



**kroton**  
paixão por educar

**GRADUAÇÃO PRESENCIAL**  
**2º semestre- 2016**

**Conversão**  
**Eletromecânica de Energia**  
**Eng<sup>a</sup> Elétrica– 5º/ 6º semestres**

**Prof<sup>o</sup>. Ms.Cristiano Malheiro**

[cmalheiro@anhanguera.com](mailto:cmalheiro@anhanguera.com)  
[cmalheiro@aedu.com](mailto:cmalheiro@aedu.com)

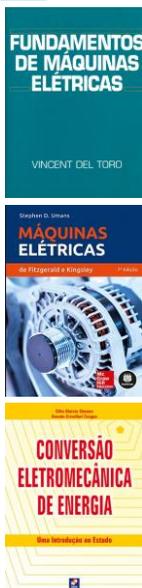
<http://cristianotm.wix.com/aulas>

1



## Aula 4

### Bibliografia Básica



1. DEL TORO, V.. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 1ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2009. No

**Acervo: 621.31042 D439f (5 exemplares)**

2. UMANS, Stephen D. **Máquinas Elétricas**. 7ª edição. Porto Alegre: Mc Graw Hill Education, 2014.

(exemplar online- arquivo pessoal do professor)

3. SIMONE, Gilio Aluísio; CREPPE, Renato Crivellari. **Conversão Eletromecânica de Energia**. 1ª ed. São Paulo: Érica, 2012, v. 1. **Acervo: 621.31 S618c (19**

**exemplares)**

2

**kroton**  
paixão por educar



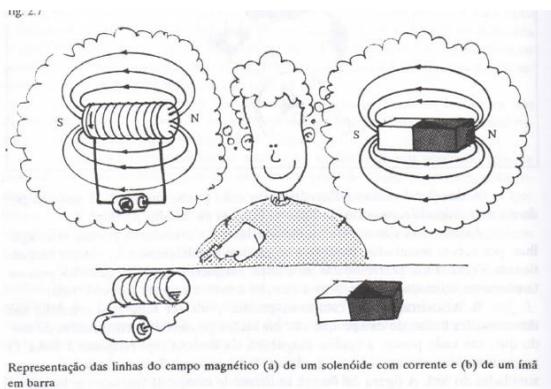
## Aula 4

### Campo Magnético

Não são só os ímãs que produzem campos magnéticos.

Esses campos sempre estarão presentes quando em fios metálicos existirem correntes elétricas.

Por exemplo, se enrolarmos um fio esmaltado em forma de bobina e ligarmos suas extremidades a uma bateria, teremos um sistema que produz um campo magnético bastante semelhante ao de um ímã. Tal campo pode ser evidenciado por meio de bússolas e representado por meio de linhas de campo



Representação das linhas do campo magnético (a) de um solenóide com corrente e (b) de um ímã em barra

3

kroton  
paixão por educar

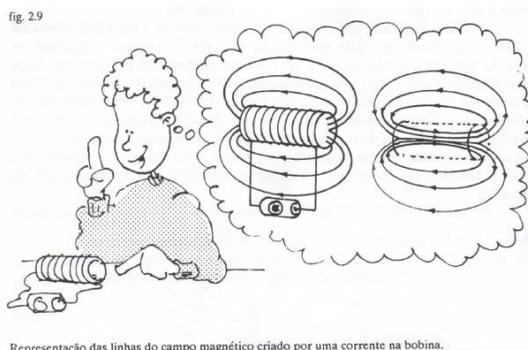


## Aula 4

### Campo Magnético

Parte do comportamento das linhas de campo magnético é descrita por uma das leis gerais do Eletromagnetismo, conhecida como Lei de Gauss magnética.

Segundo ela, não existe onde as linhas de campo magnéticas possam nascer e morrer. De acordo com ela, portanto, o campo magnético só pode ser representado por linhas fechadas, para as quais não existe o conceito de começo ou fim.



Representação das linhas do campo magnético criado por uma corrente na bobina.

