Grupo de Supercondutividade e Magnetismo

Fontes de campo magnético

Prof. Dr. Maycon Motta

São Carlos-SP, Brasil, 2016

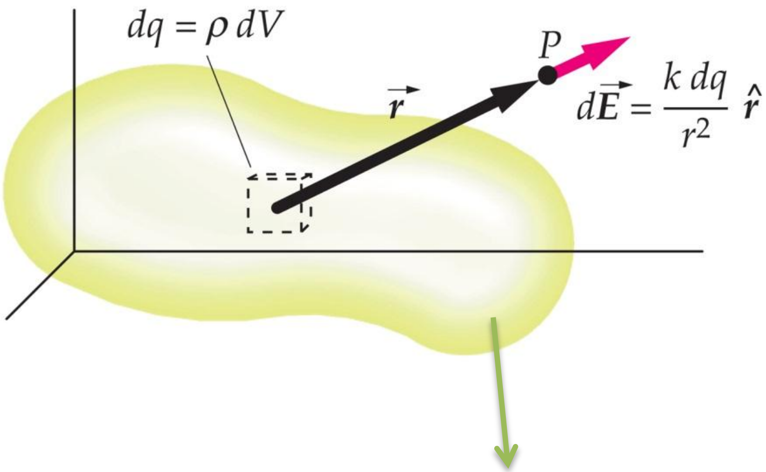
Até agora...

- Efeitos de $\vec{B}$ sobre partículas carregadas através de $\overrightarrow{F_B}$;
- Campos cruzados;
- Efeito Hall;
- Força sobre fios conduzindo corrente.

Fontes de $\vec{B}$ → Corrente gera $\vec{B}$ → Experimento de Oersted

Cálculo do campo elétrico...

Casos de baixa simetria



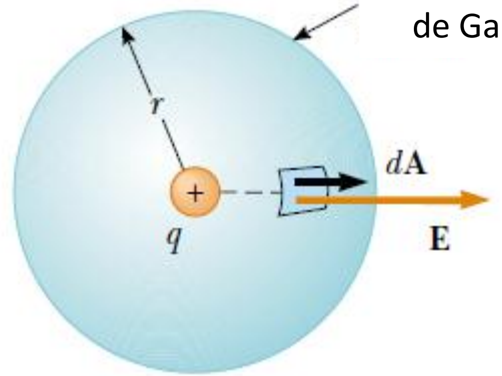
Distribuição de carga

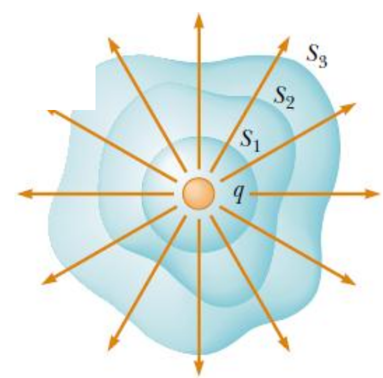
Baseado na Lei de Coulomb

$$\boxed{\vec{E} = k \int \frac{dq}{r^2}\hat{r}}$$

Casos de alta simetria

S – Superfície de Gauss





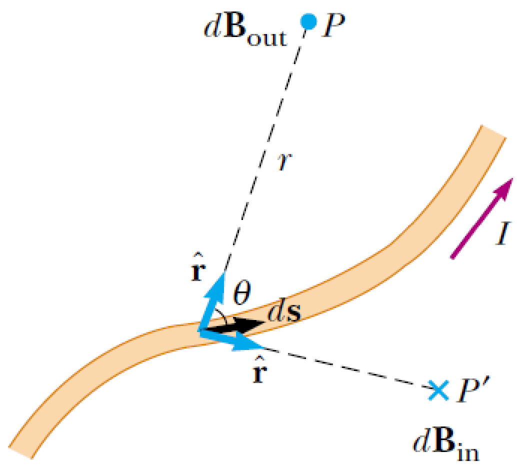
Lei de Gauss

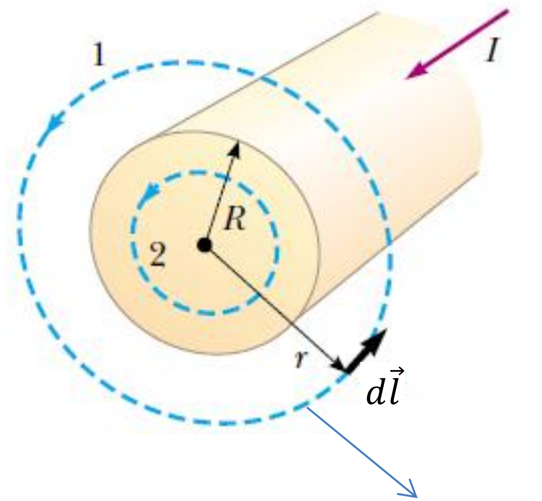
$$\boxed{\oint_S \vec{E}.\hat{n}da = \frac{q_{env}}{\varepsilon_0}}$$

E para o caso magnético?

Casos de baixa simetria

Casos de alta simetria





Lei de Biot-Savart

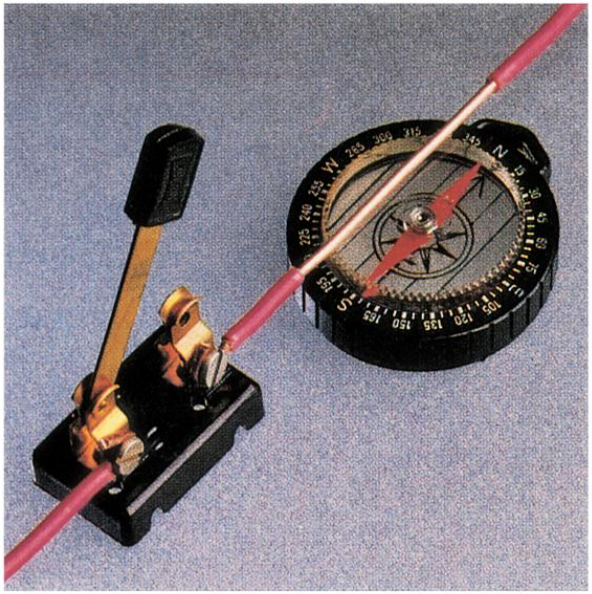
$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{d\vec{l} \times \hat{r}}{r^2}$$

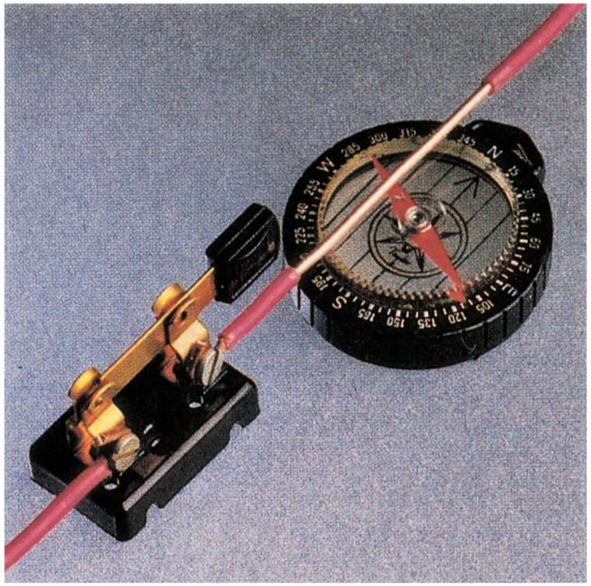
Lei de Ampère

$$\oint_C \vec{B}.d\vec{l} = \mu_0 I$$

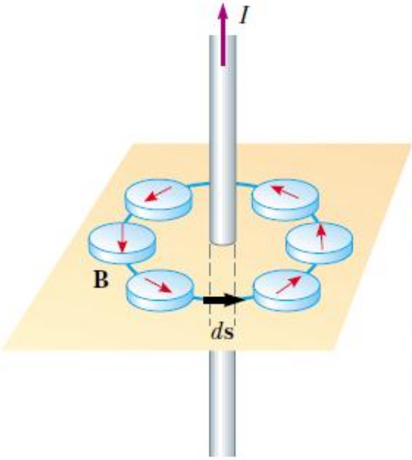
Em muitos livros: $d\vec{l} = d\vec{s}$

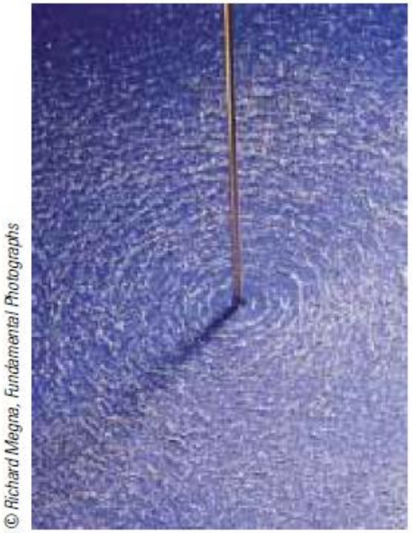
Experimento de Ørsted (1819)





Relacionou a eletricidade e o magnetismo.

