

ESP1066

Prova 1 . Peso: 3,00 . Duração: 3h

Prof. Dr. Luiz Fernando Freitas-Gutierrez

luiz.gutierrez@ufsm.br



Licença internacional *Creative Commons* 4.0 – Atribuição-SemDerivações

https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/deed.pt_BR

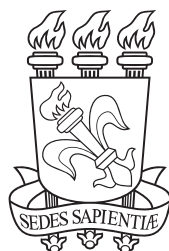
Nome & Matrícula: LF de Freitas-Gutierrez

Nota: Gabarito

05-06-2024

Instruções:

- ⇒ Preencha seu nome completo e matrícula na capa desta avaliação e rubrique as demais folhas.
- ⇒ Use caneta azul ou preta para responder.
- ⇒ Nas folhas de rascunho, é permitido o uso de lápis ou lapiseira.
- ⇒ Se precisar de espaço adicional para responder questões, solicite uma folha adicional ao professor.
- ⇒ Escreva respostas de forma clara e legível. Respostas ilegíveis não serão avaliadas.
- ⇒ Em questões de certo ou errado, ao identificar itens incorretos, corrija-os e forneça justificativas.
- ⇒ Em questões que envolvam cálculos, apresente-os de maneira completa.



UFSM

Questões	01	02	Total
Pontos	55	45	100
Notas			

- ① A Figura 1 demonstra um dispositivo composto por um material ferromagnético não-linear, cujas propriedades magnéticas são representadas pela curva de magnetização, conforme exibido na mesma ilustração.

Em relação ao dispositivo, sabe-se que o número de espiras das bobinas 1 e 2 são, respectivamente, 1000 e 5000. A área da seção transversal a ser levada em consideração para este problema é de 10 cm^2 . São dados os seguintes comprimentos: $l_{ab} = l_{de} = 40 \text{ cm}$ e $l_{bc} = l_{ef} = l_{ad} = l_{be} = l_{cf} = 80 \text{ cm}$. Com o objetivo de projeto de manter a indução magnética no entreferro equivalente a $4,5 \text{ T}$, responda os itens subsequentes.

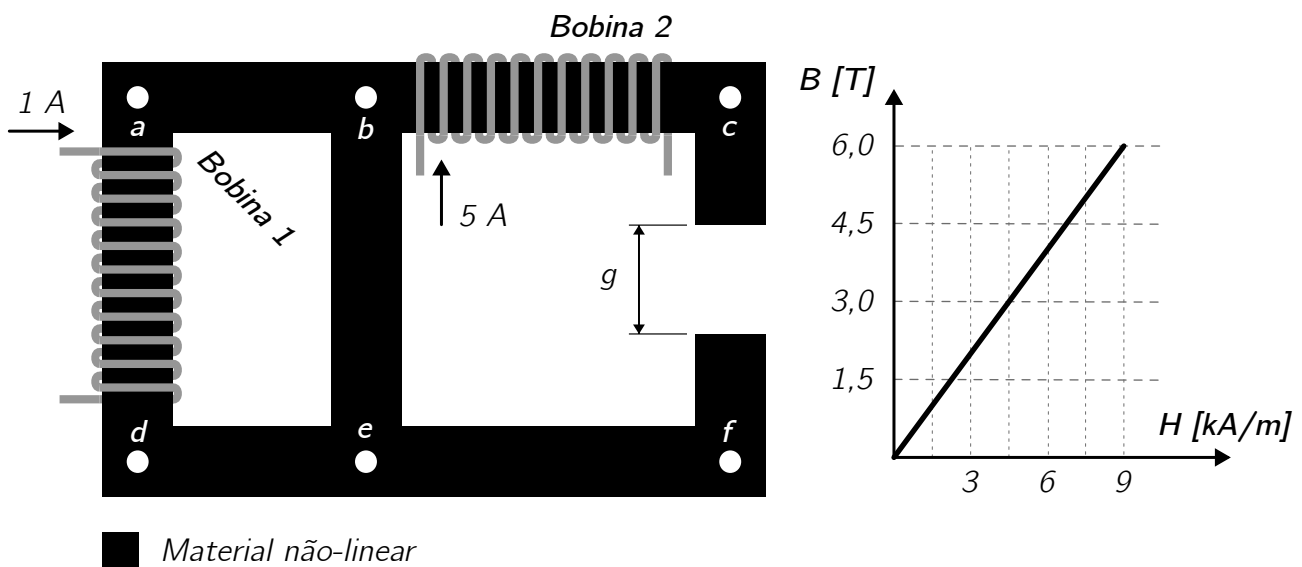


Figura 1: Ilustração para a Questão 1.

