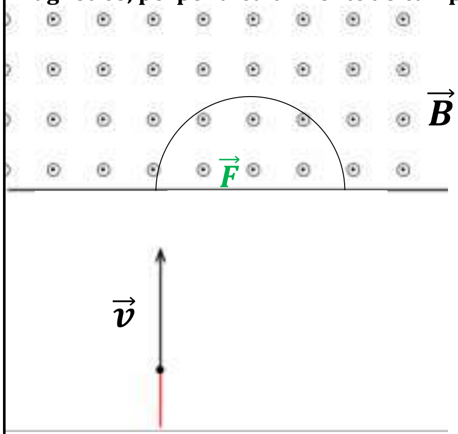
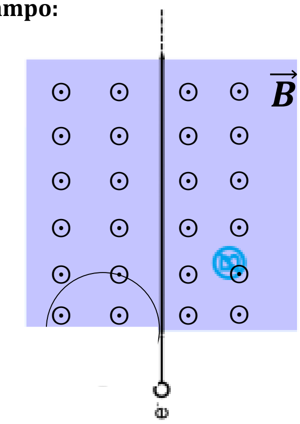
Quando uma carga elétrica entra numa região onde existe um campo magnético, fica sujeito a uma força magnética (força de Lorentz): $\boxed{\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}}$

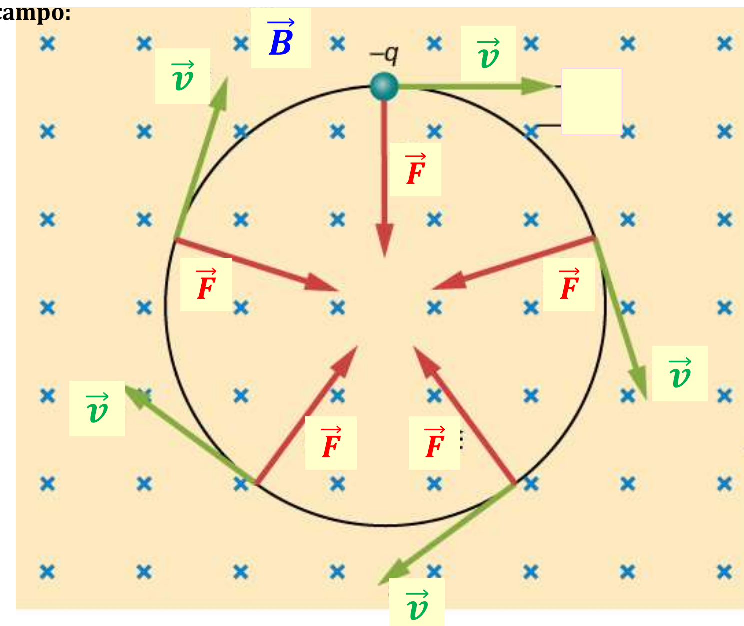
Caso de uma **carga positiva,** **com *v* constante, a penetrar num campo magnético, perpendicularmente ao campo:**



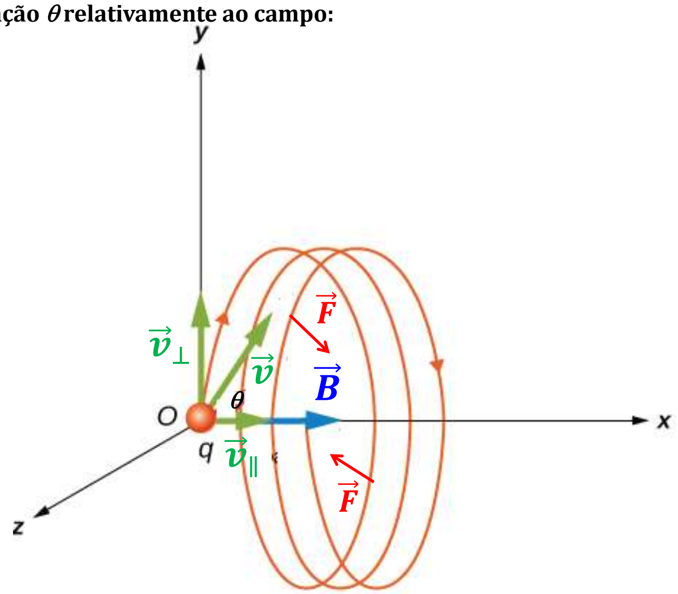
Caso de uma **carga negativa,** **com *v* constante, a penetrar num campo magnético , perpendicularmente ao campo:**



Caso de uma **carga negativa** **num campo magnético com *v* constante e perpendicular ao campo:**



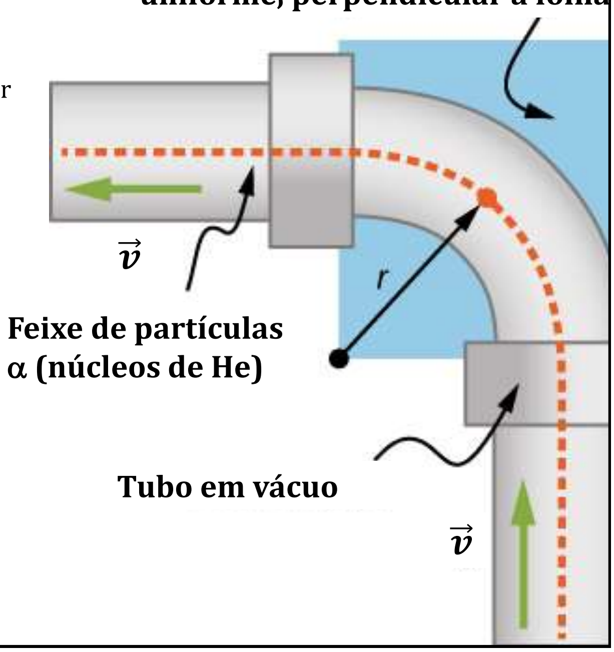
Caso de uma carga negativa num campo magnético com v constante e com uma inclinação θ relativamente ao campo:



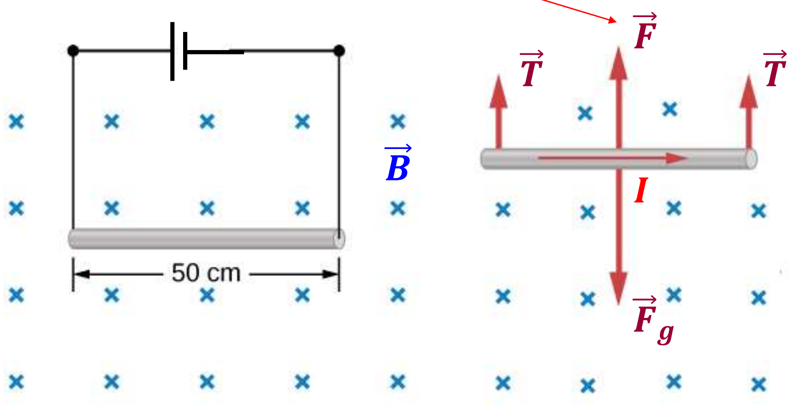
Checkpoint:

a) Qual o sentido do campo magnético para que a partícula α consiga curvar no tubo?
b) Calcule a velocidade das partícula α para que consigam curvar:

Dados:
- $m_\alpha = 6.65 \times 10^{-27} kg$
- $B = 1.1$ T
- $r = 0.5$ m



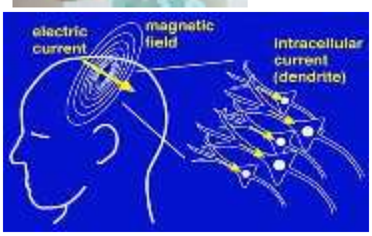
Quando um condutor, de comprimento *L*, e percorrido por uma corrente elétrica *I*, está numa região onde existe um campo magnético, fica sujeito a uma força magnética: $\boxed{\vec{F} = I\vec{L} \times \vec{B}}$

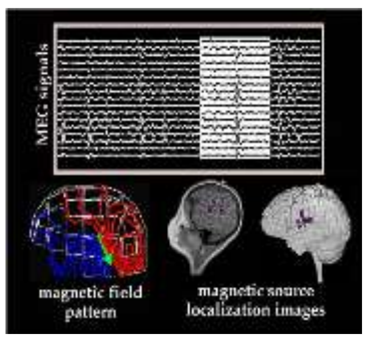


Camo Magnético (parte 2) Fontes de Campo Magnético

Encefalografia Magnética (*Magnetoencephalography* – MEG) técnica de diagnóstico médico, não invasiva, que faz o mapeamento da actividade cerebral, medindo o campo magnético produzido pelo cérebro.

