

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.

Força sobre uma carga móvel em um campo magnético uniforme

Objetivos

- ▶ Caracterizar a força magnética que atua sobre uma carga elétrica em movimento em um campo magnético uniforme.
- ▶ Utilizar a regra da mão direita nº2 para determinar o sentido e a direção da força magnética.
- ▶ Analisar os tipos de movimento de uma carga em um campo magnético uniforme.

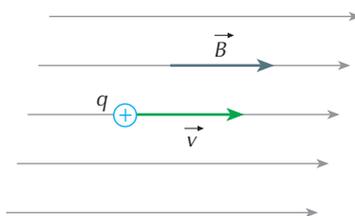
Termos e conceitos

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

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:

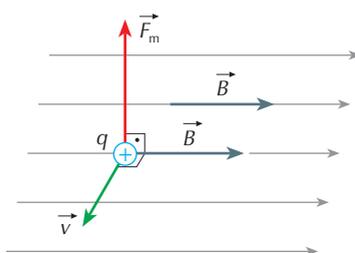
- I. se a carga se deslocar na direção paralela \vec{B} , ela não ficará sujeita à ação de força (fig. 1);



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

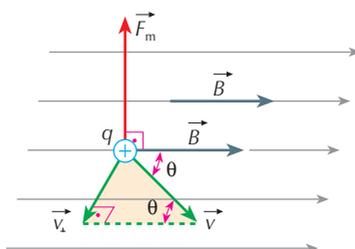
- II. se a carga se deslocar em uma direção perpendicular à do vetor \vec{B} , ela ficará sujeita à ação da força magnética \vec{F}_m (fig. 2). A direção dessa força é perpendicular ao plano formado pelos vetores \vec{B} e \vec{v} . Utilizando medidas experimentais, verifica-se que a intensidade dessa 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} .

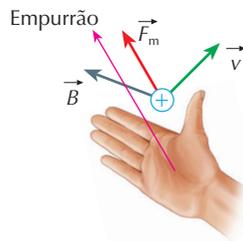
Nesse caso, para o cálculo da intensidade da força magnética, devemos considerar a componente da velocidade na direção perpendicular ao campo magnético. No triângulo destacado da **figura 3**, temos:

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

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

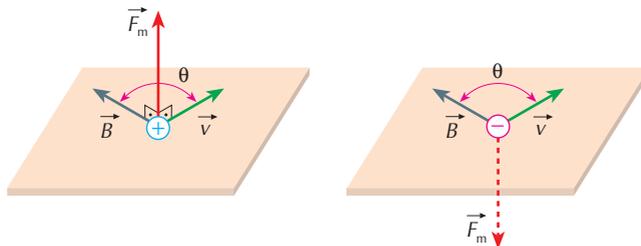
$$F_m = B \cdot |q| \cdot v \cdot \sin \theta$$

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.

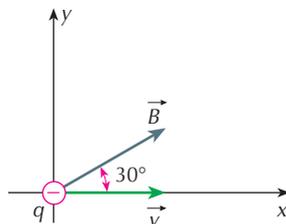


« **Figura 5.** Sentido da força magnética quando a carga móvel é positiva e quando é negativa.

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

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.



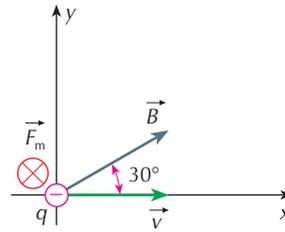
Solução:

- 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:

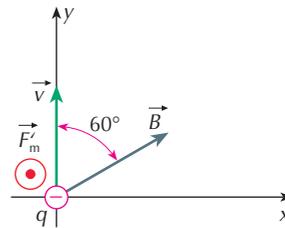
direção: perpendicular ao plano xy ;
sentido: orientado do plano para o observador \odot ;

intensidade:

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

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

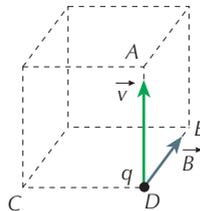
$$F'_m \approx 5,2 \cdot 10^{-5} \text{ N}$$



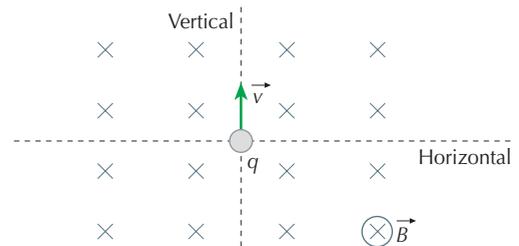
Resposta: a) \otimes ; $F_m = 3 \cdot 10^{-5} \text{ N}$; b) \odot ; $F'_m \approx 5,2 \cdot 10^{-5} \text{ N}$

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.

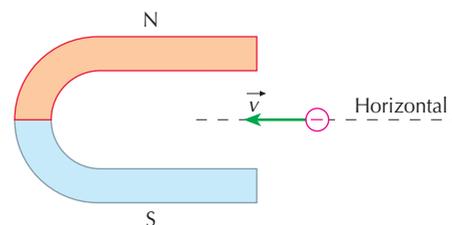


- P. 333** Uma partícula de carga elétrica $q = 2,0 \cdot 10^{-6} \text{ C}$ é lançada num campo magnético uniforme de intensidade $B = 4,0 \cdot 10^3 \text{ T}$ com velocidade $v = 20 \text{ m/s}$, sendo \vec{v} perpendicular a \vec{B} , conforme a figura. Determine a intensidade, a direção e o sentido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

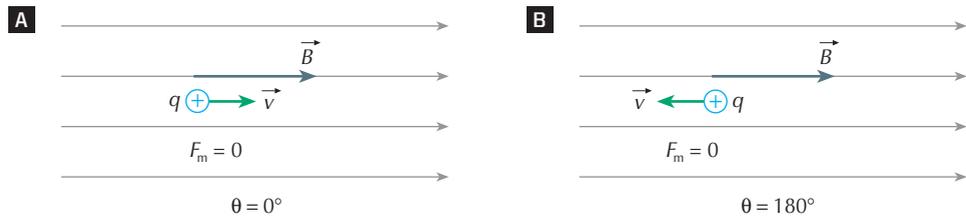


Figura 6. Quando \vec{v} é paralela a \vec{B} , a carga segue em MRU.

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} .

