



# Estou desorientado!

A televisão noticiava com estardalhaço: um grupo de estudantes estava perdido na Serra do Mar. As buscas prosseguiam, as informações eram desconstruídas. Os pais, aflitos, davam entrevistas: “Não sei como isso foi acontecer”, dizia um deles. “Eu dei ao meu filho uma bússola novinha!”

– Ô, pai – comentou Ernesto, preocupado, assistindo ao noticiário. - Se você me desse uma bússola também não ia adiantar nada, eu não sei como se usa!

– Que vergonha, meu filho! – respondeu Roberto indignado. – É muito fácil. A bússola aponta sempre para o norte, aí você se orienta e pronto!

– Não sei não, pai – duvidou Ernesto – Eu estou no meio do mato, olho para a bússola e vejo que o norte é para lá. E daí? Se eu não sei para onde eu preciso ir, de que isso me adianta?

– Bom, sei lá! Eu sempre ouvi dizer que a bússola serve para a gente se orientar, deve haver um jeito, ué! – desconversou Roberto.

– É, pai, seu forte é eletricidade mesmo – comentou, irônico, Ernesto. E acrescentou, para arrematar a conversa:

– Nesse negócio de bússola, acho que não sou só eu que estou desorientado...

Será que alguém consegue se orientar **só com uma bússola**? É claro que não! Aqui a razão está com Ernesto. A bússola indica apenas uma direção, e só isso não é suficiente, embora seja necessário. Essa direção nos permite utilizar adequadamente um mapa, por exemplo, colocando-o na posição correta. Mas, sem um mapa, sem que a pessoa saiba onde está e para onde quer ir, a bússola é inútil.

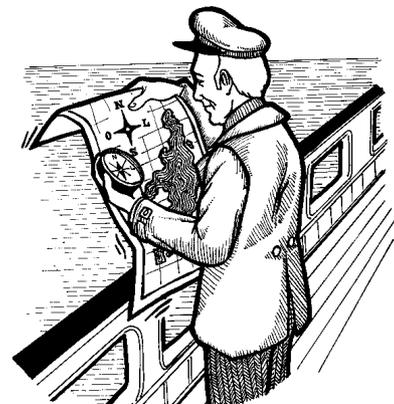


Figura 1. Sem os mapas, as bússolas seriam inúteis.

Quando se fala da época das grandes navegações, quando o Brasil foi descoberto, sempre se destaca muito o papel da invenção da bússola. Mas, se não existissem os mapas – mesmo os da época, muito imperfeitos –, tais viagens teriam sido impossíveis.

Para nós, entretanto, a importância maior da bússola não está ligada às grandes navegações, mas a outras descobertas igualmente importantes. Foi estudando as propriedades da bússola, em 1600, que William Gilbert, médico da rainha da Inglaterra, chegou à conclusão de que a Terra era um grande ímã. Também foi com o auxílio de uma bússola que, em 1820, Hans Christian Oersted, um professor de Física dinamarquês, demonstrou que a eletricidade e o magnetismo eram aspectos diferentes de um mesmo fenômeno, o **eletromagnetismo**. Este é o assunto das nossas próximas aulas.

## Magnetismo

O magnetismo já era conhecido, séculos antes de Cristo, pelos antigos gregos. Seu nome deriva de uma pedra, a magnetita, muito encontrada na Magnésia, uma região da Ásia Menor próxima à Grécia. Os gregos sabiam que essa pedra era capaz de atrair pedaços de ferro, ou seja, era um **ímã natural**. Logo se percebeu que outros pedaços de ferro, em contato com a magnetita, podiam também se transformar em ímãs. Esses pedaços de ferro eram **ímãs artificiais** que, há cerca de 1.000 anos, permitiram aos chineses a invenção da bússola – agulhas imantadas que podem girar livremente e se orientam sempre na mesma direção.

