

**PROCESSO SELETIVO – 05/2022**

**Área de Conhecimento: Máquinas Elétricas**

**PROVA ESCRITA – PADRÃO DE RESPOSTA**

**QUESTÃO 1:** \_\_\_\_\_

**Resolução da Questão 1:** A resolução segue as mesmas linhas apresentadas na página 217 do livro “*Máquinas elétricas: com introdução à eletrônica de potência*” (FITZGERALD, 2006).

A máquina desta questão é um sistema de quatro enrolamentos. Assim, a co-energia consistirá em quatro termos envolvendo metade da indutância própria multiplicada pelo quadrado da correspondente corrente do enrolamento, assim como termos de produtos que consistem em indutâncias mútuas entre pares de enrolamentos multiplicadas pelas correspondentes correntes de enrolamento. Observando que apenas os termos que envolvem as indutâncias mútuas entre o enrolamento de campo e os três enrolamentos de fase da armadura conterão termos que variam com  $\theta_m$ , podemos escrever a co-energia na forma

$$W'_{campo}(i_a, i_b, i_c, i_f, \theta_m) = W'_{cte} + \mathcal{L}_{af}i_a i_f + \mathcal{L}_{bf}i_b i_f + \mathcal{L}_{cf}i_c i_f,$$

onde

$$W'_{cte} = \frac{1}{2}L_f i_f^2 + \frac{1}{2}L_{aa}i_a^2 + \frac{1}{2}L_{bb}i_b^2 + \frac{1}{2}L_{cc}i_c^2 + L_{ab}i_a i_b + L_{bc}i_b i_c + L_{ca}i_c i_a.$$

Expandindo a equação da co-energia, obtém-se

$$W'_{campo}(i_a, i_b, i_c, i_f, \theta_m) = W'_{cte} + L_{af}I_a I_f [\cos(2\theta_m) \cos(\omega_e t + \delta) + \cos(2\theta_m - 120^\circ) \cos(\omega_e t - 120^\circ + \delta) + \cos(2\theta_m + 120^\circ) \cos(\omega_e t + 120^\circ - \delta)].$$

**Continua na próxima página.**

Finalmente, aplicando a regra trigonométrica  $\cos(a \pm b) = \cos(a)\cos(b) \mp \sin(a)\sin(b)$  é possível reescrever a co-energia como

$$W'_{campo}(i_a, i_b, i_c, i_f, \theta_m) = W'_{cte} + \frac{3}{2}L_{af}I_aI_f \cos(2\theta_m - \omega_e t - \delta).$$

O conjugado pode ser encontrado agora a partir da derivada parcial de  $W'_{campo}$  em relação a  $\theta_m$ , isto é

$$T = \left. \frac{\partial W'_{campo}}{\partial \theta_m} \right|_{i_a, i_b, i_c, i_f},$$

$$T = -3L_{af}I_aI_f \sin(2\theta_m - \omega_e t - \delta).$$

Dessa expressão, vemos que o conjugado será constante quando o rotor girar na velocidade síncrona  $\omega_s$  tal que

$$\theta_m = \omega_s t = \left( \frac{\omega_e}{2} \right) t$$

em cujo caso o conjugado será igual a

$$T = 3L_{af}I_aI_f \sin(\delta).$$

onde observa-se que o conjugado dessa máquina trifásica, operando na velocidade síncrona sob condições trifásicas equilibradas, é constante.

\*O padrão de resposta deve estar fundamentado nas bibliografias exigidas pelo Edital, para evitar problemas o professor deverá citar o capítulo/página do livro utilizado.

