Cap. 7: Força e campo magnético

7.1 – Campo magnético

7.2 – Força magnética em cargas em movimento

7.3 – Força magnética em correntes em fios

7.4 – Movimento de uma carga mum campo magnético

Breve história

- Magnetismo: conhecido dos gregos, ~ 800 A.C.

  certas pedras (magnetite, $Fe_3 0_4$) atraíam pedaços de ferro.
- 1269, Pierre de Maricourt $\rightarrow$ pólos do imã.

  Todo o imã tem dois pólos, o pólo norte e o pólo sul.

  Os pólos de mesmo nome repelem-se; os pólos de nomes opostos atraem-se.
- 1600, William Gilbert sugeriu que a própria Terra fosse um imã permanente.
- 1750, John Michell: **os pólos magnéticos exercem forças atrativas ou repulsivas, uns sobre os outros, e tais forças variam com o inverso do quadrado da respetiva separação.**

! Os pólos magnéticos não podiam ser isolados; encontravam-se sempre aos pares.

- 1819, Hans Oersted: casualmente verificou que uma corrente elétrica num condutor desviava uma agulha imanizada: **relação entre o magnetismo e a eletricidade**.

- André Ampère (1775-1836): Leis quantitativas da **força magnética entre os condutores percorridos por correntes elétricas**.

- 1820, Faraday e J. Henry: uma corrente elétrica pode ser induzida num circuito, seja pelo movimento dum imã perto do circuito, seja pela alteração duma corrente num outro circuito, vizinho ao primeiro. **Um campo magnético variável cria um campo elétrico. Cap 9**

- 1873, J.C. Maxwell as Leis do Eletromagnetismo.

- 1888, Heinrich Hertz: ondas eletromagnéticas no laboratório. Verificação das previsões de Maxwell.

- Aplicações tecnológicas do magnetismo:

-medidores elétricos,

-transformadores,

-motores,

-aceleradores de partículas,

-alto-falantes,

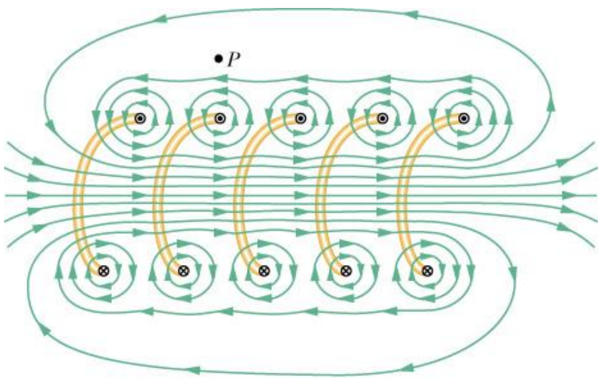
-registo de som,

-registo de imagens de TV,

-memórias de computadores...

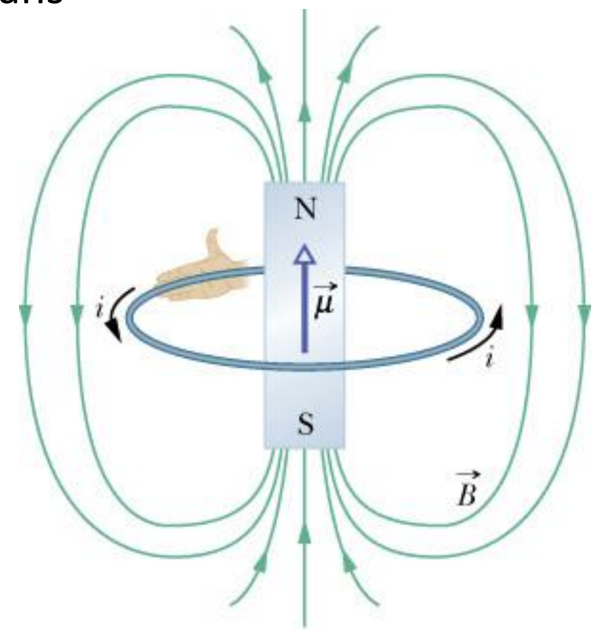
7.1 - Campo magnético: $\vec{B}$

correntes



Imans

Cargas em movimento

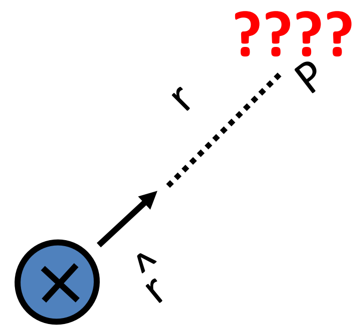


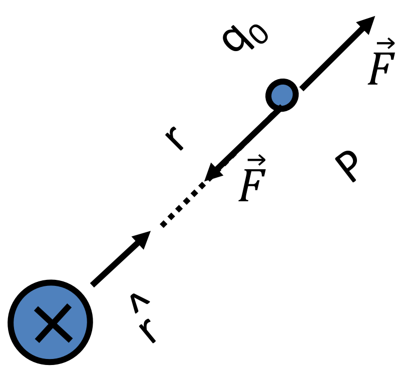
?Como sabemos que existe um campo magnético?

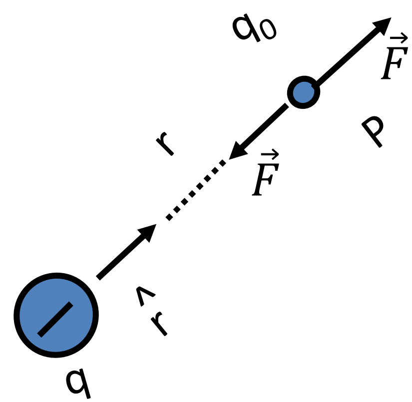
?Como sabemos que existe um campo elétrico?

Revisão

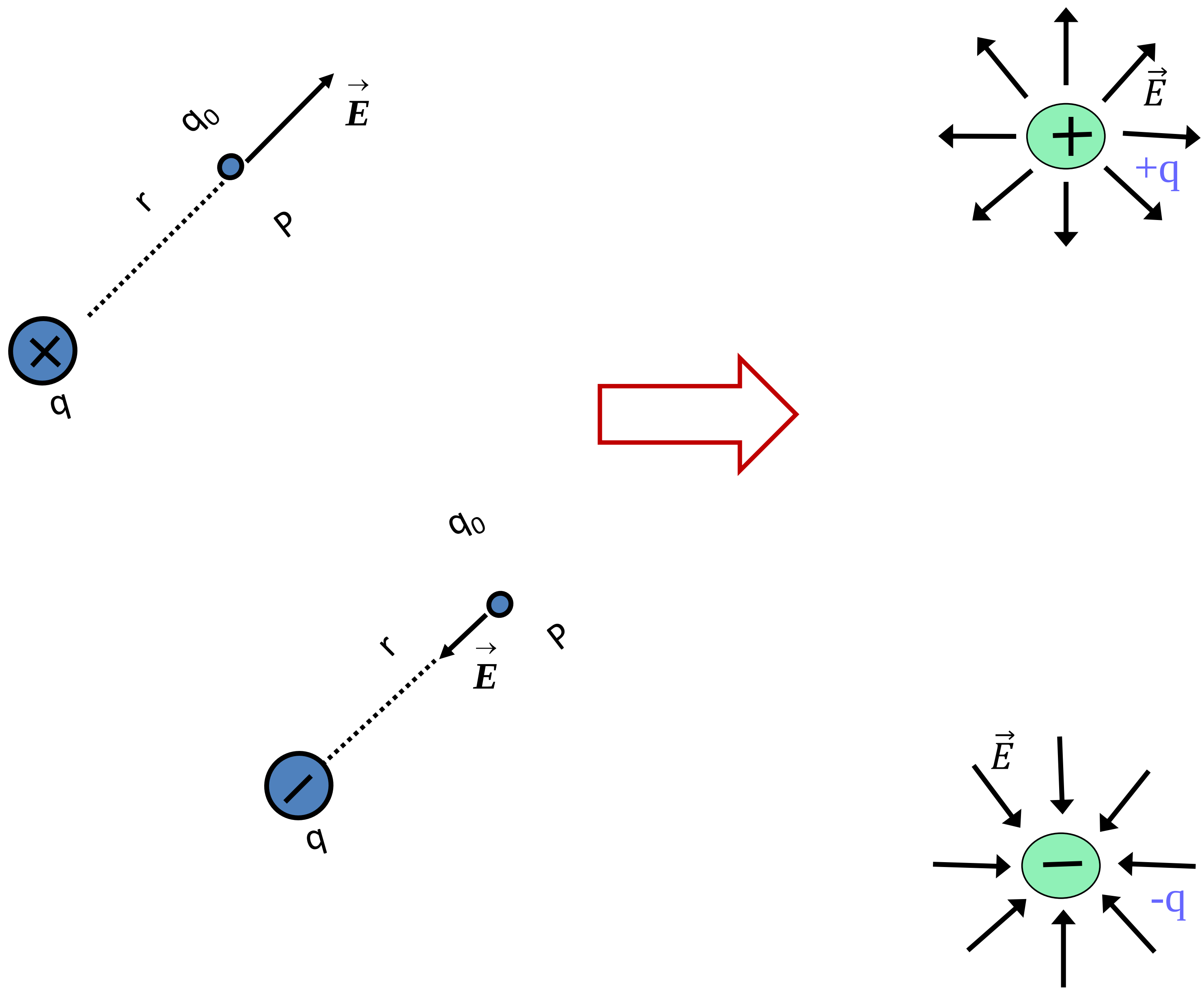
Campo Elétrico







$$\overrightarrow{E_P} = \frac{\overrightarrow{F_{qo}}}{qo}$$



q0
$\vec{E}$
r
P
q
q0
r
P
$\vec{E}$
q
$\vec{E}$
+q
$\vec{E}$
-q

Assim, vamos usar a mesma metodologia para definir campo magnético:

FORÇA ⇄ **CAMPO**

- **Definimos** o vetor ***campo magnético*** $\vec{B}$ (indução magnética ou densidade de fluxo magnético) ***num certo ponto*** do espaço em termos da **força magnética que seria exercida sobre um <u>corpo de prova aí colocado.</u>**

Uma partícula carregada que se desloca com **velocidade**

- Admitimos que não existem campos elétricos nem gravíticos na região onde está essa partícula.

