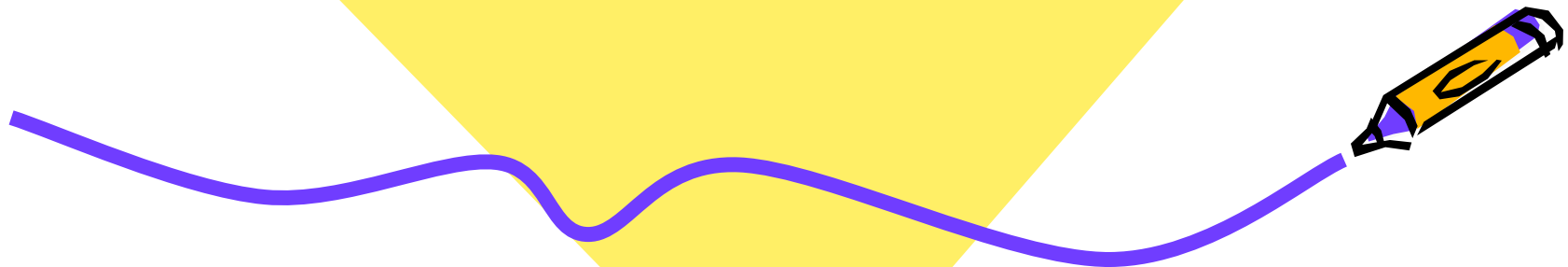




2-ELETROMAGNETISMO

(Página 24 a 115 da apostila Fundamentos do Eletromagnetismo, do professor Fernando Luiz Rosa Mussoi)



COMPETÊNCIAS

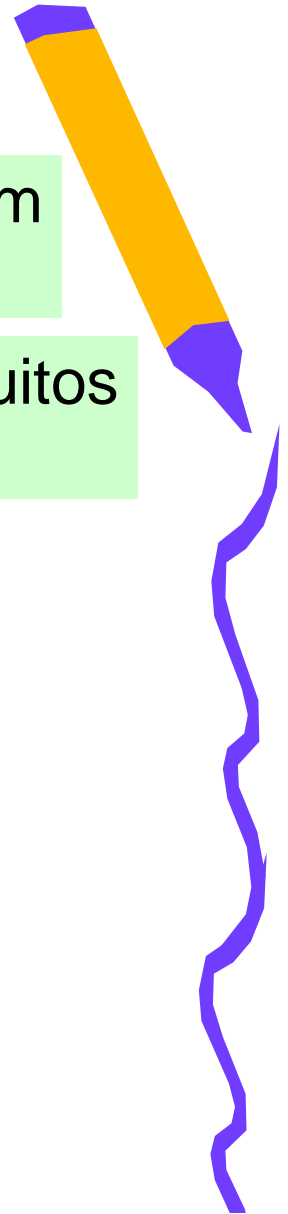
Conhecer as **leis fundamentais** do **Eletromagnetismo** e suas **aplicações**.

Analisar situações onde as leis fundamentais do Eletromagnetismo **são aplicadas**.

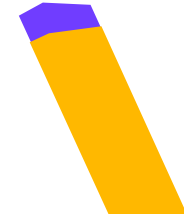
HABILIDADES

- **Analisar** situações onde a **lei de Faraday** é aplicável;
- **Analisar** situações onde a **lei de Lenz** e a **regra de Fleming** são aplicáveis;
- **Calcular** a **tensão induzida** em **condutores** que cortam um campo magnético;

- **Calcular a tensão e a frequência induzidas em espiras** que giram no interior de um campo magnético;
- **Analisar acoplamentos magnéticos** em circuitos magnéticos.



CONTEÚDO



- 2.1 – DESCOBERTAS DE OERSTED**
- 2.2 – FENÔMENOS DO ELETROMAGNETISMO**
- 2.3 – FONTES DE CAMPO ELETROMAGNÉTICO**
- 2.4 – VETOR CAMPO MAGNÉTICO INDUTOR**
- 2.5 – FORÇA MAGNETO-MOTRIZ**





2.1- Descobertas de Oersted

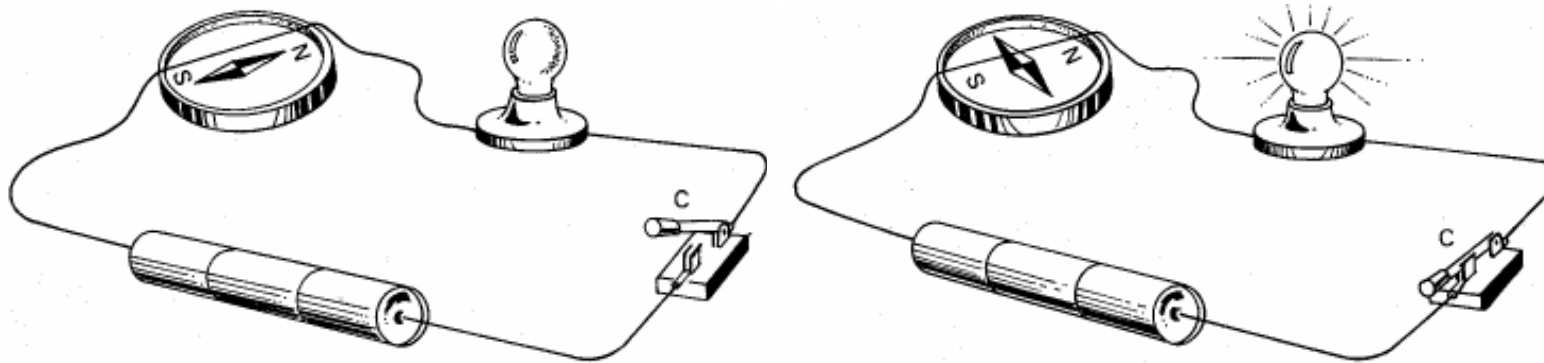


Figura 1.1 - Experiência de Oersted (Fonte: Moretto, V.P.; Eletricidade e Eletromagnetismo, Ed. Érica, 1989).

Conclusão de Oersted:

Todo condutor percorrido por corrente elétrica, cria em torno de si um campo eletromagnético.



Como consequência desta descoberta surge o.....

ELETROMAGNETISMO:

*"o campo **MAGNÉTICO** criado a partir da **ELETRICIDADE**".*



2.2- Fenômenos do Eletromagnetismo

São **três** os principais fenômenos eletromagnéticos e que regem todas as **aplicações** tecnológicas do eletromagnetismo:

A. Condutor percorrido por corrente elétrica produz campo magnético; (applet Campo Magnético de um Fio Linear Transportando uma Corrente)

Orientação da bússola em torno de um condutor percorrido por corrente.
(Fonte: Giancoli)



Visualização das linhas de campo produzidas por um condutor percorrido por corrente.
(Fonte: Giancoli)



