

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

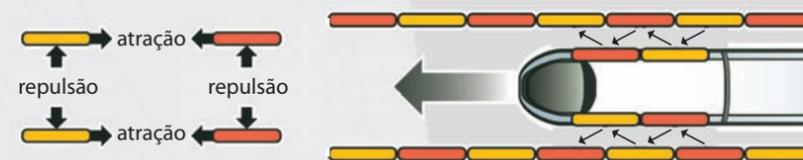
A altura da levitação precisa ser constante, por isso, a corrente elétrica, que gera o campo magnético nos eletroímãs dispostos ao longo da pista é regulada continuamente. Isso garante uma sustentação estável do trem.

### 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 Pudong, na China.

### Puxando e empurrando

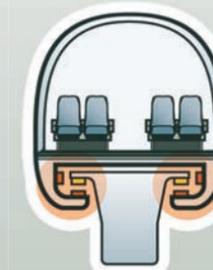
Polos de nomes contrários se atraem, polos de mesmo nome se repelem. A propulsão do trem se baseia nesse princípio.



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

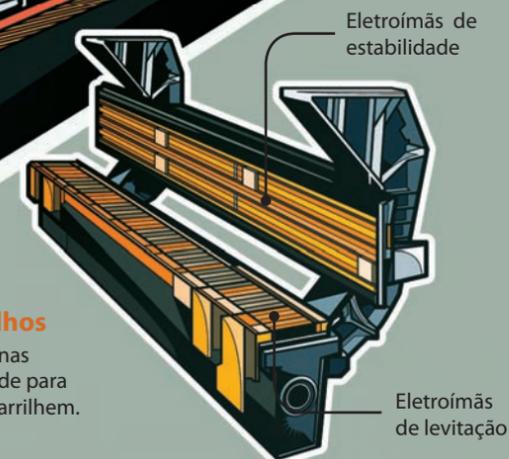
Bobinas supercondutoras na superfície dos trilhos repelem os eletroímãs presos ao trem.

### 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 descarrilhem.



## Conceitos iniciais

### Objetivo

► Conhecer os principais fenômenos magnéticos.

### Termos e conceitos

- magnetita
- ímãs artificiais
- bússola

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 ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), 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).

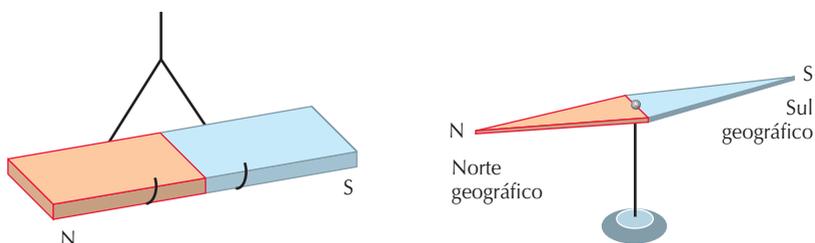
Os principais fenômenos magnéticos são os que veremos a seguir.

**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).

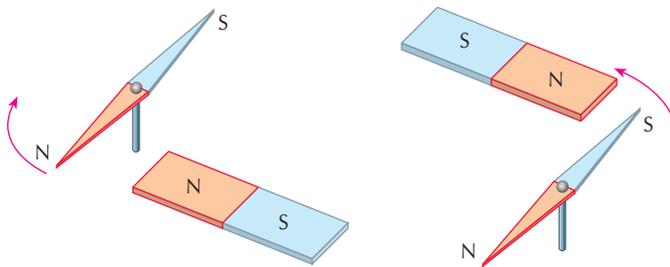


Figura 4. Atração entre polos diferentes e repulsão entre polos iguais.

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.

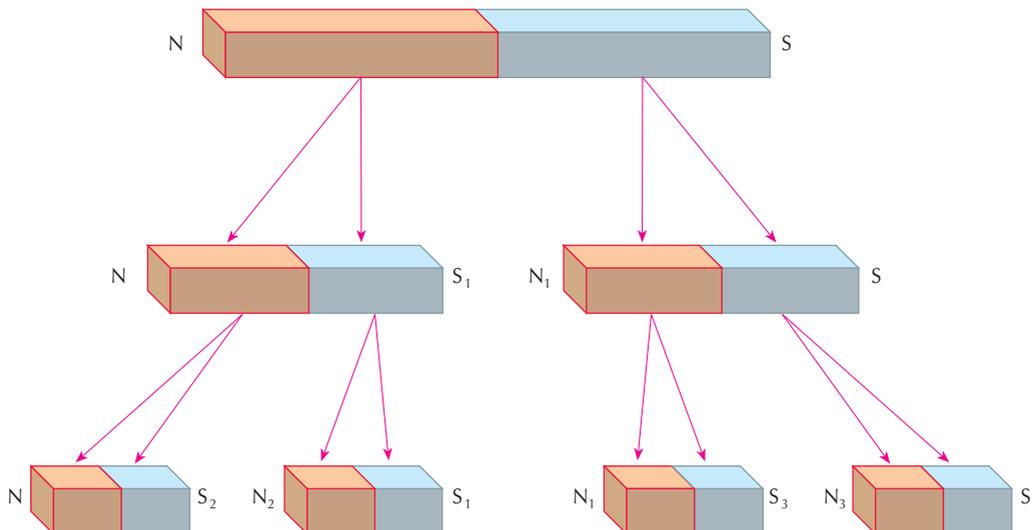


Figura 5. Os polos de um ímã são inseparáveis.



### Objetivos

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

### Termos e conceitos

- linha de indução

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).

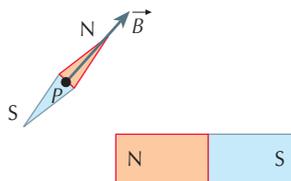


Figura 6. Direção e sentido do vetor indução magnética  $\vec{B}$ .

### 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.

## 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.

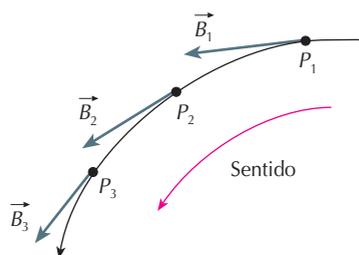


Figura 7.  
Linha de indução.

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.

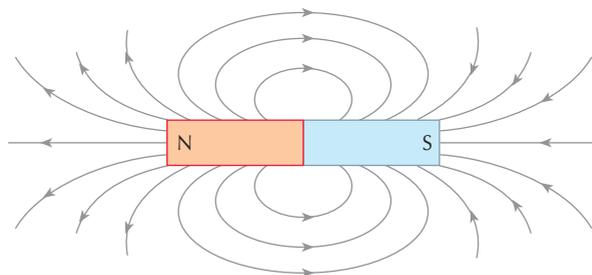


Figura 8. Linhas de indução de um ímã em forma de barra.

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).

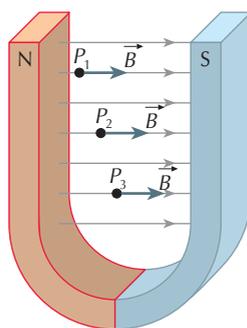
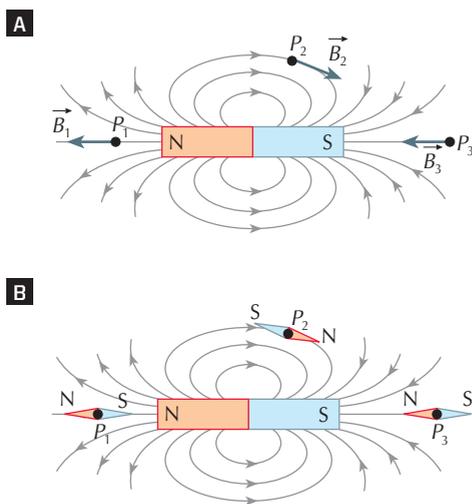


Figura 9. Linhas de indução de um ímã em ferradura.

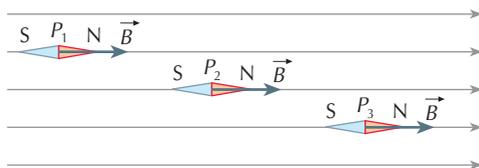
**Campo magnético uniforme** é aquele no qual, em todos os pontos, o vetor  $\vec{B}$  tem a mesma direção, o mesmo sentido e a mesma intensidade. No campo magnético uniforme, as linhas de indução são retas paralelas igualmente espaçadas e orientadas.

