

VII Campo Magnético

Introdução

Força magnética sobre carga eléctrica em movimento

Movimento de uma partícula carregada num campo magnético

Propriedades do campo magnético criado por uma corrente

Força magnética num condutor percorrido por corrente

Torque sobre uma espira com corrente num campo magnético
uniforme

Momento magnético dipolar

Introdução

- Vimos em capítulos anteriores que um dos objectivos principais foi o estudo do modo como o campo eléctrico produz uma força eléctrica sobre partículas electricamente carregadas.
- Um objectivo análogo, mas nos capítulos seguintes, é estudar o modo como o campo magnético produz uma força magnética sobre partículas carregadas em movimento.
- Algumas aplicações de campos magnéticos são: gravação áudio/vídeo em fitas magnéticas; altifalantes dos diferentes dispositivos contém ímã; motores de arranque, motores de limpa-parabrisas, motores de vidros eléctricos contém ímã.

O que produz campos magnéticos?

Existem duas maneiras de produzir campos magnéticos:

Usar partículas carregadas em movimento (corrente eléctrica em um fio) para produzir ímã. A corrente produz campo magnético que pode controlar o disco duro de um computador ou transportar material ferroso;

Usar partículas elementares (electrões por exemplo) que possuem um campo magnético intrínstico.

Introdução_cont

- Gregos antigos notaram que pedaços do minério magnetite (óxido do ferro) reunia propriedades especiais:
 - ❖ Atraíam limalhas de ferro (Fe) , mas não a pedaços de Au, Cu , Al, etc
 - ❖ Podiam atrair ou repelir outros pedaços de magnetite dependendo da orientação relativa
- Por volta do Sec. XII foi possível construir a bússula
 - ❖ Uma pequena agulha magnética suspensa de tal modo que só pode girar em torno do eixo vertical
 - ❖ A agulha sempre pára quando uma das extremidades aponta para o Norte
 - ❖ Por definição, a tal extremidade chama-se Norte e a outra Sul



❖ Tal como ocorre com cargas eléctricas, extremidades do mesmo nome repelem-se e as de polos diferentes atraem-se

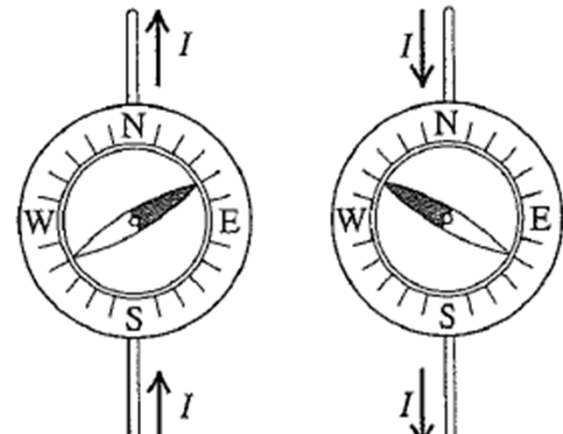
❖ O polo Norte não pode ser separado do polo Sul num íman

➤ Em 1820 Oersted mostrou que um fio transportando corrente eléctrica desviava uma agulha magnética e a direcção do desvio depende do sentido da corrente (prova de que a electricidade e magnetismo estão correlacionados).



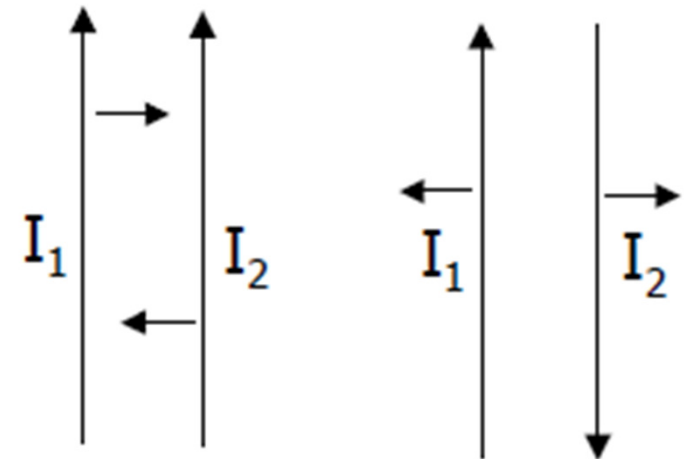
2021-12-20

Tema 7_Campo magnetico_Fisica
_FE_UEM_2021



➤ Mais tarde Ampere, usando fios paralelos transportando corrente eléctrica, notou que:

- ❖ Correntes paralelas atraem-se
- ❖ Correntes anti-paralelas repelem-se
- ❖ Força magnética não actua sobre carga estática



➤ Observações mais refinadas concluíram que:

- ❖ A força magnética é proporcional ao produto das intensidades de corrente ($\sim I_1 I_2$) \Rightarrow F é proporcional à velocidade de movimento das cargas;
- ❖ A direcção da força magnética é perpendicular à velocidade da partícula.