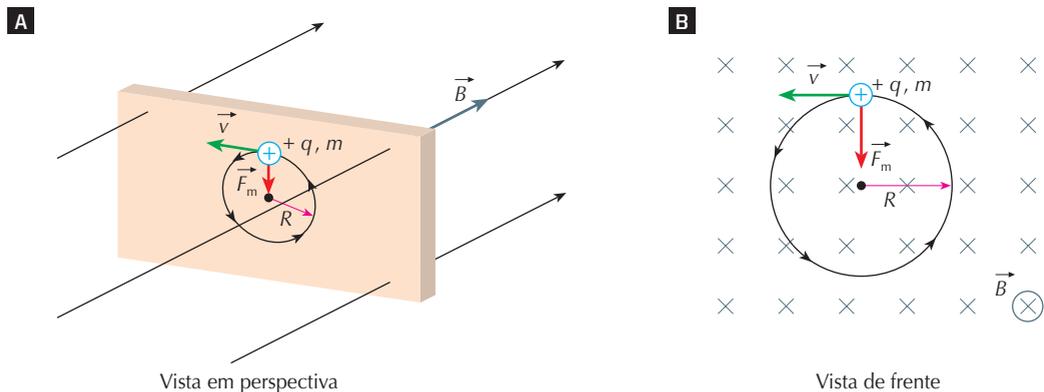


Figura 7. Quando \vec{v} é perpendicular a \vec{B} , a carga executa MCU em plano perpendicular ao vetor \vec{B} .

a) Cálculo do raio da trajetória

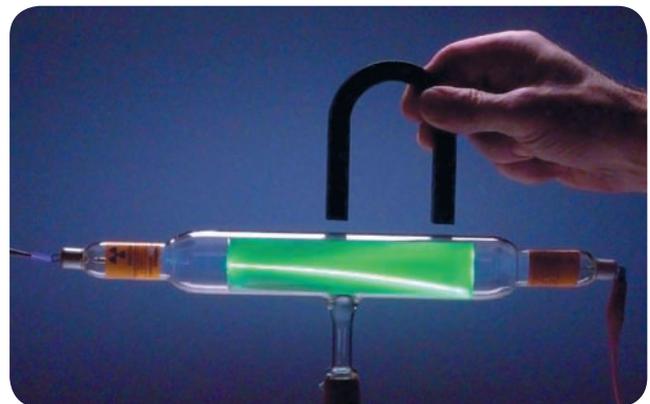
Sendo m a massa da partícula e R o raio de sua trajetória, temos:

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

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 conseqüente 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:

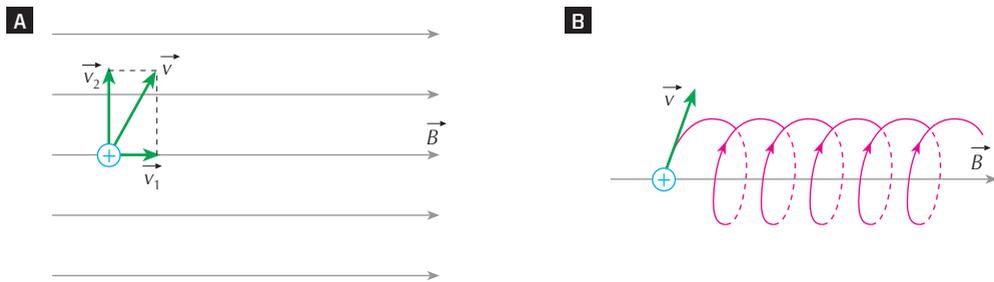
$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} \Rightarrow v = \frac{2\pi \cdot R}{T} \Rightarrow T = \frac{2\pi \cdot R}{v} \Rightarrow T = \frac{2\pi}{v} \cdot \frac{m \cdot v}{B \cdot |q|} \Rightarrow T = \frac{2\pi \cdot m}{B \cdot |q|}$$

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*

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; $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ 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:

a) 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:

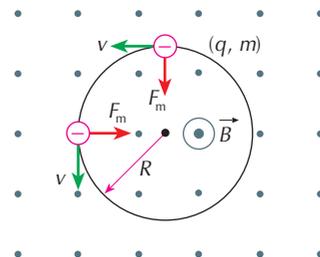
direção: perpendicular a \vec{v} e a \vec{B} e, portanto, contida no plano da figura;

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 $0,11 \text{ m}$

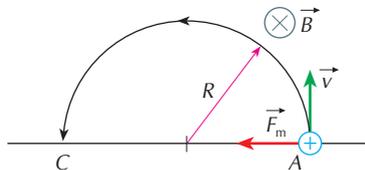
R. 133 Um próton é lançado pelo orifício A do anteparo, com velocidade $v = 7,5 \cdot 10^5 \text{ m/s}$ perpendicularmente ao campo magnético uniforme (conforme a figura) de intensidade $B = 0,5 \text{ T}$. É dada a relação massa-carga do próton $\approx 10^{-8} \text{ kg/C}$. Determine:

- a posição do ponto C sobre a qual o próton incide no anteparo;
- 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.



Sendo \vec{B} 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.

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

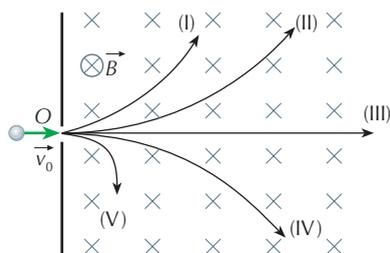
Outra maneira de se calcular esse intervalo de tempo é observar que ele corresponde à metade do período:

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

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.

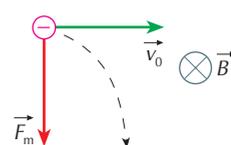
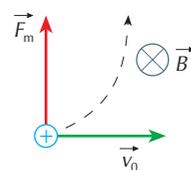
No átomo neutro de sódio ($q_{Na} = 0$), não agirá força magnética e ele não sofrerá desvio; sua trajetória será (III).

