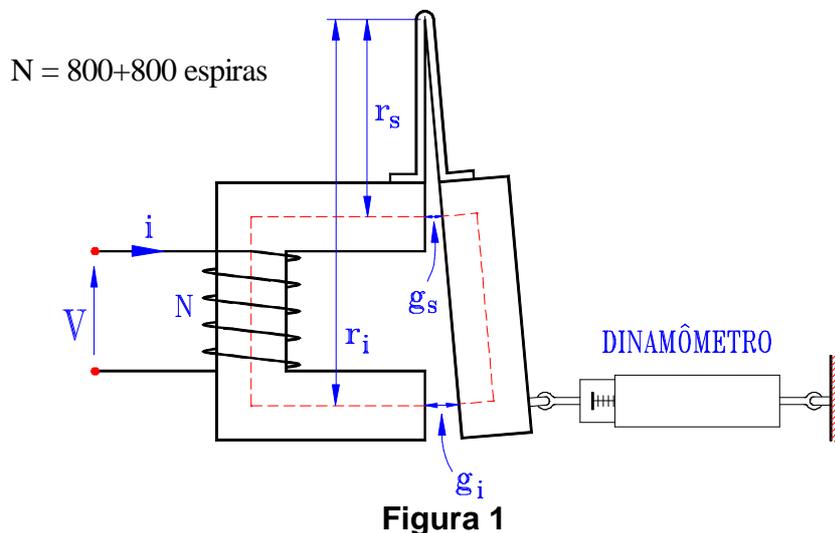


## OBJETIVO

Aplicar os princípios eletromagnéticos a um eletroímã e verificar a **validade** e as **restrições** das leis envolvidas.

## DISPOSITIVO EM ESTUDO

Iremos estudar as relações eletromagnéticas e o princípio de conversão eletromecânica desenvolvidos em um eletroímã com entreferro variável e dinamômetro acoplado à parte móvel, conforme ilustrado na figura 1.



### 1 - Dados Geométricos do Núcleo

#### Ensaio:

- Obtenha e anote as seguintes medidas do eletroímã:
  - Comprimento médio do núcleo  $\ell_n =$
  - Secção transversal do núcleo  $A =$
  - Raio de giro superior  $r_s =$
  - Raio de giro inferior  $r_i =$

Note que para pequenas aberturas angulares no entreferro:

$$g_s \approx \left( r_s / r_i \right) \cdot g_i$$

$g_s$  - entreferro superior

$g_i$  - entreferro inferior

e, portanto, o entreferro total passa a ser função apenas de  $g_i$ :

$$g_T = g_s + g_i \approx (r_s/r_i + 1) \cdot g_i$$

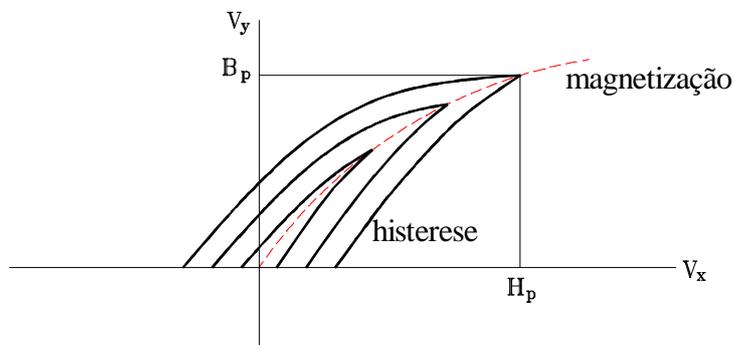
## 2 - Visualização do Laço de Histerese no Osciloscópio

### Ensaio:

- Utilizando o circuito do **Apêndice I**, obtenha o laço de histerese do eletroímã (800 espiras) sem e com entreferro. Em ambos os casos aplicar tensão de 200V rms. Comente eventuais diferenças.

## 3 - Determinação das Características Magnéticas do Núcleo

A curva de magnetização (c.c.) do núcleo passa pelos vértices dos laços de histerese (c.a.), quando se varia gradualmente a amplitude da tensão aplicada, conforme ilustrado na figura 2.