Ao medir os **campos magnéticos criados pela corrente elétrica nos neurónios**, a MEG identifica a actividade do cérebro associada às várias funções humanas, em tempo real





Um disco rígido externo ligado a um computador funciona codificando magneticamente informações que podem ser armazenadas ou recuperadas rapidamente. Uma ideia chave no desenvolvimento de dispositivos digitais é a capacidade de produzir e usar campos magnéticos deste modo.

Intensidade de algumas fontes de campo magnético

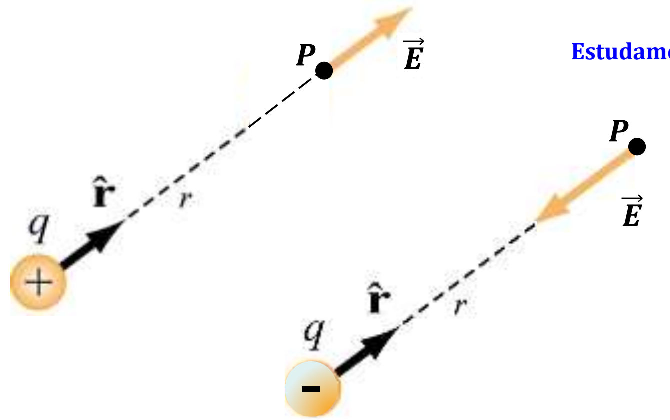
Magnete de laboratório supercondutor forte	30 T
Magnete de laboratório convencional forte	2 T
Equipamento médico de ressonância magnética	1.5 T
Íman em barra	1×10^{-2} T
Superfície do Sol	1×10^{-2} T
Superfície da Terra	0.5×10^{-4} T
No interior do cérebro humano (devido a impulso nervoso)	1×10^{-13} T

Cargas pontuais:

Uma carga elétrica (em repouso ou em movimento) cria, num ponto P, um campo elétrico dado por :

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q}{r^2}\hat{r}$$

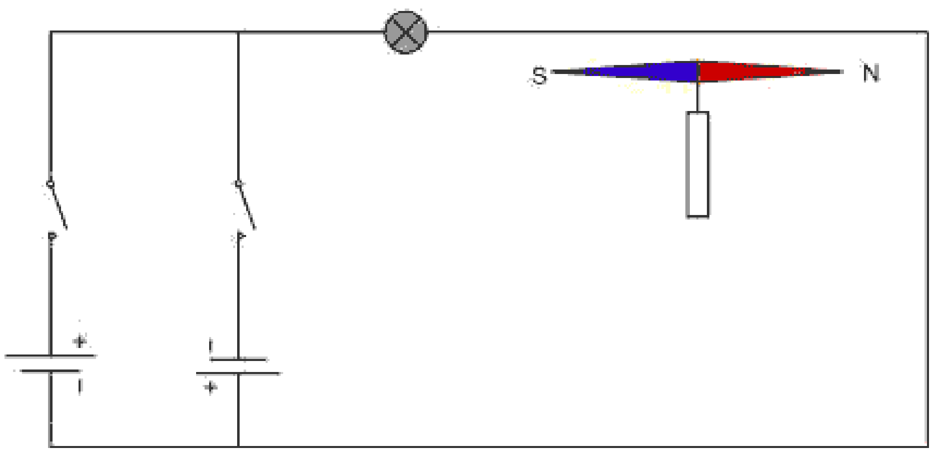
Estudamos isto no capítulo 1.



Experiência de Oersted

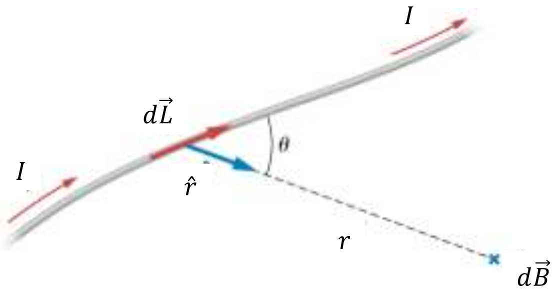
Hans Christian Oersted descobriu, em 1820, que se colocarmos uma bússola perto de uma corrente eléctrica a agulha sofre uma deflexão.

A experiência de Oersted mostrou que as correntes eléctricas (cargas com movimento orientado) produzem um campo magnético à sua volta.



Campo magnético criado por correntes elétricas:
Método 1 (através da Lei de Biot-Savart)

Jean-Baptiste Biot e Felix Savart verificam que se um fio condutor transporta uma corrente elétrica constante, o campo magnético $d\vec{B}$ criado num ponto P, associado a um elemento do condutor $d\vec{L}$, tem as seguintes características:



Lei de Biot-Savart

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{Id\vec{L} \times \hat{r}}{r^2}$$

μ_o- Permeabilidade magnética do vazio ≈$4\pi\times10^{-7}$ TmA^{-1}

O campo magnético total no ponto *P*, originado por um condutor de dimensões finitas será:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi}\int\frac{d\vec{L} \times \hat{r}}{r^2}$$

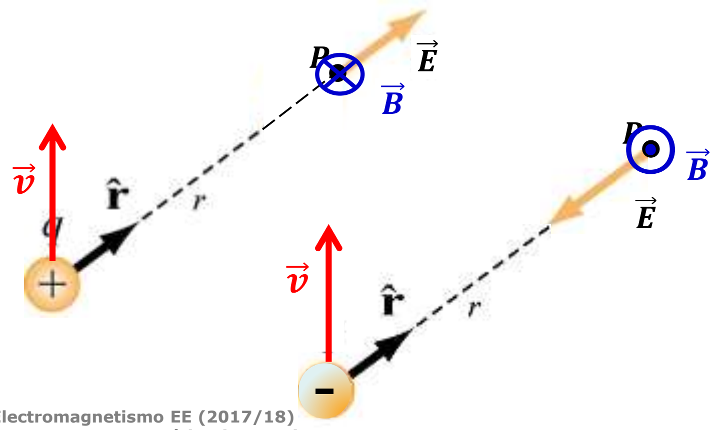
Electromagnetismo EE (2017/18)
Cap 6: Campo magnético (parte 2)

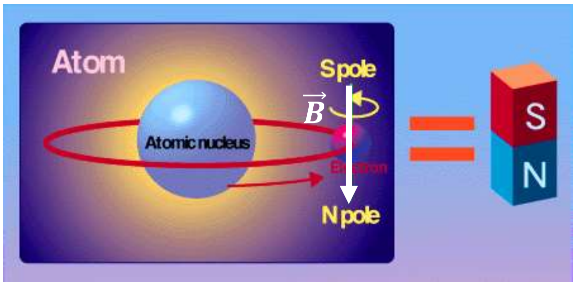
Uma carga elétrica em movimento, além de um campo elétrico, cria num ponto P um campo magnético dado por:

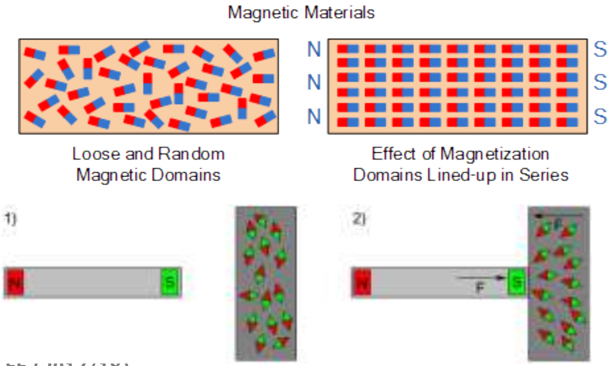
$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{q\vec{v}\times\hat{r}}{r^2}$$

Permeabilidade magnética do vazio

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\ \mathrm{T\cdot m/A} \approx 1.26 \times 10^{-6}\ \mathrm{T\cdot m/A}.$$







Lei de Biot-Savart *versus* lei de Coulomb

$$d\vec{B} = \frac{\mu_o}{4\pi}\frac{Id\vec{L}\times\hat{r}}{r^2} \qquad \vec{E}_P = k\frac{|q_1|}{r^2}\hat{r}_P$$

O elemento de corrente, $Id\vec{L}$, produz um campo magnético $d\vec{B}$. Uma carga pontual, q, em repouso, produz um campo elétrico $\vec{E}_P$.

