

# Hoje não tem vitamina, o liquidificador quebrou!



**E**ssa foi a notícia dramática dada por Cristiana no café da manhã, ligeiramente amenizada pela promessa de uma breve solução.

- Seu pai disse que arruma à noite!
- Vai ver que é outro fusível, que nem o chuveiro – palpitou Ernesto.
- Que fusível, que nada, é o motor do liquidificador que não funciona mesmo. Seu pai, o gênio da eletricidade, disse que deve ser um tal de carvãozinho que gastou.

- Carvãozinho?! Vai ver que ele confundiu o liquidificador com a churrasqueira – ironizou o menino.

Nesse ponto, a mãe achou bom liquidar a conversa:

- O engraçadinho aí não está atrasado para a escola, não?

Aquele carvãozinho ficou na cabeça do Ernesto até a noite, quando Roberto chegou. Não teve nem alô.

- Ô, pai, o que é esse tal de carvãozinho de que a mãe falou?

A resposta foi fácil. Roberto, prevenido, tinha trazido um par de “carvãozinhos”: duas barrinhas de grafite presas a duas molinhas, que os eletricitas costumam chamar de escovas. Conhecendo o filho, o pai foi logo dando a explicação completa.

- É isto aqui, ó. Essas pontas do carvãozinho é que dão o contato com o motor. A mola serve para manter o carvãozinho sempre bem apertado, para dar bom contato. Ele fica raspando no eixo do motor, por isso o pessoal chama isto aqui de escova. Com o tempo o carvãozinho gasta, fica muito curto, e a mola não consegue mais fazer com que ele encoste no motor. Aí não dá mais contato, precisa trocar.

É claro que a troca tinha de ser feita naquela mesma noite, com a palpitante assistência do filho. Roberto mostrou o rotor, as bobinas enroladas, o comutador e os velhos carvãozinhos gastos, com a esperada reação de Ernesto:

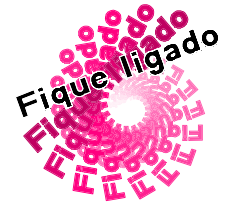
- Nossa, como gastou, heim, pai!

E o final, feliz, foi comemorado com o ruído do liquidificador triturando uma vitamina extra...

O contato por escovas é uma das muitas e engenhosas soluções tecnológicas criadas para permitir a aplicação prática dos fenômenos eletromagnéticos. Ele permite a passagem da corrente elétrica por um condutor em movimento, garantindo a continuidade desse movimento. Assim, permite a aplicação prática de um dos fenômenos eletromagnéticos que mais resultados práticos tem produzido: a ação do campo magnético sobre uma corrente elétrica.

Esse é o assunto da nossa aula de hoje.

## A ação do campo magnético sobre uma corrente elétrica



Na aula passada, vimos que cargas elétricas em movimento estão sujeitas à ação do campo magnético. Uma corrente elétrica é um fluxo de cargas elétricas em movimento. Logo, uma corrente elétrica deve sofrer também a ação de uma força devida ao campo magnético.

Como não existe corrente sem condutor, essa força deve aparecer sempre que um condutor percorrido por uma corrente elétrica esteja imerso num campo magnético.

Para determiná-la, vamos supor, inicialmente, que um condutor retilíneo, percorrido por uma corrente  $i$ , esteja imerso num campo magnético uniforme  $\vec{B}$ . Lembrando que só há força sobre uma carga em movimento se ela não se mover na mesma direção do campo magnético, o mesmo deve ocorrer para a corrente elétrica.

Vamos admitir, então, que esse condutor forme um ângulo  $\theta$  diferente de  $0^\circ$  e  $180^\circ$  com o campo magnético  $\vec{B}$ .

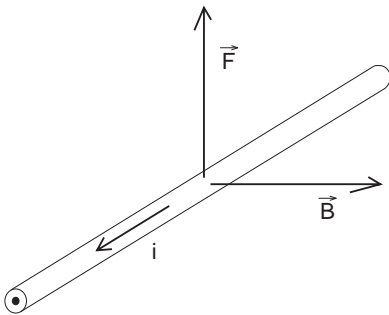


Figura 1. A direção e sentido do vetor  $\vec{F}$  que atua sobre um condutor percorrido por uma corrente  $i$ , imerso num campo magnético uniforme  $\vec{B}$ .