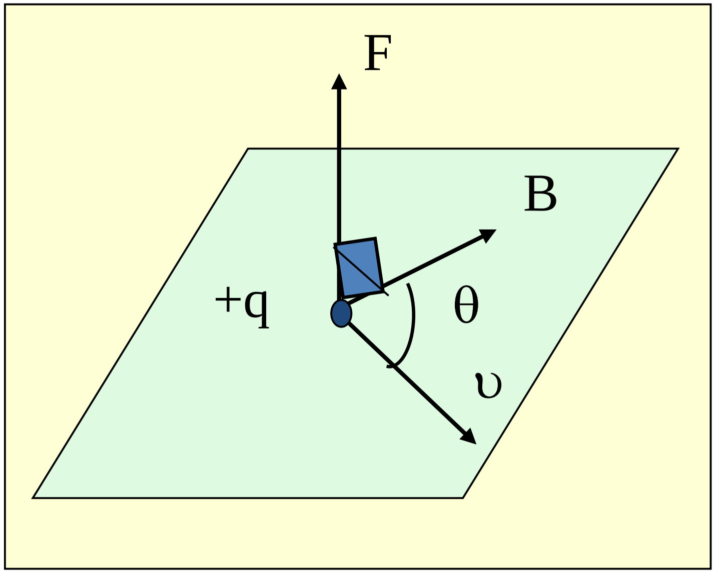
7.2 -Força magnética em cargas em movimento: $\overrightarrow{F_B}$

As experiências observando o **movimento** de diversas **partículas carregadas** num **campo magnético** levaram aos seguintes resultados:

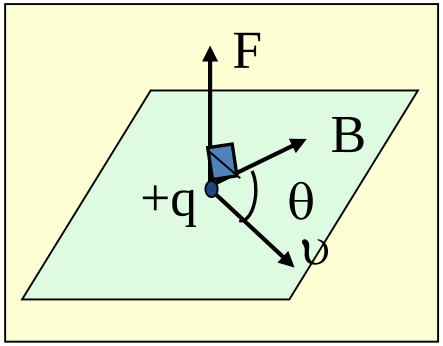
1. $\overrightarrow{F_B}$ **sobre a partícula** depende de q, $\vec{v}$ e $\vec{B}$

⇓

Depende do campo magnético e da entidade que sente força: **não só da carga mas também da velocidade da carga**



2 - O módulo da força:



$|\overrightarrow{\boldsymbol{F_B}}|$ ~ q , $|\vec{v}|$, $|\vec{B}|$ e ***seno*** do ângulo (θ) que $\vec{v}$ faz com $\vec{B}$:

2.1. Se uma partícula carregada se move numa direção // ao $\vec{B}$ (θ = 0)

$\Rightarrow$ $\overrightarrow{\boldsymbol{F_B}}$ sobre a partícula **é nula.**

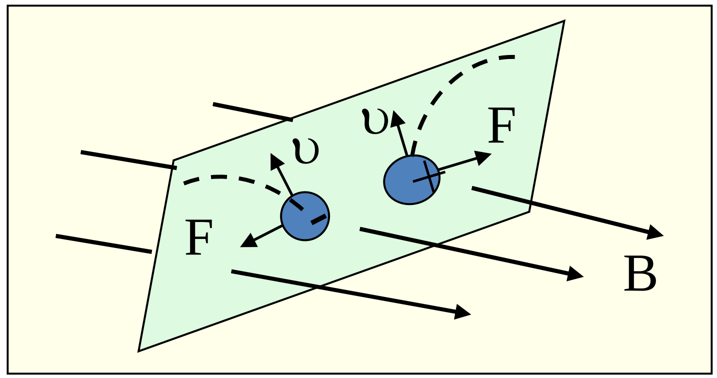
2.2. Se uma partícula carregada se move numa direção $\perp$ ao $\overrightarrow{B}$ (θ = 90º)

$\Rightarrow$ $\overrightarrow{\boldsymbol{F_B}}$ sobre a partícula **é máxima.**

2.3. Quando $\vec{v}$ fizer um ângulo θ com $\vec{B}$,

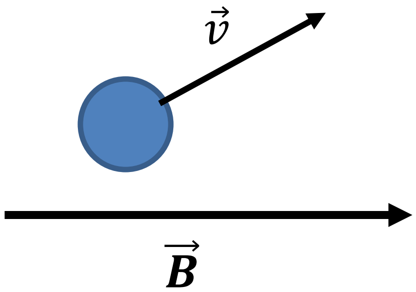
$\Rightarrow$ $\overrightarrow{\boldsymbol{F_B}}$ atua numa direção $\perp$ ao plano definido por $\vec{v}$ e $\vec{B}$

3. A força magnética terá sentidos opostos numa carga positiva e negativa que se movam no mesmo sentido numa região de campo magnético.



Voltaremos a ver isto mais tarde

Assim:



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

A força é $\perp$:

- ao vetor $\vec{B}$ e
- ao vetor $\vec{v}$

- **$\perp$ ao plano definido por** $\vec{v}$ e $\vec{B}$

Cujo módulo é dado por:

$$\left|\vec{F_B}\right| = |q|\left|\vec{v} x \vec{B}\right|$$

$$\left|\vec{v} x \vec{B}\right| = |\vec{v}|\left|\vec{B}\right| \sin \phi$$

$$\boxed{F_B = |q| vB \sin \phi}$$

PS1: Se $\vec{v}$ e $\vec{B}$ forem paralelos (antiparalelos) então $\vec{F_B} = 0$

PS2: Se $\vec{v} = 0$ então $\vec{F_B} = 0$

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

$\vec{v}$ X $\overrightarrow{\boldsymbol{B}}$

Produto vetorial
Abordagem A:

Produto vetorial

$$\begin{vmatrix} i & j & k \\ vx & vy & vz \\ Bx & By & Bz \end{vmatrix} = i(vyBz - Byvz) - j(vxBz - Bxvz) + k(vxBy - BxVy)$$

$$= a(i) + b(j) + c(k)$$

$$\overrightarrow{F_B} = q\ (a(i) + b(j) + c(k))$$

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

$\vec{v}$ X $\vec{\boldsymbol{B}}$

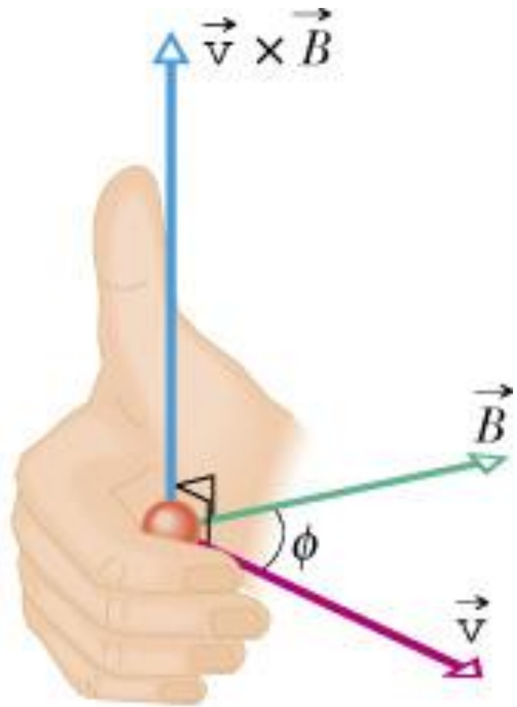
Abordagem B

i) Calculo do módulo da Força

$$\boxed{F_B = |q| vB \sin\phi}$$

+

ii) Regra da mão direita

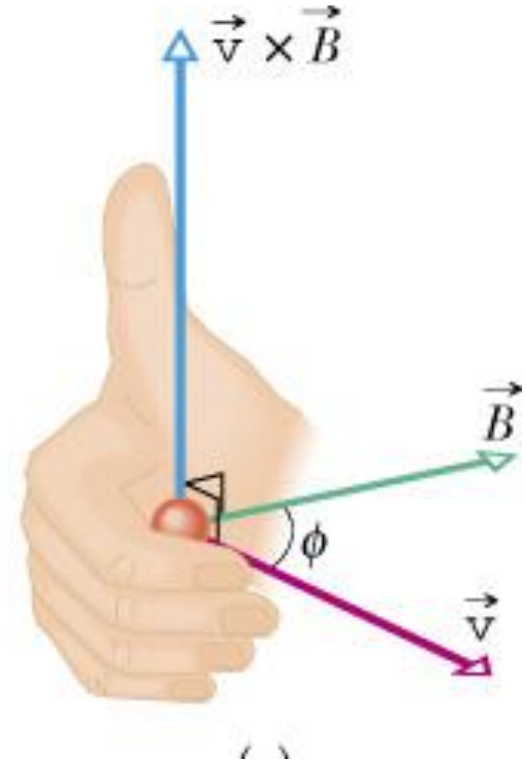


$\perp$ ao plano definido por $\vec{v}$ e $\vec{\boldsymbol{B}}$

$$\overrightarrow{F_B} = módulo\ (direção\ e\ sentido\ dado\ pela\ regra\ mão\ direita)$$

Regra da mão direita para determinar o sentido de

(direção é sempre perpendicular ao plano definido por $\vec{v}$ e $\vec{B}$):



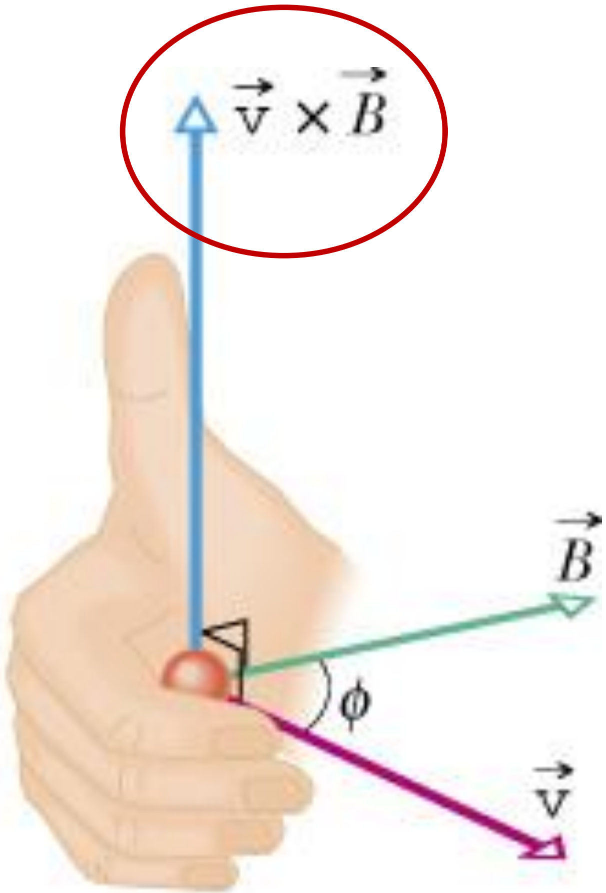
$\vec{v}$ X $\vec{\boldsymbol{B}}$

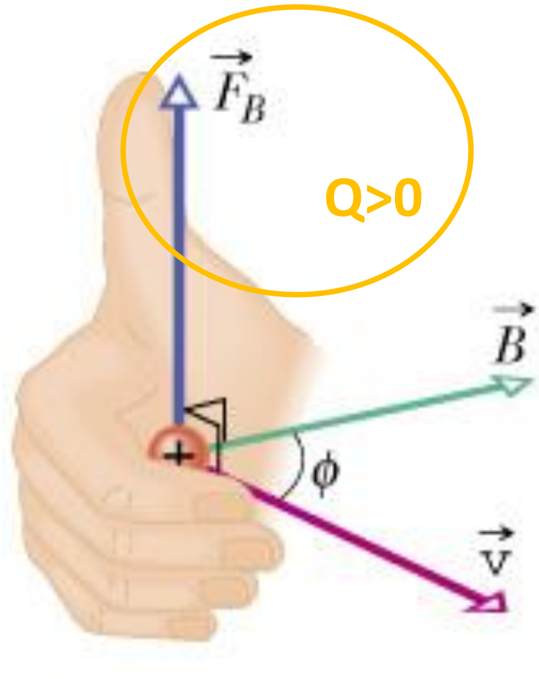
1- Mão direita;
2- Apontar os dedos da mão direita no sentido do vetor velocidade da carga;
3- fechar a mão no sentido do campo magnético;
4 - o sentido do dedo polegar, corresponde ao sentido do produto vetorial.