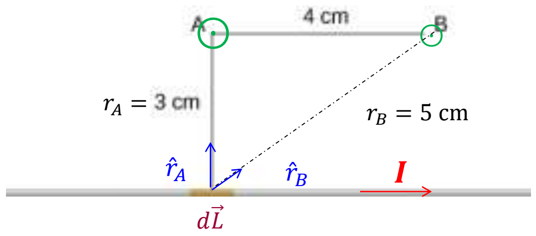
O campo magnético criado por um elemento de corrente é inversamente proporcional a r^2. O campo eléctrico criado por uma carga pontual é, também, inversamente proporcional a r^2 .

O campo eléctrico tem a direcção de *r*. O campo magnético é perpendicular a *r*.

No caso de cargas pontuais: $$\vec{B} = \frac{\mu_o}{4\pi}\frac{q\vec{v}\times\hat{r}}{r^2}$$

Checkpoint

Uma corrente de **I = 10 A** percorre um conductor linear (ver figura). Qual a magnitude, direção e sentido do campo magnético no ponto A e no ponto B, devido ao segmento amarelo de fio, com comprimento de **0.5 mm**?

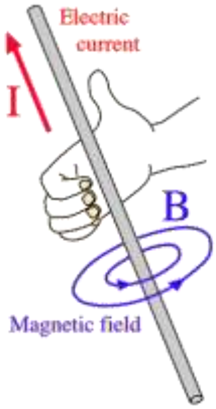


$$d\vec{B}(\mathrm{A}) = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{Id\vec{L}\times\hat{r}_A}{r_\mathrm{A}^2} \Rightarrow dB = 10^{-7}\times\frac{10\times 5\times 10^{-4}\times \sin 90\circ}{(3\times 10^{-2})^2} = 5.6\times 10^{-7}\ \mathrm{T}$$

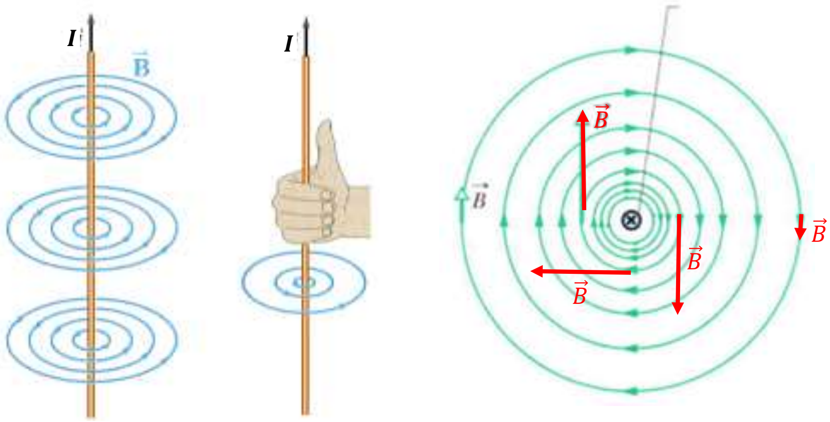
$$d\vec{B}(\mathrm{B}) = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{Id\vec{L}\times\hat{r}_B}{r_\mathrm{B}^2} \Rightarrow dB = 10^{-7}\times\frac{10\times 5\times 10^{-4}\times \sin 36.9\circ}{(5\times 10^{-2})^2} = 1.2\times 10^{-7}\ \mathrm{T}$$

Aplicação da lei de Biot-Savart a alguns casos particulares

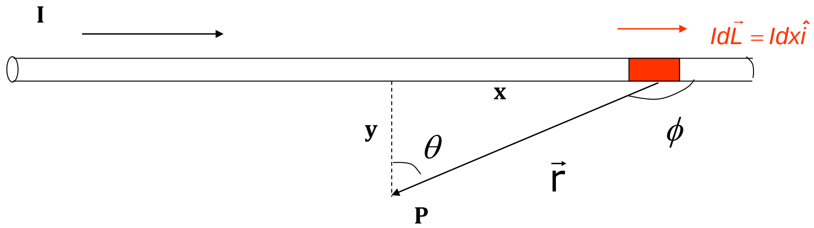
Campo magnético originado por um fio retilíneo comprido ("infinito")



Sentido das linhas de campo e do campo magnético.



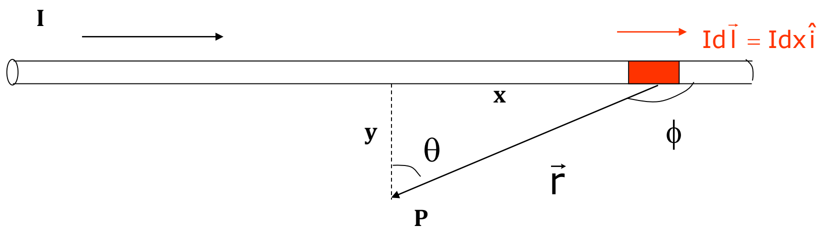
E qual a intensidade do Campo magnético originado por um fio retilíneo comprido?
Dedução:



Da lei de Biot-Savart $$d\vec{B} = \frac{\mu_o}{4\pi}\frac{Id\vec{L}\times\hat{r}}{r^2}$$

A intensidade do campo magnético no ponto **P** provocado pelo segmento dx percorrido pela corrente I.

$$dB = \frac{\mu_0 I dx}{4\pi r^2}\sin\phi = \frac{\mu_0 I dx}{4\pi r^2}\cos\theta$$

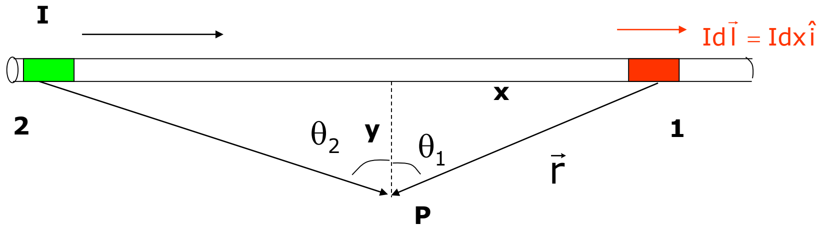


Em termos geométricos

$$x = y\,tg\theta \Rightarrow dx = y\sec^2\theta d\theta = y\frac{r^2}{y^2}d\theta = \frac{r^2}{y}d\theta$$

$$\Rightarrow dB = \frac{\mu_0 I dx}{4\pi r^2}\cos\theta = \frac{\mu_0 I}{4\pi r^2}\frac{r^2}{y}d\theta\cos\theta = \frac{\mu_0 I}{4\pi y}\cos\theta d\theta$$

Electromagnetismo EE (2017/18)
Cap 6: Campo magnético (parte 2)

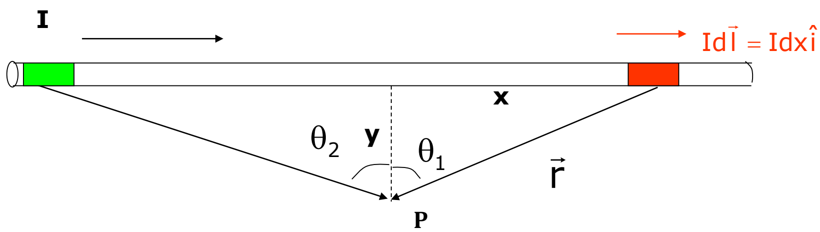


Contabilizando as contribuições de todos os elementos de condutor à direita da vertical de P ao condutor:

$$\vec{B} = \int_0^{\theta_1} \frac{\mu_0 I}{4\pi y} \cos\theta d\theta = \frac{\mu_0 I}{4\pi y} \sin\theta_1$$

Por raciocínio análogo para a parte esquerda do condutor retilíneo:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi y} \sin\theta_2$$



