



INDUSCON-96



**CONFIABILIDADE
E
QUALIDADE**

Tema 2

FAAP - CENTRO DE CONVENÇÕES
DE 12 A 14 DE AGOSTO DE 1996

CONFERÊNCIA SOBRE APLICAÇÃO
DE ELETRICIDADE NA INDÚSTRIA

Seção Técnica Grupo N° II

Cálculo e Confirmação Experimental da Força Magnética de Excitadores Eletrodinâmicos de Vibrações

Gregory Amaral Kyriazis
DIMCI/DIELE

Marcio Lima dos Santos
DIMCI/DIAVI

Mauricio dos Santos Silva
DIMCI/DIAVI

INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial

1 RESUMO

O cálculo da densidade de fluxo magnético no entreferro de um excitador eletromagnético, destinado à calibração de transdutores de vibração, é feito usando-se os métodos clássicos de projeto. A força magnética na bobina móvel é calculada sob condições de equilíbrio estático. Os valores calculados são confirmados experimentalmente em um excitador eletromagnético de imã permanente de neodímio-ferro-boro.

2 PALAVRAS-CHAVE

Excitadores Eletrodinâmicos de Vibrações, Calibração, Transdutores de Vibração, Cálculo de Campo Magnético, Força Magnética.

3 INTRODUÇÃO

Transdutores de vibração são amplamente usados para a monitoração de equipamentos e máquinas para fins de manutenção preditiva e preventiva. A fim de atender os requisitos da ISO 9000 / NBR 19000, tais transdutores devem ser calibrados em laboratórios credenciados cujos padrões estejam rastreados aos padrões primários de um laboratório de reconhecida competência. A calibração dos mesmos requer o uso de um excitador eletrodinâmico de vibrações. Atualmente, a maioria das calibrações de sensores de velocidade e acelerômetros é feita em excitadores eletromagnéticos.

O princípio de funcionamento de um excitador eletromagnético de vibrações é baseado na força de Lorentz experimentada por uma bobina móvel submetida ao campo magnético em um entreferro. No caso do excitador analisado no presente trabalho, este campo magnético é gerado por um imã permanente de terras raras.

A simplicidade da geometria do excitador e o fato dos materiais magnéticos não operarem na região de saturação magnética permitem que o campo magnético no entreferro do circuito magnético do excitador seja calculado usando-se os métodos clássicos.

4 CÁLCULO DAS PERMEÂNCIAS DO CIRCUITO MAGNÉTICO

O circuito magnético (percursos de nº 8, 9, 10 e 11 na Figura 1) do excitador analisado é fabricado com aço ao carbono S.A.E. 10-20. Como a permeabilidade relativa deste material é maior do que 590 entre 0,3 T e 0,9 T, e como a densidade de fluxo magnético no material foi mantida nesta faixa por projeto, a hipótese simplificadora de permeabilidade infinita foi adotada na análise do circuito magnético. A vantagem do uso deste material é a facilidade com que pode ser obtido em uma variedade de tamanhos e formas, a facilidade com que pode ser trabalhado e seu bom acabamento.

Suposições simplificadoras acerca dos percursos do fluxo são feitas neste trabalho. O método de

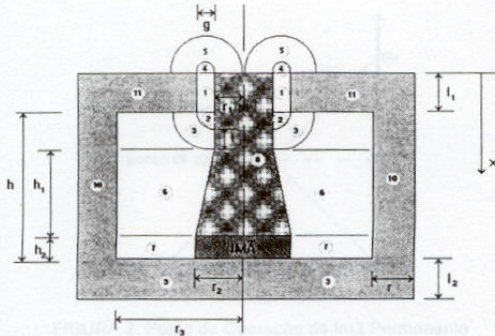


FIGURA 1. Permeâncias do Circuito Magnético do Excitador

cálculo das permeâncias de percursos prováveis de fluxo descrito em [1] é usado na avaliação das permeâncias dos percursos do fluxo de dispersão (percursos de nº 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7 na Figura 1). As dimensões dos excitadores usados neste trabalho estão listadas na Tabela 1 juntamente com os valores calculados de permeância.