**Figura 2**

Usando o método de integração de tensão através de circuito RC (veja **Apêndice I**), pode-se notar que o laço de histerese, observado através do osciloscópio, é composto dos seguintes sinais:

no eixo **x**:  $H = \frac{N \cdot I}{\ell_n} = \frac{N}{\ell_n \cdot R_{sh}} \cdot V_x$  ( $V_x \rightarrow$  valor de pico)

no eixo **y**:  $B = \frac{1}{N \cdot A} \int e \cdot dt = \frac{R \cdot C}{N \cdot A} \cdot V_y$  ( $V_y \rightarrow$  valor de pico)

e, portanto, no vértice do laço  $(H_p, B_p)$ , tem-se a relação de permeabilidade magnética:

$$\mu \approx \frac{B_p}{H_p} = \mu_r \cdot \mu_0$$

a partir da qual pode-se estimar o valor da permeabilidade relativa do núcleo ( $\mu_r$ ) em relação ao ar, para o qual  $\mu_0 \approx 4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m.

### Ensaio:

- Medir  $R_{sh}$ .

- Obter a curva  $[B \times H]$  do núcleo do eletroímã (800 espiras), sem entreferro, aplicando tensão c.a. variável de 0 a 220V rms.
- Obter a curva  $[\mu_r \times H]$ .
- Apresentar tabelas com todos os valores medidos e calculados.

#### 4 - Saturação do Núcleo

##### Ensaio:

- Um valor típico do ponto onde se inicia a saturação do material ferromagnético (curva  $[B \times H]$  deixa de ser linear) é 1,6 T. Com base na curva  $[B \times H]$  obtida no item 3, comente a esse respeito.

#### 5 - Efeito do Entreferro sobre o Campo Magnético

Assumindo conhecidas as seguintes relações eletromagnéticas:

Força magnetomotriz	$\mathfrak{F} = fmm = N \cdot I$	[A] (A.esp)
Intensidade de campo magnético	$H = (N \cdot I) / \ell$	[A/m]
Densidade de fluxo magnético	$B = \mu \cdot H$	[T] (Wb/m <sup>2</sup> )
Fluxo magnético	$\phi = B \cdot A$	[Wb]

pode-se calcular os valores de  $H$ ,  $B$  e  $\phi$  para uma dada corrente e condições de entreferro.

Quando o caminho magnético é composto por meios diferentes (ferro e ar, por exemplo), deve-se lembrar de desdobrar as equações anteriores para cada trecho específico como no caso da figura 1 onde:

$$N \cdot I = H_n \cdot \ell_n + H_g \cdot (g_i + g_s)$$

Nesse caso, o fluxo magnético permanece o mesmo ao longo do circuito, ou seja:

$$\phi = B_n \cdot A_n = B_g \cdot A_g$$

e, idealmente, as áreas transversais do núcleo e do entreferro podem ser supostas iguais, resultando:

$$B_n = B_g$$

##### Ensaio:

- Utilizando um medidor de fluxo magnético, meça o fluxo no núcleo do eletroímã (800 espiras) sem e com entreferro ( $g_i = 1$  mm), para uma corrente c.c. suprida pelo medidor em torno de 450 mA, em dois pontos diferentes do núcleo. Comente as eventuais diferenças.

- Para o valor de corrente ajustado no medidor, calcule os valores de  $H$ ,  $B$  e  $\phi$  no núcleo do eletroímã, sem entreferro.
- Com base no exemplo 1.2, página 9, do livro *Principles of Electric Machines and Power Electronics*, de P.C. Sen, calcule os valores de  $H$ ,  $B$  e  $\phi$  no núcleo do eletroímã, com entreferro ( $g_i = 1$  mm).
- Compare os valores obtidos nos dois casos para  $H$ ,  $B$  e  $\phi$ , e descreva o que aconteceu ao se introduzir o entreferro.
- Para o eletroímã com entreferro ( $g_i = 1$  mm), calcule a corrente necessária para produzir o mesmo fluxo calculado sem entreferro. Compare os valores de corrente e justifique a diferença.