4

kroton  
paixão por educar

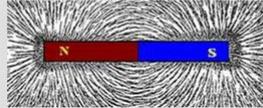


## Aula 4

### Campo Magnético



► Perto dos pólos, onde o campo magnético  $\vec{B}$  tem maior intensidade, a concentração das linhas de indução é maior, conforme

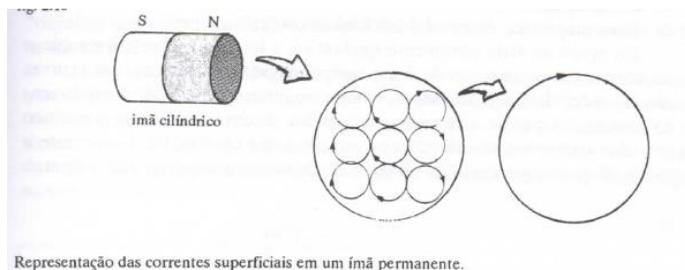


kroton  
paixão por educar



## Aula 4

### Campo Magnético



Representação das correntes superficiais em um ímã permanente.

Por estranho que pareça, os pólos de um ímã também não são pólos de verdade. Ímãs são análogos a bobinas, porque o campo magnético criado por eles se deve a correntes elétricas existentes no interior do material magnético. Essas correntes ocorrem em nível microscópico, estando associadas aos movimentos no interior do átomo.

Efeito global do ímã, é análogo a uma corrente sobre a superfície do material.

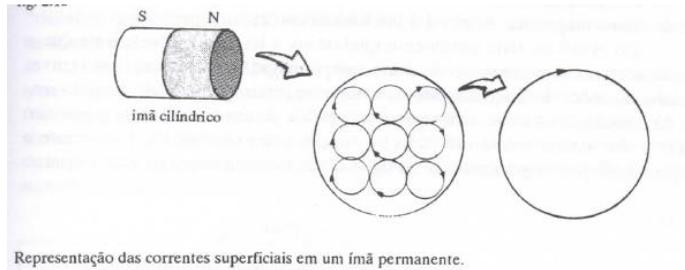
6

kroton  
paixão por educar



## Aula 4

### Campo Magnético



É análogo a bobina, sendo no primeiro caso as correntes superficiais responsáveis pela criação do campo magnético, enquanto que no outro é a corrente no fio condutor que cria o campo.

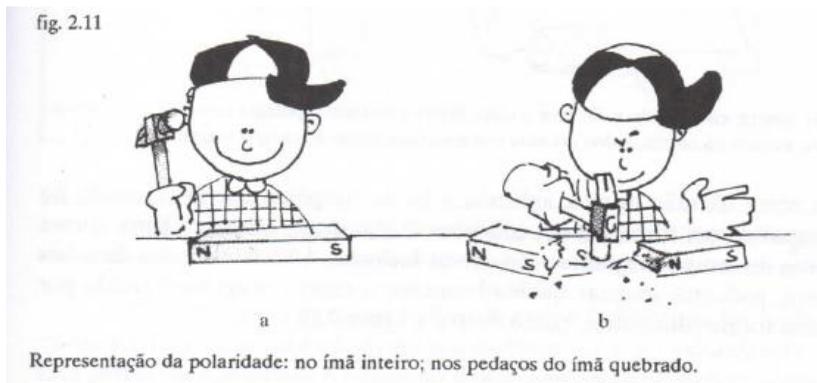
7

kroton  
paixão por educar



## Aula 4

### Campo Magnético



8

kroton  
paixão por educar



## Aula 4

### Campo Magnético

Em resumo, não podemos separar os pólos norte e sul tanto no caso de bobinas, como no de ímãs. Nos dois casos as linhas de campo magnético são constituídas por linhas fechadas e a palavra pólo é utilizada figuradamente.

De acordo com o que vimos discutindo, ímãs e bobinas criam campos magnéticos e, em ambos os casos, tal campo é devido a correntes elétricas.