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.

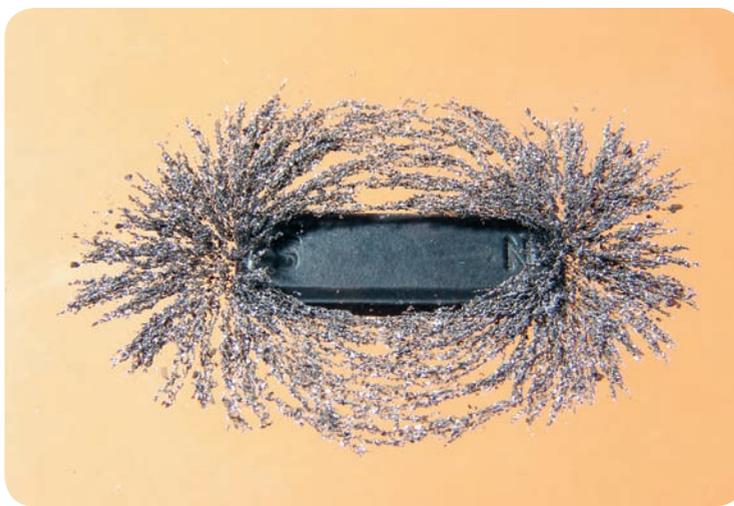
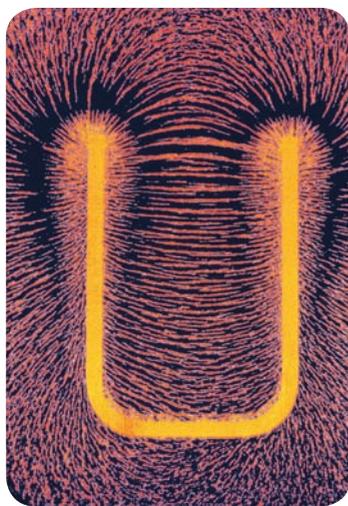


◀ **Figura 10.** (A) Em cada ponto do campo o vetor campo magnético  $\vec{B}$  é tangente à linha de indução e tem o sentido dela. (B) As pequenas agulhas magnéticas se orientam na direção do vetor campo magnético  $\vec{B}$  e com o polo norte no sentido de  $\vec{B}$ .

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.

## Campo magnético das correntes elétricas

### Objetivos

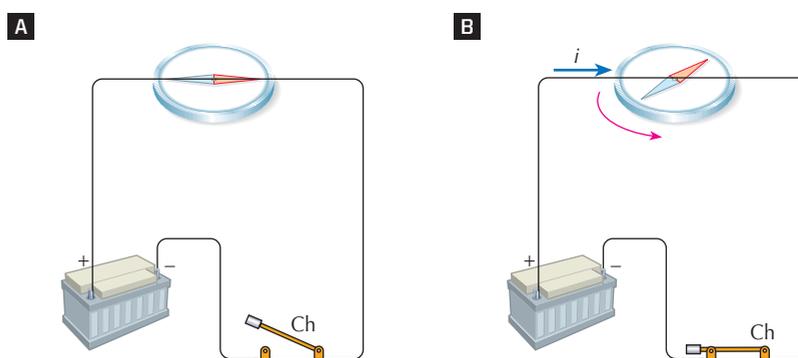
- ▶ Determinar intensidade, direção e sentido do vetor indução magnética com base na lei de Biot-Savart.
- ▶ Utilizar a regra da mão direita nº 1 para determinar o sentido do vetor indução magnética gerado por uma corrente elétrica.
- ▶ Caracterizar o vetor indução magnética no centro de uma espira circular 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

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.

## Lei de Biot-Savart

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  $\Delta L$  um elemento muito pequeno desse condutor e  $P$  um ponto da região do espaço próximo ao condutor e à distância  $r$  de  $\Delta L$ . Seja  $\alpha$  o ângulo entre  $\Delta L$  e  $r$ . Observe que  $\Delta L$  e  $r$  determinam o plano  $\pi$ .

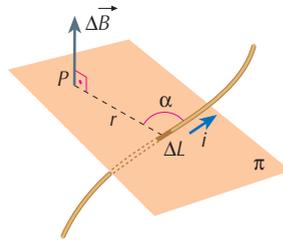


Figura 13. Lei de Biot-Savart: determinação de  $\Delta \vec{B}$  no ponto  $P$ , devido à corrente elétrica de intensidade  $i$  no elemento  $\Delta L$  de um condutor.

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

**a) direção:** perpendicular ao plano  $\pi$ .

**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  $\mu_0$  é denominado **permeabilidade magnética do vácuo**. Esse fator é uma constante universal análoga à permissividade  $\epsilon_0$  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  $\Delta L$ , e os demais dedos no sentido de  $\Delta L$  para o ponto  $P$ , onde o campo está sendo determinado. Observe que a palma da mão estará no plano  $\pi$  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 **quartzô de Savart**, para estudar a polarização da luz. A unidade de intervalo logarítmico de frequência chama-se **savart** em sua homenagem.

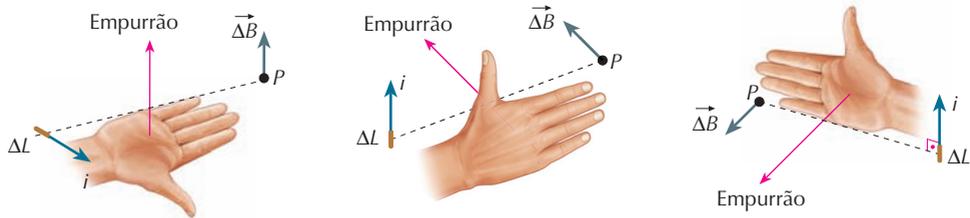


Figura 14. Determinação do sentido de  $\Delta\vec{B}$  utilizando a regra da mão direita nº 1.

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  $\mu_0$  será:

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

② As constantes  $\epsilon_0$  e  $\mu_0$  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:  $\Delta B = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{i \cdot \Delta L \cdot \sin \alpha}{R^2}$

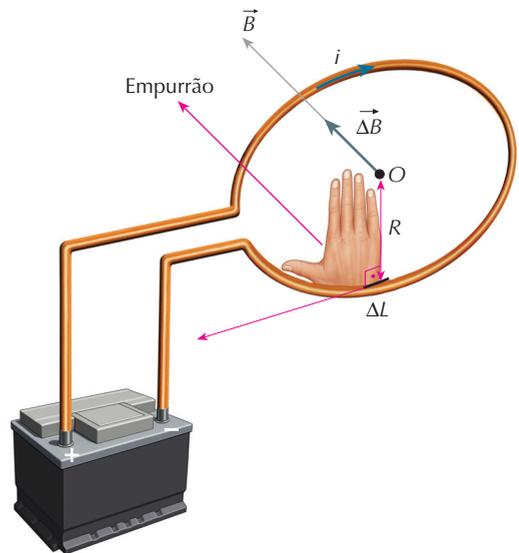


Figura 15. Determinação do vetor  $\vec{B}$  no centro  $O$  de uma espira circular. ➤

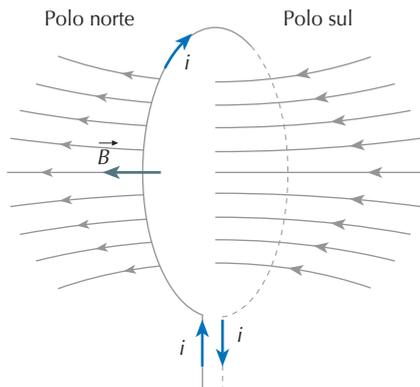
Como o ângulo entre  $R$  e  $\Delta L$  é  $\alpha = 90^\circ$ , temos que:  $\Delta B = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{i \cdot \Delta L}{R^2}$

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

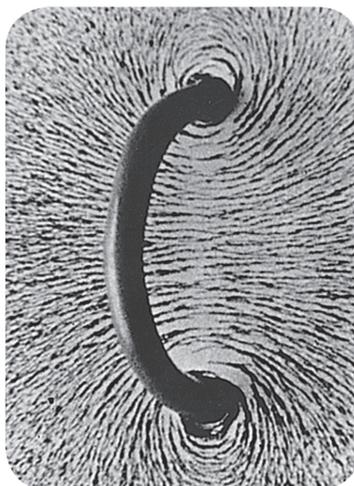
Sendo  $\sum \Delta L = 2\pi R$  (comprimento da circunferência), obtém-se:

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

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).