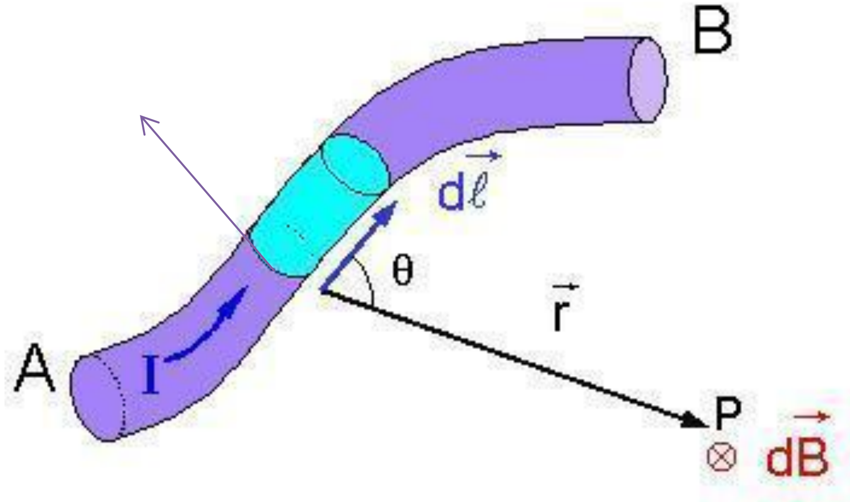




Lei de Biot-Savart

Medidas quantitativas da força exercida por uma corrente elétrica sobre a agulha de uma bússola.

$i d\vec{l}$ → elemento de corrente



- $d\vec{B} \perp d\vec{l}$
- $d\vec{B} \perp \hat{r}$ → $\hat{r} = \frac{\vec{r}}{r}$
- $|d\vec{B}| \propto \frac{1}{r^2}$
- $|d\vec{B}| \propto i$ $\theta = \sphericalangle$ entre $d\vec{l}$ e $\hat{r}$
- $|d\vec{B}| \propto \mathrm{sen}(\theta)$

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

Integral sobre a distribuição de corrente

Similar a $\vec{E}$

Constantes μ_0 e ε_0

A constante de permeabilidade magnética no vácuo é igual a:

$$\boxed{\mu_0 = 4\pi . 10^{-7} \frac{N}{A^2}}$$

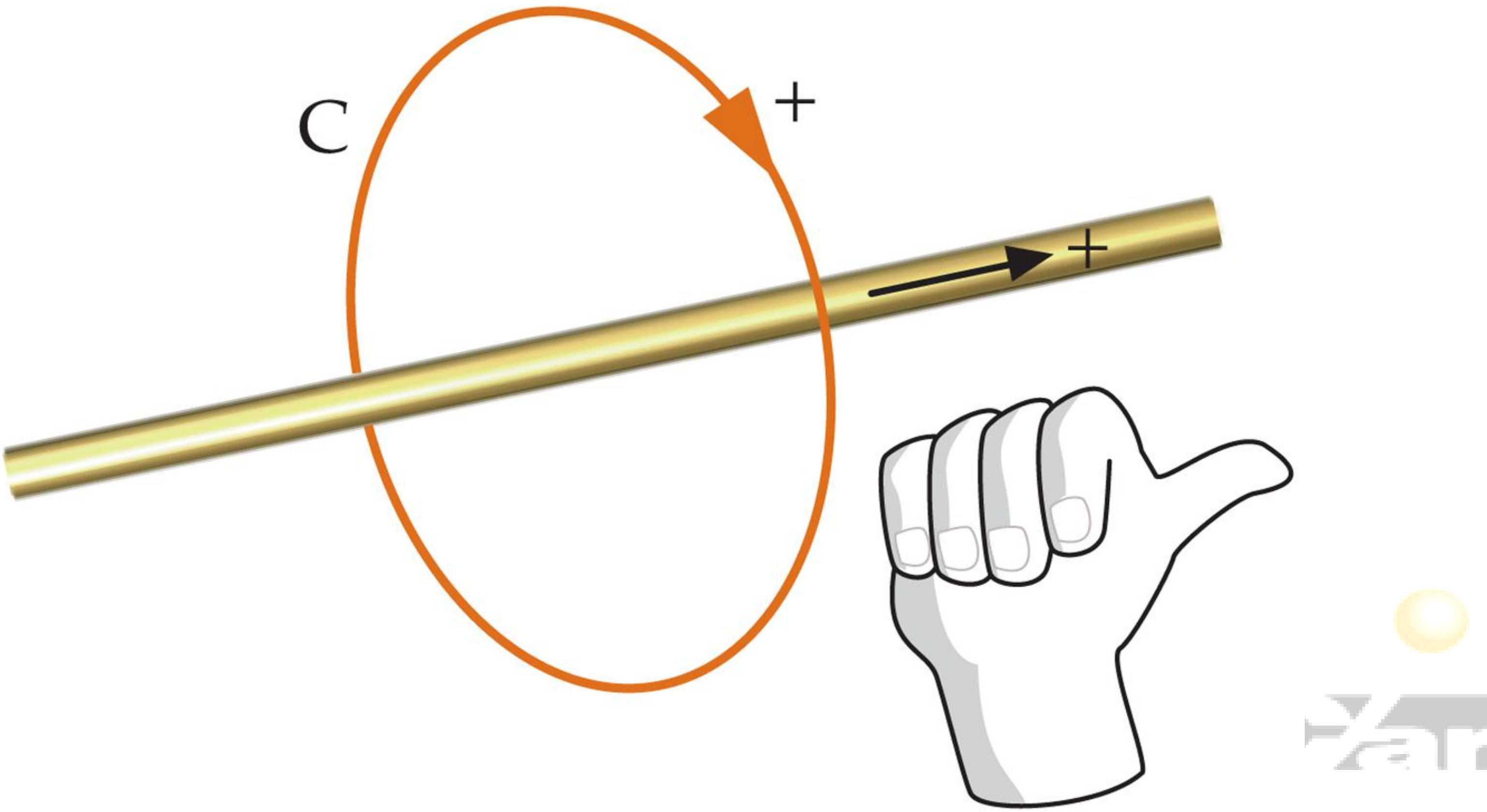
Relembrando que a constante de permissividade elétrica vale:

$$\boxed{\varepsilon_0 = 8{,}85 . 10^{-12} \frac{C^2}{N . m^2}}$$

Das Equações de Maxwell surge a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas dada por:

$$\boxed{c = \sqrt{\frac{1}{\mu_0 . \varepsilon_0}} = 3 . 10^8 \frac{m}{s}}$$

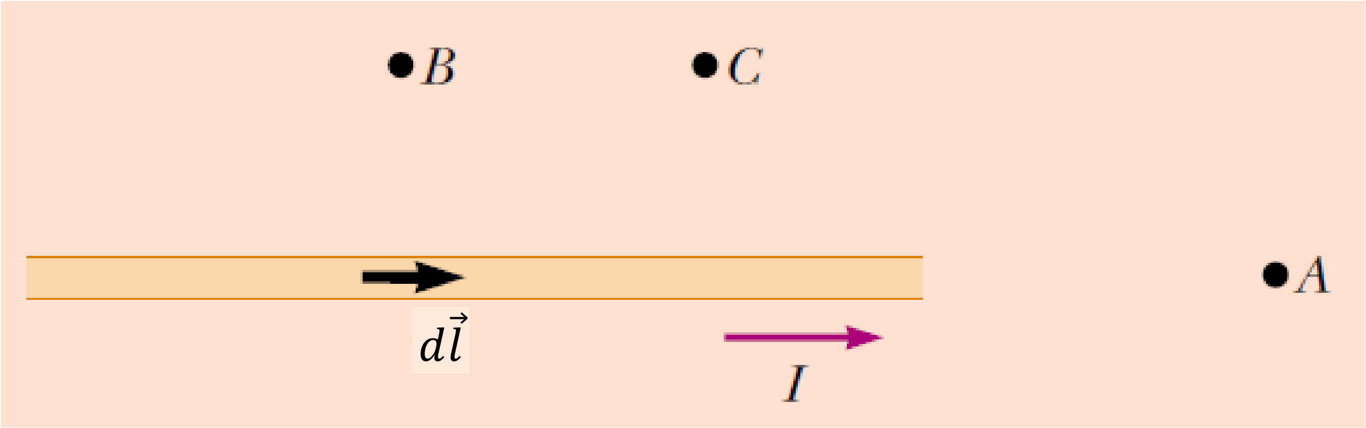
Exemplo 1



Regra da mão direita

Desafio 1

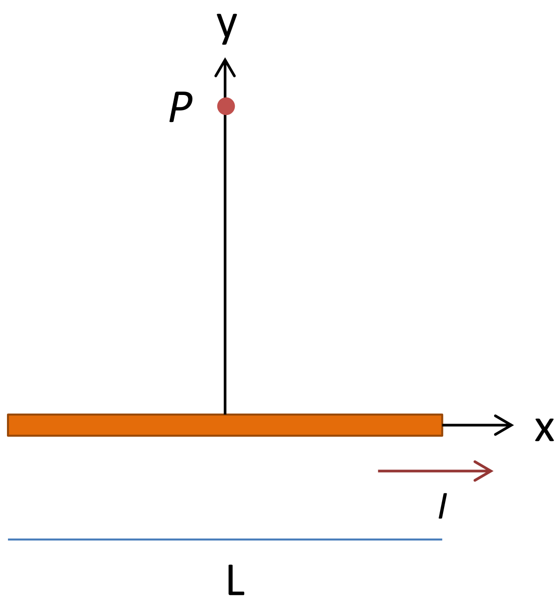
Considere a corrente ao longo de um fio reto, como mostrado abaixo. Classifique, do maior para o menor, os pontos A, B e C em termos da magnitude do campo magnético devido a uma corrente transportada pelo fio.