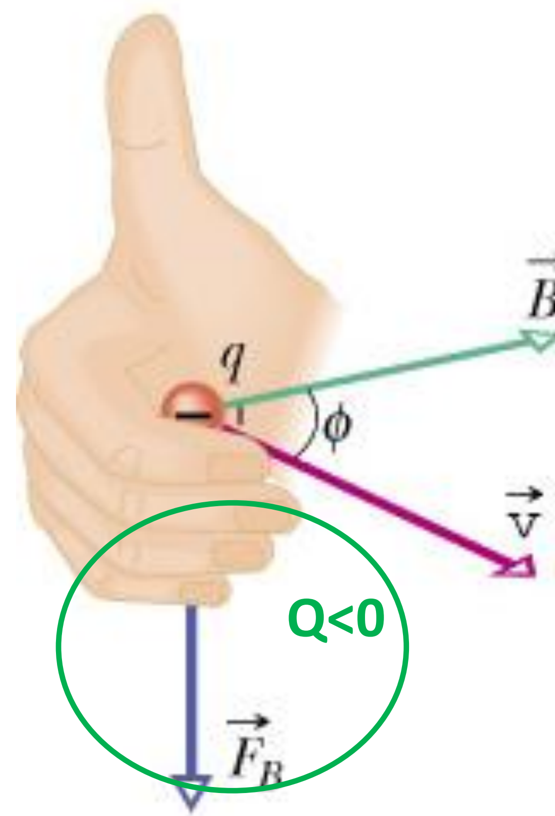
O módulo do produto vetorial é dado por:

$$\left|\vec{v}x\vec{B}\right| = |\vec{v}|\,\left|\vec{B}\right|\,sin\phi$$

Atenção: o sentido da força depende do sinal da carga



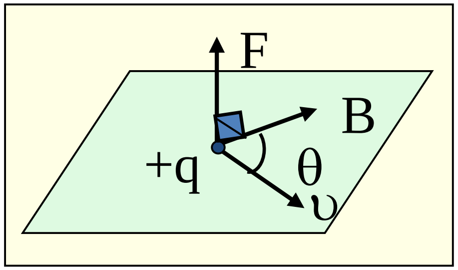




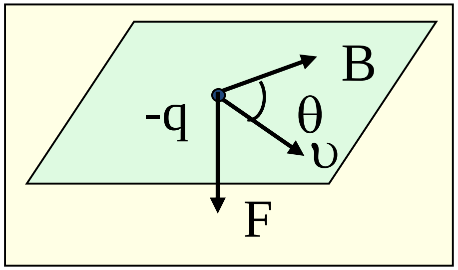
$$\boxed{\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}}$$

Voltando à afirmação do slide 8

$$\left|\vec{v} x \vec{B}\right|$$

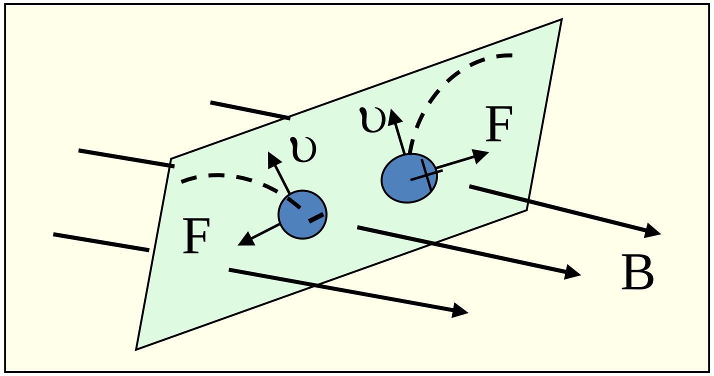


a



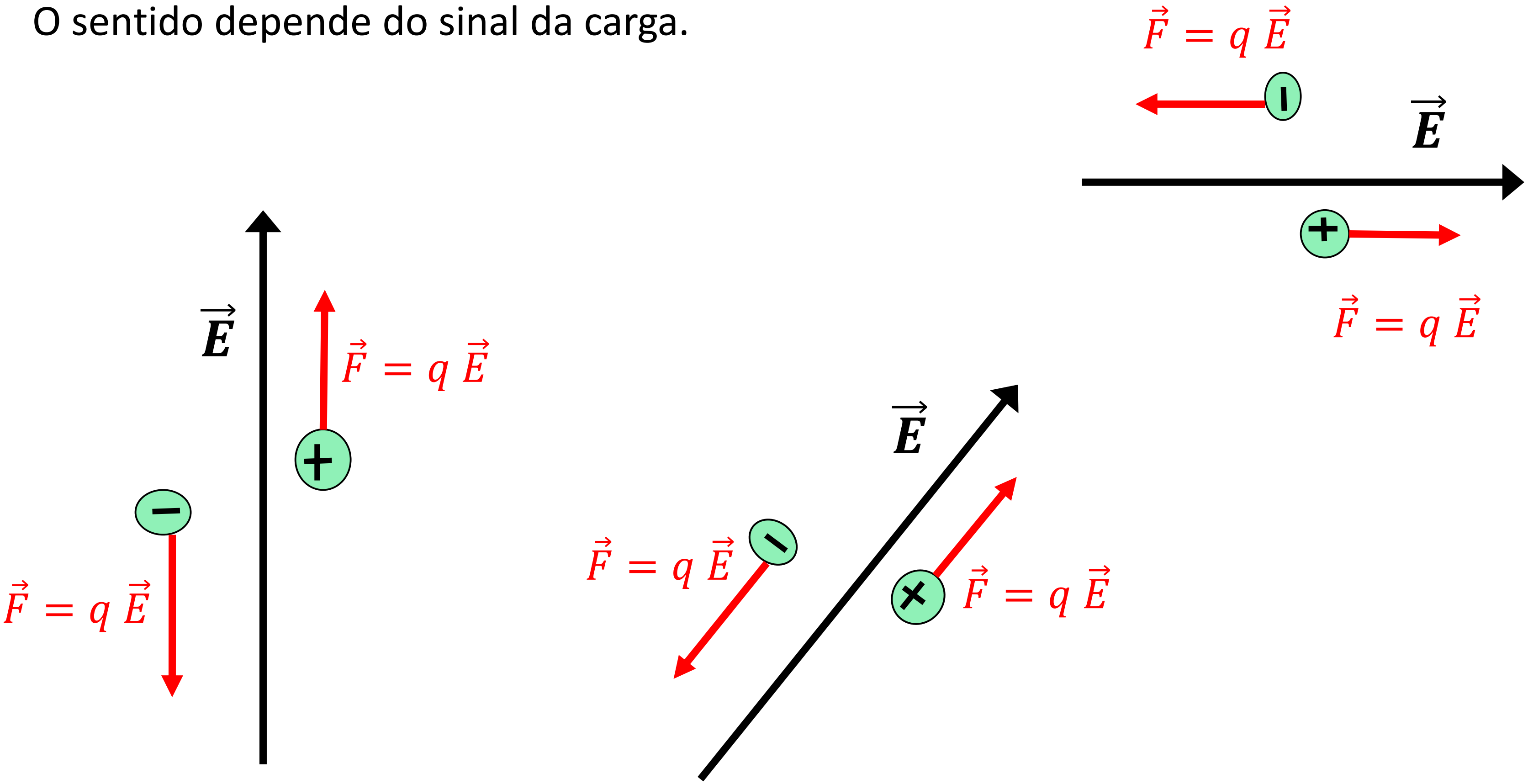
b

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



Diferenças importantes entre força elétrica e força magnética:

Força Elétrica e Campo Elétrico têm sempre a mesma direção.
O sentido depende do sinal da carga.



Força magnética é sempre perpendicular ao campo magnético (e …)

Diferenças importantes entre força elétrica e magnética:

$$\overrightarrow{F_q} = q\overrightarrow{E_P}$$

- $\overrightarrow{F_e}$ e $\vec{E}$; mesma direção (sentido depende do sinal da carga)
- $\overrightarrow{F_e}$ actua sobre cargas paradas e em movimento
- $\overrightarrow{F_e}$ realiza trabalho no deslocamento de cargas

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

- $\overrightarrow{F_B}$ Perpendicular a $\vec{B}$ (e a $\vec{v}$);
- $\overrightarrow{F_B}$ só actua sobre cargas em movimento
- $\overrightarrow{F_B}$ não realiza trabalho quando uma particula é deslocada

$\Downarrow$?????

- $\overrightarrow{F_B}$ **não realiza trabalho quando uma particula** é **deslocada**

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

$$W = \int \vec{F}.d\vec{r} = \int |\vec{F}||d\vec{r}|\cos(\vec{F}, d\vec{r}) = \mathbf{0}$$

pois $\overrightarrow{F_B}$ é **perpendicular** à **velocidade**,

ou seja ao deslocamento

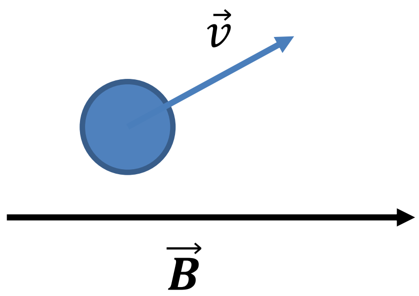
Ora como: $$W = \int \overrightarrow{F_B}.\mathrm{d}\overrightarrow{r} = \Delta Ecin = 0$$

$\Downarrow$

Não há variação do módulo do vetor velocidade

A força não realiza trabalho…..

$$\int \overrightarrow{F_B}.\mathrm{d}\vec{l} = \Delta Ecin = 0$$



Assim:

$\Rightarrow$ Um campo magnético aplicado pode **alterar a direção do vetor velocidade** (se $\overrightarrow{F_B} \neq 0$)

$\Rightarrow$ MAS **não altera o módulo** do vetor velocidade duma partícula.

Unidade SI de $\overrightarrow{\boldsymbol{B}}$: Weber por metro quadrado
(Wb/m^2) chamado
tesla (T).

- Ímanes de laboratório ~ 25.000 G (Gauss), ou 2.5 T (Tesla)
- Ímanes supercondutores ~ 250.000 G, ou 25 T
- Campo magnético da Terra, nas vizinhanças da superfície terrestre ~ 0.5 G, ou 0.5×10^{-4} T

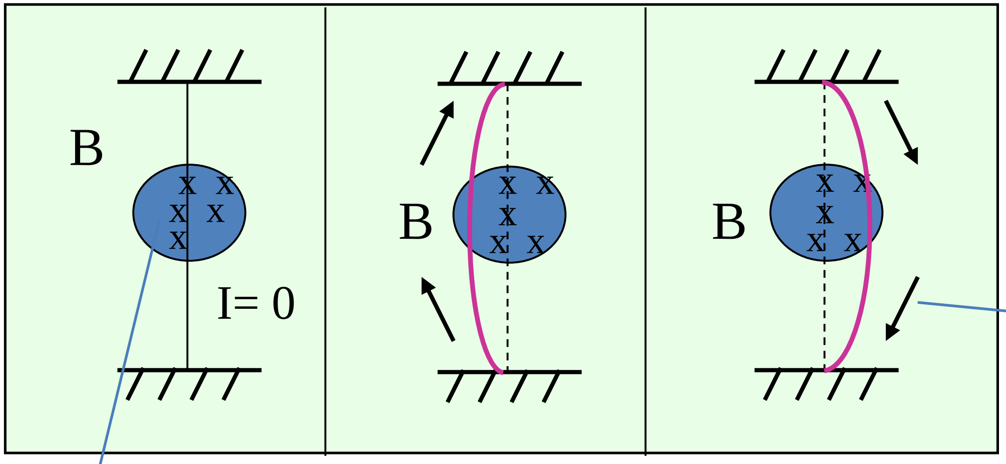
7.3 -Força magnética em correntes: $\overrightarrow{F_B}$

Se uma carga a mover-se com velocidade numa região onde existe um $\vec{B}$ sente uma força, ENTAO

uma **corrente elétrica** numa região onde existe um $\vec{B}$ sente também uma força.

$\Downarrow$

Conjunto de muitas cargas em movimento "ordenado"

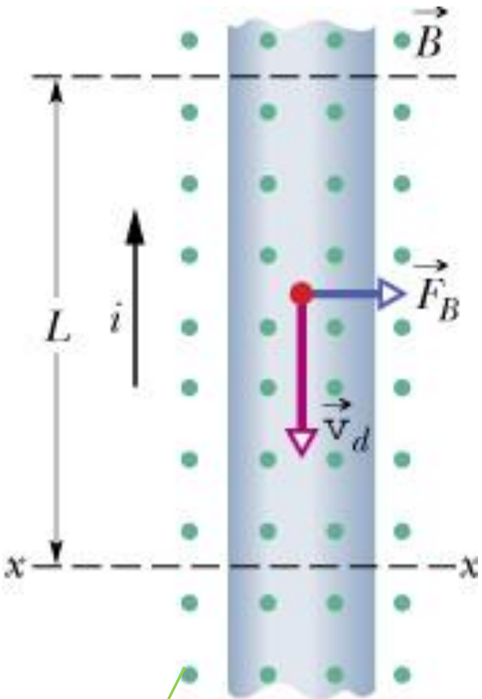


Experimentalmente

sentido da corrente

Campo magnético a apontar para dentro da folha

A força magnética resultante no fio (onde passa a corrente) é a soma das forças individuais sobre as cargas.



