CENTRO DE TECNOLOGIA (CE)
DEP. DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA (DET)
ENGENHARIA ELÉTRICA

Conversão Eletromecânica de Energia II

Prof. Victor Aguiar

Módulo III – Geradores Síncronos

Parte 2

Avaliação C

Um ensaio a vazio em um gerador síncrono trifásico de 60 Hz, mostra que uma tensão nominal a vazio de 13,8 KV é produzida por uma corrente de campo de 318 A. Extrapolando a linha do entreferro a partir do conjunto de medidas feitas na máquina, pode-se mostrar que a corrente de campo correspondente a 13,8 KV sobre a linha de entreferro é 263 A. Supondo que esteja funcionando a uma velocidade correspondente a uma frequência elétrica de 50 Hz, calcule: (A) a tensão de linha dos terminais a vazio correspondente a uma corrente de campo de 318 A e (B) a corrente de campo correspondente àquela mesma tensão na linha de entreferro de 50 Hz.

Exercício 4

Os seguintes dados foram tomados das características a vazio e de curto-circuito de uma máquina síncrona trifásica ligada em Y de 45 KVA, 220 V (tensão de linha), 6 pólos e 60 Hz.

Da característica a vazio: Tensão de linha = 220 V e Corrente de Campo = 2,84 A.

Da característica de curto-circuito, o par (I_a,I_f): (118,2.2) e (152,2.84).

Da linha de entreferro I_f é 2,2 A e tensão de linha é 202 V.

Calcule o valor não saturado da reatância síncrona, o seu valor saturado na tensão nominal e a relação de curto-circuito. Expresse a reatância síncrona em Ω/fase e p.u., considerando as especificações nominais da máquina como base.

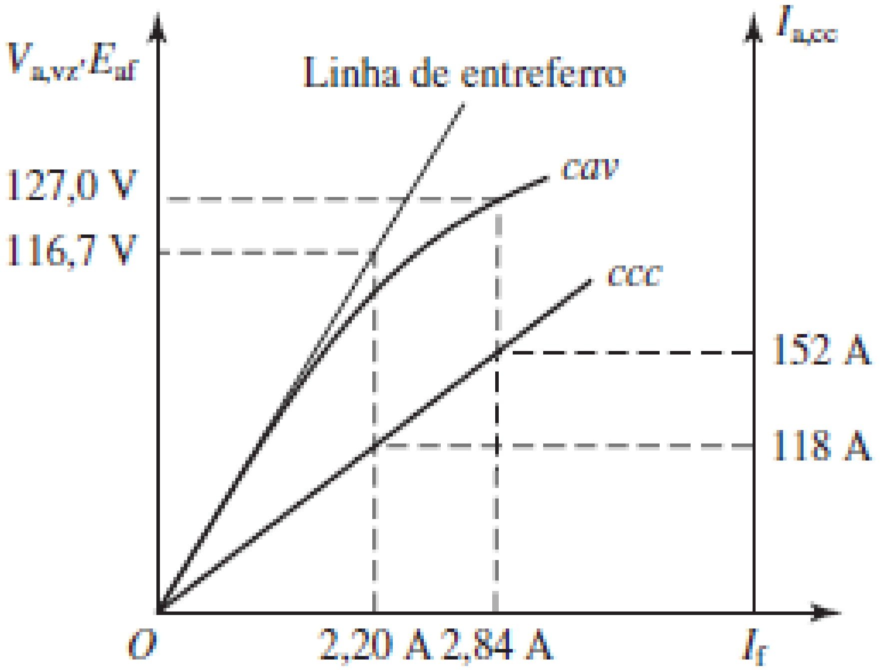
Exercício 4

Os seguintes dados foram tomados das características a vazio e de curto-circuito de uma máquina síncrona trifásica ligada em Y de 45 KVA, 220 V (tensão de linha), 6 pólos e 60 Hz.

Da característica a vazio: Tensão de linha = 220 V e Corrente de Campo = 2,84 A.

Da característica de curto-circuito, o par (I_a,I_f): (118,2.2) e (152,2.84).

Da linha de entreferro I_f é 2,2 A e tensão de linha é 202 V.



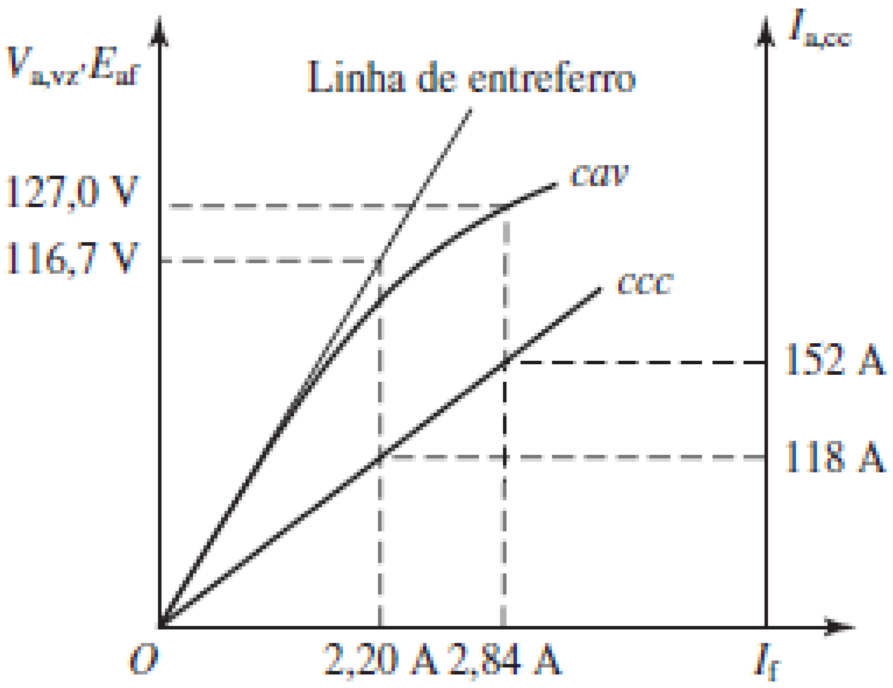
$$V_{a,g} = \frac{202}{\sqrt{3}} = 116,7V \qquad V_a = \frac{220}{\sqrt{3}} = 127V$$

Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

Exercício 4

Os seguintes dados foram tomados das características a vazio e de curto-circuito de uma máquina síncrona trifásica ligada em Y de 45 KVA, 220 V (tensão de linha), 6 pólos e 60 Hz.

Calcule o valor não saturado da reatância síncrona, o seu valor saturado na tensão nominal e a relação de curto-circuito. Expresse a reatância síncrona em Ω/fase e p.u., considerando as especificações nominais da máquina como base.



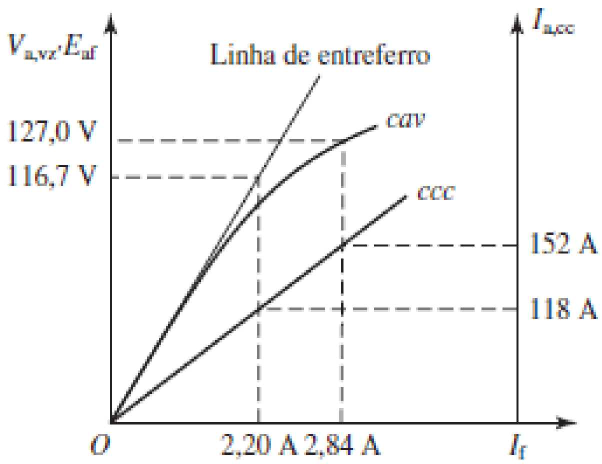
$$X_{s,ns} = \frac{116,7}{118} = 0,9889\ \Omega/\text{fase}$$

$$X_s = \frac{127}{152} = 0,8355\ \Omega/\text{fase}$$

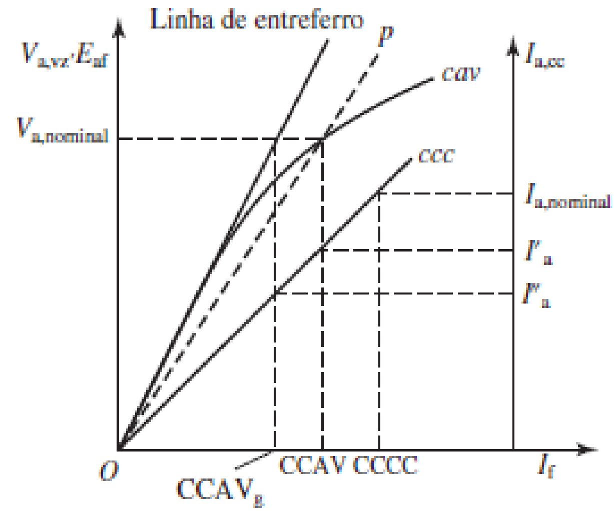
Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

Exercício 4

Os seguintes dados foram tomados das características a vazio e de curto-circuito de uma máquina síncrona trifásica ligada em Y de 45 KVA, 220 V (tensão de linha), 6 pólos e 60 Hz.
Calcule o valor não saturado da reatância síncrona, o seu valor saturado na tensão nominal e a relação de curto-circuito. Expresse a reatância síncrona em Ω/fase e p.u., considerando as especificações nominais da máquina como base.



$$I_{a,\text{nominal}} = \frac{45000}{\sqrt{3} \cdot 220} = 118\,A$$

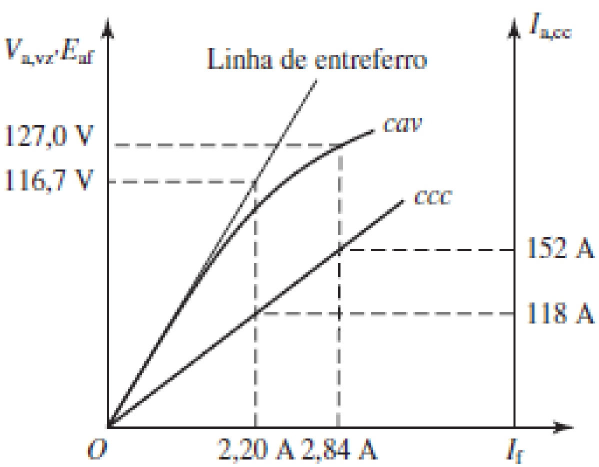


Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

Exercício 4

Os seguintes dados foram tomados das características a vazio e de curto-circuito de uma máquina síncrona trifásica ligada em Y de 45 KVA, 220 V (tensão de linha), 6 pólos e 60 Hz.

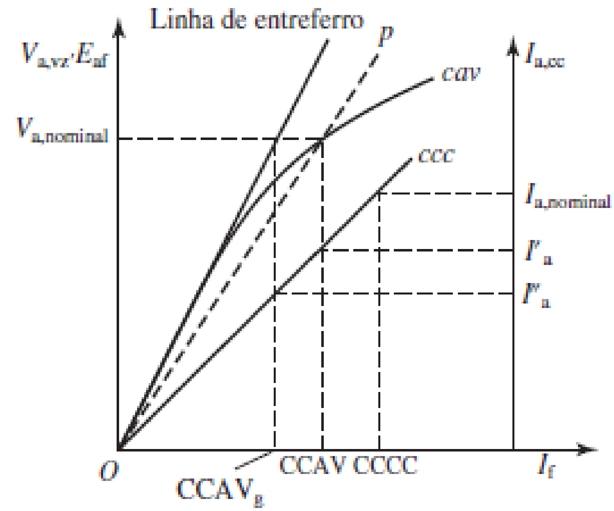
Calcule o valor não saturado da reatância síncrona, o seu valor saturado na tensão nominal e a relação de curto-circuito. Expresse a reatância síncrona em Ω/fase e p.u., considerando as especificações nominais da máquina como base.



$$I_{a,\text{nominal}} = \frac{45000}{\sqrt{3}\cdot 220} = 118\,A$$

$$CCCC = 2,2\ \text{A}$$

$$CCAV = 2,84\ \text{A}$$

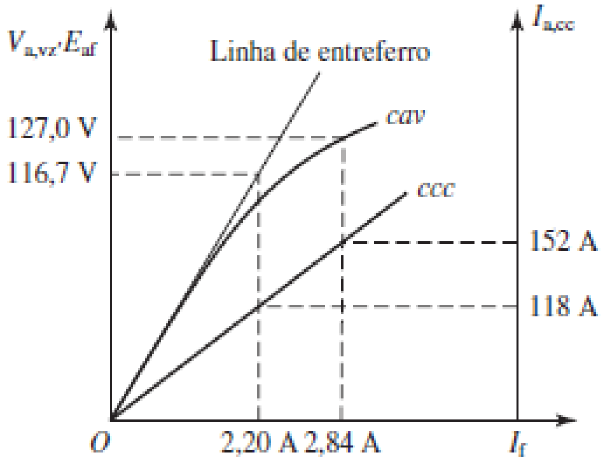


Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

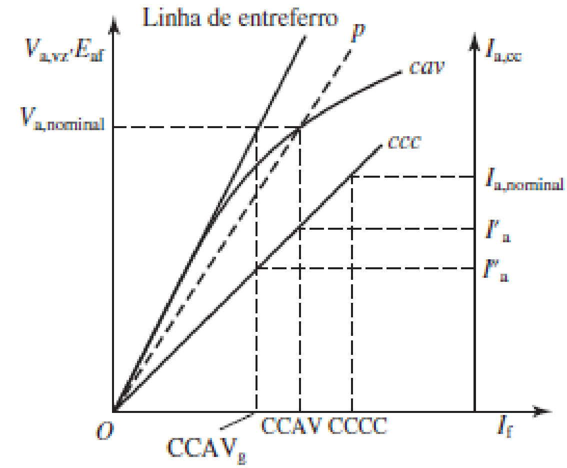
Exercício 4

Os seguintes dados foram tomados das características a vazio e de curto-circuito de uma máquina síncrona trifásica ligada em Y de 45 KVA, 220 V (tensão de linha), 6 pólos e 60 Hz.

Calcule o valor não saturado da reatância síncrona, o seu valor saturado na tensão nominal e a relação de curto-circuito. Expresse a reatância síncrona em Ω/fase e p.u., considerando as especificações nominais da máquina como base.