A bússola, por sua vez, nos levou à descoberta de que a própria Terra é um grande ímã. As regiões de um ímã nas quais o magnetismo é mais intenso, em geral as extremidades, são chamadas de pólos. Isso porque, quando um ímã é posto a girar livremente num plano horizontal, essas regiões apontam para os pólos terrestres.

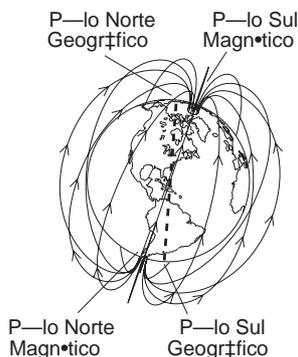


Figura 2. Os pólos do ímã apontam para os pólos da Terra. Observe que o Polo Norte geográfico está próximo do **polo sul magnético** e que o Polo Sul geográfico está perto do **polo norte magnético**.

Veja a Figura 2. O polo norte de um ímã, ou de uma bússola, é aquele que aponta para o Polo Norte terrestre. O Polo Sul, claro, é o que aponta para o Polo Sul terrestre. Os pólos magnéticos têm uma propriedade semelhante às cargas elétricas: pólos iguais se repelem, pólos diferentes se atraem. Mas a semelhança pára por aí. Não existem pólos magnéticos separados, como existem as cargas positivas e negativas. Por isso não é possível ter um ímã com uma só polaridade. Quando um ímã se parte, cada pedaço se torna um novo ímã com dois pólos, norte e sul, qualquer que seja o número de pedaços ou o tamanho de cada um.

Os processos de imantação também são diferentes dos processos de eletrização. A primeira diferença reside no material. Só é possível imantar alguns poucos materiais, chamados de ferromagnéticos: o ferro, o níquel e o cobalto. Esses elementos também entram em algumas ligas metálicas que são magnéticas, como o aço, por exemplo. Qualquer corpo de material ferromagnético – um prego, por exemplo – colocado junto a um ímã também se torna um ímã temporário. Se o prego for afastado do ímã, perde a imantação. Costuma-se dizer que o prego adquire uma imantação induzida. Veja a Figura 3. Essa imantação, no entanto, pode se tornar permanente, se o ímã for muito forte ou se alguma ação for exercida sobre o prego. Uma dessas ações pode ser esfregar o prego com o ímã, sempre com o mesmo pólo e no mesmo sentido.

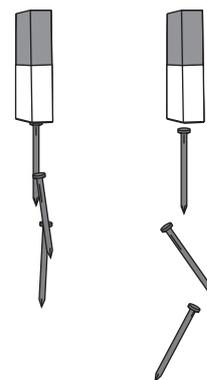


Figura 3. O prego mantém a imantação enquanto ligado ao ímã. Quando se separa do ímã ele perde a imantação



Outra ação pode ser aquecer o prego ou bater nele com um martelo, mantendo-o próximo do ímã.

É interessante notar que essas mesmas ações também podem desfazer o magnetismo de um corpo. Um ímã de ferro perde a imantação quando aquecido a 770°C. Essa temperatura recebe o nome de **ponto Curie**, em homenagem a Pierre Curie, físico francês que descobriu essa propriedade, em 1895.

Mas o que faz um corpo se magnetizar? Qual a origem dos ímãs naturais? Não é uma pergunta fácil de responder. Há muitos fatores envolvidos e nem todos são, ainda, bem conhecidos. Vamos tomar como ponto de partida os ímãs naturais: eles existem porque se formaram na Terra e o nosso planeta é um grande ímã. Além disso, a Terra, como todo ímã, cria em torno de si uma região que pode influir ou criar outros ímãs. Essa região é chamada de **campo magnético**.