Interpretação: Enquanto as partículas carregadas estiverem em movimento, é criado um campo magnético,

A força magnética é proporcional ao produto vectorial $\vec{v} \times \vec{B}$.

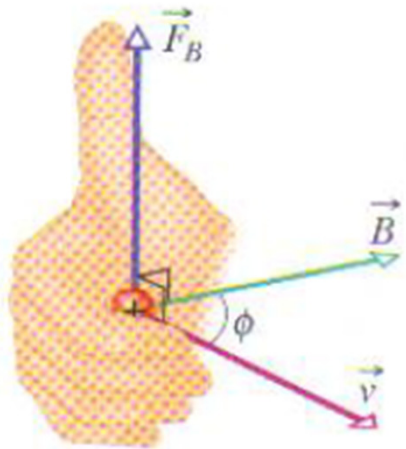
- A Terra constitui um grande ímã, cujo pólo Norte geográfico está próximo do pólo Sul magnético e é a razão pela qual o pólo Norte da bússola aponta para o Norte geográfico.
- A ligeira diferença entre a orientação do eixo de simetria do campo magnético e a orientação do eixo de rotação define a declinação magnética (desvio angular dependente da latitude do lugar).
- Por outro lado o campo magnético da Terra não é horizontal na maior parte de pontos da Terra. O desvio para cima ou para baixo denomina-se inclinação magnética.

Força magnética sobre carga eléctrica em movimento

- Sobre uma partícula carregada e em movimento num campo magnético \vec{B} experimenta uma força magnética \vec{F}_B definida pelo produto vectorial:

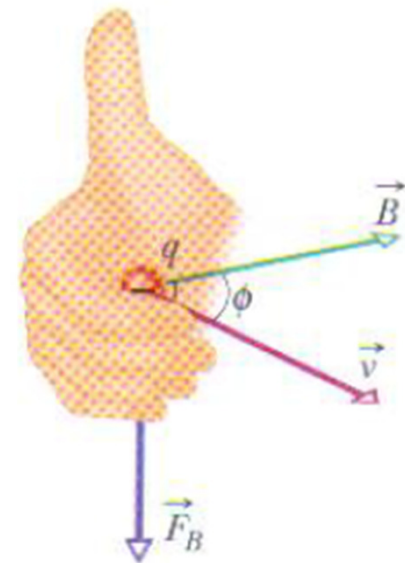
$$\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}$$

O módulo da força magnética é $F_B = qvB \sin \theta$



2021-12-20

Tema 7_Campo magnetico_Fisica
_FE_UEM_2021



A força magnética é nula quando a partícula está parada, ou quando os vectores \vec{v} e \vec{B} são paralelos/anti-paralelos.

Para carga positiva, a o sentido da força coincide com o do polegar na regra de mão direita, enquanto que para uma carga negativa, o sentido será oposto.

A força magnética é sempre perpendicular tanto a \vec{v} como a \vec{B} .

A unidade do campo magnético no SI é o Tesla

$$1 \text{ T} = \frac{\text{Newton}}{(\text{Coulombo}).(\text{metro/segundo})} = \frac{\text{Newton}}{\text{Ampere.metro}}$$

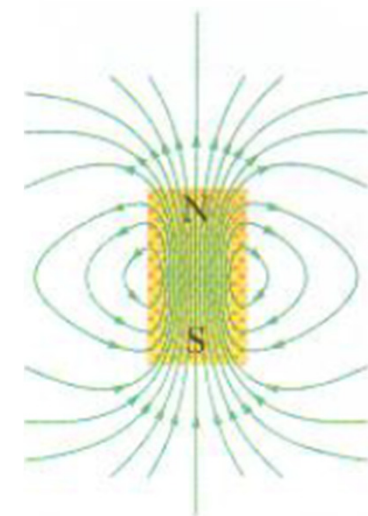
Usa-se no entanto uma outra unidade técnica, o Gauss(G).

