

**kroton**  
paixão por educar

**GRADUAÇÃO PRESENCIAL**  
**2º semestre- 2018**

**Conversão**  
**Eletromecânica de Energia**  
**Eng<sup>a</sup> Elétrica- 7º semestre**

**Profº. Ms.Cristiano Malheiro**

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

<http://cristiano1m.wix.com/aulas>

1



## Aula 5

### Apresentação do PEA

Principais assuntos abordados:

Unidade 1   Componentes discretos, circuitos e materiais magnéticos	7
Seção 1.1 - Circuitos magnéticos	9
Seção 1.2 - Materiais magnéticos	25
Seção 1.3 - Componentes discretos usados em eletricidade	39
Unidade 2   Conversores eletromecânicos, sistemas magnéticos, força e conjugado magnético	53
Seção 2.1 - Conversão eletromecânica de energia no campo elétrico e no campo magnético	55
Seção 2.2 - Sistemas de campo magnético	67
Seção 2.3 - Força e conjugado magnético	81



## Aula 5

### Apresentação do PEA

Principais assuntos abordados:

<b>Unidade 3   Indutores, circuitos trifásicos e transformadores de tensão e corrente</b>	<b>97</b>
Seção 3.1 - Dispositivos e Circuitos Indutores	99
Seção 3.2 - Dispositivos e Circuitos Transformadores	117
Seção 3.3 - Circuitos trifásicos e transformadores de tensão e corrente	135
<b>Unidade 4   Conversores de corrente alternada, corrente contínua e introdução a máquinas elétricas.</b>	<b>155</b>
Seção 4.1 - Conversores de corrente alternada	157
Seção 4.2 - Conversores de corrente contínua	175
Seção 4.3 - Introdução a máquinas elétricas	189

3



## Aula 5

### Bibliografia Básica



4



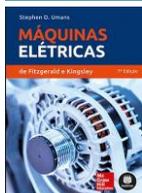


## Aula 5

### Bibliografia Complementar



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)

5



## Aula 5

### CrITÉrios de Avaliação

1. Avaliações (ambiente online):

B1 – peso 4- 1º bimestre:

- 3 pontos (**Atividades AVA**)
- 7 pontos (**Avaliação Oficial Professor - 02/10/2018\*\*\***).

B2 – peso 6 – 2º bimestre:

- 3 pontos (**Atividades do Professor**)
- 7 pontos (**Avaliação Institucional - 04/12/2018\*\*\***).

SUB ou Avaliação de 2ª Chamada – P1 ou P2

- 7 pontos (Aval. Oficial para **11/12/2018\*\*\***).

Exame (Apenas para M>=4,0)

- 10 pontos (Avaliação Oficial- **18/12/2018\*\*\***).

\*\*\*Previsão!!!

6





## Aula 5

### Núcleos ferromagnéticos com entreferro

Os dispositivos eletromecânicos apresentam como característica uma parte do núcleo que é móvel, que, no caso dos conversores eletromecânicos, se movimenta para realizar trabalho. Sempre teremos um trecho de ar entre a parte móvel e o restante do núcleo. Esta parte de ar é o entreferro, que pode assumir formas diversas, dependendo do dispositivo, como, por exemplo, em máquinas elétricas rotativas, entreferro é radial, pois a parte móvel tem a forma de um cilindro.

O entreferro apresenta uma descontinuidade de ar no núcleo de material ferromagnético

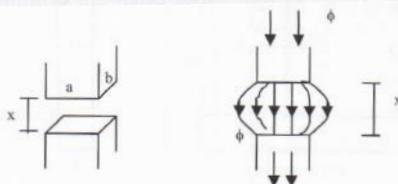


Figura 21 -Entreferro com comprimento x - efeito do espraio.

kroton  
passão por educar



## Aula 5

### Núcleos ferromagnéticos com entreferro

Nas construções eletromecânicas, o entreferro é sempre o menor possível, a fim de não elevar a relutância do circuito para valores incompatíveis com o bom desempenho do dispositivo. O fenômeno que ocorre no entreferro traduz-se por uma tentativa de fuga das linhas de campo, aumentando a seção por onde o fluxo magnético passa pelo entreferro. Veja a figura 21:

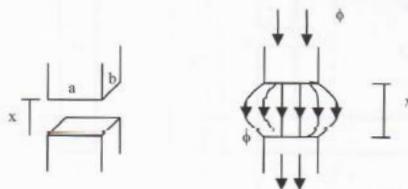


Figura 21 -Entreferro com comprimento x - efeito do espraio.