## 6 - Cálculo das Relutâncias

A relutância do circuito magnético é dada por:

$$\mathfrak{R} = \frac{\ell}{\mu \cdot A} \quad [\text{A/Wb}] \quad (\text{A-esp/Wb})$$

onde  $\ell$  - comprimento médio do caminho magnético  
 $A$  - área transversal do “condutor magnético”  
 $\mu$  - permeabilidade do meio

A relação acima deve ser aplicada a cada trecho do circuito magnético que contém diferentes características magnéticas, resultando relutâncias **em série** para um caminho magnético fechado. Circuitos magnéticos com ramificações produzem relutâncias **em paralelo**. A associação série-paralela das relutâncias é similar à de resistências elétricas.

### Ensaio:

- Para as condições do item 5:
  - Calcule a relutância total do eletroímã, sem entreferro.
  - Calcule a relutância total do eletroímã com entreferro ( $g_i = 1$  mm), utilizando a reta de carga.
  - Verifique a relação  $N \cdot I = \mathfrak{R} \cdot \phi$  para os dois casos.

## 7 - Efeito do Espriamento do Fluxo no Entreferro

Uma vez que ocorre o fenômeno do espriamento do fluxo magnético, principalmente nos trechos com maior relutância, é necessário estimar a seção transversal efetivamente ocupada pelo fluxo no entreferro. Uma regra prática muito utilizada considera que, para um entreferro  $g$ , a região ocupada pelo fluxo neste entreferro aumenta de  $g$  em cada dimensão devido ao espalhamento no ar. A figura 3 ilustra o aumento efetivo de área da seção transversal de  $A$  para  $A'$ . Essa regra não leva em conta a dispersão causada pela

saturação do núcleo.

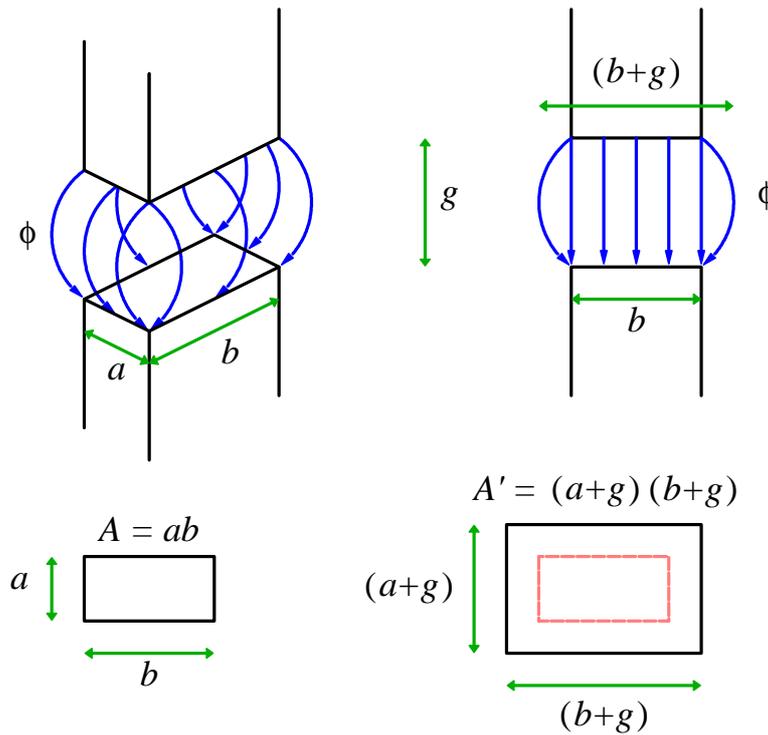


Figura 3

#### Ensaio:

- Recalcule o fluxo magnético resultante para o valor de corrente do item 5 e  $g_i = 1 \text{ mm}$ , porém considerando o espriamento no entreferro. Compare e comente.
- Calcule a variação percentual da relutância do eletroímã causada pelo efeito do espriamento no entreferro, para  $g_i = 1 \text{ mm}$ . Comente.
- Verifique novamente a relação  $N \cdot I = \mathfrak{R} \cdot \phi$  (com entreferro).