### Campo magnético

A primeira idéia de campo, em Física, sempre se refere a uma região do espaço que tem uma certa propriedade. Um campo gravitacional é uma região do espaço que atua sobre a massa dos corpos; um campo elétrico atua sobre cargas elétricas. Da mesma forma, um campo magnético é uma região do espaço que atua sobre ímãs. Embora seja uma idéia abstrata, ela pode ser visualizada com o auxílio de linhas que, no caso do campo magnético, chamam-se **linhas de indução magnética**.

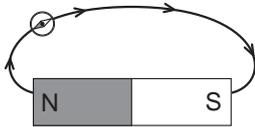


Figura 4.  
Uma pequena bússola nos permite mapear as linhas de indução magnética de um ímã.

É possível desenhar essas linhas com o auxílio de uma bússola. Se movimentarmos uma pequena bússola ao redor de um ímã em forma de barra, por exemplo, vamos observar que a agulha se movimenta como se tangenciasse uma linha que passa pelos polos do ímã. Veja a Figura 4.

Outra forma de visualizar as linhas de indução magnética de um ímã envolve a utilização de limalhas ou pó de ferro. Cada pequenino fragmento de ferro, quando colocado num campo magnético, adquire uma imantação induzida e se comporta como uma bússola. Se colocarmos um ímã em forma de barra sob uma folha de papel e espalharmos cuidadosamente as limalhas sobre a folha, vamos observar a formação de linhas desenhadas por essas limalhas. Como se fossem milhares de pequeninas bússolas, essas limalhas mostram como o campo magnético do ímã influencia aquela região do espaço. Veja a Figura 5.

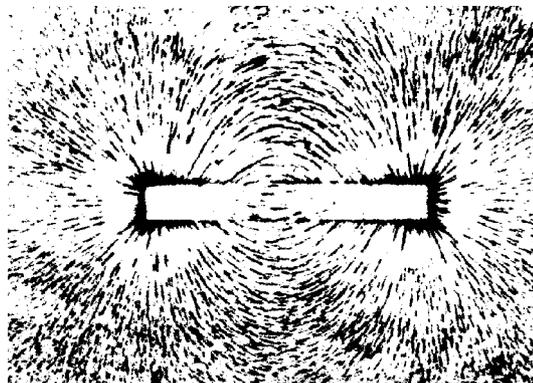


Figura 5. A configuração de um campo magnético de um ímã em forma de barra, formada por limalhas de ferro.

Outras configurações poderão se formar quando utilizamos dois ímãs em forma de barra, por exemplo, ou ímãs em forma de ferradura. Veja a Figura 6. Cada uma das figuras mostra as diferentes configurações que um campo magnético pode assumir. É interessante notar que as figuras são planas porque se formam numa folha de papel – mas o campo magnético é sempre tridimensional, não se limita ao plano do papel.

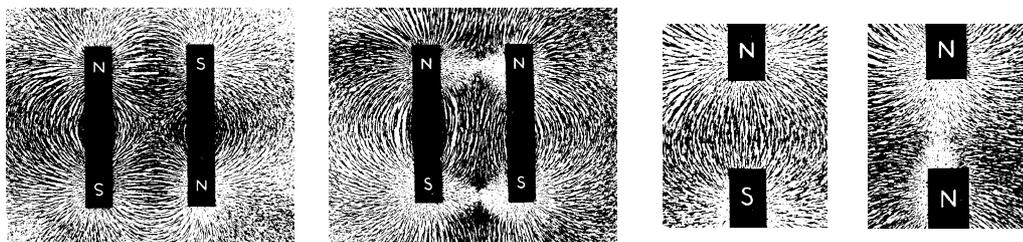


Figura 6. Diferentes configurações de campos magnéticos de dois ímãs em forma de barra, formadas com limalhas de ferro.

Todas essas figuras mostram a forma de um campo magnético. Mas como determinar a ação do campo magnético em determinado ponto? É o que vamos ver em seguida.