Inicialmente, vamos determinar a **direção e o sentido da força  $\vec{F}$**  que atua sobre esse condutor. Como, por convenção, o sentido da corrente é o sentido do movimento de cargas positivas, a determinação da direção e do sentido pode ser feita com o auxílio da mesma regra da mão direita utilizada para a determinação da força que atua sobre uma carga em movimento no campo magnético (a regra do tapa).

Basta substituir a velocidade pela corrente elétrica, ou seja, basta colocar o polegar no sentido da corrente elétrica. A palma da mão estendida continua indicando o sentido do campo magnético. A força, como antes, tem a direção e sentido do tapa. Veja a Figura 1.

Para calcular o **módulo da força  $\vec{F}$** , vamos relembrar a equação da força sobre uma carga  $q$  em movimento num campo magnético, vista na aula passada:

$$F = B \cdot q \cdot v \cdot \text{sen}\theta$$

Agora, porém, não temos apenas uma carga  $q$ , mas um condutor percorrido por uma corrente elétrica  $i$ . Lembrando a definição de corrente elétrica da Aula 40, temos:

$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t}$$

Dessa expressão obtêm-se  $\Delta q = i \cdot \Delta t$ . A expressão da força pode então ser reescrita da seguinte maneira:

$$F = B \cdot i \cdot \Delta t \cdot v \cdot \text{sen}\theta$$

AULA  
45

Suponha agora que apenas um segmento do condutor, de comprimento  $\ell$ , esteja imerso no campo magnético. A intensidade da força vai depender da carga  $\Delta q$  que percorre esse segmento  $\ell$ . Se a carga  $\Delta q$  percorre o segmento  $\ell$  num intervalo de tempo  $\Delta t$ , a sua velocidade média será:

$$v = \frac{\ell}{\Delta t}$$

Fazendo a substituição na expressão da força, temos:

$$F = B \cdot i \cdot \Delta t \cdot \frac{\ell}{\Delta t} \cdot \text{sen}\theta$$

Cancelando  $\Delta t$ , obtemos o valor da força:

$$F = B \cdot i \cdot \ell \cdot \text{sen}\theta$$

Como seria de se esperar, essa é uma expressão muito semelhante à do módulo da força sobre uma carga em movimento. Também aqui, como no caso das cargas elétricas em movimento, a força será nula se o condutor estiver disposto na mesma direção do campo magnético.

Passo a passo

- Nas Figuras 2a, 2b, 2c e 2d estão representados os vetores campo magnético  $\vec{B}$ , nos quais estão imersos condutores retilíneos percorridos por uma corrente elétrica  $i$ . Suponha que o campo magnético em cada região é uniforme. Aplicando a regra da mão direita, represente o vetor  $\vec{F}$  que atua sobre os condutores em cada caso.

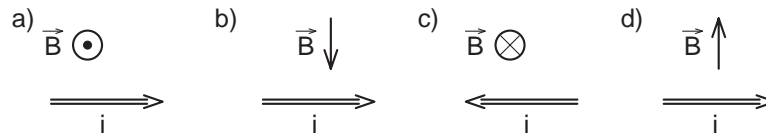


Figura 2

Solução:

Aplica-se a regra da mão direita: coloca-se a palma da mão na direção e sentido de  $\vec{B}$  e, girando-a até que o polegar coincida com o sentido da corrente elétrica  $i$ , obtêm-se a direção e o sentido da força, que seriam a direção e o sentido de um “tapa” dado com essa mão.

Se a carga fosse negativa, a força teria a mesma direção, mas sentido oposto. Veja a Figura 3.