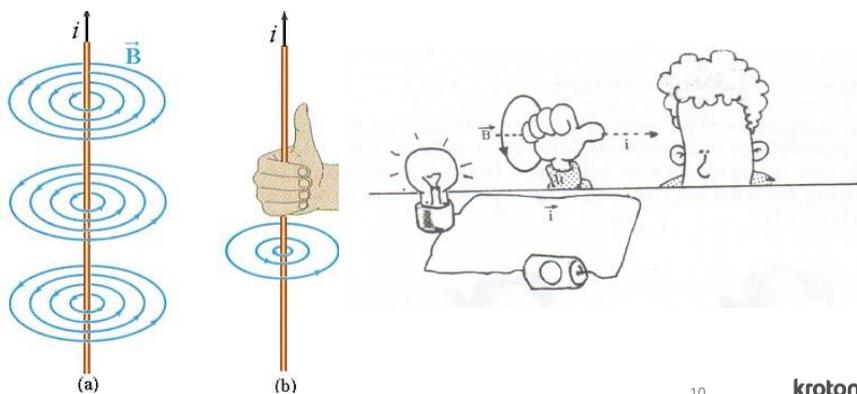
9



## Aula 4

### Lei de Ampère

Pela Lei de Ampère: Regra da mão direita- envolvendo o fio com a mão direita e fazendo o polegar coincidir com o sentido da corrente elétrica os outros dedos indicam o sentido das linhas de campo magnético.



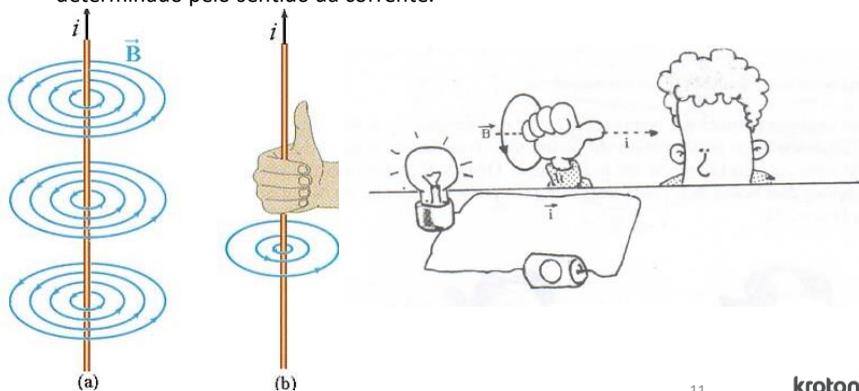
10



## Aula 4

### Lei de Ampère

Do ponto de vista puramente qualitativo, a lei de Ampère afirma que o fio com corrente tem em torno de si um campo magnético cujas linhas são curvas fechadas ao redor do fio. O sentido do campo magnético é determinado pelo sentido da corrente.



11

kroton  
passão por educar

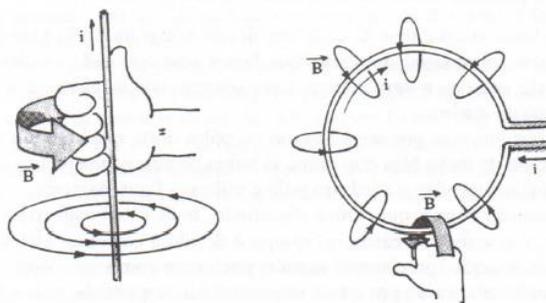


## Aula 4

### Lei de Ampère

A regra da mão direita, aplicada à lei de Ampère, nos dá o sentido do campo magnético em torno de um condutor. Além disso, a lei de Gauss afirma que as linhas de campo magnético são curvas fechadas. Utilizando essas duas leis em conjunto, podemos mapear qualitativamente o campo magnético criado por fios de várias formas diferentes, como ilustra a figura 2.13.

fig. 2.13



“Aplicação” da regra da mão direita em algumas situações.

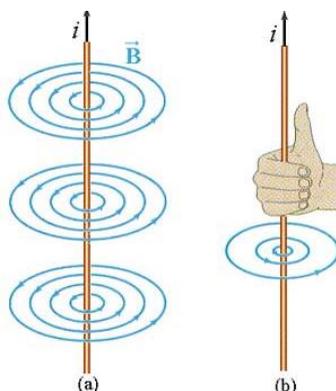
roton  
do por educar



## Aula 4

### Lei de Ampère

Pela Lei de Ampère:



A lei de Ampère relaciona os campos magnéticos às correntes elétricas que os produzem. Usando essa lei, pode-se determinar, o campo magnético determinado ao longo ou corrente associada a um determinado campo magnético.

Estabelece que para qualquer caminho de circuito fechado, a soma dos elementos vezes o comprimento do campo magnético na direção do elemento de comprimento é igual à permeabilidade vezes a corrente elétrica no circuito fechado.