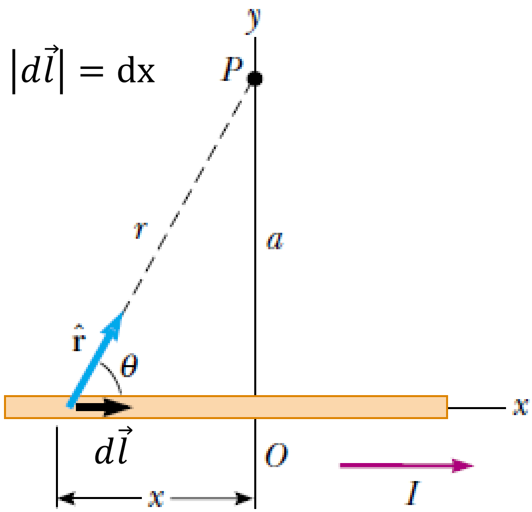


R: B > C > A

Exemplo 1

Considere um fio reto e fino de comprimento L transporta uma corrente I colocado no eixo x como mostrado na figura. Determine a magnitude, a direção e o sentido do campo magnético no ponto P devido a essa corrente.





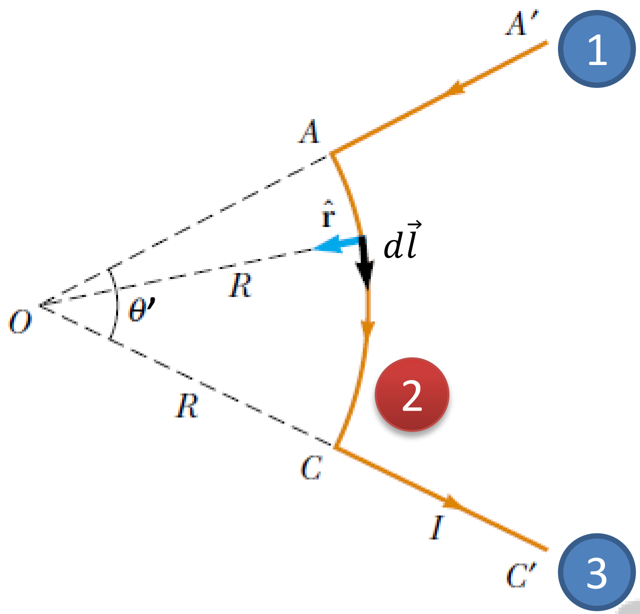
$$\boxed{B = \frac{\mu_0 I L}{2\pi y (L^2 + 4y^2)^{1/2}}}$$

Direção: perpendicular a esse plano

Sentido: saindo na folha

Exemplo 2

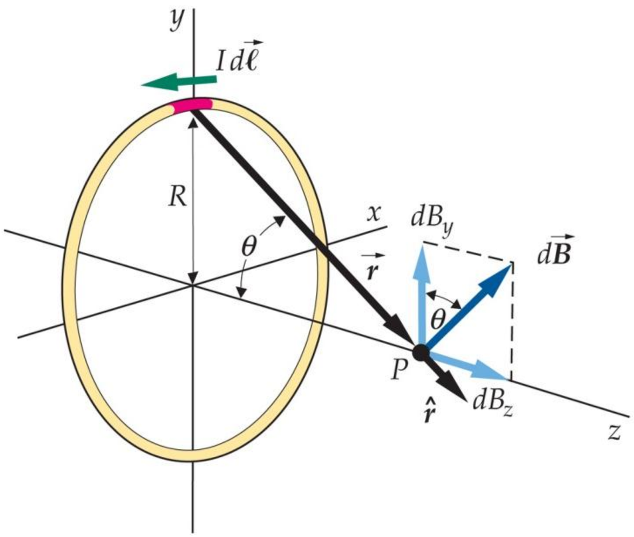
Um fio consiste de dois segmentos retos e um arco de círculo de raio R e angulo θ, que transporta uma corrente I cujo sentido é dado pela figura abaixo. Calcule o campo magnético $\vec{B}$ (módulo, direção e sentido) no ponto O devido a esse segmento de fio.



$$\boxed{B = \frac{\mu_0 I}{4\pi R}\theta'}$$

Direção: perpendicular a esse plano
Sentido: entrando na folha

Exemplo 3

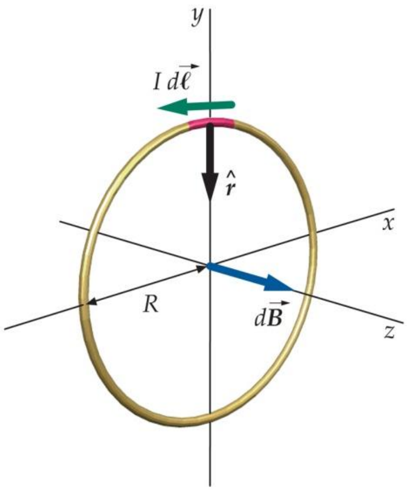


Uma espira de raio R está localizada no plano xy, como mostra a figura abaixo. Calcule o campo magnético $\vec{B}$ no ponto P a uma distância x de seu centro.

$$\boxed{B = \frac{\mu_0 I}{2} \cdot \frac{R^2}{(z^2 + R^2)^{3/2}}}$$

Qual é o campo magnético se $z \rightarrow 0$?

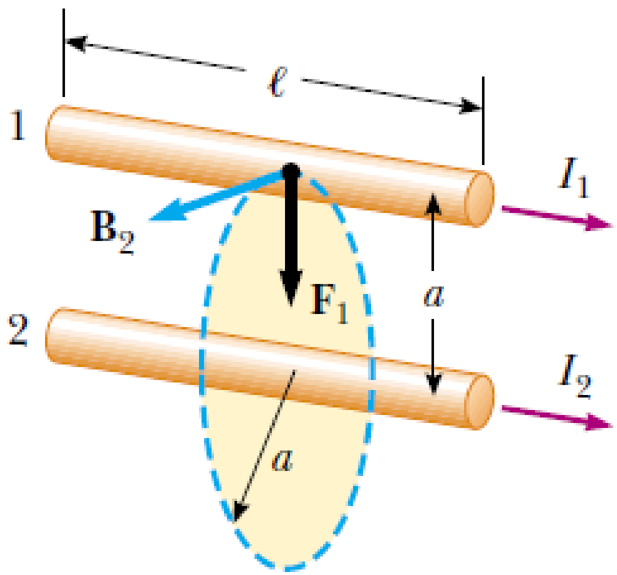
$$\boxed{B = \frac{\mu_0 I}{2R}}$$



E se $z \gg R$, qual é o valor do campo magnético?

$$\boxed{B \approx \frac{\mu_0 I R^2}{2z^3}}$$

Força magnética entre dois fios paralelos



$$\boxed{\overrightarrow{F_{12}} = I_1\vec{L} \times \overrightarrow{B_2}}$$

$$\boxed{\frac{F_{12}}{L} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi a}}$$

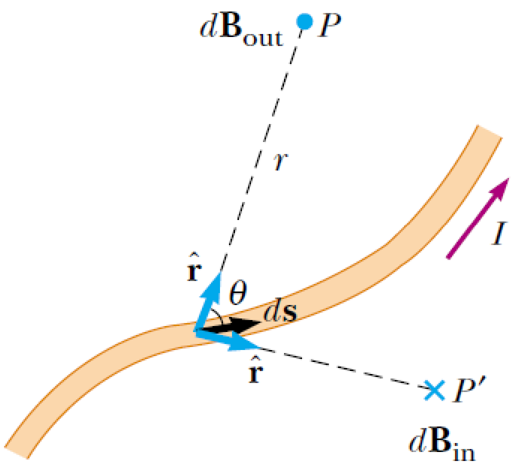
$$\boxed{B_2 = \frac{\mu_0 I_2}{2\pi a}}$$

Correntes paralelas se atraem; antiparalelas se repelem.

