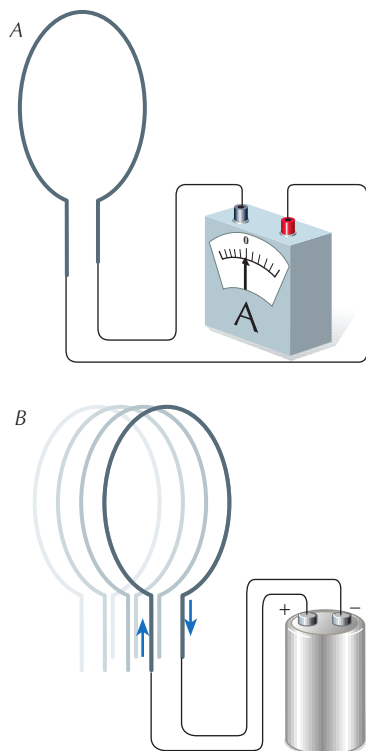
Determine o sentido da corrente induzida na espira, quando:

- B cresce com o tempo;
- B decresce com o tempo.

- P. 384** (Faap-SP) Uma espira quadrada de 8 cm de lado é perpendicular a um campo magnético, tal que a indução magnética vale $5 \cdot 10^{-3}\ \text{T}$.

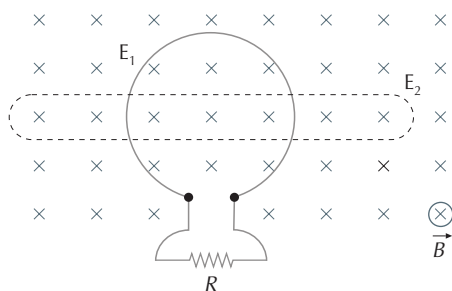
- Calcule o fluxo magnético através da espira.
- Se o campo cai a zero em 0,1 s, qual será a fem média induzida na espira nesse intervalo de tempo?

- P. 385** Na figura, as espiras A e B estão dispostas em planos paralelos. A espira A está ligada a um amperímetro e a B, a uma bateria. Determine o sentido da corrente elétrica induzida em A quando se afasta a espira B, mantendo-a paralela a A.



- P. 386** (UFV-MG) Uma bobina retangular, com uma resistência total de $4,0 \, \Omega$, é constituída de 10 espiras de $20 \, \text{cm} \times 30 \, \text{cm}$. Essa bobina está imersa em um campo magnético perpendicular a seu plano, que varia uniformemente de $8,0 \, \text{T}$ a $16,0 \, \text{T}$ no intervalo de tempo de $1,2 \, \text{s}$. Calcule, na bobina:
- a força eletromotriz induzida;
 - a intensidade da corrente.

- P. 387** Uma espira circular E_1 , de diâmetro $20 \, \text{cm}$ e resistência desprezível, está ligada a um resistor de resistência $R = 0,01 \, \Omega$ e colocada em um campo de indução magnética uniforme perpendicular a seu plano, de intensidade $B = 0,6 \, \text{T}$, conforme a figura.

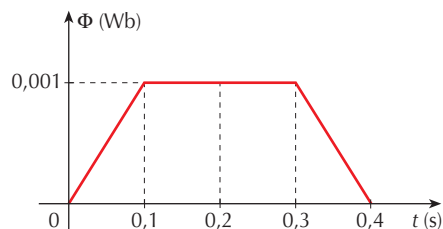


Em $0,1 \, \text{s}$ a espira se deforma, conforme E_2 , onde sua área se torna igual a $14 \, \text{cm}^2$. Determine:

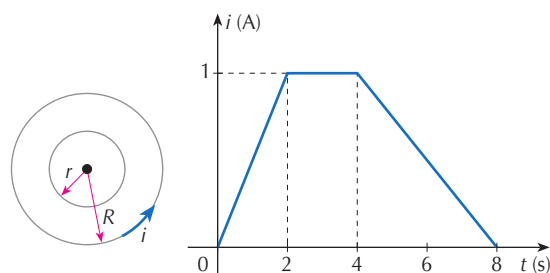
- a fem induzida média;
- a intensidade de corrente que se estabelece no circuito e o seu sentido.

- P. 388** (Vunesp) O gráfico mostra como varia com o tempo o fluxo magnético através de cada espira de uma bobina de 400 espiras, que foram enroladas próximas umas das outras para se ter garantia de que todas seriam atravessadas pelo mesmo fluxo.

- Explique por que a fem induzida na bobina é zero entre $0,1 \, \text{s}$ e $0,3 \, \text{s}$.
- Determine a máxima fem induzida na bobina.



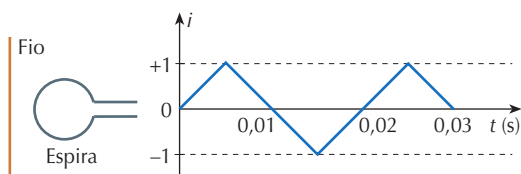
- P. 389** (UFU-MG) Duas espiras circulares, de raios $r = 0,01 \, \text{m}$ e $R = 1,0 \, \text{m}$, têm o centro comum e estão situadas no mesmo plano, como mostra a figura. Pela espira maior passa uma corrente i , que varia com o tempo de acordo com o gráfico. Admita que o campo magnético produzido através da área da espira menor seja praticamente uniforme.



Se a resistência da espira menor é de $0,1 \, \Omega$, pede-se:

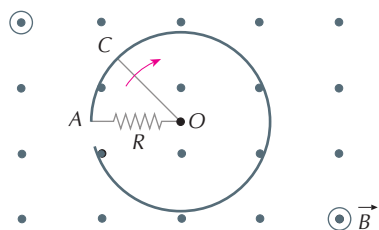
- o fluxo magnético através da área limitada pela espira menor durante o intervalo de tempo entre $t = 2 \, \text{s}$ e $t = 4 \, \text{s}$.
 - o gráfico da corrente induzida na espira menor no intervalo entre $t = 0 \, \text{s}$ e $t = 8 \, \text{s}$.
 - o sentido da corrente induzida nos intervalos de tempo dados (0 a $2 \, \text{s}$; $2 \, \text{s}$ a $4 \, \text{s}$; $4 \, \text{s}$ a $8 \, \text{s}$).
- Dados: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \, \text{T} \cdot \text{m/A}$ e $\pi^2 \approx 10$

- P. 390** (Unicamp-SP) Um fio condutor retilíneo longo é colocado no plano que contém uma espira condutora conforme a figura abaixo. O fio é percorrido por uma corrente i cuja variação em função do tempo é representada na figura.