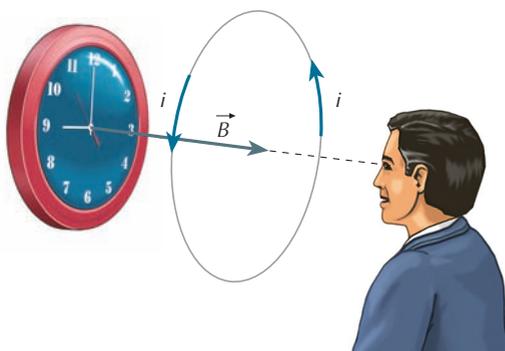
▲ **Figura 16.** Em uma espira circular, temos um polo norte e um polo sul.



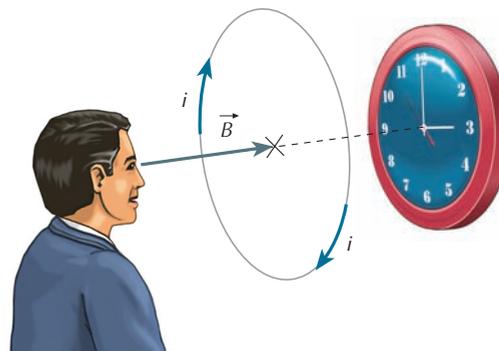
◀ **Visualização, com limalha de ferro, de um campo magnético gerado por condutor em forma de espira circular percorrida por corrente elétrica.**

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.

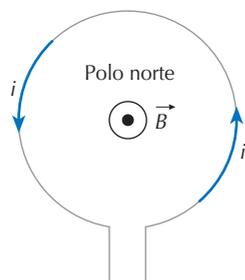


▲ **Figura 17.** Polo norte: se a corrente for vista no sentido anti-horário.

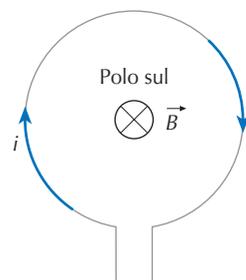


▲ **Figura 18.** Polo sul: se a corrente for vista no sentido horário.

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 ⊙ representa o vetor orientado do plano para o observador.



▲ **Figura 20.** O símbolo ⊗ 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:

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

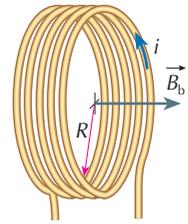


Figura 21. Bobina chata.

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.

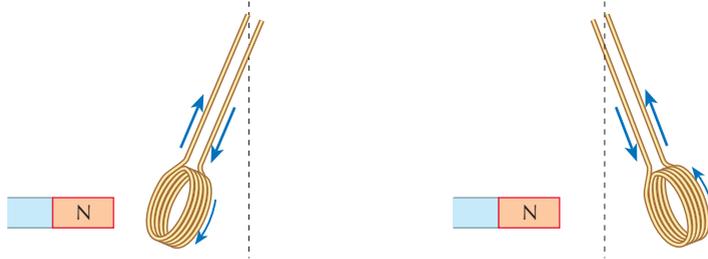


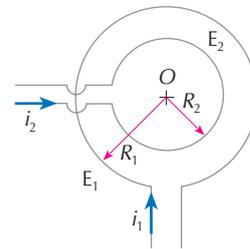
Figura 22. O comportamento de uma bobina é análogo ao de um ímã.

## 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.

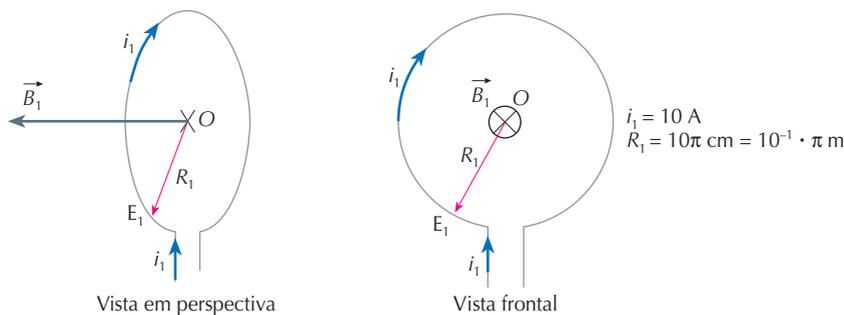
Sendo  $i_1 = 10$  A e  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  T · m/A:

- 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:



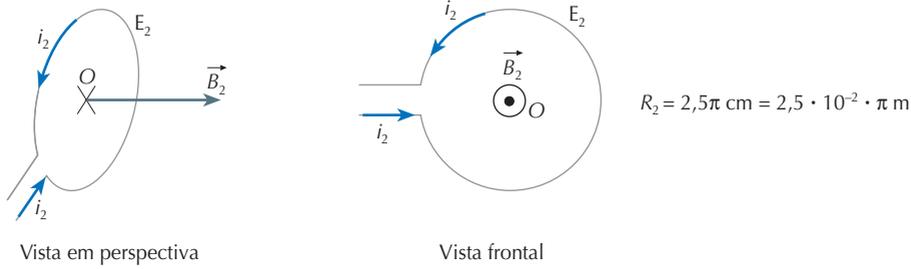
**direção:** perpendicular ao plano da espira;

**sentido:** determinado pela regra da mão direita n<sup>o</sup> 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:**  $B_2 = \frac{\mu_0}{2} \cdot \frac{i_2}{R_2}$

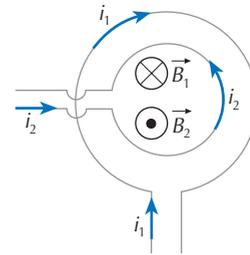
Para que o vetor indução magnética resultante no centro  $O$  seja nulo, como  $\vec{B}_1$  e  $\vec{B}_2$  têm a mesma direção e sentidos opostos (figura ao lado), eles devem ter a mesma intensidade:

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

Assim, temos:

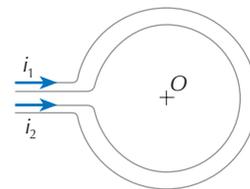
$$\frac{i_1}{R_1} = \frac{i_2}{R_2} \Rightarrow \frac{10}{10^{-1} \cdot \pi} = \frac{i_2}{2,5 \cdot 10^{-2} \cdot \pi} \Rightarrow \boxed{i_2 = 2,5 \text{ A}}$$

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

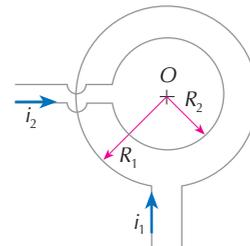


## EXERCÍCIOS PROPOSTOS

**P. 311** Duas espiras circulares, concêntricas e coplanares, de raios praticamente iguais a  $2\pi$  m são percorridas pelas correntes elétricas  $i_1 = 5$  A e  $i_2 = 3$  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.

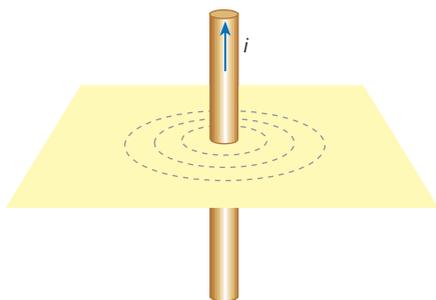
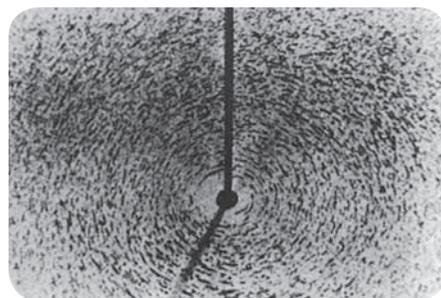


Figura 23. Linhas de indução do campo magnético de um condutor reto e extenso.



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:

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

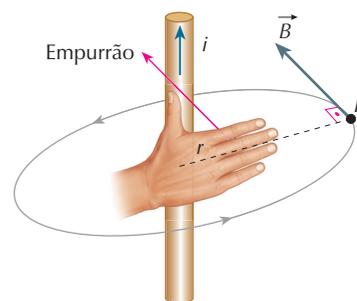


Figura 24. Características do campo magnético de um condutor reto e extenso.

