

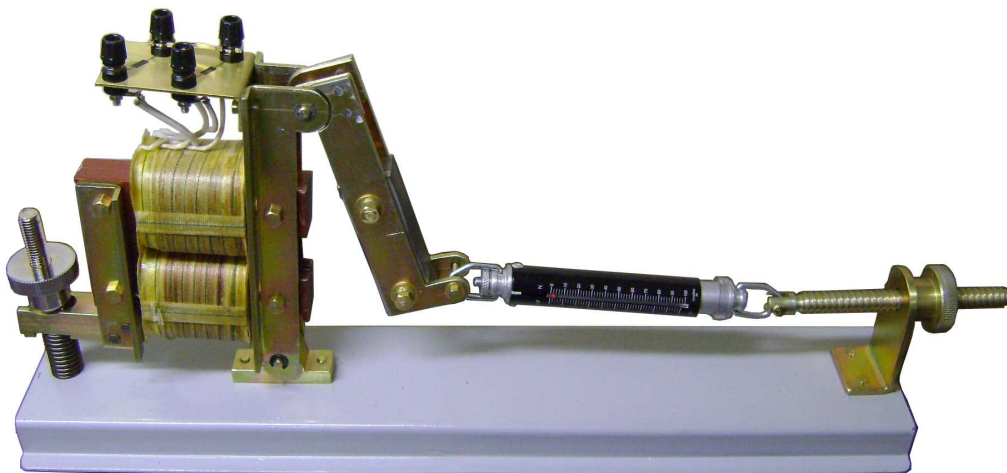
## *MANUAL DIDÁTICO*

- *Instruções de operação*
- *Experiências sugeridas*

## *EQUIPAMENTO DIDÁTICO*

### *ETC-25 A*

#### *Eletroimã de tração*



**EQUACIONAL ELÉTRICA E MECÂNICA LTDA**

RUA SECUNDINO DOMINGUES 787, JARDIM INDEPENDÊNCIA, SÃO PAULO, SÃO PAULO  
TELEFONE (011) 2100-0777 - FAX (011) 6211-1562 - CEP 03223-110  
internet: <http://www.equacional.com.br> email: [vendas@equacional.com.br](mailto:vendas@equacional.com.br)

**ELETROIMÃ****MANUAL DE UTILIZAÇÃO E EXPERIÊNCIAS SUGERIDAS****ÍNDICE:**

I – Introdução

II – Eletroimã

II.1 – Definição e descrição sucinta de dispositivo

II.2 – Utilização e importância em conversão eletromecânica.

III – Dados construtivos de eletroimã

III.1 – Desenho esquemático

III.2 – Dados técnicos

III.3 – Comentários

IV – Introdução teórica

IV.1 – Balanço de energia no eletroimã

IV.2 – Eletroimã ideal

IV.3 – Eletroimã real

IV.4 – Funcionamento em corrente contínua

IV.5 – Funcionamento em corrente alternada

IV.6 – Cálculo teórico da força no eletroimã

V – Experiências Sugeridas

Anexo 1 – Características do eletroimã em corrente alternada

Anexo 2 - Características do eletroimã em corrente contínua

**MANUAL DE ELETROIMÃ – RELAÇÃO DE EXPERIÊNCIAS SUGERIDAS:****I – Introdução:**

É fato conhecido que um campo magnético armazena energia, e conseqüentemente esse campo exerce forças mecânicas em estruturas associadas a ele. Sabe-se também que um circuito elétrico adequado pode estabelecer um campo magnético em determinadas estruturas mecânicas.

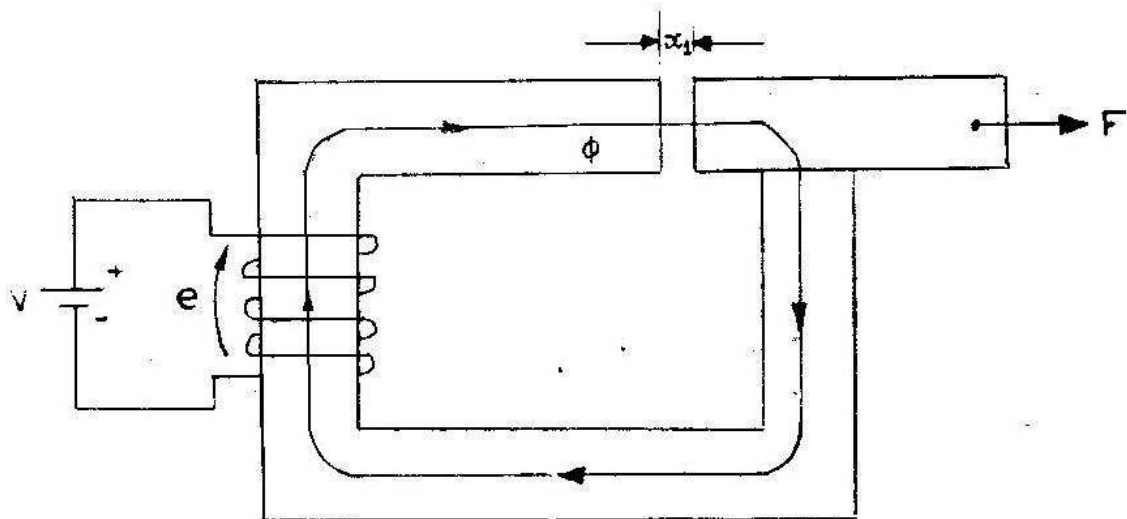
Em vista destas características, o campo magnético serve de enlace entre a parte elétrica e a parte mecânica de muitos dispositivos, sendo utilizado como agente de conversão de energia elétrica/mecânica e vice-versa.

Nesse princípio, estão baseadas todas as máquinas elétricas, e em todas vale também a lei da conservação de energia.

O eletroimã é a mais elementar estrutura mecânica em que é possível estabelecer um campo magnético através de um circuito elétrico de simples excitação, e onde se torna possível estudar as inter-relações eletro-mecânica acima citadas.

**II – Eletroimã****1. Definição e descrição do dispositivo.**

Consideremos o eletroimã da figura abaixo, excitado por uma fonte de corrente contínua e mantido nesta posição pela aplicação de uma força externa  $F$ .

**Figura 1**

Observa-se que a excitação da fonte estabelece um fluxo magnético no circuito, e notadamente há uma polarização das faces dos pólos magnéticos opostos que se atraem, dando origem a uma força desenvolvida pelo eletroimã (contrária a  $F$ ) que tende a diminuir a relutância do circuito magnético (princípio da mínima relutância).