Campo magnético a apontar para fora da folha

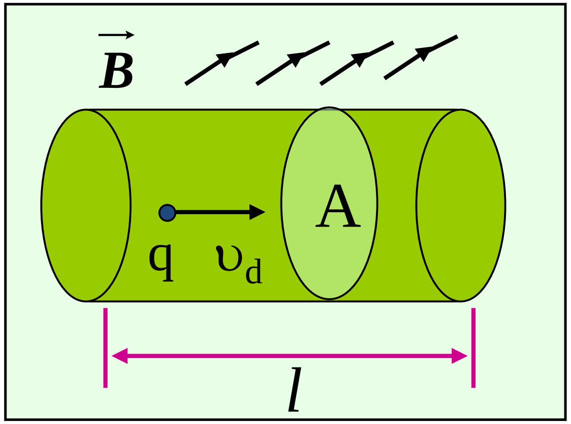
$$\overrightarrow{F_B} = \sum_{q0}^{qn} \overrightarrow{F_B}\ em\ cada\ carga$$

$$\overrightarrow{F_B} = \int_0^L d\overrightarrow{F_B} \qquad \ldots\ldots\ldots \qquad \boxed{\vec{F}_B = i\vec{L} \times \vec{B}}$$

se e só se o fio for retilineo e o campo externo uniforme

? Como chegar a $\boxed{\vec{F}_B = i\vec{L}\times\vec{B}}$ a partir de $\boxed{\vec{F}_B = q\vec{v}\times\vec{B}}$

Consideremos que o segmento condutor retilíneo da figura: comprimento *l*; área da secção reta *A* é percorrido por uma corrente I, numa região onde existe um campo magnético externo.



A força sobre a carga *q* que se move com velocidade v_d é

$$\overrightarrow{F_B} = q\overrightarrow{v_d}\mathrm{x}\vec{B}$$

A força total sobre o segmento do condutor é a força que uma carga sente multiplicada pelo nº de cargas que existem no segmento ???

- O nº de cargas no segmento = n *A l*

onde n é o numero de cargas por unidade de volume e (*l* A) é volume do segmento.

ASSIM:

$$\overrightarrow{F_B} = \left(q\overrightarrow{v_d} \times \vec{B}\right) n\ A\ l$$

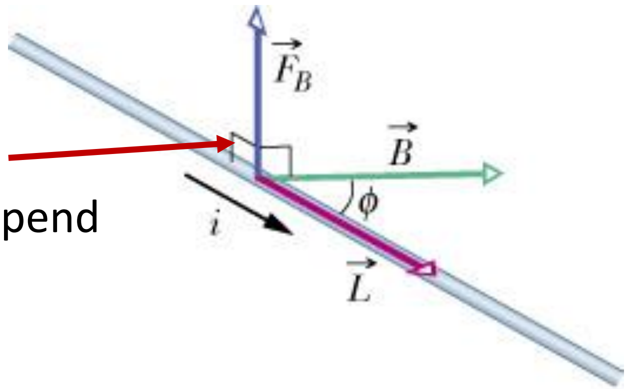
Como $I = n\ q\ v_d A$ (cap. 5)

$$\boxed{\vec{F}_B = I\vec{L} \times \vec{B}}$$

$\vec{L}$ – vetor cujo módulo é o comprimento do fio (onde passa a corrente) **e tem o sentido da corrente.**

NOTA: Esta equação só se aplica a um fio condutor retilíneo num campo magnético externo uniforme

Assim, para um fio condutor retilíneo num campo magnético externo uniforme (figura), o sentido e direção da força é:



perpend

$$\boxed{\vec{F}_B = I\vec{L} \times \vec{B}}$$

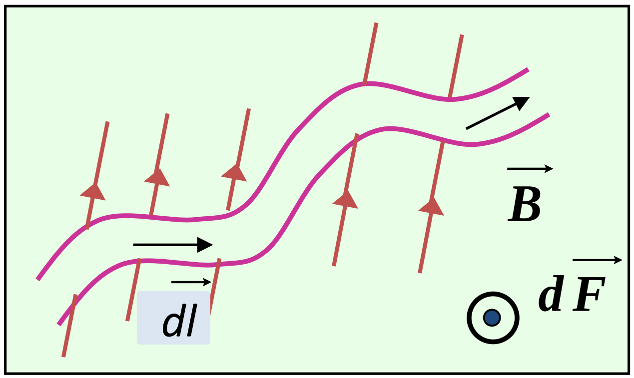
O módulo da força é:

$$|\vec{F}_B| = i|\vec{L} \times \vec{B}| = i(|\vec{L}|\;|\vec{B}|\;sin\phi)$$

Regra da mão direita

1- Apontar os dedos da mão direita no sentido da corrente;
2- fechar a mão no sentido do campo magnético;
3 - o sentido do dedo polegar, corresponde ao
sentido do produto vetorial, ou seja da Força.

Fio condutor, de forma arbitrária e secção reta uniforme, num $\overrightarrow{\boldsymbol{B}}$ externo:



Cada segmento (muito pequeno) d$\vec{l}$, na presença de um campo $\vec{B}$, sente uma força dada por:

$$d\vec{F} = I d\vec{l} \text{x} \vec{B}$$

$d\vec{F}$ **é máxima quando** $\boldsymbol{I d\vec{l} \perp \vec{B}}$

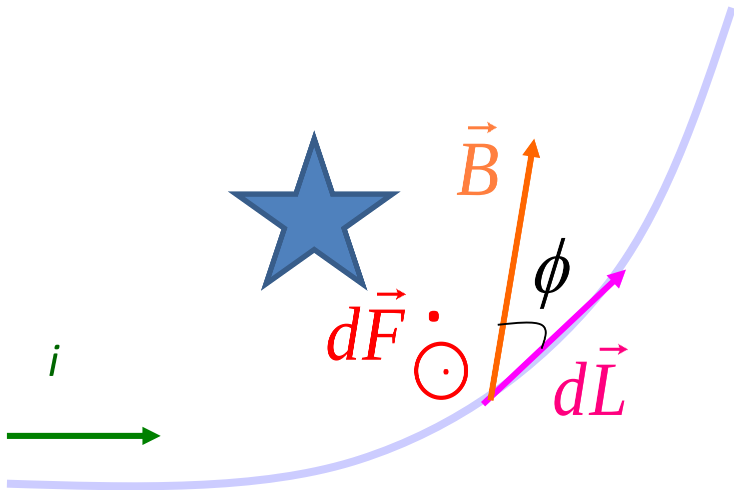
e

$\boldsymbol{d\vec{F}=0}$ **quando** $\boldsymbol{I d\vec{l}\ //\ \vec{B}}$ **;**

$$\overrightarrow{F_B} = \int_0^L d\overrightarrow{F_B} = \int_0^L I d\vec{l} \text{x} \vec{B} = I \int_0^L d\vec{l} \text{x} \vec{B}$$

Ao longo do fio, o $|\overrightarrow{\boldsymbol{B}}|$ e o ângulo entre a direção do campo e o vetor $d\vec{l}$ podem variar …….

Generalizando:



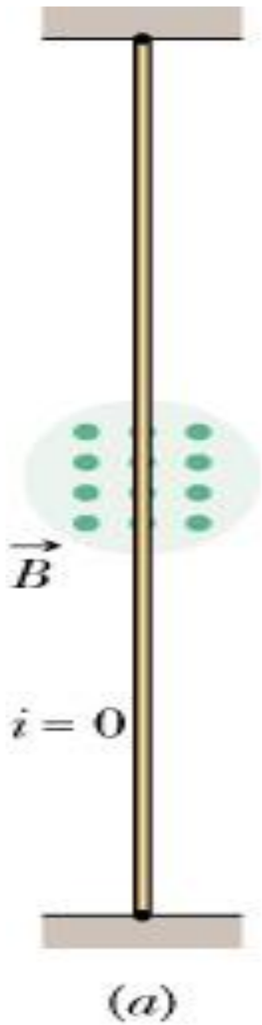
$$\boxed{d\vec{F}_B = i d\vec{L} \times \vec{B}}$$

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

Campo magnético ou força magnética a apontar para dentro da folha $\otimes$

Campo magnético ou força magnética a apontar para fora da folha $\odot$

Exemplo: Fio numa região onde existe um campo magnético a apontar para os nosso olhos



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

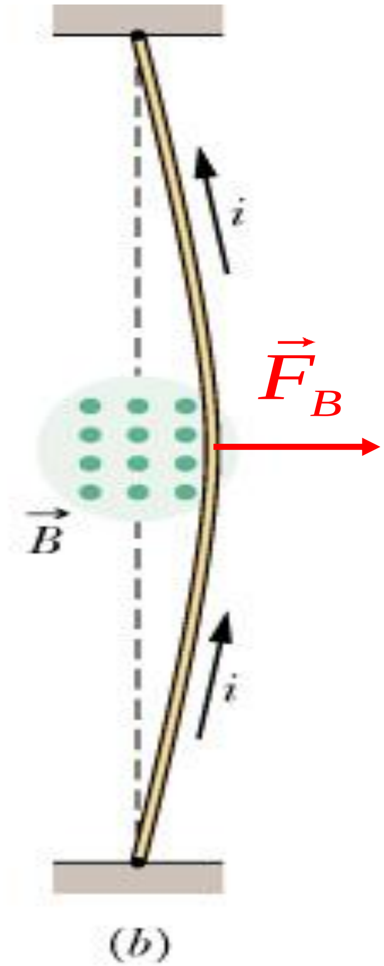
$$\left|\overrightarrow{dF_B}\right| = i\left|\overrightarrow{dL} \times \vec{B}\right| = i(\left|\overrightarrow{dL}\right| \left|\vec{B}\right| sin\phi)$$

Como a corrente é igual a zero (I=0)

o fio não sente o campo magnético , ou seja, $\overrightarrow{F_B}$=0

E SE I ≠0???

Aplicar a regra da mão direita



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

7.4 – Movimento de uma carga num campo magnético

Consideremos que uma partícula de massa *m*, carga *q e* velocidade $\vec{v}$, entra numa região de campo magnético $\vec{\boldsymbol{B}}$.

Essa partícula vai sentir uma força, pois $\vec{v} \neq 0$ e $\overrightarrow{B} \neq 0$

$$\left|\vec{F}_B\right| = q\left|\vec{v} \mathrm{x} \vec{B}\right| = q(|\vec{v}|\,\left|\vec{B}\right|\,sin\phi)$$

Essa força é ⊥ a $\vec{\boldsymbol{v}}$ e $\overrightarrow{B}$

⊥ à trajetória

$$W = \int_A^B \vec{F}.\overrightarrow{dl} = \int_A^B \overrightarrow{|F|}\,\left|\overrightarrow{dl}\right| \cos 90 = 0 = \Delta E_{cin} = -\Delta E_{pot}$$

Não realiza trabalho

Logo não há variação da cinética da partícula carregada.
ASSIM, o $\vec{\boldsymbol{B}}$ não altera o $|\vec{v}|$ (só a direção)

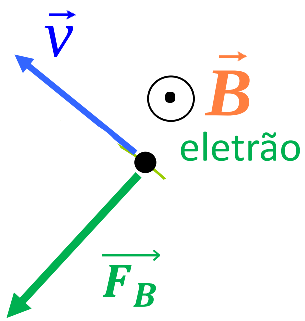
7.4 .1– Consideremos que $\vec{v} \perp \vec{B}$

Caso particular

Como a força é $\perp$ a $\vec{v}$ e a $\vec{B}$

$\overrightarrow{F_B}$ é $\perp$ à trajetória

Regra mão direita



módulo dado por

$$|\overrightarrow{F_B}| = |q||\vec{v}||\vec{B}| \; sin\, 90^o$$

$$|\overrightarrow{F_B}| = |q||\vec{v}||\vec{B}|$$

- **A partícula irá mover-se num circulo cujo plano é $\perp$ a $\vec{B}$**

No movimento da carga, por efeito da $\overrightarrow{F_B}$ as direções de $\vec{v}$ e $\overrightarrow{F_B}$ alteram-se continuamente.