$$1 \text{ T} = 10^4 \text{ G}$$

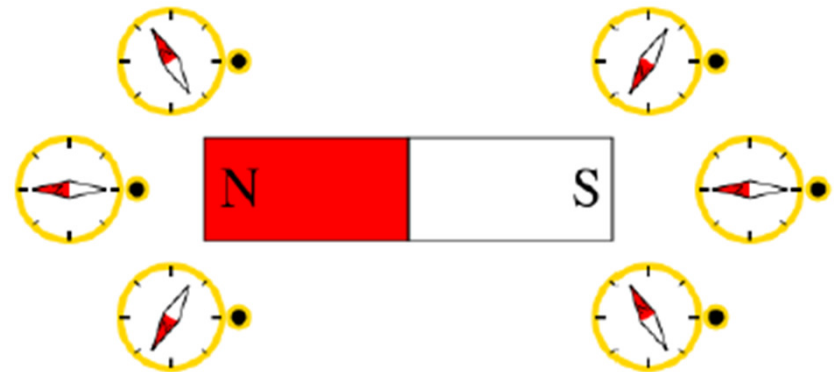
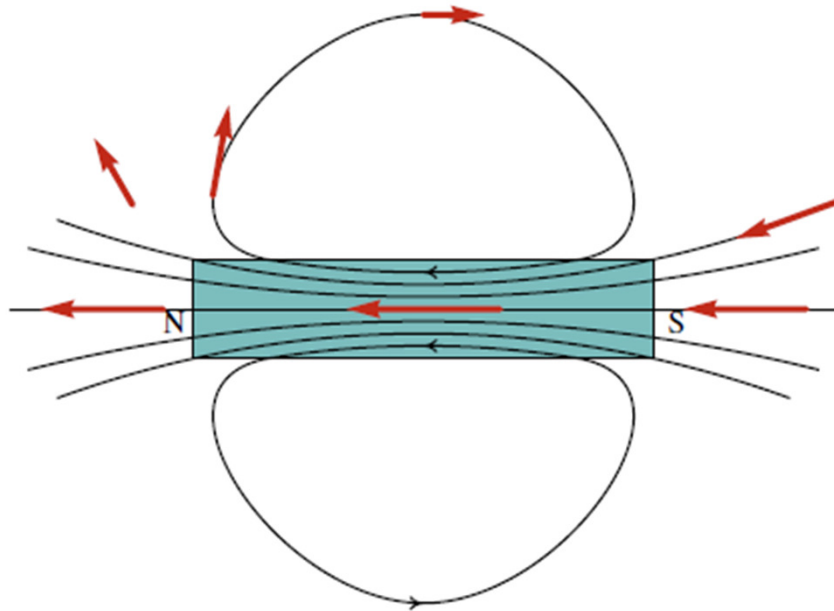
- Quando uma partícula carregada move-se numa região do espaço onde existem, simultaneamente, um campo eléctrico e um campo magnético, ambos os campos exercem forças sobre a partícula. A força resultante é a força de Lorentz e é a soma vectorial da força eléctrica e da força magnética:

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

- **Linhas do campo magnético:** a distribuição espacial do campo magnético pode ser representada por linhas do campo, tal como fizemos com o campo eléctrico.
- O vector \vec{B} é tangente as linhas do campo magnético num dado ponto e densidade das linhas indica o módulo do campo, veja a figura, representando as linhas do campo para um ímã em forma de barra.



- Usando limalhas de ferro nas proximidades de um ímã é possível visualizar as linhas do campo magnético a partir do alinhamento da limalha com o campo. Uma bússola aponta no sentido das linhas de campo magnético.



Movimento de partículas carregadas num campo magnético

- Quando uma partícula carregada movimenta-se num campo magnético, sobre a partícula actuará a força magnética $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$.
- A força magnética sendo sempre perpendicular a \vec{v} implica que a força não pode alterar o valor da velocidade, apenas na sua direcção (o W é nulo).
- Consequentemente a trajectória da partícula será circular sob a acção da força F , tal que:

$$F = |q|vB = m \frac{v^2}{R}$$

- A partir da equação do movimento, podemos encontrar o raio da órbita circular (trajectória):

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

Ou

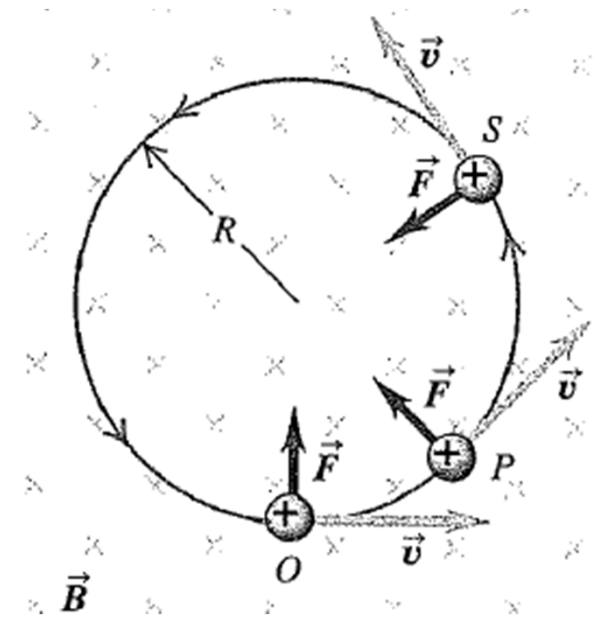
$$R = \frac{p}{|q|B}$$

P- quantidade de movimento.