Na figura 21 observa-se que as linhas de campo se deformam quando encontram o ar (entreferro). Este fenômeno é chamado de espraio de fluxo.

Para se levar em consideração o efeito do espraio, visto que existe uma redução da indução magnética B no entreferro, uma vez que a seção efetiva por onde o fluxo passa aumenta, deve-se aumentar cada dimensão pelo comprimento do entreferro.

kroton  
passão por educar



## Aula 5

### Núcleos ferromagnéticos com entreferro

No caso da figura na página anterior, onde temos uma seção retangular, a área do núcleo ferromagnético será :

$$S_{FE} = a \cdot b$$

Já a área efetiva do entreferro com comprimento igual a  $x$  terá o seguinte valor:

$$S_o = (a + x) \cdot (b + x) \quad (22)$$

Caso a seção do núcleo ferromagnético seja circular, tem-se:

$$S_{FE} = \pi \cdot r^2$$

E a área efetiva do entreferro será:

$$S_o = \pi \cdot (r + x)^2 \quad (23)$$

9

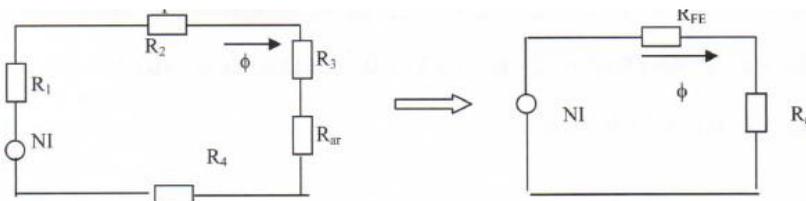


## Aula 5

### Núcleos ferromagnéticos com entreferro

#### Importante:

Na resolução de circuitos magnéticos, quando estamos montando o circuito elétrico equivalente, o entreferro aparece como um segundo material, sendo representado por uma relutância do ar ( $R_o$ ), em série com o restante do trecho considerado.

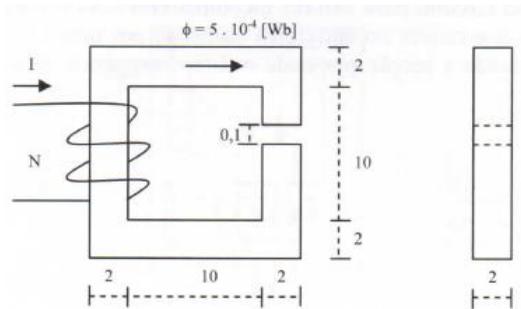


10



## Aula 5

**Exercício 7:** O núcleo abaixo é constituído de material aço fundido, possuindo um entreferro de 0,1cm. Todas as dimensões estão em centímetros e são apresentadas duas vistas: frontal e lateral do núcleo. Determinar a força magnetomotriz (NI) para se obter um fluxo magnético de  $\Phi = 5,0 \times 10^{-4}$  [Wb].



11

kroton  
passado por educar

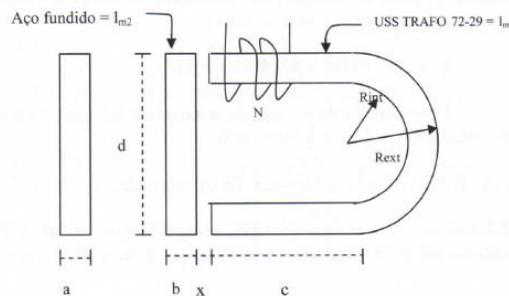


## Aula 5

**Exercício 8:** Uma bobina de 800 espiras é responsável pela FMM no núcleo ferromagnético abaixo. O núcleo é composto por dois materiais (material 1= USS TRAF0 72-29 e material 2= aço fundido). Considere o espraiamento e determine a corrente necessária de forma a manter um fluxo magnético de  $40 \times 10^{-4}$  [Wb], através dos entreferros de 0,1cm cada.

Dados:

Rexterno = 15 cm  
Rinterno = 10cm  
a = 8 cm  
b = 5cm  
c = 20cm  
d = 30cm  
x = 0,1cm  
seção retangular uniforme  
ao longo do núcleo.