### Vetor campo magnético

Para determinar a ação do campo magnético num determinado ponto é necessário, inicialmente, definir o vetor campo magnético, que será designado por  $\vec{B}$ . Por analogia à agulha de uma bússola, sua direção será sempre tangente à linha de indução magnética em cada ponto; o sentido é, por definição, de norte para o sul. Veja a Figura 7.

Mas como determinar o módulo desse vetor? No caso do campo elétrico, o vetor  $\vec{E}$  foi definido pela razão entre a força  $\vec{F}$  que o campo exercia sobre uma carga e a intensidade dessa carga,  $q$ . Ou seja:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

O vetor campo gravitacional  $\vec{g}$  também pode ser definido pela razão entre a força exercida pelo campo sobre um corpo – o seu peso  $\vec{P}$  – e a massa desse corpo,  $m$ . Ou seja:

$$\vec{g} = \frac{\vec{P}}{m}$$

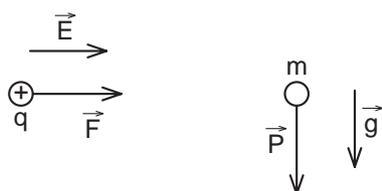


Figura 8. Os vetores campo elétrico  $\vec{E}$  e campo gravitacional  $\vec{g}$  são definidos a partir das forças que exercem sobre uma carga  $q$  ou sobre uma massa  $m$ . No campo magnético um procedimento equivalente não é possível.

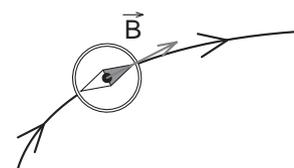


Figura 7. A direção e sentido do vetor campo magnético  $\vec{B}$  num ponto é a mesma da agulha de uma bússola colocada nesse ponto.

No campo magnético, entretanto, não existe uma grandeza específica equivalente a  $q$  ou  $m$ . Não existe um corpo com uma só polaridade magnética. Veja a Figura 8. Além disso, um ímã colocado num campo magnético está sempre sujeito à ação de **duas forças** resultantes em vez de uma só.

A ação de um campo magnético não se manifesta apenas sobre ímãs. A eletricidade e o magnetismo, como já dissemos, são diferentes aspectos de um mesmo fenômeno, o eletromagnetismo. Isso significa que existem formas de interação entre o campo magnético e cargas ou correntes elétricas. Uma dessas formas de interação vai nos permitir estabelecer a definição matemática do campo magnético  $\vec{B}$  e, conseqüentemente, a determinação do seu módulo.

### Interação entre campo magnético e uma carga elétrica em movimento

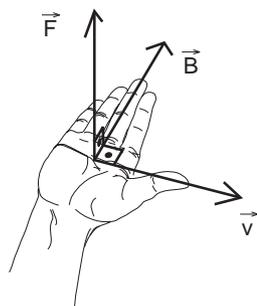


Figura 9. Regra da mão direita para uma carga  $q$  positiva: o polegar indica o sentido da velocidade, a palma da mão indica o sentido do campo e a sua perpendicular o sentido da força (sentido do “tapa”). Se a carga for **negativa** a força terá **sentido oposto**.

Vamos supor que numa região do espaço exista um campo magnético  $\vec{B}$ , uniforme ou constante – isto é, que tem o mesmo valor, a mesma direção e o mesmo sentido em todos os pontos. Se uma carga elétrica  $q$  for colocada nessa região, em repouso, nada vai ocorrer. Mas, se ela for lançada com uma velocidade  $\vec{v}$  numa direção que forme um ângulo  $\theta$  com a direção de  $\vec{B}$ , ela vai sofrer a ação de uma força  $\vec{F}$ . Essa força tem características muito peculiares:

- a sua direção é sempre perpendicular ao plano formado pelos vetores  $\vec{B}$  e  $\vec{v}$ ;
- o seu sentido depende do sinal da carga  $q$  e pode ser determinado por algumas regras práticas, como a regra da mão direita ou regra do “tapa”. Veja Figuras 9 e 10;
- o seu módulo é diretamente proporcional ao produto de  $q$  pelo módulo de  $\vec{v}$  pelo seno do ângulo  $\theta$ , ou seja:  $F \propto q \cdot v \cdot \text{sen}\theta$