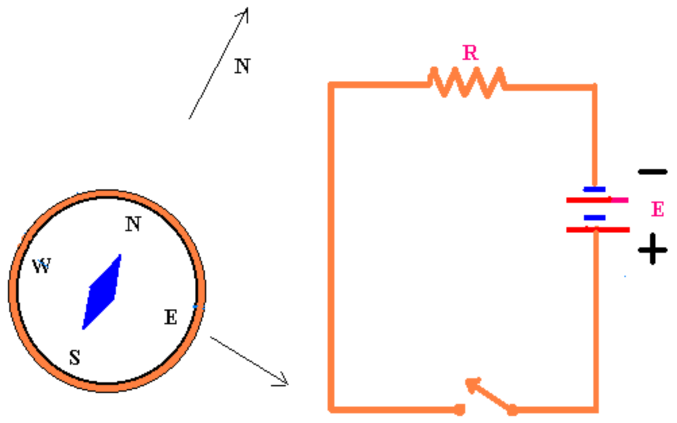
O Campo magnético total no ponto P devido à dimensão total do condutor será (substituindo y por **r**, que corresponde à distância perpendicular de P ao fio condutor):

$$\boxed{B = B_1 + B_2 = \frac{\mu_0 I}{4\pi r}\left(sen\theta_1 + sen\theta_2\right)}$$

Se o **fio for muito longo** ("<u>infinito</u>"): $\theta_1 \wedge \theta_2 \cong 90^o$

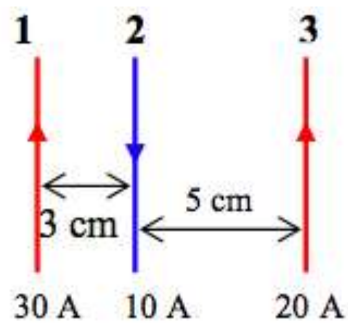
$$\boxed{B = \frac{\mu_o I}{2\pi r}}$$

Explicação da experiência de Oersted

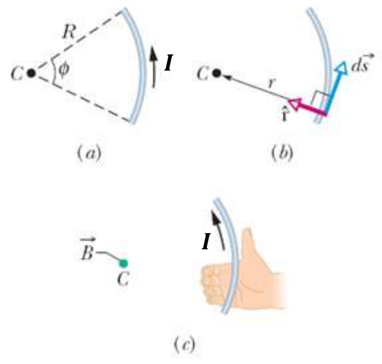


Checkpoint:

Considere os 3 fios longos representados na figura. Calcule o campo magnético a meio da distância entre os fios 2 e 3.



Campo magnético criado por um condutor curvilíneo (dedução)



$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{Id\vec{L}\times\hat{r}}{r^2}$$

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{Ids\sin\frac{\pi}{2}}{R^2} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{Ids}{R^2}$$

$$B = \int dB = \int_0^S \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{Ids}{R^2} = \int_0^\phi \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{IRd\phi}{R^2}$$

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi R}\int_0^\phi d\phi \qquad \boxed{B = \frac{\mu_0 I\phi}{4\pi R}}$$

Com ϕ em radianos

Campo magnético criado no centro de uma espira circular (dedução)

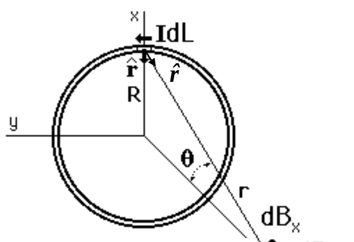
$$\phi = 2\pi$$

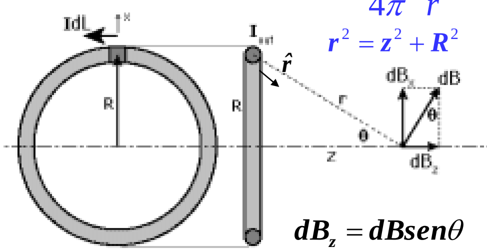
$$B = \frac{\mu_0 I 2\pi}{4\pi R} \qquad \boxed{B = \frac{\mu_0 I}{2R}}$$

Campo magnético sobre o eixo que passa pelo centro de uma espira circular (dedução)

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{IdL}{r^2}$$

$$r^2 = z^2 + R^2$$





A componente dB_x anula-se devido à simetria da espira. O campo resultante só tem componente B_z

$$dB_z = dB\,sen\theta$$

$$sen\theta = \frac{R}{\sqrt{R^2 + z^2}}$$

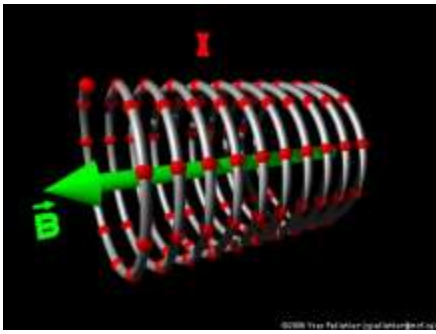
$$dB_z = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{IdL}{z^2+R^2}\frac{R}{\sqrt{z^2+R^2}} = \frac{\mu_0 IdL}{4\pi}\frac{R}{\left(z^2+R^2\right)^{3/2}}$$

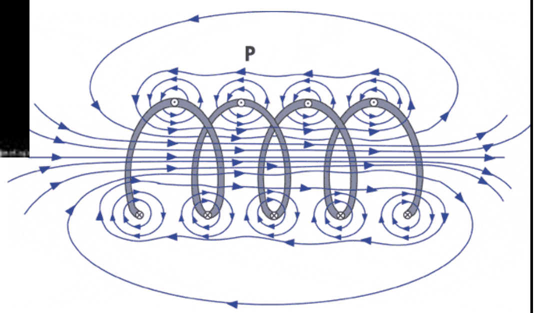
$$\boxed{B_z = \frac{\mu_0 I 2\pi}{4\pi}\frac{R^2}{\left(z^2+R^2\right)^{3/2}}}$$

Campo magnético no eixo da espira

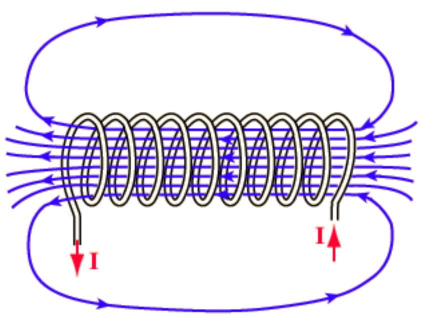
Campo magnético originado por um solenoide (dedução)

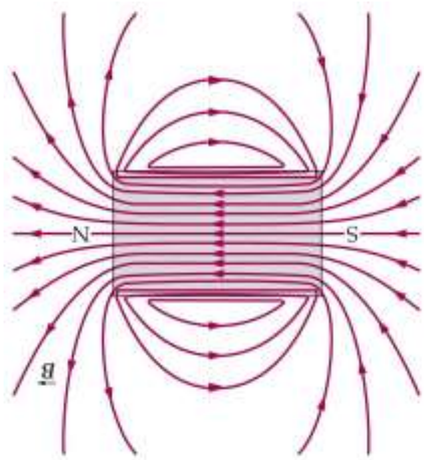
Um solenóide corresponde basicamente a uma série de espiras circulares colocadas lado a lado fortemente comprimidas (em forma de hélice). São dispositivos importantes no âmbito do electromagnetismo e usados para criar campos magnéticos fortes e uniformes (no interior do solenóide).



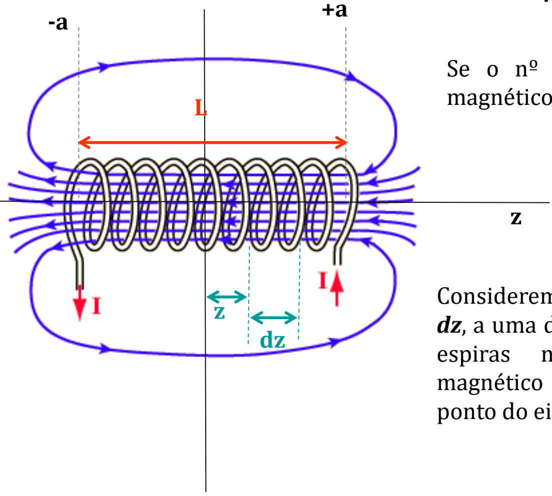


As linhas de campo magnético de um solenóide são idênticas às linhas de campo magnético de um magnete.