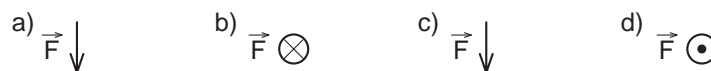


Figura 3

2. Um fio condutor retilíneo de 0,20 m de comprimento está disposto horizontalmente numa região em que existe um campo magnético também horizontal e uniforme de módulo  $B = 0,5$  T. Suponha que esse fio seja percorrido por uma corrente elétrica  $i = 0,4$  A. Determine o módulo e a direção da força que atua sobre esse fio quando ele:
- esta na mesma direção do campo magnético  $\vec{B}$
  - forma um ângulo de  $53^\circ$  com o campo magnético  $\vec{B}$
  - é perpendicular ao campo magnético  $\vec{B}$

### Solução:

- a) Se o fio condutor tem a mesma direção do campo, o ângulo  $\theta$  é  $0^\circ$  ou  $180^\circ$ , cujo seno é zero. Portanto, **a força é nula.**
- b) Se o fio e o campo são horizontais, é fácil ver que a força que atua sobre o fio é vertical. O sentido da força depende dos sentidos do campo e da corrente elétrica. Para calcular o módulo, basta aplicar a expressão  $F = B \cdot i \cdot \ell \cdot \text{sen}\theta$ . Temos, então:  
 $F = 0,5 \cdot 0,4 \cdot 0,2 \cdot \text{sen}53^\circ$   
 Sendo  $\text{sen } 53^\circ = 0,8$ , obtemos:  
 **$F = 0,032\text{N}$**
- c) Nesse caso, nada muda em relação à direção da força, que continua vertical. Se as direções são perpendiculares,  $\theta = 90^\circ$  e  $\text{sen } 90^\circ = 1,0$ . Portanto, o módulo da força será dado pelo produto  $F = B \cdot i \cdot \ell$ . Temos, então:  
 $F = 0,5 \cdot 0,4 \cdot 0,2 \Rightarrow$   
 **$F = 0,04\text{N}$**

### Uma espira imersa num campo magnético - O efeito motor

Espira vem de espiral, nome que se dá a cada uma das voltas de um fio enrolado. Mas esse nome é usado mesmo quando a volta é retangular.

Imagine, então, uma espira retangular imersa num campo magnético uniforme, de maneira que dois de seus lados estejam dispostos perpendicularmente às linhas do campo.

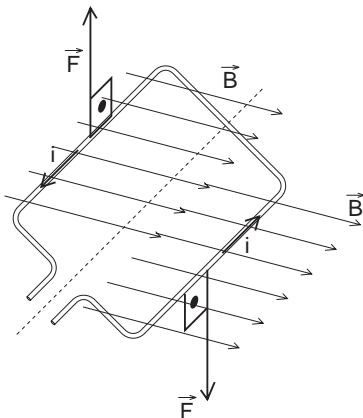


Figura 4. Uma espira retangular imersa num campo magnético: os lados perpendiculares à direção do campo sofrem a ação de forças verticais mas de sentidos opostos.

É fácil ver que uma corrente elétrica  $i$  percorrendo essa espira vai ter sentidos opostos em lados opostos. Suponha agora que o campo magnético e o plano da espira sejam horizontais. Pela regra da mão direita, pode-se verificar que os lados da espira que são perpendiculares ao campo magnético vão sofrer a ação de forças verticais, de sentidos opostos. Note que essas forças tendem a fazer a espira girar. Veja a Figura 4.

Os outros dois lados estão na mesma direção do campo e, por isso, não sofrem a ação de força.

**AULA**  
**45**

Se essa espira tiver de torcer uma pequena mola, por exemplo, que se oponha ao seu movimento, será possível avaliar a corrente elétrica que a percorre. Quanto maior a corrente, maior a torção. Fixando-se um ponteiro à espira (ou a um conjunto de espiras), pode-se medir a intensidade da corrente elétrica. Esse é o princípio de funcionamento do galvanômetro, elemento básico dos medidores elétricos. Veja a Figura 5.