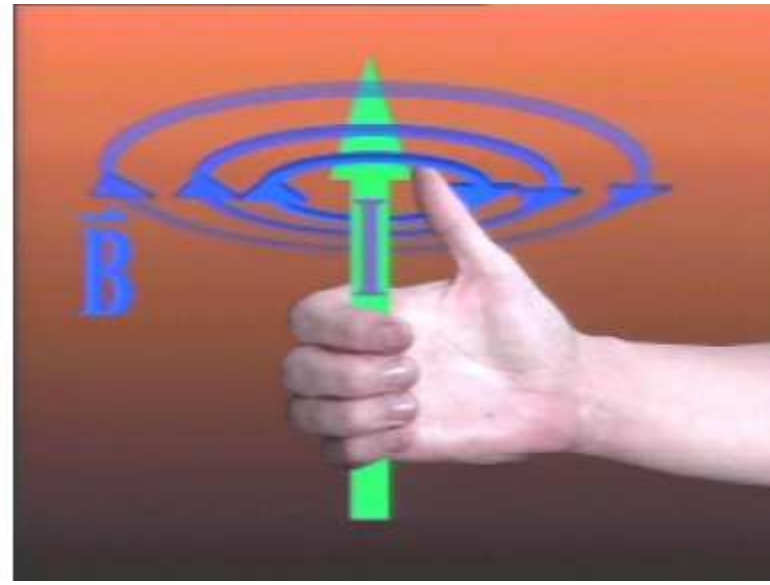
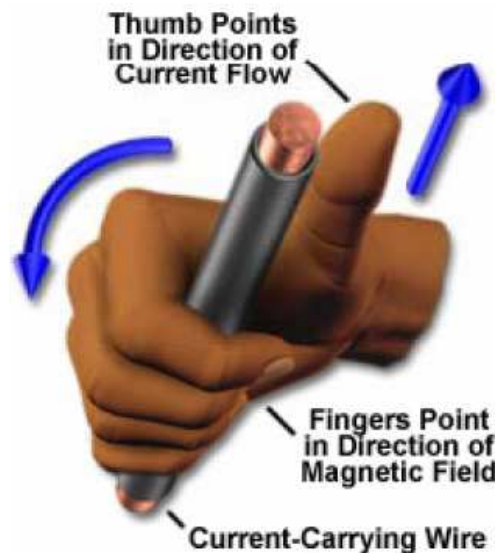
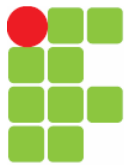


Figura 3.3 - As linhas de campo magnético criado por uma corrente elétrica são concêntricas.

Regra de Ampère - Regra da Mão Direita

Mão **direita** envolvendo o condutor com o **polegar** apontando para o sentido **convencional** da corrente elétrica, os demais **dedos** indicam o sentido das linhas de **campo** que envolvem o condutor.



Descubra o sentido do campo magnético!

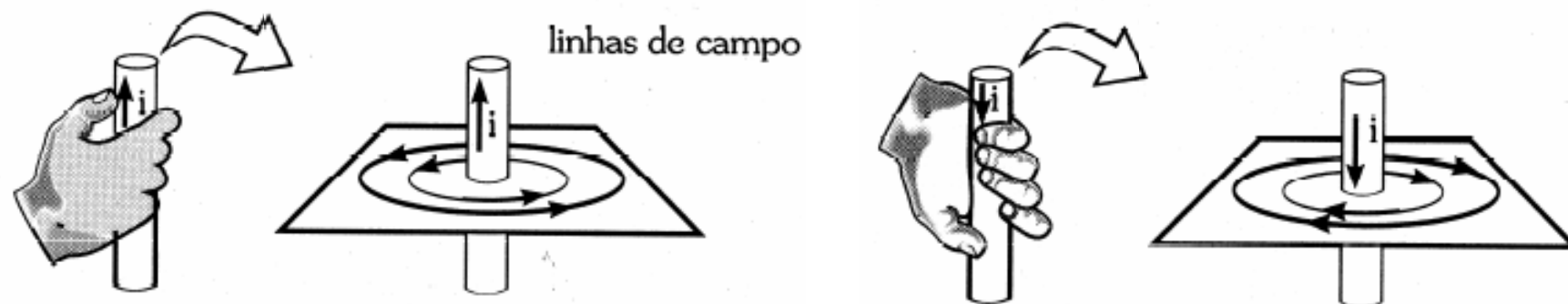


Figura 3.4 - Lei de Ampère e regra da mão direita (Fonte: Chiquetto e Parada; Física Eletricidade vol.3 ed. Scipione, 1992).

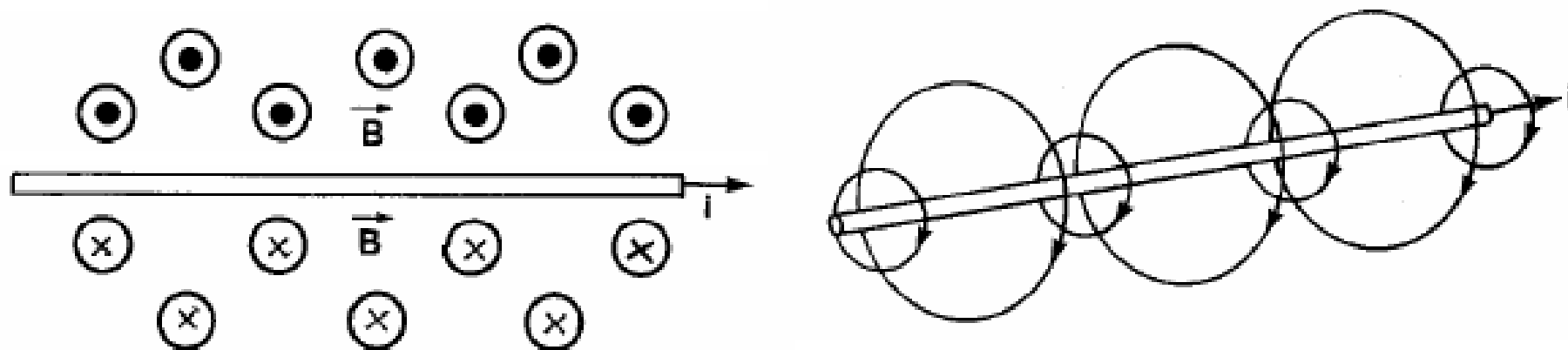
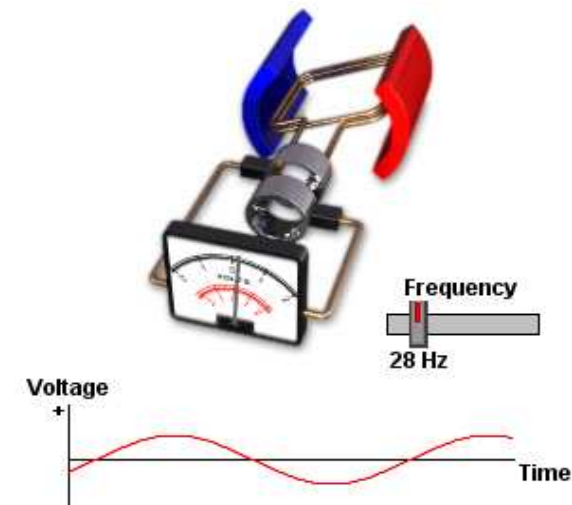
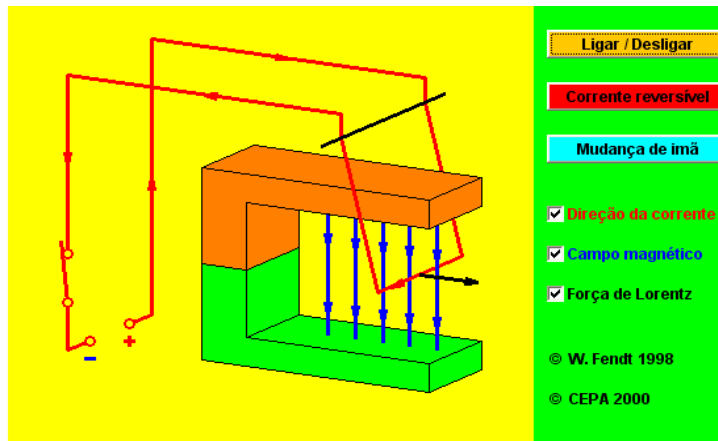


Figura 3.6 - Campo Eletromagnético produzido por um condutor; a) em perspectiva; b) indicado no plano.