Consideremos um solenóide de comprimento L, com N espiras e percorrido por uma corrente I. O nº de espiras por unidade de comprimento é dado por:



$$n = \frac{N}{L}$$

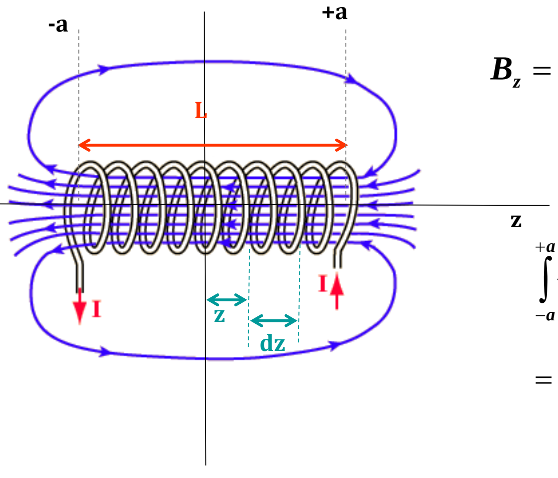
Se o nº de espiras fosse 1, o campo magnético ao longo do eixo seria:

$$B_z = \frac{\mu_0 I}{2} \frac{R^2}{\left(z^2 + R^2\right)^{3/2}}$$

Consideremos um elemento do solenóide ***dz***, a uma distância ***z*** da origem $\Rightarrow$ há ***ndz*** espiras nesse elemento. O campo magnético criado por esse elemento num ponto do eixo da espira será dado por:

$$dB_z = \frac{\mu_0 nIdz}{2} \frac{R^2}{\left(z^2 + R^2\right)^{3/2}}$$

O Campo magnético na origem, considerando a totalidade do solenóide será dado por:



$$B_z = \frac{\mu_0 nIR^2}{2} \int_{-a}^{+a} \frac{dz}{\left(z^2 + R^2\right)^{3/2}}$$

$$\int_{-a}^{+a} \frac{dz}{\left(z^2 + R^2\right)^{3/2}} = \left. \frac{z}{R^2\sqrt{z^2 + R^2}} \right|_{-a}^{+a}$$

$$= \frac{2a}{R^2\sqrt{a^2 + R^2}}$$

$$B_z = \mu_0 nI \frac{a}{\sqrt{a^2 + R^2}}$$

Se a >> R $\Rightarrow$ $\boxed{B_z \approx \mu_0 nI}$

Num equipamento de ressonância magnética (RM) um campo magnético intense é gerado por um solenoid. O paciente fica rodeado pelo enrolamento de fio que é percorrido por correntes elevadas que percorem fios supercondutores. O campo eletromagnético é usado para alterar o spin dos protões no corpo do paciente. O tempo que demora os protões demoram a alinhar os spin ou a relaxar depende dos tecidos biológicos a que pertencem. A imagem permite verificar se a estrutura dos tecidos está normal, ou não.

Resumo

Lei de Biot-Savart permite calcular o campo magnético criado por um fio condutor que transporta uma corrente eléctrica constante

$$d\vec{B} = \frac{\mu_o}{4\pi}\frac{Id\vec{s}\times\hat{r}}{r^2}$$

Campo magnético criado por um condutor rectilíneo longo

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

Campo magnético criado por um condutor curvilíneo

$$B = \frac{\mu_o I\phi}{4\pi R}$$

Campo magnético criado no centro de uma espira condutora circular

$$B = \frac{\mu_o I}{2R}$$

Campo magnético criado ao longo do eixo de uma espira condutora circular

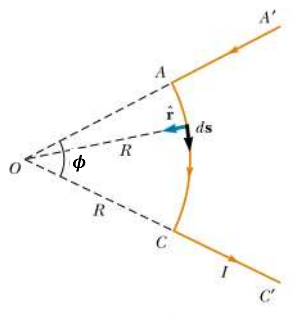
$$B_z = \frac{\mu_0 I}{2}\frac{R^2}{\left(z^2+R^2\right)^{3/2}}$$

Campo magnético criado no eixo de um solenoide:

$$B_z \approx \mu_0 n I$$

Checkpoint

Determinar a magnitude, a direcção e o sentido do campo magnético no ponto O, criado pela corrente que circula no fio A'C'.



B provocado pela porção AA':

$$\vec{\boldsymbol{B}} = \frac{\mu_0 I}{4\pi}\int_{A'}^{A}\frac{d\vec{\boldsymbol{L}}\times\hat{\boldsymbol{r}}}{r^2} \qquad d\vec{\boldsymbol{L}} \parallel \hat{\boldsymbol{r}} \qquad \Rightarrow B = 0$$

B provocado pela porção CC'

$$\vec{\boldsymbol{B}} = \frac{\mu_0 I}{4\pi}\int_{C}^{C'}\frac{d\vec{\boldsymbol{L}}\times\hat{\boldsymbol{r}}}{r^2} \qquad d\vec{\boldsymbol{L}} \parallel \hat{\boldsymbol{r}} \qquad \Rightarrow B = 0$$

B provocado pela porção AC

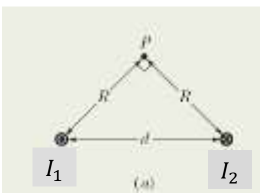
$$B = \frac{\mu_o I\phi}{4\pi R}$$

$O \otimes$ $\vec{\boldsymbol{B}}$

Sentido?

Checkpoint

Determinar o campo magnético (magnitude e sentido) no ponto P devido às correntes $I_1 = 15$ A e $I_2 = 32$ A, num fio longo separadas por uma distância $d = 5.3$ cm

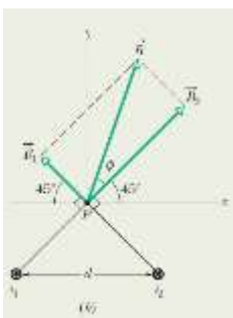


Magnitude de B devido a cada uma das correntes.

$$\boldsymbol{B_1} = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi R} = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi d\cos\frac{\pi}{4}} = 8.0\times10^{-5}\ \mathbf{T}$$

$$\boldsymbol{B_2} = \frac{\mu_0 I_2}{2\pi R} = \frac{\mu_0 I_2}{2\pi d\cos\frac{\pi}{4}} = 1.7\times10^{-4}\ \mathbf{T}$$

Mas quais os sentidos? $\boldsymbol{B} = \sqrt{B_1^2 + B_2^2} = 1.9\times10^{-4}\ \mathbf{T}$



$$\phi = \tan^{-1}\frac{B_1}{B_2} = \tan^{-1}\frac{I_1}{I_2} = 0.44\ \text{rad} = 25°$$

Ou

$$\vec{\boldsymbol{B}}_1 = -8.0\times10^{-5}\cos 45°\,\hat{\boldsymbol{\imath}} + 8.0\times10^{-5}\cos 45°\,\hat{\boldsymbol{\jmath}}$$

$$\vec{\boldsymbol{B}}_1 = -5.7\times10^{-5}\hat{\boldsymbol{\imath}} + 5.7\times10^{-5}\hat{\boldsymbol{\jmath}}\ \mathbf{T}$$

$$\vec{\boldsymbol{B}}_2 = 1.7\times10^{-4}\cos 45°\,\hat{\boldsymbol{\imath}} + 1.7\times10^{-4}\cos 45°\,\hat{\boldsymbol{\jmath}}$$

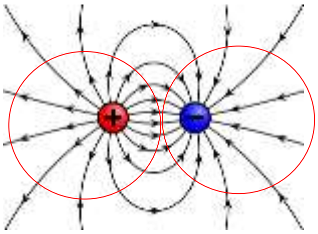
$$\vec{\boldsymbol{B}}_1 = 1.2\times10^{-4}\hat{\boldsymbol{\imath}} + 1.2\times10^{-4}\hat{\boldsymbol{\jmath}}\ \mathbf{T}$$

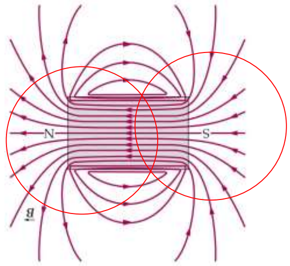
$$\vec{\boldsymbol{B}} = 6.3\times10^{-5}\hat{\boldsymbol{\imath}} + 1.8\times10^{-4}\hat{\boldsymbol{\jmath}}\ \mathbf{T}$$

Campo magnético criado por correntes elétricas:
Método 2 (através da Lei de Ampère)

Lei de Gauss do magnetismo

As linhas de campo magnético são linhas fechadas (as de campo elétrico começam e acabam em cargas).





Consequência?