Ou ainda

$$R = \frac{m\omega}{|q|} \frac{R}{B} \Rightarrow \text{Simplificando } R ,$$

$\omega = \frac{|q|}{m} B$ a frequência angular da partícula carregada em um campo magnético uniforme depende apenas de B e da razão q/m para cada tipo de partícula. Esta é a frequência angular do ciclotrão (um dos primeiros aceleradores de partículas)



❖ Para determinar o sentido da força magnética que age sobre partícula carregada positiva e em movimento, usa-se a regra da mão direita do seguinte modo:

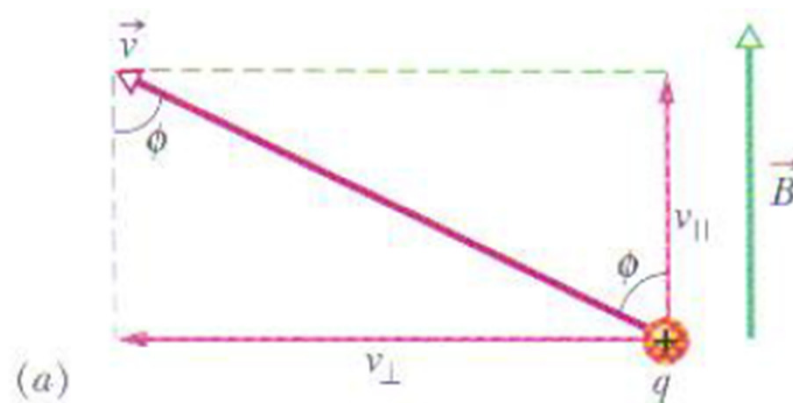
- Quatro dedos esticados indicam o sentido do campo magnético;
- O polegar indica o sentido da velocidade;
- A palma da mão indica a força magnética.

- **Exemplo:** o magnetrão de um forno de micro-ondas emite ondas electromagnéticas com frequência $f = 2450 \text{ MHz}$. Qual é o módulo do campo magnético necessário para que os electrões movam-se em trajectórias circulares e com aquela frequência?

$$\omega_{Magn} = \frac{|q|}{m} B = 2\pi f$$
$$B = \frac{2\pi f m}{|q|} = \frac{6,28 \times 2450 \times 10^6 \times 9,1 \times 10^{-31}}{1,6 \times 10^{-19}} =$$

$$B = 0,0877 \text{ T}$$

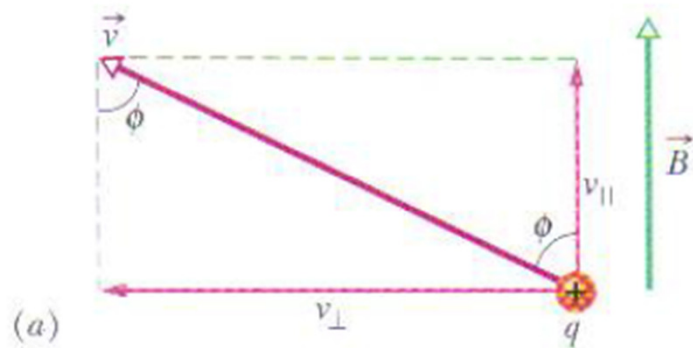
- Quando o vector velocidade tiver componente paralela ao campo magnético uniforme, a partícula descreve trajectória helicoidal cujo eixo é a direcção do campo magnético $\begin{cases} v_{\parallel} = v \cos \varphi \\ v_{\perp} \sin \varphi \end{cases}$



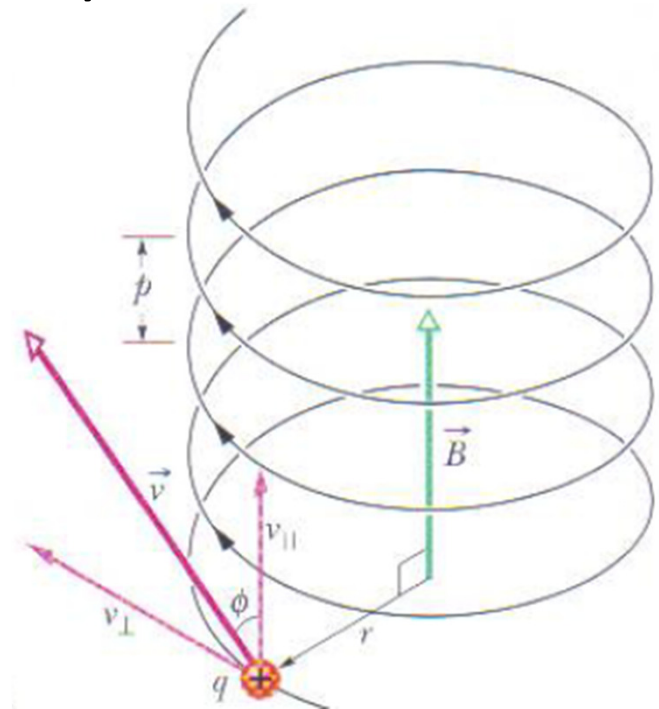
- A componente paralela do vector velocidade permanece constante e define o passo p da espiral enquanto que a sua componente vertical gira com frequência angular ω . Esta componente define o raio da hélice.