| | Geometria (mm) | | Permeâncias (Wb/A) | |
|-------|----------------|----------|--------------------|-----------------------|
| | Núcleo 1 | Núcleo 2 | Núcleo 1 | Núcleo 2 |
| r | 4,0 | 4,0 | P_1 | $7,2 \times 10^{-7}$ |
| r_1 | 24,0 | 22,0 | P_2 | $1,1 \times 10^{-7}$ |
| r_2 | 24,0 | 24,0 | P_3 | $2,5 \times 10^{-7}$ |
| r_3 | 52,3 | 52,3 | P_4 | $0,5 \times 10^{-7}$ |
| h | 69,5 | 70,5 | P_5 | $1,7 \times 10^{-7}$ |
| h_1 | 41,5 | 41,2 | P_6 | $4,4 \times 10^{-7}$ |
| h_2 | 10,0 | 10,0 | P_7 | $0,5 \times 10^{-7}$ |
| g | 4,0 | 6,0 | P_8 | $1,8 \times 10^{-5}$ |
| l_1 | 14,0 | 14,0 | P_9 | $10,6 \times 10^{-5}$ |
| l_2 | 15,0 | 15,0 | P_{10} | $1,2 \times 10^{-5}$ |
| t | 14,0 | 13,3 | P_{11} | $4,9 \times 10^{-5}$ |

5 CÁLCULO DA DENSIDADE DE FLUXO NO ENTREFERRO

De acordo com a Lei de Ampère para circuitos magnéticos,

$$\int_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = 0 \quad (1)$$

onde \vec{H} é a força magnetizante e C é o caminho percorrido pelas linhas de fluxo magnético.

Supondo-se uma permeabilidade relativa infinita para o aço,

$$H_1 h_2 + H_2 g = 0 \quad (2)$$

onde h_2 é a altura do ímã, g é a distância do entreferro (Figura 1) e os índices i e g correspondem ao ímã e ao entreferro, respectivamente.

O fluxo magnético total é dado por

$$\Phi_T = \nu \cdot \Phi_g \quad (3)$$

onde Φ_g é o fluxo magnético no percurso nº 1 do entreferro (Figura 1) e ν é o coeficiente de dispersão definido por:

$$\nu = \frac{P_T}{P_1} = \frac{\sum_{n=1}^7 P_n}{P_1} \quad (4)$$

onde P_T é a permeância total dos percursos do fluxo de dispersão.

Usando-se (3) e sabendo-se que $\Phi_g = B_g \cdot A_g$ e $\Phi_T = B_i \cdot A_i$, a densidade de fluxo no percurso nº 1 do entreferro (Figura 1) é dada por

$$B_g = \mu_0 \cdot H_g = \frac{A_i}{\nu \cdot A_g} \cdot B_i \quad (5)$$

onde A_g é a área média da seção transversal do percurso nº 1 do entreferro, A_i é a área da seção transversal do ímã, e B_g e B_i são as densidades de fluxo no percurso nº 1 do entreferro e no ímã, respectivamente.

O mais novo dos materiais de terras raras é o Neodímio-Ferro-Boro (Nd-Fe-B). Um material de produto de energia máximo de 34 A.T/m, indução residual B_r de 1,06 T e força coercitiva H_c de 127 A/m foi selecionado. A curva de desmagnetização deste material pode ser considerada linear (Figura 2), isto é,

$$B_i = -\frac{B_r}{H_c} \cdot H_i + B_r \quad (6)$$

As equações (2) e (5) podem ser resolvidas para se obter uma relação linear para B_i em termos de H_i :

$$B_i = -\mu_0 \cdot \nu \cdot \left(\frac{A_g}{A_i} \right) \cdot \left(\frac{h_2}{g} \right) \cdot H_i \quad (7)$$