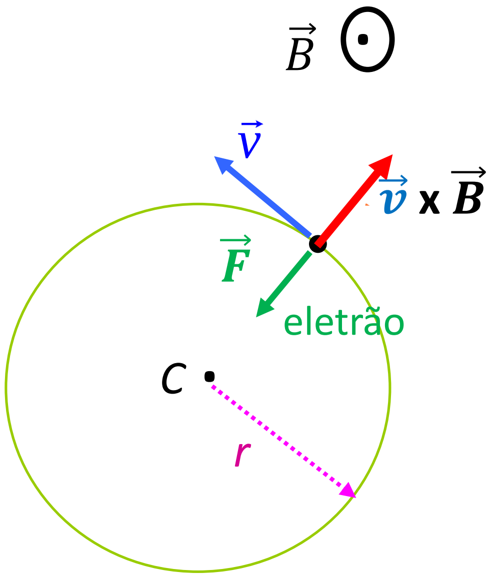
Trajectória será circular com velocidade uniforme

Assim, $\overrightarrow{F_B}$ é uma **força centrípeta**, que altera a direção de $\vec{v}$, **mas não o seu módulo**.

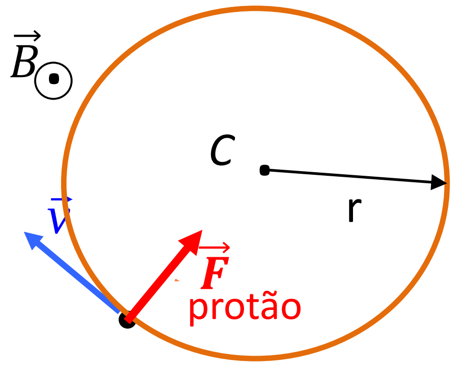
$\overrightarrow{F_B}$ é radial;

$| \; \overrightarrow{F_B} \; | = q \, \upsilon \, B$

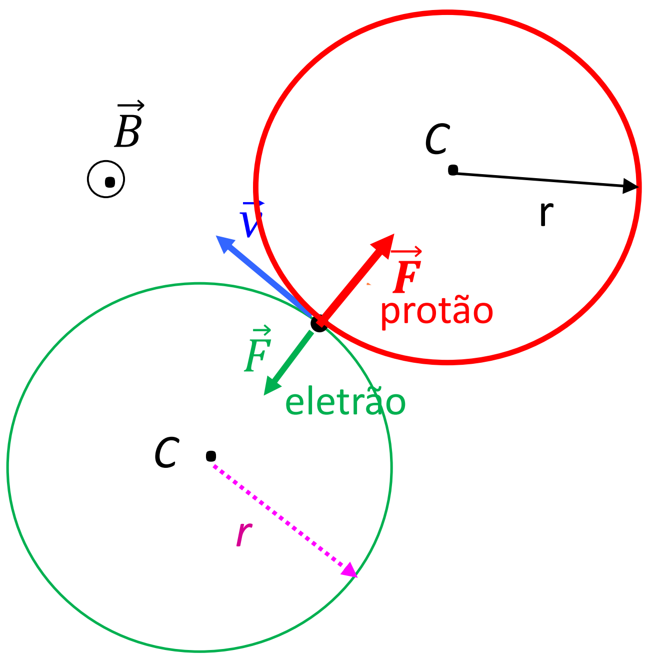
$| \; \overrightarrow{F_{Cent}} \; | = \mathrm{m} \, \dfrac{v^2}{r}$



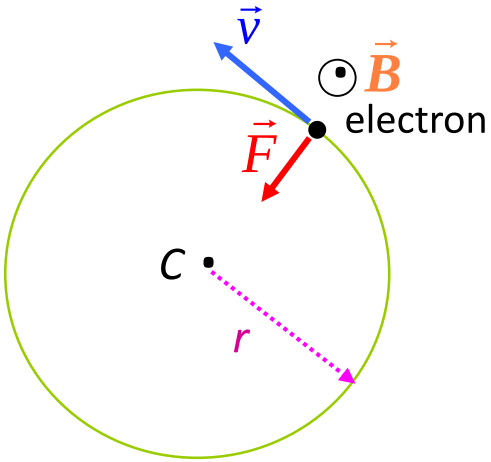
Se fosse um protão



Se fosse um protão e um eletrão



Qual o raio da trajetória????????



$$|\overrightarrow{F_B}| = |q||\vec{v}||\vec{B}| \quad = Força_{centrípeta}$$

$$F_B = q\, v\, B = m\frac{v^2}{r}$$

Aceleração centrípeta

$$\boxed{r = \frac{mv}{|q|\,B}}$$

Raio da trajetória

F centripta

Período do movimento: $$\boxed{T = \frac{2\pi m}{|q|\,B}}$$

T= $\frac{2\pi r}{v}$

tempo que a partícula demora a percorrer a circunferência: x=vt

ω= $v\ /\ r$

$$\boxed{\omega = \frac{|q|\,B}{m}}$$

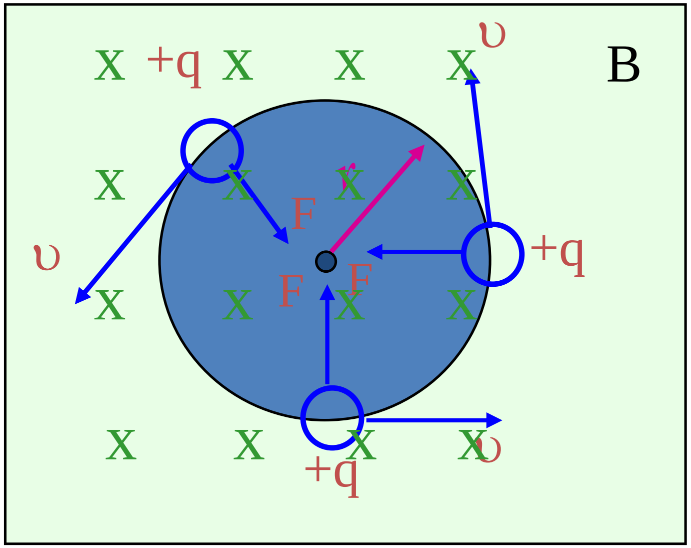
Frequência angular da carga

$$\boxed{T = \frac{2\pi m}{|q| B}}$$

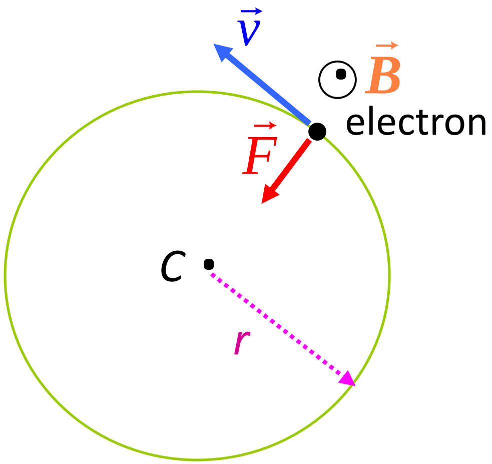
$$\boxed{\omega = \frac{|q| B}{m}}$$

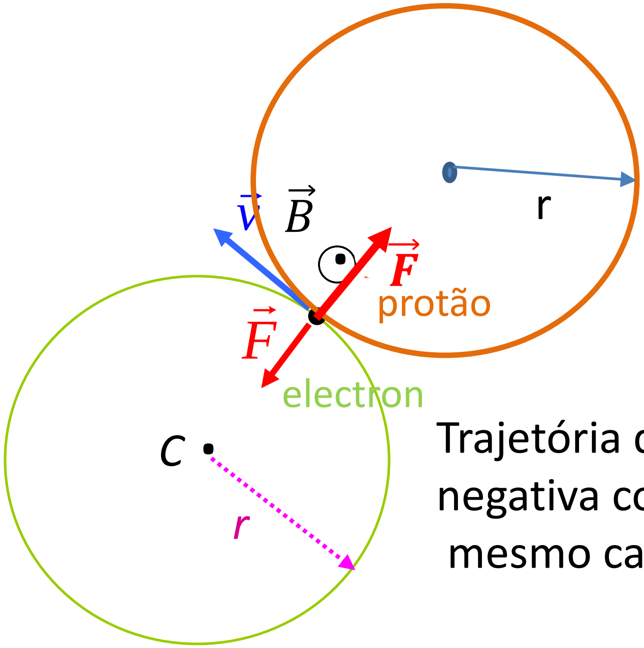
Não dependem nem da velocidade da carga nem do raio da trajetória!

Trajetória de uma carga positiva num campo B:



Trajetória de uma carga negativa num campo B:





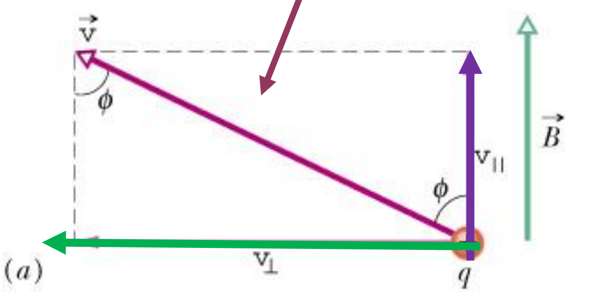
Trajetória de uma carga positiva e de uma carga negativa com a mesma velocidade e sentindo o mesmo campo B:

7.4.2 – Se $\vec{v} \not\perp \vec{\boldsymbol{B}}$

O vetor velocidade pode ser decomposto
numa componente $//$ a B, e
numa componente $\perp$ a B