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.

$$\text{Sendo } q_e = q_F, m_F > m_e, R_e = \frac{m_e v_0}{B \cdot |q_e|} \text{ e } R_F = \frac{m_F v_0}{B \cdot |q_F|},$$

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

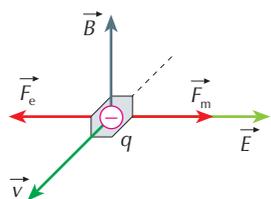


R. 135 Determine a velocidade de um elétron que não sofre desvio em sua trajetória quando submetido à ação simultânea de um campo elétrico \vec{E} e um campo magnético de indução \vec{B} . Esses campos têm intensidades $E = 34 \cdot 10^2 \text{ V/m}$ e $B = 2 \cdot 10^{-4} \text{ T}$, e são perpendiculares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

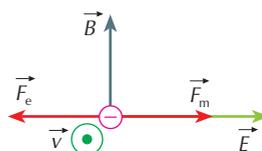
Solução:

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 $F_m = B \cdot |q| \cdot v \cdot \text{sen } 90^\circ = B \cdot |q| \cdot v$ e $F_e = F_m$, segue:

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

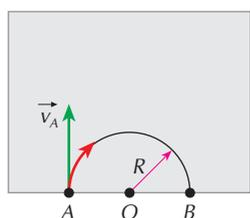
$$\Rightarrow v = 17 \cdot 10^6 \text{ m/s} \Rightarrow \boxed{v = 1,7 \cdot 10^7 \text{ m/s}}$$

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} .

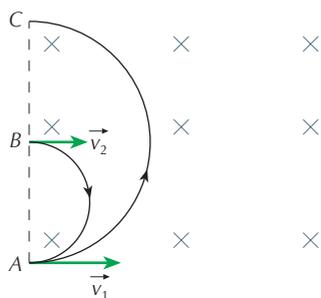
P. 336 (UFMG) Um elétron entra na região sombreada da figura, onde existe um campo magnético uniforme. No ponto A, a velocidade do elétron é $v_A = 3,52 \cdot 10^7 \text{ m/s}$. O raio da trajetória é $R = 1,0 \cdot 10^{-2} \text{ m}$ e a razão carga-massa do elétron é, em valor absoluto, $\frac{e}{m}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



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} .

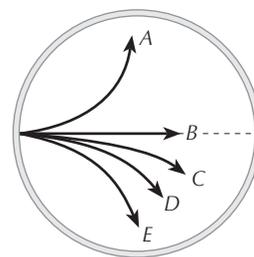
P. 337 (Fuvest-SP) A figura representa as trajetórias de duas partículas eletrizadas que penetram numa câmara de bolhas onde há um campo magnético uniforme, orientado perpendicularmente para dentro do plano do papel. A partícula P_1 penetra na câmara no ponto A e sai em C. A partícula P_2 penetra em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



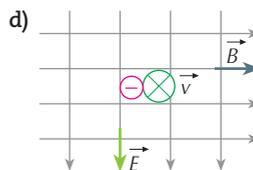
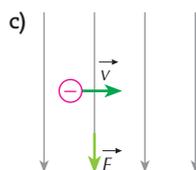
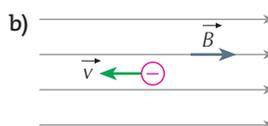
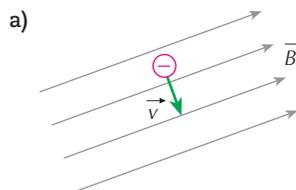
- Quais os sinais das cargas q_1 e q_2 das partículas?
- Sendo $|q_1| = |q_2|$, $v_1 = v_2$ e $AB = BC$, qual a relação entre as massas m_1 e m_2 das partículas?

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 (Efe-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.

Força sobre um condutor reto em um campo magnético uniforme

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

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:

$$\Delta q = i \cdot \Delta t \quad \textcircled{1}$$

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

$$F_m = B \cdot \Delta q \cdot v \cdot \sin \theta \quad \textcircled{2}$$

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 .

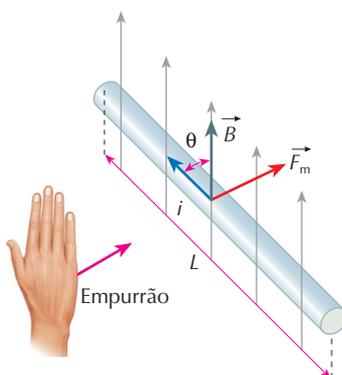


Figura 9. Força em condutor reto percorrido por corrente elétrica em um campo magnético uniforme.

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:

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

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

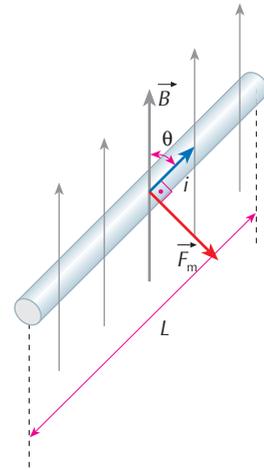
$$\theta = 30^\circ$$

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

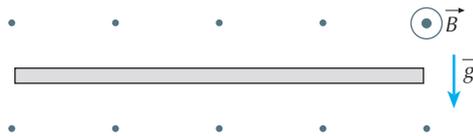
vem:

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

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

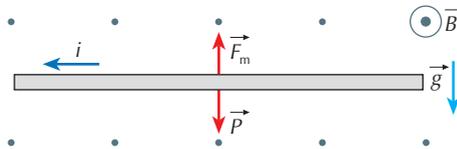


- R. 137** Um condutor reto e horizontal de comprimento $L = 0,20 \text{ m}$ e massa $m = 60 \text{ g}$, percorrido por uma corrente de intensidade $i = 15 \text{ A}$, encontra-se em equilíbrio sob as ações de um campo magnético de indução \vec{B} e do campo gravitacional \vec{g} , conforme a figura.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

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



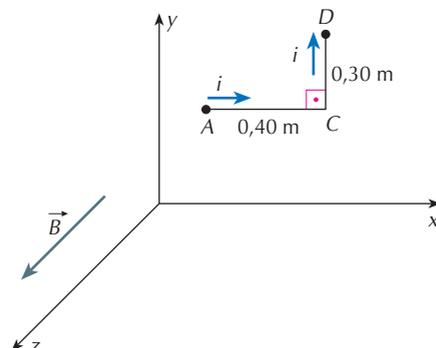
Sendo $i = 15 \text{ A}$, $L = 0,20 \text{ m}$, $\theta = 90^\circ$, $m = 60 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$ e $g = 10 \text{ m/s}^2$, temos:

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

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 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:

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

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

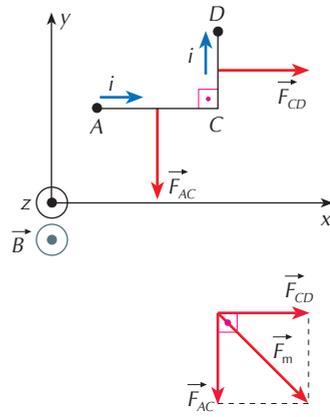
$$F_{CD} = B \cdot i \cdot L_{CD} \cdot \sin \theta = 1,0 \cdot 3,0 \cdot 0,30 \cdot \sin 90^\circ \Rightarrow$$