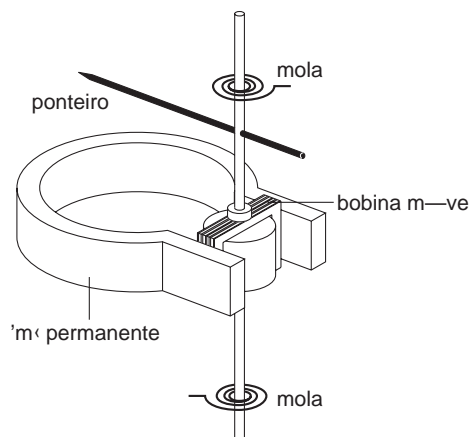


Figura 5. O princípio de funcionamento do galvanômetro: a mola se opõe à rotação da espira permitindo a medida da corrente elétrica que a percorre.

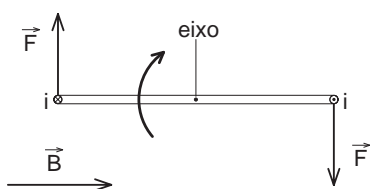


Figura 6a. As forças nos ramos paralelos fazem a espira girar no sentido anti-horário.

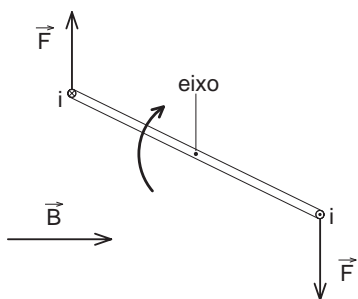


Figura 6b. Mesmo em movimento, as forças se mantêm na mesma direção e sentido.

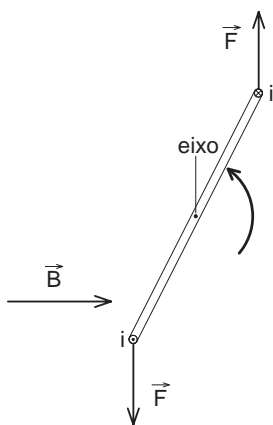


Figura 6c. Quando ela passa do plano vertical o sentido de rotação se inverte. Note que o sentido de percurso da corrente elétrica também se inverteu.

Suponha agora que essa espira esteja apoiada num eixo, de forma que as forças que atuam nos seus lados possam fazê-la, de fato, girar. Veja a Figura 6a.

Vamos acompanhar o seu movimento. É interessante notar que, à medida que a espira se movimenta, a direção e o sentido das forças que atuam nos seus lados não mudam, pois os sentidos da corrente e do campo continuam os mesmos. Veja a Figura 6b.

Por isso, quando o lado de cima fica à esquerda do lado de baixo, o sentido de rotação se inverte. A espira que estava girando no sentido anti-horário passa a girar no sentido horário. Veja a Figura 6c.

A espira, nessas condições, vai adquirir um movimento de vaivém.

Se, de alguma forma, for possível fazer com que o sentido de rotação se mantenha constante, essa espira será o elemento básico de um motor. Isso se consegue com um comutador – dois contatos móveis ligados a um gerador por meio de um par de escovas (os carvãozinhos da nossa história).

Como você pode ver na Figura 7, esses contatos móveis permitem que a corrente elétrica percorra a espira sempre no mesmo sentido, fazendo com que as forças atuem sobre ela de maneira a produzir um sentido único de rotação. Esse é o chamado **efeito motor**, porque nele se baseia a maior parte dos motores elétricos.

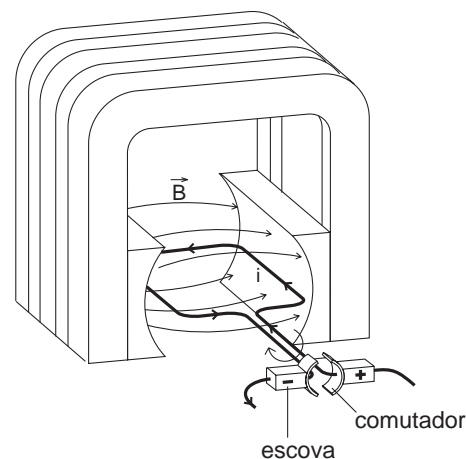


Figura 7. Um sistema de comutadores, contatos móveis por escovas, faz com que a espira seja percorrida pela corrente sempre no mesmo sentido, garantindo um sentido único de rotação