**Membros da Banca:**

---

**Avaliador 1 (nome e assinatura)**

---

**Avaliador 2 (nome e assinatura)**

---

**Avaliador 3 (nome e assinatura)**

---

**Presidente da Banca (nome e assinatura)**

**Área de Conhecimento: Máquinas Elétricas**

**PROVA ESCRITA – PADRÃO DE RESPOSTA**

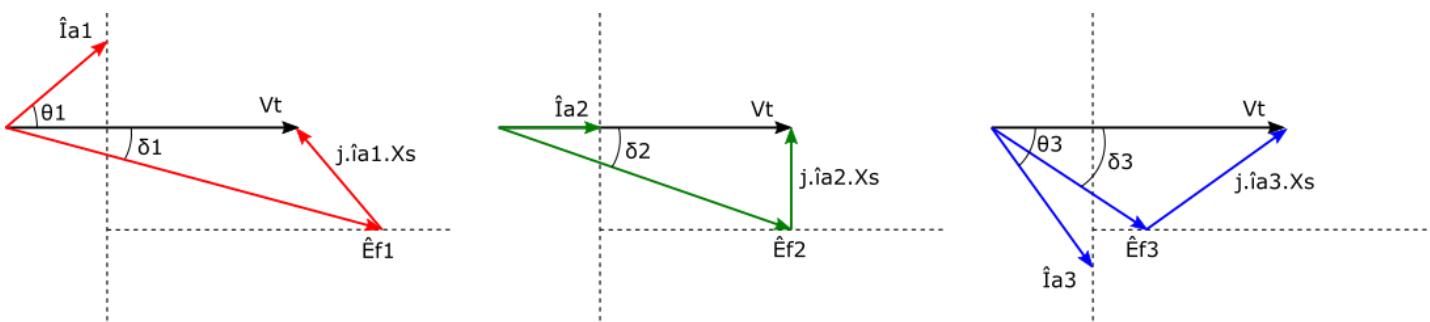
**QUESTÃO 2:** \_\_\_\_\_

**Resolução da Questão 2:** A resolução segue as mesmas linhas apresentadas a partir da página 248 do livro “*Fundamentos de Máquinas Elétricas*” de Vincent Del Toro.

A característica do controle do fator de potência existe na máquina síncrona por ser uma máquina com excitação dupla. Desta forma, embora a operação em uma tensão aplicada constante exija um fluxo resultante fixo, tanto a fonte CC quanto a fonte CA podem cooperar para estabelecer este fluxo resultante. Se a corrente do enrolamento de campo for muito grande, então, evidentemente, a tensão no entreferro resultante no motor tende a ser maior do que a exigida pela tensão aplicada.

Consequentemente, uma reação ocorre, o que faz com que a corrente de armadura assuma um ângulo de fator de potência tal que a FMM de armadura produza o efeito desmagnetizante que é necessário para restaurar o fluxo resultante desejado. Do mesmo modo, se o campo for sub-excitado, o fluxo no entreferro resultante tende a ser muito pequeno. Isso também cria uma diferença de tensão fasorial entre a tensão da rede e a tensão de excitação do motor que atua para fazer com que a corrente de armadura circule com fator de potência que possibilita a ele magnetizar o entreferro no valor necessário para fornecer o fluxo resultante necessário.

Se a componente reativa da corrente deve ser adiantada ou atrasada vem imediatamente do estudo dos diagramas fasoriais representados na figura a seguir para vários valores de excitação.