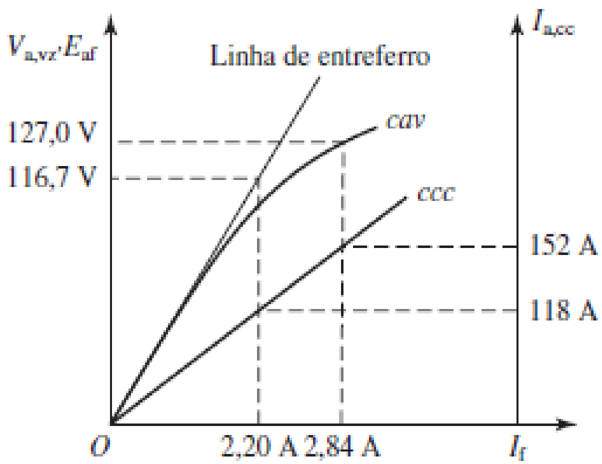
$$X_s = \frac{CCCC}{CCAV} = \frac{2,2}{2,84} = 0,7746 \text{ p.u.}$$



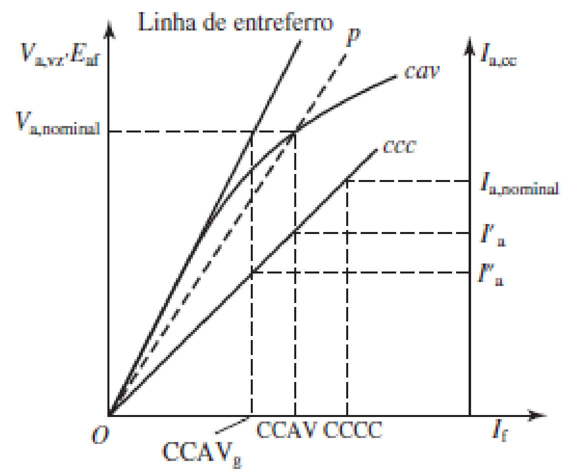
Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

Exercício 4

Os seguintes dados foram tomados das características a vazio e de curto-circuito de uma máquina síncrona trifásica ligada em Y de 45 KVA, 220 V (tensão de linha), 6 pólos e 60 Hz.
Calcule o valor não saturado da reatância síncrona, o seu valor saturado na tensão nominal e a relação de curto-circuito. Expresse a reatância síncrona em Ω/fase e p.u., considerando as especificações nominais da máquina como base.



$$X_s = \frac{CCCC}{CCAV} = \frac{2,2}{2,84} = 0,7746\,\text{p.u.}$$



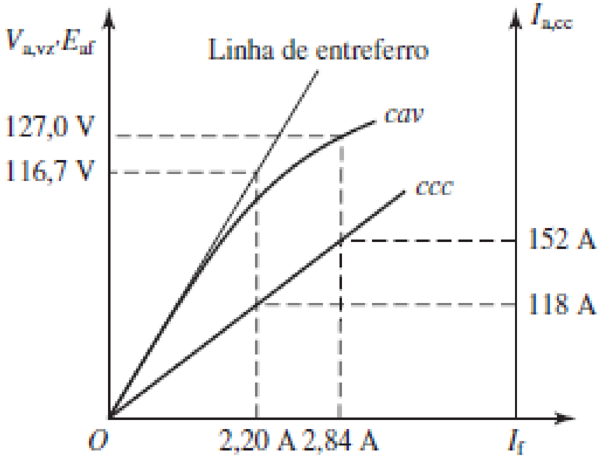
$$\frac{116,7}{2,2} = \frac{127}{CCAV_g} \rightarrow CCAV_g = 2,39\,\text{A}$$

Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

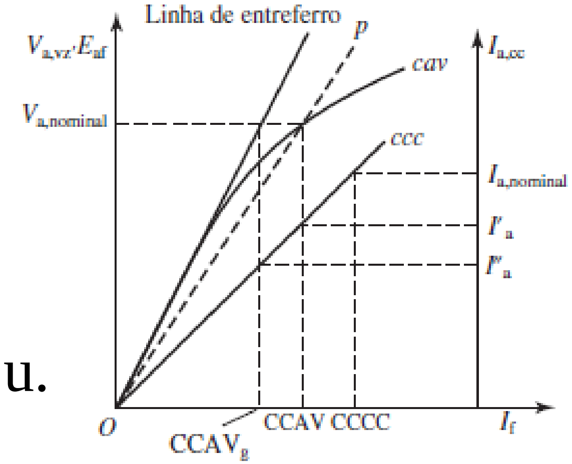
Exercício 4

Os seguintes dados foram tomados das características a vazio e de curto-circuito de uma máquina síncrona trifásica ligada em Y de 45 KVA, 220 V (tensão de linha), 6 pólos e 60 Hz.

Calcule o valor não saturado da reatância síncrona, o seu valor saturado na tensão nominal e a relação de curto-circuito. Expresse a reatância síncrona em Ω/fase e p.u., considerando as especificações nominais da máquina como base.



$$\frac{116,7}{2,2} = \frac{127}{CCAV_g} \rightarrow CCAV_g = 2,39\,\text{A}$$



$$X_{s,ns} = \frac{CCCC}{CCAV_g} = \frac{2,2}{2,39} = 0,9205\text{ p.u.}$$

Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

Exercício 4

Os seguintes dados foram tomados das características a vazio e de curto-circuito de uma máquina síncrona trifásica ligada em Y de 45 KVA, 220 V (tensão de linha), 6 pólos e 60 Hz.

Da característica a vazio: Tensão de linha = 220 V e Corrente de Campo = 2,84 A.

Da característica de curto-circuito, o par (I_a,I_f): (118,2.2) e (152,2.84).

Da linha de entreferro I_f é 2,2 A e tensão de linha é 202 V.

Calcule o valor não saturado da reatância síncrona, o seu valor saturado na tensão nominal e a relação de curto-circuito. Expresse a reatância síncrona em Ω/fase e p.u., considerando as especificações nominais da máquina como base.

$$X_s = 0,7746 \text{ p.u.} \qquad X_s = 0,8355\ \Omega/\text{fase}$$

$$X_{s,ns} = 0,9205 \text{ p.u.} \qquad X_{s,ns} = 0,9889\ \Omega/\text{fase}$$

$$Z_{base} = \frac{220^2}{45000} = 1,0756\,\Omega \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} X_s = \dfrac{0,8355}{1,0756} = 0,7768\,\text{p.u.} \\ X_{s,ns} = \dfrac{0,9889}{1,0756} = 0,9194\,\text{p.u.} \end{array} \right\}$$

Avaliação D

As leituras a seguir foram obtidas dos resultados de ensaios a vazio e em curto-circuito realizados em um turbogerador trifásico ligado em Y, 2 pólos, 850 MVA, 26 kV e 60 Hz, operando na velocidade síncrona:

Corrente de campo, A	1690	3260
Corrente de armadura, ensaio de curto-circuito, kA	9,82	18,9
Tensão de linha, característica a vazio, kV	26,0	(31,8)
Tensão de linha, linha de entreferro, kV	(29,6)	(56,9)

Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

Os números entre parênteses são extrapolações baseadas nos dados medidos. Encontre (a) a RCC, (b) o valor não saturado da reatância síncrona e (c) o valor saturado da reatância síncrona, ambos em por unidade e em Ω/fase.

Característica de Curto-Circuito

- Perdas causadas pela corrente de armadura
  - Medir potência mecânica para acionar a máquina
  - Fluxo de magnetização é pequeno
    - Perdas no núcleo são desprezíveis

$$P_{mec} = P_{AV} + 3 \cdot I_{a,cc}^{2} \cdot R_a + P_{\text{suplementar}}$$

$$P_{cc} = 3 \cdot I_{a,cc}^{2} R_a + P_{\text{suplementar}}$$

Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

Característica de Curto-Circuito

- Perdas causadas pela corrente de armadura
  - Medir potência mecânica para acionar a máquina
  - Fluxo de magnetização é pequeno
    - Perdas no núcleo são desprezíveis

$$P_{mec} = P_{AV} + 3 \cdot I_{a,cc}^2 \cdot R_a + P_{\text{suplementar}}$$

$$P_{cc} = 3 \cdot I_{a,cc}^2 R_a + P_{\text{suplementar}}$$

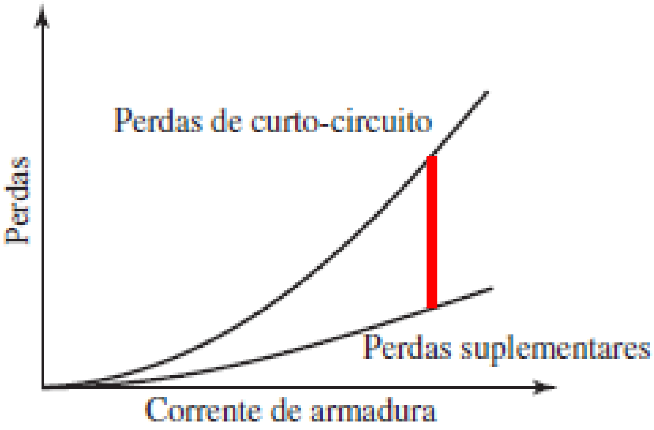
$$P_{armadura} = 3 \cdot I_{a,cc}^2 R_a$$

Característica de Curto-Circuito

- Perdas causadas pela corrente de armadura
  - Medir potência mecânica para acionar a máquina
  - Fluxo de magnetização é pequeno
    - Perdas no núcleo são desprezíveis

$$P_{mec} = P_{AV} + 3 \cdot I_{a,cc}^{2} \cdot R_{a} + P_{\text{suplementar}}$$

$$P_{cc} = 3 \cdot I_{a,cc}^{2} R_{a} + P_{\text{suplementar}}$$



Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

$$P_{armadura} = 3 \cdot I_{a,cc}^{2} R_{a}$$

Exercício 5

No caso da máquina síncrona trifásica de 45 KVA, ligada em Y, 220 V (linha), 6 pólos e 60 Hz, as perdas de curto-circuito são de 1,8 kW para a corrente de armadura de 118 A e a temperatura de 25ºC. A resistência CC de armadura nessa temperatura é 0,0335 Ω/fase. Calcule a resistência de armadura efetiva por unidade e em Ω/fase a 25ºC.

Exercício 5

No caso da máquina síncrona trifásica de 45 KVA, ligada em Y, 220 V (linha), 6 pólos e 60 Hz, as perdas de curto-circuito são de 1,8 kW para a corrente de armadura de 118 A e a temperatura de 25ºC. A resistência CC de armadura nessa temperatura é 0,0335 Ω/fase. Calcule a resistência de armadura efetiva por unidade e em Ω/fase a 25ºC.

$$R_{a,ef} = \frac{P_{cc}/P_{\text{nominal}}}{I_{a,\text{nominal}}^{2}} \frac{1{,}8/45}{1^{2}} = 0{,}04\,\text{p.u.}$$

Exercício 5

No caso da máquina síncrona trifásica de 45 KVA, ligada em Y, 220 V (linha), 6 pólos e 60 Hz, as perdas de curto-circuito são de 1,8 kW para a corrente de armadura de 118 A e a temperatura de 25ºC. A resistência CC de armadura nessa temperatura é 0,0335 Ω/fase. Calcule a resistência de armadura efetiva por unidade e em Ω/fase a 25ºC.

$$R_{a,ef} = \frac{P_{cc}/P_{\text{nominal}}}{I_{a,\text{nominal}}^2} \frac{1{,}8/45}{1^2} = 0{,}04\,\text{p.u.}$$

$$R_{a,ef} = \frac{P_{cc}/3}{I_{a,\text{nominal}}} \frac{1800/3}{118^2} = 0{,}043\,\Omega/\text{fase}$$

Exercício 5

No caso da máquina síncrona trifásica de 45 KVA, ligada em Y, 220 V (linha), 6 pólos e 60 Hz, as perdas de curto-circuito são de 1,8 kW para a corrente de armadura de 118 A e a temperatura de 25ºC. A resistência CC de armadura nessa temperatura é 0,0335 Ω/fase. Calcule a resistência de armadura efetiva por unidade e em Ω/fase a 25ºC.

$$R_{a,ef} = \frac{P_{cc}/P_{nominal}}{I_{a,nominal}^2} \frac{1{,}8/45}{1^2} = 0{,}04\,\text{p.u.} \qquad R_{a,ef} = \frac{P_{cc}/3}{I_{a,nominal}} \frac{1800/3}{118^2} = 0{,}043\,\Omega/\text{fase}$$

$$\frac{R_{a,ef}}{R_{a,CC}} = \frac{0{,}043}{0{,}0335} = 1{,}28 \Rightarrow$$

Resistência eficaz 28% maior que a resistência CC obtida no ensaio

Avaliação E

No caso da máquina síncrona trifásica de 45 KVA, ligada em Y, 220 V (linha), 6 pólos e 60 Hz, as perdas de curto-circuito são de 1,8 kW para a corrente de armadura de 118 A. A resistência de armadura eficaz na temperatura de 25ºC é 0,0335 Ω/fase. Calcule levando em conta a resistência eficaz calculada anteriormente, as perdas suplementares nesta operação.

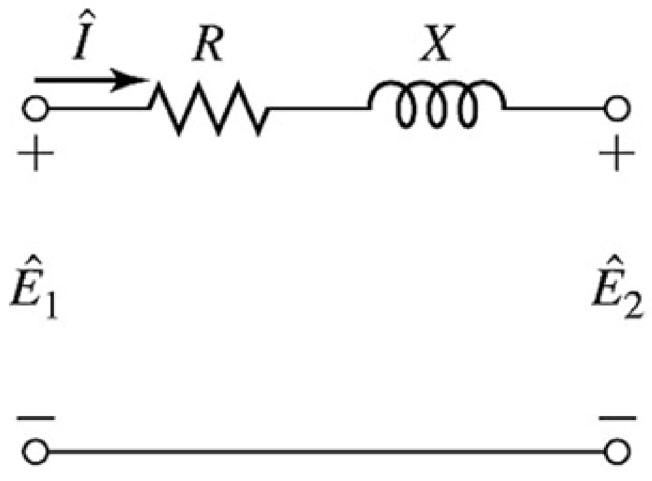
Em seguida, considerando que em 50º C as perdas de curto-circuito é de 3,6 kW e a corrente de armadura 126 A, calcule as perdas suplementares para esta nova operação. Atenção para a equação (5.39) do livro “Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley”.

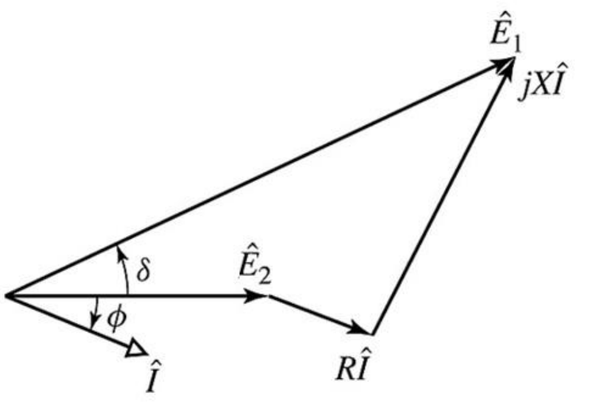
Avaliação F

Considere um gerador síncrono trifásico de 13,8 KV e 25 MVA cujas perdas trifásicas de curto-circuito são 52,8 KW para corrente de armadura nominal. Calcule (A) a sua corrente de armadura nominal e (B) sua resistência de armadura efetiva em Ω/fase e em p.u.

Potência e Ângulo de Carga em Regime Permanente

- Análise de Potência de um circuito
  - Análise de um circuito simples





Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

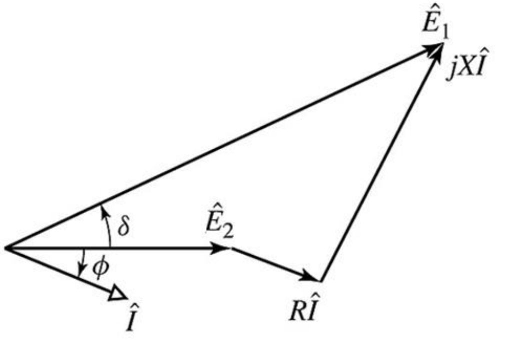
- FP indutivo

Potência e Ângulo de Carga em Regime Permanente

- Análise do Circuito Equivalente

$$\hat{I} = \frac{\hat{E}_1 - \hat{E}_2}{Z} = \frac{E_1\angle\delta - E_2\angle 0^\circ}{|Z|\angle\phi_Z}$$

$$\hat{E}_1 = E_1\angle\delta \qquad \hat{E}_2 = E_2$$



Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

Potência e Ângulo de Carga em Regime Permanente

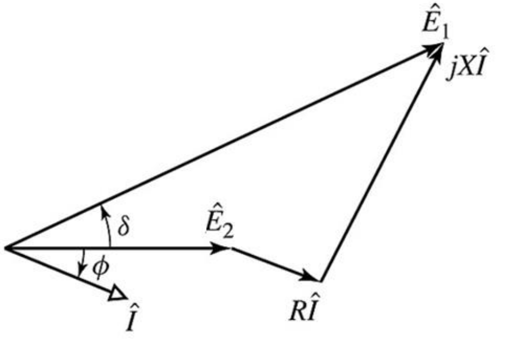
- Análise do Circuito Equivalente

$$\hat{I} = \frac{\hat{E}_1 - \hat{E}_2}{Z} = \frac{E_1\angle\delta - E_2\angle 0^\circ}{|Z|\angle\phi_Z}$$

$$Z = R + jX = |Z|\angle\phi_Z$$

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2}$$

$$\hat{E}_1 = E_1\angle\delta \qquad \hat{E}_2 = E_2$$



Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

Potência e Ângulo de Carga em Regime Permanente

- Análise do Circuito Equivalente

$$\hat{I} = \frac{\hat{E}_1 - \hat{E}_2}{Z} = \frac{E_1\angle\delta - E_2\angle 0^\circ}{|Z|\angle\phi_z}$$