## 2. Utilização e importância para o estudo em conversão eletromecânica.

Analisando o comportamento do eletroímã, estabeleceremos suas equações elétricas, mecânicas e eletromecânicas. A solução simultânea destas equações do lado elétrico, do lado mecânico e do lado eletromecânico propriamente dito nos dará o modelo com o qual trabalharemos. A importância do eletroímã reside no fato de tomar-se contato direto com a procura e solução de modelos que simbolizem o melhor possível o que se observa num circuito magnético, seja este de simples excitação (eletroímã) ou de dupla excitação (máquinas elétricas).

### III – Dados Construtivos do eletroímã

#### 1. Desenho esquemático:

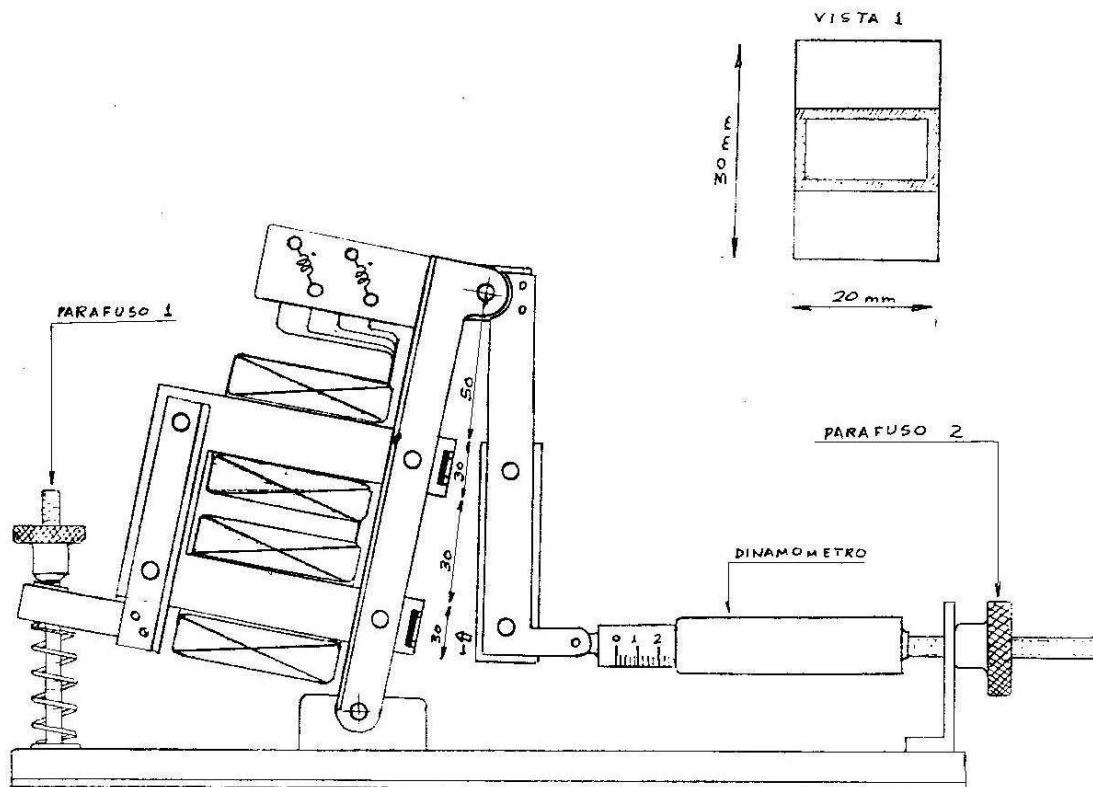


Figura 2

#### 2. Dados Técnicos

- O eletroímã em questão possui duas bobinas, que podem ser ligadas em série ou em paralelo bastando para tanto que se utilize devidamente as placas para ligação.
- O número de espiras por bobina é 800.
- A resistência de cada bobina é 3,18 à temperatura de 20° C.
- A corrente máxima por bobina é 2,5 A.

Logo temos:

Bobinas em paralelo:

- N° de espiras equivalente – 800 esp.
- Resistência equivalente – 1,59 ohms
- Corrente máxima – 5,0 A.

Bobinas em série:

- N° de espiras equivalente – 1600 esp.
- Resistência equivalente – 6,36 ohms
- Corrente máxima – 2,5 A

A máxima força que se pode medir no dinamômetro é 10 kgf.

3. Comentários:

A geometria de construção deste eletroímã em particular favorece o aparecimento de um fluxo de dispersão com razoável proporção sobre o fluxo total no circuito magnético; isto se deve ao fato de termos as bobinas muito próximas e largas, e assim teremos linhas de fluxo se fechando entre as bobinas e em toda proximidade destas.

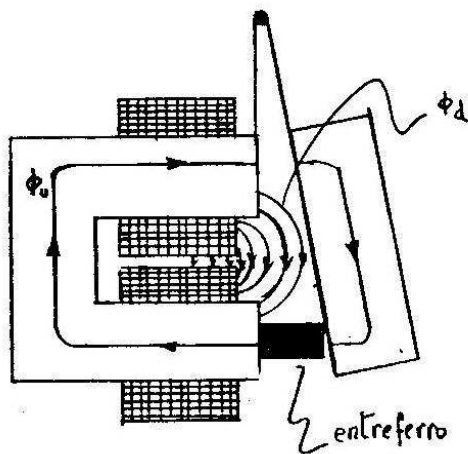


Figura 3

**IV – Introdução Teórica**

1. Balço de energia no eletroimã

Na estrutura magnética do eletroimã da figura 1, estabelece-se um fluxo  $\phi$  ao ser excitada a bobina. Supondo-se que não haja movimento entre as partes, e que as perdas no ferro sejam desprezíveis; descontadas as perdas Joule, a energia v.i.dt consumida no intervalo de tempo dt será armazenado no campo magnético e vale:

$$dw_e = (-e)idt = dw_c; \text{ onde } e = -\frac{d\lambda}{dt}$$

$$dw_e = \frac{d\lambda}{dt} \cdot idt = id\lambda = ni d\phi = Fd\phi$$

Logo o acréscimo de energia armazenado no campo magnético devido à variação de  $\phi_1$  até  $\phi_2$  do fluxo será dado por:

$$w_e = w_c = \int_{\phi_1}^{\phi_2} F \cdot d\phi = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} id\lambda$$

E que corresponde à área hachurada da figura abaixo para uma curva de magnetização genérica ( $\phi \times F$ ).