Definição de Ampére: Um ampere corresponde a uma corrente elétrica constante que passa por dois fios retos paralelos, de comprimento infinito e seção reta desprezível, situados no vácuo e afastados 1 metro um do outro, a qual produz uma força entre os mesmos de 2 x 10^{-7} N/m (0,0000002 newtons por metro)

Cálculo de $\vec{B}$

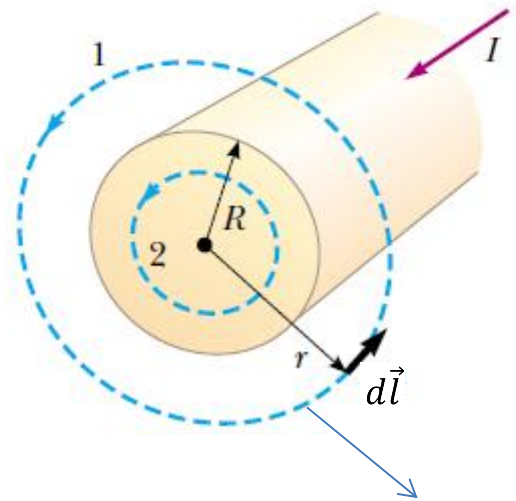
Casos de baixa simetria



Lei de Biot-Savart

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

Casos de alta simetria



Lei de Ampère

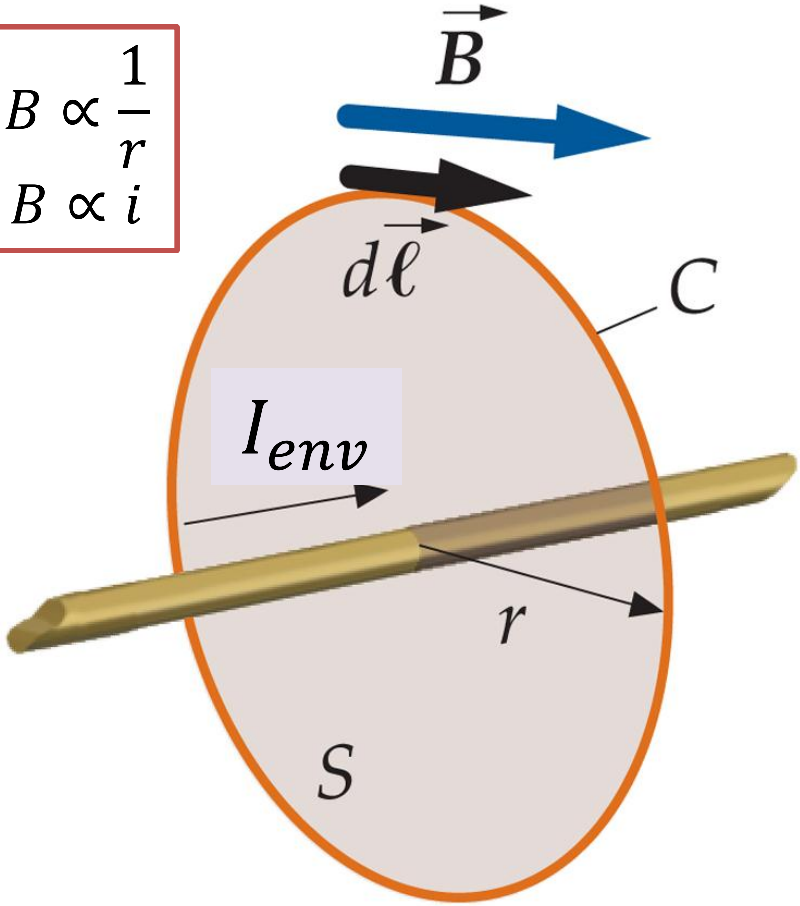
$$\boxed{\oint_C \vec{B}.d\vec{l} = \mu_0 I}$$

Em muitos livros: $d\vec{l} = d\vec{s}$

Lei de Ampère

Casos de alta simetria

$$\boxed{\begin{array}{c} B \propto \dfrac{1}{r} \\ B \propto i \end{array}}$$



$$\boxed{\oint_C \vec{B}.d\vec{l} = \mu_0 I_{env}}$$

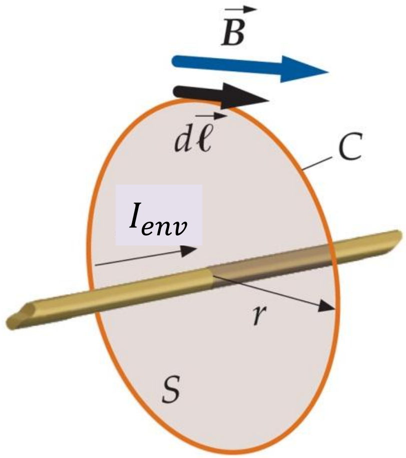
Incógnita

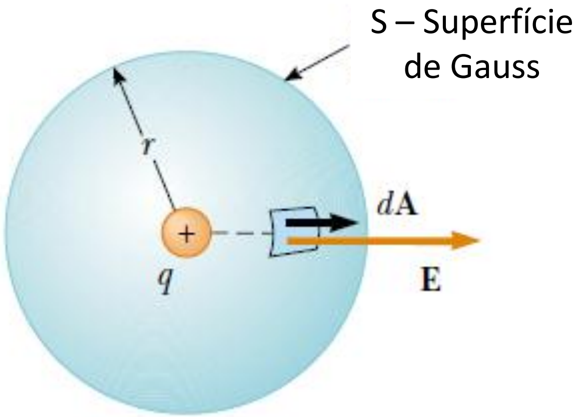
Corrente resultante que corta a área ou superfície *S* restrita ou limitada pelo caminho *C*.

O caminho C (ou laço de Ampère) é escolhido de forma a se adaptar à simetria do campo.

Apesar de a Lei de Gauss e a Lei de Ampère serem empregadas em problemas de alta simetria, a Lei de Ampère não se refere-se a fluxo, mas a circulação de $\vec{B}$ em torno de um fio.

Lei de Ampére x Lei de Gauss





$$\oint_C \vec{B}.d\vec{l} = \mu_0 I_{env} = \mu_0 \int_S \vec{J}.\vec{n}dA$$

$$\oint_S \vec{E}.\hat{n}da = \frac{q_{env}}{\varepsilon_0} = \frac{1}{\varepsilon_0}\int_V \rho dV$$

Orientação: pode ser escolhido arbitráriamente, mas deve seguir a regra da mão direita para o sinal da corrente.

Lembre-se: não é fluxo!

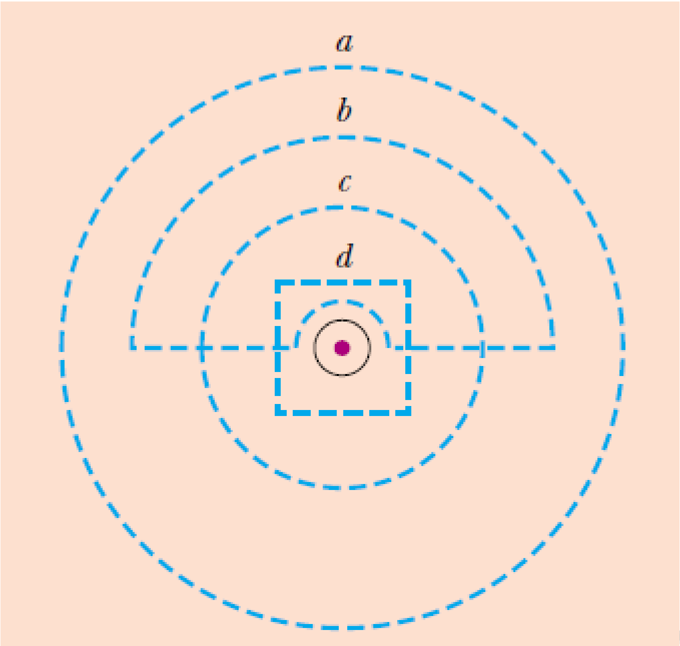
O fluxo magnético será tratado em outro momento...

Orientação: saindo da superfície fechada.