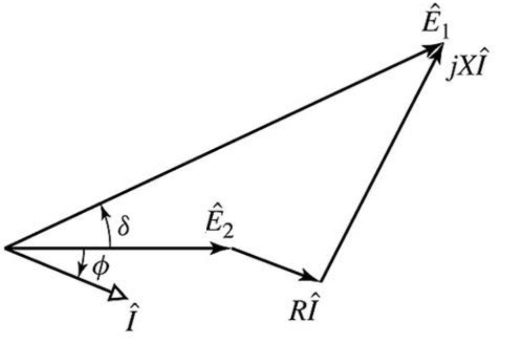
$$Z = R + jX = |Z|\angle\phi_z$$

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2}$$

$$\hat{E}_1 = E_1\angle\delta \qquad \hat{E}_2 = E_2$$

- Para FP indutivo

$$P_2 = \mathrm{Re}\left(3 \cdot \dot{E}_2 \cdot \dot{I}^*\right)$$



Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

Potência e Ângulo de Carga em Regime Permanente

- Análise do Circuito Equivalente

$$\hat{I} = I\angle\phi = \frac{E_1\angle\delta - E_2\angle 0^\circ}{|Z|\angle\phi_z} = \frac{E_1}{|Z|}\angle\delta - \phi_z - \frac{E_2}{|Z|}\angle -\phi_z$$

Potência e Ângulo de Carga em Regime Permanente

- Análise do Circuito Equivalente

$$\hat{I} = I\angle\phi = \frac{E_1\angle\delta - E_2\angle 0^\circ}{|Z|\angle\phi_z} = \frac{E_1}{|Z|}\angle\delta - \phi_z - \frac{E_2}{|Z|}\angle -\phi_z$$

$$\hat{I}^* = I\angle -\phi = \frac{E_1}{|Z|}\angle \phi_z - \delta - \frac{E_2}{|Z|}\angle \phi_z$$

Potência e Ângulo de Carga em Regime Permanente

- Análise do Circuito Equivalente

$$\hat{I} = I\angle\phi = \frac{E_1\angle\delta - E_2\angle 0^\circ}{|Z|\angle\phi_z} = \frac{E_1}{|Z|}\angle\delta - \phi_z - \frac{E_2}{|Z|}\angle -\phi_z$$

$$\hat{I}^* = I\angle -\phi = \frac{E_1}{|Z|}\angle\phi_z - \delta - \frac{E_2}{|Z|}\angle\phi_z$$

$$3\cdot\hat{E}_2\hat{I}^* = 3\cdot E_2\cdot I\angle -\phi = \frac{3\cdot E_2\cdot E_1}{|Z|}\angle\phi_z - \delta - \frac{3\cdot E_2^2}{|Z|}\angle\phi_z$$

Potência e Ângulo de Carga em Regime Permanente

- Análise do Circuito Equivalente

$$\hat{I} = I\angle\phi = \frac{E_1\angle\delta - E_2\angle 0^\circ}{|Z|\angle\phi_z} = \frac{E_1}{|Z|}\angle\delta-\phi_z - \frac{E_2}{|Z|}\angle-\phi_z$$

$$\hat{I}^* = I\angle-\phi = \frac{E_1}{|Z|}\angle\phi_z-\delta - \frac{E_2}{|Z|}\angle\phi_z$$

$$3\cdot\hat{E}_2\hat{I}^* = 3\cdot E_2\cdot I\angle-\phi = \frac{3\cdot E_2\cdot E_1}{|Z|}\angle\phi_z-\delta - \frac{3\cdot E_2^2}{|Z|}\angle\phi_z$$

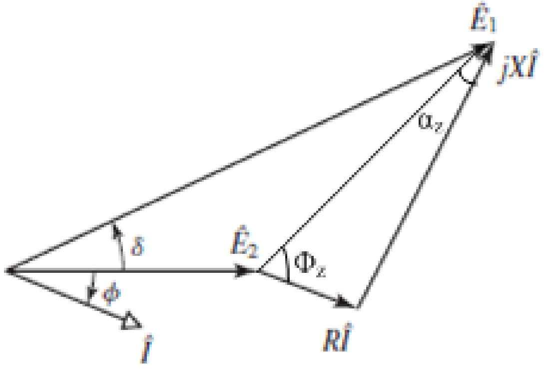
$$\mathrm{Re}\left(3\cdot\hat{E}_2\hat{I}^*\right) = P_2 = \frac{3\cdot E_2\cdot E_1}{|Z|}\cos\left(\phi_z-\delta\right) - \frac{3\cdot E_2^2}{|Z|}\cos\left(\phi_z\right)$$

Potência e Ângulo de Carga em Regime Permanente

- Análise do Circuito Equivalente

$$\mathrm{Re}\left(3\cdot\hat{E}_2\hat{I}^*\right)=P_2=\frac{3\cdot E_2\cdot E_1}{|Z|}\cos\left(\phi_z-\delta\right)-\frac{3\cdot E_2^2}{|Z|}\cos\left(\phi_z\right)$$

$$\alpha_z+\phi_z=90^\circ$$



Adaptado de: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

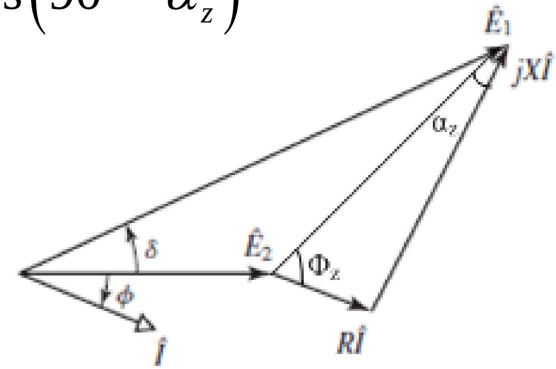
Potência e Ângulo de Carga em Regime Permanente

- Análise do Circuito Equivalente

$$\mathrm{Re}\left(3\cdot\hat{E}_2\hat{I}^*\right)=P_2=\frac{3\cdot E_2\cdot E_1}{|Z|}\cos\left(\phi_z-\delta\right)-\frac{3\cdot E_2^2}{|Z|}\cos\left(\phi_z\right)$$

$$\alpha_z+\phi_z=90^\circ$$

$$\mathrm{Re}\left(3\cdot\hat{E}_2\hat{I}^*\right)=P_2=\frac{3\cdot E_2\cdot E_1}{|Z|}\cos\left(90^\circ-\alpha_z-\delta\right)-\frac{3\cdot E_2^2}{|Z|}\cos\left(90^\circ-\alpha_z\right)$$



Adaptado de: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

Potência e Ângulo de Carga em Regime Permanente

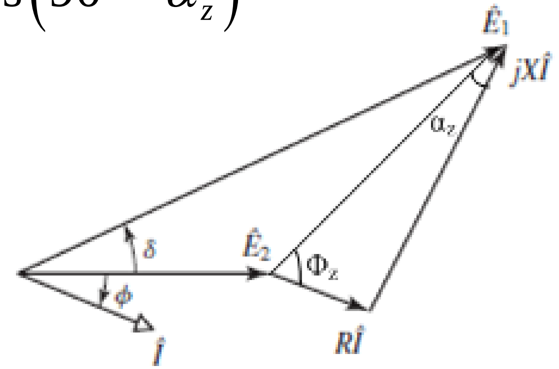
- Análise do Circuito Equivalente

$$\mathrm{Re}\left(3\cdot\hat{E}_2\hat{I}^*\right)=P_2=\frac{3\cdot E_2\cdot E_1}{|Z|}\cos\left(\phi_z-\delta\right)-\frac{3\cdot E_2^2}{|Z|}\cos\left(\phi_z\right)$$

$$\alpha_z+\phi_z=90^\circ$$

$$\mathrm{Re}\left(3\cdot\hat{E}_2\hat{I}^*\right)=P_2=\frac{3\cdot E_2\cdot E_1}{|Z|}\cos\left(90^\circ-\alpha_z-\delta\right)-\frac{3\cdot E_2^2}{|Z|}\cos\left(90^\circ-\alpha_z\right)$$

$$\alpha_z+\phi_z=90^\circ\rightarrow\cos\left[90^\circ-\left(\alpha_z+\delta\right)\right]=\mathrm{sen}\left(\alpha_z+\delta\right)$$



Adaptado de: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

Potência e Ângulo de Carga em Regime Permanente

- Análise do Circuito Equivalente

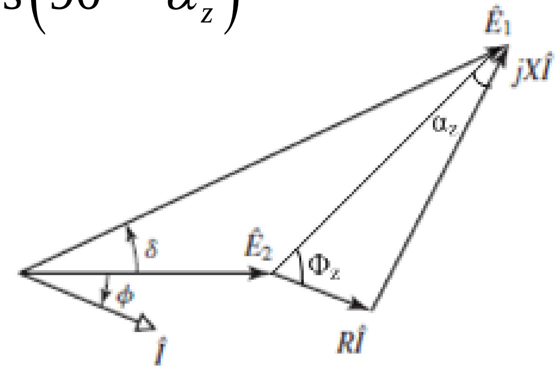
$$\mathrm{Re}\left(3\cdot\hat{E}_2\hat{I}^*\right)=P_2=\frac{3\cdot E_2\cdot E_1}{|Z|}\cos\left(\phi_z-\delta\right)-\frac{3\cdot E_2^2}{|Z|}\cos\left(\phi_z\right)$$

$$\alpha_z+\phi_z=90^\circ$$

$$\mathrm{Re}\left(3\cdot\hat{E}_2\hat{I}^*\right)=P_2=\frac{3\cdot E_2\cdot E_1}{|Z|}\cos\left(90^\circ-\alpha_z-\delta\right)-\frac{3\cdot E_2^2}{|Z|}\cos\left(90^\circ-\alpha_z\right)$$

$$\alpha_z+\phi_z=90^\circ\rightarrow\cos\left[90^\circ-\left(\alpha_z+\delta\right)\right]=\mathrm{sen}\left(\alpha_z+\delta\right)$$

$$P_2=\frac{3\cdot E_2\cdot E_1}{|Z|}\mathrm{sen}\left(\delta+\alpha_z\right)-\frac{3\cdot E_2^2}{|Z|}\cos\left(90^\circ-\alpha_z\right)$$



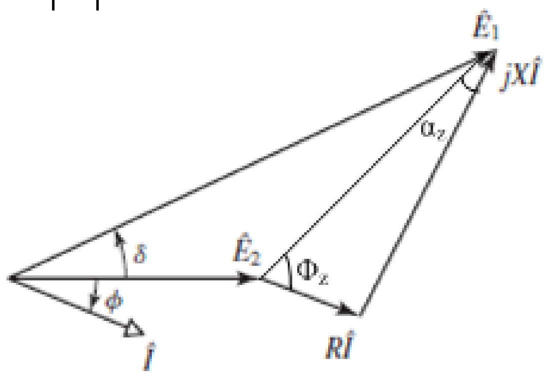
Adaptado de: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

Potência e Ângulo de Carga em Regime Permanente

- Análise do Circuito Equivalente

$$P_2 = \frac{3 \cdot E_2 \cdot E_1}{|Z|} \operatorname{sen}\left(\delta + \alpha_z\right) - \frac{3 \cdot E_2^2}{|Z|} \cos\left(90^\circ - \alpha_z\right)$$

$$\alpha_z = \arctan\left(\frac{R}{X}\right) \qquad \cos\left(90^\circ - \alpha_z\right) = \cos\left(\phi_z\right) = \frac{R}{|Z|}$$



Adaptado de: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

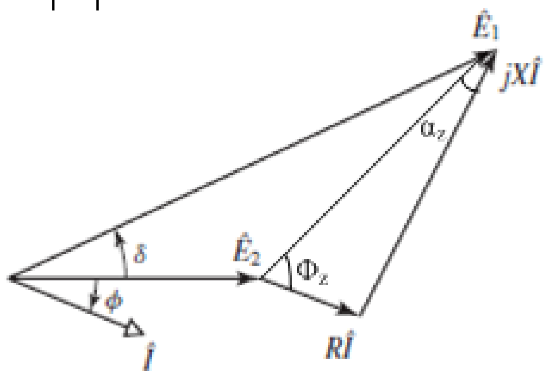
Potência e Ângulo de Carga em Regime Permanente

- Análise do Circuito Equivalente

$$P_2 = \frac{3 \cdot E_2 \cdot E_1}{|Z|} \operatorname{sen}(\delta + \alpha_z) - \frac{3 \cdot E_2^2}{|Z|} \cos(90^\circ - \alpha_z)$$

$$\alpha_z = \arctan\left(\frac{R}{X}\right) \qquad \cos(90^\circ - \alpha_z) = \cos(\phi_z) = \frac{R}{|Z|}$$

$$P_2 = \frac{3 \cdot E_2 \cdot E_1}{|Z|} \operatorname{sen}\left[\delta + \arctan\left(\frac{R}{X}\right)\right] - \frac{3 \cdot E_2^2 \cdot R}{|Z|^2}$$



Adaptado de: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

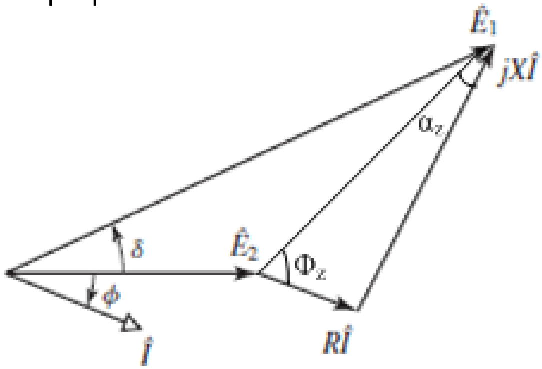
Potência e Ângulo de Carga em Regime Permanente

- Análise do Circuito Equivalente

$$P_2 = \frac{3 \cdot E_2 \cdot E_1}{|Z|} \operatorname{sen}\left(\delta + \alpha_z\right) - \frac{3 \cdot E_2^2}{|Z|} \cos\left(90^\circ - \alpha_z\right)$$

$$\alpha_z = \arctan\left(\frac{R}{X}\right) \qquad \cos\left(90^\circ - \alpha_z\right) = \cos\left(\phi_z\right) = \frac{R}{|Z|}$$

$$P_2 = \frac{3 \cdot E_2 \cdot E_1}{|Z|} \operatorname{sen}\left[\delta + \arctan\left(\frac{R}{X}\right)\right] - \frac{3 \cdot E_2^2 \cdot R}{|Z|^2}$$



$$P_2 = \frac{3 \cdot E_2 \cdot E_1}{\sqrt{R^2 + X^2}} \operatorname{sen}\left[\delta + \arctan\left(\frac{R}{X}\right)\right] - \frac{3 \cdot E_2^2 \cdot R}{R^2 + X^2}$$

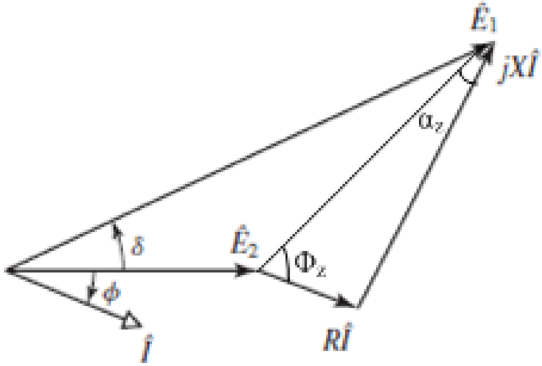
Adaptado de: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

Potência e Ângulo de Carga em Regime Permanente

- Análise do Circuito Equivalente

$$P_2 = \frac{3 \cdot E_2 \cdot E_1}{\sqrt{R^2 + X^2}} \operatorname{sen}\left[\delta + \arctan\left(\frac{R}{X}\right)\right] - \frac{3 \cdot E_2^2 \cdot R}{R^2 + X^2}$$

- R=0



Adaptado de: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

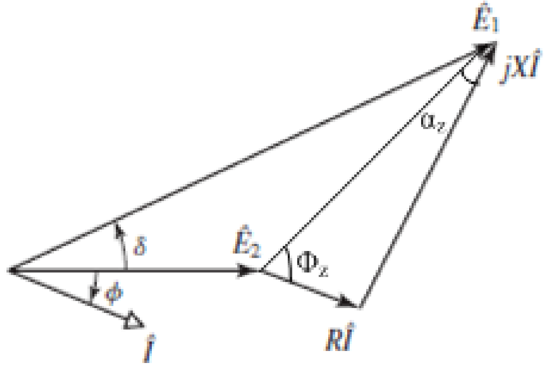
Potência e Ângulo de Carga em Regime Permanente

- Análise do Circuito Equivalente

$$P_2 = \frac{3 \cdot E_2 \cdot E_1}{\sqrt{R^2 + X^2}} \operatorname{sen}\left[\delta + \arctan\left(\frac{R}{X}\right)\right] - \frac{3 \cdot E_2^2 \cdot R}{R^2 + X^2}$$