- Qual a frequência da corrente que percorre o fio retilíneo?
- Faça um gráfico do fluxo magnético que atravessa a espira em função do tempo.
- Faça um gráfico da força eletromotriz induzida nos terminais da espira em função do tempo.

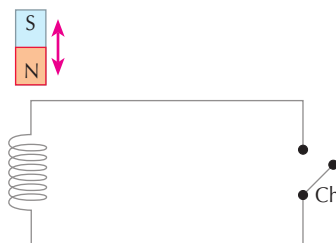
- P. 391** No circuito da figura, representa-se uma espira metálica de centro O , com uma pequena abertura ao lado do ponto A , um resistor R e um condutor OC , de comprimento $0,4\text{ m}$ e que gira, no sentido horário, em torno de O com movimento de rotação uniforme de frequência $0,2\text{ Hz}$. O circuito está imerso num campo magnético de indução uniforme de intensidade $0,5\text{ T}$, perpendicular ao plano do circuito e orientado para fora da folha.



Sabendo que no instante inicial a extremidade C do condutor OC estava sobre o ponto A , determine:

- o valor absoluto da fem média induzida no circuito fechado ACO ;
- o sentido da corrente induzida no resistor R .

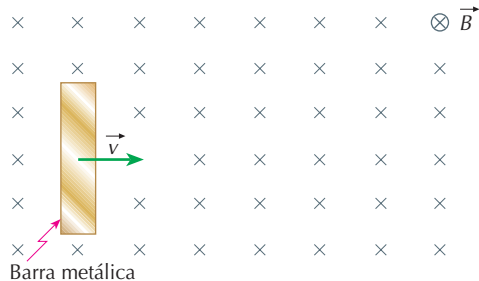
- P. 392** Os terminais de um solenoide são ligados a uma chave Ch , conforme a figura a seguir. Mantendo-se fixo o solenoide, põe-se a oscilar, ao longo de seu eixo, um ímã.



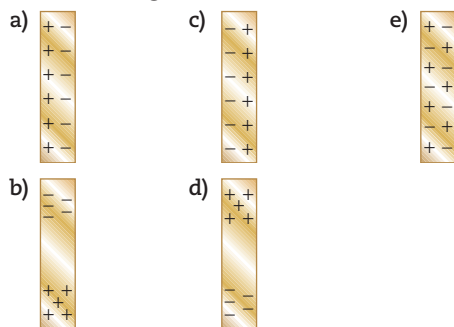
- O que ocorre estando Ch aberta e a seguir fechada?
- E no caso de se substituir o solenoide por um disco metálico?

TESTES PROPOSTOS

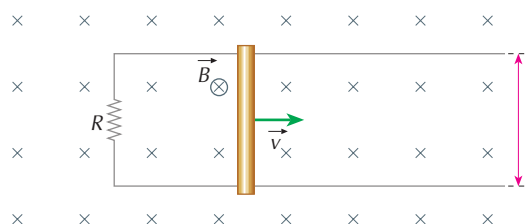
- T. 372** (UFV-MG) Uma barra metálica neutra desloca-se com velocidade constante $\vec{v}$, na presença do campo magnético uniforme $\vec{B}$.



Assinale a figura que **melhor** representa a distribuição de cargas na barra:



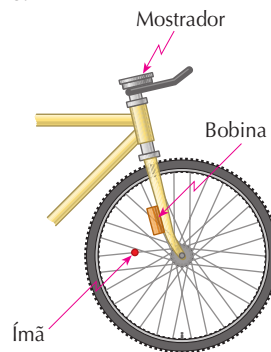
- T. 373** (ITA-SP) Uma barra metálica de comprimento $L = 50,0\text{ cm}$ faz contato com um circuito, fechando-o. A área do circuito é perpendicular ao campo de indução magnética uniforme B . A resistência do circuito é $R = 3,00\ \Omega$, sendo de $3,75 \cdot 10^{-3}\text{ N}$ a intensidade da força constante aplicada à barra, para mantê-la em movimento uniforme com velocidade $v = 2,00\text{ m/s}$.



Nessas condições, o módulo de B é:

- $0,300\text{ T}$
- $0,225\text{ T}$
- $0,200\text{ T}$
- $0,150\text{ T}$
- $0,100\text{ T}$

- T. 374** (UFJF-MG) Um dispositivo usado para medir a velocidade de bicicletas é composto de um pequeno ímã preso a um dos raios e uma bobina fixa no garfo. Esta é ligada por fios condutores a um mostrador preso ao guidão, conforme representado na figura abaixo.

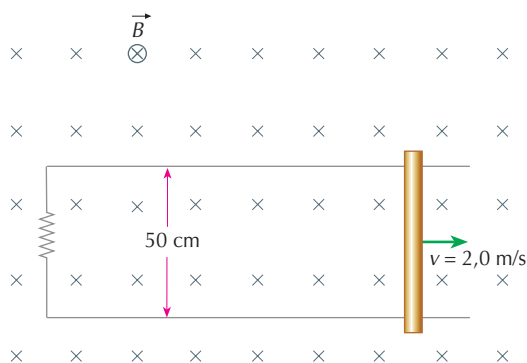


A cada giro da roda, o ímã passa próximo à bobina, gerando um pulso de corrente que é detectado e processado pelo mostrador. Assinale, entre as alternativas abaixo, a que explica a geração deste pulso de corrente na bobina.

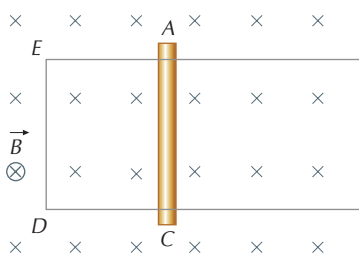
- A passagem do ímã próximo à bobina produz uma variação do fluxo do campo magnético na bobina que, de acordo com a lei de Faraday-Lenz, gera o pulso de corrente.
- Por estar em movimento circular, o ímã está acelerado, emitindo raios X, que são detectados pela bobina, gerando o pulso de corrente.
- Na passagem do ímã próximo à bobina, devido à lei de Coulomb, elétrons são emitidos pelo ímã e absorvidos pela bobina, gerando o pulso de corrente.
- A passagem do ímã próximo à bobina produz uma variação do fluxo do campo elétrico na bobina que, de acordo com a lei de Ampère, gera o pulso de corrente.
- Devido à lei de Ohm, a passagem do ímã próximo à bobina altera sua resistência, gerando o pulso de corrente.