B. Campo magnético provoca ação de uma força magnética sobre um condutor percorrido por corrente elétrica. (aplet Força Lorentz)



C. Fluxo Magnético variante sobre um condutor gera (induz) corrente elétrica. (aplet indução magnética 1 e 2, Lei de Lenz)



2.3- Fontes de Campo Eletromagnético

A. Campo Eletromagnético gerado em torno de um Condutor Retilíneo

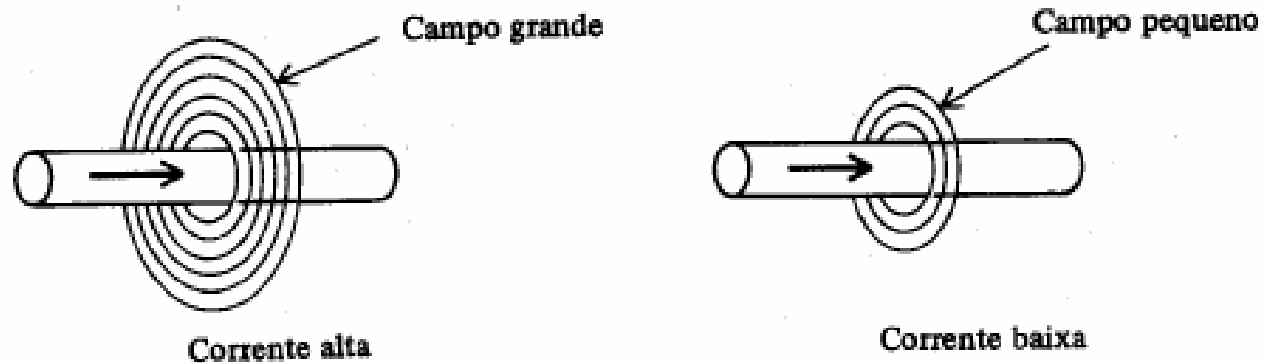


Figura 4.1 - Representação do campo magnético em função da intensidade da corrente



Tabela de permeabilidade

Tabela 6.1 - Materiais quanto à Permeabilidade Relativa

Permeabilidade Relativa, μ_R	Tipo de Material
$\gg 1$	Ferromagnéticos
$\cong 1$	Paramagnéticos
< 1	Diamagnéticos

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

Tabela 6.2 - Permeabilidade Relativa de Materiais Ferromagnéticos

Tipo de Material	Permeabilidade Relativa, μ_R
Ferro Comercial	9.000
Ferro Purificado	200.000
Ferro Silício	55.000
Permalloy	1×10^6
Supermalloy	1×10^7
Permendur	5.000
Ferrite	2.000

μ_r – permeabilidade relativa

μ – permeabilidade absoluta

μ_0 – permeabilidade no vácuo

Tabela 2: Permeabilidade relativa.

Material	Permeabilidade relativa
Ar	1
Chapa para gerador (liga Fe, Si)	5.000 a 8.000
Mumetal (liga de Ni, Fe, Cu, Cr)	45.000
Liga 1040 (liga de Ni, Fe, Cu, Mo)	100.000



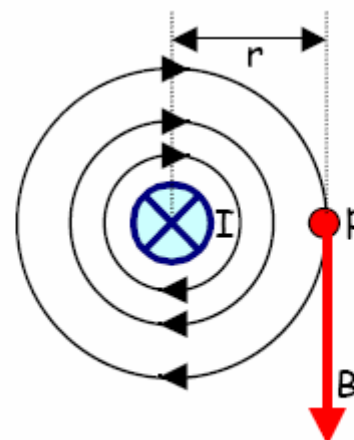
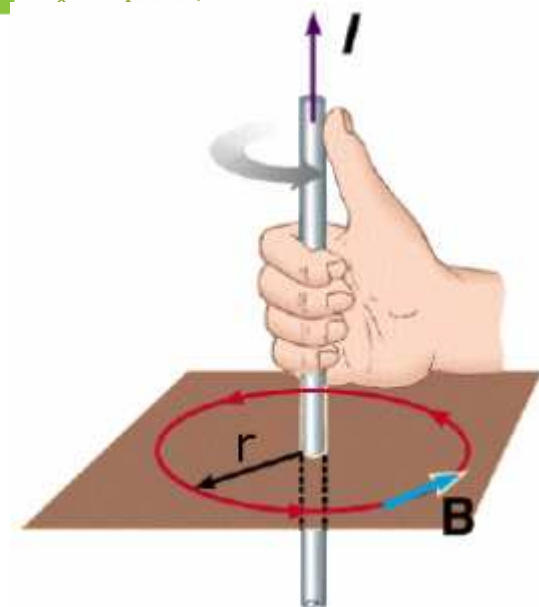
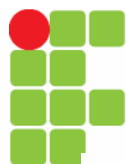


Figura 4.2 - Vetor Campo magnético tangente às linhas de campo.

$$B = \frac{\mu \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot r}$$

onde:

B = Densidade de campo Magnético (ou Densidade de Fluxo Magnético) num ponto p [T, Tesla];

r = distância entre o centro do condutor e o ponto p considerado [m];

I = intensidade de corrente no condutor [A].

μ = permeabilidade magnética do meio [T.m/A]

$$\text{Permeabilidade Magnética do Vácuo: } \mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ (T.m/A)}$$

Esta equação é válida para **condutores longos**, ou seja, quando a distância r for bem menor que o comprimento do condutor ($r \ll \ell$).



A Densidade de Fluxo Magnético B é o efeito da Força Magnetizante H num dado meio μ .

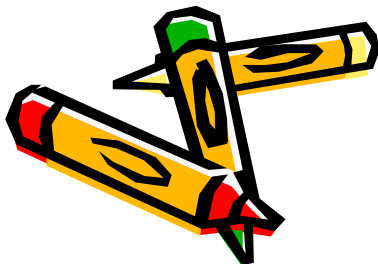
$$H = \frac{B}{\mu}$$

$$B = \mu \cdot H$$

Para um condutor retilíneo:

$$H = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot r}$$

H – Vetor Campo Magnético Indutor ou Vetor Força Magnetizante [A/m]
 B – Densidade de Campo magnético ou Densidade de fluxo magnético [T]



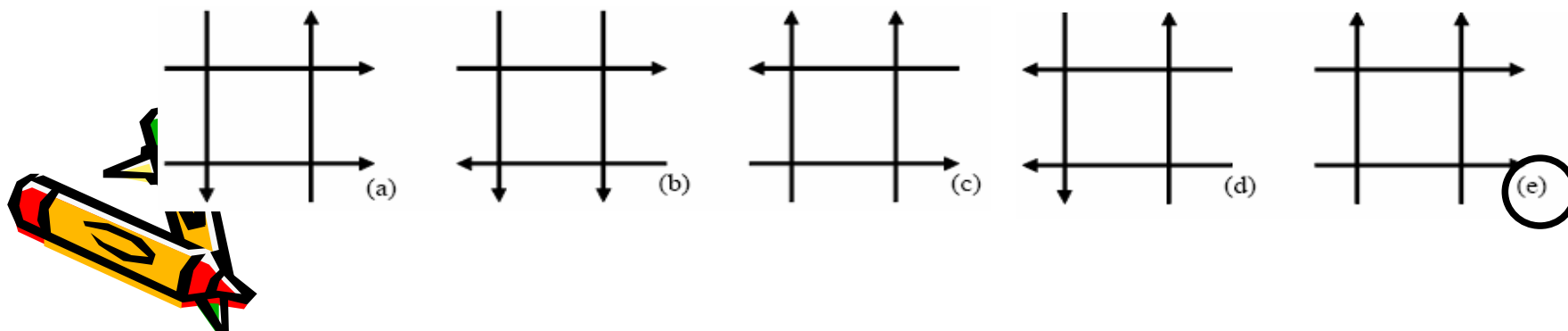
EXERCÍCIOS



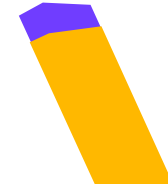
1) Sejam dois fios de comprimento infinito, condutores, de seção reta desprezível, paralelos separados por uma distância d . Se em algum ponto situado entre os fios o campo magnético for nulo, quando os mesmos são percorridos por uma corrente elétrica, pode-se afirmar que:

- a) as correntes têm o mesmo sentido;
- b) as correntes têm sentidos contrários;
- ☒ c) as intensidades e sentidos de correntes são iguais;
- d) o enunciado está errado, pois o campo magnético jamais será nulo;
- e) faltam dados para responder a questão.