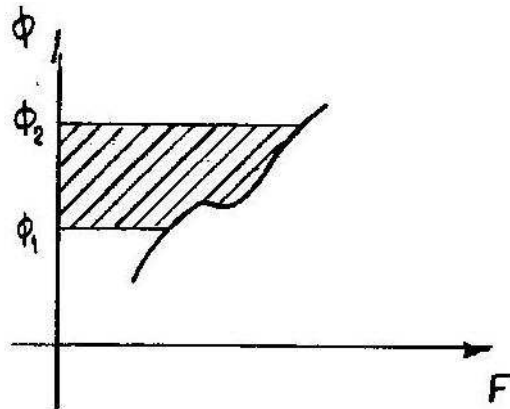


Figura 4

Caso a função  $\phi \times F$  fosse linear; teríamos:

$$w_c = \int_0^{\phi} F \cdot d\phi = \frac{1}{2} F \cdot \phi = w_c$$

No eletroimã, quando o entreferro varia de  $x_1$  e  $x_2$ , supondo regime permanente em cada um destes, a corrente deve ser a mesma, já que é esta imposta pela tensão da fonte na resistência interna da bobina.

Assim teremos as energias magnéticas armazenadas no circuito para cada situação mostrada na figura a seguir.

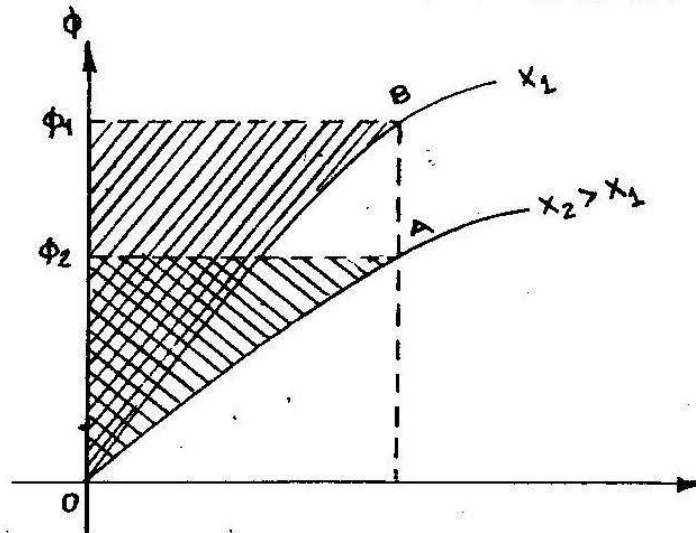


Figura 5

$$W_{\text{mag } x_1} = \text{Área } 0 B \Phi_1 0$$

$$W_{\text{mag } x_2} = \text{Área } 0 A \Phi_2 0$$

Supondo abertura da parte móvel aplicando-se uma força  $F$  sobre a armadura, durante o tempo  $dt$ , e indo do entreferro  $x_1$  ao entreferro  $x_2$ ; aplicando o balanço de energia temos:

$$W_e + W_{\text{mec}} = \Delta W_e + W_{\text{mag}} + \Delta W_{\text{mec}} + \text{perdas}$$

Onde:

$W_e$  = energia do lado elétrico

$W_{\text{mec}}$  = energia do lado mecânico

$\Delta W_e$  = variação da energia armazenada no campo elétrico

$W_{\text{mag}}$  = variação da energia armazenada no campo magnético

$\Delta W_{\text{mec}}$  = variação da energia mecânica

Perdas = Joule nos enrolamentos, histerética, foucault, mecânica nos atritos.

Adota-se que energia que entra no sistema é positivo e saindo é negativa.

Englobando-se no termo  $W_{\text{mec}}$  as perdas por atrito e as variações de energia armazenada potencial e cinética, já que nos interessa o trabalho útil, desprezando-se a energia armazenada no campo elétrico face aos outros termos (como na maioria dos conversores eletromecânicos), temos:

$$W_{mec} + W_{eletr} = W_{mag}$$

Onde as perdas elétricas estão incluídas no termo  $W_{mag}$   
 O processo de abertura está representado a seguir:

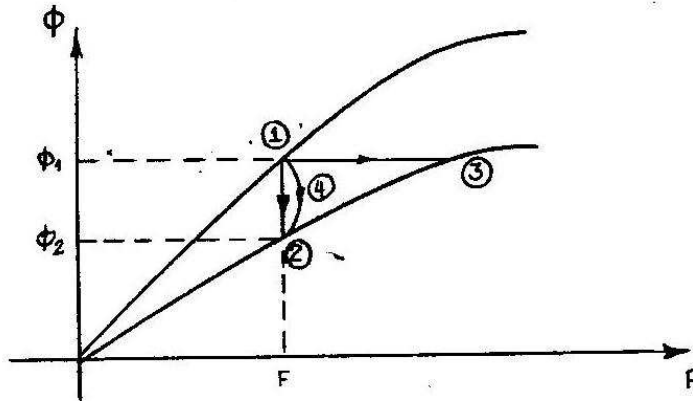


Figura 6

Se a abertura é feita num intervalo de tempo  $dt$  tendendo ao infinito, a curva  $\Phi \times F$  se aproxima de ① ② durante a abertura, pois a f.e.m. induzida na bobina é muito pequena e praticamente não altera a corrente.

Se a abertura é feita rapidamente, num intervalo de tempo  $dt$  tendendo a zero, a curva  $\Phi \times F$  se aproxima de ① ③ e após o movimento o  $\Phi$  e a f.m.m. decrescem ao longo da curva de magnetização ③ ②.

No caso real, a curva  $\Phi \times F$  estará entre estes dois extremos, aproximando-se da curva ①④② dependendo dos parâmetros do eletroímã da carga útil bem como os parâmetros do circuito elétrico. Logo quanto mais rápido o transitório de abertura, maior será o pico de corrente que a bobina absorve da fonte.

No processo de fechamento teremos analogamente:

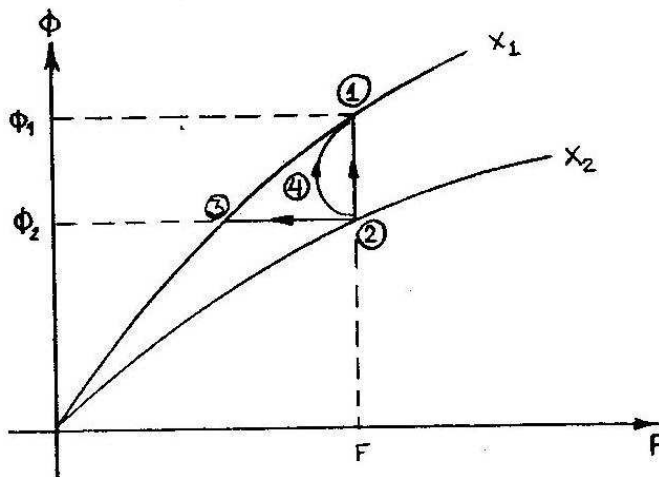


Figura 7

- Fechamento lento – ② ①
- Fechamento rápido – ②③ ①
- Fechamento real – ② ④ ①



Observe que durante o fechamento a corrente tem um pico negativo, isto é diminui.  
 As figuras abaixo mostram a energia mecânica durante o transitório de abertura e fechamento do eletroímã; lembrando que  $W_{mec} = W_{elet} - W_{mag}$ .