T. 375 (UFPA) A figura mostra uma barra metálica que faz contato com um circuito aberto, fechando-o. A área do circuito é perpendicular a um campo magnético constante $B = 0,15 \text{ T}$. A resistência total do circuito é de $3,0 \Omega$. Qual é a intensidade da força necessária para mover a barra, como indicado na figura, com uma velocidade constante igual a $2,0 \text{ m/s}$?

- $5,5 \cdot 10^{-1} \text{ N}$
- $2,50 \cdot 10^{-2} \text{ N}$
- $3,75 \cdot 10^{-3} \text{ N}$
- $2,25 \cdot 10^{-3} \text{ N}$
- $5,50 \cdot 10^{-4} \text{ N}$



T. 376 (UFMS) Considere um campo magnético de intensidade B , perpendicular e entrando no plano desta página, e um circuito elétrico constituído pelos condutores ACDE, contidos no plano desta mesma página. A haste AC pode se movimentar paralelamente ao trecho DE (figura abaixo).

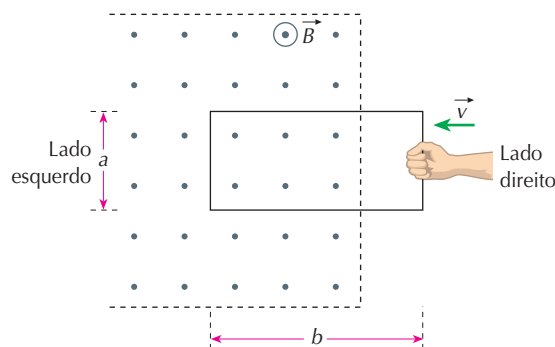


Assim, é correto afirmar que:

- Enquanto B for aumentando, uma força magnética induzida tenderá a afastar a haste AC de DE.
- Se B for aumentando e a haste mantida fixa, elétrons irão movimentar-se de A para C.
- Não há um fluxo magnético através do circuito ACDE.
- Se B aumentando e a haste mantida fixa, ter-se-á a ddp induzida $V_A - V_C > 0$.
- Se B permanecer constante e a haste AC for forçada a se aproximar de DE, o sentido da corrente elétrica induzida será de A para C.
- Enquanto B for aumentando, o campo magnético induzido, dentro do circuito ACDE, terá o mesmo sentido do campo magnético de intensidade B .

Dê como resposta a soma dos números que precedem as afirmações corretas.

T. 377 (UFSC) Ao fazer uma demonstração em uma aula experimental, um professor de Física introduz uma espira metálica retangular de lados medindo a e b , com velocidade constante $\vec{v}$, em uma região onde há um campo magnético $\vec{B}$ constante, perpendicular ao plano da espira, como mostra a figura. O trecho esquerdo da espira, de comprimento a , tem resistência R e o restante dela tem resistência desprezível.

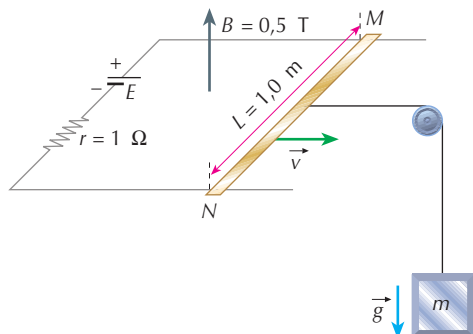


Assinale a(s) proposição(ões) correta(s).

- O sentido da corrente induzida na espira é horário.
- A transformação do trabalho mecânico realizado pelo professor em energia térmica na espira é explicada pelo princípio da conservação da energia.
- O fluxo magnético dentro do plano da espira não varia, pois o campo magnético $\vec{B}$, na região, tem módulo constante.
- A lei de Lenz, que determina o sentido da corrente induzida na espira, é uma consequência do princípio da conservação da energia.
- Atua sobre o fio esquerdo da espira, de resistência R e comprimento a , uma força magnética de módulo $\frac{B^2 \cdot a^2 \cdot v}{R}$, direção horizontal e sentido da direita para a esquerda.

Dê como resposta a soma dos números que precedem as afirmativas corretas.

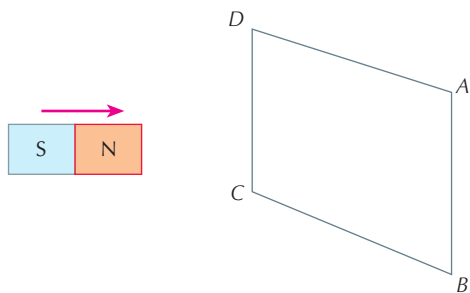
T. 378 No sistema da figura, a barra condutora MN, de resistência desprezível, se desloca com velocidade constante $v = 20 \text{ m/s}$, apoiada em trilhos condutores retos, paralelos e de resistência desprezível, puxada por um corpo de massa $m = 2 \text{ kg}$. Nas extremidades do trilho está ligado um gerador de força eletromotriz E e resistência interna r . A aceleração da gravidade é $g = 10 \text{ m/s}^2$ e o campo de indução magnética é B , perpendicular ao plano do sistema.



A força eletromotriz induzida na barra e a força eletromotriz E valem, respectivamente:

- 12 V e 10 V
- 6 V e 20 V
- 10 V e 50 V
- 50 V e 10 V
- 10 V e 30 V

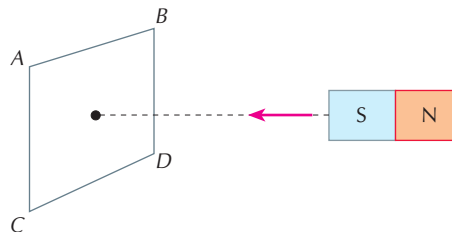
T. 379 (UEL-PR) Um ímã, em forma de barra, atravessa uma espira condutora retangular ABCD, disposta verticalmente, conforme a figura abaixo.