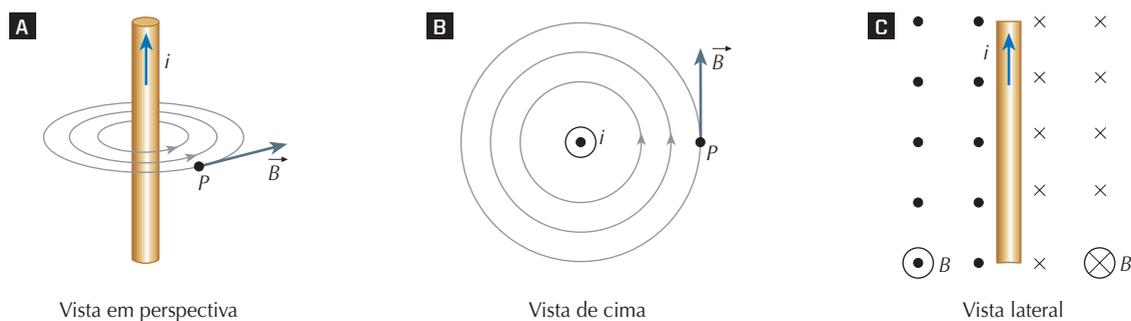


Figura 25. Três vistas do campo magnético originado por um condutor reto e extenso. Nas vistas (B) e (C), utilizamos a convenção internacional apresentada nas figuras 19 e 20 para uma grandeza orientada do plano para o observador  $\odot$  e do observador para o plano  $\otimes$ .

**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.



## 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.

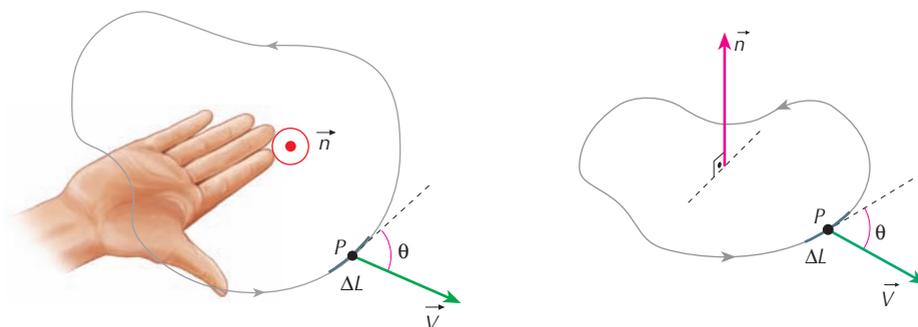
Considere um percurso plano fechado, de formato qualquer, representado em perspectiva e no plano da figura. Adotando um sentido para o percurso, tracemos a normal  $\vec{n}$  ao plano pela regra da mão direita nº 1, dispondo o polegar no sentido do percurso.

No ponto  $P$ , seja  $\vec{V}$  um vetor no plano do percurso, formando ângulo  $\theta$  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  $\vec{B}$ .

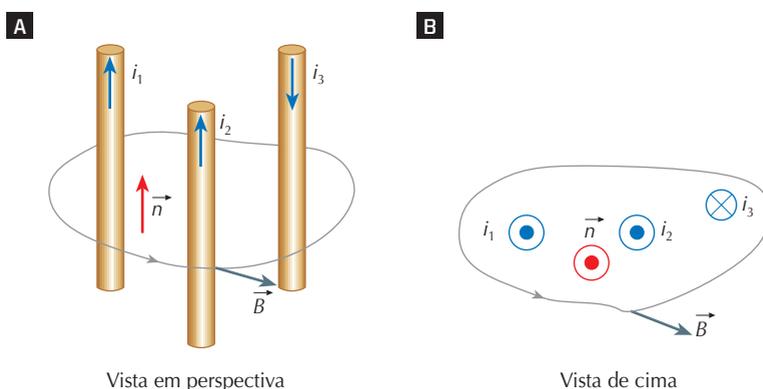


Figura 26. Percurso fechado orientado, enlaçando as correntes elétricas  $i_1$ ,  $i_2$  e  $i_3$ .

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  $\mu_0$  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 nº 1.

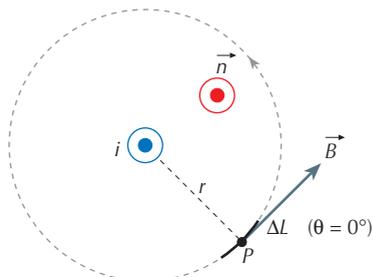


Figura 27. Esquema para o cálculo do campo magnético de um condutor reto, utilizando a lei de Ampère.

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:

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

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.

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

## 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.

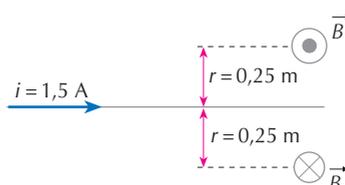
**Solução:**

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:

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

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

**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:

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

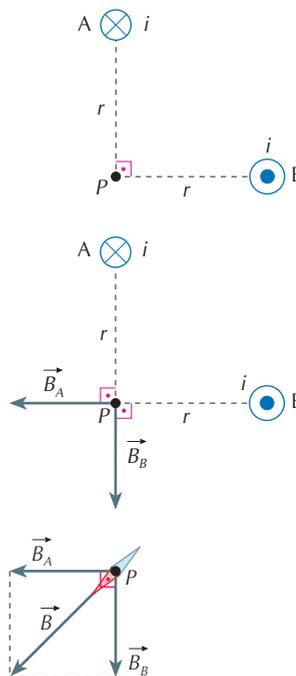
O vetor indução magnética resultante em P será  $\vec{B} = \vec{B}_A + \vec{B}_B$ , obtido pela regra do paralelogramo.

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  $\vec{B}$ .

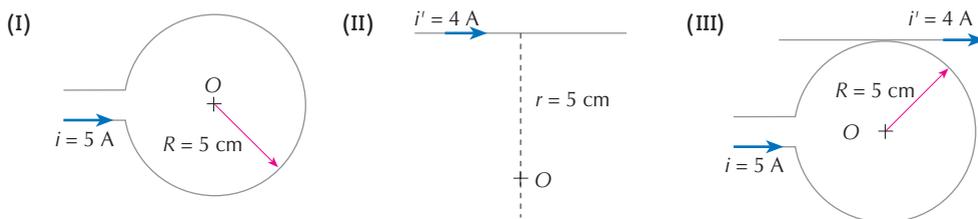
**Resposta:**  $\approx 7,1 \cdot 10^{-6} \text{ T}$



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

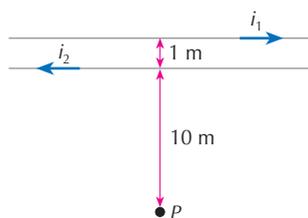


**P. 316** Dois condutores retos paralelos e extensos são percorridos por corrente elétrica de mesma intensidade  $i = 10$  A. Determine a intensidade do vetor indução magnética  $\vec{B}$ , no ponto P, nos casos indicados a seguir. (É dado  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{T} \cdot \text{m}}{\text{A}}$ .)

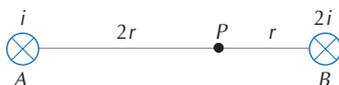


**P. 317** Dois condutores retos, paralelos e extensos conduzem correntes elétricas de sentidos opostos e intensidade  $i_1 = i_2 = 100$  A. Determine a intensidade do vetor indução magnética no ponto P.

(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?

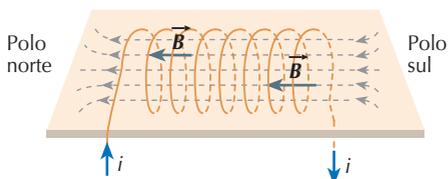
## 5 Campo magnético de um solenoide

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

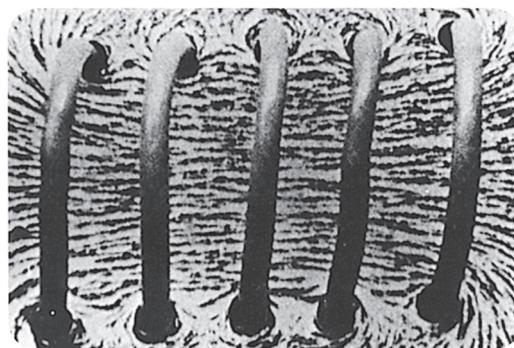
Na **figura 28**, o solenoide passa pelos furos de uma cartolina, sobre a qual colocamos limalha de ferro. Quando uma corrente elétrica  $i$  circula pelo solenoide, a limalha de ferro se dispõe segundo as linhas de indução do campo magnético originado.