Desafio 2

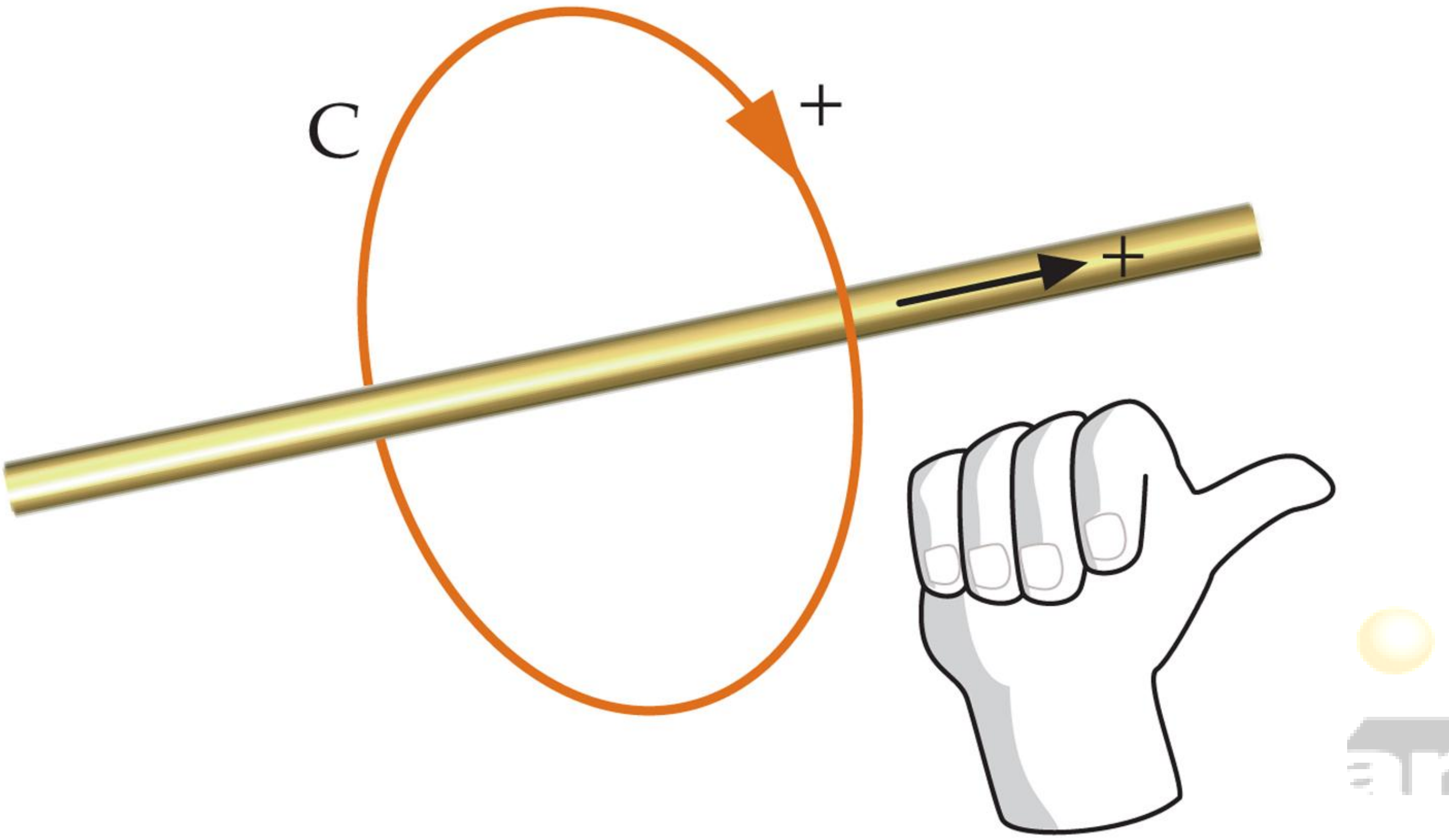
Considere vários caminhos fechados a, b, c, e d próximos a um fio transportando corrente que corta o plano da lousa/tela. Classifique, do maior para o menor, a magnitude de $\oint \vec{B}.d\vec{l}$ para esses caminhos fechados.

$$\oint_C \vec{B}.d\vec{l} = \mu_0 I_{env}$$



R: a = c = d > b

Orientação: regra da mão direita

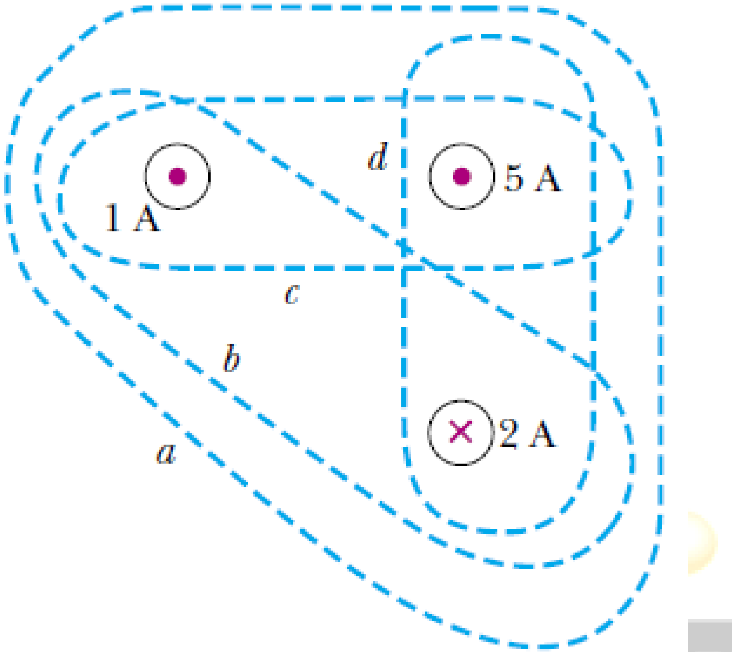


Regra da mão direita

Desafio 3

Considere vários caminhos fechados a, b, c, e d próximos a três fios transportando corrente que corta o plano da lousa/tela. Classifique, do maior para o menor, a magnitude de $\oint \vec{B}.d\vec{l}$ para esses caminhos fechados.

$$\boxed{\oint_C \vec{B}.d\vec{l} = \mu_0 I}$$



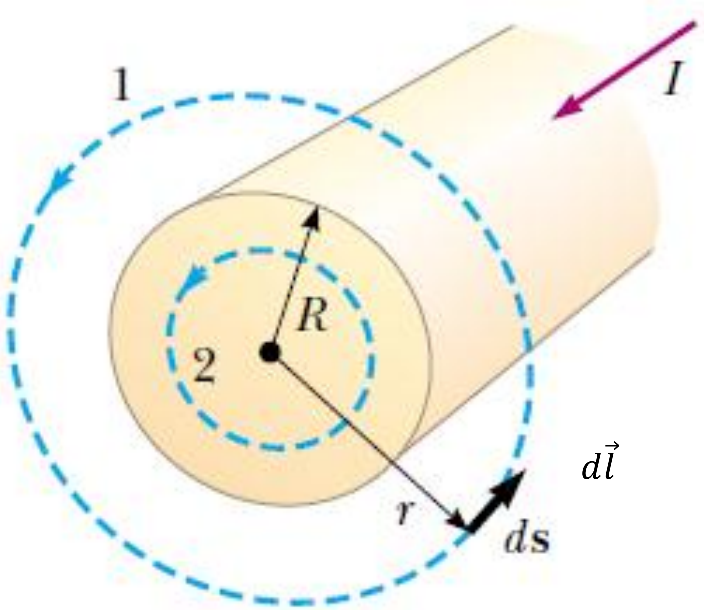
Varrendo no sentido antihorário

R: a = 4 A; b = 1 A; c = 6 A; d = 3 A.

c > a > d > b

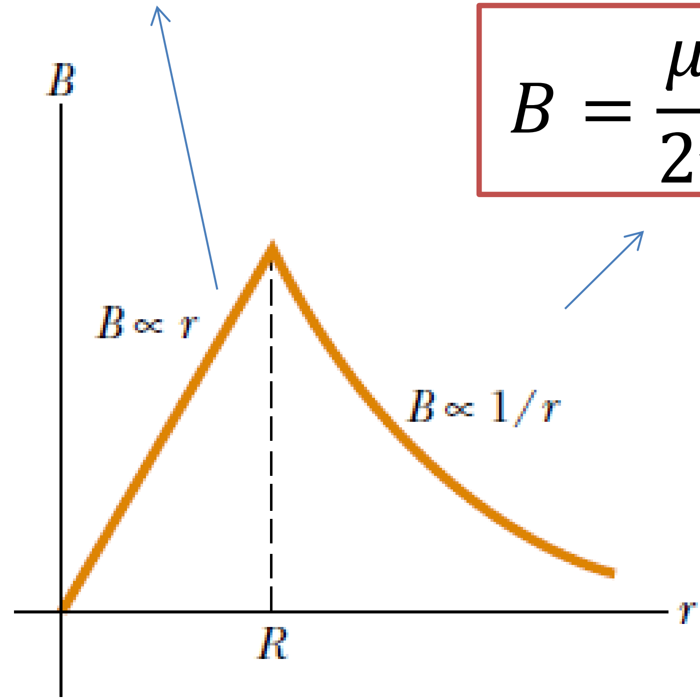
Exemplo 4

Um fio longo e reto de raio R transporta uma corrente estacionária I uniformemente distribuída ao longo da seção transversal do fio. Calcule o campo magnético $\vec{B}$ a uma distância r do centro do fio nas regiões $r \geq R$ e $r \leq R$.