13

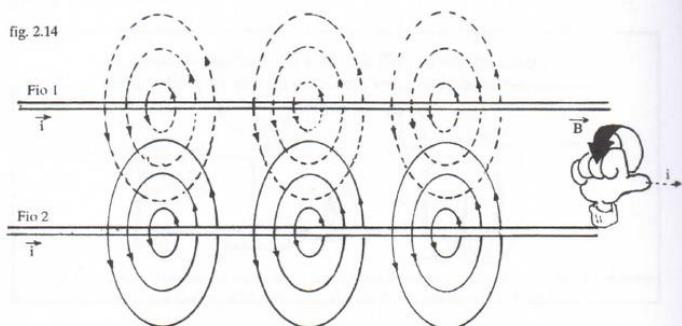
kroton  
paixão por educar



## Aula 4

### Presença de Força

Isso significa que um fio com corrente, em presença de um campo magnético, criado por um outro fio com corrente ou um ímã permanente, está sujeito à ação de uma força. Para ilustrar, vamos considerar uma situação particular em que temos dois fios paralelos percorridos por correntes de mesmo sentido como ilustra a figura 2.14.



Representação das linhas de campo magnético criadas por correntes de mesmo sentido em dois fios paralelos.

kroton  
paixão por educar



## Aula 4

### Força entre Condutores Paralelos

Sejam dois fios condutores paralelos retos e infinitos percorridos pelas correntes elétricas  $i_1$  e  $i_2$  (Fig.25).

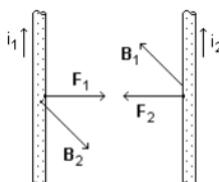


Fig.25

A corrente  $i_1$  gera um campo  $B_1$  no fio com a corrente  $i_2$ , de modo que sobre um segmento de comprimento  $L$  desse fio existe uma força  $F_2$ , e a corrente  $i_2$  gera um campo  $B_2$  no fio com a corrente  $i_1$ , de modo que sobre um segmento de comprimento  $L$  desse fio existe uma força  $F_1$ . Essas duas forças têm a mesma direção, contida no plano dos fios e perpendicular a eles, e também o mesmo módulo:

15

**kroton**  
paixão por educar



## Aula 4

### Força entre Condutores Paralelos

$$F_1 = i_1 L B_2$$

e

$$F_2 = i_2 L B_1$$

Mas:

$$B_1 = \frac{\mu_0 i_1}{2\pi d}$$

e

$$B_2 = \frac{\mu_0 i_2}{2\pi d}$$

de modo que:

$$F_1 = F_2 = \frac{\mu_0 i_1 i_2 L}{2\pi d}$$

Assim, essas forças  $F_1$  e  $F_2$  constituem um par ação-reação, no sentido da terceira lei de Newton. Se as duas correntes elétricas têm o mesmo sentido, as forças atuam no sentido de aproximar os fios, e se as correntes elétricas têm sentidos opostos, as forças atuam no sentido de afastar os fios.

**kroton**  
paixão por educar

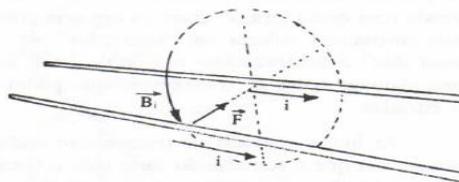
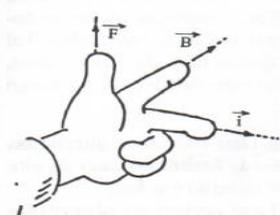


## Aula 4

A força de origem magnética tem algumas propriedades que são bastante diferentes das de forças radiais, tratadas na Mecânica, cuja direção de atuação coincide com a reta que passa pelo centro dos objetos em interação, como é o caso da força gravitacional. A força magnética age numa direção que é perpendicular ao plano formado pelo campo magnético e a corrente.