- R=0

$$\alpha_z = \arctan\left(\frac{0}{X}\right) = \arctan(0) \rightarrow \alpha_z = 0^\circ$$



Adaptado de: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

Potência e Ângulo de Carga em Regime Permanente

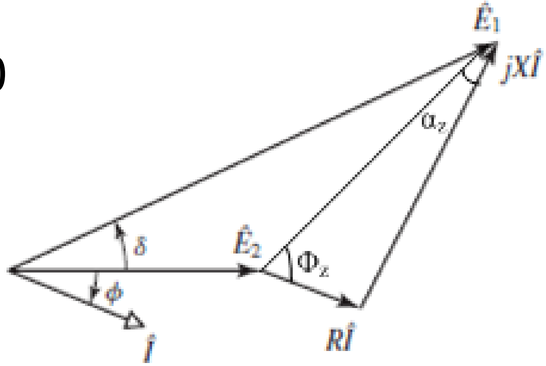
- Análise do Circuito Equivalente

$$P_2 = \frac{3 \cdot E_2 \cdot E_1}{\sqrt{R^2 + X^2}} \operatorname{sen}\left[\delta + \arctan\left(\frac{R}{X}\right)\right] - \frac{3 \cdot E_2^2 \cdot R}{R^2 + X^2}$$

- R=0

$$\alpha_z = \arctan\left(\frac{0}{X}\right) = \arctan(0) \rightarrow \alpha_z = 0^\circ$$

$$\frac{3 \cdot E_2^2 \cdot 0}{X^2} = 0$$



Adaptado de: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

Potência e Ângulo de Carga em Regime Permanente

- Análise do Circuito Equivalente

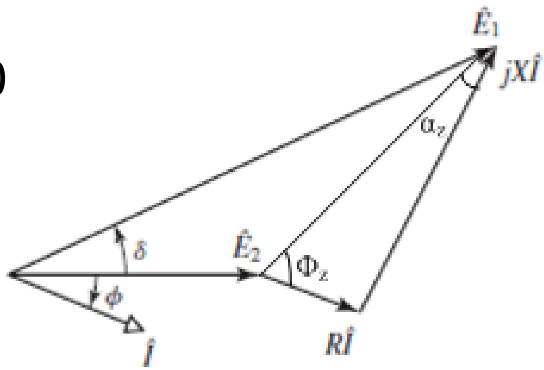
$$P_2 = \frac{3 \cdot E_2 \cdot E_1}{\sqrt{R^2 + X^2}} \operatorname{sen}\left[\delta + \arctan\left(\frac{R}{X}\right)\right] - \frac{3 \cdot E_2^2 \cdot R}{R^2 + X^2}$$

- R=0

$$\alpha_z = \arctan\left(\frac{0}{X}\right) = \arctan(0) \rightarrow \alpha_z = 0^\circ$$

$$\frac{3 \cdot E_2^2 \cdot 0}{X^2} = 0$$

$$P_1 = P_2 = \frac{3 \cdot E_2 \cdot E_1}{X} \operatorname{sen}(\delta)$$



Adaptado de: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

Potência e Ângulo de Carga em Regime Permanente

- Outra consideração traz o mesmo resultado

$$P_1 = P_2 = \frac{E_1 \cdot E_2}{|Z|} sen(\delta)$$

Potência e Ângulo de Carga em Regime Permanente

- Outra consideração traz o mesmo resultado

$$R \ll |Z|$$

$$P_1 = P_2 = \frac{E_1 \cdot E_2}{|Z|} sen(\delta)$$

Potência e Ângulo de Carga em Regime Permanente

- Outra consideração traz o mesmo resultado

$$R \ll |Z| \qquad\qquad |Z| \approx X$$

$$P_1 = P_2 = \frac{E_1 \cdot E_2}{|Z|} sen(\delta)$$

Potência e Ângulo de Carga em Regime Permanente

- Outra consideração traz o mesmo resultado

$$R \ll |Z| \qquad |Z| \approx X \qquad \alpha_z \approx 0$$

$$P_1 = P_2 = \frac{E_1 \cdot E_2}{|Z|} sen(\delta)$$

  - Característica do ângulo de potência

Potência e Ângulo de Carga em Regime Permanente

- Outra consideração traz o mesmo resultado

$$R \ll |Z| \qquad |Z| \approx X \qquad \alpha_z \approx 0$$

$$P_1 = P_2 = \frac{E_1 \cdot E_2}{|Z|} sen(\delta)$$

  - Característica do ângulo de potência
  - Transferência máxima

$$P_{1máx} = P_{2máx} = \frac{E_1 \cdot E_2}{|Z|}$$

Potência e Ângulo de Carga em Regime Permanente

- Transferência máxima

$$P_1 = P_2 = \frac{E_1 \cdot E_2}{|Z|} sen(\delta) \qquad P_{1máx} = P_{2máx} = \frac{E_1 \cdot E_2}{|Z|}$$

  - Este termo se refere a potência máxima teórica que pode ser fornecida sem perda de sincronismo

Potência e Ângulo de Carga em Regime Permanente

- Transferência máxima

$$P_1 = P_2 = \frac{E_1 \cdot E_2}{|Z|} sen(\delta) \qquad P_{1máx} = P_{2máx} = \frac{E_1 \cdot E_2}{|Z|}$$

  - Este termo se refere a potência máxima teórica que pode ser fornecida sem perda de sincronismo
    - Na prática, esse valor pode ser muito mais elevado que a potência nominal da máquina

Potência e Ângulo de Carga em Regime Permanente

- Transferência máxima

$$P_1 = P_2 = \frac{E_1 \cdot E_2}{|Z|} sen(\delta) \qquad P_{1máx} = P_{2máx} = \frac{E_1 \cdot E_2}{|Z|}$$

  - Este termo se refere a potência máxima teórica que pode ser fornecida sem perda de sincronismo
    - Na prática, esse valor pode ser muito mais elevado que a potência nominal da máquina
    - Potência nominal da máquina é o limite prático operacional de potência que é determinado por limitações térmicas

Potência e Ângulo de Carga em Regime Permanente

- Análise do ângulo de potência

$$\delta > 0$$

  - Tensão E_1 adiantada em relação a E_2
  - Potência flui de E_1 para E_2

Potência e Ângulo de Carga em Regime Permanente

- Análise do ângulo de potência

$$\delta > 0$$

  - Tensão E_1 adiantada em relação a E_2
  - Potência flui de E_1 para E_2

$$\delta < 0$$

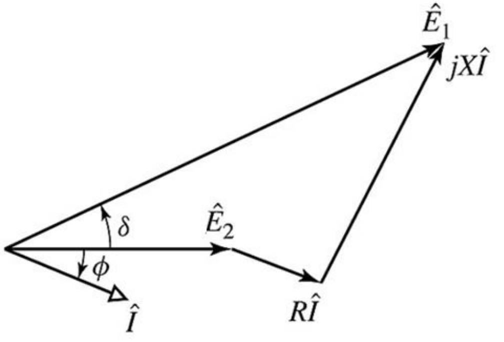
  - Tensão E_2 adiantada em relação a E_1
  - Potência flui de E_2 para E_1
- Equação e análise são gerais para esse circuito

Potência e Ângulo de Carga em Regime Permanente

- Para a potência reativa (Q)

$$\hat{I} = \frac{\hat{E}_1 - \hat{E}_2}{Z} = \frac{E_1\angle\delta - E_2\angle 0^\circ}{|Z|\angle\phi_Z}$$

$$\hat{E}_1 = E_1\angle\delta \qquad \hat{E}_2 = E_2$$



Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

Potência e Ângulo de Carga em Regime Permanente

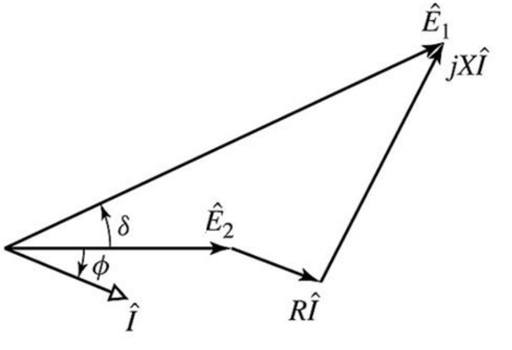
- Para a potência reativa (Q)

$$\hat{I} = \frac{\hat{E}_1 - \hat{E}_2}{Z} = \frac{E_1\angle\delta - E_2\angle 0^\circ}{|Z|\angle\phi_z}$$

$$Z = R + jX = |Z|\angle\phi_z$$

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2}$$

$$\hat{E}_1 = E_1\angle\delta \qquad \hat{E}_2 = E_2$$



Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

Potência e Ângulo de Carga em Regime Permanente

- Para a potência reativa (Q)

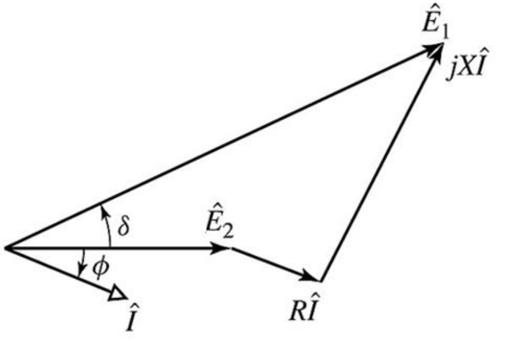
$$\hat{I} = \frac{\hat{E}_1 - \hat{E}_2}{Z} = \frac{E_1\angle\delta - E_2\angle 0^\circ}{|Z|\angle\phi_z}$$

$$Z = R + jX = |Z|\angle\phi_z$$

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2}$$

$$\hat{E}_1 = E_1\angle\delta \qquad \hat{E}_2 = E_2$$

- Para FP indutivo



$$Q_2 = \mathrm{Im}\left(3 \cdot \dot{E}_2 \cdot \dot{I}^*\right)$$

Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

Potência e Ângulo de Carga em Regime Permanente

- Análise do Circuito Equivalente

$$\hat{I} = I\angle\phi = \frac{E_1\angle\delta - E_2\angle 0^\circ}{|Z|\angle\phi_z} = \frac{E_1}{|Z|}\angle\delta - \phi_z - \frac{E_2}{|Z|}\angle -\phi_z$$

$$\hat{I}^* = I\angle -\phi = \frac{E_1}{|Z|}\angle\phi_z - \delta - \frac{E_2}{|Z|}\angle\phi_z$$

Potência e Ângulo de Carga em Regime Permanente

- Análise do Circuito Equivalente

$$\hat{I} = I\angle\phi = \frac{E_1\angle\delta - E_2\angle 0^\circ}{|Z|\angle\phi_z} = \frac{E_1}{|Z|}\angle\delta - \phi_z - \frac{E_2}{|Z|}\angle -\phi_z$$

$$\hat{I}^* = I\angle -\phi = \frac{E_1}{|Z|}\angle\phi_z - \delta - \frac{E_2}{|Z|}\angle\phi_z$$

$$3 \cdot \hat{E}_2 \hat{I}^* = 3 \cdot E_2 \cdot I\angle -\phi = \frac{3 \cdot E_2 \cdot E_1}{|Z|}\angle\phi_z - \delta - \frac{3 \cdot E_2^2}{|Z|}\angle\phi_z$$

Potência e Ângulo de Carga em Regime Permanente

- Análise do Circuito Equivalente

$$\hat{I} = I\angle\phi = \frac{E_1\angle\delta - E_2\angle 0^\circ}{|Z|\angle\phi_z} = \frac{E_1}{|Z|}\angle\delta - \phi_z - \frac{E_2}{|Z|}\angle -\phi_z$$

$$\hat{I}^* = I\angle -\phi = \frac{E_1}{|Z|}\angle\phi_z - \delta - \frac{E_2}{|Z|}\angle\phi_z$$

$$3\cdot\hat{E}_2\hat{I}^* = 3\cdot E_2\cdot I\angle -\phi = \frac{3\cdot E_2\cdot E_1}{|Z|}\angle\phi_z - \delta - \frac{3\cdot E_2^2}{|Z|}\angle\phi_z$$

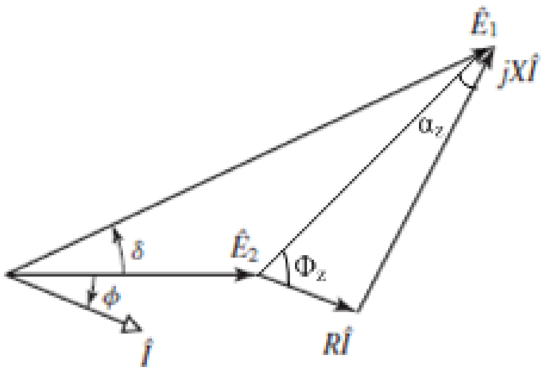
$$\mathrm{Im}\left(3\cdot\hat{E}_2\hat{I}^*\right) = Q_2 = \frac{3\cdot E_2\cdot E_1}{|Z|}\,\mathrm{sen}\left(\phi_z - \delta\right) - \frac{3\cdot E_2^2}{|Z|}\,\mathrm{sen}\left(\phi_z\right)$$

Potência e Ângulo de Carga em Regime Permanente

- Análise do Circuito Equivalente

$$\mathrm{Im}\left(3\cdot\hat{E}_2\hat{I}^*\right)=Q_2=\frac{3\cdot E_2\cdot E_1}{|Z|}\mathrm{sen}\left(\phi_z-\delta\right)-\frac{3\cdot E_2^2}{|Z|}\mathrm{sen}\left(\phi_z\right)$$

$$\alpha_z+\phi_z=90^\circ$$



Adaptado de: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

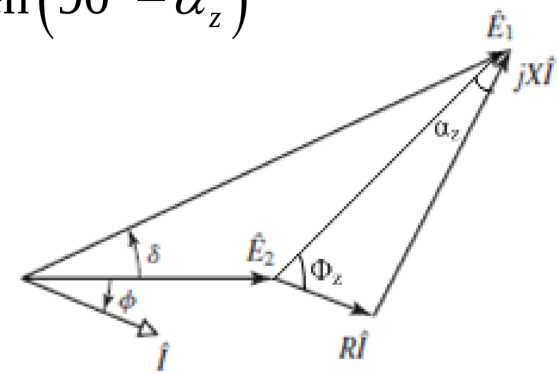
Potência e Ângulo de Carga em Regime Permanente

- Análise do Circuito Equivalente

$$\mathrm{Im}\left(3\cdot\hat{E}_2\hat{I}^*\right)=Q_2=\frac{3\cdot E_2\cdot E_1}{|Z|}\mathrm{sen}\left(\phi_z-\delta\right)-\frac{3\cdot E_2^2}{|Z|}\mathrm{sen}\left(\phi_z\right)$$

$$\alpha_z+\phi_z=90^\circ$$

$$\mathrm{Im}\left(3\cdot\hat{E}_2\hat{I}^*\right)=Q_2=\frac{3\cdot E_2\cdot E_1}{|Z|}\mathrm{sen}\left(90^\circ-\alpha_z-\delta\right)-\frac{3\cdot E_2^2}{|Z|}\mathrm{sen}\left(90^\circ-\alpha_z\right)$$



Adaptado de: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

Potência e Ângulo de Carga em Regime Permanente

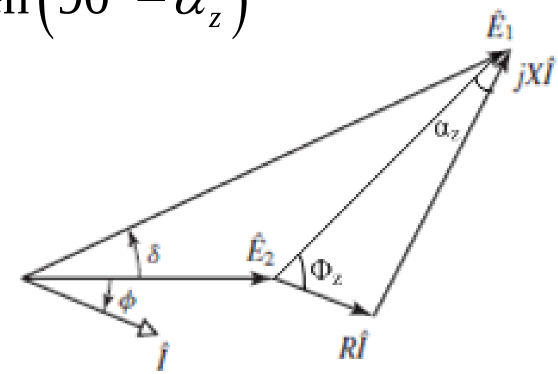
- Análise do Circuito Equivalente

$$\mathrm{Im}\left(3\cdot\hat{E}_2\hat{I}^*\right)=Q_2=\frac{3\cdot E_2\cdot E_1}{|Z|}\mathrm{sen}\left(\phi_z-\delta\right)-\frac{3\cdot E_2^2}{|Z|}\mathrm{sen}\left(\phi_z\right)$$

$$\alpha_z+\phi_z=90^\circ$$

$$\mathrm{Im}\left(3\cdot\hat{E}_2\hat{I}^*\right)=Q_2=\frac{3\cdot E_2\cdot E_1}{|Z|}\mathrm{sen}\left(90^\circ-\alpha_z-\delta\right)-\frac{3\cdot E_2^2}{|Z|}\mathrm{sen}\left(90^\circ-\alpha_z\right)$$

$$\alpha_z+\phi_z=90^\circ\rightarrow\mathrm{sen}\left[90^\circ-\left(\alpha_z+\delta\right)\right]=\cos\left(\alpha_z+\delta\right)$$