A expressão acima, como toda relação de proporcionalidade, pode se transformar numa igualdade, desde que se defina uma constante de proporcionalidade. Em outras palavras:

$$\frac{F}{q \cdot v \cdot \text{sen}\theta} = (\text{constante})$$

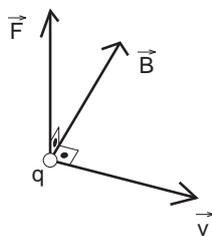


Figura 10. A relação entre os vetores  $\vec{F}$ ,  $\vec{B}$  e  $\vec{v}$  para uma carga  $q$  positiva. Se a carga for negativa  $\vec{F}$  terá sentido oposto ao representado

Vamos tentar entender por que o valor de  $F$  dividido pelo produto  $q \cdot v \cdot \text{sen}\theta$  permanece constante. Matematicamente, isso indica que, quando uma, duas ou as três grandezas do denominador variam, o valor da força também deve variar para que o resultado da fração fique constante. Fisicamente, isso só pode acontecer se uma grandeza envolvida na situação descrita permanecer constante. De acordo com a nossa suposição inicial, essa grandeza é o campo magnético  $\vec{B}$ , no qual a carga  $q$  se movimenta. Como na expressão estão indicados apenas os módulos de  $F$  e  $\vec{v}$ , podemos afirmar que essa constante é o módulo de  $\vec{B}$ . Temos, portanto:

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

A unidade do vetor campo magnético será dada pela razão  $N/(C \cdot m/s)$ , uma vez que o seno é uma grandeza adimensional (sem unidade). Essa unidade é chamada de **tesla**,  $T$ , em homenagem a **Nikola Tesla**, físico polonês radicado nos Estados Unidos que, no final do século passado, foi responsável pela invenção de inúmeras aplicações tecnológicas do eletromagnetismo, entre elas os motores e dínamos de corrente alternada.

Da definição de campo magnético pode-se obter também uma expressão para a força que atua sobre uma carga em movimento num campo magnético:

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

É importante lembrar que, como a expressão da força é um produto, ela será nula se qualquer dos seus fatores for nulo. Isso ocorre quando  $v = 0$ , ou seja, quando a carga está em repouso em relação ao campo, como já dissemos. A força também é nula se o ângulo  $\theta$  for zero ou igual a  $180^\circ$ , pois o seno desses ângulos é zero. Na prática, isso significa que uma carga em movimento, na mesma direção de um campo magnético, independentemente do sentido, não sofre a ação de força desse campo.

### Representação tridimensional de vetores

Como vimos, os vetores  $\vec{B}$ ,  $\vec{F}$  e  $\vec{v}$  sempre se relacionam tridimensionalmente. Isso nos obriga a ampliar a forma de representar os vetores para poder colocá-los no papel, que é bidimensional. Assim, sempre que um vetor for perpendicular ao plano da figura, dirigindo-se para fora ou para o leitor, ele será representado pelo símbolo  $\odot$ . Essa figura foi escolhida porque dá a idéia de uma flecha vista de frente, dirigindo-se para quem a vê. Se o vetor for perpendicular ao plano da figura, dirigindo-se para dentro, ele será representado pelo símbolo  $\otimes$ . Aqui a idéia é a mesma – é como se fosse uma flecha vista por trás, pelo penacho, afastando-se de quem a vê.

### Passo a passo

1. Nas Figuras 11a, 11b, 11c e 11d estão representados os vetores  $\vec{B}$  e  $\vec{v}$  atuando sobre uma carga  $q$  positiva. Suponha que o campo magnético em cada região é uniforme. Aplicando a regra da mão direita, represente o vetor  $\vec{F}$  que atua em cada caso.