## Campo magnético gerado por um condutor retilíneo percorrido por uma corrente elétrica

Se um campo magnético  $\vec{B}$  pode atuar sobre um condutor percorrido por uma corrente elétrica, podemos supor que um condutor percorrido por uma corrente elétrica gere um campo magnético. Esse efeito, aliás, foi a primeira constatação experimental de que a eletricidade e o magnetismo eram aspectos de um mesmo fenômeno, o eletromagnetismo. Trata-se da experiência de Oersted, a que já nos referimos na aula anterior.

Quais são as características desse campo magnético  $\vec{B}$ ? Para saber, precisamos dar a direção, o sentido e o módulo de  $\vec{B}$ . Para isso vamos, inicialmente, descrever uma experiência.

Suponha que se coloque um longo condutor retilíneo verticalmente, atravessando uma mesa horizontal. Sobre essa mesa vamos colocar uma bússola que possa circundar esse condutor.

Vamos supor também que pelo condutor passa uma corrente elétrica suficientemente intensa. Isso é importante para que o campo magnético gerado pelo condutor seja bem mais forte que o campo magnético terrestre, ou seja, para que a orientação da bússola indique apenas a ação do campo gerado pelo condutor.

Movendo, então, a bússola sobre a mesa, vamos perceber que as linhas do campo magnético descrevem círculos em torno do condutor. Veja a Figura 8.

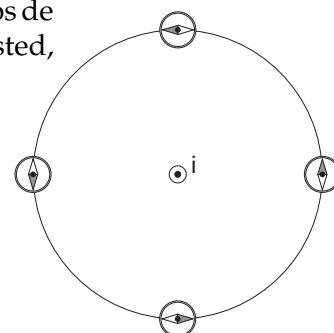


Figura 8. Campo magnético gerado por um condutor retilíneo. Observe que a agulha da bússola é tangente em cada ponto a uma circunferência com centro no condutor.

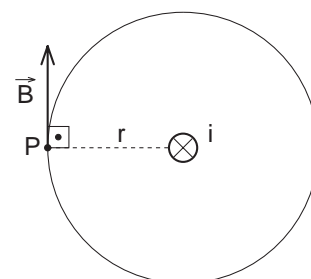


Figura 9. O campo magnético em P tem a direção da tangente à circunferência de raio r e o sentido indicado pela regra da mão direita. A corrente i está orientada para dentro do plano da figura.

Dessa forma podemos determinar a direção, o sentido e o módulo do campo magnético  $\vec{B}$  gerado num ponto P, a uma distância r do condutor. A experiência mostrou que esse campo tem a direção da tangente à circunferência que passa por P. Essa circunferência tem raio r, que é a distância de P ao condutor e está contida num plano perpendicular ao condutor. Na nossa experiência, esse plano é o plano da mesa. Veja a Figura 9.

A experiência permite ainda a determinação do sentido do campo. Ele pode ser obtido por uma regra prática, utilizando-se também a mão direita. Basta colocar o polegar no sentido da corrente e dobrar os dedos: eles indicarão o sentido de  $\vec{B}$ . Veja a Figura 10.

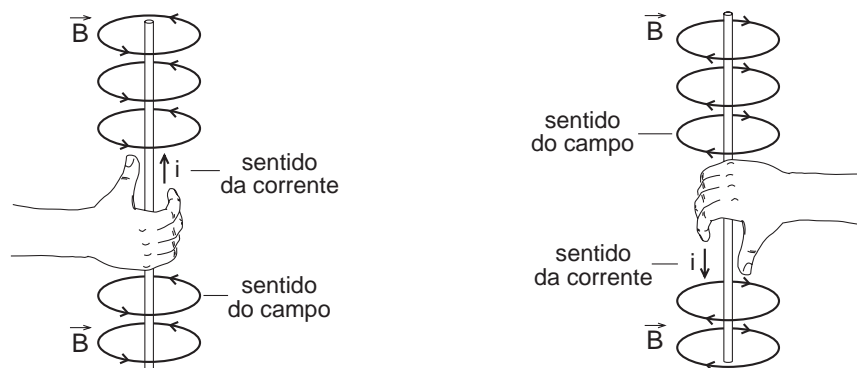


Figura 10. Regra da mão direita para o campo magnético gerado por um condutor

O módulo de  $\vec{B}$  é determinado também a partir de verificações experimentais. Verifica-se que para um condutor muito longo, em relação à distância  $r$ , o campo magnético gerado por um condutor percorrido por uma corrente elétrica  $i$  no ponto  $P$  tem as seguintes características:

- I)  $B$  é diretamente proporcional a  $i$
- II)  $B$  é inversamente proporcional a  $r$

Matematicamente, essas relações pode ser expressas da seguinte maneira:

$$B = \text{constante} \cdot \frac{i}{r}$$

Essa constante, no vácuo, vale  $2 \cdot 10^{-7} \text{T m/A}$ . Portanto, a expressão do módulo de  $\vec{B}$  pode ser escrita na forma:

$$B = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{i}{r}$$

### Passo a passo

3. Na Figura 11 está representado um condutor retilíneo, perpendicular ao plano da figura. Ele é percorrido por uma corrente  $i = 2,0 \text{ A}$ , dirigida para fora do plano da figura (a corrente elétrica não é um vetor, mas utilizamos a mesma representação na figura para facilitar a compreensão). Determine o módulo, a direção e o sentido do campo magnético nos pontos A e B situados a  $0,1 \text{ m}$  do condutor.

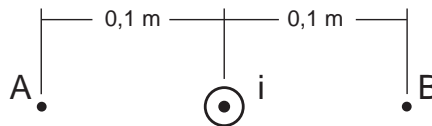


Figura 10

### Solução:

O módulo do campo magnético em B é o mesmo nos pontos A e B, pois ambos estão à mesma distância  $r = 0,1 \text{ m}$  do condutor. Aplicando-se a expressão de B, temos, portanto:

$$B_A = B_B = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{i}{r}$$

$$B_A = B_B = 2 \cdot 10^{-7} \cdot 2,0 \neq 0,1$$

$$B_A = B_B = 4 \cdot 10^{-8} \text{ T}$$

Para determinar a direção e o sentido de  $\vec{B}$ , basta aplicar a regra da mão direita. Em A o vetor  $\vec{B}$  terá direção **vertical** e sentido **para baixo**; em B, **vertical para cima** (estamos supondo que o plano da figura é horizontal).

## Força entre condutores retilíneos e paralelos

Se um condutor percorrido por uma corrente elétrica pode gerar um campo magnético, e se um campo magnético pode exercer uma força sobre um condutor percorrido por uma corrente elétrica, pode-se concluir que dois condutores percorridos por corrente elétrica exercem forças entre si.

O caso mais interessante de ação mútua entre dois condutores ocorre quando esses condutores são paralelos. Vamos inicialmente examinar o caso em que as correntes têm o mesmo sentido. Veja a Figura 12.

O condutor 1, percorrido por uma corrente elétrica  $i_1$ , gera um campo magnético  $\vec{B}_1$ , onde se encontra o condutor 2 percorrido pela corrente elétrica  $i_2$ . Aplicando as duas regras da mão direita que aprendemos, podemos determinar a direção e o sentido de  $\vec{B}_1$  atuando no condutor 2, e qual a força  $\vec{F}_1$  que esse campo faz aparecer nesse condutor. Essa força vai ter o sentido de aproximar o condutor 2 do condutor 1.

Se fizermos o mesmo raciocínio para determinar a força que o condutor 2 exerce sobre o condutor 1, vamos obter também uma força que tende a aproximar 1 de 2.

Conclui-se, portanto, que **condutores paralelos percorridos por correntes elétricas no mesmo sentido se atraem**.

Repetindo o mesmo raciocínio para correntes de sentidos opostos, vamos observar forças de repulsão entre eles. Veja a Figura 13.

Portanto, **condutores paralelos percorridos por correntes elétricas de sentidos opostos se repelem**.