#### OBSERVAÇÃO

**A PARTIR DESTES ITENS INCLUA O ESPRAIMENTO EM TODOS OS CÁLCULOS.**

### 8 - Cálculo da Indutância

A indutância  $L$  de um circuito representa o fluxo enlaçado ( $\lambda = N \cdot \phi$ ) por unidade de corrente:

$$L = \frac{\lambda}{I} = N \cdot \frac{\phi}{I} \quad [\text{H}]$$

**Ensaio:**

- Calcule as indutâncias (em Henry) através das medidas do fluxo magnético.
- Mostre que  $L$  é uma *característica do circuito magnético* dada por  $L = N^2 / \mathfrak{R}$ .
- Com base nesta expressão e para os valores do item 6:
  - Calcule a indutância, sem entreferro, para  $N = 800$  espiras.
  - Calcule a indutância com  $g_i = 1$  mm,  $N = 800$  espiras.
  - Compare os resultados obtidos.

---

## ET521 – Laboratório de Princípios de Conversão de Energia

2º semestre 2012

### Módulo 2 - Estudo de Eletroímã

#### Parte 2

---

#### 9 - Força Magnetomotriz

Vimos que a f.m.m. necessária para estabelecer um determinado fluxo magnético  $\phi$  vale:

$$\mathfrak{F} = fmm = N \cdot I$$

Essa relação sugere que se pode fixar uma f.m.m. “trocando” o número de espiras ( $N$ ) por corrente elétrica ( $I$ ). Supondo que o fluxo e o circuito magnético são mantidos constantes, resultará uma força de atração constante como mostrado adiante. Pode-se, portanto, comprovar a relação da f.m.m. acima, medindo a força de atração resultante para diferentes combinações de  $N \cdot I = \text{cte}$ .

#### Ensaio:

- Utilizando o dinamômetro, meça a corrente c.c. mínima no eletroímã, sem entreferro, que sustenta uma força de atração de 3 kgf para 1600 espiras e 800 espiras.
- Verifique se resulta o mesmo fluxo nos dois casos.
- Repita os dois itens anteriores para o entreferro  $g_i = 1$  mm, com 800 e 1600 espiras.
- Comente os resultados obtidos.

#### 10 - Cálculo da Energia Acumulada no Campo Magnético

A energia acumulada no campo magnético equivale à área da característica  $[\lambda \times I]$  definida por:

$$W_m = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I \cdot d\lambda = \int_{B_1}^{B_2} I \cdot N \cdot A \cdot dB = \int_{B_1}^{B_2} \frac{H \cdot \ell}{N} \cdot N \cdot A \cdot dB = A \cdot \ell \cdot \int_{B_1}^{B_2} H \cdot dB$$

Uma vez que o produto  $A \cdot \ell$  é o volume do núcleo, então  $\int_{B_1}^{B_2} H \cdot dB$  é a densidade volumétrica de energia magnética. No caso linear,  $\mu = \text{cte}$  e  $H = B/\mu$ , então essa integral vale:

$$\frac{W_m}{A \cdot \ell} = \frac{1}{\mu} \cdot \int_{B_1}^{B_2} B \cdot dB = \frac{B_2^2 - B_1^2}{2\mu}$$

Supondo que  $B_1 = 0$  no início da magnetização, então a energia final será:

$$W_m = \frac{A \cdot \ell \cdot B^2}{2\mu}$$

**Ensaio:**

- Para  $g_i = 1 \text{ mm}$ ,  $N = 800$  espiras e a corrente medida no item 9, calcule a energia (em mJ) armazenada no núcleo e em cada entreferro.
- Compare a energia total armazenada nos entreferros com a armazenada no núcleo. Comente.

**11 - Cálculo da Força de Atração do Eletroímã**

A força de atração corresponde à taxa de variação da energia magnética com a variação do comprimento do entreferro, ou seja:

$$F_m = \frac{\partial}{\partial g} W_m$$

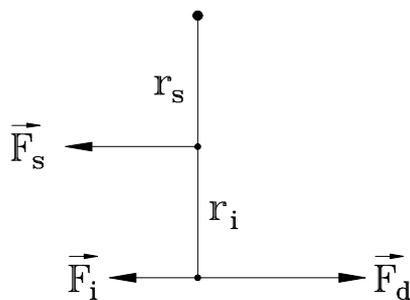
Devido ao movimento em torno do pivot do núcleo, a condição de equilíbrio das forças é mostrada na figura 4 e dada por:

$$F_d \cdot r_i = F_i \cdot r_i = F_s \cdot r_s$$

onde  $F_s$  - força no entreferro superior

$F_i$  - força no entreferro inferior

$F_d$  - força total do eletroímã



**Figura 4**

Para  $r_i = 2r_s$  a força do dinamômetro vale:

$$F_d = F_i + F_s / 2$$

Em termos da taxa de variação da energia:

$$F_d = \frac{\partial}{\partial g_i} W_i + \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial}{\partial g_s} W_s$$