Adaptado de: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

Potência e Ângulo de Carga em Regime Permanente

- Análise do Circuito Equivalente

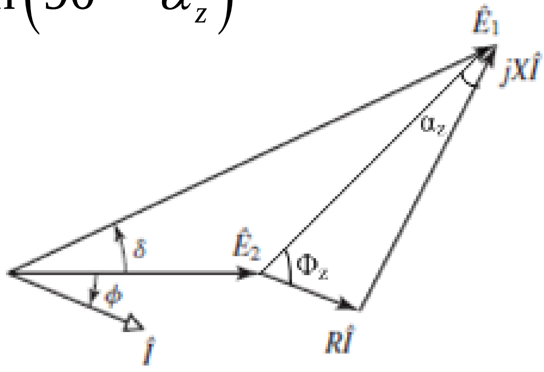
$$\mathrm{Im}\left(3\cdot\hat{E}_2\hat{I}^*\right)=Q_2=\frac{3\cdot E_2\cdot E_1}{|Z|}\mathrm{sen}\left(\phi_z-\delta\right)-\frac{3\cdot E_2^2}{|Z|}\mathrm{sen}\left(\phi_z\right)$$

$$\alpha_z+\phi_z=90^\circ$$

$$\mathrm{Im}\left(3\cdot\hat{E}_2\hat{I}^*\right)=Q_2=\frac{3\cdot E_2\cdot E_1}{|Z|}\mathrm{sen}\left(90^\circ-\alpha_z-\delta\right)-\frac{3\cdot E_2^2}{|Z|}\mathrm{sen}\left(90^\circ-\alpha_z\right)$$

$$\alpha_z+\phi_z=90^\circ\rightarrow\mathrm{sen}\left[90^\circ-\left(\alpha_z+\delta\right)\right]=\cos\left(\alpha_z+\delta\right)$$

$$Q_2=\frac{3\cdot E_2\cdot E_1}{|Z|}\cos\left(\delta+\alpha_z\right)-\frac{3\cdot E_2^2}{|Z|}\mathrm{sen}\left(90^\circ-\alpha_z\right)$$



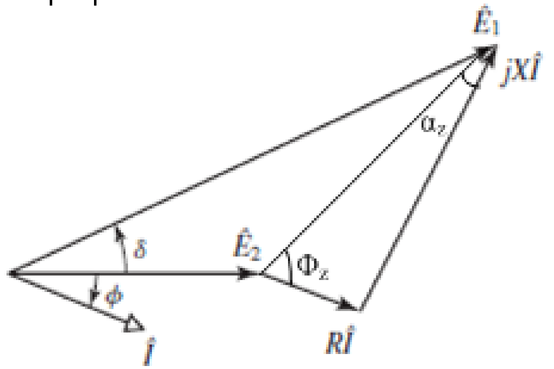
Adaptado de: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

Potência e Ângulo de Carga em Regime Permanente

- Análise do Circuito Equivalente

$$Q_2 = \frac{3 \cdot E_2 \cdot E_1}{|Z|}\cos\left(\delta + \alpha_z\right) - \frac{3 \cdot E_2^2}{|Z|}\operatorname{sen}\left(90^\circ - \alpha_z\right)$$

$$\alpha_z = \arctan\left(\frac{R}{X}\right) \qquad \operatorname{sen}\left(90^\circ - \alpha_z\right) = \operatorname{sen}\left(\phi_z\right) = \frac{X}{|Z|}$$



Adaptado de: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

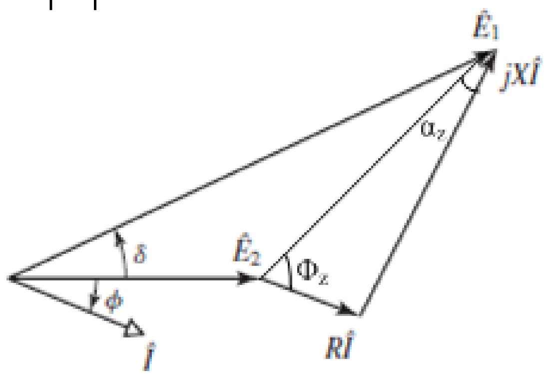
Potência e Ângulo de Carga em Regime Permanente

- Análise do Circuito Equivalente

$$Q_2 = \frac{3 \cdot E_2 \cdot E_1}{|Z|} \cos\left(\delta + \alpha_z\right) - \frac{3 \cdot E_2^2}{|Z|} \operatorname{sen}\left(90^\circ - \alpha_z\right)$$

$$\alpha_z = \arctan\left(\frac{R}{X}\right) \qquad \operatorname{sen}\left(90^\circ - \alpha_z\right) = \operatorname{sen}\left(\phi_z\right) = \frac{X}{|Z|}$$

$$Q_2 = \frac{3 \cdot E_2 \cdot E_1}{|Z|} \cos\left[\delta + \arctan\left(\frac{R}{X}\right)\right] - \frac{3 \cdot E_2^2 \cdot X}{|Z|^2}$$



Adaptado de: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

Potência e Ângulo de Carga em Regime Permanente

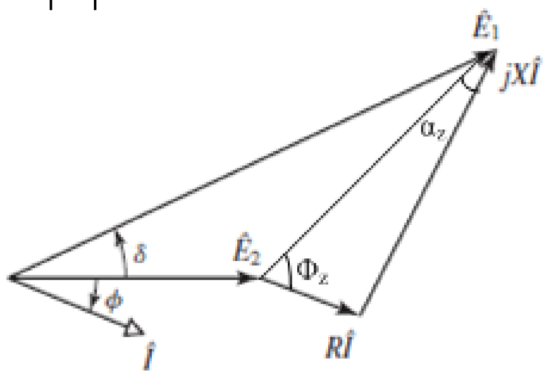
- Análise do Circuito Equivalente

$$Q_2 = \frac{3 \cdot E_2 \cdot E_1}{|Z|}\cos(\delta + \alpha_z) - \frac{3 \cdot E_2^2}{|Z|}\operatorname{sen}(90^\circ - \alpha_z)$$

$$\alpha_z = \arctan\left(\frac{R}{X}\right) \qquad \operatorname{sen}(90^\circ - \alpha_z) = \operatorname{sen}(\phi_z) = \frac{X}{|Z|}$$

$$Q_2 = \frac{3 \cdot E_2 \cdot E_1}{|Z|}\cos\left[\delta + \arctan\left(\frac{R}{X}\right)\right] - \frac{3 \cdot E_2^2 \cdot X}{|Z|^2}$$

$$Q_2 = \frac{3 \cdot E_2 \cdot E_1}{\sqrt{R^2 + X^2}}\cos\left[\delta + \arctan\left(\frac{R}{X}\right)\right] - \frac{3 \cdot E_2^2 \cdot X}{R^2 + X^2}$$



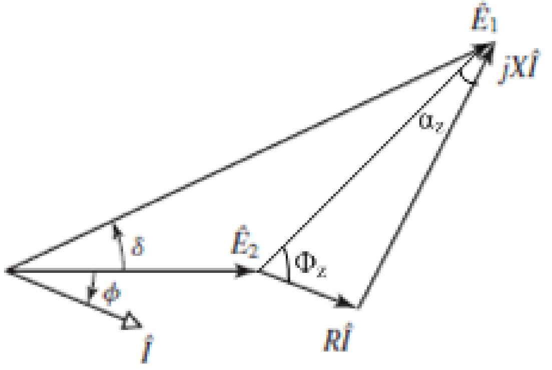
Adaptado de: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

Potência e Ângulo de Carga em Regime Permanente

- Análise do Circuito Equivalente

$$Q_2 = \frac{3 \cdot E_2 \cdot E_1}{\sqrt{R^2 + X^2}} \cos\left[\delta + \arctan\left(\frac{R}{X}\right)\right] - \frac{3 \cdot E_2^2 \cdot X}{R^2 + X^2}$$

- R=0



Adaptado de: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

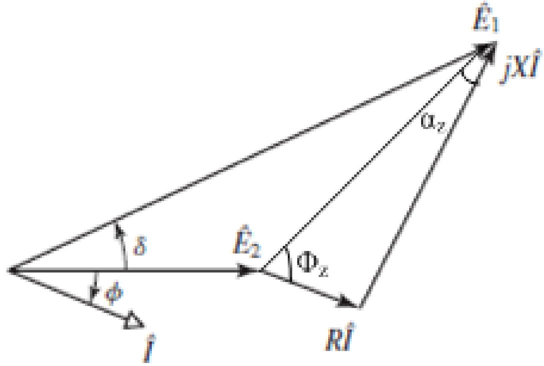
Potência e Ângulo de Carga em Regime Permanente

- Análise do Circuito Equivalente

$$Q_2 = \frac{3 \cdot E_2 \cdot E_1}{\sqrt{R^2 + X^2}} \cos\left[\delta + \arctan\left(\frac{R}{X}\right)\right] - \frac{3 \cdot E_2^2 \cdot X}{R^2 + X^2}$$

- R=0

$$\alpha_z = \arctan\left(\frac{0}{X}\right) = \arctan(0) \rightarrow \alpha_z = 0^\circ$$



Adaptado de: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

Potência e Ângulo de Carga em Regime Permanente

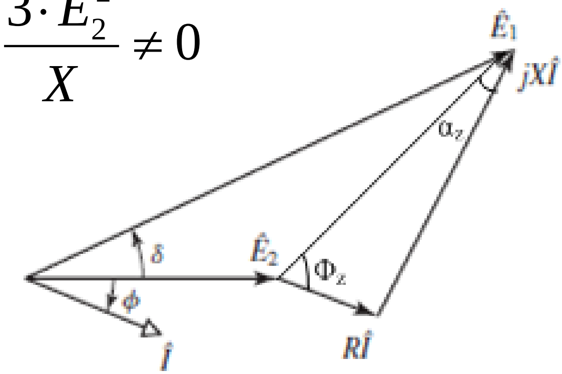
- Análise do Circuito Equivalente

$$Q_2 = \frac{3 \cdot E_2 \cdot E_1}{\sqrt{R^2 + X^2}} \cos\left[\delta + \arctan\left(\frac{R}{X}\right)\right] - \frac{3 \cdot E_2^2 \cdot X}{R^2 + X^2}$$

- R=0

$$\frac{3 \cdot E_2^2 \cdot X}{X^2} = \frac{3 \cdot E_2^2}{X} \neq 0$$

$$\alpha_z = \arctan\left(\frac{0}{X}\right) = \arctan(0) \rightarrow \alpha_z = 0^\circ$$



Adaptado de: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

Potência e Ângulo de Carga em Regime Permanente

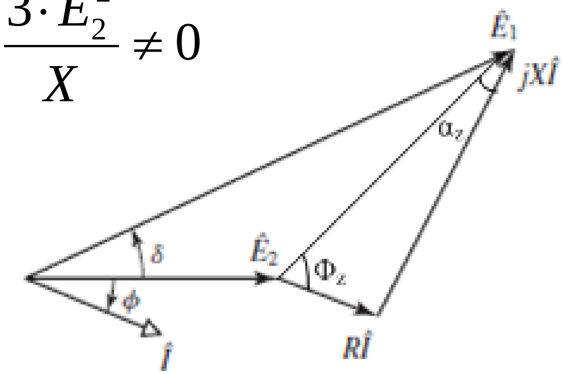
- Análise do Circuito Equivalente

$$Q_2 = \frac{3 \cdot E_2 \cdot E_1}{\sqrt{R^2 + X^2}} \cos\left[\delta + \arctan\left(\frac{R}{X}\right)\right] - \frac{3 \cdot E_2^2 \cdot X}{R^2 + X^2}$$

- R=0

$$\frac{3 \cdot E_2^2 \cdot X}{X^2} = \frac{3 \cdot E_2^2}{X} \neq 0$$

$$\alpha_z = \arctan\left(\frac{0}{X}\right) = \arctan(0) \rightarrow \alpha_z = 0^\circ$$



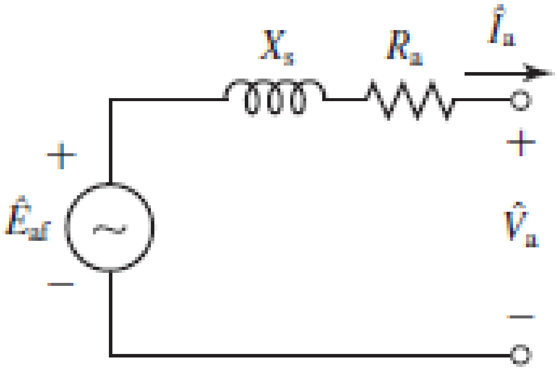
$$Q_1 = Q_2 = \frac{3 \cdot E_2 \cdot E_1}{X} \cos(\delta) - \frac{3 \cdot E_2^2}{X}$$

Adaptado de: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

Potência e Ângulo de Carga em Regime Permanente

- Com grandezas da circuito equivalente

$$P_a = \frac{3 \cdot V_a \cdot E_{af}}{\sqrt{R_a^2 + X_s^2}} \operatorname{sen}\left[\delta + \arctan\left(\frac{R_a}{X_a}\right)\right] - \frac{3 \cdot V_a^2 \cdot R_a}{R_a^2 + X_s^2}$$



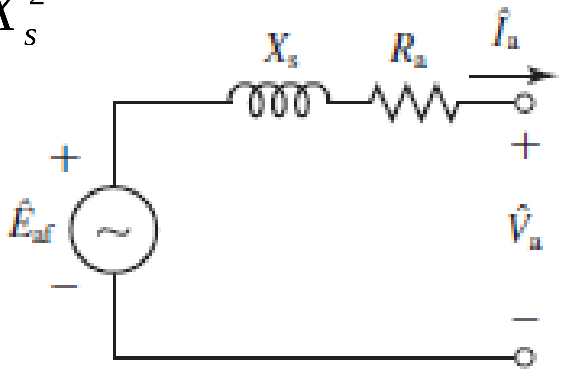
Adaptado de: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

Potência e Ângulo de Carga em Regime Permanente

- Com grandezas da circuito equivalente

$$P_a = \frac{3 \cdot V_a \cdot E_{af}}{\sqrt{R_a^2 + X_s^2}} \operatorname{sen}\left[\delta + \arctan\left(\frac{R_a}{X_a}\right)\right] - \frac{3 \cdot V_a^2 \cdot R_a}{R_a^2 + X_s^2}$$

$$Q_a = \frac{3 \cdot V_a \cdot E_{af}}{\sqrt{R_a^2 + X_s^2}} \cos\left[\delta + \arctan\left(\frac{R_a}{X_s}\right)\right] - \frac{3 \cdot V_a^2 \cdot X_s}{R_a^2 + X_s^2}$$



Adaptado de: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

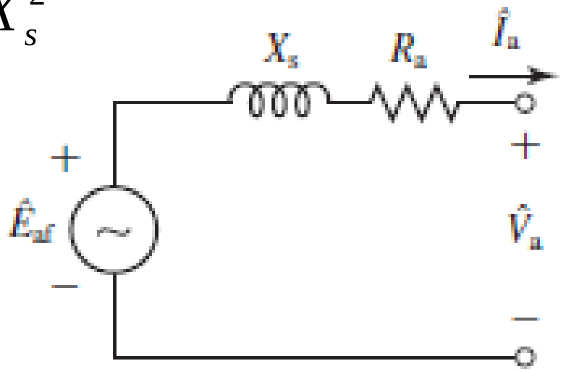
Potência e Ângulo de Carga em Regime Permanente

- Com grandezas da circuito equivalente

$$P_a = \frac{3 \cdot V_a \cdot E_{af}}{\sqrt{R_a^2 + X_s^2}} \operatorname{sen}\left[\delta + \arctan\left(\frac{R_a}{X_a}\right)\right] - \frac{3 \cdot V_a^2 \cdot R_a}{R_a^2 + X_s^2}$$

$$Q_a = \frac{3 \cdot V_a \cdot E_{af}}{\sqrt{R_a^2 + X_s^2}} \cos\left[\delta + \arctan\left(\frac{R_a}{X_s}\right)\right] - \frac{3 \cdot V_a^2 \cdot X_s}{R_a^2 + X_s^2}$$