É interessante notar que esse fenômeno originou a definição da unidade fundamental de corrente elétrica do SI, o **ampère**:

**O ampère é a corrente elétrica constante que, mantida em dois condutores retilíneos, paralelos, de espessura desprezível e comprimento infinito, separados por uma distância de 1 metro, gera em, cada um desses condutores, uma força de  $2 \cdot 10^{-7}$  newtons por metro de comprimento.**

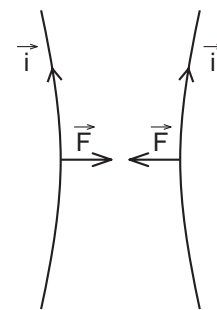


Figura 12  
Forças de interação entre condutores paralelos percorridos por correntes elétricas de mesmo sentido

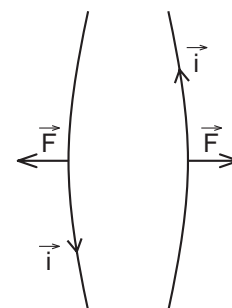


Figura 13  
Forças de interação entre condutores paralelos percorridos por corrente elétricas em sentidos opostos.

## Campo gerado por uma bobina ou solenóide

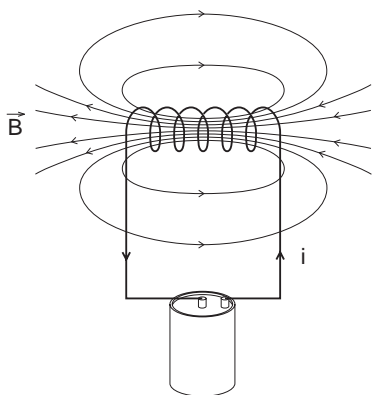


Figura 14. Campo magnético gerado por um solenóide

Se um condutor retilíneo gera um campo magnético circular, pode-se imaginar que um condutor circular, formando uma espira, gere um campo magnético retilíneo.

Isso de fato pode ocorrer quando, em vez de uma única espira, tivermos uma conjunto de espiras enroladas formando uma bobina ou solenóide. Veja a Figura 14.

Pode-se notar na figura que, quanto maior o número de espiras, maior o solenóide e, conseqüentemente, mais retilíneas serão as linhas do campo magnético no interior do solenóide.



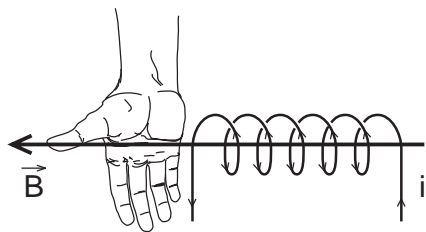


Figura 15. Campo no interior de um solenóide – regra da mão direita.

Note que a mesma regra da mão direita que indica o sentido do campo gerado por um condutor retilíneo é aplicada ao solenóide, invertendo-se o papel dos dedos e do polegar. Nesse caso, devemos colocar os dedos em curva de acordo com o sentido da corrente elétrica que percorre o solenóide. O sentido do campo, no interior do solenóide, será indicado pelo polegar. Veja a Figura 15.

O campo no interior de um solenóide é diretamente proporcional ao número de espiras e à intensidade da corrente que as percorre. Se o interior, o núcleo do solenóide, for preenchido com um material ferromagnético, a intensidade do campo magnético aumenta enormemente.

Aliás, é dessa forma que se constroem os eletroímãs, bobinas enroladas em núcleos de ferro que, quando percorridas por uma corrente elétrica geram um intenso campo magnético.

A grande vantagem do eletroímã, além do intenso campo magnético que pode gerar, é a possibilidade de ser acionado, ou não, bastando uma chave que permita, ou não, a passagem da corrente elétrica. Os eletroímãs têm inúmeras aplicações tecnológicas, desde simples campainhas e relês a gigantescos guindastes. Veja a Figura 16.