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:  $\Delta C_1(\vec{B}) = B \cdot L \cdot \cos 0^\circ = B \cdot L$

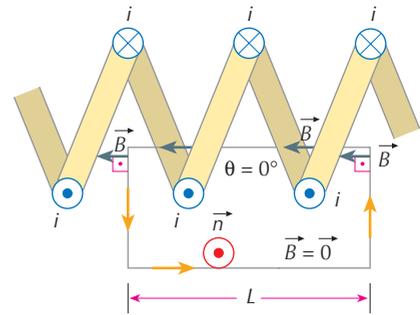
No exterior, como  $\vec{B} = \vec{0}$ ,  $\Delta C_2(\vec{B}) = 0$ , e nos lados perpendiculares ao eixo do solenoide, e internos a ele, os elementos de circulação valem:  $\Delta C_3(\vec{B}) = \Delta C_4(\vec{B}) = 0$ , pois  $\cos 90^\circ = 0$ .

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

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

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:**

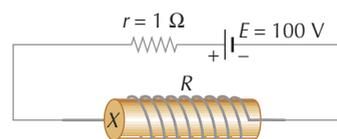
Para esse solenoide, no comprimento  $L = 1 \text{ m}$ , o número de espiras é  $N = 10.000$ . Sendo  $i = 0,4 \text{ A}$ , tem-se:

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

**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.

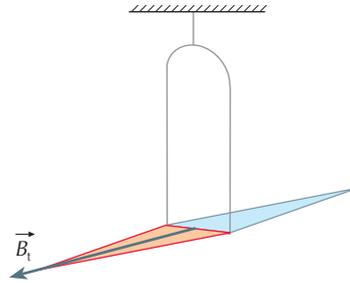
► Compreender os conceitos de inclinação magnética e declinação magnética.

► 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.

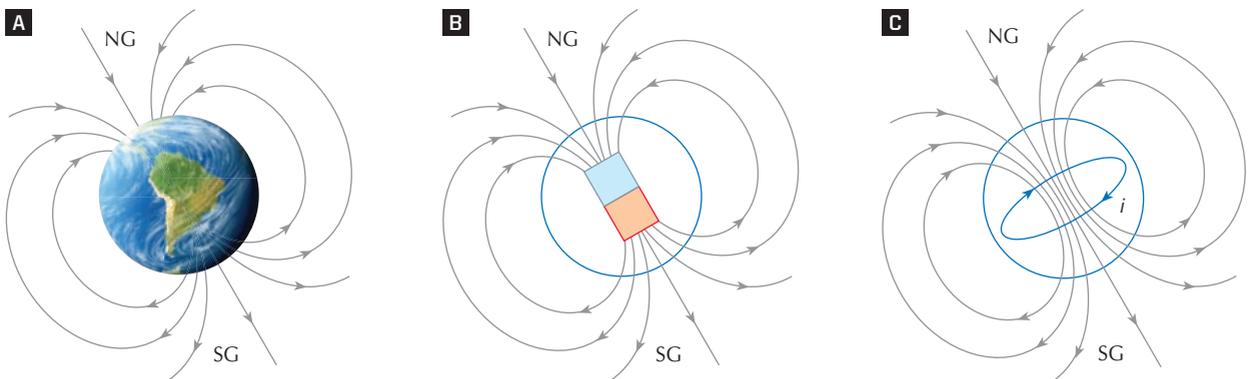
Na **figura 31A**, mostramos as linhas de indução do campo magnético observado nas proximidades da Terra. Essas observações são explicadas com base na ideia de que a Terra é um grande ímã (**fig. 31B**), indo as linhas de indução do **Sul Geográfico (SG)** para o **Norte Geográfico (NG)**.

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  $\vec{B}$ .



## 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.

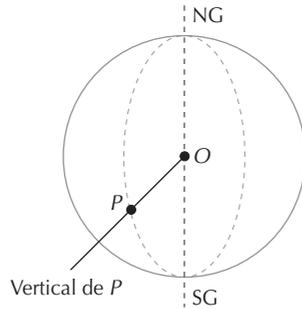


Figura 32. Meridiano geográfico. Considerando a Terra uma esfera, o meridiano que passa pelo ponto  $P$  é o plano do grande círculo, passando por  $P$  e pelos polos geográficos NG e SG.

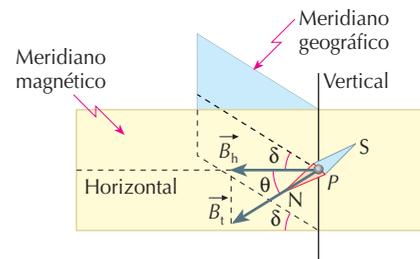


Figura 33. Campo magnético terrestre:  $\vec{B}_t$  = vetor indução magnética terrestre  $\vec{B}_h$  = componente horizontal  $\theta$  = inclinação magnética  $\delta$  = declinação magnética

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

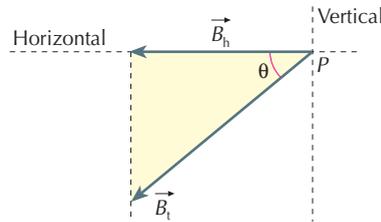


Figura 34. Inclinação magnética e componente horizontal de  $\vec{B}_t$ .

Os **polos magnéticos** da Terra são pontos nos quais a inclinação magnética é igual a  $90^\circ$ . **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  $\delta$  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.

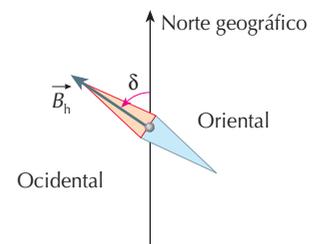


Figura 35. Declinação magnética.

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



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 **isoclinicas**, 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.



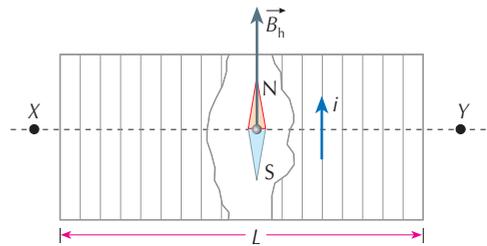
Fonte: Grupo de Geomagnetismo do Observatório Nacional

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.



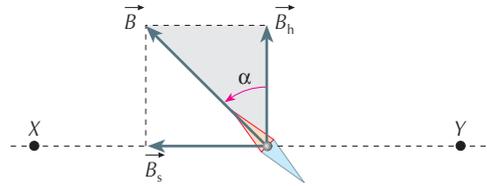
## EXERCÍCIO RESOLVIDO

**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  $\alpha$  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  $\alpha$ , 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:**  $\alpha$  é o ângulo cuja tangente é:  $\mu_0 \cdot \frac{N}{L} \cdot \frac{i}{B_h}$

## EXERCÍCIO PROPOSTO

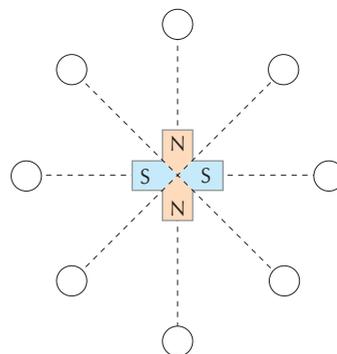
**P. 320** Em um ponto de São Paulo, o vetor indução magnética terrestre tem intensidade  $B_t = 8\pi \cdot 10^{-6} \text{ T}$ . Nesse ponto coloca-se um solenoide de modo que seu eixo seja paralelo ao campo  $\vec{B}_t$ . O comprimento do solenoide é 0,25 m e ele possui 500 espiras. Calcule a intensidade 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.