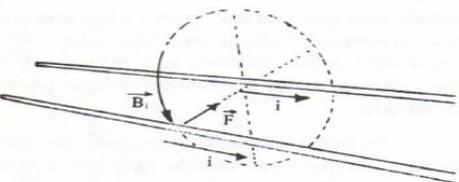
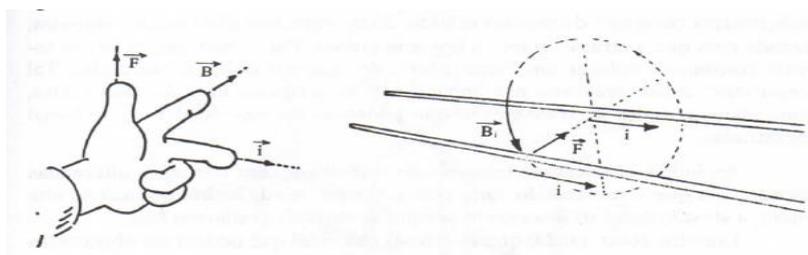
Existe uma regra prática para se determinar a direção de atuação da força magnética, a qual faz uso da mão esquerda. Com os dedos dispostos conforme indica a figura 2.15 é possível determinar a direção e sentido da força, fazendo coincidir a direção e sentido do campo magnético com a do dedo indicador e a da corrente no trecho de fio considerado com a do dedo médio. A direção e sentido do dedo polegar coincidirá com a da força. Essa maneira de obtermos a direção e sentido da força é denominada de *regra da mão esquerda*.

fig. 2.15



## Aula 4

### RME- Regra da Mão Esquerda.



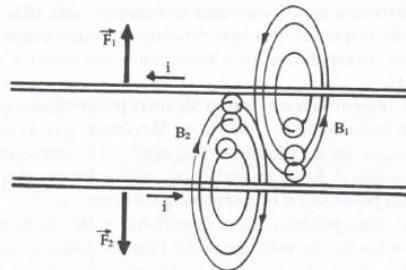


## Aula 4

### RME- Regra da Mão Esquerda

Para completar a discussão desse exemplo é preciso lembrar que o fio 1 também cria um campo magnético que causa a força sobre o fio 2. As ações do fio 1 sobre o fio 2 e as do fio 2 sobre o fio 1 ocorrem simultaneamente, fazendo com que os fios estejam sujeitos a forças cujos sentidos são responsáveis por uma atração entre eles. Se a corrente de um dos fios fosse invertida, teríamos uma força de repulsão conforme ilustra a figura 2.16.

fig. 2.16



Representação da corrente elétrica e dos vetores campo magnético ( $\vec{B}$ ) e da força no trecho paralelo do fio com corrente.

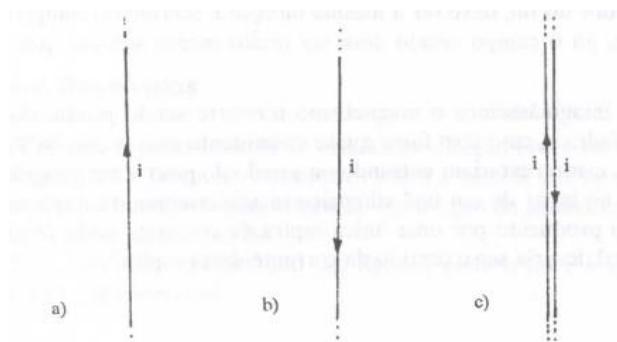
19

kroton  
paixão por educar



## Aula 4

**Exemplo 1: Desenhe as linhas de campo magnético criado por um fio com corrente  $i$ , nas situações representadas pelas figuras a, b e c:**



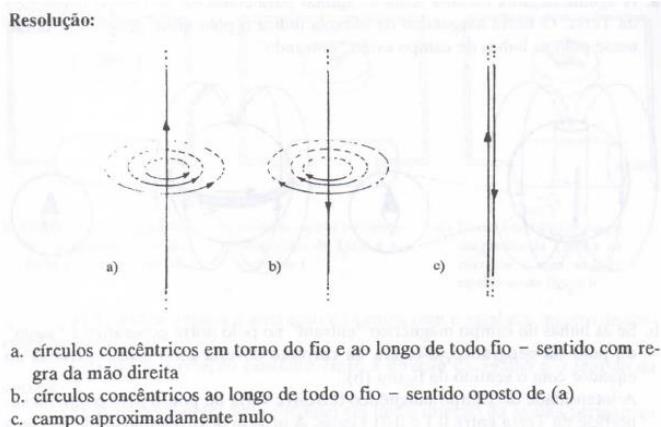
20

kroton  
paixão por educar



## Aula 4

**Exemplo 1: Desenhe as linhas de campo magnético criado por um fio com corrente  $i$ , nas situações representadas pelas figuras a, b e c:**