Mas como  $g_s = g_i / 2$  resulta:

$$F_d = \frac{\partial}{\partial g_i} W_i + \frac{\partial}{\partial g_i} W_s$$

**Ensaio:**

- Admitindo esta combinação de forças válida para o eletroímã e considerando o espraiamento, calcule a força resultante para  $g_i = 1 \text{ mm}$ ,  $N = 800$  espiras e corrente medida no item 9.
- Calcule o erro percentual em relação ao valor usado no item 9 e comente a sua origem.

**12 - Perdas no núcleo**

Como o circuito eletromagnético não é ideal, ocorrem perdas na bobina e no núcleo. A potência elétrica absorvida pelo eletroímã ( $P_E$ ) pode ser medida. Essa potência corresponde às perdas ôhmicas na bobina ( $P_O$ ), por correntes de Foucault ( $P_F$ ) e por histerese ( $P_H$ ) no núcleo:

$$P_E = P_O + P_F + P_H$$

As perdas por correntes de Foucault ( $P_F$ ) e por histerese ( $P_H$ ) no núcleo, em geral são agregadas como *perdas no núcleo*:

$$P_N = P_F + P_H$$

Com um certo grau de dificuldade, é possível obter  $P_F$  e  $P_H$ . Entretanto, na prática, isto não é necessário, bastando obter o valor de  $P_N$ .

Conhecida a resistência da bobina ( $R$ ), pode-se estimar as perdas no núcleo como sendo:

$$P_N = P_E - P_O = P_E - R \cdot I^2$$

A potência total ( $P_E$ ) pode ser medida diretamente através de wattímetro ou indiretamente através de  $V$ ,  $I$  e  $\cos\phi$ .

**Ensaio:**

- Meça a resistência  $R$  da bobina.
- Para  $N = 800$  espiras e sem entreferro, aplique 130 V, 60 Hz, e meça  $I$  e  $\cos\phi$ . Calcule  $P_E$ ,  $P_O$  e  $P_N$ .
- Para  $N = 800$  espiras e  $g_i = 1 \text{ mm}$ , aplique 130 V, 60 Hz e meça  $I$  e  $\cos\phi$ . Calcule  $P_E$ ,  $P_O$  e  $P_N$ .

- Compare as perdas no núcleo com as perdas na resistência da bobina.
- Explique porque as perdas no núcleo sem entreferro são menores do que as perdas com entreferro.

### 13 - Circuito Equivalente do Eletroímã

Para analisar o comportamento elétrico do eletroímã em c.a., pode-se utilizar o circuito equivalente da figura 5. Nesse modelo, as perdas são representadas por uma resistência em série e uma condutância em paralelo ( $R$  e  $G_{eq}$ , respectivamente), a dispersão de fluxo pela reatância  $X_l$ , e a característica de magnetização pela susceptância  $B_{eq}$ . A saturação é uma não linearidade que não está representada nesse modelo.

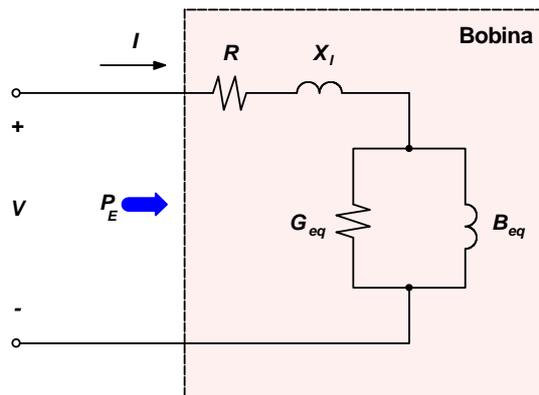


Figura 5

#### Ensaio:

- Desprezando as quedas de tensão na resistência série e na reatância de dispersão, obtenha a condutância equivalente  $G_{eq}$  devido às perdas no núcleo, sem entreferro:

$$G_{eq} = P_N / V^2$$

- Verifique que o valor da resistência que representa as perdas no núcleo é bem maior que a resistência  $R$  da bobina medida no item 12.
- Obtenha a indutância  $L_{eq}$  a partir da admitância equivalente obtida da relação corrente/tensão aplicadas ao eletroímã:

$$Y_{eq} = \frac{I}{V} \approx \sqrt{G_{eq}^2 + B_{eq}^2}$$

em que  $B_{eq}$  é a susceptância equivalente e:

$$L_{eq} = \frac{1}{\omega \cdot B_{eq}} = \frac{1}{\omega \cdot \sqrt{Y_{eq}^2 - G_{eq}^2}}$$

Compare  $L_{eq}$  obtida por esse modelo, com os valores calculados e medidos no item 8.



## APÊNDICE I

### Obtenção da Curva $[B \times H]$ no Osciloscópio

1 - Da lei circuital de Ampère sabe-se que para um percurso  $\ell$ :

$$\oint H \cdot d\ell = N \cdot I$$

Para  $H$  constante resulta:

$$H \cdot \ell = N \cdot I$$

logo:

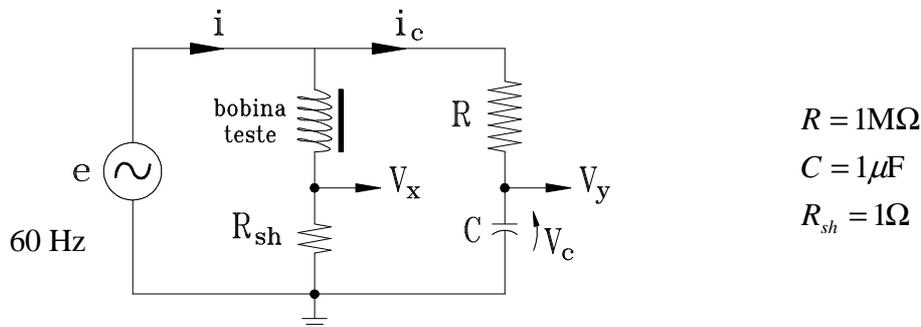
$$H = \frac{N}{\ell} \cdot I \rightarrow \text{eixo X proporcional a } I \rightarrow V_x = R_{sh} \cdot I$$

2 - Da lei de indução de Faraday sabe-se que:

$$e = \frac{d}{dt} \lambda = N \frac{d}{dt} \phi = N \cdot A \frac{d}{dt} B$$

$$B = \frac{1}{N \cdot A} \int e \cdot dt$$

Para obter  $\int e \cdot dt$  monta-se um circuito RC, com  $R \gg 1/(\omega \cdot C)$ , alimentado pela tensão  $e(t)$ :



A tensão sobre o capacitor é dada por:

$$V_c = \frac{1}{C} \int i_c \cdot dt \approx \frac{1}{C} \int \frac{e}{R} \cdot dt = \frac{1}{R \cdot C} \int e \cdot dt$$

logo:

$$B \approx \frac{R \cdot C}{N \cdot A} \cdot V_c \rightarrow \text{eixo Y proporcional a } V_c \rightarrow V_Y = V_C$$

## APÊNDICE II

### Ajuste do Osciloscópio HP 54501

#### TIME BASE

5 ms/div  
delay 0 seg  
reference cntr  
window off

#### CHANNEL

CH1 e CH2 **ON** - CH3 e CH4 **OFF**  
CH1 100 mV/div.  $V_x$   
CH2 200 mV/div.  $V_y$

#### TRIGGER

auto  
edge  
source 1

#### DISPLAY

avg  
# of avg 2048 (máx)  
# of screens: 1  
grid  
connect dots **ON**

#### WAVEFORM MATH

f1  
display **ON**  
chan 2  
vs  
chan 1  
sensitivity 45 mV/div