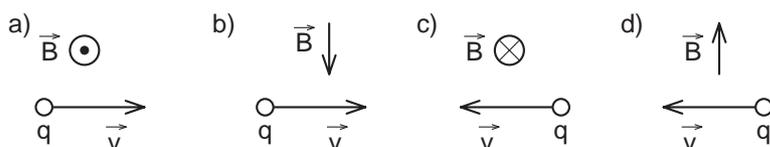


Figura 11

### Solução:

Aplica-se a regra da mão direita. Coloca-se a palma da mão na direção e no sentido de  $\vec{B}$  e gira-se até que o polegar coincida com a direção e o sentido da velocidade,  $\vec{v}$ . A direção e o sentido da força  $\vec{F}$  serão dados pela perpendicular que sai da palma da mão, para fora. Como se fosse a força de um tapa dado com essa mão. Se a carga fosse negativa, a força teria a mesma direção, mas sentido oposto. Veja a Figura 12.



Figura 12

2. Uma carga  $q$  de  $6\mu\text{C}$  é lançada com uma velocidade de  $100\text{m/s}$  numa região do espaço onde existe um campo magnético  $\vec{B}$  de intensidade  $0,5\text{ T}$ . Sabendo-se que as direções da velocidade da carga e do campo magnético são perpendiculares entre si, determine a intensidade da força que atua sobre a carga.

### Solução:

Basta aplicar a relação:

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

$$F = 0,5 \cdot 6 \cdot 10^{-6} \cdot 100 \cdot \text{sen } 90^\circ$$

$$F = 3 \cdot 10^{-4} \text{ N}$$

### Movimento de uma partícula carregada num campo magnético uniforme

Suponha que numa região do espaço exista um campo magnético  $\vec{B}$ , uniforme. Se uma carga elétrica  $q$  for lançada numa direção perpendicular a esse campo, ela vai sofrer a ação de uma força  $\vec{F}$ , cujo módulo será:

$$F = B \cdot q \cdot v$$

uma vez que  $\text{sen } 90^\circ$  é igual a 1. O vetor  $\vec{F}$ , por sua vez, será perpendicular a  $\vec{v}$ . Mas, se a força é perpendicular à velocidade, ela só pode mudar a direção e o sentido dessa velocidade. Dessa forma, os valores de todas as grandezas envolvidas,  $B$ ,  $q$ ,  $v$  e  $F$ , são constantes; as únicas coisas que vão mudar são a direção e o sentido de  $\vec{v}$ . Veja a Figura 13.

Ora, uma força constante, atuando perpendicularmente à velocidade de um corpo, faz com que esse corpo execute um movimento circular uniforme. É uma **força centrípeta**. Na Aula 11 você aprendeu que a força centrípeta  $F_C$ , que atua sobre uma partícula de massa  $m$  que descreve um movimento circular uniforme de raio  $r$ , é dada pela expressão:

$$F_C = m \frac{v^2}{r}$$

Por outro lado, sabemos que a força centrípeta é, sempre, a força resultante que faz com que um corpo execute um MCU. Nesse caso, a força centrípeta é a força  $\vec{F}$  exercida pelo campo magnético. Teremos então:

$$F = F_C$$

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

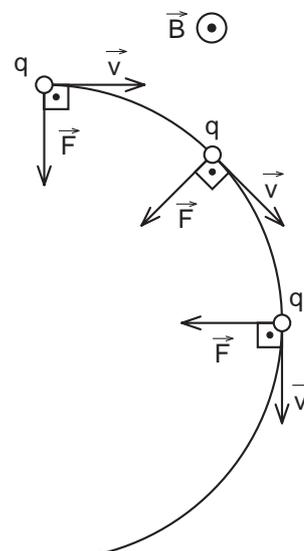


Figura 13. A força  $\vec{F}$  atuando sempre perpendicularmente ao vetor velocidade  $\vec{v}$  faz com que a partícula de carga  $q$ , positiva, execute um movimento circular uniforme.