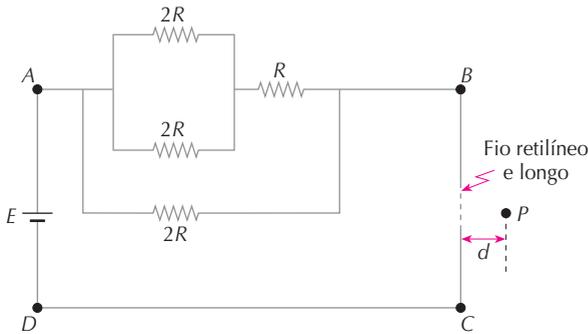
- Reproduza a figura no caderno e desenhe algumas linhas de força que permitam caracterizar a forma do campo magnético criado pelo ímã, no plano da figura.
- Desenhe nos oito círculos da figura reproduzida a orientação da bússola em sua posição de equilíbrio. A agulha deve ser representada por uma flecha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

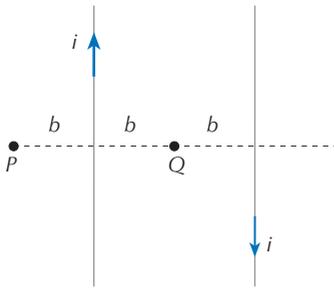
$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{T} \cdot \text{m}}{\text{A}})$$



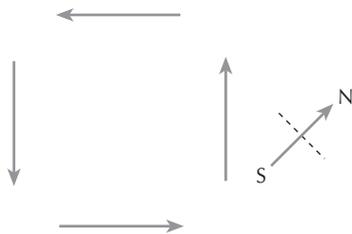
- Calcule a corrente total no circuito.
- Admita que o comprimento do fio no trecho BC seja muito maior que a distância  $d$  entre o fio e o ponto P, ou seja, em relação ao ponto P, o fio pode ser considerado como retilíneo e longo. Calcule o campo magnético nesse ponto, devido somente ao trecho BC.

**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.

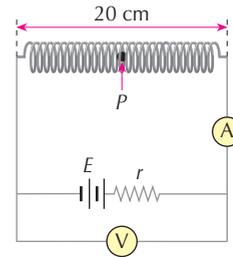


**P. 324** (Fuvest-SP) A figura indica quatro bússolas que se encontram próximas a um fio condutor percorrido por uma intensa corrente elétrica.



- 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.



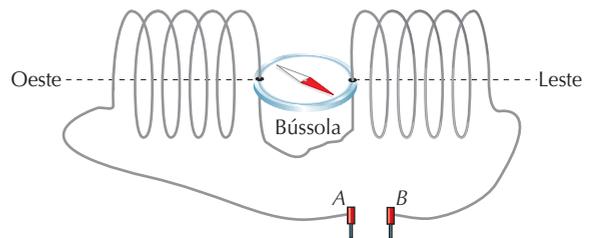
- Qual o valor da força eletromotriz da bateria?
- Qual a intensidade do campo magnético gerado no ponto P, localizado no meio do interior vazio do solenoide?

Dados:

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

$B = \mu_0 \cdot \frac{N}{L} \cdot i$  (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  $\theta$ , ângulo que a agulha faz com a direção norte. Os terminais A e B são inseridos convenientemente no circuito onde se quer medir a corrente. Uma medida inicial de calibração indica que, para  $\theta_0 = 45^\circ$ , a corrente  $I_0 = 2 \text{ A}$ .



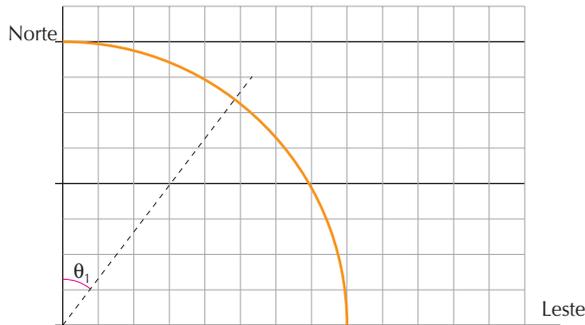
Note e adote:

- 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  $\mu_0$  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  $\theta_1$ , representada no esquema abaixo. Utilize, para isso, uma construção gráfica.



- Indique, no esquema dado, a nova direção  $\theta_2$  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.

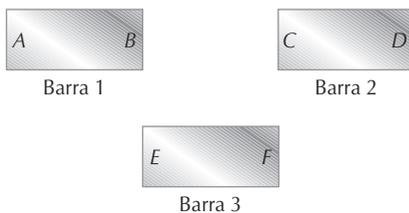
**P. 327** (Unicamp-SP) A corrente elétrica contínua em uma dada linha de transmissão é de 4.000 A. Um escoteiro perdido, andando perto da linha de transmissão, tenta se orientar utilizando uma bússola. O campo magnético terrestre é de  $B_t = 5,0 \cdot 10^{-5}$  T perto da superfície da Terra. A permeabilidade magnética é  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  T · 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 5π cm, é colocada no plano do meridiano magnético de um lugar. A componente horizontal do vetor indução magnética terrestre tem intensidade  $2 \cdot 10^{-5}$  T e  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  T · 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.



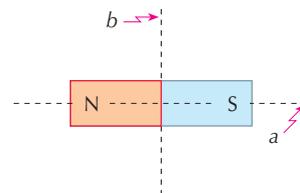
Passou, então, a fazer os seguintes testes:

- 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.

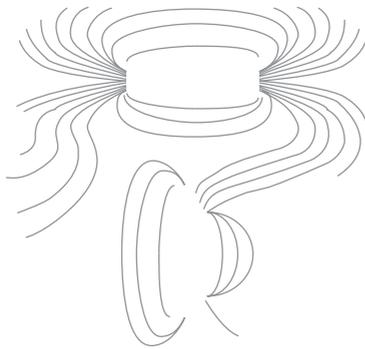


Logo em seguida ao corte, pode-se observar que os pedaços resultantes:

- 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:

**a)**

**d)**

**b)**

**e)**

**c)**

- 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.

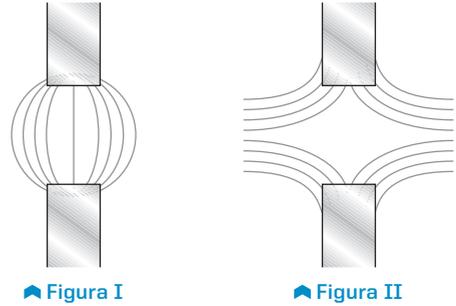


Figura I

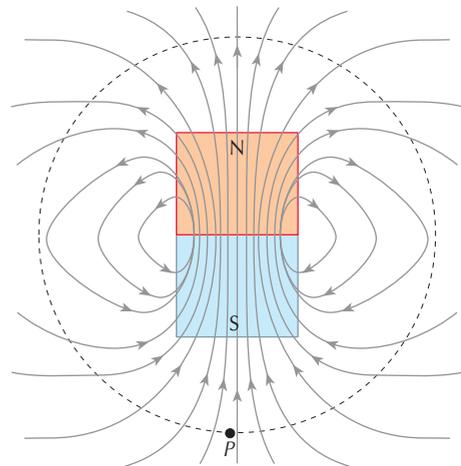
Figura II

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

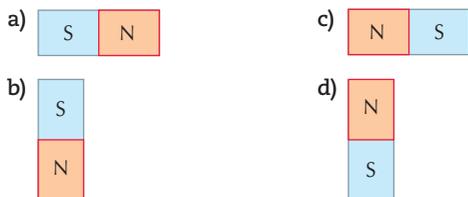
Nessas condições, desconsidere o campo magnético da Terra.



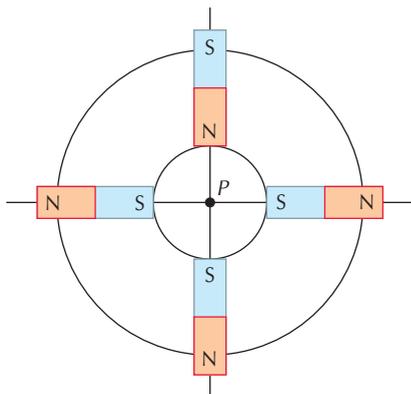
**T. 294** (Uerj) As linhas de indução de um campo magnético uniforme são mostradas abaixo.