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

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:

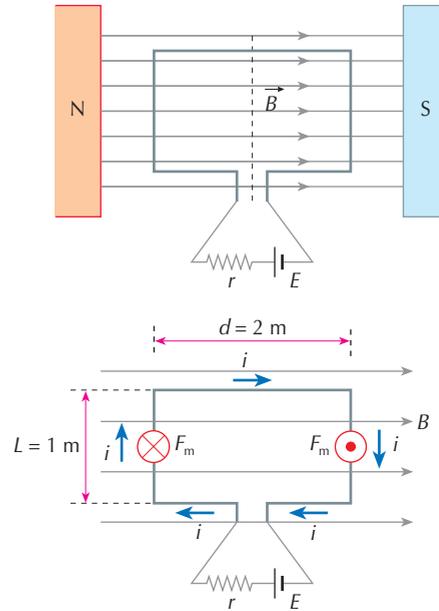
Determinamos, de acordo com a regra da mão direita nº 2, os sentidos das forças magnéticas. Observe que, nos condutores paralelos a \vec{B} , as forças magnéticas são nulas. O quadro fica sujeito a um binário de momento:

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

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

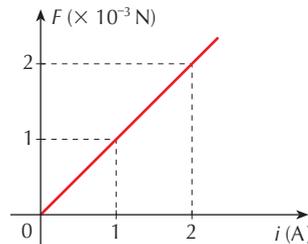
$$M = 3 \cdot 10^{-2} \cdot 2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 2 \Rightarrow \boxed{M = 12 \cdot 10^{-2} \text{ N} \cdot \text{m}}$$

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

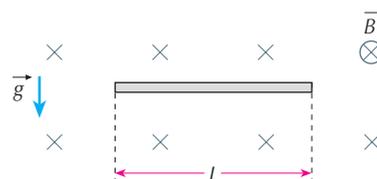
**EXERCÍCIOS PROPOSTOS**

P. 342 (Efei-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.

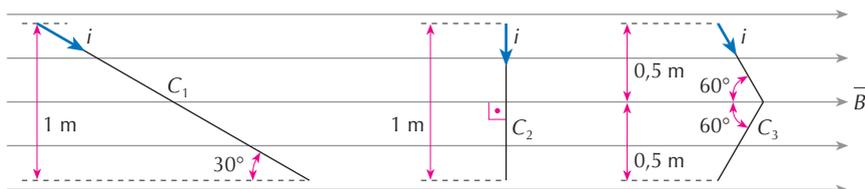
P. 343 (UFRGS-RS) Uma das maneiras de se obter o valor de um campo magnético uniforme é colocar um fio condutor perpendicularmente às linhas de indução e medir a força que atua sobre o fio para cada valor da corrente que o percorre. Em uma dessas experiências, utilizando-se um fio de 0,1 m, obtiveram-se 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.



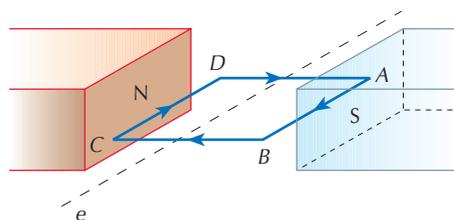
P. 344 Um segmento de condutor reto e horizontal, tendo comprimento $L = 20 \text{ cm}$ e massa $m = 40 \text{ g}$, percorrido por corrente elétrica de intensidade $i = 5,0 \text{ A}$, apresenta-se em equilíbrio sob as ações exclusivas da gravidade \vec{g} e de um campo magnético \vec{B} horizontal.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

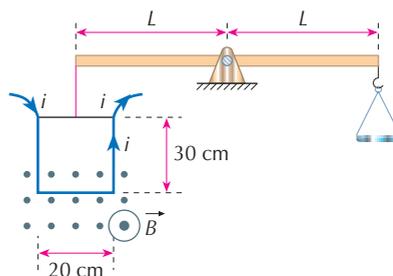


P. 346 (FEI-SP) Uma espira retangular ABCD de dimensões $AB = 2$ cm e $BC = 1$ cm localiza-se entre os polos N e S de um ímã permanente conforme a figura: o campo de indução pode ser considerado uniforme nessa região, com intensidade $B = 0,8$ T. A bobina pode girar em torno do eixo de simetria e , e 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.

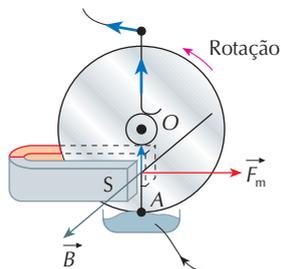


Figura 10.
Funcionamento da roda de Barlow.

* **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.

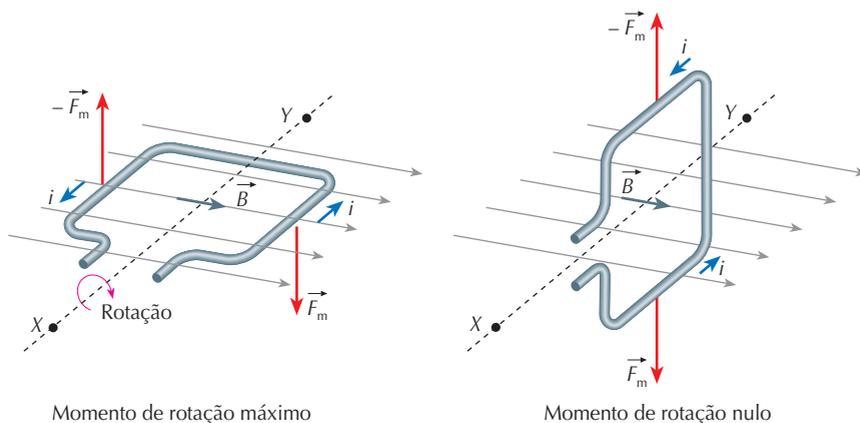


Figura 11. Funcionamento dos motores elétricos atuais.

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.