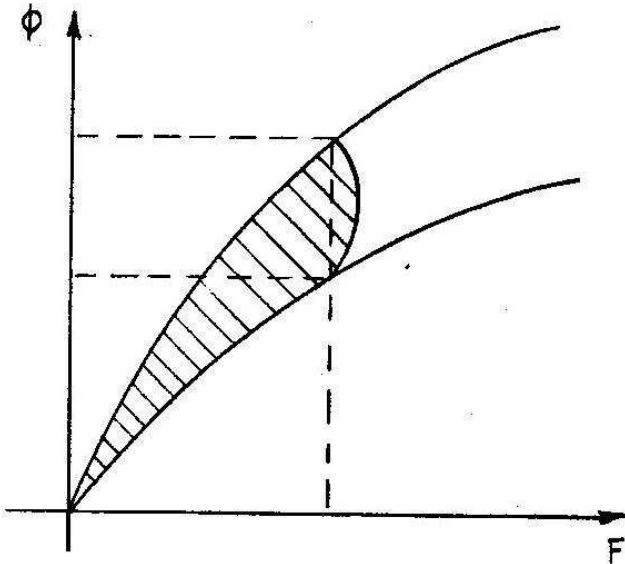


Figura 8 – Abertura

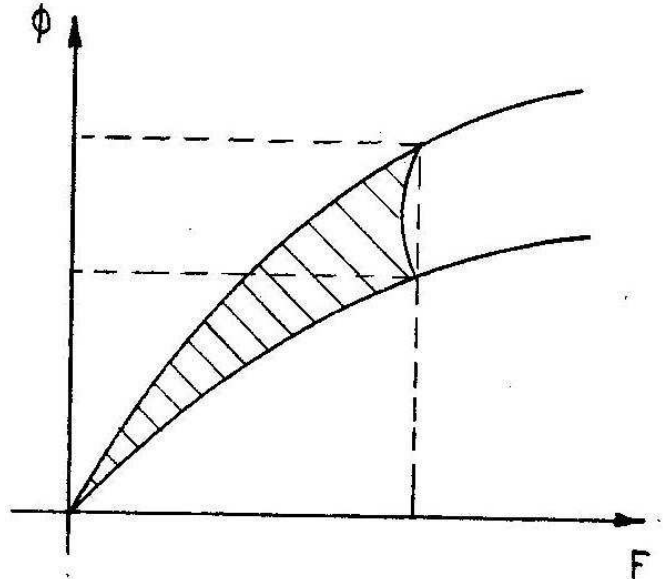


Figura 9 – Fechamento

É claro que  $W_{mec} = F \cdot \Delta x$  que é o trabalho realizado pelo eletroímã no intervalo de tempo  $\Delta t$ .

Para entreferros pequenos ( $\Delta x \rightarrow 0$ );  $W_{mec} = W_{mag}$

e temos: 
$$F = \frac{\Delta W_{mag}}{\Delta x}$$

ou seja, a força é variação da energia magnética com o entreferro. Como  $\Delta W_{mag}$  varia com  $\Phi$  e  $F$ , temos:

$$F = \frac{\delta W_{mag}}{\delta x} \quad \Phi = \text{constante}$$

ou usando

$$F = \frac{\delta W_{mag}}{\delta x} \quad F = \text{constante}$$

Admitindo toda a energia magnética armazenada no entreferro.

$$W_{mag} = \frac{1}{2} \phi_0 F_0 = \frac{1}{2} \frac{F_0}{R} \therefore W_{mag} = \frac{1}{2} L I^2$$

$$F = \frac{\Delta W_{mag}(F \cdot x)}{\Delta x} = \frac{1}{2} d \frac{L I^2}{dx}$$

e com  $F = \text{constante}$   
 $I = \text{constante}$

$$\therefore F = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{dx}$$

Aplicando esta expressão ao eletroímã da figura 1.

$$F = -\frac{\mu_0 S (NI)^2}{2 x^2} \quad (1)$$

Ou seja, a força é contrária ao sentido de  $x$ .

Admitindo  $\phi = \text{constante}$   $F = \frac{\delta W_{mag}}{\delta x}$   $\phi = \text{constante}$

$$F = \frac{B^2 S}{2 \mu_0} \quad (2)$$

Para um mesmo entreferro, as expressões (1) e (2) devem resultar num mesmo valor.

2. Eletroímã ideal.

É aquele em que desprezamos todas as perdas, elétricas e mecânicas, assim como a dispersão de fluxo e o espraçamento, seu circuito equivalente é mostrado na figura a seguir.

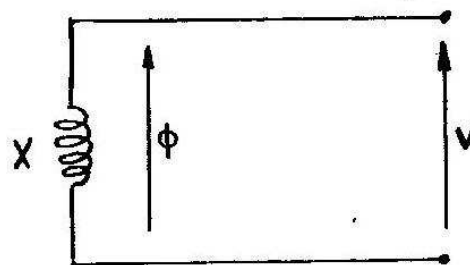


Figura 10

3. Eletroimã real.

Neste eletroimã introduzimos alguns parâmetros como:

$r$  = resistência ôhmica dos enrolamentos,

$x_d$  = reatância de dispersão; seu circuito equivalente pode ser visto a seguir.

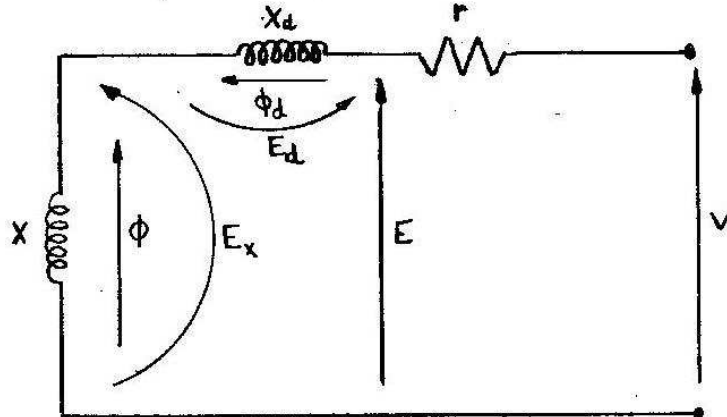


Figura 11

É a reatância  $x_d$  que produzirá um efeito secundário que influi muito no comportamento do eletroimã em corrente alternada.