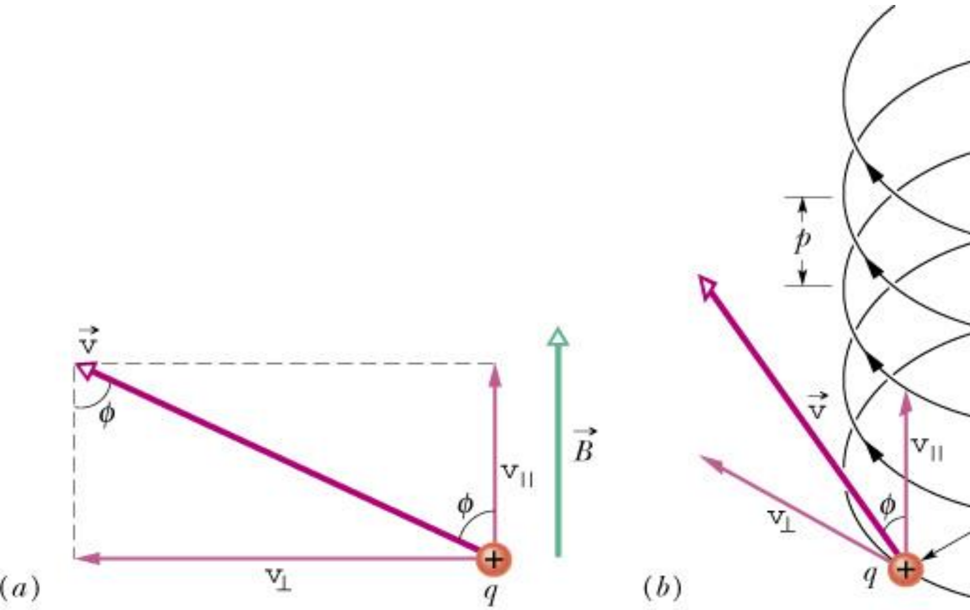
Deslocamento na direção de B

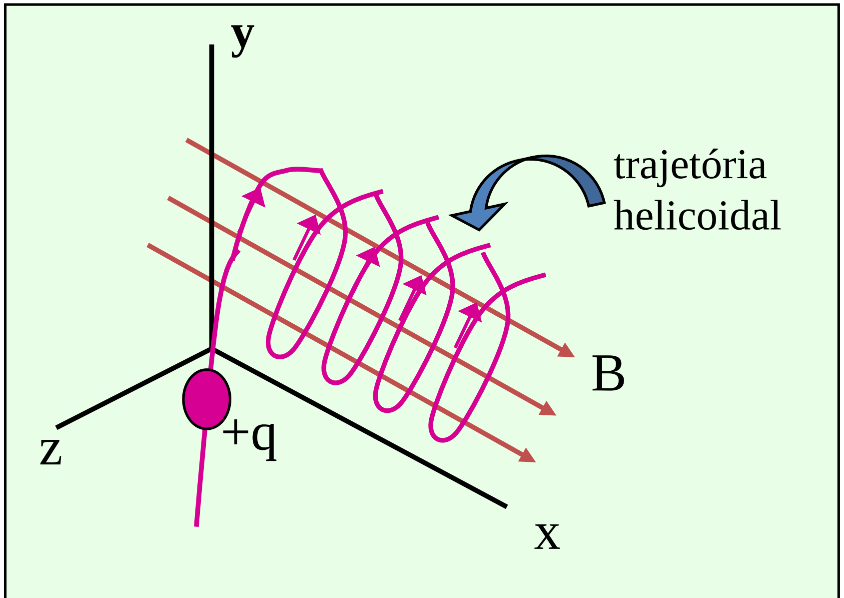
MCU como no caso anterior



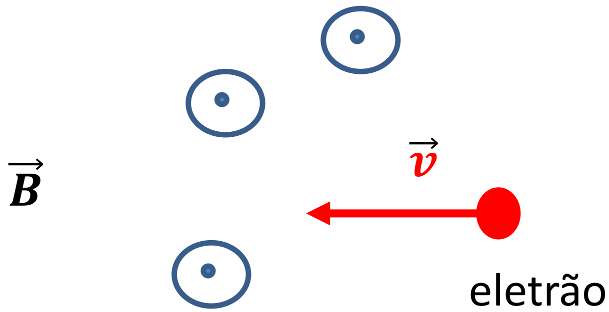
A componente $//$ da velocidade não sente o campo B (pois ângulo entre v // e $\vec{\boldsymbol{B}}$ é de 0º)

a trajectória
é hélicoidal

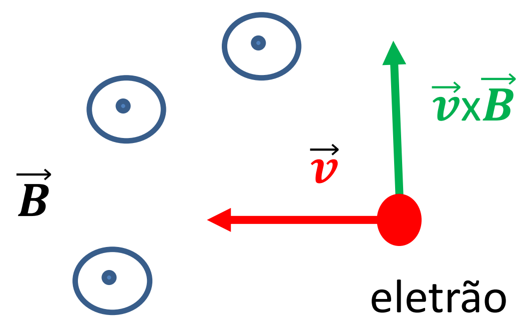


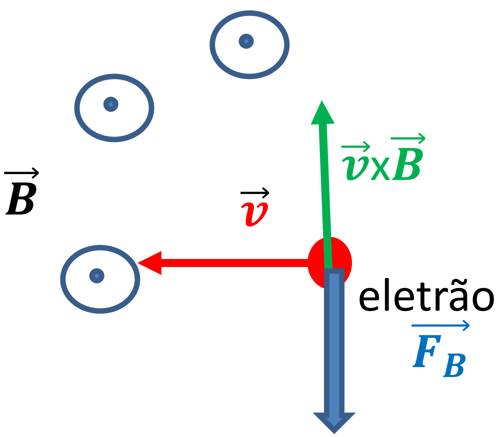


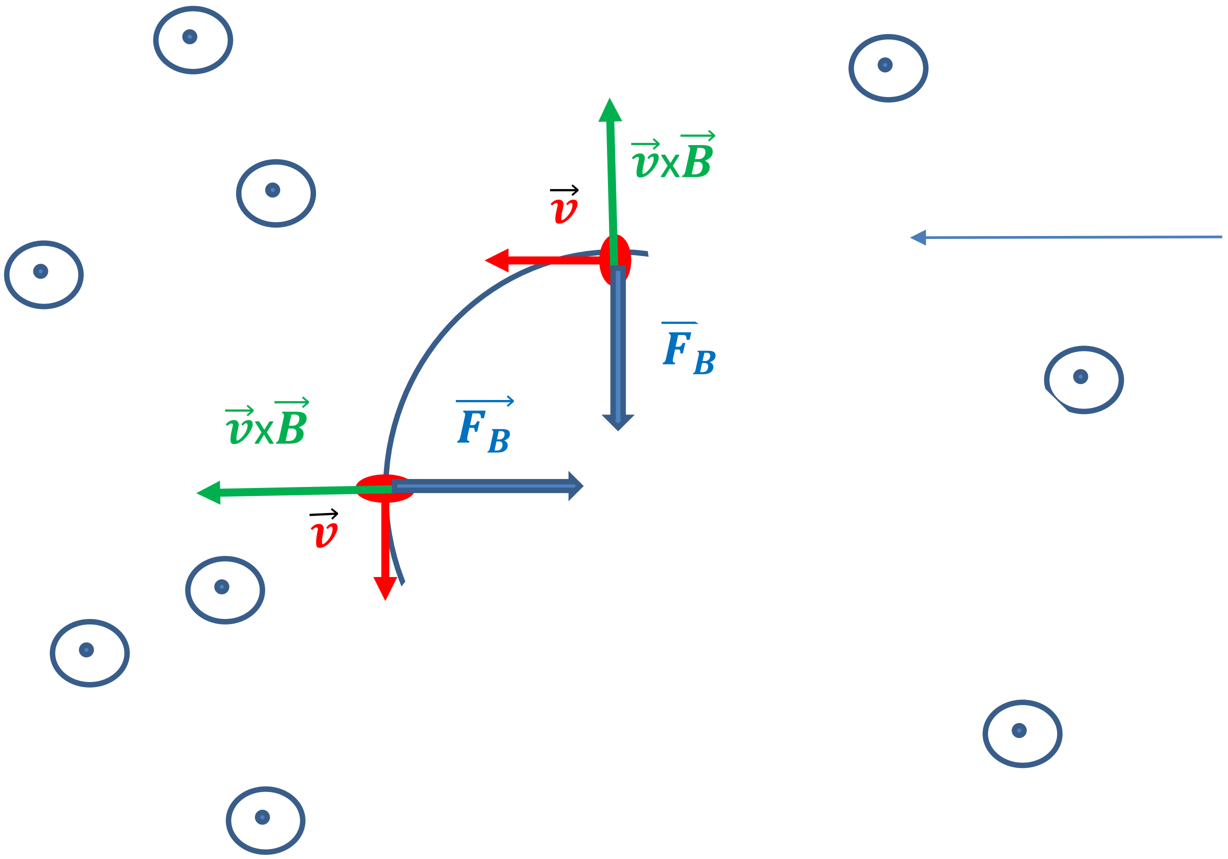
EX1: Trajetória de uma carga negativa



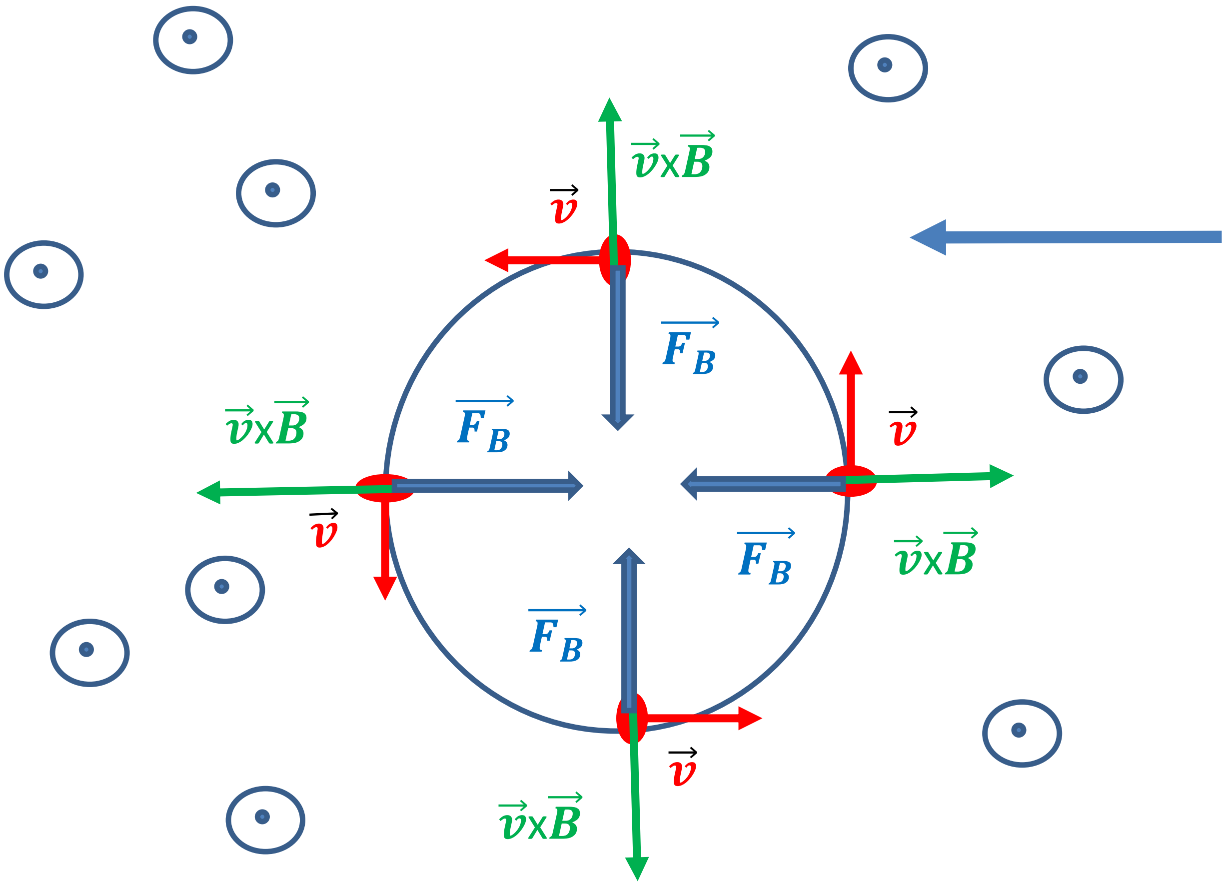
$$\boxed{\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}}$$





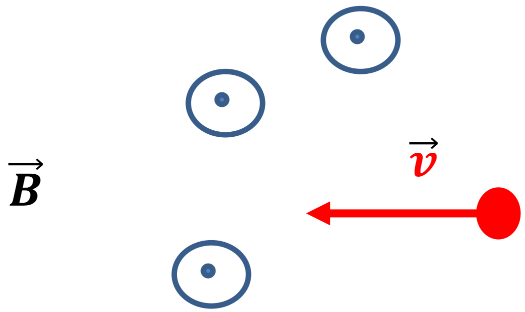


$\vec{v}$x$\vec{B}$
$\vec{v}$
$\overline{F}_B$
$\vec{v}$x$\vec{B}$
$\overrightarrow{F_B}$
$\vec{v}$

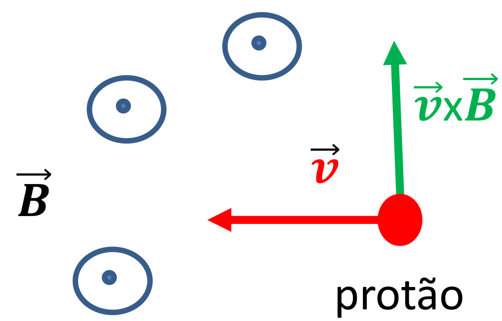


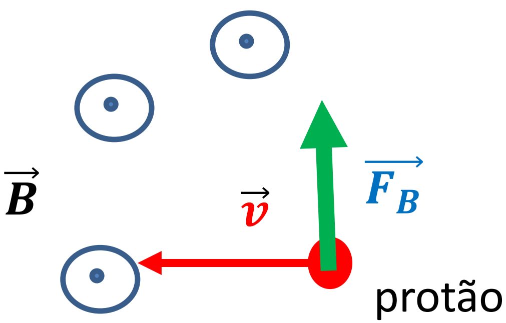
$\vec{v}$x$\vec{B}$
$\vec{v}$
$\vec{F_B}$
$\vec{v}$x$\vec{B}$
$\vec{F_B}$
$\vec{v}$
$\vec{v}$
$\vec{F_B}$
$\vec{v}$x$\vec{B}$
$\vec{F_B}$
$\vec{v}$
$\vec{v}$x$\vec{B}$