Dessa última relação podem-se obter outras relações importantes sobre o movimento de uma partícula carregada num campo magnético uniforme, como o raio  $r$  da circunferência descrita. Por exemplo:

$$r = \frac{m \cdot v}{B \cdot q}$$

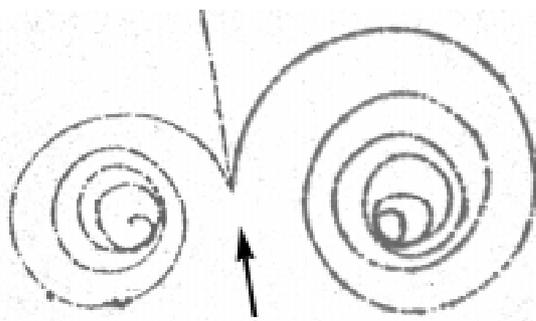


Figura 14. Foto de traços de partículas numa câmara de bolhas.

O estudo da trajetória de partículas carregadas em campos magnéticos é uma das formas que os físicos têm de conhecer as características dessas partículas. É possível ver e fotografar o rastro, isto é, a trajetória deixada por essas partículas, em equipamentos construídos especialmente para esse fim e que são imersos em campos magnéticos. Um desses equipamentos é a câmara de bolhas, uma espécie de aquário cheio de hidrogênio líquido. As partículas, quando atravessam essas câmaras, deixam rastros de sua passagem. Os rastros são fotografados para estudo posterior. Veja a Figura 14.

### Passo a passo

3. Observe a Figura 14. Nela você vê a trajetória de duas partículas numa câmara de bolhas imersa num campo magnético uniforme, orientado perpendicularmente para fora do plano da figura. Qual é o sinal da carga de cada partícula?

### Solução:

Observando a figura notamos duas trajetórias circulares que se iniciam a partir de um determinado ponto. A seta, antes desse ponto, indica o sentido de entrada das partículas na câmara – portanto, esse é o sentido da velocidade das partículas. Com a palma da mão direita estendida, orientada para fora do plano da figura e com o polegar no sentido indicado pela seta, determinamos o sentido da força que atua sobre a carga positiva. É fácil ver que a palma da mão indica que a força é para a direita. Portanto, a partícula de carga positiva é a que descreve a trajetória que se curva para a direita. A outra é a de carga negativa.

É interessante observar que, na realidade, as trajetórias não são circulares, mas espirais. Isso acontece porque a velocidade não se mantém constante. Ela vai diminuindo devido às resistências que se opõem ao seu movimento. Por isso o raio da circunferência que ela descreve também vai diminuindo, o que resulta numa trajetória em espiral.

4. Suponha que, na Figura 14, a partícula que descreve a espiral da esquerda seja um elétron que penetrou na câmara de bolhas com uma velocidade de  $2,0 \cdot 10^6$  m/s. Se campo magnético for uniforme e tiver intensidade de  $5 \cdot 10^{-4}$  T, qual o raio da circunferência descrita inicialmente pelo elétron?

São dados: carga do elétron  $\Rightarrow e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  C

massa do elétron  $\Rightarrow m = 9,1 \cdot 10^{-31}$  kg

### Solução:

Basta aplicar a relação  $r = \frac{m \cdot v}{B \cdot q}$ , onde  $q = e$ :

$$r = \frac{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 2,0 \cdot 10^6}{5 \cdot 10^{-4} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}$$

$$r = 2,275 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

A magnetita e a bússola foram os primeiros indícios que o ser humano teve da existência de algo que seus sentidos não podem detectar, o campo magnético. Muitos séculos foram necessários para que se ligassem os fenômenos magnéticos aos elétricos e surgisse o eletromagnetismo, cujas aplicações estão hoje presentes em todos os momentos de nossa vida. A orientação com o auxílio da bússola ainda hoje é usada com muita frequência, mas tem, além dos mapas muito mais precisos, dispositivos auxiliares cada vez mais eficientes. Existem, por exemplo, pequenos receptores de sinais provenientes de satélites, capazes de informar com precisão a localização de seu portador. Esses receptores se tornaram possíveis graças às ondas eletromagnéticas, surgidas a partir do desenvolvimento científico e tecnológico originado pelo próprio eletromagnetismo.