Nessas condições, é correto afirmar que, na espira:

- não aparecerá corrente elétrica induzida nem quando o ímã se aproxima nem quando se afasta da espira.
- tem-se uma corrente elétrica induzida, no sentido de A para B, apenas quando o ímã se aproxima da espira.
- tem-se uma corrente elétrica induzida, no sentido de A para B, tanto quando o ímã se aproxima como quando se afasta da espira.
- tem-se uma corrente elétrica induzida, no sentido de B para A, tanto quando o ímã se aproxima como quando se afasta da espira.
- tem-se uma corrente elétrica induzida, no sentido de A para B, apenas quando o ímã se afasta da espira.

T. 380 (UnB-DF) Na figura, N e S são, respectivamente, os polos norte e sul de um ímã permanente, e ABCD é uma espira retangular.



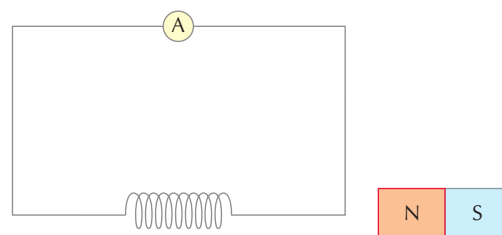
Então:

- Se o polo sul do ímã estiver sendo aproximado da espira, no sentido indicado pela seta, haverá uma corrente induzida na espira que flui no sentido ACDB.
- Se cortarmos a espira no ponto A, por exemplo, e aproximarmos da espira o polo sul do ímã, embora não haja corrente induzida, haverá uma fem induzida.
- Se o polo sul do ímã estiver sendo afastado da espira, no sentido da esquerda para a direita, a corrente induzida na espira terá o mesmo sentido da corrente que seria induzida nesta, se aproximássemos dela o polo norte do ímã, no sentido da direita para a esquerda.

Responda:

- se somente as proposições II e III forem corretas.
- se somente as proposições I e III forem corretas.
- se somente as proposições I e II forem corretas.
- nenhuma dessas é correta.

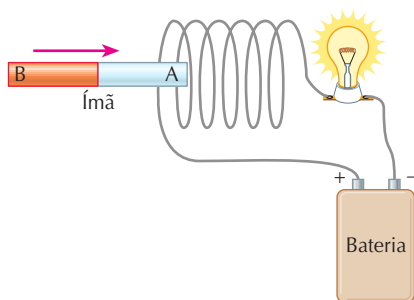
T. 381 (UFMG) A figura mostra um ímã próximo a um circuito constituído por uma bobina e um medidor sensível de corrente.



Colocando-se a bobina e o ímã em determinados movimentos, o medidor poderá indicar passagem de corrente na bobina. Não há indicação de passagem de corrente pelo medidor quando:

- o ímã e a bobina se movimentam, aproximando-se.
- a bobina se aproxima do ímã, que permanece parado.
- o ímã se desloca para a direita e a bobina para a esquerda.
- o ímã e a bobina se deslocam ambos para a direita com a mesma velocidade.
- o ímã se aproxima da bobina e esta permanece parada.

T. 382 (Vunesp) Em um circuito, uma bateria fornece uma ddp constante para manter uma lâmpada acesa, como mostra a figura.

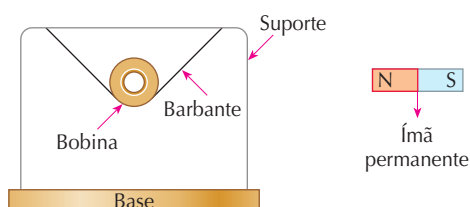


Um ímã é inserido rapidamente entre as espiras formadas com o fio do circuito que liga a lâmpada à bateria.

Pode-se dizer que, durante o período de tempo em que o ímã é inserido, o brilho da lâmpada:

- diminui apenas para o caso em que A é o polo norte do ímã.
- diminui apenas para o caso em que A é o polo sul do ímã.
- diminui, qualquer que seja o polo em A.
- não se altera, qualquer que seja o polo em A.
- não se altera porque o processo é rápido.

T. 383 (Unemat-MT) Um professor de Física resolve efetuar um experimento sobre eletromagnetismo envolvendo a lei de Faraday e a lei de Lenz. Para tanto, ele montou uma bobina com 4 cm de diâmetro interno, com 20 voltas de um fio fino de cobre ($d = 0,5 \text{ mm}$), montando o experimento de acordo com o esquema abaixo:



Para demonstrar essas leis, o professor introduziu lentamente o polo norte de um ímã permanente ao longo do eixo da bobina, notando que ela não foi atraída ou repelida pelo ímã. Feito isso, afastou rapidamente o ímã ao longo do eixo da bobina. Num segundo momento, o professor aproximou rapidamente o polo norte do ímã ao longo do eixo da bobina.

Com essas duas atividades é possível afirmar que:

- Pela lei de Faraday, ao se aproximar ou afastar rapidamente o ímã ao longo do eixo da bobina, vai ocorrer variação do fluxo do campo magnético, gerando uma corrente induzida na bobina, criando nela um campo magnético.
- Pela lei de Lenz, o afastamento rápido do ímã gerou uma corrente induzida que opôs a variação do fluxo do campo magnético. Sendo assim, a corrente circulou de tal forma a impedir esse afastamento, criando um polo sul na face da bobina, atraindo-a.

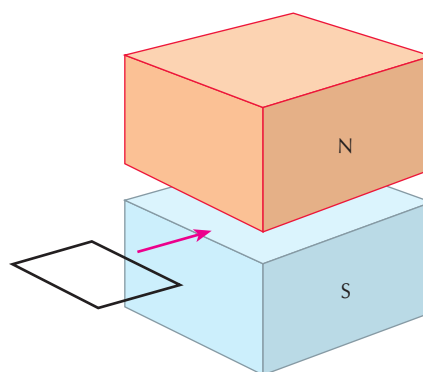
(04) Pela lei de Faraday, ao aproximar rapidamente o ímã da bobina, gerou uma corrente induzida na bobina e, pela lei de Lenz, o sentido da corrente induzida vai se opor à variação do fluxo do campo magnético, criando um polo norte na face da bobina, repelindo-a.

(08) Tanto o afastamento como a aproximação rápida do ímã ao longo do eixo da bobina, pela lei de Faraday, vão gerar uma corrente induzida na bobina. E, pela lei de Lenz, a corrente induzida não vai se opor à variação do fluxo do campo magnético, de tal forma que a bobina será sempre atraída pelo ímã.