A geometria de construção do nosso eletroimã favorece um valor relativamente alto de  $x_d$  comparados aos parâmetros.

4. Eletroimã em corrente contínua

Neste caso teremos  $I = \text{constante}$ , porém nos transitórios de abertura e fechamento, teremos uma variação de  $I$  devido à variação de relutância.

$$F = R \cdot \phi$$

$$\frac{dF}{dt} = \phi \frac{dR}{dt} + R \frac{d\phi}{dt} = \frac{N \cdot dI}{dt}$$

Logo, teremos uma f.e.m. na bobina  $N \cdot \frac{d\phi}{dt}$  que altera o valor da corrente.

**Movimento muito lento da armadura:**

Neste caso teremos que  $\frac{dR}{dt} \cong 0$ ;  $\phi = \text{constante}$

Assim temos que  $I = \frac{E}{R}$  depende só da resistência do enrolamento do eletroimã.

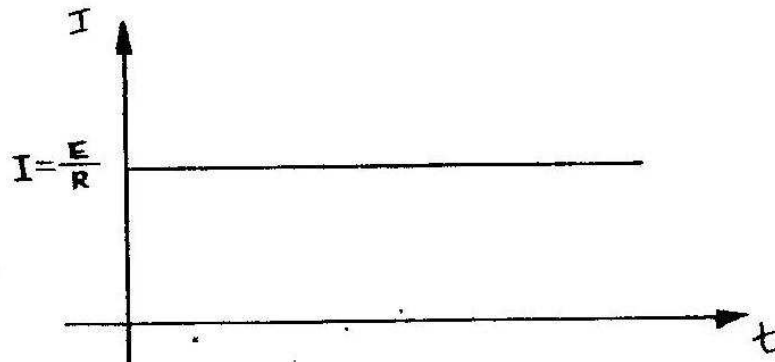


Figura 12

**Movimento muito rápido da armadura**

Neste caso a relutância  $R$  aumenta (abertura) ou diminui (fechamento) e o fluxo diminui (abertura) ou aumenta (fechamento); e assim tem-se:

$$I = \frac{E - N \frac{d\phi}{dt}}{Ri}$$

Na abertura:

$I$  aumenta pois  $\frac{d\phi}{dt}$  é negativo.

No fechamento:

$I$  diminui pois  $\frac{d\phi}{dt}$  é positivo.

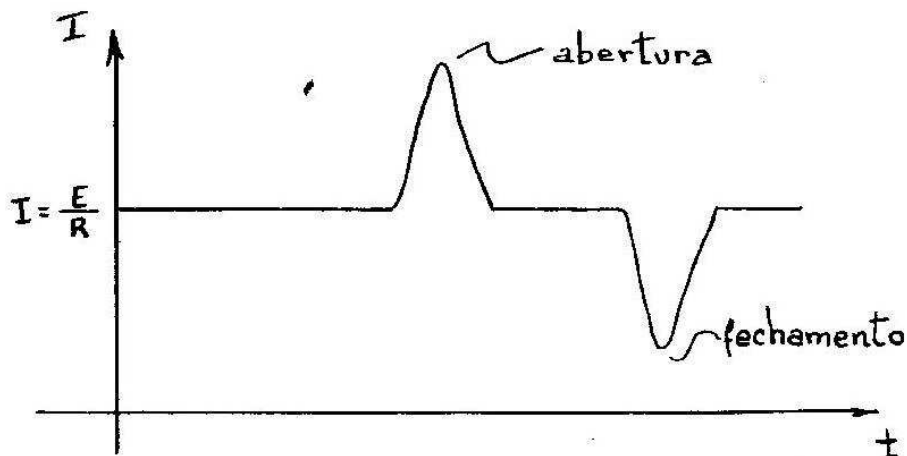


Figura 13

**Força em corrente contínua**

Em regime  $I(t) = \text{constante}$

logo:  $F = K \left( \frac{I}{\theta} \right)^2$  ; para tensão constante:

$$F = \frac{\bar{K}}{\theta^2} \quad (\text{vide cálculo teórico do conjugado})$$

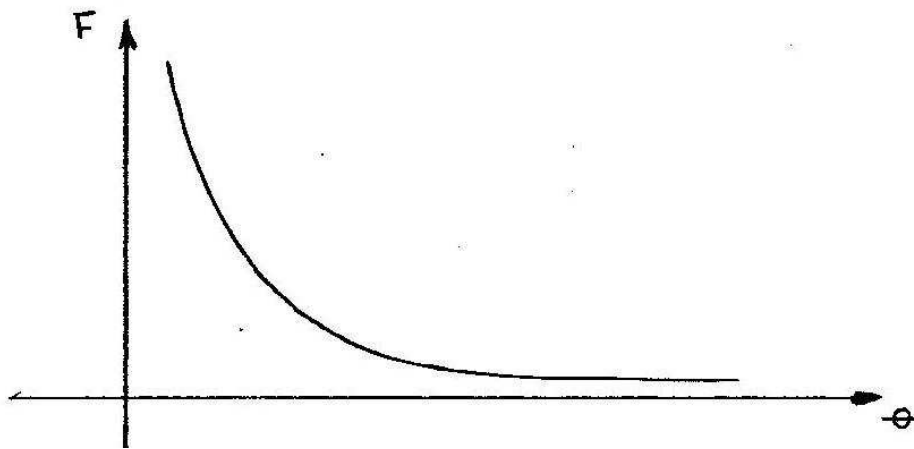


Figura 14

5. Eletroimã em corrente alternada

- No caso do eletroimã ideal; temos:

$$F(t) = \frac{K}{\theta^2} I^2(t) \quad \text{onde} \quad I(t) = I_{\max} \text{sen}.wt$$

em regime senoidal permanente:

$$\dot{V} = \dot{X} \cdot \dot{I}$$

$$I = \alpha e$$

$$\dot{V} = wL I \cdot \dot{I} = \frac{|\dot{V}|}{|wL|} = \left| \frac{\dot{V} \cdot e}{wN^2 \mu \cdot S} \right|$$

e como  $e = \alpha_1 \cdot \theta$

$$I = \alpha_2 \theta$$

Assim:

$$F = K \cdot \frac{Ie f^2}{\theta^2} = K \cdot \frac{\alpha_2^2 \cdot \theta^2}{\theta^2}$$

Logo  $F = \text{Constante}$

Temos que para o eletroimã IDEAL em c.a. a força é constante com o entreferro.