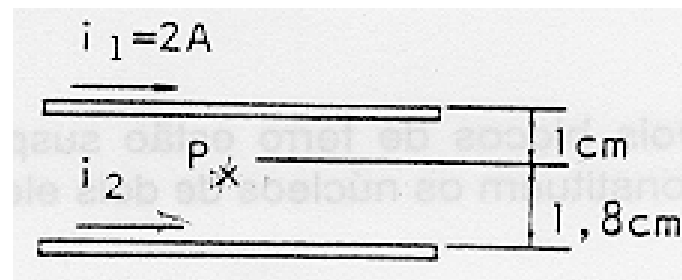
2) Quatro fios longos são percorridos por correntes iguais. A área limitada pelos quatro fios é um quadrado. A disposição que apresenta um campo magnético nulo no seu centro de simetria é:



EXERCÍCIOS

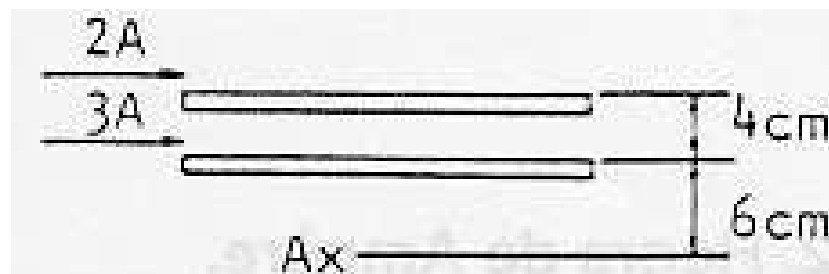


- 3) Qual é a intensidade e o sentido da corrente I_2 , de modo que o campo magnético no ponto P seja nulo? **R: 3,6A**

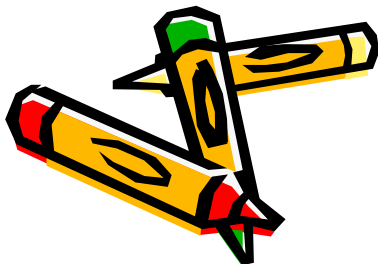


FONTE: CEFET/PR

- 4) Calcular a intensidade de campo magnético indutor H a 50 cm do centro de um condutor retilíneo percorrido por uma corrente elétrica de 3 A. **R: 0,96Ae/m**
- 5) Qual é a intensidade de campo magnético indutor H no ponto A da figura a seguir ? **R: 11,1Ae/m**



FONTE: CEFET/PR



B. Campo Eletromagnético gerado no centro de uma Espira Circular.

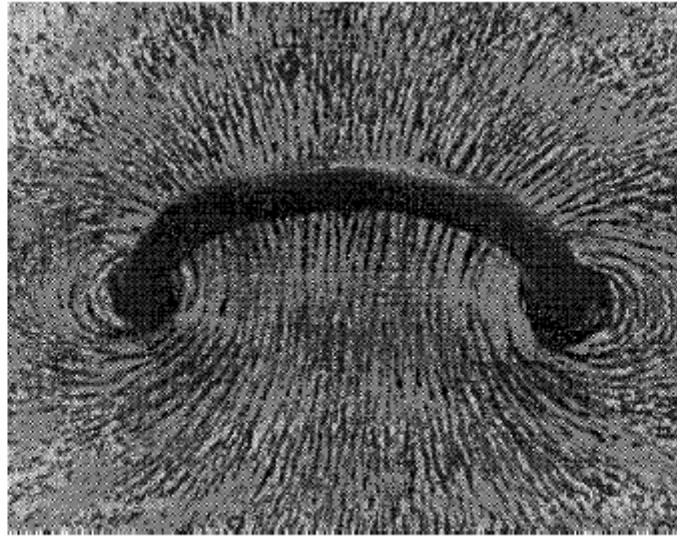


Figura 4.3 - Visualização do Campo magnético no centro de uma espira circular (Fonte: Gozzi, Giuseppe G. M., Circuitos Magnéticos, Coleção Estude e Use, Ed. Érica, 1996).

$$B = \frac{\mu \cdot I}{2 \cdot R}$$

Onde:

B = é a densidade de campo magnético no centro da espira circular [T, Tesla];

R = raio da espira [m];

I = intensidade de corrente na espira circular [A].

μ = permeabilidade magnética do meio [T.m/A]



A Densidade de Fluxo Magnético B é o efeito da Força Magnetizante H num dado meio μ .

$$H = \frac{B}{\mu}$$

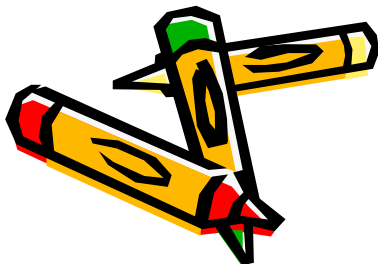
$$B = \mu \cdot H$$

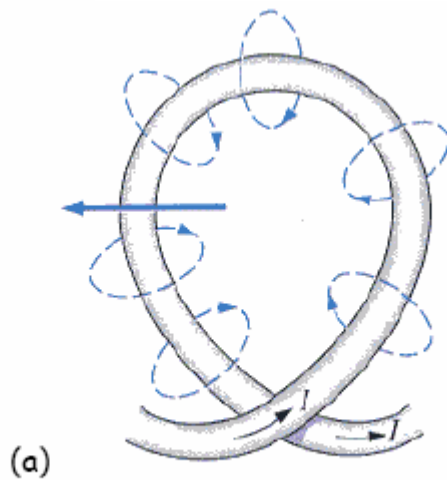
Para uma espira circular:

$$H = \frac{I}{2 \cdot R}$$

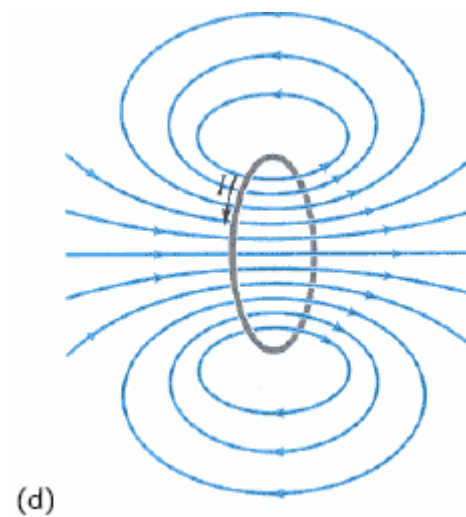
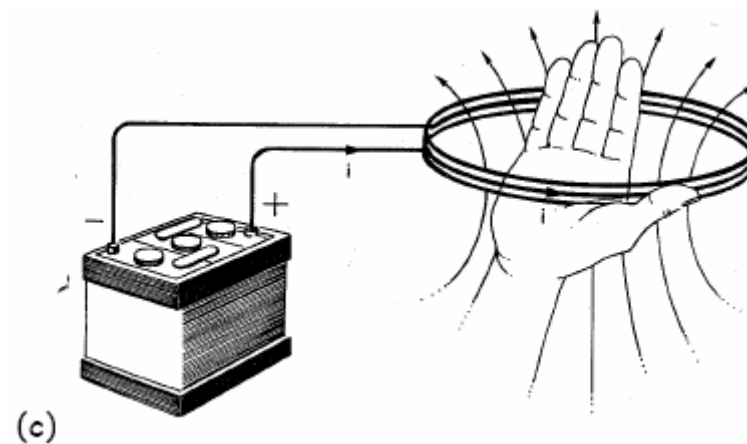
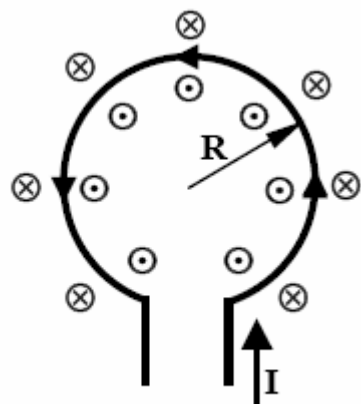
H – Vetor Campo Magnético Indutor ou Vetor Força Magnetizante [A/m]

B – Densidade de Campo magnético ou Densidade de fluxo magnético [T]





Fonte: Boylestad, R.L., *Introductory Circuit Analysis*, Prentice Hall, 2003.