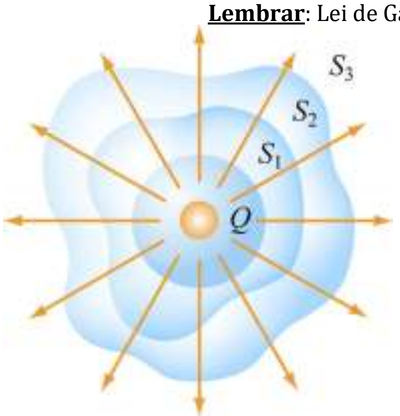
Em geral:

$$\boldsymbol{\phi_E = \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} \neq 0}$$

$$\boldsymbol{\phi_B = \oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0}$$

Lei de Ampère

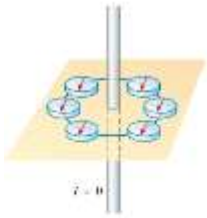
Lembrar: Lei de Gauss do campo elétrico:

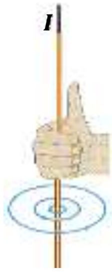


$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{q_{\text{int}}}{\varepsilon_0}$$

O fluxo total do campo elétrico através das superficies fechadas depende da carga no interior da superfície

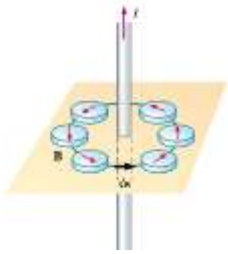
Veja-se esta situação trivial:





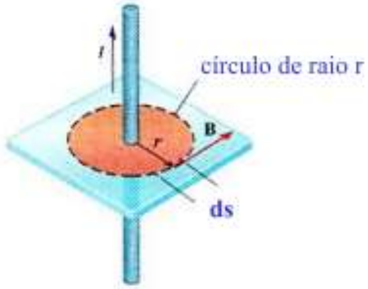
$$B \propto I$$

$$B \propto \frac{1}{r}$$



- As linhas de campo magnético são concêntricas ao fio e encontram-se num plano perpendicular ao fio
- A magnitude do campo magnético é constante em qualquer ponto de uma circunferência que esteja centrada no fio
- A direcção do campo magnético é tangente em cada ponto à linha de campo magnético (circunferência)

Calcule-se o produto $\vec{B} \cdot d\vec{s}$ sobre uma curva circular centrada num fio condutor longo que transporta uma corrente *I*:



Em todos os pontos da curva, o campo magnético é tangente à curva, assim:

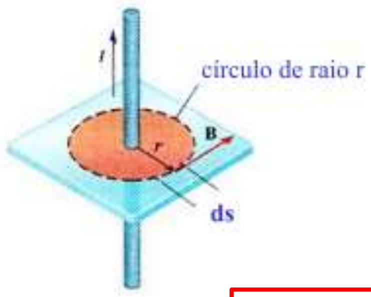
$$\boldsymbol{d\vec{s} \parallel \vec{B} \Rightarrow \vec{B} \cdot d\vec{s} = B \cdot ds} \cdot \cos \boldsymbol{0 = B \cdot ds}$$

Como vimos atrás (pela lei de Biot-Savart) a magnitude do campo magnético, em qualquer ponto da circunferência é constante e é dado por:

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

Então:
$$\boldsymbol{\vec{B} \cdot d\vec{s} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \cdot ds}$$

$$\vec{B}\cdot d\vec{s} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}\cdot ds$$



Integrando ao longo da circunferência:

$$\oint \vec{B}\cdot d\vec{s} = \underbrace{B}_{\frac{\mu_0 I}{2\pi r}} \underbrace{\oint ds}_{2\pi r} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}\cdot 2\pi r$$

$$\boxed{B\oint ds = \mu_0 I}$$

Lei de Ampère

I – corrente que atravessa uma superfície no interior de uma linha fechada (*neste caso o círculo limitado pela linha de campo circular*)

Andre-Marie Ampère
(1775– 1836)

O resultado pode ser aplicado ao caso geral de uma curva fechada arbitrária atravessada por uma corrente constante:

$$B\oint ds = \mu_0 I_{inc}$$

Corrente que passa pela área limitada pela linha fechada.

Componente tangencial de B, somada sobre a linha fechada.

Tal como a lei de Gauss, a Lei de Ampère é sempre válida para qualquer curva fechada, e é útil em algumas situações particulares: situações envolvendo correntes com simetria elevada.

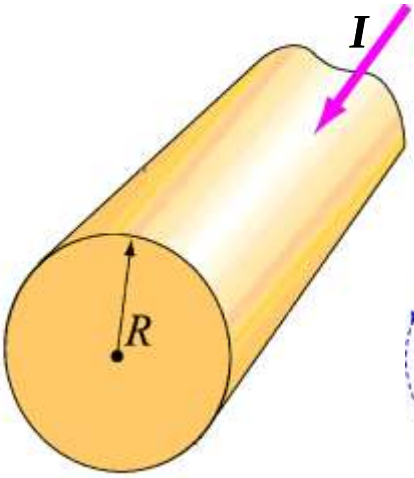
Aplicar a lei de Ampère

1. Identificar regiões em que se pretende calcular B. O sentido é dado pela regra da mão direita
2. Escolher a linha fechada (linha amperiana) em que B é nulo ou constante
3. Calcular $\oint \vec{B} \cdot d\vec{s}$
4. Calcular a corrente elétrica que passa através da superfície delimitada pela linha fechada
5. Aplicar a lei de Ampère para calcular B

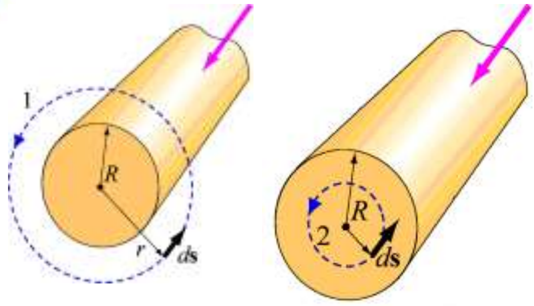
$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 I_{inc}$$

Exemplo 1: Fio retilíneo "infinito" (fio muito longo)

Um conductor cilíndrico com raio R e uma corrente I constante homogénea (J = constante). Calcular B originado pela corrente neste conductor em qualquer ponto

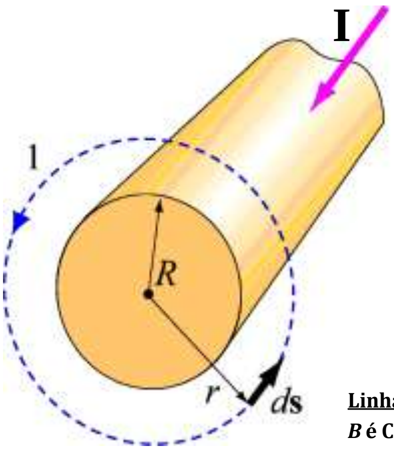


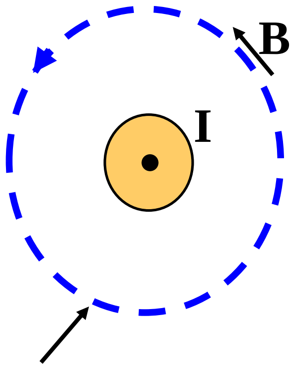
Calculemos em 2 regiões:
(1) Exterior ao fio (r ≥ R)
(2) No interior do fio (r < R)



Região 1: exterior ao fio (r ≥ R)

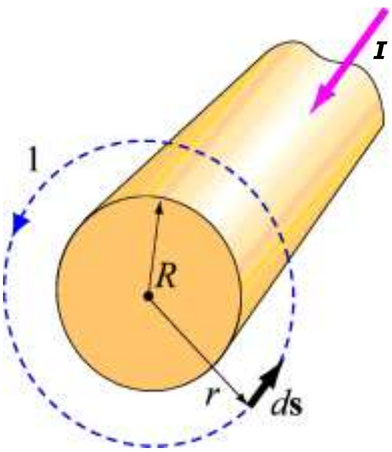
Simetria cilíndrica → circunferência amperiana.
$\vec{B}$ com sentido anti-horário ou direto.