No caso do eletroimã REAL; temos em regime senoidal permanente:

$$\dot{V} = \dot{E} + r \dot{I} \quad (\text{vide fig. 11 - circ. Equivalente})$$

mas  $\dot{E} = \dot{E}_x + \dot{E}_{xd}$  onde  $\dot{E}_x = j\omega L \dot{I}$

$$\dot{E}_d = j\omega L_d \dot{I}$$

logo:

$$\dot{V} = \dot{I}(r + j\omega L + j\omega L_d) \therefore I = \frac{|\dot{V}|}{|r + j\omega L + j\omega L_d|}$$

Onde:  $L = \frac{N^2}{R} = \frac{N^2 \mu_0 S}{e}$

$L_d = \text{constante}$  (depende da geometria do eletroimã)

Como  $r \ll (\omega L + \omega L_d)$   $I = \frac{|\dot{V}|}{|j\omega L + j\omega L_d|}$

$$I = \left| \frac{\dot{V} \cdot e}{(N^2 \mu_0 S + L_d e) \omega} \right|$$

Chamando:

$$\omega L_d = K_1 ; \omega N^2 \mu_0 \cdot S = K_2 ; V = K_3$$

temos que:

$$I = \frac{K_3 \cdot e}{K_2 + K_1 e} \quad (\text{que é a variação de } I \text{ com o entreferro}).$$

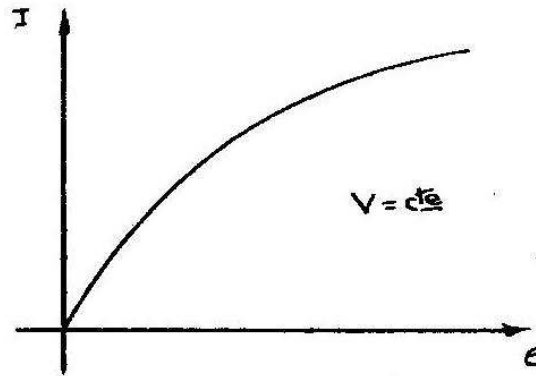


Figura 15

Assim temos:

$$F = K \frac{I^2 e f}{\theta^2} \quad \text{com } e = \alpha \theta$$

$$F = K \left( \frac{K_3^2}{K_2^2 + K_1^2 e^2 + 2K_1 K_2 e} \right)$$

Assim temos:

$$F = \frac{A}{B + C e^2 + D e} \quad (\text{que é a variação de } F \text{ com o entreferro})$$

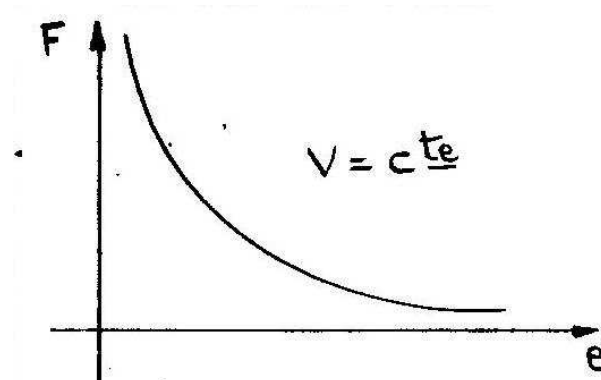


Figura 16

**Movimento muito lento da armadura:**

Como em corrente alternada a corrente é função do entreferro, ela acompanhará a variação de entreferro, estabilizando num determinado valor para cada "e", e aí permanecendo enquanto o valor de "e" permanecer.

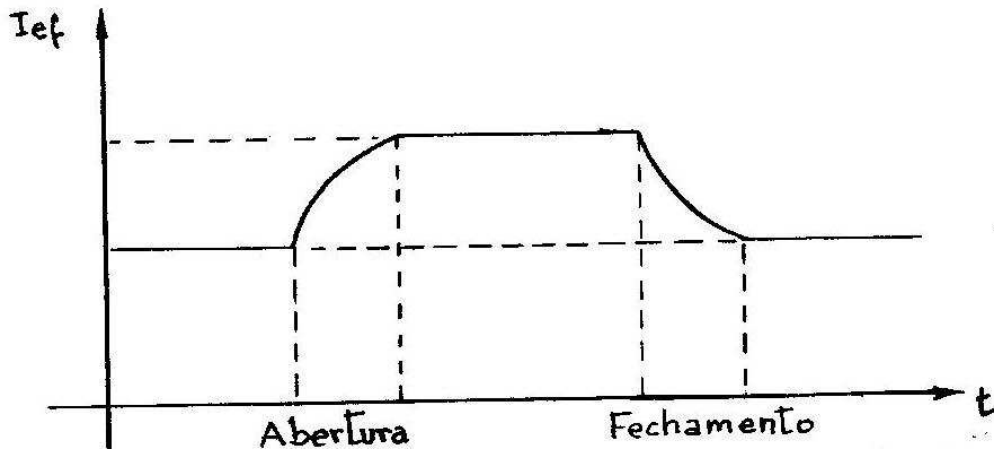


Figura 17

**Movimento muito rápido da armadura**

Este caso é semelhante ao caso de alimentação em corrente contínua, porém o valor final da corrente dependerá do entreferro final.