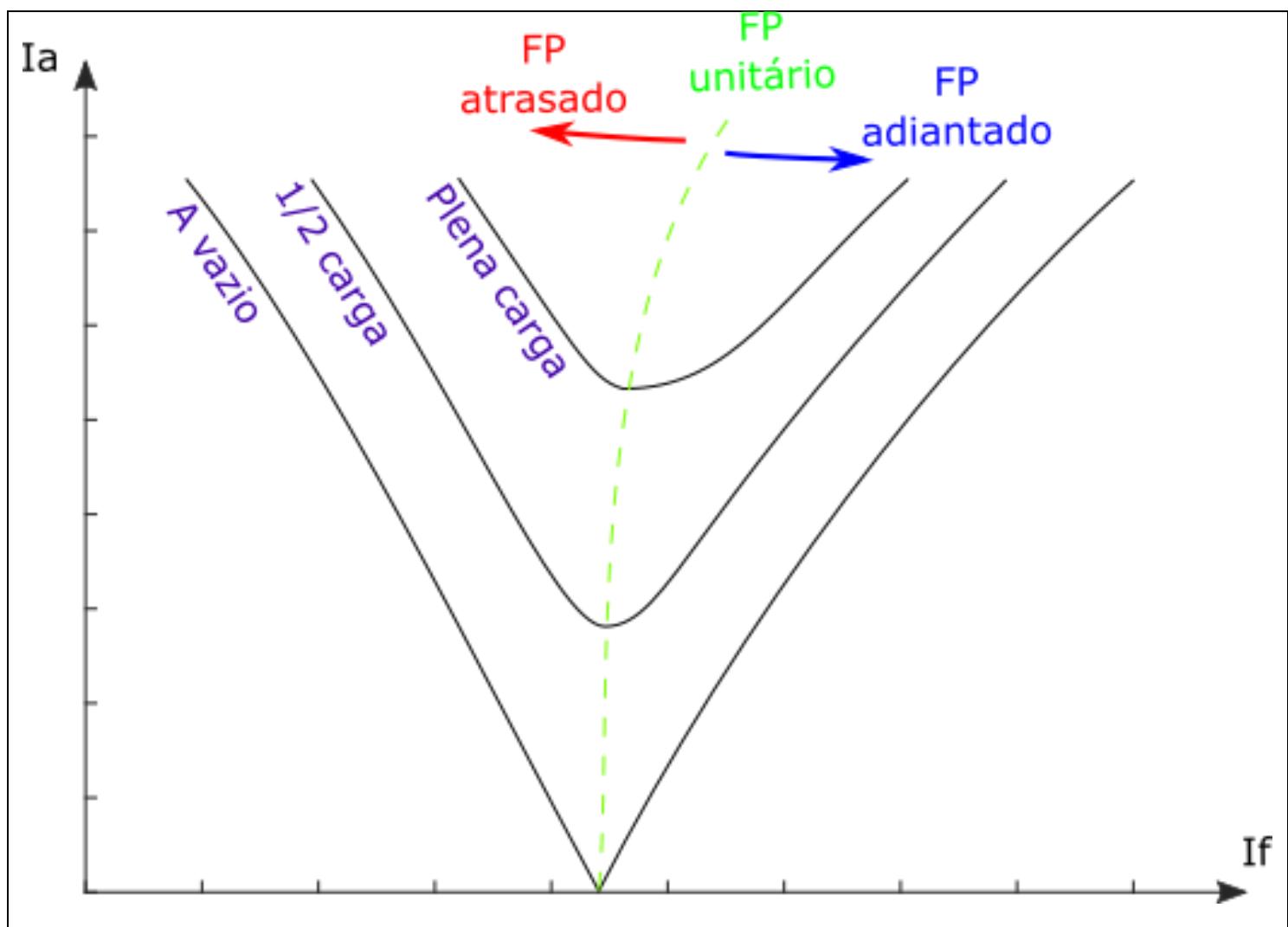


*Continua na próxima página.*

O diagrama se aplica para uma potência mecânica desenvolvida considerada constante. Portanto, quando  $\hat{E}_f$  se altera, o  $\text{sen}(\delta)$  deve mudar de modo correspondente para manter  $E_f \text{ sen}(\delta)$  constante. Na figura, isso significa que, quando a excitação varia, o lugar geométrico da extremidade do fator  $\hat{E}_f$  é a linha tracejada. Outrossim, a componente em fase da corrente em cada caso deve ser a mesma. No primeiro caso, onde a tensão de excitação é  $\hat{E}_{f1}$ , a corrente de campo está produzindo fluxo demais. Isso gera uma reação entre o motor e a fonte, que requer uma corrente adiantada de um módulo tal que gera uma quantidade e sentido de queda na reatância síncrona que, quando somada a  $\hat{E}_{f1}$ , produz uma tensão terminal fixa,  $\hat{V}_t$ . Fisicamente, o que está ocorrendo é que uma corrente reativa adiantada está circulando, o que atua no sentido de desmagnetizar o campo de fluxo no valor necessário. Quando a excitação é reduzida a  $\hat{E}_{f2}$ , não há fluxo em excesso produzido pelo enrolamento de campo. Consequentemente, a corrente da rede CA não tem componente reativo. Tem, simplesmente, o valor da componente em fase necessária para fornecer potência à carga. Na excitação correspondente a  $\hat{E}_{f3}$ , a máquina está fortemente sub-excitada. Para compensar, uma reação ocorre, que permite à rede entregar uma grande corrente reativa atrasada, que ajuda a estabelecer o valor do fluxo no entreferro exigido pela tensão terminal. Observa-se, também, que, quando a excitação se reduz, o ângulo de potência deve aumentar, para uma carga mecânica desenvolvida fixa.