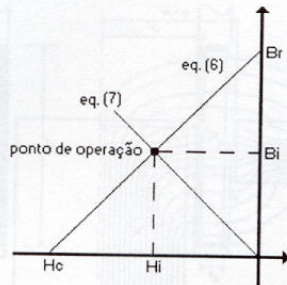


FIGURA 2. Ponto de Operação do Ímã Permanente

Resolvendo-se as equações (6) e (7) para B_i e H_i , tem-se para o ponto de operação do ímã (Figura 2)

$$B_i = \frac{B_r}{1 - \frac{B_r}{\mu_o \cdot v \cdot H_c} \cdot \left(\frac{A_i}{A_g}\right) \cdot \left(\frac{g}{h_2}\right)} \quad (8)$$

A densidade de fluxo magnético no percurso nº 1 (Figura 1) pode ser obtida substituindo-se (8) em (5), isto é,

$$B_g = \frac{A_i \cdot B_r}{v \cdot A_g - \frac{B_r \cdot A_i}{\mu_o \cdot H_c} \cdot \left(\frac{g}{h_2}\right)} \quad (9)$$

Até aqui todo o cálculo da densidade de fluxo magnético no entreferro foi feito com a suposição de que o efeito da corrente elétrica na bobina móvel possa ser desprezado. A contribuição desta corrente para a densidade de fluxo no entreferro deve, entretanto, ser analisada. Considerando-se uma corrente i circulando em uma bobina móvel de N espiras, a equação (2) deve ser reescrita como

$$H_i \cdot h_2 + H_g \cdot g = N \cdot i \quad (10)$$

As equações (5), (6), (7) e (10) podem ser resolvidas para se obter a densidade de fluxo magnético no percurso de nº 1 (Figura 1) com a contribuição da corrente na bobina móvel:

$$B_{g1} = \frac{B_r \cdot A_i \left(1 - \frac{N \cdot i}{H_c \cdot h_2}\right)}{v \cdot A_g - \frac{B_r \cdot A_i}{\mu_o \cdot H_c} \cdot \left(\frac{g}{h_2}\right)} \quad (13)$$

Esta equação se reduz à equação (9) para corrente nula na bobina móvel.

5.1 Confirmação Experimental do Cálculo da Densidade de Fluxo no Entreferro

A confirmação experimental da densidade de fluxo no entreferro foi feita utilizando-se um gaussímetro (Yokogawa 3251) com ponta-de-prova de efeito Hall (3252-02) que permite medir a densidade de fluxo magnético em entreferros de distância mínima de 1 (um) mm. Posicionou-se a ponta-de-prova em 20 pontos marcados na tampa do entreferro e a outra metade no diâmetro interno (Figura 3).

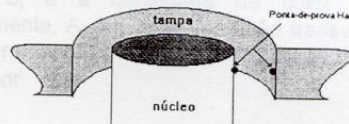


FIGURA 3. Pontos de Medição

As medições da densidade de fluxo no entreferro foram feitas com dois núcleos de dimensões diferentes (Tabela 1). Os valores medidos estão listados na Tabela 2 juntamente com os valores calculados de (9).

TABELA 2. Comparação entre resultados obtidos

| | Núcleo 1 | Núcleo 2 |
|----------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Fluxo calculado (Wb) | 6.6×10^{-4} | 5.3×10^{-4} |
| Fluxo medido (Wb) | $(6.4 \pm 0.3) \times 10^{-4}$ | $(5.0 \pm 0.2) \times 10^{-4}$ |

6 CÁLCULO DA FORÇA MAGNÉTICA NA BOBINA MÓVEL

A Figura 4 mostra uma seção do excitador na região onde o campo magnético atua sobre a bobina móvel. Na parte da direita da figura, mostra-se a passagem da distribuição de fluxo do circuito magnético através das espiras portadoras de corrente da bobina. Supõe-se na parte da direita da figura que o espaço da bobina esteja preenchido com um condutor de cobre sólido de uma espira portando j amperes por metro quadrado uniformemente distribuídos.