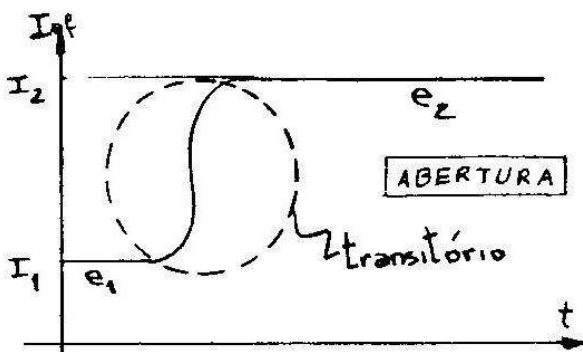


Figura 18

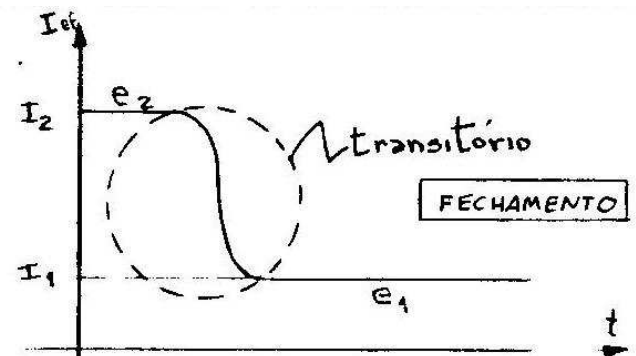


Figura 19

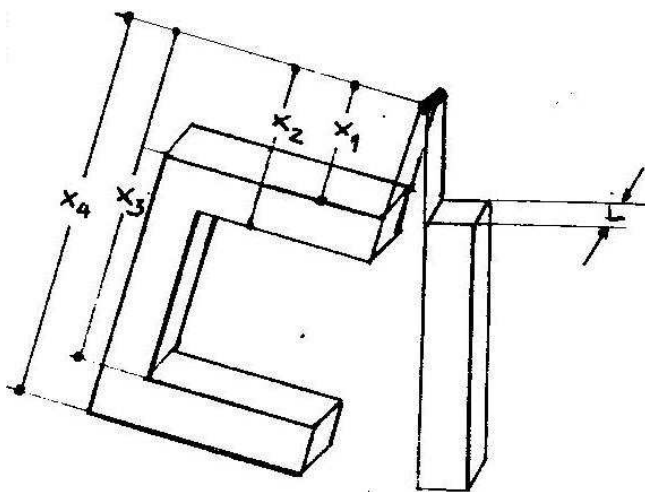
6. Cálculo Teórico do Conjugado

Seja  $I(t)$  a corrente no enrolamento num dado instante e  $\theta(t)$  a abertura do entreferro num dado instante.

Fazendo-se as seguintes hipóteses:

- 1)  $S_{ar} = S_{Fe}$ . (não há espraimento de fluxo)
- 2) Circuito magnético não saturado
- 3) Dispersão de fluxo desprezível





$L =$  Largura do eletroímã

Figura 20

Da aplicação do balanço de energia temos:

$$C = \frac{1}{2} I^2(t) \frac{dL}{d\theta} \qquad L = \frac{N^2}{R} = N^2 P$$

$$R_T = R_{12} + R_{34} \qquad P_T = \frac{P_{12} \cdot P_{34}}{P_{12} + P_{34}}$$

$$C = \frac{1}{2} N^2 I^2 \frac{dP}{d\theta} \qquad dP = \frac{\mu \cdot l dx}{x\theta}$$

$$P_{12} = \frac{\mu \cdot L}{\theta} \ln \frac{x_2}{x_1} \qquad P_{34} = \frac{\mu \cdot L}{\theta} \ln \frac{x_4}{x_3}$$

$$P_T = \frac{\mu \cdot L}{\theta} \frac{\ln(x_2/x_1) \ln(x_4/x_3)}{\ln(x_4/x_3 \cdot x_2/x_1)} = \frac{K}{\theta}$$

$$\mu_{Fe} \gg \mu_{Ar}$$

$$S_{Fe} = S_{Ar}$$

$$R_{Fe} \ll R_{Ar}$$

$$\therefore R_{TOTAL} \cong R_{Ar}$$

$$dP/d\theta = -\frac{K}{\theta^2}$$

$$\text{Logo: } C(t) = \frac{1}{2} N^2 I(t)^2 \frac{K}{\theta^2}$$

O Eletroimã em questão possui um anel em curto que serve para diminuir a vibração da parte móvel do eletroimã quando este é submetido a ensaios em corrente alternada.

#### V – Experiências Sugeridas

- a) Ensaio em corrente contínua.  
1) Executar a montagem a seguir.

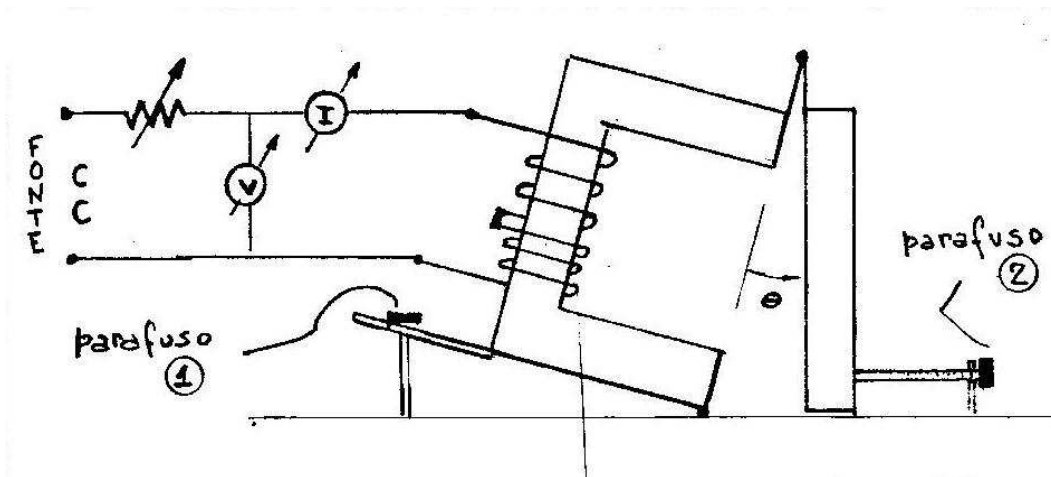


Figura 21

#### **OBSERVAÇÕES:**

- a) Ligar as bobinas do eletroímã em série.  
b) Não deixar em que a corrente ultrapasse 2,5 A.
- 2) Ajustar o parafuso ① e ② de maneira que a parte móvel do eletroímã fique na sua natural posição de equilíbrio, e assim seu peso próprio influirá o mínimo possível na marcação do dinamômetro.
  - 3) Para  $V = \text{constante}$ , observar a variação de  $I$  com a variação de  $\theta$ , para a abertura e fechamento rápidos, e depois para abertura e fechamento lento.
  - 4) Tentar explicar a variação ocorrida.
  - 5) Fixar um valor de corrente no amperímetro e afrouxar o parafuso ② até que a parte móvel fixe-se no eletroímã que já deve possuir um entreferro de material (isolante) entre as partes. Apertando aos poucos o parafuso ② até que as partes voltem a soltar-se, neste momento anotar-se o valor do conjugado do dinamômetro.