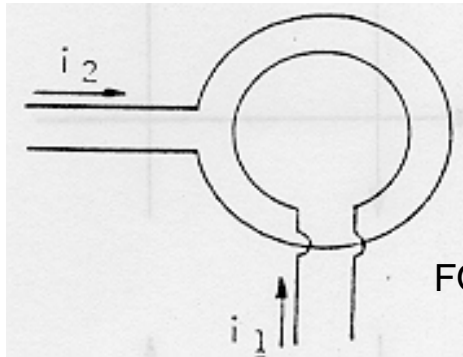


Giancoli. *Physics for engineers and scientists*

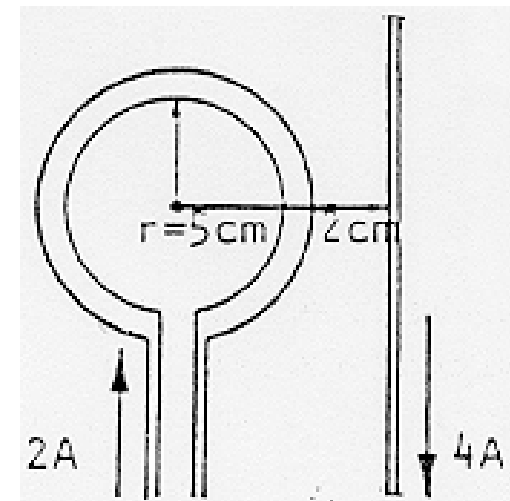
Figura 4.4 - Representação do Campo Magnético gerado por uma espira circular percorrida por corrente.

EXERCÍCIOS

- 6) Qual é o valor do campo magnético indutor H no centro de uma espira circular feita com um condutor de 1m de comprimento e percorrida por uma corrente de 2 A ? **R: 6,28Ae/m**
- 7) Qual é o valor do campo magnético indutor H no centro comum às duas espiras de raio 7 cm e 10 cm, dado que $I_1 = 3$ A e $I_2 = 4$ A ? Qual o sentido do campo magnético resultante ? **R: 41,4Ae/m**



FONTE: CEFET/PR



- 8) Calcular o valor do campo magnético no centro da espira da figura acima (a direita). **R: 29,1Ae/m**

C. Campo Eletromagnético gerado no centro de uma Bobina Longa ou Solenóide.

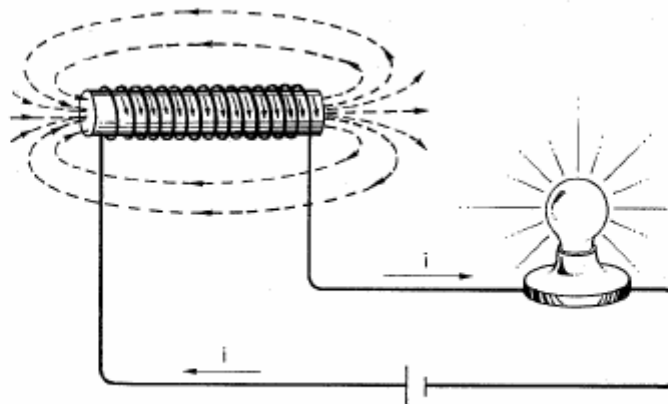


Figura 4.5 - Linhas do Campo Eletromagnético criado por uma bobina percorrida por corrente

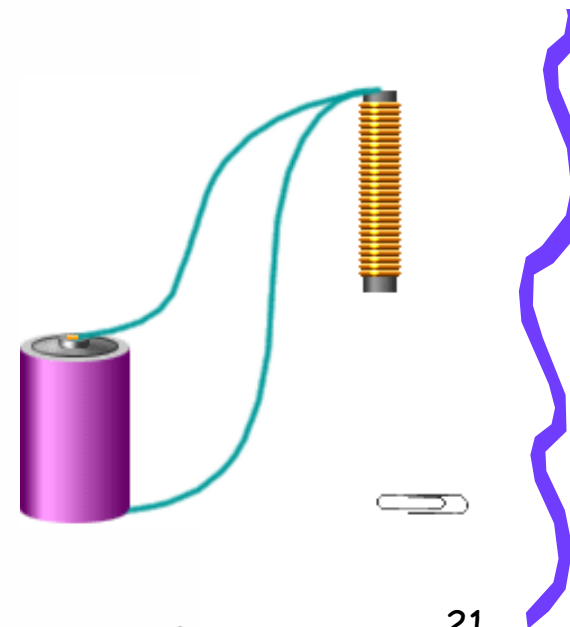
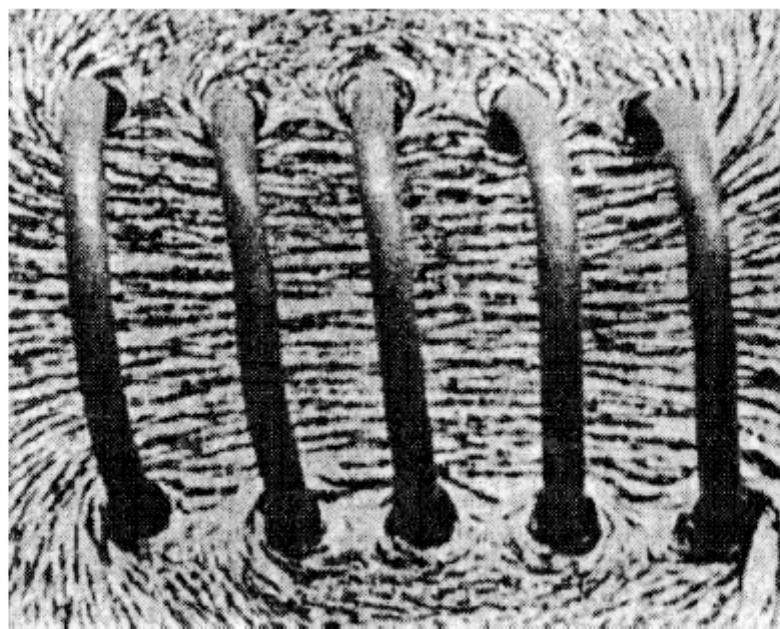


Figura 4.6 - Concentração das Linhas Campo Magnético no interior de uma bobina percorrida por corrente
(Fonte: Gozzi, Giuseppe G. M., Circuitos Magnéticos, Coleção Estude e Use, Ed. Érica, 1996).

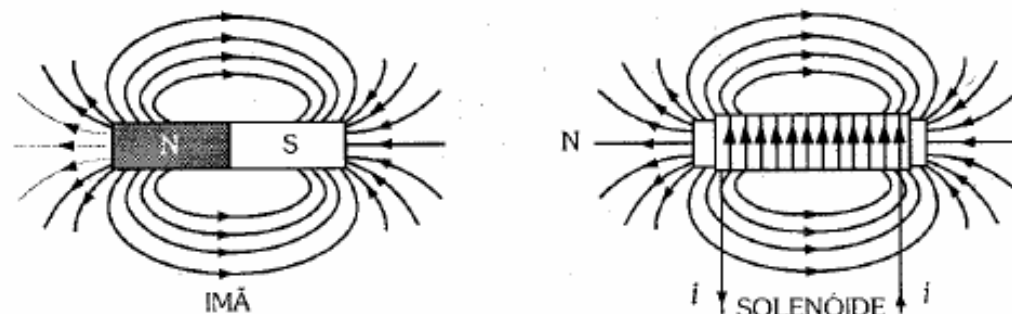


Figura 4.7. Campo Magnético de um ímã em barra e de um solenóide são semelhantes (Fonte: Gozzi, Giuseppe G. M., Circuitos Magnéticos, Coleção Estude e Use, Ed. Érica, 1996).