$$p = \frac{2\pi m v_{//}}{|q|B} \quad \& \quad R = \frac{m v_{\perp}}{|q|B}$$

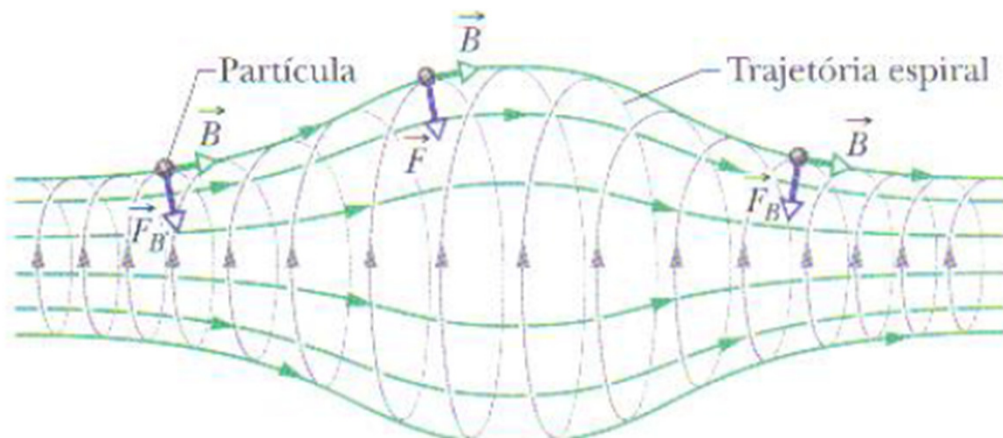
- Exemplos de movimento de partícula carregada num campo magnético uniforme (a & b) e num campo magnético não uniforme (c).



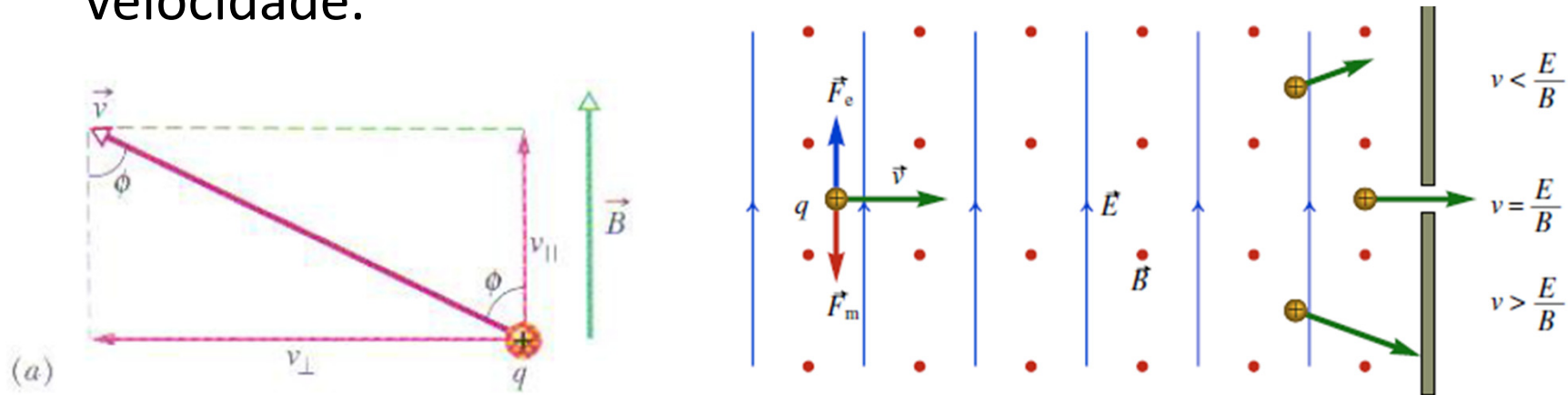
b



c



- **Selector de velocidade de partículas carregadas:** Um par de campos eléctrico e magnético uniformes e perpendiculares entre si podem ser usados para seleccionar partículas com determinada velocidade.