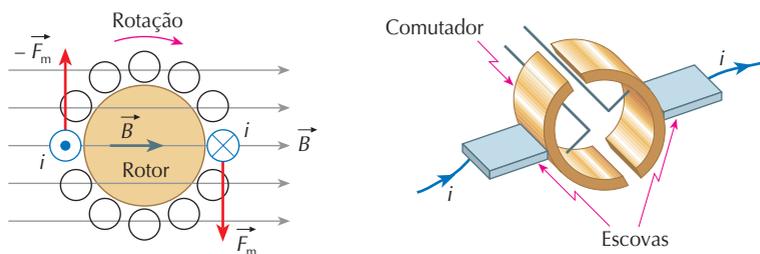


Figura 12. Rotor, comutador e escovas.

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.

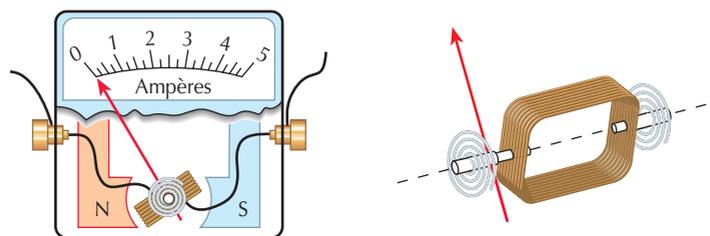


Figura 13. Amperímetro analógico.

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.

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



Força magnética entre condutores paralelos

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.

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.

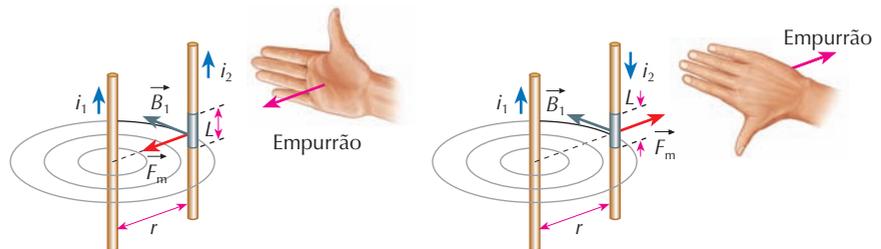


Figura 14. Força entre condutores paralelos.

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.**

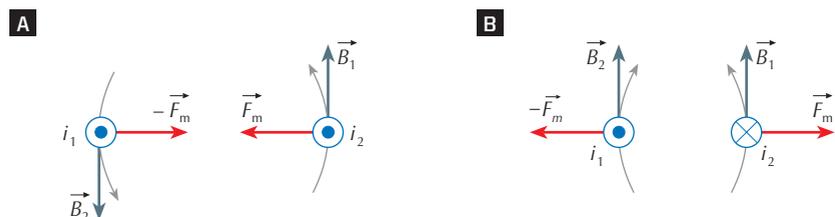


Figura 15. Vista de cima de dois condutores retos e extensos, paralelos e percorridos por corrente elétrica. Em (A) temos correntes no mesmo sentido, em (B) temos correntes de sentidos opostos.

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.

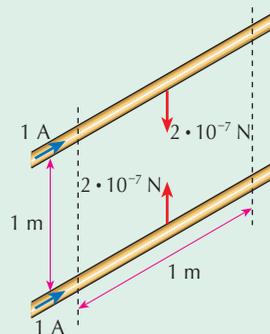
Em ambos os casos, a intensidade da força que um condutor extenso exerce sobre um comprimento L do outro será:

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

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:

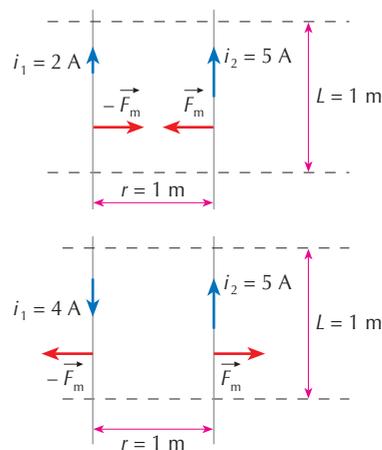
- Como as correntes têm o mesmo sentido, a força magnética será de atração e, em cada metro de comprimento dos condutores, terá intensidade:

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

- 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).

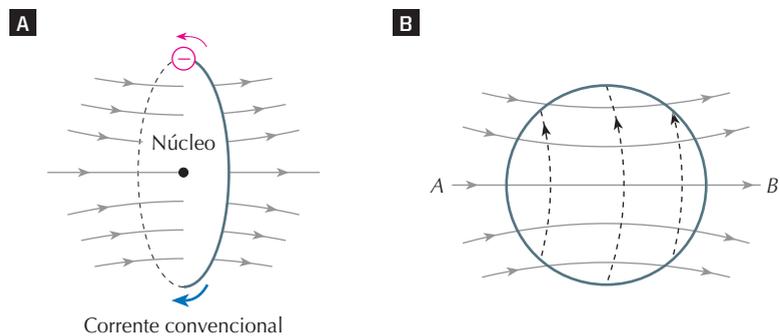


Figura 16. Modos de um elétron originar um campo magnético.

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 equivalendo 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.

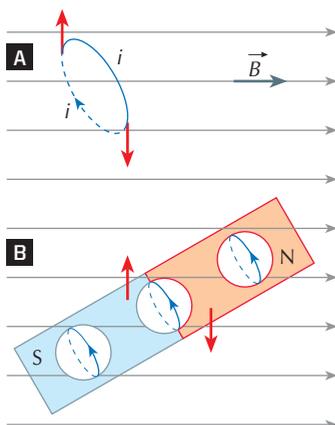
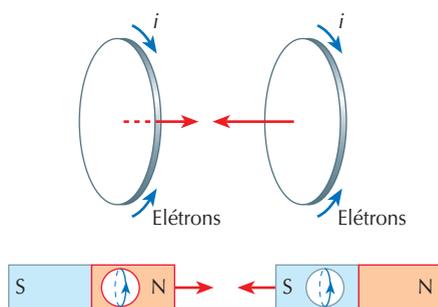


Figura 17. A disposição de um ímã em forma de barra em um campo magnético uniforme é semelhante à de uma espira percorrida por corrente. Os sentidos de rotação indicados no ímã são os dos elétrons.

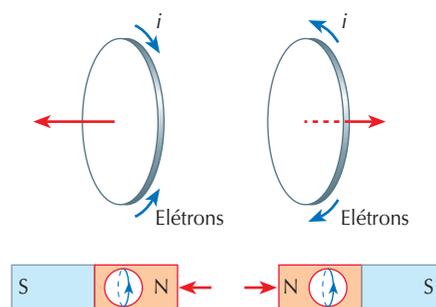
Quando o polo norte de um ímã é aproximado do polo sul de outro ímã, os elétrons dos dois ímãs giram no mesmo sentido (**fig. 18**).