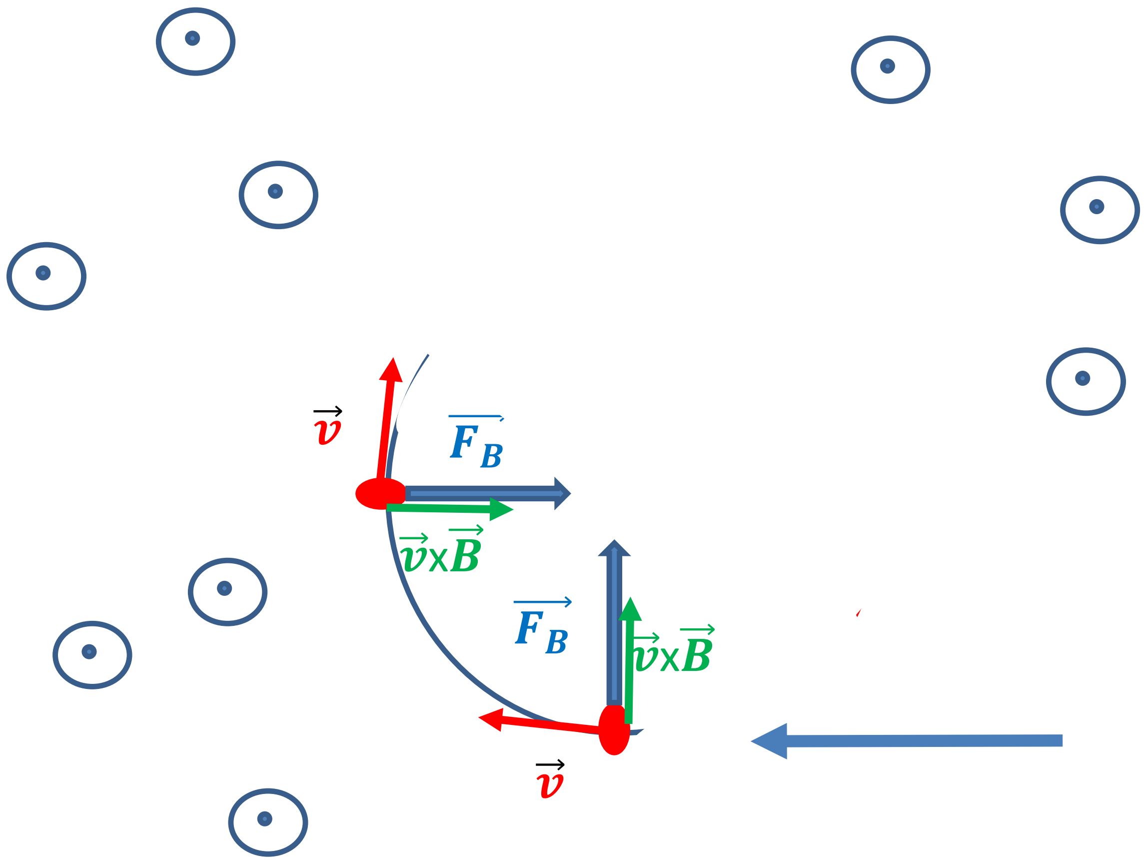
EX2: Trajetória de uma carga positiva



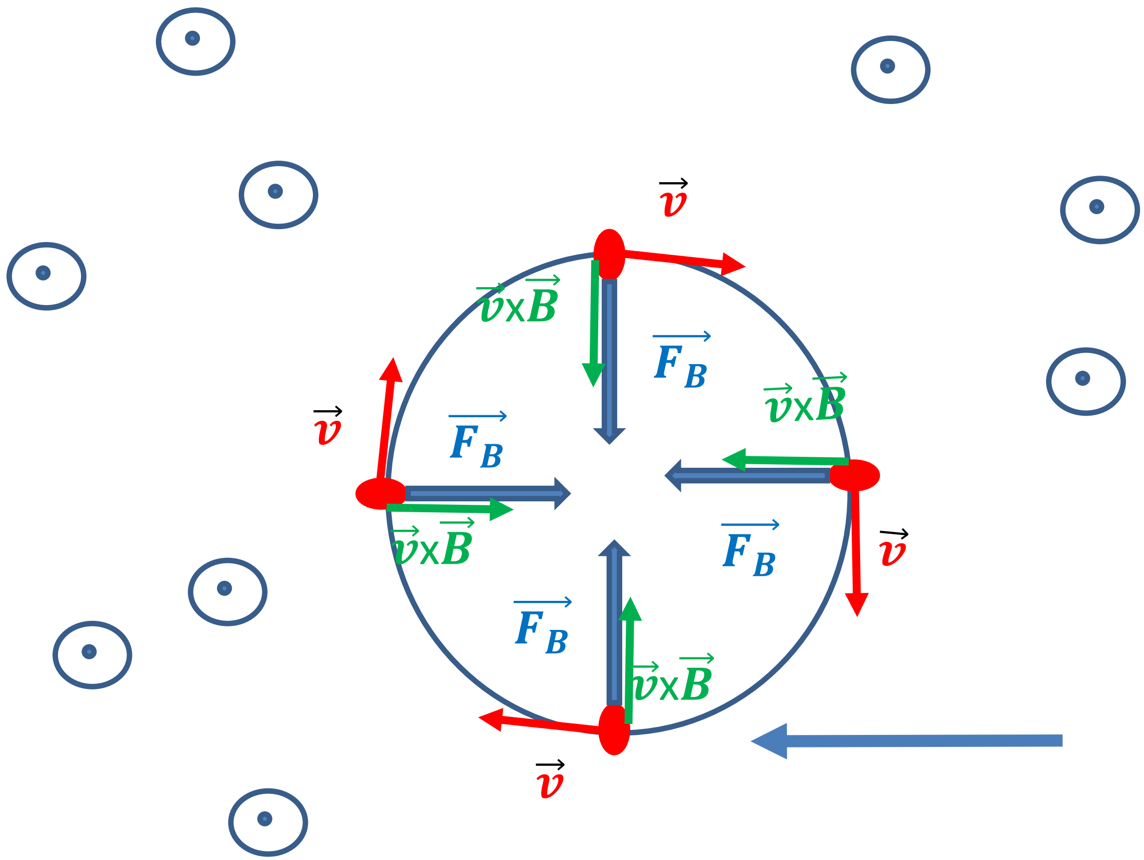
$$\boxed{\vec{F}_B = q\vec{v} \times \vec{B}}$$







$\vec{v}$
$\overrightarrow{F_B}$
$\vec{v} \times \vec{B}$
$\overrightarrow{F_B}$
$\vec{v} \times \vec{B}$
$\vec{v}$

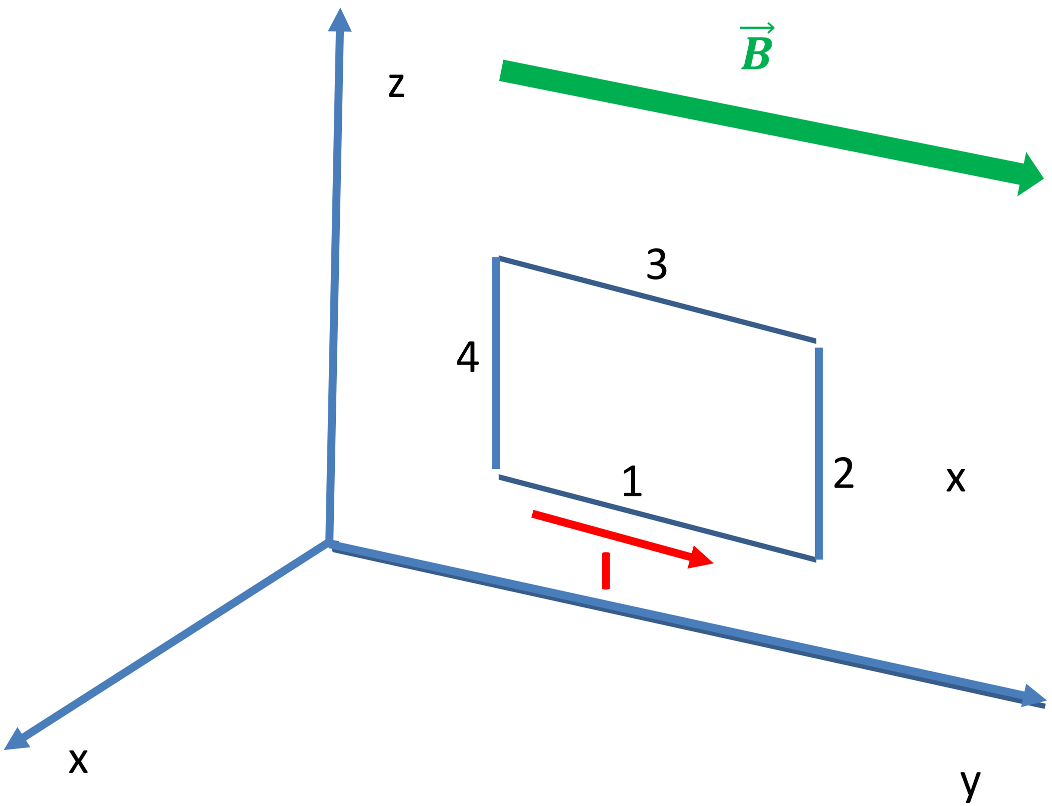


$\vec{v}$
$\vec{v}$x$\vec{B}$
$\vec{F_B}$
$\vec{v}$x$\vec{B}$
$\vec{v}$
$\vec{F_B}$
$\vec{v}$x$\vec{B}$
$\vec{F_B}$
$\vec{v}$
$\vec{F_B}$
$\vec{v}$x$\vec{B}$
$\vec{v}$

A ação do campo magnético em cargas em movimento é usada para:

- Guiar feixes de partículas;
- Determinar a concentração de portadores de carga (Efeito Hall);
- Base dos motores de corrente contínua: movimento de rotação provocado pela interação de uma corrente com o campo magnético.