- Quando a força resultante é nula não há desvio da trajectória da partícula. Sendo maior a força magnética, as partículas serão deflectidas para baixo (para o caso de carga positiva).

$$F_r = qE - qvB = q(E - vB)$$

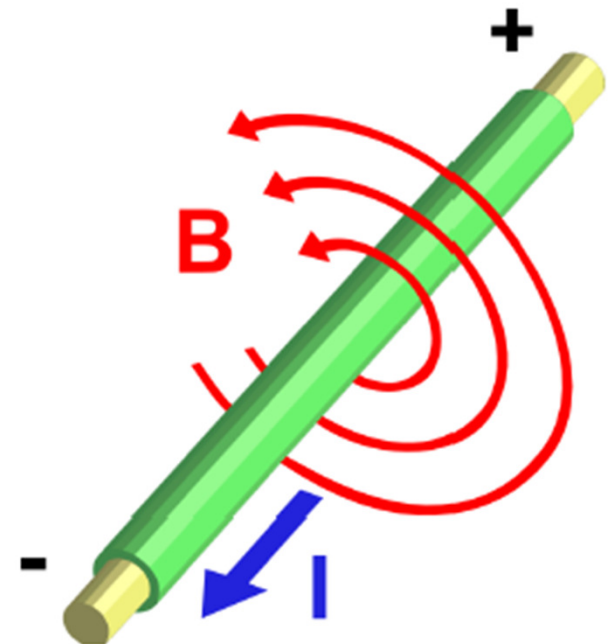
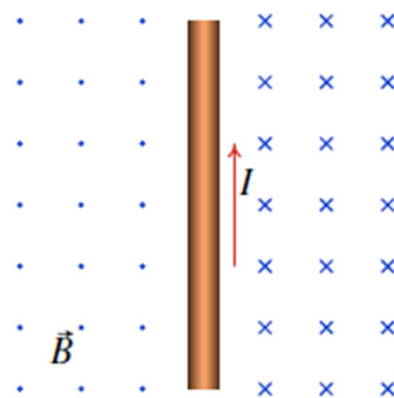
$$F_r = 0 \Rightarrow E - vB = 0 \text{ ou } v = \frac{E}{B}$$

$$F_r > 0 \Rightarrow E - vB > 0 \text{ ou } \frac{E}{B} > v \quad \& \quad F_r < 0 \Rightarrow \frac{E}{B} < v$$

Propriedades do campo magnético criado por uma corrente

Uma corrente ao percorrer um condutor cria em sua volta um campo magnético. Ou seja, o condutor que transporta

corrente eléctrica produz
linhas do campo magnético
a sua volta.



- Para determinar o campo, abraça-se o condutor de tal modo que o polegar indique o sentido da corrente, os quatro dedos curvados indicam as linhas do campo e o \vec{B} é tangente aquelas linhas em qualquer ponto.
- O campo magnético produzido por um condutor com corrente é directamente proporcional à intensidade de corrente e diminui com o aumento da distância do ponto P até ao eixo do condutor.
- O módulo de \vec{B} será calculado usando a lei de Ampere:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

Força magnética num condutor com corrente e imerso em campo magnético

Quando um condutor transportando corrente está inserido num campo magnético externo, sobre o condutor vai actuar uma força magnética \vec{F}_B . É fisicamente equivalente a interacção entre o campo magnético externo e as cargas eléctricas que se movem dentro do condutor:

$$F_B = qv_d B \sin \varphi$$

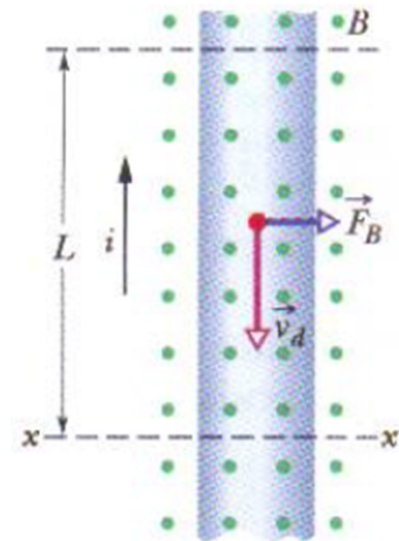
Onde $q = it = i \frac{L}{v_d}$

Logo, $F_B = i \frac{L}{v_d} v_d B \sin \varphi = iLB$

$\sin \varphi = 1$ porque $\vec{B} \perp \vec{L}$ (\vec{B} perpendicular ao fio)