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.



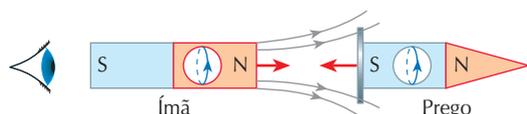
▲ **Figura 18.** O polo norte atrai o polo sul de modo semelhante à atração entre condutores percorridos por correntes de mesmo sentido.



▲ **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.

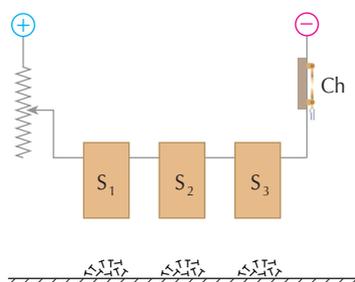
Quando o polo norte de um ímã é aproximado de um prego (**fig. 20**), os elétrons desse prego adquirem uma certa orientação sob a ação do campo magnético do ímã: passam a girar no sentido anti-horário, do ponto de vista de um observador que está olhando no sentido do campo magnético do ímã. A extremidade 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

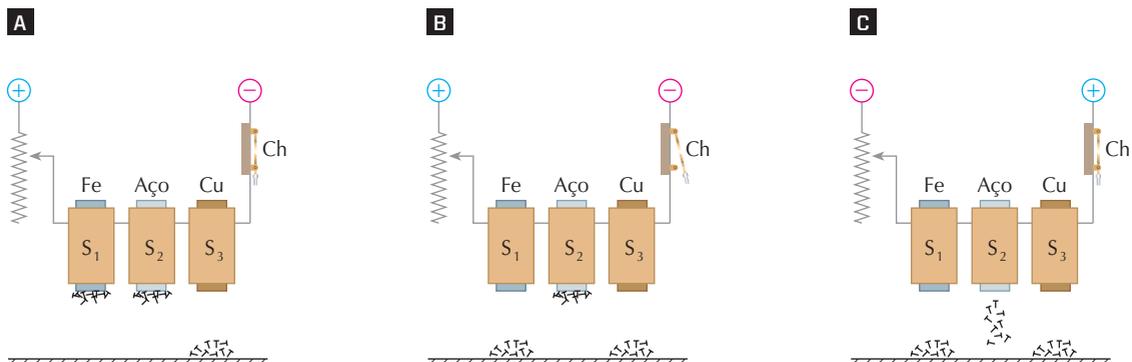
Considere três solenoides idênticos, S_1 , S_2 e S_3 , ligados em série aos terminais de um gerador e próximos a pregos de ferro colocados em um plano horizontal (**fig. 21**). Quando a chave Ch é fechada, a passagem da corrente elétrica i origina, no interior dos solenoides, o campo magnético \vec{B}_0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

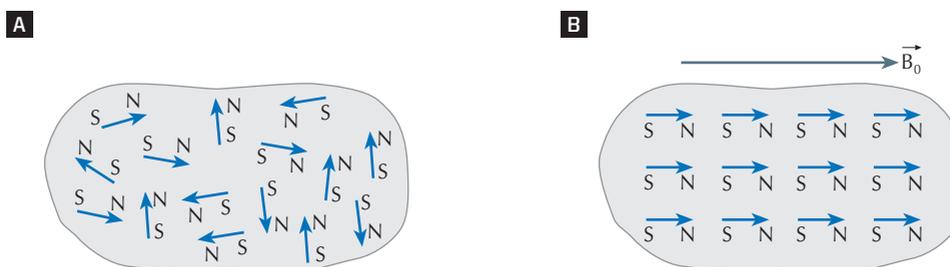
Pode-se calcular a intensidade do vetor indução magnética \vec{B} , resultante no interior dos solenoides da experiência anterior, com núcleos de diferentes substâncias. Comparando-se a intensidade B do campo resultante com a intensidade B_0 do campo sem os núcleos, as substâncias podem ser classificadas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

1º) 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 $B < B_0$.

2º) 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.



3ª) 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.

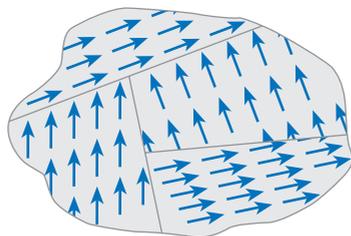


Figura 24.
Domínios de Weiss.

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.

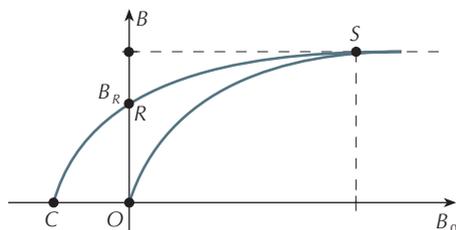


Figura 25.
Curva de imantação de uma substância ferromagnética.

* 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**.

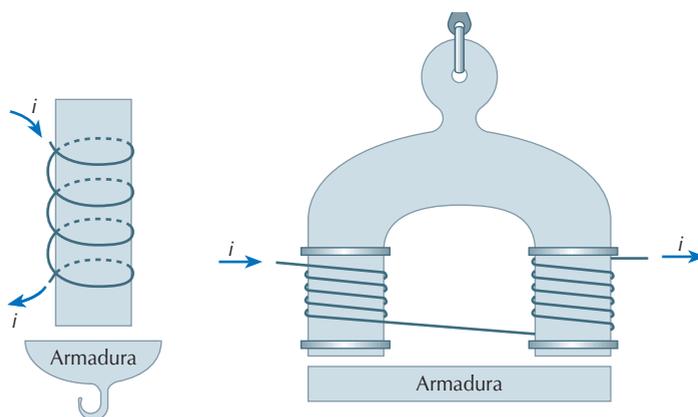


Figura 26. Esquemas de eletroímãs.

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.

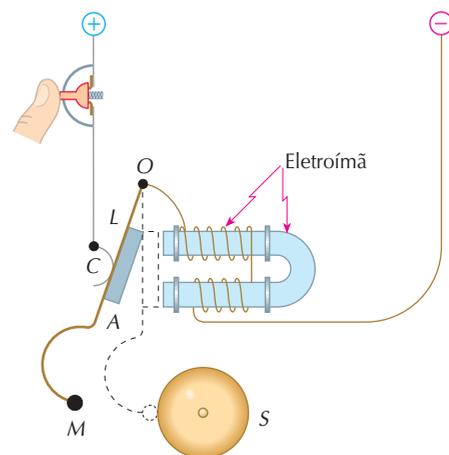


Figura 27. Esquema do funcionamento de uma campainha elétrica.