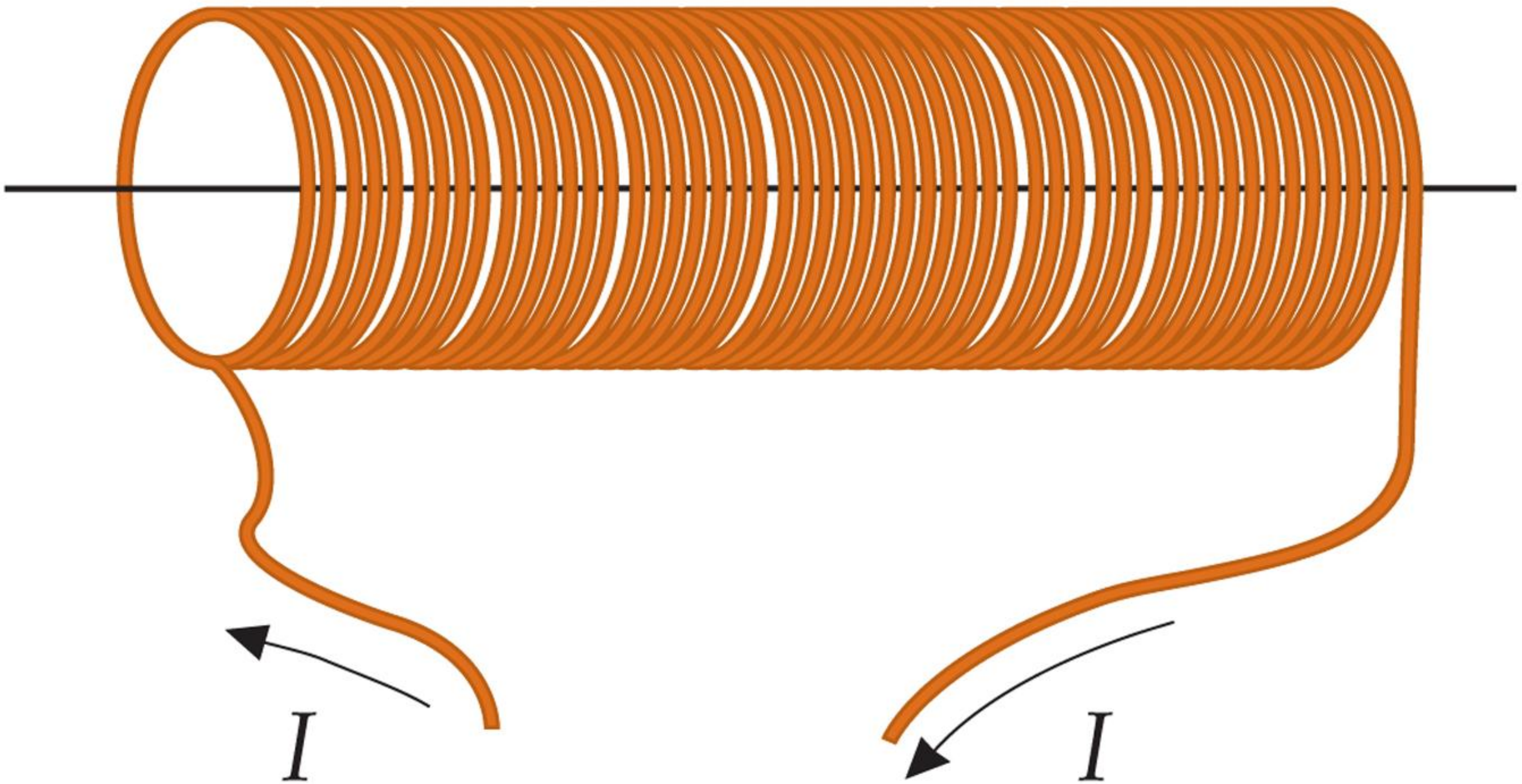


$$\boxed{B = \left(\frac{\mu_0 I}{2\pi R^2}\right) r}$$

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

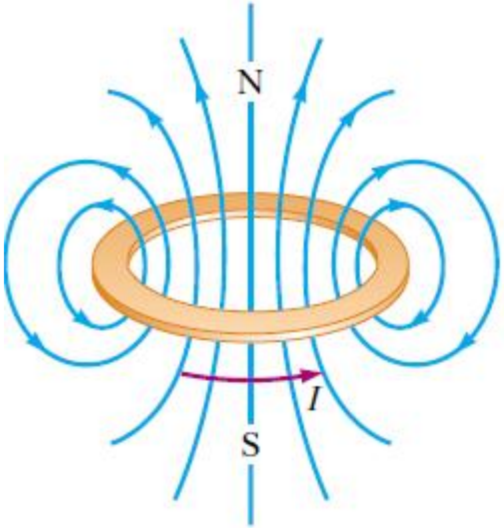


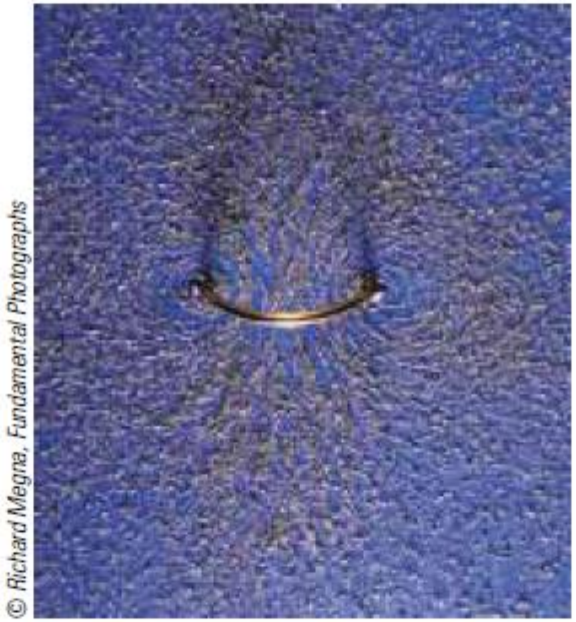
Solenóide

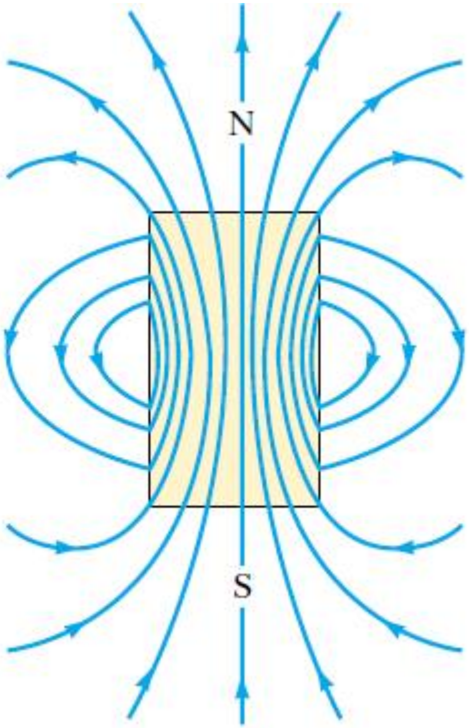


Solenóide: Similaridades entre uma espira e um ímã

Campo magnético em ambos os casos:

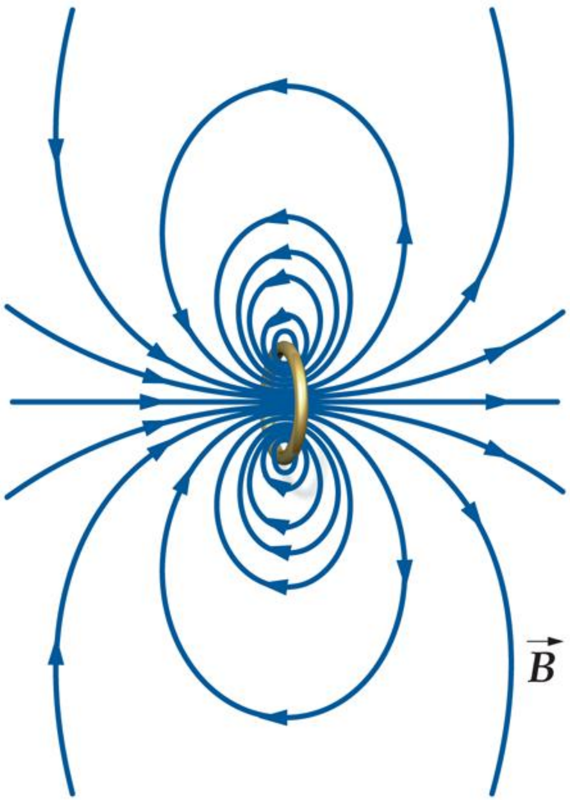




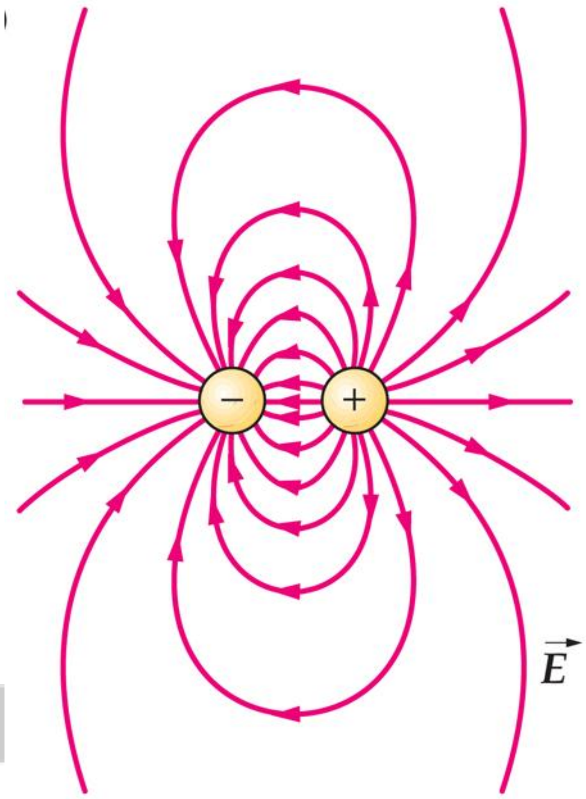


Solenóide: Similaridades entre $\vec{p}$ e $\vec{\mu}$

Campo magnético devido a uma espira/dipolo:

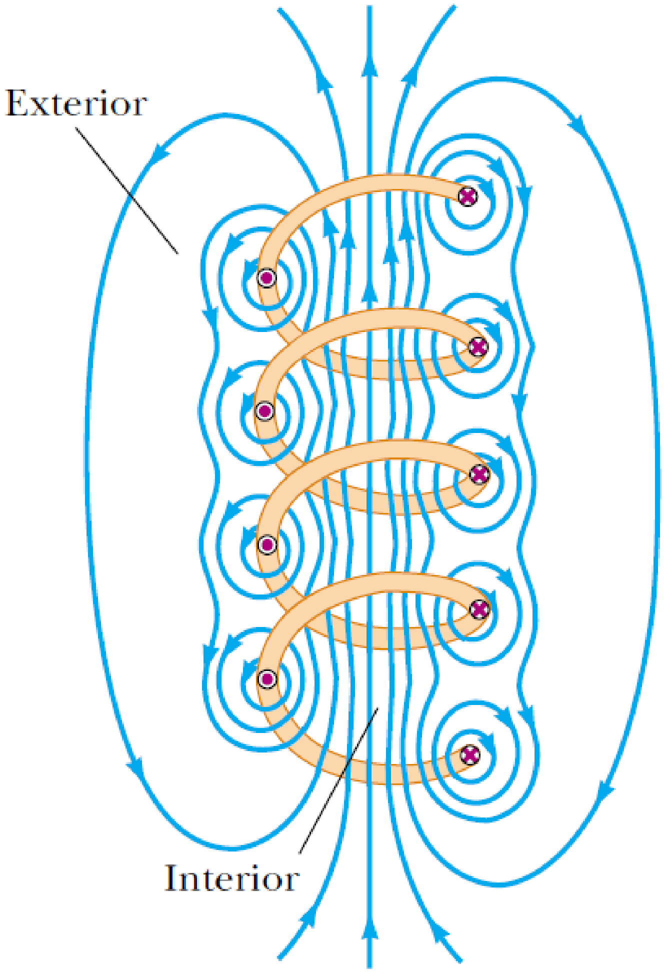


Campo elétrico devido a um dipolo elétrico:

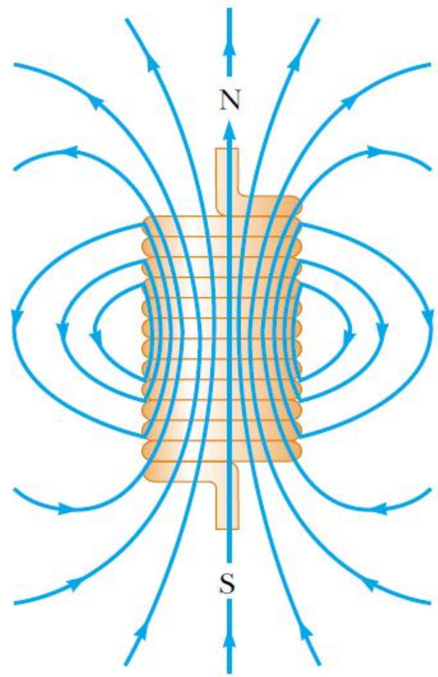


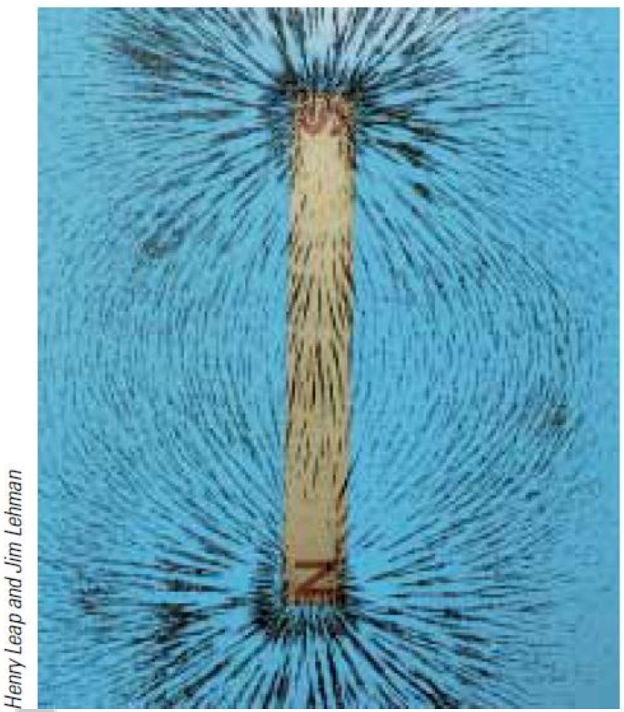
Solenóide

Solenóide “esticado”:



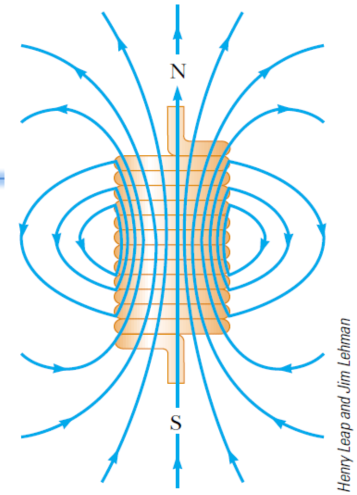
Solenóide ideal:





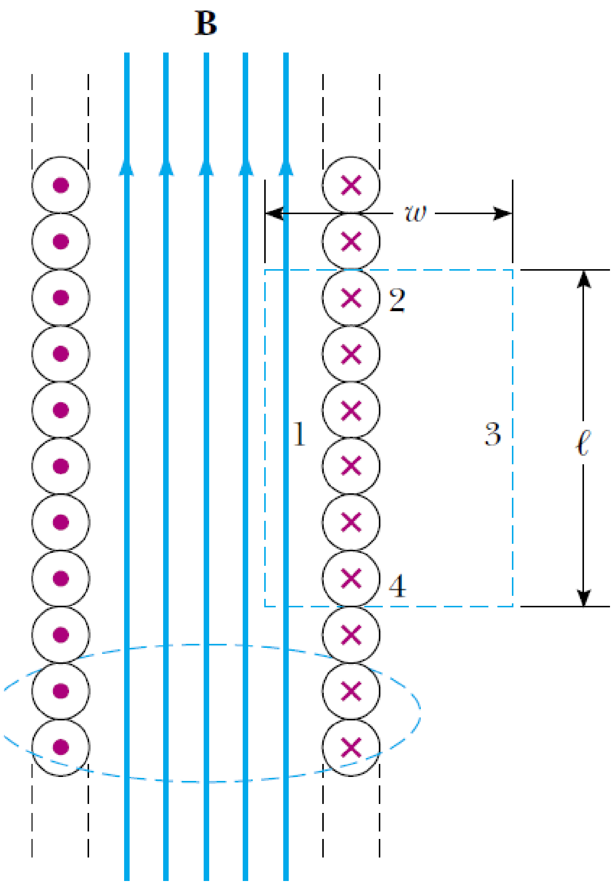
Henry Leap and Jim Lehman

Solenóide (Exemplo 5)