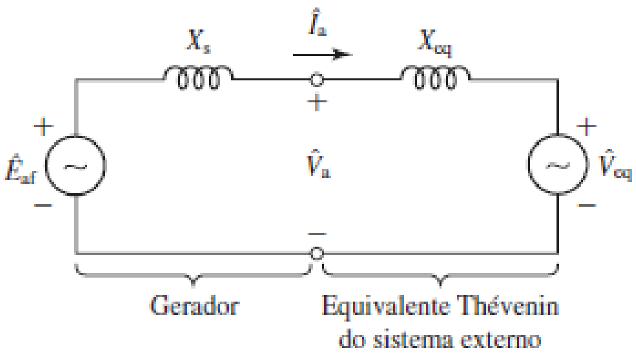
$$R_a \rightarrow 0 \quad \begin{cases} P_a = P_{af} = \dfrac{3 \cdot V_a \cdot E_{af}}{X_s} \operatorname{sen}(\delta) \\[2ex] Q_a = Q_{af} = \dfrac{3 \cdot V_a \cdot E_{af}}{X_s} \cos(\delta) - \dfrac{3 \cdot V_a^2}{X_s} \end{cases}$$



Adaptado de: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

Potência e Ângulo de Carga em Regime Permanente

- Análise da máquina real com sistema externo

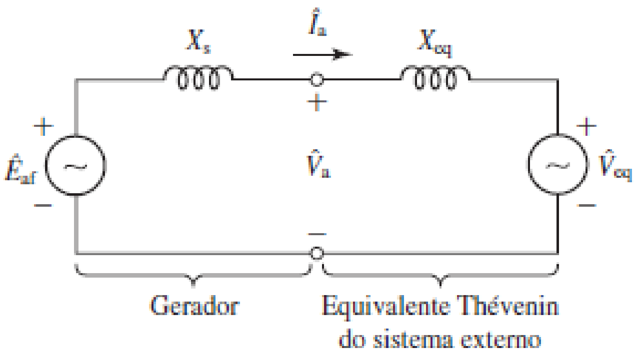


Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

$$P = \frac{E_{af} \cdot V_{EQ}}{X_s + X_{EQ}} \operatorname{sen}(\delta)$$

Potência e Ângulo de Carga em Regime Permanente

- Análise da máquina real com sistema externo



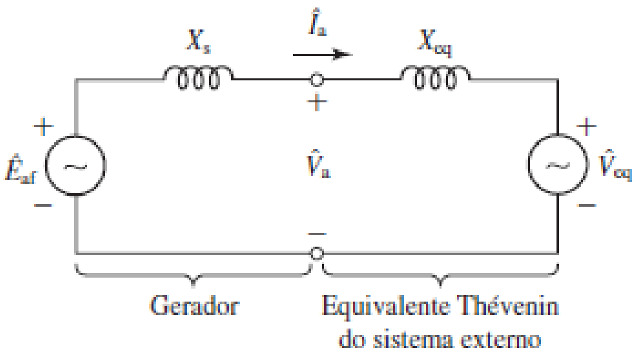
Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

$$P = \frac{E_{af} \cdot V_{EQ}}{X_s + X_{EQ}} \operatorname{sen}(\delta)$$

  - Apresenta a potência transferida de um gerador a um sistema externo

Potência e Ângulo de Carga em Regime Permanente

- Análise da máquina real com sistema externo



Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

$$P = \frac{E_{af} \cdot V_{EQ}}{X_s + X_{EQ}} \operatorname{sen}(\delta)$$

  - Apresenta a potência transferida de um gerador a um sistema externo
  - Importante: definir o equivalente do sistema externo – equivalente de Thévenin

Potência e Ângulo de Carga em Regime Permanente

- Para sistemas trifásicos
  - Caso as tensões sejam de fase

$$P_{3\phi} = 3 \cdot \frac{E_{af} \cdot V_{EQ}}{X_s + X_{EQ}} sen(\delta)$$

Potência e Ângulo de Carga em Regime Permanente

- Para sistemas trifásicos
  - Caso as tensões sejam de fase

$$P_{3\phi} = 3 \cdot \frac{E_{af} \cdot V_{EQ}}{X_s + X_{EQ}} sen(\delta)$$

  - Caso as tensões sejam em p.u.

$$P_{3\phi} = \frac{E_{af} \cdot V_{EQ}}{X_s + X_{EQ}} sen(\delta)$$

Potência e Ângulo de Carga em Regime Permanente

- Considerações
  - Transferência de potência
    - A partir da **variação da corrente de campo** e da *tensão induzida* no gerador

Potência e Ângulo de Carga em Regime Permanente

- Considerações
  - Transferência de potência
    - A partir da **variação da corrente de campo** e da *tensão induzida* no gerador
  - *Limite de corrente de campo* na excitação
    - Limite que não pode ser ultrapassado indiscriminadamente – questões térmicas!

Potência e Ângulo de Carga em Regime Permanente

- Considerações
  - Transferência de potência
    - A partir da **variação da corrente de campo** e da *tensão induzida* no gerador
  - *Limite de corrente de campo* na excitação
    - Limite que não pode ser ultrapassado indiscriminadamente – questões térmicas!
  - Considerações sobre *estabilidade do sistema*
    - **Ângulo de potência bem inferior a 90º**
    - Máquinas devem **assegurar valores nominais de tensão e frequência**

Exercício 6

Um gerador trifásico síncrono de 75 MVA e 13,8 KV, com uma reatância síncrona saturada de 1,35 p.u. e uma reatância não saturada de 1,56 p.u., é ligado a um sistema extremo, cuja reatância equivalente é de 0,23 p.u. e cuja tensão é 1 p.u. Ambas tomando o gerador como base. Ele atinge a tensão nominal de circuito aberto para uma corrente de campo de 297 A

A) Encontre a potência máxima (em MW e p.u.) que pode ser fornecida ao sistema extremo se a tensão interna do gerador for mantida igual a 1 pu.

Exercício 6/A

Um gerador trifásico síncrono de 75 MVA e 13,8 KV, com uma reatância síncrona saturada de 1,35 p.u. e uma reatância não saturada de 1,56 p.u., é ligado a um sistema extremo, cuja reatância equivalente é de 0,23 p.u. e cuja tensão é 1 p.u. Ambas tomando o gerador como base. Ele atinge a tensão nominal de circuito aberto para uma corrente de campo de 297 A

A) Encontre a potência máxima (em MW e p.u.) que pode ser fornecida ao sistema extremo se a tensão interna do gerador for mantida igual a 1 p.u.

$$P_{máx} = \frac{E_{af} \cdot V_{EQ}}{X_s + X_{EQ}}$$

Máquina próxima a tensão terminal, valor de reatância síncrona saturada deve ser utilizada

$$P_{máx} = \frac{1 \cdot 1}{1,35 + 0,23} = 0,633\,\text{p.u.} = 0,633 \cdot 75\,\text{M} = 47,5\,\text{MW}$$

Exercício 6

Um gerador trifásico síncrono de 75 MVA e 13,8 KV, com uma reatância síncrona saturada de 1,35 p.u. e uma reatância não saturada de 1,56 p.u., é ligado a um sistema extremo, cuja reatância equivalente é de 0,23 p.u. e cuja tensão é 1 p.u. Ambas tomando o gerador como base. Ele atinge a tensão nominal de circuito aberto para uma corrente de campo de 297 A

A) Encontre a potência máxima (em MW e p.u.) que pode ser fornecida ao sistema extremo se a tensão interna do gerador for mantida igual a 1 pu.

B) Utilizando o MATLAB, plotar a tensão terminal do gerador quando a saída do gerador é variada de zero até a potência máxima com as condições da letra A).

Exercício 6/B

Um gerador trifásico síncrono de 75 MVA e 13,8 KV, com uma reatância síncrona saturada de 1,35 p.u. e uma reatância não saturada de 1,56 p.u., é ligado a um sistema extremo, cuja reatância equivalente é de 0,23 p.u. e cuja tensão é 1 p.u. Ambas tomando o gerador como base. Ele atinge a tensão nominal de circuito aberto para uma corrente de campo de 297 A

A) ...

B) Utilizando o MATLAB, plotar a tensão terminal do gerador quando a saída do gerador é variada de zero até a potência máxima com as condições da letra A).

$$\hat{I}_a = \frac{\hat{E}_{af} - \hat{V}_{EQ}}{j\left(X_s + X_{EQ}\right)} = \frac{E_{af}\underline{|\delta} - V_{EQ}}{j\left(X_s + X_{EQ}\right)} = \frac{1\underline{|\delta} - 1}{j1,58} = -0,6329\, j \cdot \left[1\underline{|\delta} - 1\right] = -0,6329\underline{|\delta + 90^\circ} - 1\underline{|90^\circ}$$

Exercício 6/B

Um gerador trifásico síncrono de 75 MVA e 13,8 KV, com uma reatância síncrona saturada de 1,35 p.u. e uma reatância não saturada de 1,56 p.u., é ligado a um sistema extremo, cuja reatância equivalente é de 0,23 p.u. e cuja tensão é 1 p.u. Ambas tomando o gerador como base. Ele atinge a tensão nominal de circuito aberto para uma corrente de campo de 297 A

A) ...

B) Utilizando o MATLAB, plotar a tensão terminal do gerador quando a saída do gerador é variada de zero até a potência máxima com as condições da letra A).

$$\hat{I}_a = \frac{\hat{E}_{af} - \hat{V}_{EQ}}{j\left(X_s + X_{EQ}\right)} = \frac{E_{af}\underline{|\delta} - V_{EQ}}{j\left(X_s + X_{EQ}\right)} = \frac{1\underline{|\delta} - 1}{j1,58} = -0,6329\,j \cdot \left[1\underline{|\delta} - 1\right] = -0,6329\underline{|\delta + 90^\circ} - 1\underline{|90^\circ}$$

$$\hat{V}_a = \hat{V}_{EQ} + jX_{EQ} \cdot \hat{I}_a = 1 + j0,23\left(\frac{1\underline{|\delta} - 1}{j1,58}\right) = 1 + \left(\frac{0,23}{1,58} \cdot 1\underline{|\delta} - 1\right) = 1 + \left(0,14557\underline{|\delta} - 1\right)$$

Exercício 6/B

Um gerador trifásico síncrono de 75 MVA e 13,8 KV, com uma reatância síncrona saturada de 1,35 p.u. e uma reatância não saturada de 1,56 p.u., é ligado a um sistema extremo, cuja reatância equivalente é de 0,23 p.u. e cuja tensão é 1 p.u. Ambas tomando o gerador como base. Ele atinge a tensão nominal de circuito aberto para uma corrente de campo de 297 A

A) ...

B) Utilizando o MATLAB, plotar a tensão terminal do gerador quando a saída do gerador é variada de zero até a potência máxima com as condições da letra A).

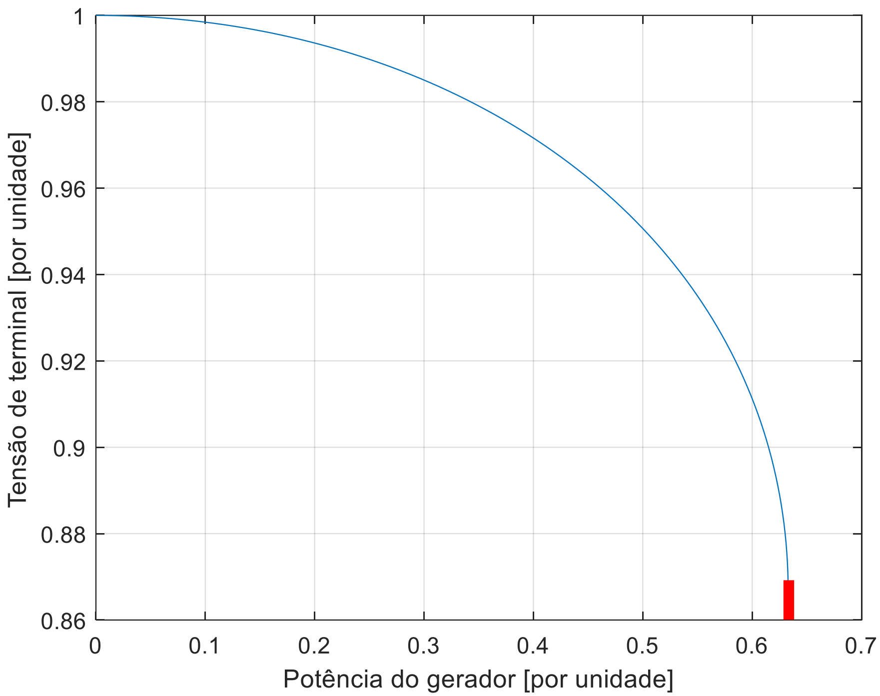
$$\hat{I}_a = \frac{\hat{E}_{af} - \hat{V}_{EQ}}{j\left(X_s + X_{EQ}\right)} = \frac{E_{af}\underline{|\delta} - V_{EQ}}{j\left(X_s + X_{EQ}\right)} = \frac{1\underline{|\delta} - 1}{j1,58} = -0,6329\,j \cdot \left[1\underline{|\delta} - 1\right] = -0,6329\underline{|\delta + 90^\circ} - 1\underline{|90^\circ}$$

$$\hat{V}_a = \hat{V}_{EQ} + jX_{EQ} \cdot \hat{I}_a = 1 + j0,23\left(\frac{1\underline{|\delta} - 1}{j1,58}\right) = 1 + \left(\frac{0,23}{1,58} \cdot 1\underline{|\delta} - 1\right) = 1 + \left(0,14557\underline{|\delta} - 1\right)$$

$$\hat{V}_a = 1 + 0,14557 \cdot \left[\left(1\underline{|\delta}\right) - 1\right] \qquad P = \mathrm{Re}\left[\hat{V}_{\hat{a}} \cdot \hat{I}_a^*\right]$$

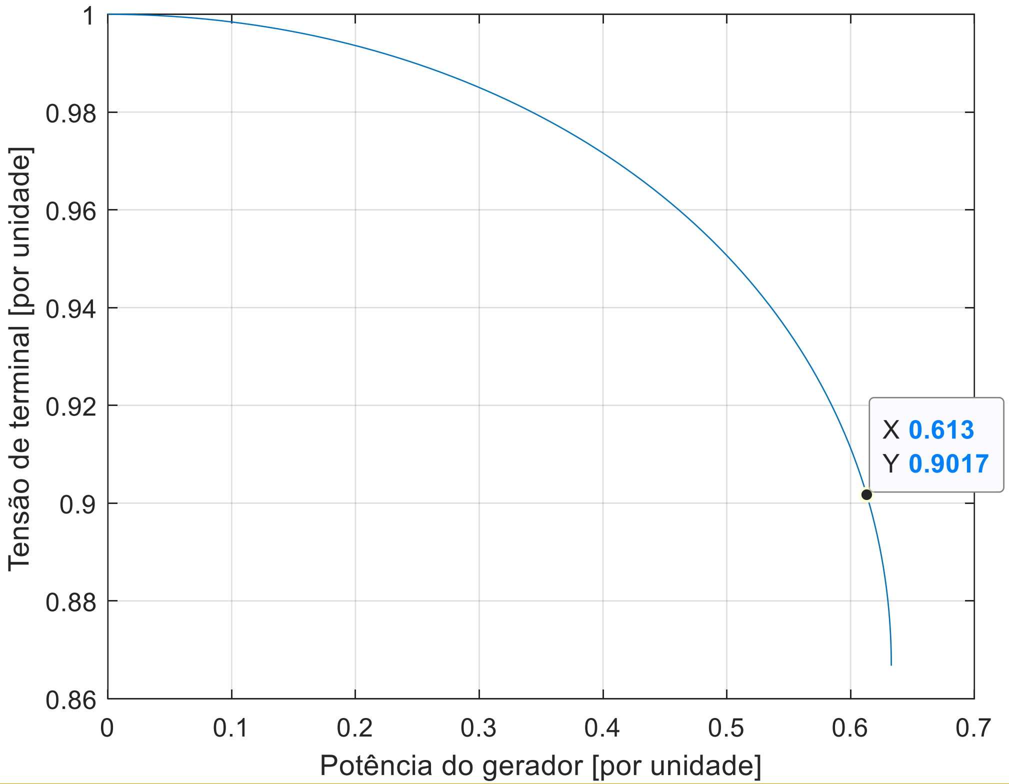
Exercício 6/B

```
clc
clear
% Solução da parte (b)
% Parâmetros do sistema
Veq = 1.0;
Eaf = 1.0;
Xeq = .23;
Xs = 1.35;
n = 1:101;
delta = (pi/2)*(n-1)/100;
Iahat = (Eaf *exp(j*delta) - Veq)/(j*(Xs + Xeq));
Vahat = (Veq + j*Xeq*Iahat);
Vamag = abs(Vahat);
P = real(Vahat.*conj(Iahat));
% Agora plote os resultados
plot(P,Vamag)
xlabel('Potência do gerador [por unidade]')
ylabel('Tensão de terminal [por unidade]')
```