21

kroton  
paixão por educar

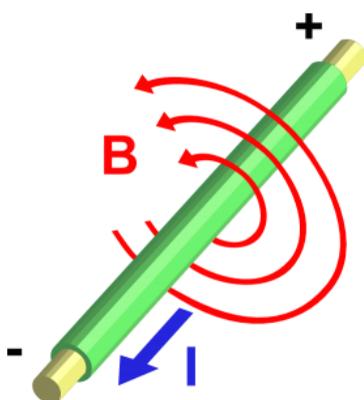


## Aula 4

### Lei de Ampère

Em termos da corrente total que inclui tanto a corrente livre e ligada, a linha integrante do campo  $B$  (em tesla, T) em torno da curva  $C$  fechando o campo magnético é proporcional ao total  $I$  da passagem de corrente através de uma superfície  $S$  (delimitada por  $C$ )

$$\oint_C \mathbf{B} \cdot d\boldsymbol{\ell} = \mu_0 \iint_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} = \mu_0 I$$



Estabelece que para qualquer caminho de circuito fechado, a soma dos elementos vezes o comprimento do campo magnético na direção do elemento de comprimento é igual à permeabilidade vezes a corrente elétrica no circuito fechado.

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

$B$  é campo magnético ou densidade de fluxo magnético.

22

kroton  
paixão por educar

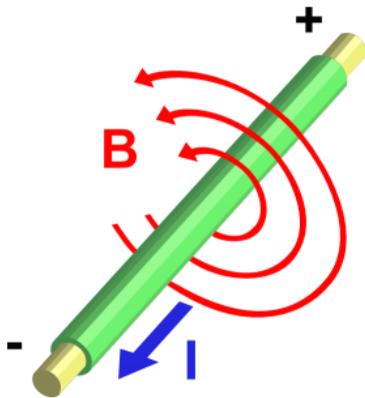


## Aula 4

### Lei de Ampère

Em termos da corrente total que inclui tanto a corrente livre e ligada, a linha integrante do campo  $B$  (em tesla, T) em torno da curva  $C$  fechando o campo magnético é proporcional ao total  $I$  da passagem de corrente através de uma superfície  $S$  (delimitada por  $C$ )

$$\oint_C \mathbf{B} \cdot d\boldsymbol{\ell} = \mu_0 \iint_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} = \mu_0 I$$



$$B = \frac{\mu I}{2 \cdot \pi \cdot r} \quad (\text{T}) \text{ ou } (\text{Wb/m}^2)$$

$B$  é campo magnético ou densidade de fluxo magnético.

$\mu$  é a permeabilidade do meio: é função da taxa com que a densidade de fluxo magnético aumenta ou diminui para uma corrente específica  $I$ .

Normalmente:  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  (Newton/A<sup>2</sup>)

23

kroton  
paixão por educar



## Aula 4

### Lei de Ampère (pág. 2 Del Toro)

$$F = I_2 B \quad (1-2)$$

onde

$$B = \frac{\mu I_1}{2 \pi r} \quad (1-3)$$

Aqui, por razões que se tornam agora claras,  $B$  é definido<sup>3</sup> como o campo magnético ou, ainda melhor, como a *densidade de fluxo magnético* existente na região onde está o condutor elementar 2 e é expresso

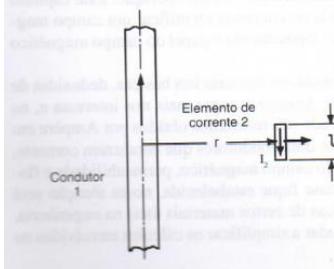


Fig. 1.1 Ilustração da força existente entre o elemento de corrente  $I_2$  e um condutor longo que conduz a corrente  $I_1$ , como descrito pela lei de Ampère.

24

kroton  
paixão por educar



## Aula 4

### Permeabilidade magnética

Devido a forma como a densidade de fluxo foi definida, indica que o efeito do meio pode ser representado em função da taxa com a qual ele aumenta ou diminui a densidade de fluxo magnético para uma corrente específica  $I$ .