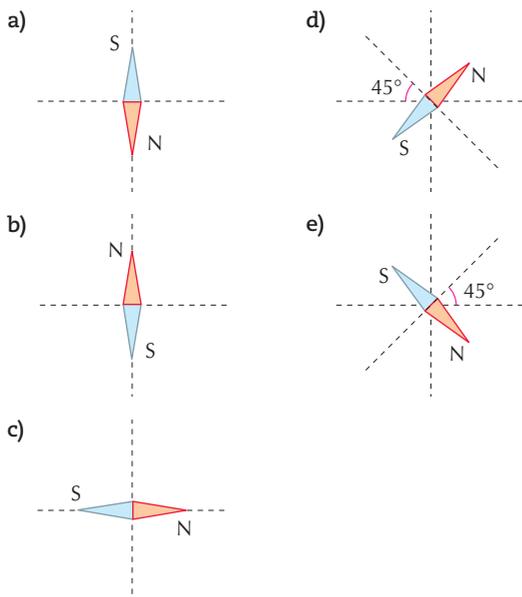
Designando por N o polo norte e por S o polo sul de um ímã colocado no mesmo plano da figura, é possível concluir que o ímã permanecerá em equilíbrio estável se estiver na seguinte posição:



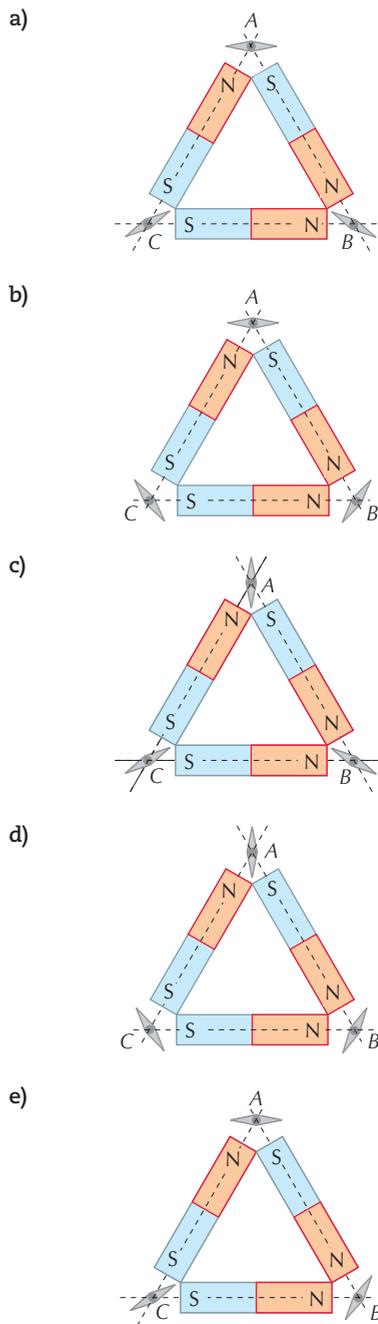
**T. 295** (Fuvest-SP) Quatro ímãs iguais em forma de barra, com as polaridades indicadas, estão apoiados sobre uma mesa horizontal, como na figura, vistos de cima.



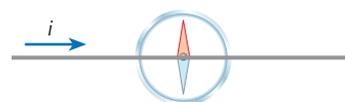
Uma pequena bússola é também colocada na mesa, no ponto central P, equidistante dos ímãs, indicando a direção e o sentido do campo magnético dos ímãs em P. Não levando em conta o efeito do campo magnético terrestre, a figura que melhor representa a orientação da agulha da bússola é:



**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:



**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                      d) apenas I e II  
 b) apenas II                     e) I, II e III  
 c) apenas III

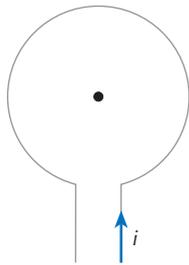
**T. 298** (PUC-MG) No centro de uma espira circular de raio  $R$  percorrida por uma corrente de intensidade  $i$ , o vetor indução magnética:

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



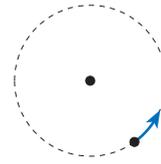
Considerando-se  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$ , as características do vetor indução magnética no centro da espira são:

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

**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                                      c) 2,0                                      e) 4,0  
 b) 1,0                                      d) 2,5

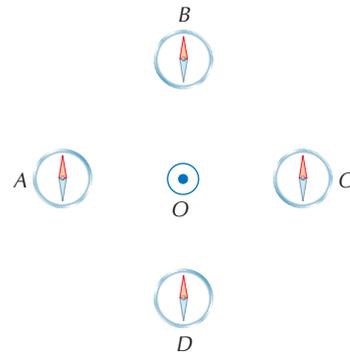
**T. 301** (UFU-MG) Considere o elétron, em um átomo de hidrogênio, como sendo uma massa pontual, girando, no plano da folha, em uma órbita circular, como mostra a figura.



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

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

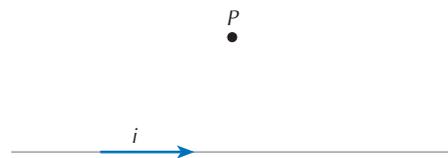
**T. 302** (Funrei-MG) Quatro bússolas, dispostas como na figura abaixo, apontam inicialmente para o polo Norte terrestre.



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.



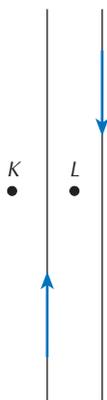
**T. 304** (UEPB) Na segunda década do século XIX, o físico dinamarquês Hans Christian Oersted (1777-1851) constatou que, ao aproximar uma bússola de um fio percorrido por uma corrente elétrica, sua agulha sofria um desvio. Daí, concluiu: “toda corrente elétrica gera no espaço que a envolve um campo 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  $L$ .

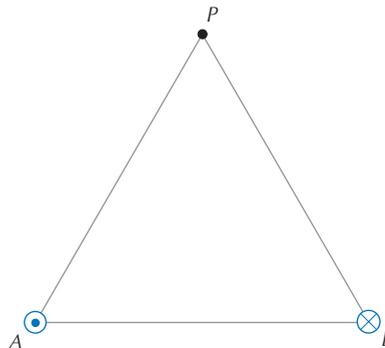


Os fios e os pontos estão no mesmo plano. O ponto  $L$  é equidistante dos dois fios e o ponto  $K$  está à esquerda deles.

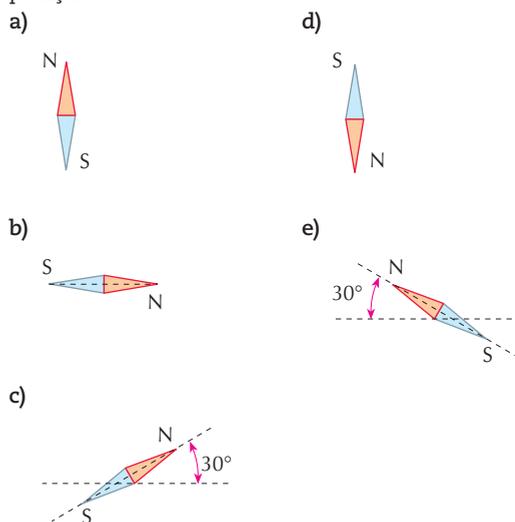
Considerando-se essas informações, é correto afirmar que o campo magnético:

- 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.

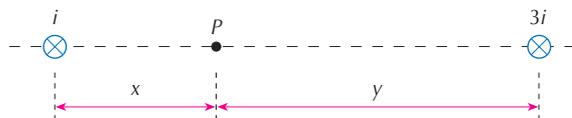
**T. 306** (Ufla-MG) A figura abaixo, em corte, mostra dois condutores  $A$  e  $B$  colocados nos vértices inferiores de um triângulo equilátero.



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:



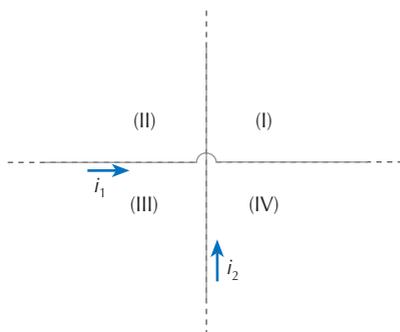
**T. 307** (Fatec-SP) Dois fios metálicos retos, paralelos e longos são percorridos por correntes  $i$  e  $3i$  de sentidos iguais (entrando no papel, no esquema). O ambiente é vácuo.



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

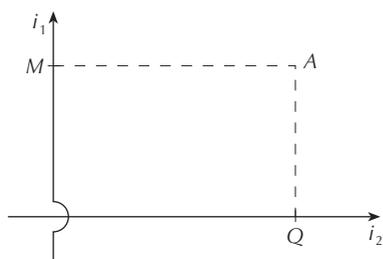
**T. 308** (UEL-PR) Dois fios longos e retilíneos são dispostos perpendicularmente entre si e percorridos por correntes elétricas de intensidades  $i_1$  e  $i_2$  como mostra a figura a seguir.