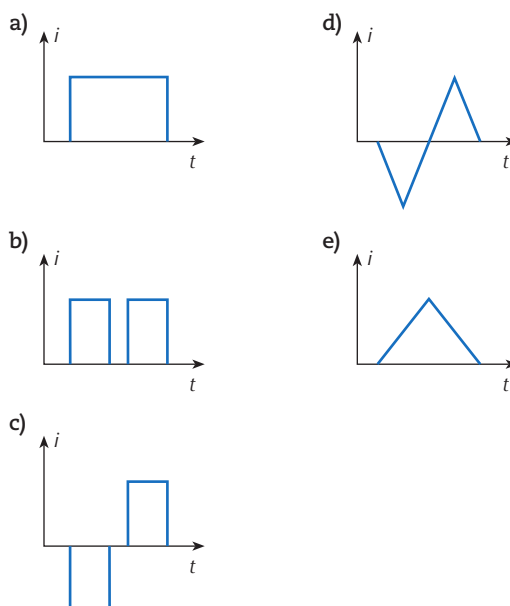
(16) Tanto o afastamento como a aproximação rápida do ímã ao longo do eixo da bobina, pela lei de Faraday, vão gerar uma corrente induzida na bobina. E, pela lei de Lenz, a corrente induzida não vai se opor à variação do fluxo do campo magnético, de tal forma que a bobina será sempre repelida pelo ímã.

Dê como resposta a soma dos números que precedem as afirmações corretas.

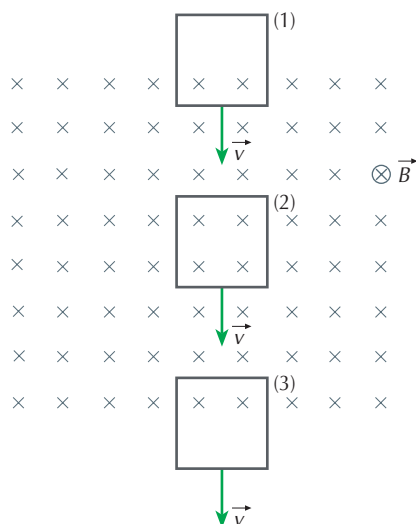
T. 384 (UFC-CE) Uma espira retangular condutora passa com velocidade constante entre os polos de um ímã, conforme a figura abaixo.



Assinale a alternativa que melhor representa a variação da intensidade i da corrente elétrica com o tempo t , enquanto a espira atravessa o espaço entre os polos do ímã.



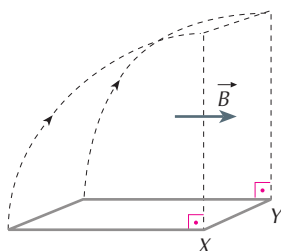
- T. 385** (UFRGS-RS) A figura mostra três posições sucessivas de uma espira condutora que se desloca com velocidade constante numa região em que há um campo magnético uniforme, perpendicular à página e para dentro da página.



Selecione a alternativa que supre as omissões nas frases seguintes:

- I. Na posição (1), a espira está penetrando na região onde existe o campo magnético e, conseqüentemente, está o fluxo magnético através da espira.
 - II. Na posição (2), não há na espira.
 - III. Na posição (3), a corrente elétrica induzida na espira, em relação à corrente induzida na posição (1), tem sentido .
- a) aumentando, fluxo, igual
 - b) diminuindo, corrente, contrário
 - c) diminuindo, fluxo, contrário
 - d) aumentando, corrente, contrário
 - e) diminuindo, fluxo, igual

- T. 386** (Unifesp) A figura representa a vista de perfil de uma espira condutora retangular fechada, que pode girar em torno do eixo XY.

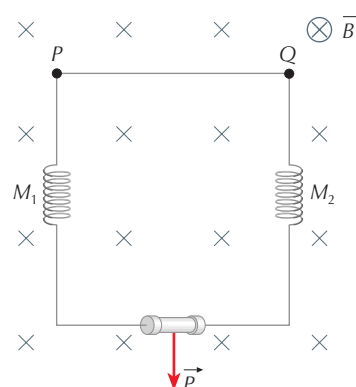


Se essa espira for girada de 90° , por uma força externa, de forma que seu plano, inicialmente paralelo às linhas do campo magnético uniforme $\vec{B}$, se torne perpendicular a essas linhas, pode-se afirmar que:

- a) aparece uma corrente elétrica induzida na espira, que gera um campo magnético que se opõe a essa rotação.
- b) aparece uma corrente elétrica induzida na espira, que gera um campo magnético que favorece essa rotação.
- c) aparece uma corrente elétrica oscilante induzida na espira, que gera um campo magnético oscilante.

- d) aparecem correntes elétricas induzidas de sentidos opostos em lados opostos da espira, que, por isso, não geram campo magnético.
- e) aparecem correntes elétricas induzidas de mesmo sentido em lados opostos, que, por isso, não geram campo magnético.

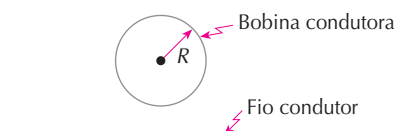
- T. 387** (UEL-PR) Na figura abaixo, um resistor de peso $\vec{P}$ encontra-se inicialmente em uma posição tal que duas molas, M_1 e M_2 , feitas com o próprio fio condutor, não se encontram distendidas. Os fios condutores que formam a espira são presos aos suportes P e Q, fixos. Todo o sistema encontra-se em um plano perpendicular ao plano do solo. Nessa região, um campo magnético, de módulo B constante e paralelo ao solo, “penetra” na espira perpendicularmente ao seu plano. Abandonando-se o resistor ao efeito do campo gravitacional, este efetuará um movimento oscilatório.