A descrição precedente por ser resumida observando-se que, para uma dada condição de carga  $\delta$ , o motor síncrono não tem necessidade de solicitar corrente reativa sempre que  $E_f \cos(\delta) = V_t$ . Contudo, solicita uma corrente reativa *adiantada* sempre que  $E_f \cos(\delta) > V_t$  e uma corrente reativa *atrasada* sempre que  $E_f \cos(\delta) < V_t$ . Se for feito um gráfico da corrente de armadura, quando a excitação varia, para uma carga mecânica desenvolvida fixa, a corrente pode ser observada como tendo um valor elevado para sub-excitação e sobre-excitação, passando por um mínimo em um ponto intermediário. Trata-se da curva V esboçada na figura a seguir.

***Continua na próxima página.***



\*O padrão de resposta deve estar fundamentado nas bibliografias exigidas pelo Edital, para evitar problemas o professor deverá citar o capítulo/página do livro utilizado.

**Membros da Banca:**

---

**Avaliador 1 (nome e assinatura)**

---

**Avaliador 2 (nome e assinatura)**

---

**Avaliador 3 (nome e assinatura)**

---

**Presidente da Banca (nome e assinatura)**

**PROCESSO SELETIVO – 05/2022**

**Área de Conhecimento: Máquinas Elétricas**

**PROVA ESCRITA – PADRÃO DE RESPOSTA**

**QUESTÃO 3:** \_\_\_\_\_

**Resolução da Questão 3:** A resolução segue as mesmas linhas apresentadas na página 306 do livro “*Máquinas elétricas: com introdução à eletrônica de potência*” (FITZGERALD, 2006). Apenas os valores da velocidade e da corrente de terminal foram modificados para simplificar os cálculos.

A potência dissipada no enrolamento do estator é dada por

$$P_{estator} = 3I_1^2R_1 = 3(22,4)^20,2 = 301 \text{ W.}$$

Assim, a potência no entreferro é

$$P_g = P_{entrada} - P_{estator} = 15,7 - 0,3 = 15,4 \text{ kW.}$$

A velocidade síncrona dessa máquina pode ser obtida por

$$n_s = \left( \frac{120}{polos} \right) f_e = \left( \frac{120}{2} \right) 60 = 3600 \text{ rpm}$$

e, portanto, o escorregamento é

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{3600 - 3510}{3600} = 0.025.$$

Assim,

$$P_{rotor} = sP_g = 0,025 \cdot 15,4 \text{ kW} = 419 \text{ W.}$$

\*O padrão de resposta deve estar fundamentado nas bibliografias exigidas pelo Edital, para evitar problemas o professor deverá citar o capítulo/página do livro utilizado.

**Membros da Banca:**

---

**Avaliador 1 (nome e assinatura)**

---

**Avaliador 2 (nome e assinatura)**

---

**Avaliador 3 (nome e assinatura)**

---

**Presidente da Banca (nome e assinatura)**



## Assinaturas do documento



Código para verificação: **2Y71L1TU**

Este documento foi assinado digitalmente pelos seguintes signatários nas datas indicadas:

 **JOSE DE OLIVEIRA** (CPF: 445.XXX.099-XX) em 12/12/2022 às 09:07:20  
Emitido por: "SGP-e", emitido em 30/03/2018 - 12:42:47 e válido até 30/03/2118 - 12:42:47.  
(Assinatura do sistema)

Para verificar a autenticidade desta cópia, acesse o link <https://portal.sgpe.sea.sc.gov.br/portal-externo/conferencia-documento/VURFU0NfMTIwMjJfMDAwNTU5NzFfNTYwNThfMjAyMi8yWTcxTDFUVQ==> ou o site <https://portal.sgpe.sea.sc.gov.br/portal-externo> e informe o processo **UDESC 00055971/2022** e o código **2Y71L1TU** ou aponte a câmera para o QR Code presente nesta página para realizar a conferência.