A força axial em um anel elementar de cobre de área de seção transversal $dr \cdot dx$ metros quadrados é devido à reação entre a corrente deste anel e a componente radial da densidade

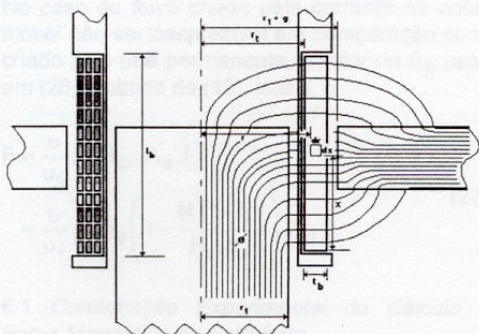


FIGURA 4. Linhas de Fluxo Magnético no Entreferro

de fluxo no centro da sua seção transversal. Supõe-se neste ponto que o fluxo criado pela corrente na bobina móvel seja desprezível em comparação com o criado pelo ímã permanente (mais adiante isto será revisado). Sendo este o caso, a força magnética pode ser expressa por

$$F = B i \ell \quad (14)$$

onde a corrente do anel elementar i é dada por

$$i = j \cdot dx \cdot dr \quad (15)$$

A densidade de fluxo B à qual o anel está submetido é

$$B = \frac{d\Phi_r}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot dx} \quad (16)$$

onde $d\Phi_r$ é a componente radial do fluxo de dispersão do circuito magnético no comprimento axial dx , e o comprimento do anel elementar é

$$\ell = 2 \cdot \pi \cdot r \quad (17)$$

Substituindo-se (15), (16) e (17) em (14), a força no anel elementar é dada por

$$dF = j \cdot dx \cdot dr \cdot \frac{d\Phi_r}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot dx} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r = j \cdot dr \cdot d\Phi_r \quad (18)$$

Integrando-se (18), obtém-se a força total na bobina móvel,

$$F = j \cdot \int_{r_i}^{r_i+t_b} dr \cdot \int_{x=0}^{x=l_b} d\Phi_r = j \cdot t_b \cdot \int_{x=0}^{x=l_b} d\Phi_r \quad (19)$$

Mas $\int_{x=0}^{x=l_b} d\Phi_r$ é igual ao fluxo de dispersão total do circuito magnético, supondo-se que o comprimento da bobina l_b seja suficientemente

grande de tal modo que nenhum fluxo do circuito magnético passe sem atravessar a bobina. Também $j \cdot t_b$ é o ampère por metro de comprimento axial da bobina e, portanto, a intensidade de campo magnético H do solenóide. Assim, a força total na bobina móvel é

$$F = H \Phi_r \quad (20)$$

onde Φ_r é todo o fluxo do núcleo que finalmente alcança a tampa da caixa radialmente. Este fluxo é calculado do fluxo no ímã permanente Φ_T de

$$\Phi_r = \frac{\Phi_T}{\nu_1} = \frac{B_i \cdot A_i}{\nu_1} \quad (21)$$

onde B_i é a densidade de fluxo no ímã permanente, A_i é a área da seção transversal do ímã permanente e ν_1 é o coeficiente de dispersão dado por

$$\nu_1 = \frac{\sum_{n=1}^7 P_n}{\sum_{n=1}^5 P_n} \quad (22)$$

Considerando-se que a bobina móvel seja composta de N espiras pelas quais circulam uma corrente i , a densidade de corrente média é

$$j = \frac{N \cdot i}{l_B \cdot t_B} \quad (23)$$

Portanto, substituindo-se (21) e (23) em (14), onde $H = j \cdot t_B$, a força magnética é

$$F = \frac{N \cdot i}{l_B} \cdot \frac{B_i \cdot A_i}{\nu_1} \quad (24)$$

A densidade de fluxo é comumente medida no entreferro por meio de um gaussímetro. O valor máximo de fluxo é medido na região de maior permeância do entreferro (percurso nº 1 na Figura 1). Substituindo-se (5) em (24), tem-se

$$F = \frac{\nu}{\nu_1} \cdot \frac{N \cdot i}{l_B} \cdot B_g \cdot A_g \quad (25)$$

ou

$$F = \frac{\nu}{\nu_1} \cdot \eta \cdot B_g \cdot A_g \cdot i \quad (26)$$

onde η é o número de espiras por unidade de comprimento.