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 comparam 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

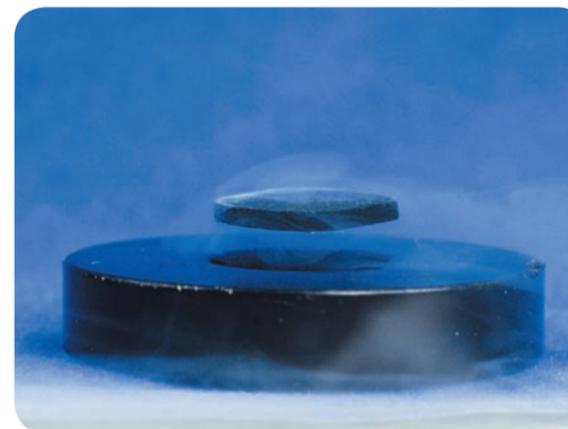
Não é só na economia energética, ao se conduzir a eletricidade, que está a importância da supercondutividade. Várias outras aplicações têm revolucionado o mundo. A seguir, citamos algumas:

- 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 , levitando 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 quilômetros 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**.

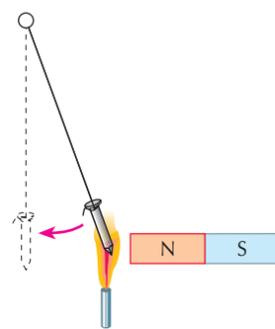
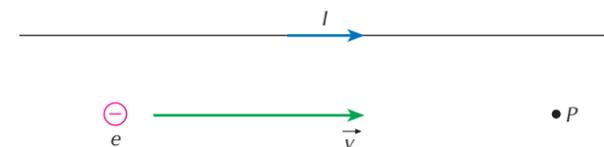


Figura 28. Aquecimento de um prego de ferro até atingir seu ponto Curie.

* **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.

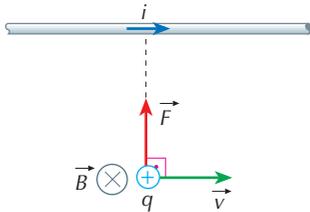


- Qual a direção e o sentido do campo magnético no ponto P?
- Faça um desenho indicando a direção e o sentido da força que atua sobre o elétron no instante t .

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:

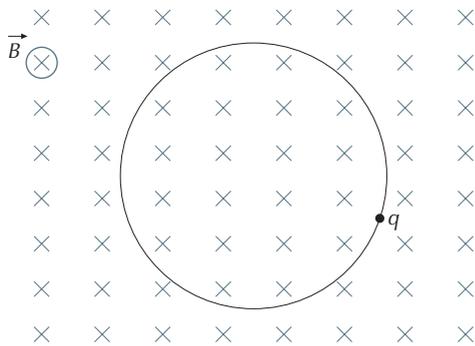
- a intensidade do campo de indução magnética \vec{B} criado pela corrente i , no ponto indicado;
- a intensidade da força magnética exercida sobre a esfera metálica.

(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

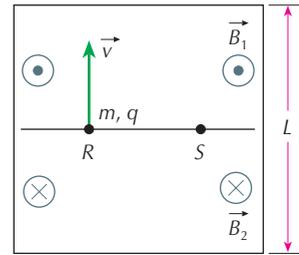
$1,0 \cdot 10^9 \text{ C/kg}$. Determine:

- 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.

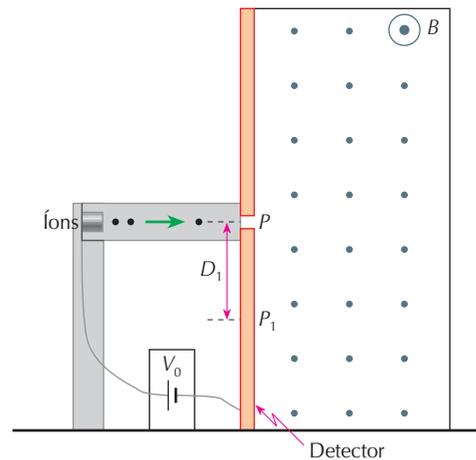
Adote $\pi = 3$.

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 .

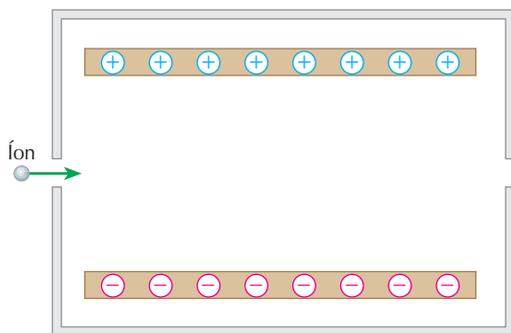
P. 356 (UFG-GO) Uma partícula de massa igual a 20 mg (miligramas) com carga de $100 \mu\text{C}$ ($1 \mu = 10^{-6}$), deslocando-se com velocidade de $1,0 \text{ cm/s}$ ao longo da direção x , entra em uma região com campo magnético uniforme, de intensidade igual a 10 T , apontando na direção perpendicular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



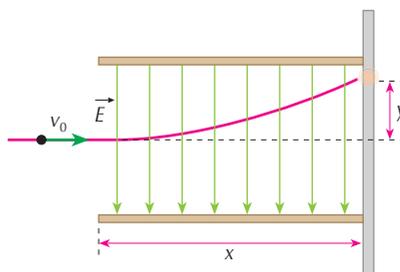
O campo magnético, constante e uniforme, é produzido por um eletroímã, não mostrado nessa figura. Considere que o peso dos íons é desprezível.

- 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.

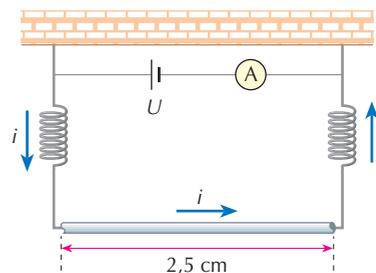
Com esse experimento, Thomson concluiu que todas as partículas que compõem os raios catódicos tinham a mesma razão $\frac{q}{m}$ entre a carga e a massa, e as denominou elétrons.