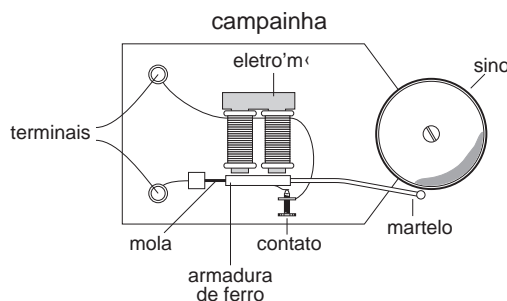


Figura 16. Aplicações tecnológicas do eletroímã

A ação do campo magnético sobre uma corrente elétrica e o fenômeno inverso, a geração de um campo magnético por uma corrente elétrica, são conhecidos há quase dois séculos. São, certamente, fenômenos responsáveis por uma revolução tecnológica que modificou drasticamente a nossa vida.

Mas essa revolução não surgiu imediatamente. Embora já se conhecesse a tecnologia dos eletroímãs, com suas inúmeras aplicações, demorou ainda algumas décadas para que tudo isso pudesse de fato ser aplicado na prática. Faltava desenvolver uma tecnologia capaz de gerar a enorme quantidade de energia que esses dispositivos exigiam. As pilhas eram as únicas fontes de energia elétrica, mas eram (e ainda são...) caras e muito pouco práticas. Para iluminar alguns metros de rua eram necessárias enormes pilhas que utilizavam substâncias químicas incômodas e poluentes.

Essa nova tecnologia começou a surgir em 1831, quando foi descoberto um novo fenômeno eletromagnético: a **indução eletromagnética**. Um campo magnético variável, junto a um circuito elétrico, faz aparecer uma corrente elétrica nesse circuito. É o princípio básico dos geradores e das grandes usinas de eletricidade, que tornaram possível uma nova era – a era da eletricidade.

Nesta aula você aprendeu:

- como um campo magnético atua sobre um condutor percorrido por uma corrente elétrica;
- como determinar as características da força de interação entre o campo magnético e a corrente elétrica;
- a ação de um campo magnético sobre uma espira de corrente;
- as características de um campo magnético gerado por uma corrente elétrica;
- como interagem dois condutores paralelos percorridos por correntes elétricas;
- as características do campo magnético gerado por um solenóide.



### Exercício 1

Nas Figuras 17 a, 17 b, 17 c e 17 d estão representados os vetores campo magnético  $\vec{B}$  de diferentes regiões, nos quais estão imersos condutores retilíneos percorridos por uma corrente elétrica  $i$ . Suponha que o campo magnético em cada região é uniforme. Aplicando a regra da mão direita, represente o vetor  $\vec{F}$  que atua sobre os condutores em cada caso.

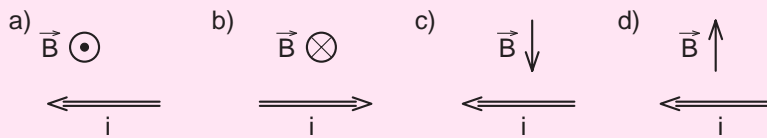
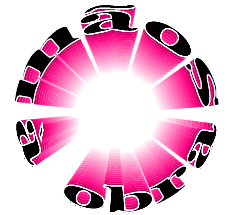


Figura 17



### Exercício 2

Um fio condutor retilíneo de 0,50 m de comprimento está disposto horizontalmente em uma região na qual existe um campo magnético, também horizontal e uniforme, de módulo  $B = 0,35$  T. Suponha que esse fio seja percorrido por uma corrente elétrica  $i = 0,8$  A. Determine o módulo e a direção da força que atua sobre esse fio quando ele:

- está na mesma direção do campo magnético  $\vec{B}$ .
- forma um ângulo de  $37^\circ$  com o campo magnético  $\vec{B}$ .
- é perpendicular ao campo magnético  $\vec{B}$ .

### Exercício 3

Na Figura 18 está representado um condutor retilíneo, muito comprido, perpendicular ao plano da figura, percorrido por uma corrente  $i = 2,5$  A, dirigida para dentro do plano da figura. Determine o módulo, a direção e o sentido do campo magnético nos pontos A e B, situados a 0,05 m do condutor.



Figura 18