- a) 15 pontos Determine o comprimento médio g do entreferro.

$$g = 1,36 \text{ cm} - 3 \text{ mm}$$

- b) 5 pontos Estime os fluxos magnéticos concatenados em cada bobina (Λ_1 e Λ_2).

$$\Lambda_1 = 1,22 \text{ Wb-c}$$

$$\Lambda_2 = 22,5 \text{ Wb-c}$$

- c) 10 pontos Calcule a energia magnética \mathcal{W}_g acumulada no entreferro.

$$\mathcal{W}_g = 10,98 \text{ J}$$

- d) 10 pontos Quantifique as indutâncias próprias (L_1 e L_2) dos enrolamentos.

$$L_1 = 0,3 \text{ H}$$

$$L_2 = 4,56 \text{ H}$$

- e) 15 pontos Estabeleça a indutância mútua M entre as bobinas.

$$M = 0,3 \text{ H}$$

⊗ Procedimentos para o cálculo da indutância M :

$$M = \frac{\Lambda_{12}}{I_1} = \frac{N_2 \Phi_{12}}{I_1}$$

Nomenclatura:

Φ_{12} : fluxo mag. da 1ª que atingiu a 2ª. Λ_{12} : fluxo concatenado da 1ª na 2ª. I_1 : corrente da 1ª (produtora de Φ_{12}). N_2 : número de espiras da 2ª (atingida por Φ_{12}).

2) 45 pontos Analise os itens abaixo, indicando se são certos ou errados.

- a) ☒ E Apesar da analogia matemática entre circuitos magnéticos e elétricos ser válida em muitos aspectos, existem algumas diferenças físicas entre eles, como a dissipação de potência I^2R em sistemas elétricos. Contudo, não existe perda ou absorção de potência pelo campo H em circuitos magnéticos.
- b) ☒ E Na Figura 2, a regra dos pontos representa duas bobinas com fluxos magnéticos Φ_1 e Φ_2 produzidos em sentidos opostos.

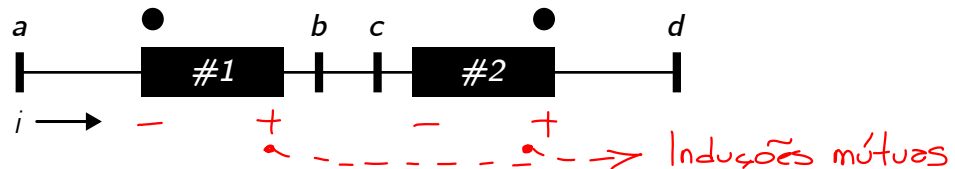


Figura 2: Duas bobinas em série, com autoindutâncias L_1 e L_2 , indutância mútua M , e percorridas por uma corrente i .

- c) ☐ ☒ E A força eletromotriz induzida na bobina #2, decorrente da influência do enrolamento #1 na Figura 2, é dada por $\mathcal{E}_{21} = M di/dt$, onde $v_c < v_d$. *$\Delta \mathcal{E}_{21} = M di/dt$*
- d) ☐ ☒ E A equação que rege o circuito da Figura 2 é dada por $v_{ad} = (L_1 + L_2 - 2M) di/dt$.
- e) ☒ E Em um material ferromagnético, a curva de magnetização entre duas induções B_1 e B_2 para valores decrescentes de H é equivalente à curva correspondente a valores crescentes de H .
- f) ☒ E Em um ensaio de polaridade em um transformador monofásico, é possível obter tanto uma combinação aditiva quanto subtrativa, sem impactar na posição dos pontos do primário e secundário.
- g) ☐ ☒ E Um transformador foi inicialmente ensaiado no NUPEDDE sob 678,7 V e 60 Hz, observando-se uma potência a vazio de 904 W. Em um segundo teste, a mesma máquina foi excitada com 282,8 V e 25 Hz, resultando em 344,4 W. Desconsiderando as distintas tensões aplicadas, é possível estimar as perdas por histerese a 60 Hz como aproximadamente 424 W. *424 W*
- h) ☐ ☒ E Para o caso do item anterior, as diferentes tensões possuem impacto desprezível na estimativa das perdas no ferro a partir das equações de Steinmetz. *$\phi, B \propto V$
impactam nas perdas no ferro*
- i) ☒ E O ciclo de fluxo concatenado por corrente (Λ, i) possui aproximadamente o mesmo formato que o ciclo de histerese.
- j) ☐ ☒ Considerar o espraimento tende a *subestimar* a densidade de fluxo magnético. *superestimar*