Espira rectangular numa região de campo magnético



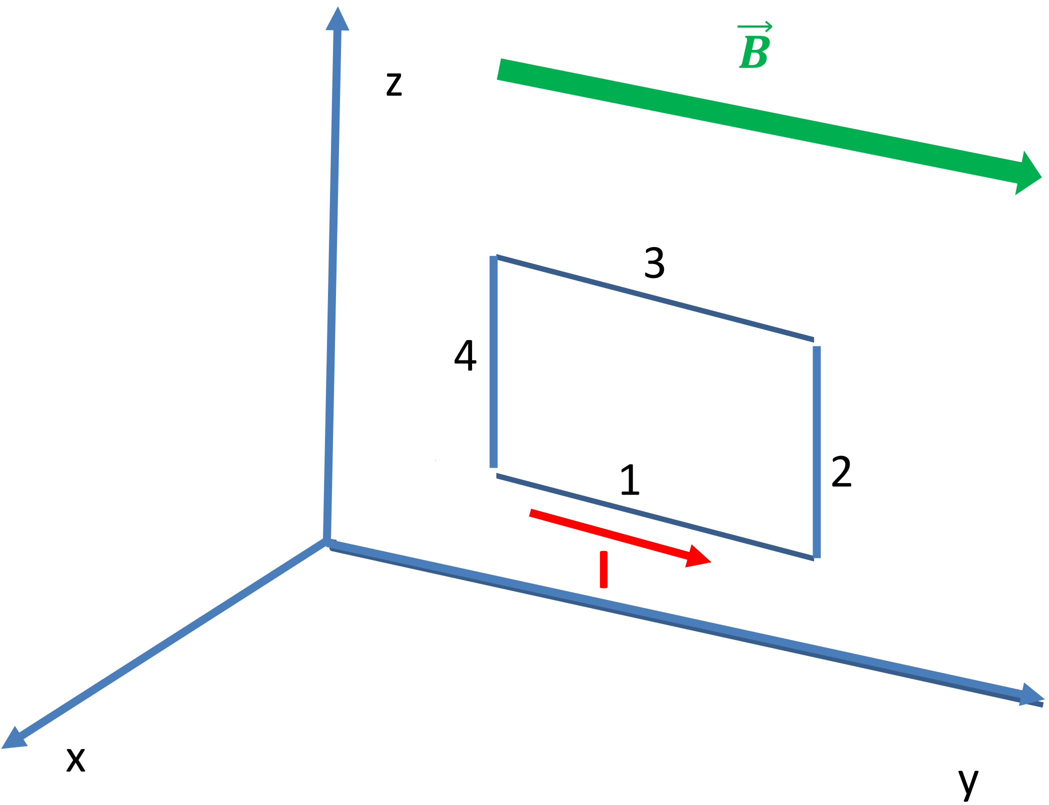
$$\overrightarrow{F_B} = \int_0^L d\overrightarrow{F_B}$$

$$d\vec{F} = Id\vec{l} \times \vec{B}$$

$$\overrightarrow{F_B} = \int_0^L d\overrightarrow{F_B} = \int_0^L Id\vec{l} \times \vec{B}$$
$$= I \int_0^L d\vec{l} \times \vec{B}$$

$$|\vec{F}_B| = i|\vec{L} \times \vec{B}| = i(|\vec{L}|\,|\vec{B}|\,sin\phi)$$

Analisar lados 1, 3, 2, 4



Lado 1 e 3 :

$$\left|\vec{F}_B\right| = i\left|\vec{L}x\vec{B}\right| = i\left(\left|\vec{L}\right|\left|\vec{B}\right| \sin\phi\right)$$

0

$$\overrightarrow{F_B} = 0$$

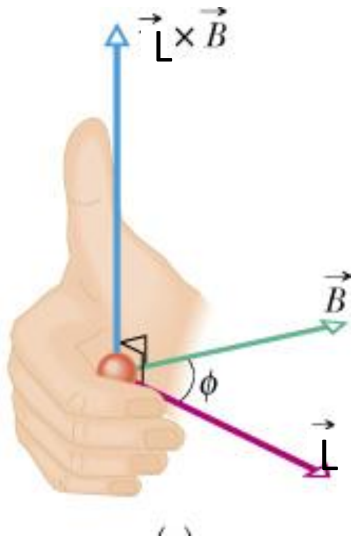
Lado 2 e 4 :

$$\left|\vec{F}_B\right| = i\left|\vec{L}x\vec{B}\right| = i\left(\left|\vec{L}\right|\left|\vec{B}\right| \sin\phi\right)$$

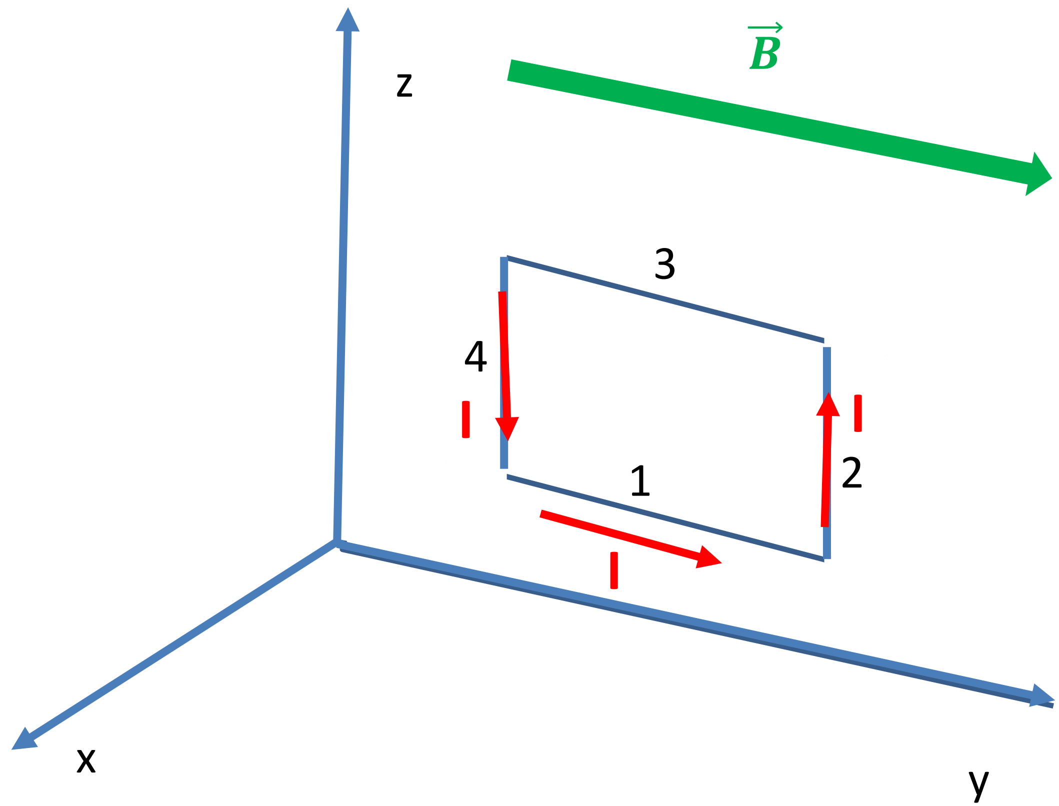
-1 ou +1

$$\overrightarrow{F_B} \neq 0$$

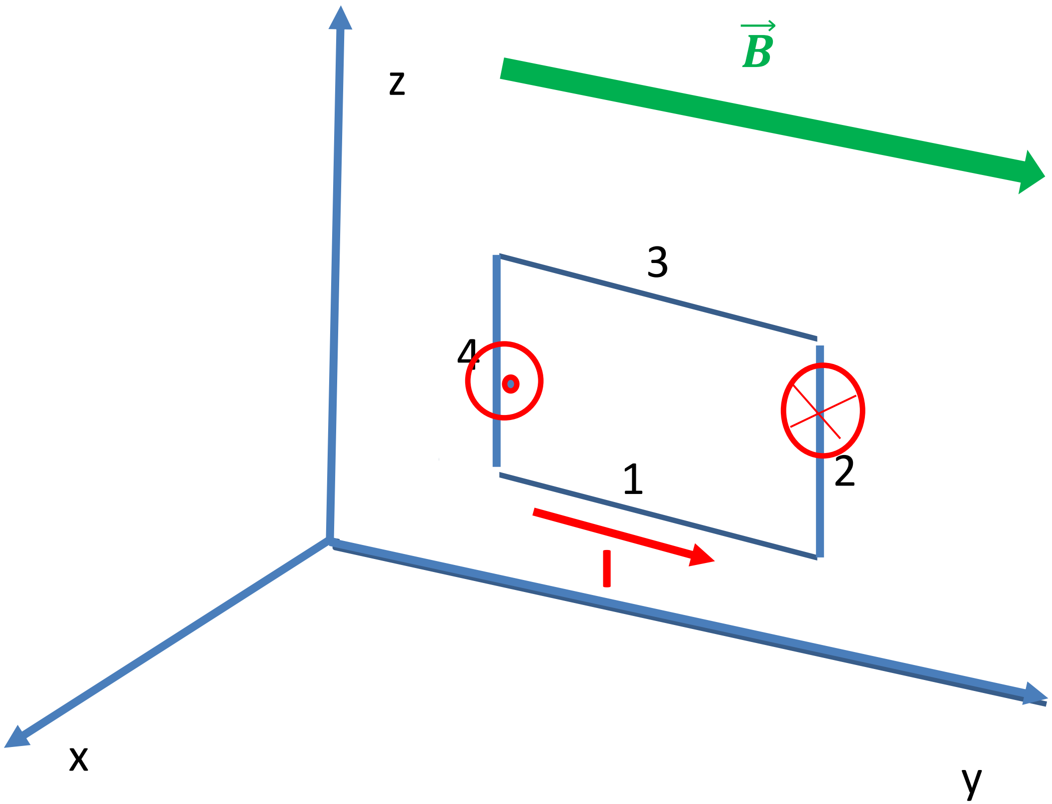
Regra da mão direita



L × B
B
ϕ
L

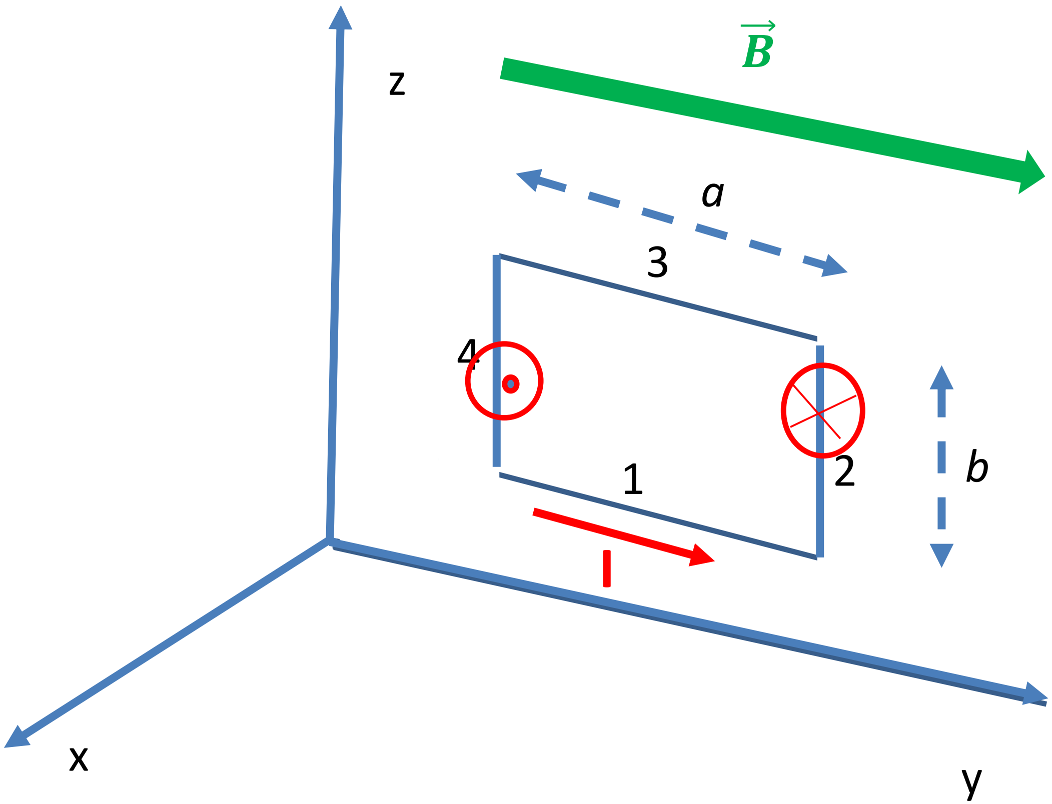


B
z
3
4
I
I
2
1
I
x
y



$\overrightarrow{F_B}$ $\odot$ $\overrightarrow{F_B}$ $\otimes$

$$\left|\vec{F}_B\right| = i\left|\vec{L} \text{x}\, \vec{B}\right| = I(\left|\vec{L}\right|\,\left|\vec{B}\right|)$$



$$\left|\vec{F}_B\right| = i\left|\vec{L} \times \vec{B}\right| = I\left(\left|\vec{L}\right| \left|\vec{B}\right|\right)$$

$$\left|\overrightarrow{\boldsymbol{F}_{\boldsymbol{B}}}\right| = \boldsymbol{Ib\ B}$$

Torque

T = $(Ib\ B)$ **a**

ROTAÇÂO