- 6) Repetir 5) para vários entreferro, de modo a poder-se levantar a curva  $F \times e$  para  $I$  constante.
- 7) Para outros valores de  $I$  repetir os itens 5) e 6).
- 8) Comparar as curvas obtidas com as curvas teóricas.

B) Ensaio em corrente alternada.

- 1) Executar a montagem a seguir:

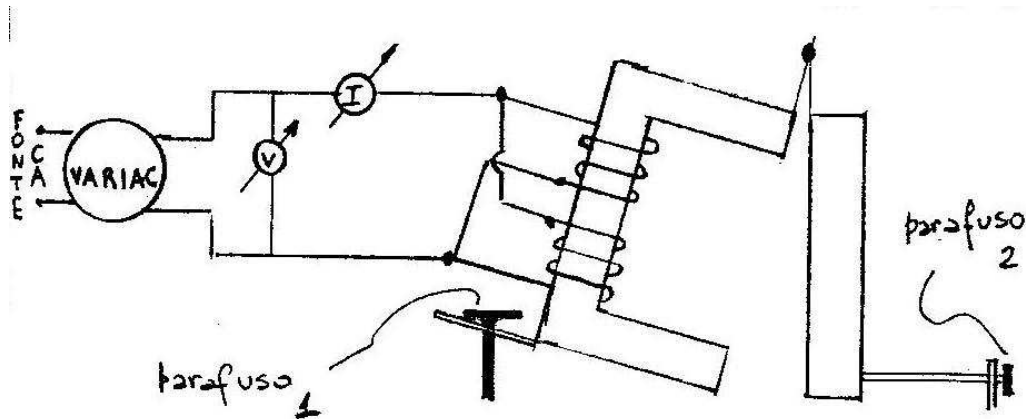


Figura 22

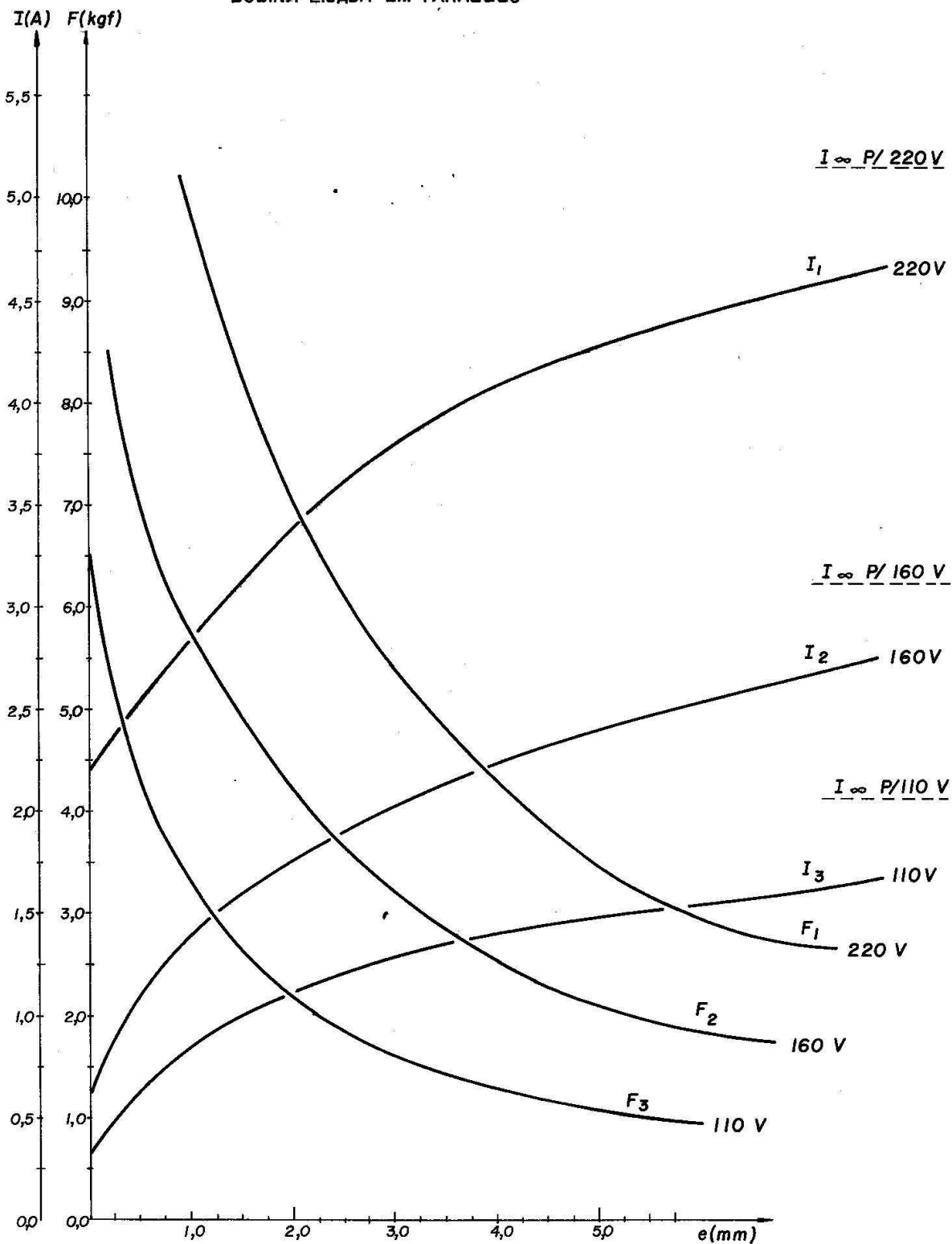
**OBSERVAÇÕES:**

- a) Ligar as bobinas do eletroímã em paralelo.
  - b) Não deixar que a corrente ultrapasse 5 A.
- 2) Procedendo como no ensaio em corrente contínua, levantar curvas  $I \times e$  para  $V =$  constante e  $F \times e$  para  $V =$  constante.
  - 3) Repetir item 2) para mais valores de tensões diferentes.
  - 4) Comparar as curvas teóricas com as curvas levantadas.
  - 5) Verificar a variação de  $I$  com abertura e fechamento rápidos e lentos da parte móvel do eletroímã.

**CURVAS CARACTERISTICAS DO ELETROIMÃ**

**FUNCIONAMENTO EM CORRENTE ALTERNADA**

- CURVAS  $F \times e$   $I \times e$
- BOBINA LIGADA EM PARALELO



### CURVAS CARACTERISTICAS DO ELETROIMÃ

FUNCIONAMENTO EM CORRENTE CONTÍNUA

- CURVAS  $F \times e$
- BOBINA LIGADA EM SÉRIE