12

kroton  
passado por educar



## Aula 5

**Segundo tipo de exercício:** conhece-se a FMM, e o fluxo magnético é a incógnita.

**2.3.3.a)** se o núcleo não possuir entreferro e for composto por um único material com seção constante, a solução é obtida diretamente:

$$\text{Tem-se a FMM} = NI \rightarrow H_{FE} = NI / l_{fe} .$$

Uma vez obtido o valor da intensidade de campo magnético, consulta-se o gráfico do material, obtendo-se o valor de B.

Com B determinado, obtém-se o fluxo magnético:  $\phi = B / S$

**2.3.3.b)** se o núcleo possuir dois materiais com seções diferentes ou com entreferro, a solução não é obtida diretamente, visto que o meio não é linear.

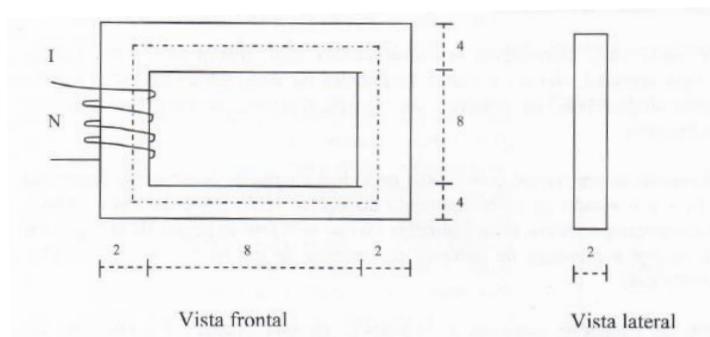
13

**kroton**  
possível por educar



## Aula 5

**Exercício 9:** Considere o núcleo feito com material aço fundido, e que a  $FMM=NI=120$ [Aesp]. Determine o fluxo magnético.



14

**kroton**  
possível por educar



## Aula 5

### Exercício 9- Solução:

#### Método das tentativas:

Adota-se um fluxo e determina-se a FMM correspondente como nos exercícios anteriores.

Quando o fluxo corresponder a FMM dada, esse fluxo será a solução.

Como adotar o fluxo?

Inicia-se por um fluxo menor do que o obtido, se toda a FMM estivesse aplicada sobre o material de maior relutância.

A partir daí, vamos decrescendo o valor do fluxo e calculando o B e o H de cada trecho, equacionando o circuito magnético até chegar no valor da FMM = NI dada.

No caso, o circuito acima será dividido em dois trechos:

Trecho 1:  $S=8 \text{ cm}^2$ ;  $l= 20,0 \text{ cm}$

Trecho 2:  $S= 4 \text{ cm}^2$ ;  $l= 24,0 \text{ cm}$

15



## Aula 5

### Exercício - Solução:

No caso, o circuito acima será dividido em dois trechos:

Trecho 1:  $S=8 \text{ cm}^2$ ;  $l= 20,0 \text{ cm}$

Trecho 2:  $S= 4 \text{ cm}^2$ ;  $l= 24,0 \text{ cm}$

O trecho de maior relutância é o trecho 2. Assim:  $H_2 l_2 = NI = 120 \rightarrow H_2 = 500$  [Aesp/m].

Consultando a curva de magnetização do "Cast Steel" temos  $B_2= 0,76$  [T].

O fluxo magnético nesta situação será:  $\phi_2 = 3,04 \times 10^{-4}$  [Wb].

Passamos agora para as tentativas, tomando como ponto de partida, por exemplo, o valor de fluxo de  $2,8 \cdot 10^{-4}$  [Wb], preenchemos a tabela a seguir:

$\phi \times 10^{-4}$ [Wb]	$B_1$ [Wb/m <sup>2</sup> ]	$B_2$ [Wb/m <sup>2</sup> ]	$H_1$ [Aesp/m]	$H_2$ [Aesp/m]	NI [Aesp]
2,8	0,35	0,70	280	460	166,4
2,4	0,30	0,60	250	400	146
2,0	0,25	0,50	225	350	129
1,8	0,23	0,45	210	325	120

Conclusão: o fluxo no núcleo ferromagnético é  $1,8 \times 10^{-4}$  [Wb], que corresponde a FMM = 120 [Aesp].

16



**kroton**   
paixão por educar

## Bibliografia desta aula:

1.

SOARES, Ronaldo Alves.  
**Conversão  
Eletromecânica de  
Energia**. 1ª edição. São  
Paulo: Mc Editora  
Universitária  
Leopoldianum, 2008.

2. **AVAEDUC**

17



18