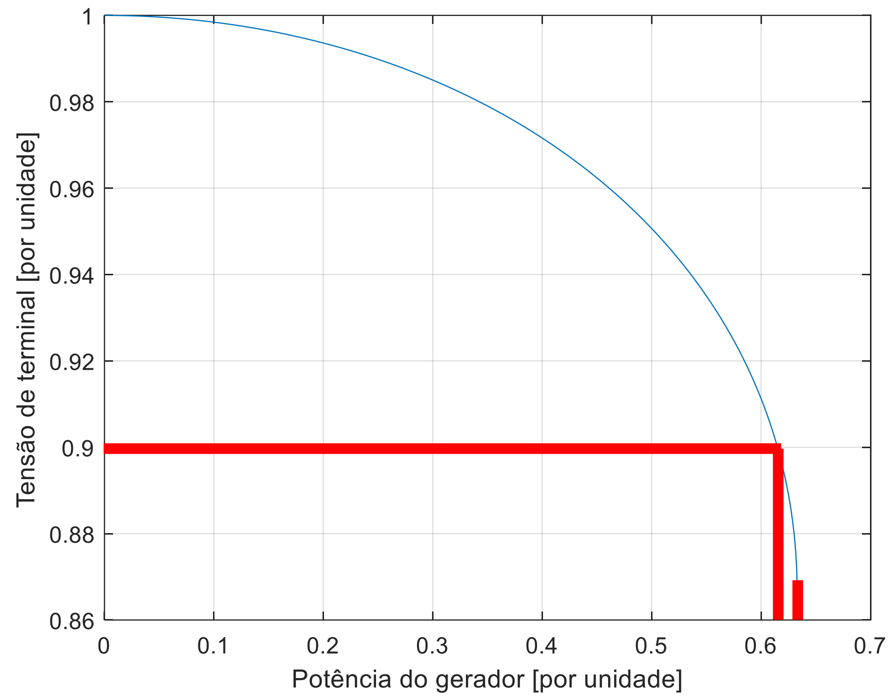
Exercício 6/B

Se for permitido uma redução de até 10% na tensão terminal, isso significa que nesta tensão o potência máxima do gerador é limitada a 0,613 p.u. (diferente do valor máximo 0,633 p.u. da letra (A).



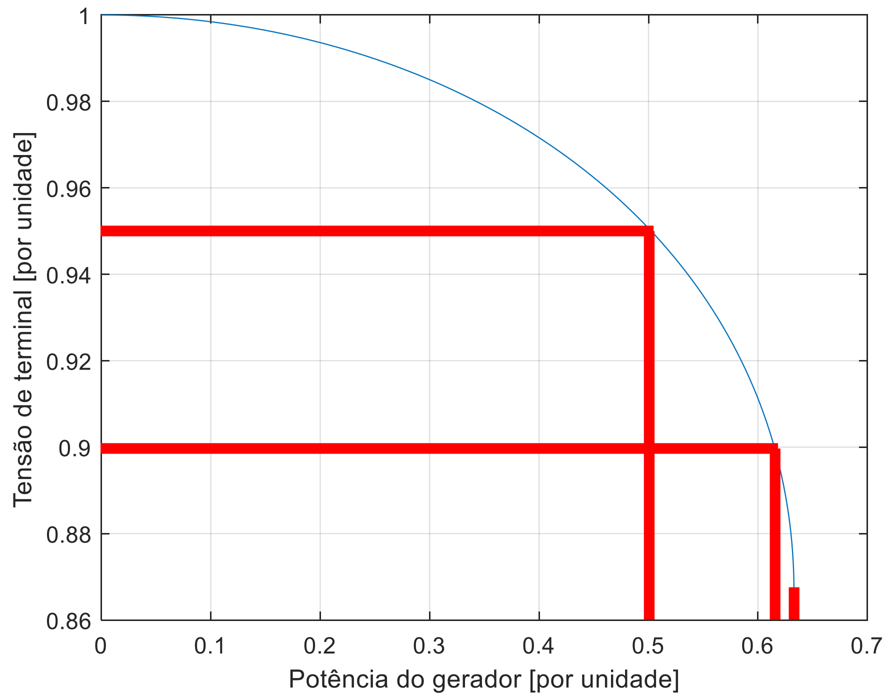
Exercício 6/B

```
clc
clear
% Solução da parte (b)
% Parâmetros do sistema
Veq = 1.0;
Eaf = 1.0;
Xeq = .23;
Xs = 1.35;
n = 1:101;
delta = (pi/2)*(n-1)/100;
Iahat = (Eaf *exp(j*delta) - Veq)/(j*(Xs + Xeq));
Vahat = (Veq + j*Xeq*Iahat);
Vamag = abs(Vahat);
P = real(Vahat.*conj(Iahat));
% Agora plote os resultados
plot(P,Vamag)
xlabel('Potência do gerador [por unidade]')
ylabel('Tensão de terminal [por unidade]')
```



Exercício 6/B

Se for permitido uma redução de até 5% na tensão terminal, isso significa que nesta tensão o potência máxima do gerador é limitada a 0,5 p.u. (diferente do valor máximo de 0,633 pu.



Exercício 6

Um gerador trifásico síncrono de 75 MVA e 13,8 KV, com uma reatância síncrona saturada de 1,35 p.u. e uma reatância não saturada de 1,56 p.u., é ligado a um sistema extremo, cuja reatância equivalente é de 0,23 p.u. e cuja tensão é 1 p.u. Ambas tomando o gerador como base. Ele atinge a tensão nominal de circuito aberto para uma corrente de campo de 297 A

A) Encontre a potência máxima (em MW e p.u.) que pode ser fornecida ao sistema extremo se a tensão interna do gerador for mantida igual a 1 pu.

B) Utilizando o MATLAB, plotar a tensão terminal do gerador quando a saída do gerador é variada de zero até a potência máxima com as condições da letra A).

C) Agora suponha que o gerador esteja equipado com um regulador automático de tensão (RAT) que controla a corrente de campo mantendo constante a tensão terminal. Se a carga submetida ao gerador for nominal, calcule o correspondente ângulo de potência, a tensão por unidade e a corrente de campo. Usando o MATLAB, plote a força eletromotriz gerada por unidade em função da potência por unidade

Exercício 6/C

...

A) ...

B) ...

C) Agora suponha que o gerador esteja equipado com um regulador automático de tensão (RAT) que controla a corrente de campo mantendo constante a tensão terminal. Se a carga submetida ao gerador for nominal, calcule o correspondente ângulo de potência, a tensão por unidade e a corrente de campo. Usando o MATLAB, plote a força eletromotriz gerada por unidade em função da potência por unidade

Tensão terminal é mantida constante em 1 p.u. A potência pode ser expressa por:

Exercício 6/C

$$P = \frac{V_a \cdot V_{EQ}}{X_{EQ}} \operatorname{sen}\left(\delta_t\right)$$

$$P = \frac{1}{0,23} \operatorname{sen}\left(\delta_t\right) = 4,35 \cdot \operatorname{sen}\left(\delta_t\right)$$

Exercício 6/C

$$P = \frac{V_a \cdot V_{EQ}}{X_{EQ}} \operatorname{sen}\left(\delta_t\right)$$

$$P = \frac{1}{0,23} \operatorname{sen}\left(\delta_t\right) = 4,35 \cdot \operatorname{sen}\left(\delta_t\right)$$

Para P=1 p.u., o ângulo será: $1 = 4,35 \cdot \operatorname{sen}\left(\delta_t\right) \rightarrow \delta_t = 13,3^{o}$

Exercício 6/C

$$P = \frac{V_a \cdot V_{EQ}}{X_{EQ}} \operatorname{sen}\left(\delta_t\right) \qquad P = \frac{1}{0,23} \operatorname{sen}\left(\delta_t\right) = 4,35 \cdot \operatorname{sen}\left(\delta_t\right)$$

Para P=1 p.u., o ângulo será: $1 = 4,35 \cdot \operatorname{sen}\left(\delta_t\right) \rightarrow \delta_t = 13,3^o$

Cálculo da corrente $\hat{I}_a = \frac{V_a \underline{|\delta_t} - V_{EQ}}{jX_{EQ}} = \frac{1\underline{|13,3^o} - 1}{j0,23} = 1,007\underline{|6,65^o}$

Exercício 6/C

$$P = \frac{V_a \cdot V_{EQ}}{X_{EQ}} \operatorname{sen}(\delta_t) \qquad P = \frac{1}{0,23} \operatorname{sen}(\delta_t) = 4,35 \cdot \operatorname{sen}(\delta_t)$$

Para P=1 p.u., o ângulo será: $1 = 4,35 \cdot \operatorname{sen}(\delta_t) \rightarrow \delta_t = 13,3^{\circ}$

Cálculo da corrente $\hat{I}_a = \frac{V_a \underline{|\delta_t} - V_{EQ}}{jX_{EQ}} = \frac{1\underline{|13,3^{\circ}} - 1}{j0,23} = 1,007\underline{|6,65^{\circ}}$

$$\hat{E}_{\tilde{a}f} = \hat{V}_{\hat{E}Q} + j\left(X_{EQ} + X_s\right) \cdot \hat{I}_a = 1 + j1,58 \cdot 1,007\underline{|6,65^{\circ}} = 1,78\underline{|62,7^{\circ}}$$

Exercício 6/C

$$P = \frac{V_a \cdot V_{EQ}}{X_{EQ}} \operatorname{sen}(\delta_t) \qquad P = \frac{1}{0,23} \operatorname{sen}(\delta_t) = 4,35 \cdot \operatorname{sen}(\delta_t)$$

Para P=1 p.u., o ângulo será: $1 = 4,35 \cdot \operatorname{sen}(\delta_t) \rightarrow \delta_t = 13,3^{o}$

Cálculo da corrente $\hat{I}_a = \frac{V_a \angle \delta_t - V_{EQ}}{jX_{EQ}} = \frac{1 \angle 13,3^{o} - 1}{j0,23} = 1,007 \angle 6,65^{o}$

$$\hat{E}_{\tilde{a}f} = \hat{V}_{\hat{E}Q} + j\left(X_{EQ} + X_s\right) \cdot \hat{I}_a = 1 + j1,58 \cdot 1,007 \angle 6,65^{o} = 1,78 \angle 62,7^{o}$$

$$E_{af} = 1,78 \, \text{p.u.}$$

Exercício 6/C

$$P = \frac{V_a \cdot V_{EQ}}{X_{EQ}} \operatorname{sen}(\delta_t) \qquad P = \frac{1}{0,23} \operatorname{sen}(\delta_t) = 4,35 \cdot \operatorname{sen}(\delta_t)$$

Para P=1 p.u., o ângulo será: $1 = 4,35 \cdot \operatorname{sen}(\delta_t) \rightarrow \delta_t = 13,3^{o}$

Cálculo da corrente $\hat{I}_a = \frac{V_a \angle \delta_t - V_{EQ}}{jX_{EQ}} = \frac{1 \angle 13,3^{o} - 1}{j0,23} = 1,007 \angle 6,65^{o}$

$$\hat{E}_{\tilde{a}f} = \hat{V}_{\hat{E}Q} + j\left(X_{EQ} + X_s\right) \cdot \hat{I}_a = 1 + j1,58 \cdot 1,007 \angle 6,65^{o} = 1,78 \angle 62,7^{o}$$

$$E_{af} = 1,78 \text{ p.u.} \qquad \delta = 62,7^{o}$$

Exercício 6/C

$$P = \frac{V_a \cdot V_{EQ}}{X_{EQ}} \operatorname{sen}(\delta_t)$$

$$P = \frac{1}{0,23} \operatorname{sen}(\delta_t) = 4,35 \cdot \operatorname{sen}(\delta_t)$$

Para P=1 p.u., o ângulo será: $1 = 4,35 \cdot \operatorname{sen}(\delta_t) \rightarrow \delta_t = 13,3^{\circ}$

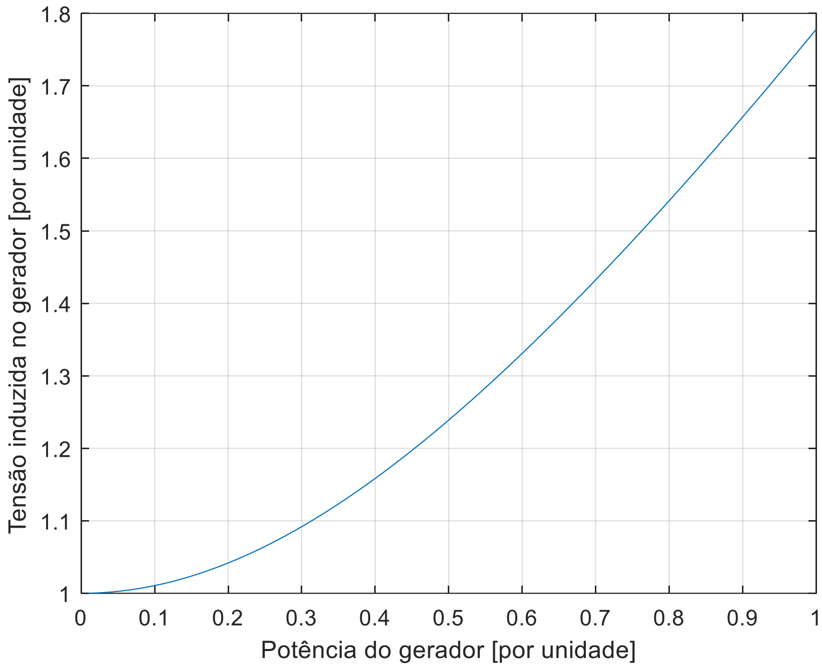
Cálculo da corrente $\hat{I}_a = \dfrac{V_a \underline{|\delta_t} - V_{EQ}}{jX_{EQ}} = \dfrac{1\underline{|13,3^{\circ}} - 1}{j0,23} = 1,007\underline{|6,65^{\circ}}$

$$\hat{E}_{\tilde{a}f} = \hat{V}_{\hat{E}Q} + j\left(X_{EQ} + X_s\right) \cdot \hat{I}_a = 1 + j1,58 \cdot 1,007\underline{|6,65^{\circ}} = 1,78\underline{|62,7^{\circ}}$$

$$E_{af} = 1,78\,\text{p.u.} \qquad \delta = 62,7^{\circ} \qquad I_f = 1,78 \cdot 297 = 529\,A$$