$$B_g \cdot S = \Phi = B_g \cdot \text{espraimento} \quad \downarrow \quad \text{espraimento} \uparrow$$

$$P_o = A f + B f^2 \quad \leftarrow P_h, P_{cp}$$

$$\begin{aligned} 904 &= A \cdot 60 + B \cdot 60^2 \\ 344,4 &= A \cdot 25 + B \cdot 25^2 \quad (x - 2,4) \Rightarrow 77,44 = B \cdot 2100 \\ B &\approx 0,04 \\ A &\approx 12,67 \\ \text{logo, } P_h &= 12,67 \cdot 60 = 760 \text{ W} \end{aligned}$$

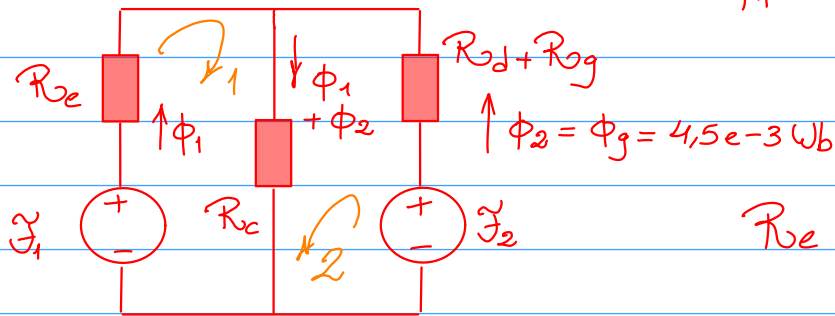
0,03688

$$B_g = 4,5 \text{ T} \rightarrow \phi_g = B_g \cdot S = 4,5 \cdot 10^{-4} = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$$

$$\mu_f = ? \rightarrow B = \mu_f H$$

$$6 = \mu_f \cdot 9000$$

$$\mu_f \approx 6,67 \cdot 10^{-4} \text{ H/m}$$



$$R_e = \frac{l_e}{\mu_f S} \approx 2,4 \cdot 10^6 \text{ H}^{-1}$$

$$R_c = \frac{l_c}{\mu_f S} \approx 1,2 \cdot 10^6 \text{ H}^{-1}$$

$$R_d = \frac{l_d}{\mu_f S} = \frac{24 - g}{6,67 \cdot 10^{-4}} \text{ H}^{-1}$$

$$R_g = \frac{g}{\mu_0 S} = \frac{g}{1,26 \cdot 10^{-9}} \text{ H}^{-1}$$

$$F_1 = N_1 I_1 = 1000 \text{ At}$$

$$F_2 = N_2 I_2 = 25000 \text{ At}$$

Malha 1: $-F_1 + \phi_1 R_e + (\phi_1 + \phi_2) R_c = 0$

$$-\phi_1 R_e + (\phi_1 + \phi_2) R_c = F_1$$

Malha 2: $-F_2 + \phi_2 R_d + \phi_2 R_g + (\phi_1 + \phi_2) R_c = 0$

$$\phi_2 R_d + \phi_2 R_g + (\phi_1 + \phi_2) R_c = F_2$$

$$\phi_1 (R_e + R_c) + \phi_2 R_c = F_1$$

$$\phi_1 \cdot 3,6 \cdot 10^6 + 4,5 \cdot 10^{-3} \cdot 1,2 \cdot 10^6 = 1000$$

$$\phi_1 = -1,22 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$$

$$\phi_2 (R_d + R_g) + (\phi_1 + \phi_2) R_c = F_2$$

$$4,5 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{g}{1,26 \cdot 10^{-9}} + \frac{24 - g}{6,67 \cdot 10^{-4}} \right) + (4,5 \cdot 10^{-3} - 1,22 \cdot 10^{-3}) \cdot 1,2 \cdot 10^6 = 25000$$

$$\frac{g}{1,26 \cdot 10^{-9}} + \frac{24 - g}{6,67 \cdot 10^{-4}} = 4,68 \cdot 10^6$$