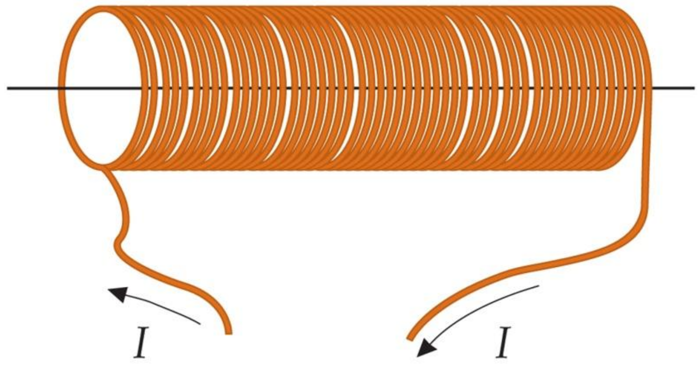
Aplicando a Lei de Ampère para um solenóide:

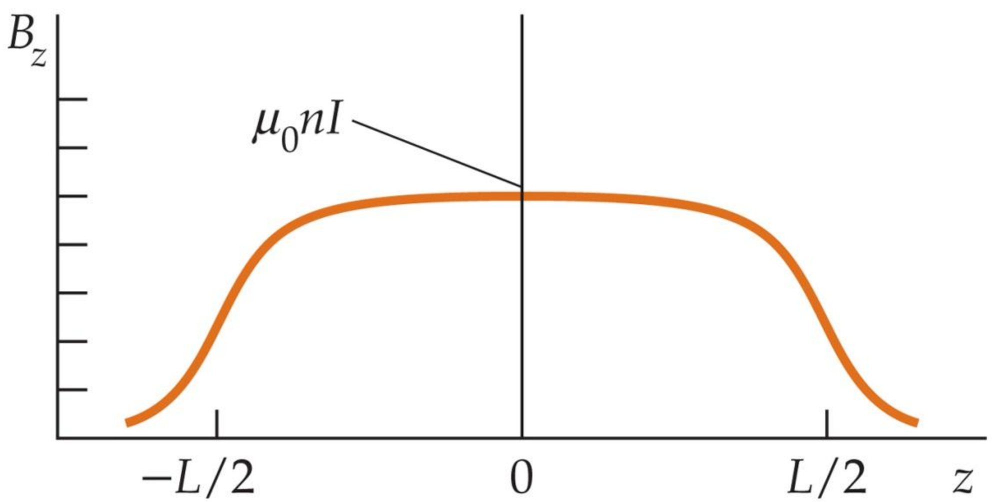
$$\boxed{\oint_C \vec{B}.d\vec{l} = \int_1 \vec{B}.d\vec{l} + \cancel{\int_2 \vec{B}.d\vec{l}} + \cancel{\int_3 \vec{B}.d\vec{l}} + \cancel{\int_4 \vec{B}.d\vec{l}} = B\ell = \mu_0 NI}$$



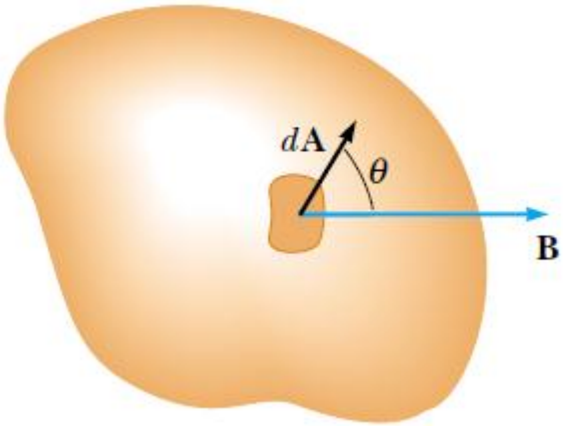
$$\boxed{B = \frac{\mu_0 NI}{\ell} = \mu_0 nI}$$

Solenóide real: perfil de campo





Fluxo magnético



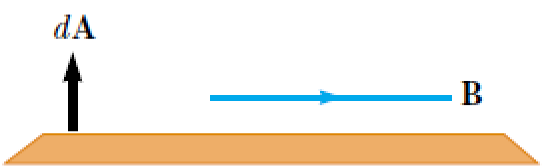
$$\boxed{\Phi_B = \int_A \vec{B}.\hat{n}da}$$

Não é uma superfície fechada!

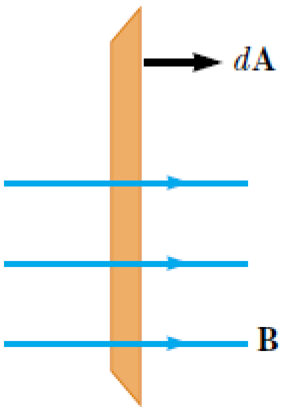
Caso especial:

- $\vec{B}$ uniforme;
- Área plana;

$$\Phi_B = B.A.\cos\theta$$



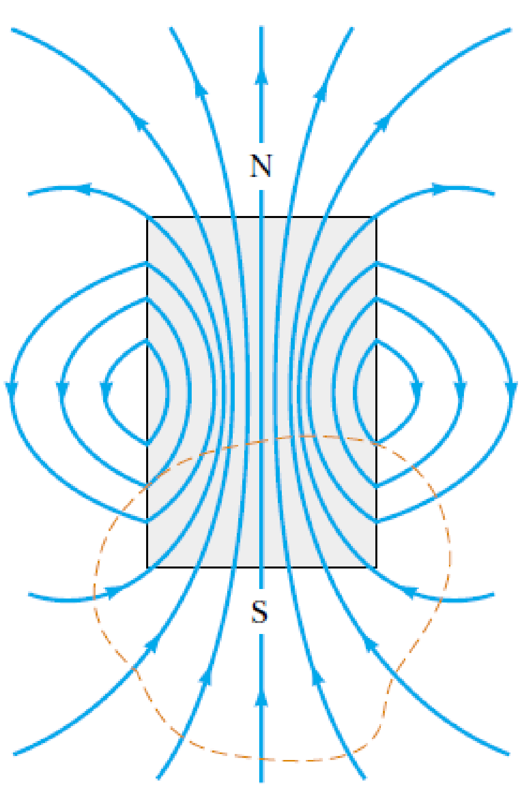
$$\Phi_B = 0$$

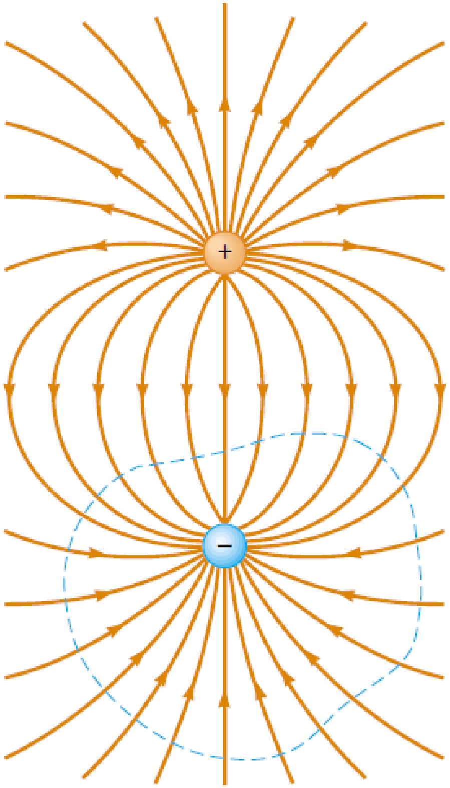


$$\Phi_B = \Phi_B{}^{\text{max}}$$

O fluxo magnético que varia no tempo é muito importante e será estudado no próximo capítulo.

Lei de Gauss no Magnetismo





$$\oint_S \vec{B}.\hat{n}da = 0$$

Como o número de linhas que saem e que entram na superfície é o mesmo, o fluxo resultante de $\vec{B}$ é zero.

Lembre-se: a menor unidade de "carga magnética" é um dipolo magnético.

Referências

[1] D. Halliday, R. Resnick e J. Walker. Fundamentos da Física, 6ª ed., Rio de Janeiro: LTC, 2003. v. 3. 281 p.

[2] H. D. YOUNG, R. A. FRIEDMAN. Física III: Eletromagnetismo, 12ª ed., São Paulo: Addison Wesley, 2008. v. 3. 425 p.

[3] P. A. Tipler e G. Mosca. Física para cientistas e engenheiros, 5ª ed., Rio de Janeiro: Editora LTC, 2006. v. 2. 550 p.

[4] R. A. Serway, J. W. Jewett Jr. Princípios de Física, Eletromagnetismo, 3ª ed., São Paulo: Thomson, 2005. v.3

FIM