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.

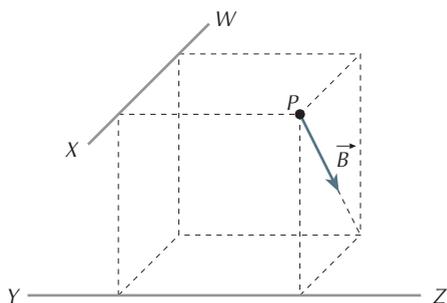


As distâncias são  $AM = 4,0$  cm e  $QA = 2,0$  cm, e as intensidades das correntes,  $i_1 = 8$  A e  $i_2 = 7$  A. O módulo do vetor indução magnética no ponto A é de:

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

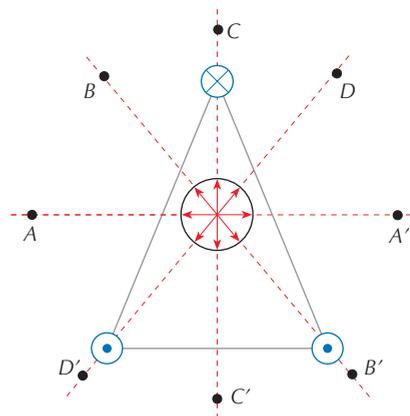
**T. 310** (UFMG) Dois fios condutores WX e YZ, retos e longos, estão dispostos sobre duas arestas de um cubo imaginário, como mostra a figura.



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.

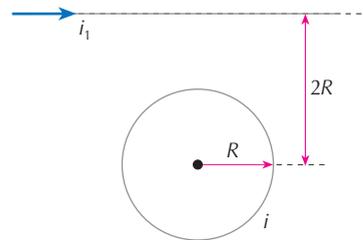
**T. 311** (Fuvest-SP) Três fios verticais e muito longos atravessam uma superfície plana e horizontal, nos vértices de um triângulo isósceles, como na figura abaixo desenhada no plano.



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.

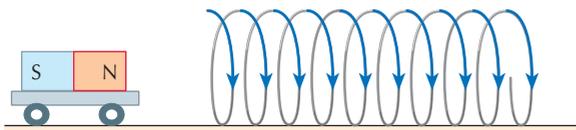


- T. 313** (FEI-SP) A intensidade do campo magnético produzido no interior de um solenoide muito comprido, percorrido por corrente, depende basicamente:
- só do número de espiras do solenoide.
  - só da intensidade da corrente.
  - do diâmetro interno do solenoide.
  - do número de espiras por unidade 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 polo sul do ponteiro da bússola aponta para o polo Norte geográfico porque o Norte geográfico corresponde ao Sul magnético.
- o polo norte do ponteiro da bússola aponta para o polo Norte geográfico porque as linhas do campo magnético não são fechadas.
- o polo sul do ponteiro da bússola aponta para o polo Sul geográfico porque o Sul geográfico corresponde ao Sul magnético.
- o polo norte do ponteiro da bússola aponta para o polo Sul geográfico porque o Norte geográfico corresponde ao Norte magnético.
- o polo sul do ponteiro da bússola aponta para o polo Sul geográfico porque o Norte geográfico corresponde ao Sul magnético.

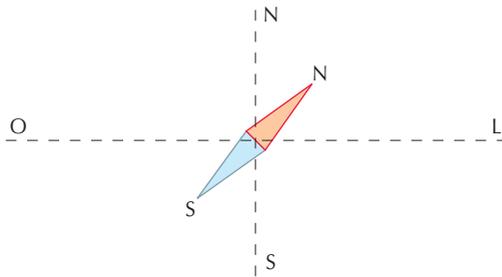
- T. 318** (UFRN) Um escoteiro recebeu do seu instrutor a informação de que a presença de uma linha de alta tensão elétrica pode ocasionar erro na direção que é fornecida, para o norte da Terra, por uma bússola.

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:

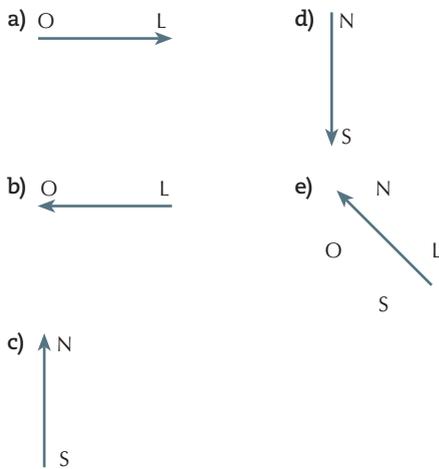
- a distância da bússola à linha for pequena, a corrente que passa na linha for intensa e a linha estiver orientada na direção norte-sul.
- a distância da bússola à linha for grande, a corrente que passa na linha for intensa e a linha estiver orientada na direção leste-oeste.
- a distância da bússola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



**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  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). 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  $10.000 \text{ ampères}$  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  $1 \text{ m}$  de distância do lugar por onde ocorreu a descarga:

- 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.
- 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.
- 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.
- se alinharão na direção do campo magnético da Terra, pois a essa distância o campo magnético criado pela descarga tem pouca intensidade.
- 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  $45^\circ$  em relação à direção original. Pode-se concluir que o módulo do campo adicional é:

- $\frac{B_h}{\sqrt{2}}$
- $\frac{B_h}{2}$
- $B_h$
- $\sqrt{2} \cdot B_h$
- $2B_h$

(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:

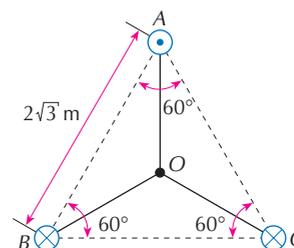
- $7\pi$
- $2\pi$
- $\frac{\pi}{4}$
- $\frac{\pi}{2}$
- um valor diferente desses



# 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  $2 \cdot 10^{-6} \text{ T}$ .

**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:

a) 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:

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

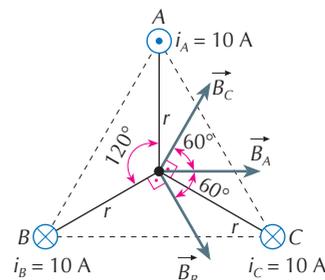


Figura I.

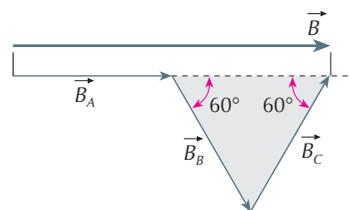
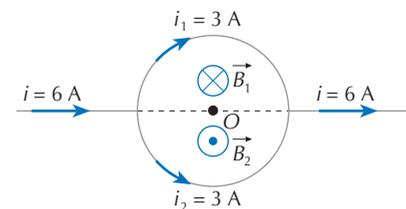
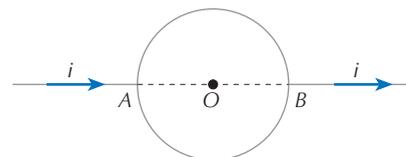


Figura II.



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:

$$B_R = 0$$

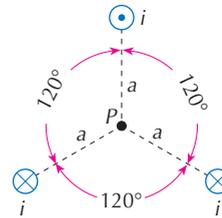
Observação:

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

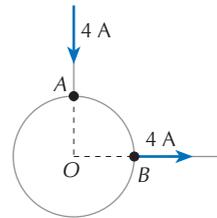
Resposta: a)  $B_1 = B_2 = 3 \cdot 10^{-6} \text{ T}$ ; b) zero

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

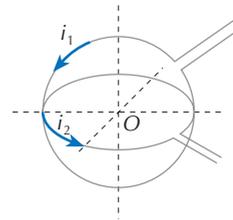


**P. 330** (Unicamp-SP) Um condutor homogêneo de resistência  $8 \Omega$  tem a forma de uma circunferência. Uma corrente  $I = 4 \text{ A}$  chega por um fio retilíneo ao ponto A e sai pelo ponto B por outro fio retilíneo perpendicular, conforme a figura. As resistências dos fios retilíneos podem ser 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  $10 \text{ cm}$ , 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)	$\otimes$	$\otimes$	$\odot$