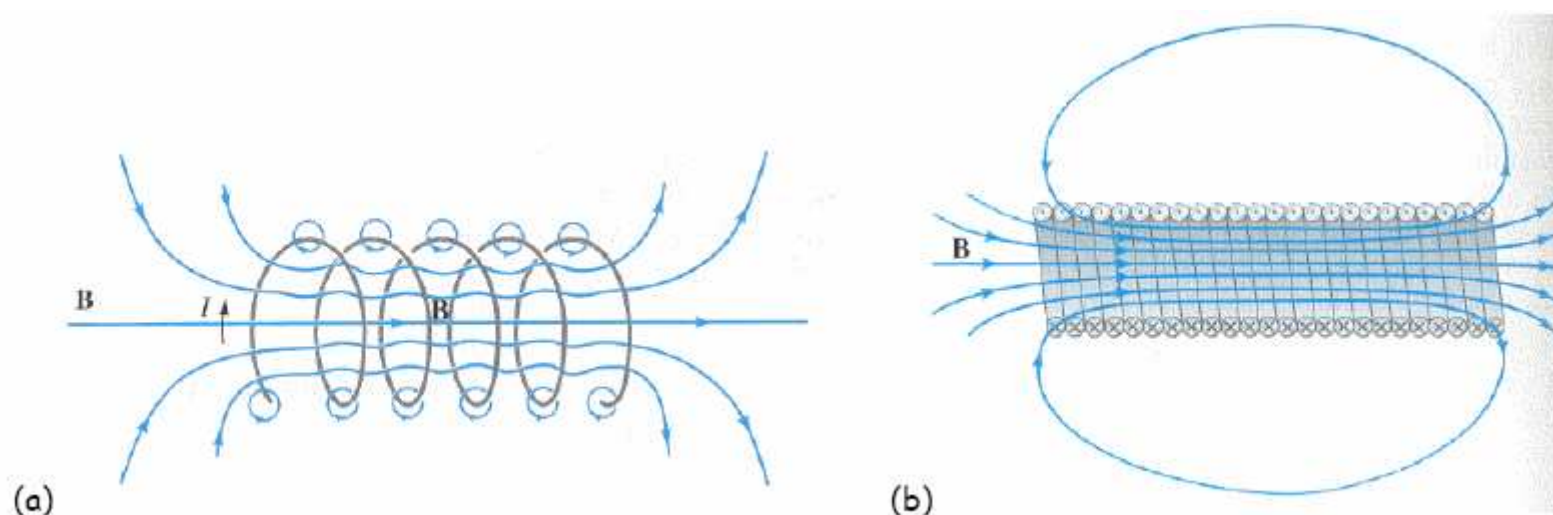


Figura 4.8 - Campo magnético no solenóide: (a) espiras separadas; (b) espiras justapostas (Fonte: Giancoli).

$$B = \frac{\mu \cdot N \cdot I}{\ell}$$

onde:

B = é a densidade de campo magnético no centro do solenóide [T, Tesla];

N = número de espiras do solenóide;

I = é a intensidade de corrente elétrica que percorre o solenóide [A];

ℓ = comprimento longitudinal do solenóide [m].

μ = permeabilidade magnética do meio (núcleo do solenóide) [T.m/A]



A Densidade de Fluxo Magnético B é o efeito da Força Magnetizante H num dado meio μ .

$$H = \frac{B}{\mu}$$

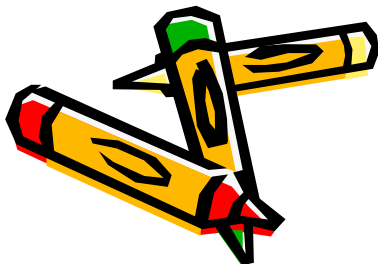
$$B = \mu \cdot H$$

O módulo do vetor campo magnético indutor ou vetor força magnetizante H numa bobina pode ser dado por:

$$H = \frac{N \cdot I}{\ell}$$

H – Vetor Campo Magnético Indutor ou Vetor Força Magnetizante [A/m]

B – Densidade de Campo magnético ou Densidade de fluxo magnético [T]



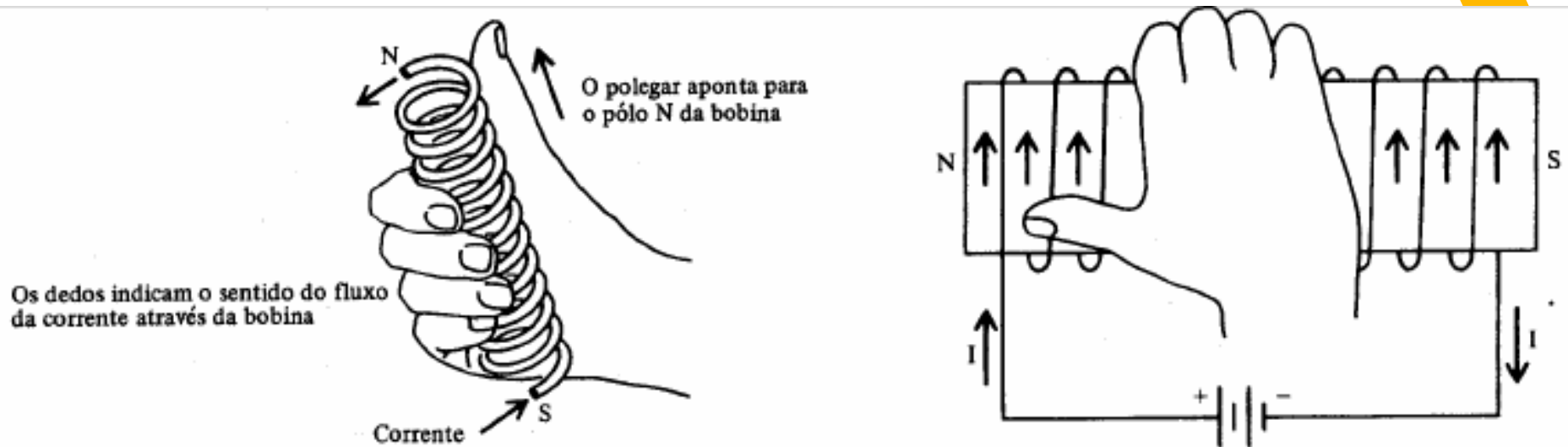
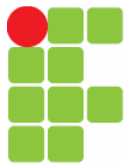


Figura 4.9 - Regra da mão direita aplicada a uma bobina.



EXERCÍCIOS

9) Calcular o campo magnético no centro de um solenóide de 10 cm de comprimento, com 600 espiras e percorrido por uma corrente de 2 A ? **R: 12000Ae/m**

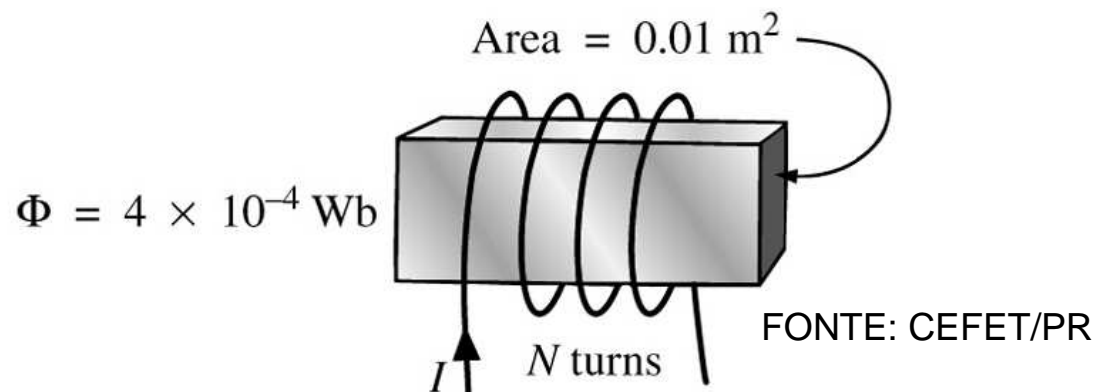
10) Para o eletroímã da figura abaixo:

a) determine a densidade de fluxo magnético no núcleo;