No caso do fluxo criado pela corrente na bobina móvel não ser desprezível em comparação com o criado pelo ímã permanente, o valor de B_g usado em (26) é obtido de (13), isto é,

$$F = \frac{\nu}{\nu_1} \cdot \eta \cdot B_{gt} \cdot A_g \cdot i \quad (27)$$

$$= \frac{\nu}{\nu_1} \cdot \eta \cdot B_g \left(1 - \frac{N \cdot (i + i_0)}{H_c \cdot h_2} \right) \cdot A_g \cdot i$$

6.1 Confirmação Experimental do Cálculo da Força Magnética no Entreferro

A medição da força magnética foi feita com a bobina móvel do excitador em equilíbrio estático. Duas bobinas com números de espiras por metro η diferentes e com diâmetros de fio distintos foram construídas.

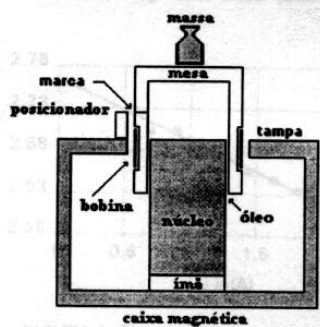


FIGURA 5. Dispositivo para Medição da Força Magnética

Um ensaio foi feito para cada bobina móvel. O comprimento da bobina l_b e o seu posicionamento é tal que esta é atravessada somente pelos fluxos de dispersão dos percursos de nº 1, 2, 3, 4 e 5 na Figura 1. O posicionador funciona como um referencial de carga nula. O equilíbrio da bobina é obtido através da circulação de uma corrente contínua i_0 . Assim, quando a marca existente na mesa coincide com o posicionador, o peso do conjunto mesa-bobina P será igual à força magnética inicial F_{mag_0} (Figura 6).

Ao se colocar uma massa na mesa (peso p), esta apresenta sua marca posicionada abaixo do posicionador. A intensidade da corrente contínua é aumentada de forma a equilibrar novamente a mesa, colocando a marca da mesa na altura do posicionador. Com isto pode-se dizer que a força magnética F_{mag} é igual ao peso da massa p .

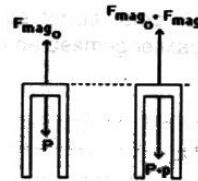


FIGURA 6. Diagrama de Forças

Para a análise das incertezas da medição, foram feitos dez registros de corrente para cada massa colocada sobre a mesa. A corrente efetiva que equilibra a massa é dada pela diferença entre a corrente lida e a corrente de equilíbrio i_0 .

TABELA 3. Características dos Fios Usados nas Bobinas

| | Bobina 1 | Bobina 2 |
|--------------------|----------------------|----------------------|
| ϕ_{nu} | 0,81 mm | 0,29 mm |
| $\phi_{esmaltado}$ | 0,86 mm | 0,31 mm |
| l_b | 55,2 mm | 55,2 mm |
| η | 1081 m ⁻¹ | 2937 m ⁻¹ |
| N | 60 | 163 |

A força magnética na bobina móvel foi calculada de (27) inserindo-se valores obtidos experimentalmente. O fluxo magnético $B_g A_g$ medido no percurso de nº 1 (Figura 1), na ausência de corrente na bobina, é de $(4,8 \pm 0,3) \times 10^{-4}$ Wb. A altura h_2 do ímã consta da Tabela 1. As características das bobinas estão listadas na Tabela 3. O coeficiente de dispersão ν/ν_1 foi também obtido experimentalmente fazendo-se um gráfico da força medida dividida pela corrente versus a corrente (Figuras 7 e 8). Dividindo-se (27) por i obtém-se uma reta cujo coeficiente é dado por

$$a_0 = \frac{\nu}{\nu_1} \eta B_g A_g \quad (28)$$

Fazendo-se uma regressão linear [3] dos pontos medidos (Figuras 7 e 8), obtém-se os valores experimentais de ν/ν_1 para cada bobina, que estão listados na Tabela 4 juntamente com o valor calculado substituindo-se os dados da Tabela 1 em (4) e (22).