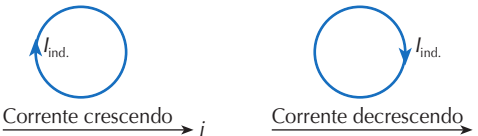
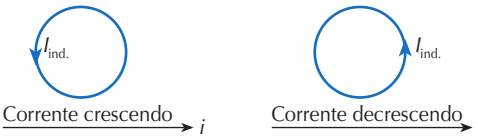
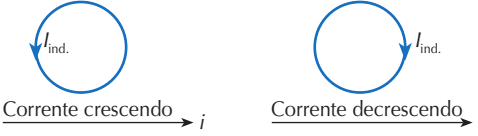
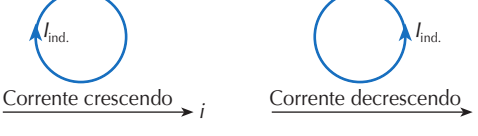
Com base nesses dados e nas leis do Eletromagnetismo, é correto afirmar:

- a) Aparece no circuito uma corrente constante, no sentido anti-horário, independente do movimento de subida ou de descida do resistor.
- b) Aparece no circuito uma corrente variável, no sentido horário, quando o resistor está descendo, e essa corrente inverte-se quando o resistor está subindo.
- c) Aparece no circuito uma corrente variável, no sentido anti-horário, quando o resistor está descendo, e essa corrente inverte-se quando o resistor está subindo.
- d) Aparece no circuito uma corrente constante, no sentido horário, quando o resistor está descendo, e essa corrente inverte-se quando o resistor está subindo.
- e) Aparece no circuito uma corrente constante, no sentido anti-horário, quando o resistor está descendo, e essa corrente inverte-se quando o resistor está subindo.

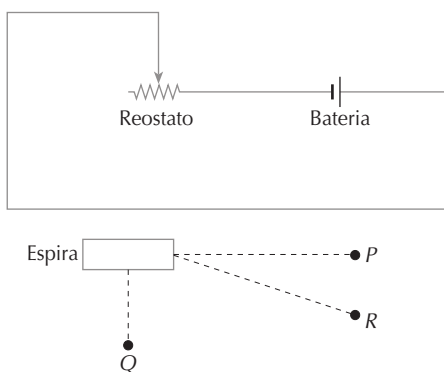
- T. 388** (ITA-SP) Um fio retilíneo e longo acha-se percorrido por uma corrente i , que pode aumentar ou diminuir com o tempo. Uma espira condutora circular de raio R acha-se nas proximidades desse fio, com o seu eixo de simetria disposto perpendicularmente ao fio, como mostra a figura.



Qualquer variação na corrente i que percorre o fio irá, segundo a lei de indução de Faraday, induzir uma corrente I_{ind} na bobina, cujo sentido será ditado pela lei de Lenz, ou seja, essa corrente induzida I_{ind} tem sentido tal que tende a criar um fluxo de I_{ind} através da bobina, oposto à variação do fluxo de $\vec{B}$ que lhe deu origem. Se a corrente i que percorre o fio estiver crescendo ou decrescendo no tempo, a corrente I_{ind} deverá ter seu sentido indicado na configuração:

- a)
- 
- Corrente crescendo i Corrente decrescendo i
- b)
- 
- Corrente crescendo i Corrente decrescendo i
- c)
- 
- Corrente crescendo i Corrente decrescendo i
- d)
- 
- Corrente crescendo i Corrente decrescendo i
- e) Nenhuma das configurações acima é correta.

T. 389 (UFMG) A figura mostra um circuito composto de uma bateria e de um reostato (resistor do qual se pode variar a resistência). Esse circuito está ao lado de uma espira metálica.



Na espira metálica **não** haverá corrente elétrica quando:

- a) a espira se deslocar em linha reta na direção do ponto P.
b) a espira se deslocar em linha reta na direção do ponto Q.
c) a espira se deslocar em linha reta na direção do ponto R.
d) a resistência no reostato estiver sendo alterada.

T. 390 (Fuvest-SP) Um fio retilíneo, bastante longo, está no plano de uma espira retangular, paralelo a um de seus lados, conforme indicado na figura I. A corrente I_1 no fio varia em função do tempo t , conforme indicado na figura II.

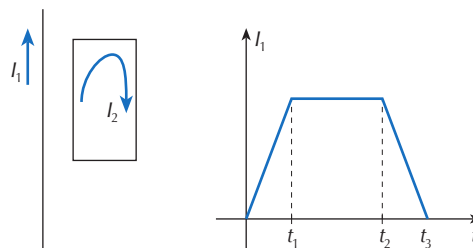
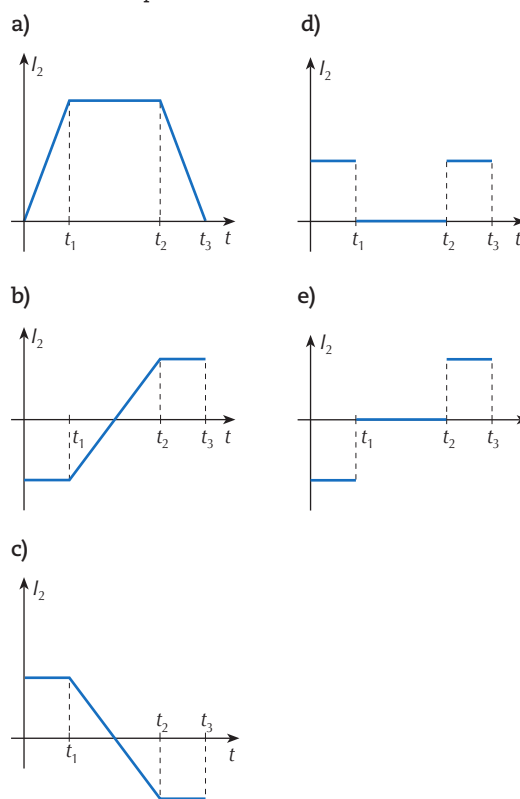


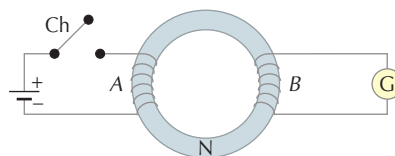
Figura I.

Figura II.

O gráfico que melhor representa a corrente I_2 induzida na espira é:

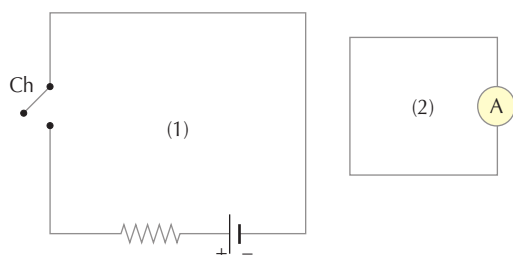


T. 391 (ITA-SP) Na montagem da figura a seguir, A e B são enrolamentos de fios condutores, G é um galvanômetro e N um núcleo de ferro.