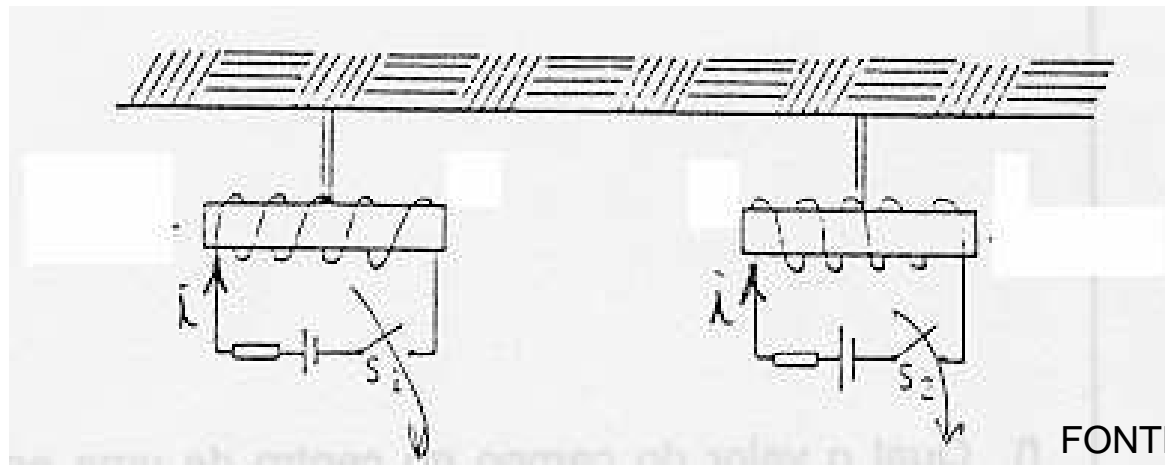
R: 0,04T

b) desenhe as linhas de campo magnético e sua orientação;

c) indique os pólos norte e sul.



11) Dois blocos de ferro estão suspensos por fios e constituem os núcleos de dois eletroímãs, como na figura a seguir:



FONTE: CEFET/PR

Assinale a alternativa **incorreta**:

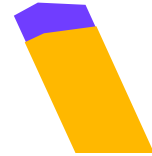
☐ Fechando-se a chave S1, mantendo-se a chave S2 aberta, os dois blocos de ferro irão atrair-se;

☐ Fechando-se as duas chaves S1 e S2 ao mesmo tempo, os blocos irão repelir-se;

☐ Fechando-se a chave S2, mantendo-se a chave S1 aberta, não haverá atração entre os blocos;

☐ Fechando-se as duas chaves S1 e S2 ao mesmo tempo, os blocos não irão atrair-se.





12) Um solenóide de 1 metro de comprimento contém 500 espiras e é percorrido por uma corrente de 2A. Determinar a intensidade do vetor campo magnético no interior do solenóide. Adote $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T.m/A}$

13) No interior de um solenóide de comprimento 0,16m, registra-se um campo magnético de intensidade $5\pi \cdot 10^{-4} \text{ T}$, quando ele é percorrido por uma corrente de 8A. Quantas espiras tem esse solenóide? Adote $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T.m/A}$

14) Considere um solenóide de 0,16m de comprimento com 50 espiras. Sabendo que o solenóide é percorrido por uma corrente de 20A, determine a intensidade do campo magnético no seu interior.

15) Um solenóide de 1 metro de comprimento contém 1000 espiras e é percorrido por uma corrente de i . Sabendo que o vetor campo magnético no seu interior vale $8\pi \cdot 10^{-4} \text{ T}$, determine i . O solenóide está no vácuo.





D. Campo Eletromagnético gerado por um Toróide.



Figura 4.11 - Aspecto de um Toróide (Fonte: Giancoli).

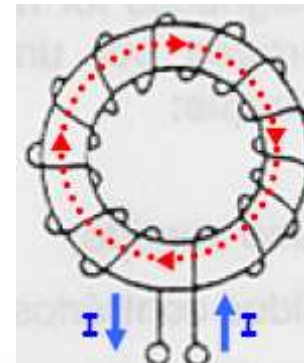
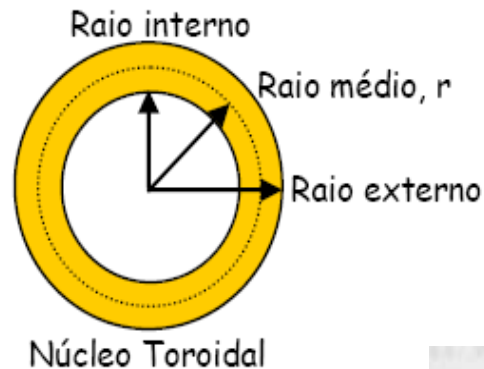


Figura 4.13 - Sentido das linhas de campo no núcleo da bobina toroidal.

$$B = \frac{\mu \cdot N \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot r}$$

Onde:

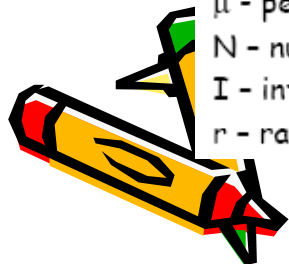
B - densidade de campo magnético no interior do núcleo do toróide, [T];

μ - permeabilidade magnética do meio no interior das espiras do toróide (núcleo);

N - número de espiras da bobina toroidal;

I - intensidade de corrente no condutor da bobina, [A];

r - raio médio do toróide, [m].





A Densidade de Fluxo Magnético B é o efeito da Força Magnetizante H num dado meio μ .

$$H = \frac{B}{\mu}$$

$$B = \mu \cdot H$$

Para uma bobina toroidal:

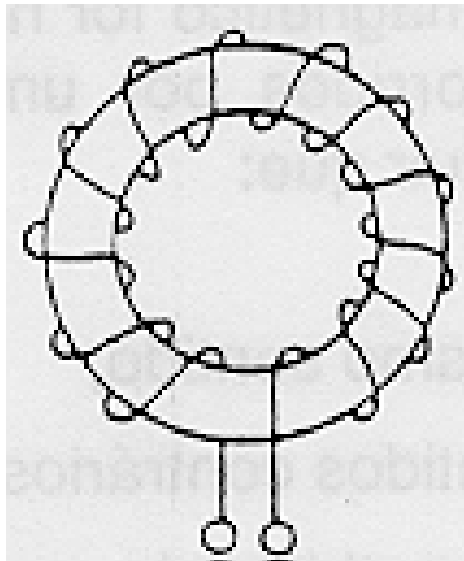
$$H = \frac{N \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot r}$$

H – Vetor Campo Magnético Indutor ou Vetor Força Magnetizante [A/m]
 B – Densidade de Campo magnético ou Densidade de fluxo magnético [T]

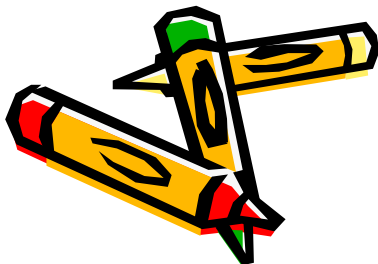


EXERCÍCIOS

- 16)** Calcule o valor do campo magnético indutor no interior do núcleo de um solenóide toroidal de raio interno de 10 cm e raio externo de 12 cm, onde estão enroladas 1000 espiras percorridas por uma corrente de 1A. **R:** **1446,9Ae/m**