Para fio rectineo, em geral vale a equação:

$$\vec{F}_B = i\vec{L} \times \vec{B}$$

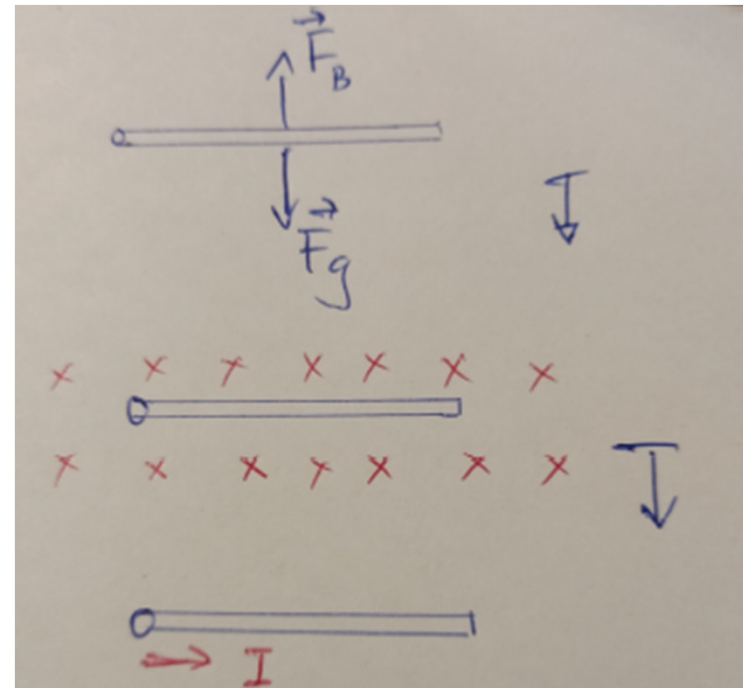


- Se o fio não for retilíneo, ou o campo não for uniforme, deve-se mentalmente dividir o fio em pequenos segmentos e aplicar a equação $\vec{F}_B = i\vec{L} \times \vec{B}$ na forma diferencial e depois integrar por todo o comprimento L:

$$d\vec{F}_B = i d\vec{L} \times \vec{B}$$
$$F_B = \int i dL B \sin \varphi$$

Exemplo: Um fio horizontal retilíneo, transporta corrente de 28 A. Determine o módulo e a orientação do menor campo magnético capaz de manter o fio suspenso (equilibrar a força de gravidade). A densidade linear de massa é $\lambda = 46,6 \text{ g/m}$.

- **Solução:** Para equilibrar a força de gravidade, é preciso que \vec{F}_B esteja orientado verticalmente para cima. Sendo o campo \vec{B} horizontal, podemos dirigi-lo a penetrar no plano e usar regra apropriada para o sentido da corrente:



$$F_B = F_g \Rightarrow iLB \sin \theta = mg \Rightarrow$$

$$B = \frac{mg}{iL \sin \theta} = \frac{(m/L)g}{i \sin \theta}$$

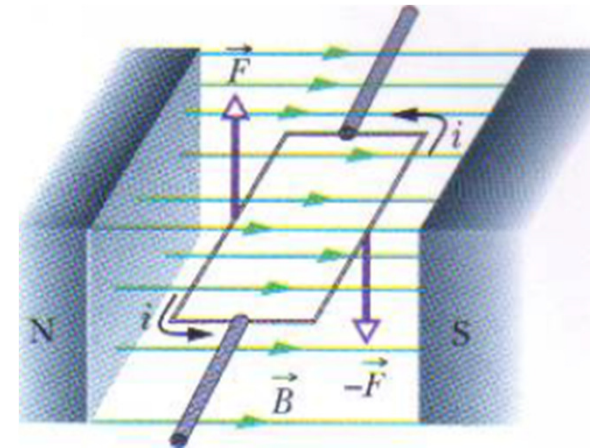
Para menor valor de \vec{B} implica maximizar $\sin \theta = 1!$

$$B = \frac{(m/L)g}{i} = \frac{46,6 \times 10^{-3} \times 9,8}{28} = 16,3 \times 10^{-3} =$$

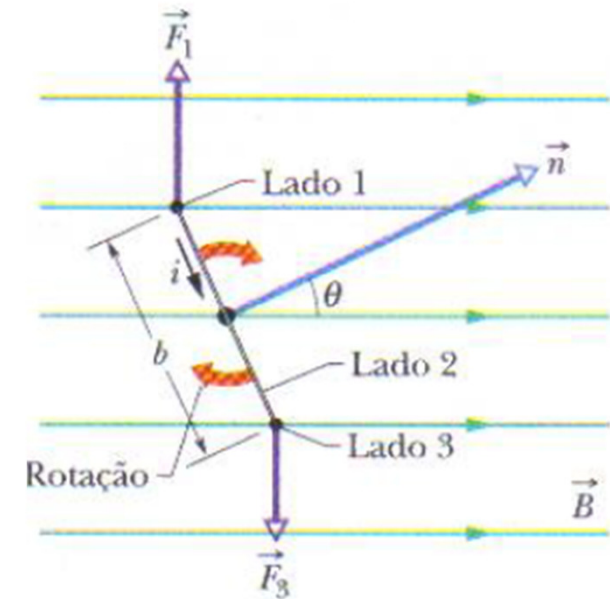
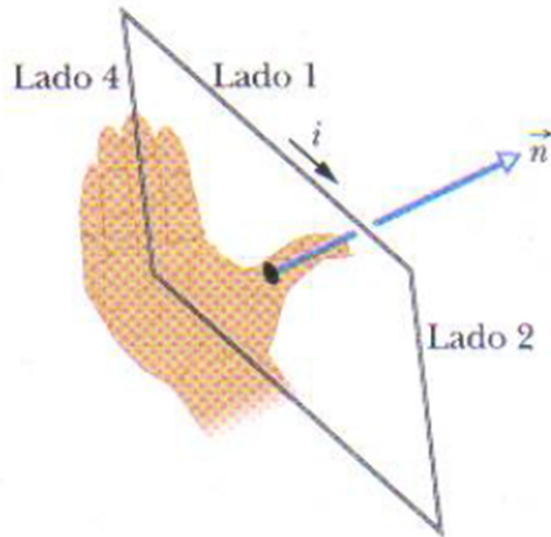
$$B = 1,63 \times 10^{-2} \text{ T}$$