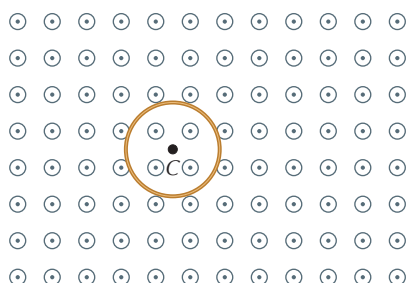
- a) Há uma corrente transitória em G, quando a chave Ch é fechada.
b) Há corrente em G, enquanto Ch estiver fechada.
c) Somente haverá corrente em G, quando Ch for aberta.
d) Nunca haverá corrente em G.
e) Nenhuma das afirmações é correta.

T. 392 (FMI-MG) Analisando a figura abaixo e sabendo-se que as espiras (1) e (2) são condutores e estão no plano do papel, podemos afirmar que:



- I. no instante em que a chave Ch é fechada, o sentido da corrente na espira (2) será horário.
 - II. no instante em que a chave Ch é aberta, o sentido da corrente na espira (2) será horário.
 - III. enquanto a chave Ch permanece fechada e o conjunto constituído pelo circuito (1) e pela espira (2) se move para a direita, com velocidade constante, o sentido da corrente na espira (2) é anti-horário.
- a) Apenas I está correta.
 - b) Apenas II está correta.
 - c) Apenas III está correta.
 - d) I e III estão corretas.
 - e) II e III estão corretas.

T. 393 (Ufop-MG) Considere uma espira circular rígida de cobre em um campo magnético constante (não muda com o tempo) e uniforme (é o mesmo em todo lugar). Inicialmente, o plano da espira é normal à direção do campo magnético.

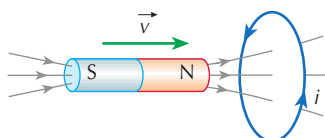


Então, uma corrente elétrica sempre será induzida na espira durante:

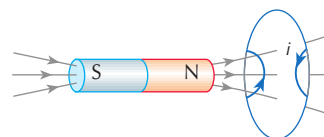
- a) o giro da espira em torno de um diâmetro.
- b) o deslocamento da espira no plano em que se encontrava inicialmente.
- c) o deslocamento da espira na direção do campo magnético.
- d) o giro da espira em torno do eixo paralelo ao campo e que contém o seu centro.

T. 394 (ITA-SP) Considere as situações representadas a seguir. A situação que contraria a lei de indução de Faraday será:

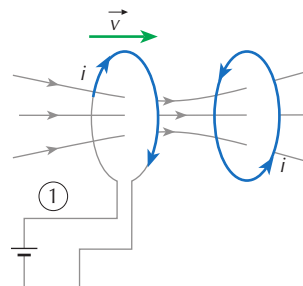
- a) ímã que se desloca com uma velocidade $\vec{v}$.



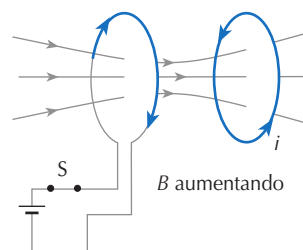
- b) espira em deformação (diminuindo).



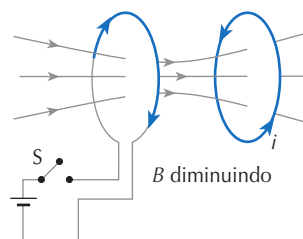
- c) circuito ① deslocando-se com uma velocidade $\vec{v}$.



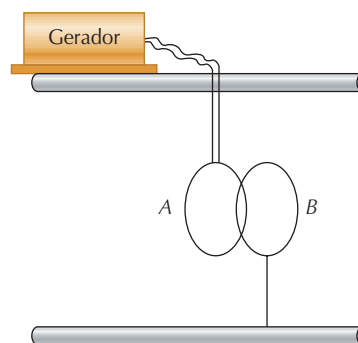
- d) logo após o instante em que se fecha a chave S.



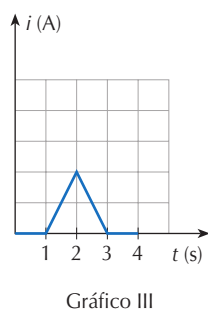
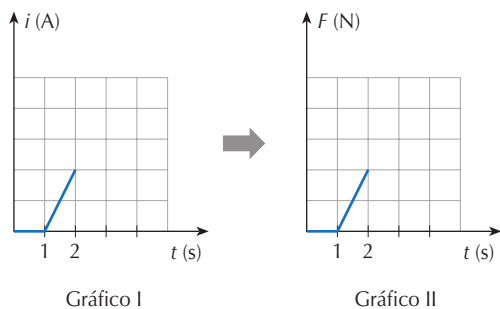
- e) logo após o instante em que se abre a chave S.



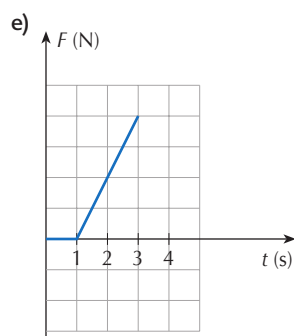
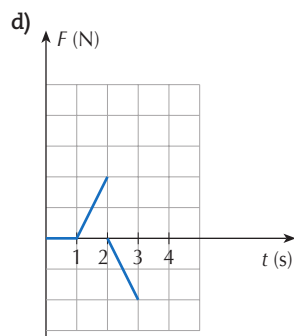
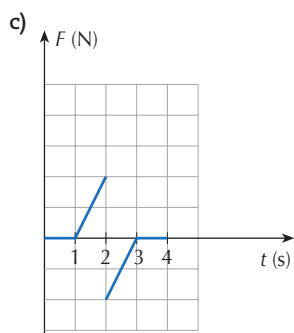
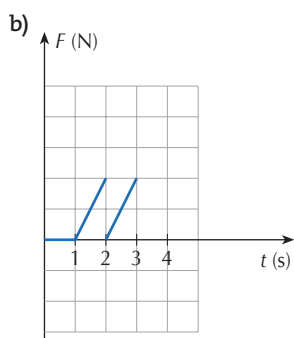
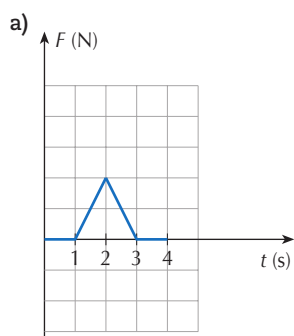
T. 395 (Fuvest-SP) Dois anéis circulares iguais, A e B, construídos com fio condutor, estão frente a frente. O anel A está ligado a um gerador, que pode lhe fornecer uma corrente variável.