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.



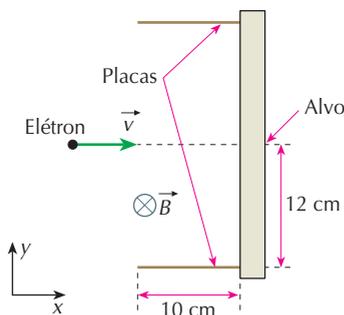
- Calcule a razão $\frac{q}{m}$ da partícula, em função da deflexão y , da velocidade inicial v_0 , da distância x e do módulo do campo elétrico E .
- Realizando a experiência, Thomson verificou que a introdução de um campo magnético uniforme de módulo $B = 2,0 \times 10^{-4} \text{ T}$ entre as placas, 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.



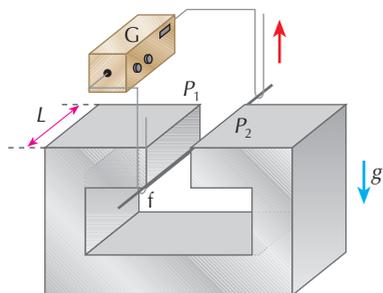
O fio condutor tem comprimento $2,5 \text{ cm}$ e massa $1,0 \text{ g}$; as molas, condutoras de eletricidade, têm constante elástica $5,0 \text{ N/m}$. Quando a tensão elétrica está desligada, as molas apresentam deformação de $2,0 \text{ mm}$. Com a tensão ajustada para produzir uma corrente de $1,0 \text{ A}$ 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:

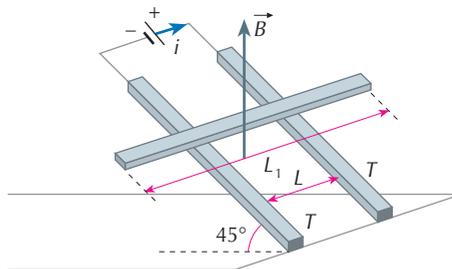
- o valor da força eletromagnética F_0 , em newtons, que age sobre o fio.

- o trabalho total \mathcal{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.

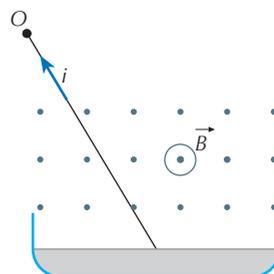
Note e adote:

- 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 $g = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$.
- Podem ser desprezados os efeitos de borda do campo B , o atrito entre o fio e os guias e a resistência do ar.

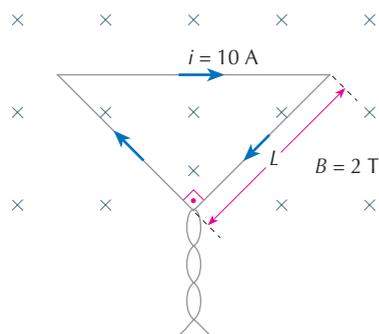
P. 362 Uma barra condutora metálica, de comprimento $L_1 = 2$ m e peso $P = 2$ N, apoia-se sobre dois trilhos T , também condutores, que formam com a horizontal o ângulo de 45° . A distância L entre os trilhos vale 1 m. As extremidades superiores dos trilhos estão ligadas a uma bateria e, nessa região 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.



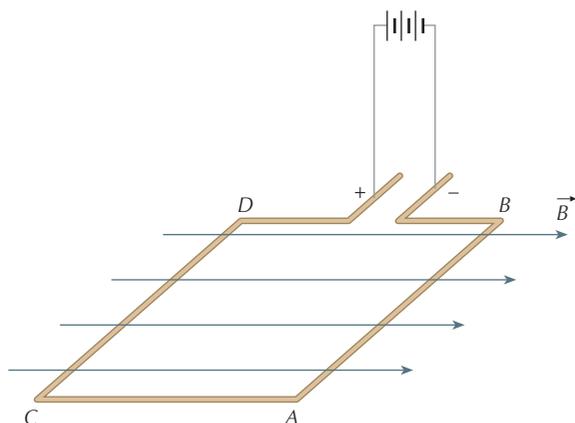
P. 363 Um fio reto, homogêneo, de massa 8 g e comprimento 25 cm, está suspenso por sua extremidade superior a um ponto O em torno do qual pode girar livremente; sua extremidade inferior está em contato com mercúrio contido em uma pequena cuba. O fio é percorrido por uma corrente de 5 A, no sentido mostrado 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 $g = 10 \text{ m/s}^2$, 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:

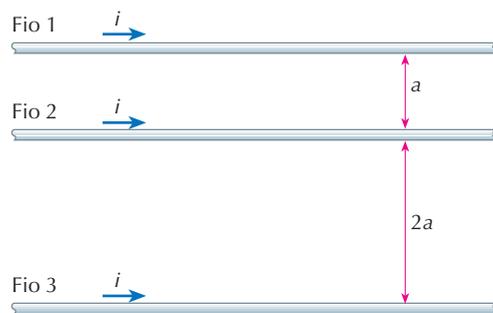
- intensidade da corrente que percorre a espira:
 $i = 0,80 \text{ A}$
- resistência do fio no trecho DCAB:
 $R = 2,5 \Omega$
- módulo do vetor campo magnético:
 $B = 0,50 \text{ T}$
- comprimento dos lados da espira:
 $AB = CD = 0,050 \text{ m}$

Determine:

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

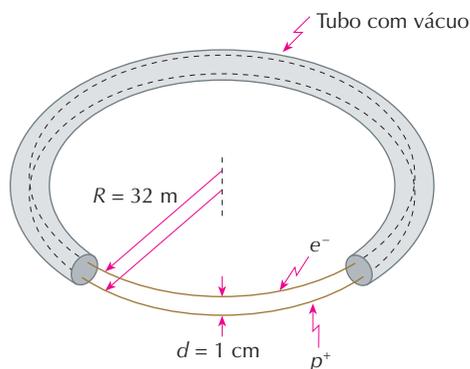
P. 366 (UFPE) Três longos fios paralelos, de tamanhos iguais e espessuras desprezíveis, estão dispostos como mostra a figura e transportam correntes iguais e de mesmo sentido. Se as forças exercidas pelo fio 1

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 simplificadaamente na figura, elétrons (e^-) se movem com velocidade $v \approx c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$, 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:

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