Linha amperiana:
B **é Constante e Paralelo ao plano da linha fechada.**
I **atravessa o plano delimitado pela linha amperiana**

Região 1: exterior ao fio (r ≥ R)



$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 I_{inc}$$

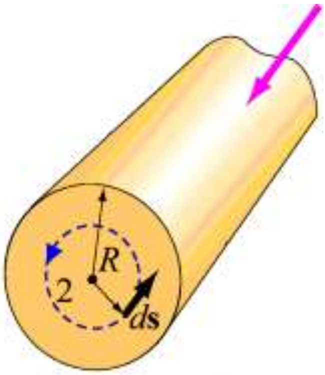
$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = B \oint ds = B(2\pi r)$$

$$B(2\pi r) = \mu_0 I_{inc} = \mu_0 I$$

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

Sentido anti-horário

Região 2: no interior do fio (r < R)



$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 I_{inc}$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = B \oint ds = B(2\pi r)$$

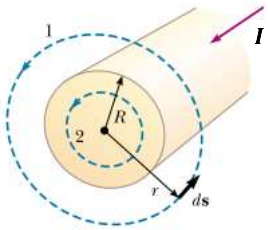
$$B(2\pi r) = \mu_0 I_{inc} \qquad B = \frac{\mu_0 I_{inc}}{2\pi r}$$

$$I_{inc} = I \frac{\pi r^2}{\pi R^2} = I \frac{r^2}{R^2}$$

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

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

Sentido anti-horário



Região 1: exterior ao fio (r ≥ R)

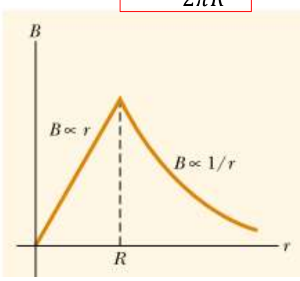
$$\boxed{B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}}$$

Sentido anti-horário

Região 2: no interior do fio (r < R)

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

Sentido anti-horário



Exemplo 2: Condutor num enrolamento toroidal

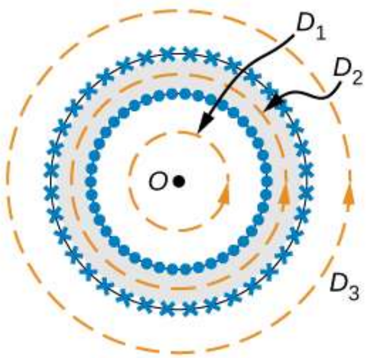
Um conductor enrolado toroidalmente é percorrido por uma corrente I constante homogénea (J = constante). Calcular B originado pela corrente neste conductor em qualquer ponto

Calculemos em 3 regiões:

(1) Na zona interna do enrolamento toroidal (D_1)

(2) No interior do toroide (D_2)

(3) Na zona externa do enrolamento toroidal (D_1)



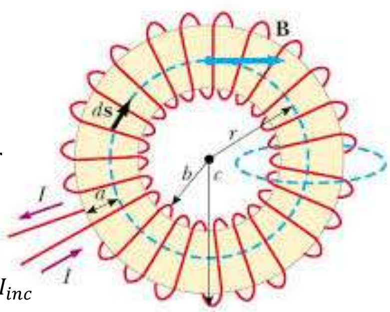
No interior do toróide (D_2)

No toróide ("donut") estão ***N*** voltas de fio percorrido pela corrente ***I***.

O campo magnético na circunferência no interior do toróide calculado por aplicação da lei de Ampère

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = B \oint ds = B(2\pi r)$$

$$B(2\pi r) = \mu_0 I_{inc}$$



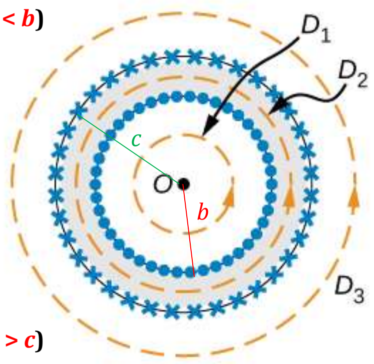
A corrente total entre que atravessa qualquer circunferência concêntrica à azul, mas com **b < r < c** (no interior do toróide é : $I_{inc} = NI$

$$B 2\pi r = \mu_0 I_{inc} = \mu_0 NI \qquad \boxed{B = \frac{\mu_0 NI}{2\pi r}}$$

Consequências:

No interior do toróide (b < r < c) – A magnitude do campo magnético diminui com aumento de r. Mas se $c\text{-}b << r$, **B** é ~constante

Na zona interna do enrolamento toroidal (D_1 – $r < b$)



A corrente total entre que atravessa qualquer circunferência concêntrica à D_1 mas com $\boldsymbol{r < b}$ ***é nula***: $\boldsymbol{I_{inc} = 0}$

$$B = \frac{\mu_0 0}{2\pi r} \quad \Rightarrow B = 0$$

Na zona externa do enrolamento toroidal (D_3 – $r > c$)

A corrente total entre que atravessa qualquer circunferência concêntrica à D_3 mas com ***r >c é nula***: $\boldsymbol{I_{inc} = 0}$**, porque metade das 2N correntes tem sentido para fora deste plano e a outra metade tem sentido para dentro deste plano**

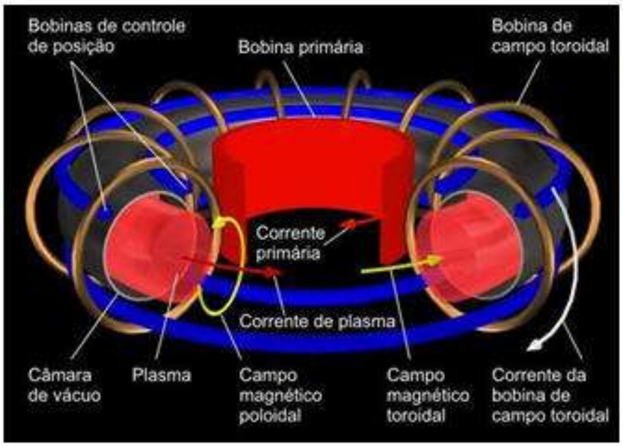
$$B = \frac{\mu_0 (NI - NI)}{2\pi r} \quad \Rightarrow B = 0$$

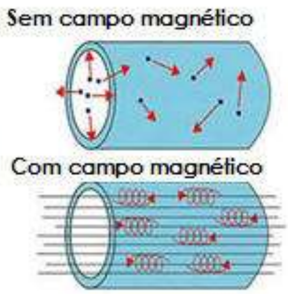
Confinamento das cargas

Tokamak – reactor experimental de fusão nuclear

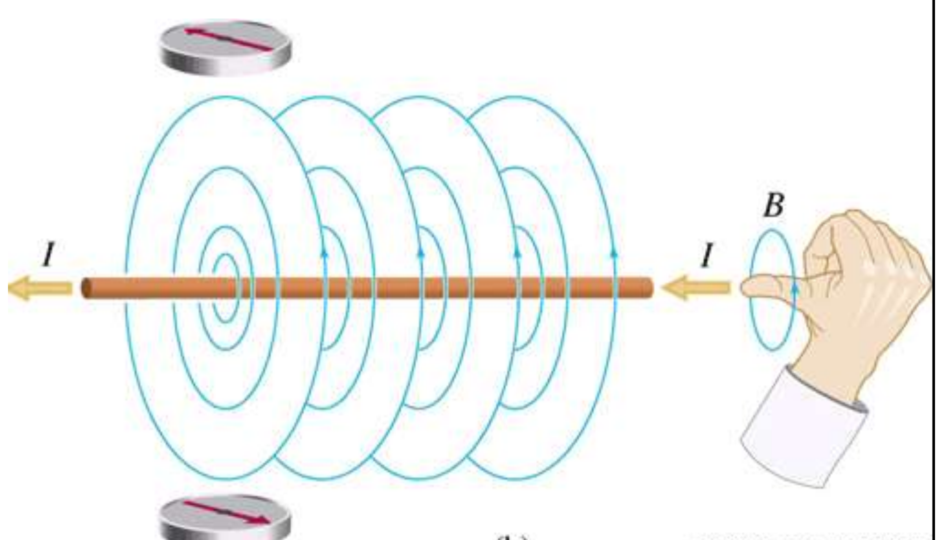
Contém cerca de 10 km de enrolamento de cobre (arrefecido a água), com corrente pulsada, que pode atingir picos de 73 000 A, produzindo campos magnéticos de 5.2 T durante 3 s.

Os campos magnéticos produzidos confinam as partículas carregadas.



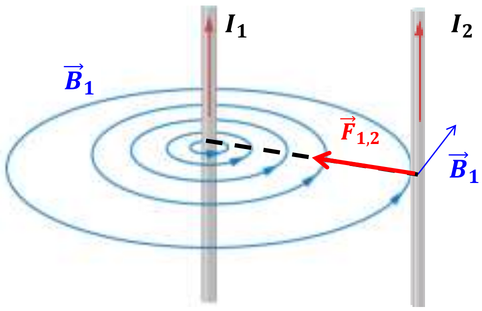


Já sabemos que:



(b)

Quais as consequências de colocar um fio condutor, com uma corrente elétrica I_2, a uma distância d paralelamente a outro fio condutor com corrente elétrica I_1?