Torque sobre uma espira com corrente num campo magnético uniforme

- A figura mostra uma espira rectangular de lados a e b , percorrida por corrente i num campo magnético uniforme \vec{B} .
- Para definir a orientação da espira relativamente a \vec{B} , usaremos o vector normal \vec{n} .
- A força total sobre a espira é a soma das forças nos 4 lados



$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \vec{F}_4$$



Na figura, θ é o ângulo entre a normal e o vector \vec{B} . Logo, o ângulo entre o vector \vec{L} e \vec{B} no lado 2 (no sentido da corrente) é $\theta_2 = 90 - \theta$, e

$$F_2 = iLB \sin(90 - \theta) = iLB \cos \theta = ibB \cos \theta$$

Para o lado 4 teremos

$$F_4 = iLB \sin(180 + \theta) = -iLB \cos \theta = -ibB \cos \theta$$

\vec{F}_2 & \vec{F}_4 não produzem torques porque as forças são paralelas ao eixo de rotação.

- Nos lados 1 e 3 da bobina, os vetores \vec{L} e \vec{B} são sempre perpendiculares, tal que:

$$F_1 = iLB = IaB \quad \& \quad F_3 = -iLB = -iaB$$

Ou seja, a força resultante é nula.

Contudo, a tendência rotacional de \vec{F}_1 & \vec{F}_3 é a mesma (os 2 torques são horários), sendo por isso o torque resultante diferente de zero.

Facilmente nota-se que o braço de cada um dos torques será $d = \frac{b}{2} \sin \theta$. Logo, o torque resultante será:

$$\tau = \tau_1 + \tau_3 = 2iaB \frac{b}{2} \sin \theta = iabB \sin \theta$$

- Se a espira for substituída por uma bobina constituída por N espiras, o torque resultante sobre a bobina será igual a soma dos torques individuais que agem sobre cada espira:

$$\tau_{bob} = N\tau_{esp} = NiabB \sin \theta = (NAi)B \sin \theta$$

Onde A é a área limitada pela bobina.

A última expressão independe da forma geométrica da bobina plana, desde que o campo magnético seja uniforme.

Portanto, uma bobina percorrida por corrente num campo magnético uniforme tende a girar até que o vector normal fique alinhado com o campo magnético.

Nos motores eléctricos existe um comutador entre a bobina e contactos que a alimentam com corrente, cujo papel é inverter o sentido da corrente assim que \vec{n} e \vec{B} estiverem prestes a linhar.

Momento magnético dipolar

- Uma bobina percorrida por corrente ao sofrer um torque num campo magnético, ela comporta-se como um ímã em forma de barra.
- Consequentemente, a bobina com corrente possui um dipolo magnético e o torque acima calculado está associado ao momento magnético dipolar $\vec{\mu}$:

$$\tau = \mu B \sin \theta$$

Onde θ é o ângulo entre $\vec{\mu}$ e \vec{B} .

A direcção de $\vec{\mu}$ coincide com a de \vec{n} .

$$\mu = NiA$$

Tal como foi representado o torque do dipolo eléctrico ($\vec{\tau} = \vec{p} \times \vec{E}$), o torque magnético é:

$$\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B}$$

Quando um dipolo magnético submetido a um torque gira de uma orientação inicial θ_i para uma final θ_f , o torque aplicado realiza trabalho sobre o dipolo. Se em ambas as posições o dipolo permanece em repouso, o trabalho será:

$$W = U_f - U_i$$

Onde $U = -\vec{\mu} \cdot \vec{B} = -\mu B \cos \theta$

Logo,

$$W = -\mu B (\cos \theta_f - \cos \theta_i)$$

Leitura individual

- Princípio de funcionamento do forno micro-ondas.