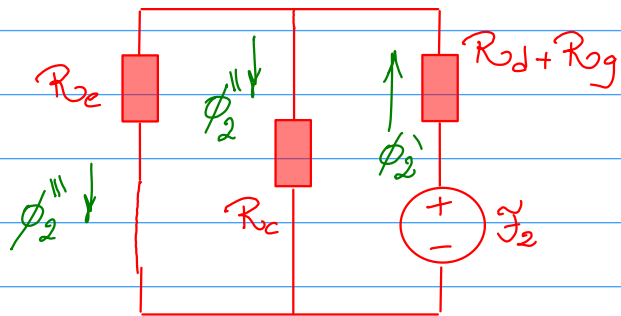
$$4,94 \cdot 10^8 \cdot g - 1,50 \cdot 10^6 \cdot g = 1,08 \cdot 10^6 \therefore g = 1,36 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$\Lambda_1 = N_1 \phi_1 = 1,22 \text{ Wb-c}$$

$$\Lambda_2 = N_2 \phi_2 = 22,5 \text{ Wb-c}$$

5000

$$W_g = \frac{B_g H_g}{2} \cdot V = \frac{B_g^2}{2\mu_0} \cdot S \cdot g = 10,96 \text{ J}$$



$$R_d = 3,6 \text{ e}+6 \text{ H}^{-1}$$

$$R_g = 1,08 \text{ e}+6 \text{ H}^{-1}$$

$$J_2 = \left[(R_d + R_g + R_c \parallel R_e) \cdot \phi_2' \right]$$

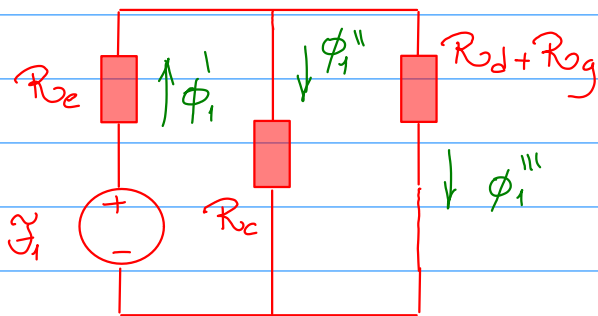
$$\phi_2' = 4,56 \text{ e}-3 \text{ Wb} \rightarrow L_1 = \frac{5000 \cdot 4,56 \text{ e}-3}{5}$$

$$L_1 = 4,56 \text{ H}$$

$$J_2 - (R_d + R_g) \phi_2' = 3666,4 \text{ Ae}$$

$$\text{Com isso, } \phi_2''' = \frac{3666,4}{R_c} = 1,53 \text{ e}-3 \text{ Wb}$$

$$M = \frac{1000 \cdot 1,53 \text{ e}-3}{5} \approx 0,30 \text{ H}$$



$$J_1 = \left\{ \left[R_e + R_c \parallel (R_d + R_g) \right] \phi_1' \right\}$$

$$\phi_1' = 2,98 \text{ e}-4 \text{ Wb}$$

$$L_2 = \frac{1000 \cdot 2,98 \text{ e}-4}{1}$$

$$\otimes J_1 - R_e \cdot \phi_1' = 285,16 \text{ Ae}$$

$$L_2 \approx 0,3 \text{ H}$$

$$\text{Com isso, } \phi_1''' = \frac{285,16}{R_d + R_g} = 6,09 \text{ e}-5 \text{ Wb}$$

$$\phi_2' - \phi_1''' \approx 4,5 \text{ e}-3 \text{ Wb} = \phi_g \text{ (Confirmado!)}$$

$$M = \frac{5000 \cdot 6,09 \text{ e}-5}{1} = 0,30 \text{ H (Confirmado!)}$$