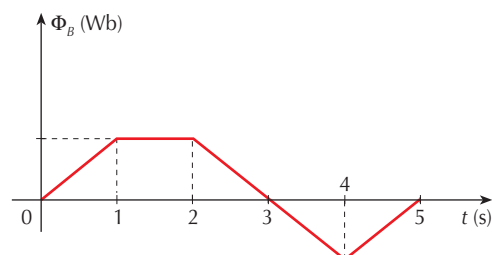
Quando a corrente i que percorre A varia como no gráfico I, uma corrente é induzida em B e surge, entre os anéis, uma força repulsiva (representada como positiva), indicada no gráfico II.



Considere agora a situação em que o gerador fornece ao anel A uma corrente como indicada no gráfico III. Nesse caso, a força entre os anéis pode ser representada por:

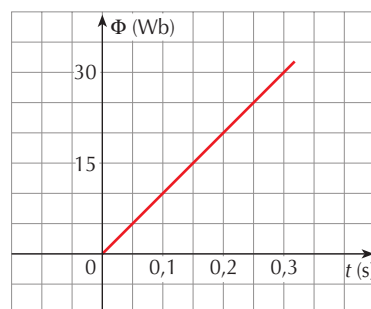


T. 396 (UFRGS-RS) O gráfico registra o fluxo magnético através de um anel metálico ao longo de 5 segundos. Em quais dos intervalos de tempo a seguir relacionados (valores em segundos) surgirá no anel uma corrente elétrica induzida?



- a) Somente em (1, 2).
- b) Somente em (0, 1) e (2, 3).
- c) Somente em (0, 1) e (4, 5).
- d) Somente em (0, 1), (1, 2) e (2, 3).
- e) Somente em (0, 1), (2, 3), (3, 4) e (4, 5).

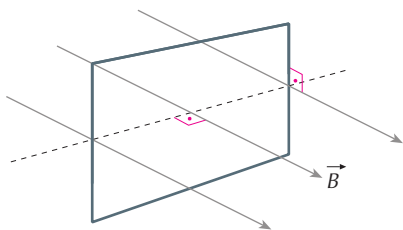
T. 397 Uma espira circular de fio condutor está sujeita a uma variação de fluxo magnético, dada em weber, em relação ao tempo, conforme o gráfico.



Qual é, em volts, o módulo da força eletromotriz induzida na espira durante esse intervalo de tempo?

a) 100 b) 10 c) 9,0 d) 1,0 e) 0,01

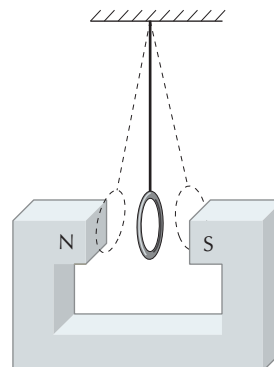
- T. 398** (Fatec-SP) Em um campo de indução uniforme, com intensidade $B = 1,0 \text{ T}$ (tesla = Wb/m^2), situa-se uma espira retangular tendo área $A = 100 \text{ cm}^2$. A espira é giratória em torno da reta que passa pelos centros de dois lados opostos, normal ao campo e mantida fixa. Inicialmente o plano da espira é normal ao campo (ver esquema). Gira-se a espira de um ângulo reto ($90^\circ = \frac{\pi}{2} \text{ rad}$) em duração $\Delta t = 1,0 \cdot 10^{-2} \text{ s}$.



A força eletromotriz média induzida na espira é:

- a) $1,0 \cdot 10^{-2} \text{ V}$
 - b) $1,0 \text{ V}$
 - c) $1,0 \cdot 10^{-4} \text{ V}$
 - d) 100 V
 - e) nenhuma das anteriores
- T. 399** (Unibe-MG) Uma espira retangular de dimensões ($4 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$) é disposta perpendicularmente às linhas de indução de um campo magnético uniforme de intensidade $1 \cdot 10^{-2} \text{ T}$. Constata-se que a intensidade do campo magnético se reduz a zero em 2 s. O valor da fem induzida média nesse intervalo de tempo, em módulo, vale:
- a) $2 \cdot 10^{-6} \text{ V}$
 - b) $1 \cdot 10^{-5} \text{ V}$
 - c) $2 \cdot 10^{-5} \text{ V}$
 - d) $3 \cdot 10^{-5} \text{ V}$
 - e) $4 \cdot 10^{-5} \text{ V}$
- T. 400** (Mackenzie-SP) Uma bobina de 100 espiras de área $8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ cada uma tem resistência de 12Ω . Um campo de indução magnética, paralelo ao eixo da bobina, induz corrente $1 \cdot 10^{-3} \text{ A}$. A variação uniforme do campo em 1 s é de:
- a) $1,0 \cdot 10^{-2} \text{ T}$
 - b) $2,0 \cdot 10^{-2} \text{ T}$
 - c) $3,0 \cdot 10^{-2} \text{ T}$
 - d) $1,5 \cdot 10^{-2} \text{ T}$
 - e) $6,5 \cdot 10^{-2} \text{ T}$

- T. 401** (Fuvest-SP) Um anel de alumínio suspenso por um fio isolante oscila entre os polos de um ímã, mantendo-se, inicialmente, no plano perpendicular ao eixo N-S e equidistante das faces polares. O anel oscila, entrando e saindo da região entre os polos, com uma certa amplitude.



Nessas condições, sem levar em conta a resistência do ar e outras formas de atrito mecânico, pode-se afirmar que, com o passar do tempo:

- a) a amplitude de oscilação do anel diminui.
 - b) a amplitude de oscilação do anel aumenta.
 - c) a amplitude de oscilação do anel permanece constante.
 - d) o anel é atraído pelo polo norte do ímã e lá permanece.
 - e) o anel é atraído pelo polo sul do ímã e lá permanece.
- T. 402** Toda massa metálica móvel em campo magnético constante ou fixa em campo magnético variável dissipará calor, o que é explicado pela existência das correntes de Foucault. Para limitar essas correntes em máquinas elétricas empregam-se:
- a) peças metálicas maciças.
 - b) substâncias boas condutoras de calor.
 - c) lâminas metálicas finas empilhadas e isoladas.
 - d) substâncias de baixo calor específico.
 - e) nenhuma das anteriores.