FONTE: CEFET/PR





2.5- Força Magneto-Motriz

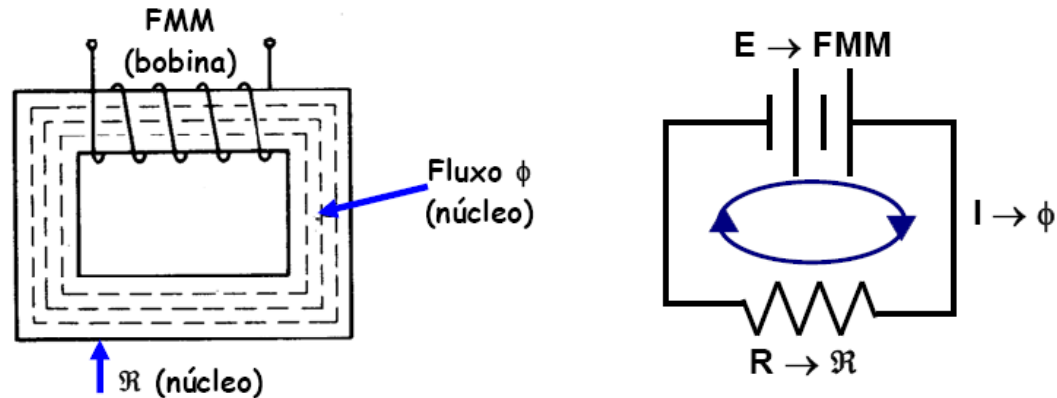


Figura 4.15 - Circuito magnético fechado com núcleo de ferromagnético e seu equivalente elétrico.

A Força Magneto-motriz produzida por uma bobina é dada pelo produto:

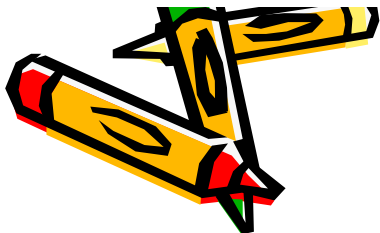
$$FMM = N \cdot I$$

onde:

FMM - Força Magneto-Motriz, em Ampère-espira [Ae]

N - Número de espiras;

I - Intensidade da corrente elétrica, em Ampères [A].



$$FMM = H \cdot \ell$$

onde:

FMM - Força Magneto-Motriz, [Ae]

H - Força Magnetizante ou Campo Magnético Indutor, [Ae/m];

ℓ - Comprimento médio do caminho do circuito magnético, [m].

Observação: O comprimento médio do caminho do circuito magnético é o comprimento total de uma linha de campo posicionada no centro do núcleo, como mostra a linha de campo grifada na figura 4.14.

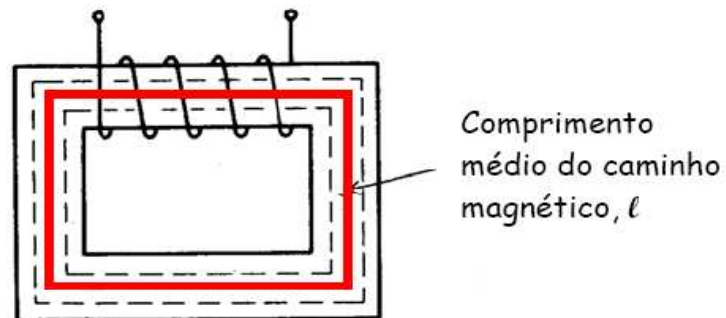
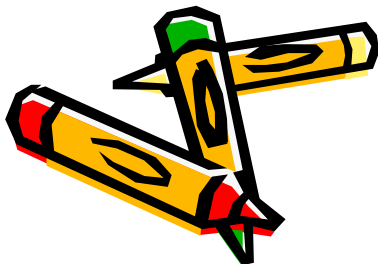


Figura 4.14 - Comprimento médio do caminho do circuito magnético.



Exemplo:

Na figura 4.15 considere que a bobina possui 120 espiras percorridas por uma corrente de 500mA e que o comprimento médio do circuito magnético é $\ell = 0,15\text{m}$ e cuja área da seção transversal do núcleo é 2 cm^2 .

- a) Determine o campo magnético indutor e a força magneto-motriz;

$$H = \frac{N \cdot I}{\ell} = \frac{120 \cdot 0,5}{0,15} = 400 \text{ Ae / m}$$

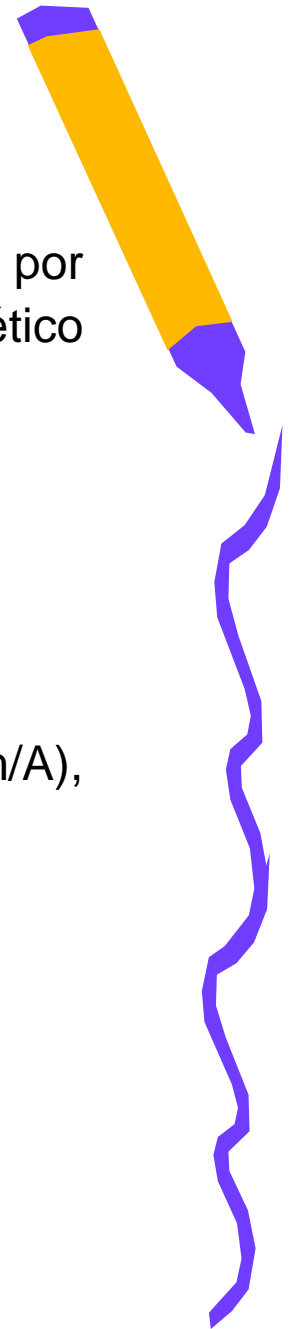
$$\text{FMM} = H \cdot \ell = 400 \cdot 0,15 = 60 \text{ Ae}$$

- b) Considerando a permeabilidade do material sendo $\mu = 5 \cdot 10^{-4} \text{ (Tm/A)}$, determine a relutância magnética do núcleo;

$$\mathfrak{R} = \frac{\ell}{\mu \cdot A} = \frac{0,15}{5 \cdot 10^{-4} \cdot 2 \cdot 10^{-4}} = \frac{0,15}{10 \cdot 10^{-8}} = 0,15 \cdot 10^7 \text{ Ae/Wb}$$

- c) Determine a densidade de fluxo magnético no núcleo (B).

$$B = \mu \cdot H = 5 \cdot 10^{-4} \cdot 400 = 0,2 \text{ T}$$



EXERCÍCIOS

17) Determine a relutância de um circuito magnético se um fluxo de $4,2 \times 10^{-4} \text{ Wb}$ for estabelecido por uma $FMM = 400 \text{ Ae}$. Determine o campo magnético indutor H para uma bobina de 6 polegadas de comprimento. **R: $952,4 \text{ kAe/Wb}$; $2624,67 \text{ Ae/m}$**

18) Se um campo magnético indutor H de 600 Ae/m for aplicado a um circuito magnético, uma densidade de fluxo de $0,12 \text{ Wb/m}^2$ é imposta. Encontre a permeabilidade μ de um material que produza o dobro da densidade de fluxo original com o mesmo H . **R: $0,0004 \text{ Wb/A.m}$**



EXERCÍCIOS

19) Em um campo magnético indutor $H = 100 \text{ Ae/m}$ é colocado um pedaço de material ferromagnético cuja permeabilidade relativa é $\mu_R = 1600$ para este valor de H . Calcular o valor da densidade de campo magnético no interior do material. **R: 0,2T.**

20) Para o mesmo material do item anterior, quando $H = 300 \text{ Ae/m}$ temos $B = 0,3 \text{ T}$. Qual o valor da permeabilidade relativa para $H = 300 \text{ Ae/m}$? **R: 796**

21) Uma espira de 30cm de diâmetro é submetida à circulação de uma corrente de 3A. Qual o valor da densidade de fluxo no centro dessa espira, estando esta no ar? E se colocarmos um material com permeabilidade relativa igual a 1000, qual será o novo valor de B ? **R: 12,56 μT ; 12,56mT**