Vivemos imersos num mar de ondas eletromagnéticas. Elas nos trazem o som e a imagem dos fatos que ocorrem em todo mundo. Pode-se dizer que, hoje, o eletromagnetismo é mais responsável do que nunca por nossa orientação. Ou desorientação...



Nesta aula você aprendeu:

- o que é magnetismo;
- o que é campo magnético e sua configuração em linhas de indução;
- a definição do vetor campo magnético e como determinar suas características;
- como interagem o campo magnético e uma carga elétrica;
- como se representam vetores tridimensionalmente;
- as características do movimento de uma carga elétrica num campo

magnético uniforme.

### Exercício 1

Nas Figuras 15a, 15b, 15c e 15d estão representados os vetores  $\vec{B}$  e  $\vec{v}$  atuando sobre uma carga  $q$  positiva. Suponha que o campo magnético em cada região é uniforme. Aplicando a regra da mão direita, represente o vetor  $\vec{F}$  que atua em cada caso.

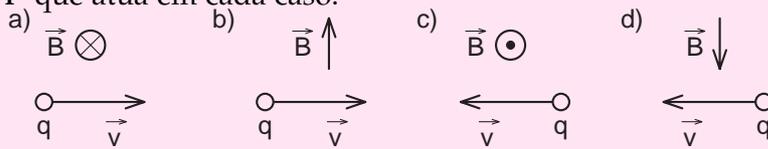


Figura 15

### Exercício 2

Uma carga  $q$  de  $2\mu\text{C}$  é lançada com uma velocidade de  $180\text{m/s}$  numa região do espaço onde existe um campo magnético  $\vec{B}$  de intensidade  $0,4\text{ T}$ . Sabendo-se que as direções da velocidade da carga e do campo magnético são perpendiculares entre si, determine a intensidade da força que atua sobre a carga.

### Exercício 3

Observe a Figura 16. Nela você vê a trajetória de três partículas numa câmara de bolhas imersa num campo magnético uniforme, orientado perpendicularmente para dentro do plano da figura. As setas indicam o sentido do movimento. Qual é o sinal da carga de cada partícula?

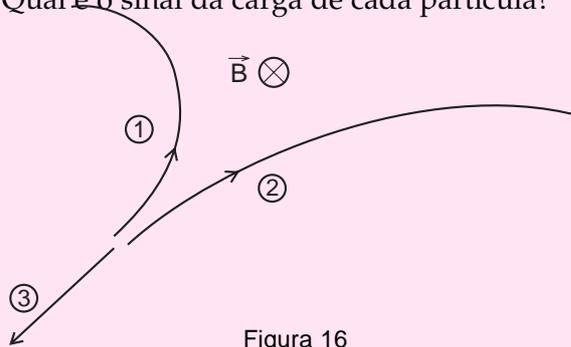


Figura 16

### Exercício 4

Uma partícula de massa  $m = 2,0 \cdot 10^{-8}\text{ kg}$  e carga positiva  $q = 6 \cdot 10^{-9}\text{ C}$  penetra numa região onde existe um campo magnético uniforme, de intensidade de  $5 \cdot 10^{-3}\text{ T}$ , com velocidade de  $6,0 \cdot 10^4\text{ m/s}$  e perpendicular à direção do campo magnético. Qual o raio da circunferência descrita pelo elétron?