O segundo fio condutor fica sob a ação do campo magnético criado pelo primeiro fio. Que é que isso provoca?

A força magnética atua num fio com uma corrente:

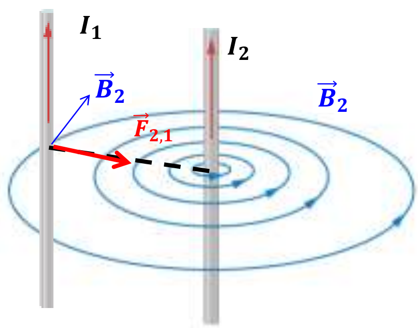
$$\vec{F}_{1,2} = I_2 \vec{L} \times \vec{B}_1$$

$$F_{1,2} = I_2 L B_1 \sin 90°$$

$$F_{1,2} = I_2 L \frac{\mu_0 I_1}{2\pi d}$$

Fio 2 é puxado para o fio 1

Por outro lado o fio com uma corrente elétrica I_2, também origina um campo magnético em torno de si B_2?



Agor o primeiro fio condutor fica sob a ação do campo magnético criado pelo segundo fio.

A força magnética atua num fio com uma corrente:

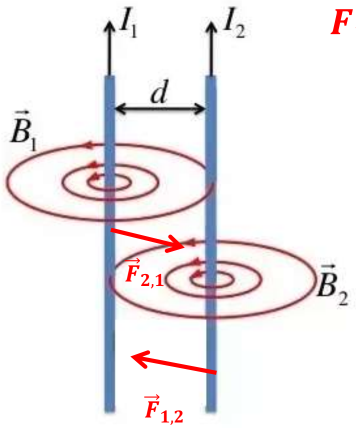
$$\vec{F}_{2,1} = I_1 \vec{L} \times \vec{B}_2$$

$$F_{2,1} = I_1 L B_2 \sin 90°$$

$$F_{2,1} = I_1 L \frac{\mu_0 I_2}{2\pi d}$$

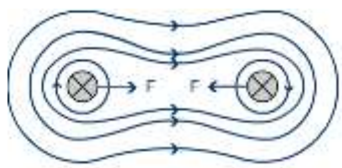
Fio 1 é puxado para o fio 2

$$F_{1,2} = I_2 L \frac{\mu_0 I_1}{2\pi d} \qquad F_{2,1} = I_1 L \frac{\mu_0 I_2}{2\pi d}$$



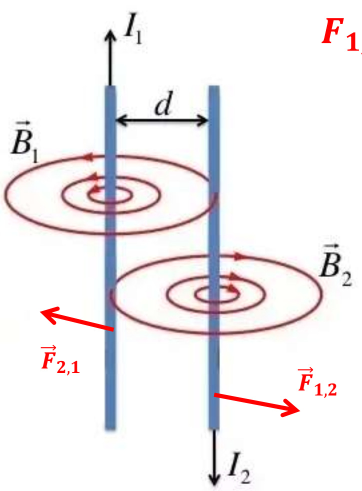
$$F_{1,2} = F_{2,1} = \frac{\mu_0 L I_1 I_2}{2\pi d}$$

As forças magnéticas entre dois fios paralelos que transportem corrente no mesmo sentido são atrativas



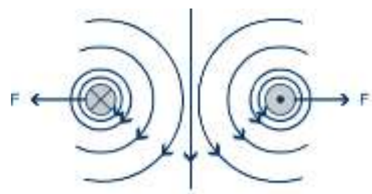
E se as correntes tiverem sentidos opostos?

$$F_{1,2} = I_2 L \frac{\mu_0 I_1}{2\pi d} \qquad F_{2,1} = I_1 L \frac{\mu_0 I_2}{2\pi d}$$



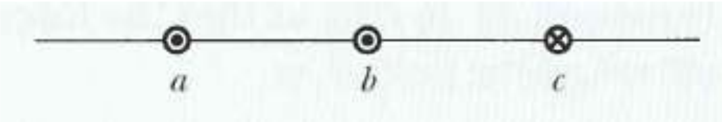
$$F_{1,2} = F_{2,1} = \frac{\mu_0 L I_1 I_2}{2\pi d}$$

As forças magnéticas entre dois fios paralelos que transportem corrente com sentidos opostos são repulsivas



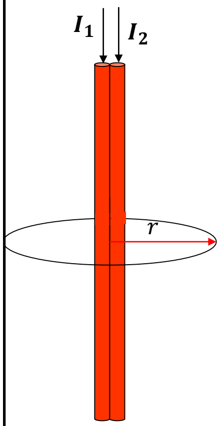
Checkpoint

A figura representa 3 fios longos paralelos e equidistantes percorridos por correntes elétricas idênticas com sentidos para fora (a e b) e para dentro da folha (c). Ordene os fios por ordem decrescente de magnitude da força magnética resultante, devido às correntes dos outros dois fios.



Checkpoint

Calcular o campo magnético em qualquer ponto r suficientemente afastado dos fios, sabendo que (r = 2 m) :



I_1**=10 A** I_2**=25 A**

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = B \oint ds = B(2\pi r)$$

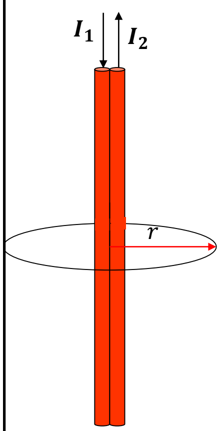
$$B = \frac{\mu_0 I_c}{2\pi r} \qquad I_c = 35 \text{ A} \downarrow$$

$$B = \frac{4\pi\times 10^{-7}\times 35}{2\pi\times 2} = 35\times 10^{-7}\text{ T}$$

Sentido horário

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

Checkpoint



Calcular o campo magnético em qualquer ponto r suficientemente afastado dos fios, sabendo que (r = 2 m) :

$\boldsymbol{I_1}$**=10 A** $\boldsymbol{I_2}$**=25 A**

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = B \oint ds = B(2\pi r)$$

$$B = \frac{\mu_0 I_c}{2\pi r} \qquad I_c = 15 \text{ A} \uparrow$$

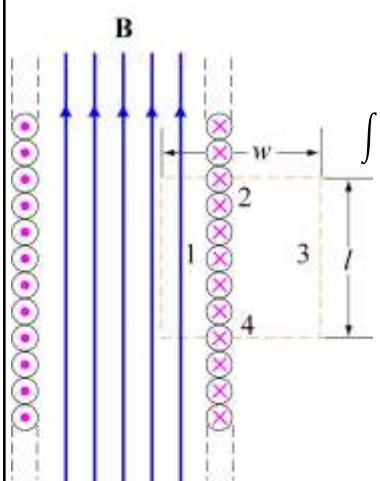
$$B = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 15}{2\pi \times 2} = 15 \times 10^{-7} \text{ T}$$

Sentido anti-horário

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

Checkpoint

Calcular o campo magnético no interior do solenoide :



$$\begin{cases} \vec{\boldsymbol{B}} \perp \boldsymbol{d\vec{s}} & \textbf{Lados 2 e 4} \\ \vec{\boldsymbol{B}} \approx \vec{\boldsymbol{0}} & \textbf{Lado 3} \end{cases}$$

$$\int \vec{B} \cdot d\vec{s} = \int_1 \vec{B} \cdot d\vec{s} + \int_2 \vec{B} \cdot d\vec{s} + \int_3 \vec{B} \cdot d\vec{s} + \int_4 \vec{B} \cdot d\vec{s}$$

$$\int \vec{B} \cdot d\vec{s} = Bl + 0 + 0 + 0$$

$$I_c = \frac{N}{l} lI = nlI$$

$$\int \vec{B} \cdot d\vec{s} = Bl = \mu_0 I_c$$

$$Bl = \mu_0 nlI$$

$$B = \mu_0 nI$$

Electromagnetes

Um electromagnete consiste num “núcleo” de Ferro (permeabilidade magnética elevada) colocado no interior de um enrolamento de fio (por exemplo um solenóide). O Campo Magnnético no núcleo é superior ao que seria sem núcleo de Ferro e é proporciona ao nº de espiras do enrolamento.