Quando os condutores da Fig. 1-1 forem hipoteticamente colocados no vácuo e a força for medida para valores especificados de  $I_1, I_2, l$  e  $r$ , o valor para a permeabilidade do vácuo obtida da Eq. (1-1) e expresso em unidades mks será

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \quad (1-4)$$

A unidade de permeabilidade também sai da Eq. (1-1). Desta forma

$$\mu_0 \propto \frac{\text{newtons}}{\text{ampère}^2}$$

onde  $\propto$  significa "é proporcional a". Mas

paixão por educar



## Aula 4

### Permeabilidade magnética

Naqueles casos, onde o meio for diferente do vácuo, a permeabilidade absoluta é novamente, e de forma fácil, calculada da Eq. (1-1). Uma comparação com o resultado obtido para o vácuo conduz a uma grandeza chamada *permeabilidade relativa*,  $\mu_r$ . Sua expressão matemática é

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (1-5)$$

A Eq. (1-5) indica claramente que a permeabilidade relativa é simplesmente um número que expressa a taxa na qual a densidade do fluxo magnético aumenta ou diminui, em relação à do vácuo. Para alguns materiais, como o Deltamax, o valor de  $\mu_r$  pode exceder a 100.000. A maioria dos materiais ferromagnéticos, contudo, tem valores de  $\mu_r$  na casa de centenas ou milhares.



## Aula 4

**Exemplo 2 (pág. 40 Del Toro- exercício 1.2):** Os fios indicados na figura são longos, retos, paralelos e estão completamente imersos em ferro com permeabilidade relativa igual a 1000. Cada fio conduz uma corrente de 10 A.

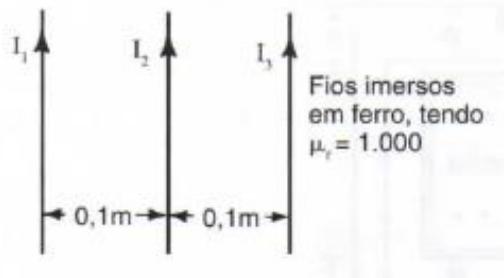
- Calcule o módulo e o sentido da força resultante por metro no fio no qual  $I_2$  circula.
- (a) Calcule o módulo e o sentido da força resultante por metro no fio no qual  $I_1$  circula.
- Repita (a) parte a para o terceiro fio.

27



## Aula 4

**Exemplo 2 (pág. 40 Del Toro):** Os fios indicados na figura são longos, retos, paralelos e estão completamente imersos em ferro com permeabilidade relativa igual a 1000. Cada fio conduz uma corrente de 10 A.



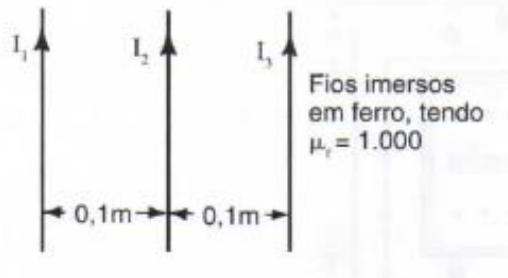
28





## Aula 4

**Exemplo 2 (pág. 40 Del Toro- exercício 1.2):** Repita o Prob. 1.2 para a corrente  $I_2$  circulando em sentido oposto a  $I_1$  e  $I_3$



29



## Aula 4

### Definições de Grandezas Magnéticas- Fundamentos de Máquinas Elétricas Capítulo 1 (2 a 15)

- Força magneto-motriz;
- Fluxo magnético;
- Relutância magnética;
- Lei de Ohm para circuitos magnéticos;
- Densidade de fluxo magnético;
- Intensidade de campo magnético.

Analogia com Circuitos Elétricos:

- Força Eletromotriz;
- Corrente Elétrica;
- Resistência Elétrica;
- Lei de Ohm;
- Densidade de corrente;
- Intensidade de campo elétrico.

30



**kroton**   
paixão por educar

## Bibliografia desta aula:

1. DEL TORO, V.. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 1<sup>a</sup> edição. Rio de Janeiro: LTC, 2009.
2. GREF. Física 3- **Eletromagnetismo**. EDUSP.

31



32