TABELA 4. Comparação do coeficiente de dispersão obtido

| | calculado | medido | |
|-------------|-----------|----------|----------|
| | | bobina 1 | bobina 2 |
| ν/ν_1 | 2,0 | 2,0±0,1 | 2,0±0,1 |

A comparação entre os valores calculados e medidos da força magnética está ilustrada nas Figuras 9 e 10. Os valores medidos estão dentro das incertezas associadas ao processo de medição da força magnética na bobina móvel. Uma causa da discrepância observada (máximo de 1,7 % do valor medido) é o atrito entre a bobina móvel e o núcleo.

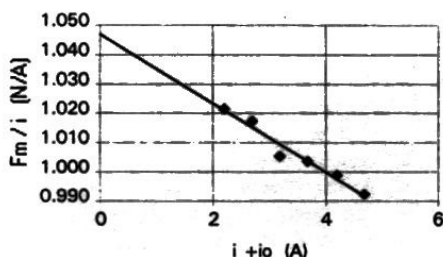


FIGURA 7. Regressão Linear (Bobina 1)

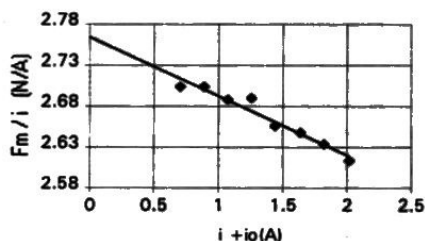


FIGURA 8. Regressão Linear (Bobina 2)

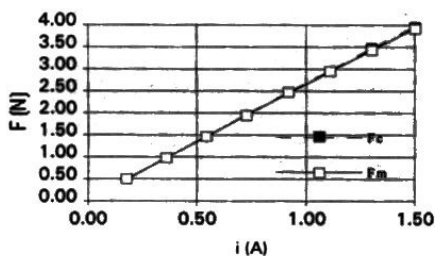


FIGURA 9. Comparação entre os Valores Calculados (F_c) e Medidos (F_m) da Força Magnética na Bobina 1.

7 CONCLUSÕES

Os métodos clássicos de projeto de dispositivos magnéticos são aplicáveis ao cálculo da força (em equilíbrio estático) de excitadores eletromagnéticos de vibrações que usam ímãs

permanentes de terras raras. O comportamento linear da curva de desmagnetização destes ímãs

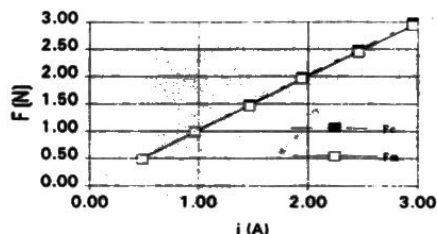


FIGURA 10. Comparação entre os Valores Calculados (F_c) e Medidos (F_m) da Força Magnética na Bobina 2.

permite o tratamento analítico do problema. Os valores calculados de campo magnético no entreferro e força na bobina móvel foram confirmados experimentalmente em um excitador eletromagnético de ímã permanente de neodímio-ferro-boro.

8 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Gilmar Machado Ximenes, chefe do Laboratório de Vibrações, José Augusto de Azevedo, chefe da Divisão de Acústica e Vibrações, e Marcos Aurélio Lima de Oliveira, chefe da Divisão de Eletricidade, pela provisão dos recursos necessários à realização deste trabalho. Os autores também agradecem ao CNPq pelo financiamento do projeto do qual este trabalho é apenas uma parte.

Agradecimentos vão também para as equipes dos Laboratórios de Acústica e Vibrações pela ajuda prestada na construção e ensaio dos excitadores usados neste trabalho. Os autores são também gratos a Marcio A. Sens, da Universidade Federal Fluminense pela medição das características dos materiais magnéticos.

9 REFERÊNCIAS

- [1] ROTERS, H.C., *Electromagnetic Devices*, John Wiley & Sons, 1941.
- [2] WECC Doc.19-1990, *Guidelines for the Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibrations*, 1990.
- [3] CHATFIELD, C., *Statistics for Technology*, Chapman & Hall, 3rd edition, 1983.