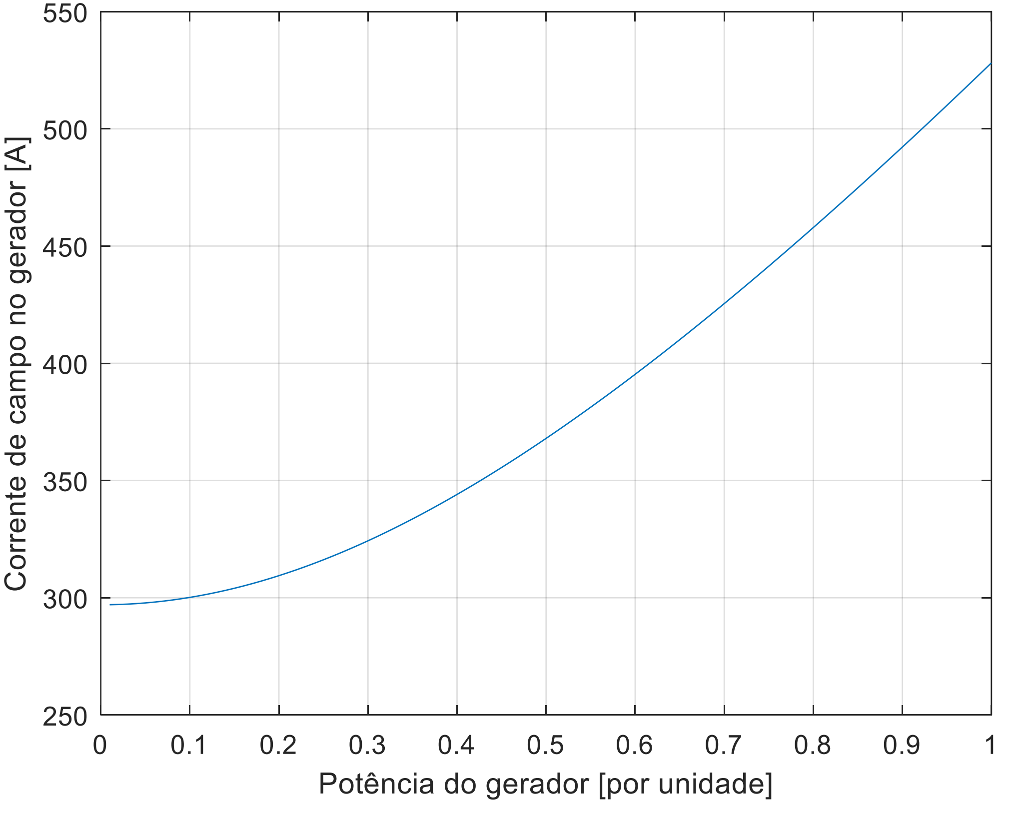
Exercício 6/C

```
Va=1.0;
K=Va*Veq/Xeq;
PP=0.01:0.01:1;
[ind1,ind2]=size(PP);
arg=PP./K;
delta_t=asin(arg);
Va_fasor=Va.*(cos(delta_t)+1i.*sin(delta_t));
Veq_fasor=Veq.*ones(ind1,ind2);
Xeqq=Xeq.*ones(ind1,ind2);
Ia_fasor=(Va_fasor-Veq_fasor)./(1i.*Xeqq);
Xss=Xs.*ones(ind1,ind2);
Eaf_fasor=Veq_fasor+1i.*(Xeqq+Xss).*Ia_fasor;
Eaf=abs(Eaf_fasor);
% Agora plote os resultados
figure(2),plot(PP,Eaf)
grid on
xlabel('Potência do gerador [por unidade]')
ylabel('Tensão induzida no gerador [por unidade]')
```



Exercício 6/C

```
AFNL=297;
If=AFNL.*Eaf;
% Agora plote os resultados
figure(3),plot(PP,If)
grid on
xlabel('Potência do gerador [por unidade]')
ylabel('Corrente de campo no gerador [A]')
```

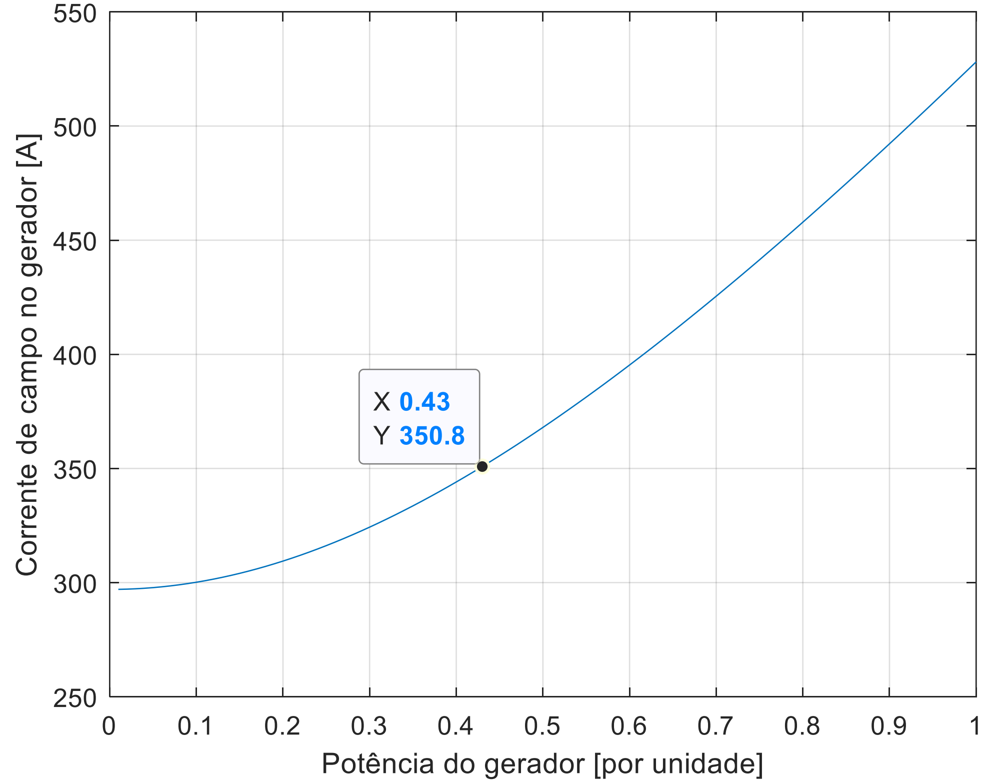


Exercício 6/C

Se o limite de corrente de campo for 350 A para o gerador:

A capacidade do gerador cai para 0,43 p.u., isto é, 32,25 MVA.

- ***Assim, o limite de capacidade do gerador depende do sistema externo que ele atende e da capacidade de corrente dos condutores do enrolamento de campo.***



Especificações Nominais

- Há limites no gerador síncrono
  - Potência e velocidade
  - Propósito: proteger a máquina de danos, devido a uso impróprio

Especificações Nominais

- Há limites no gerador síncrono
  - Potência e velocidade
  - Propósito: proteger a máquina de danos, devido a uso impróprio
- Especificações básicas
  - Tensão, velocidade e frequência

Especificações Nominais

- Há limites no gerador síncrono
  - Potência e velocidade
  - Propósito: proteger a máquina de danos, devido a uso impróprio
- Especificações básicas
  - Tensão, velocidade e frequência
    - Cada máquina deve ter uma frequência elétrica especificada, número de polos e velocidade de eixo

Especificações Nominais

- Há limites no gerador síncrono
  - Potência e velocidade
  - Propósito: proteger a máquina de danos, devido a uso impróprio
- Especificações básicas
  - Tensão, velocidade e frequência
    - Cada máquina deve ter uma frequência elétrica especificada, número de polos e velocidade de eixo
    - Tensão é a especificação mais importante: toda a construção da máquina, o fluxo e a velocidade depende da tensão.

Especificações Nominais

- Especificações de potência aparente e fator de potência

$$S_n = 3 \cdot V_{F,n} \cdot I_{a,máx} = \sqrt{3} \cdot V_{L,n} \cdot I_{L,máx}$$

  - Potência da armadura e da máquina, é dada em kVA

Especificações Nominais

- Especificações de potência aparente e fator de potência

$$S_n = 3 \cdot V_{F,n} \cdot I_{a,máx} = \sqrt{3} \cdot V_{L,n} \cdot I_{L,máx}$$

  - Potência da armadura e da máquina, é dada em kVA
  - Apesar disto, a corrente de campo influencia:
    - Existe restrição de fator de potência mínimo aceitável dentro dos kVAs nominais:

$$\hat{E}_a = \hat{V}_t + jX_s \cdot \hat{I}_a$$

Especificações Nominais

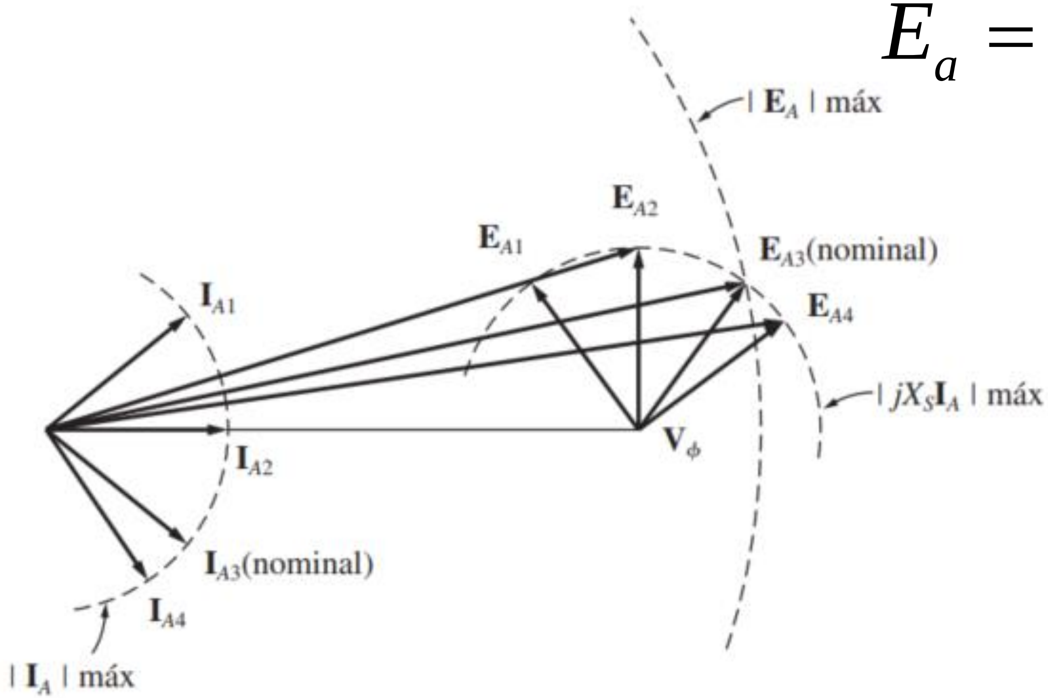
- Especificações de potência aparente e fator de potência
  - Existe restrição de fator de potência mínimo aceitável dentro dos kVAs nominais:

$$\hat{E}_a = \hat{V}_t + jX_s \cdot \hat{I}_a$$

Especificações Nominais

- Especificações de potência aparente e fator de potência
  - Existe restrição de fator de potência mínimo aceitável dentro dos kVAs nominais:

$$\hat{E}_a = \hat{V}_t + jX_s \cdot \hat{I}_a$$

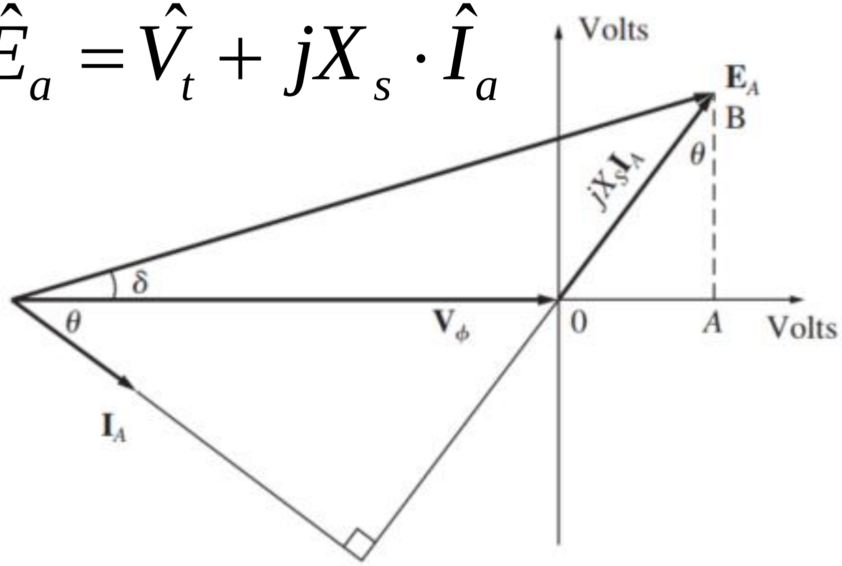


Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

Especificações Nominais

- Curvas de capacidade do gerador síncrono
  - Todos os limites a um gerador podem ser representados graficamente pelo <u>*diagrama de capacidade*</u>

$$\hat{E}_a = \hat{V}_t + jX_s \cdot \hat{I}_a$$

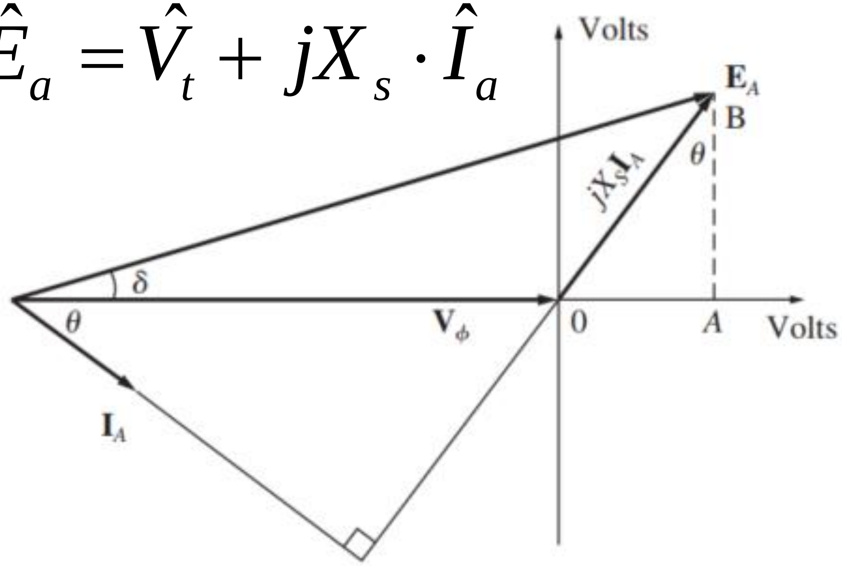


Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

Especificações Nominais

- Curvas de capacidade do gerador síncrono
  - Todos os limites a um gerador podem ser representados graficamente pelo *diagrama de capacidade*

$$\hat{E}_a = \hat{V}_t + jX_s \cdot \hat{I}_a$$



$$P = 3 \cdot V_{F,n} \cdot I_a \cdot \cos(\theta)$$

$$Q = 3 \cdot V_{F,n} \cdot I_a \cdot \mathrm{sen}(\theta)$$

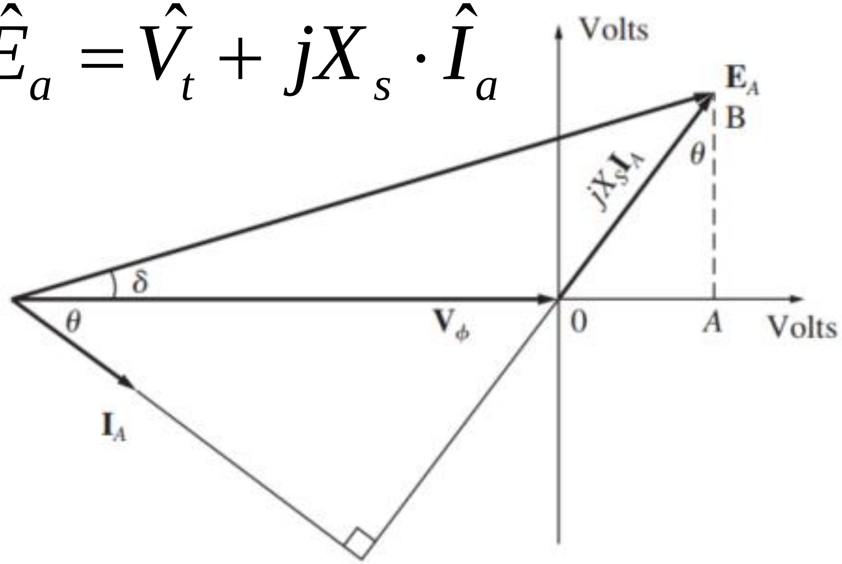
$$S = 3 \cdot V_{F,n} \cdot I_a$$

Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

Especificações Nominais

- Curvas de capacidade do gerador síncrono
  - Todos os limites a um gerador podem ser representados graficamente pelo <u>*diagrama de capacidade*</u>

$$\hat{E}_a = \hat{V}_t + jX_s \cdot \hat{I}_a$$



$$P = 3 \cdot V_{F,n} \cdot I_a \cdot \cos(\theta)$$

$$Q = 3 \cdot V_{F,n} \cdot I_a \cdot \mathrm{sen}(\theta)$$

$$S = 3 \cdot V_{F,n} \cdot I_a$$

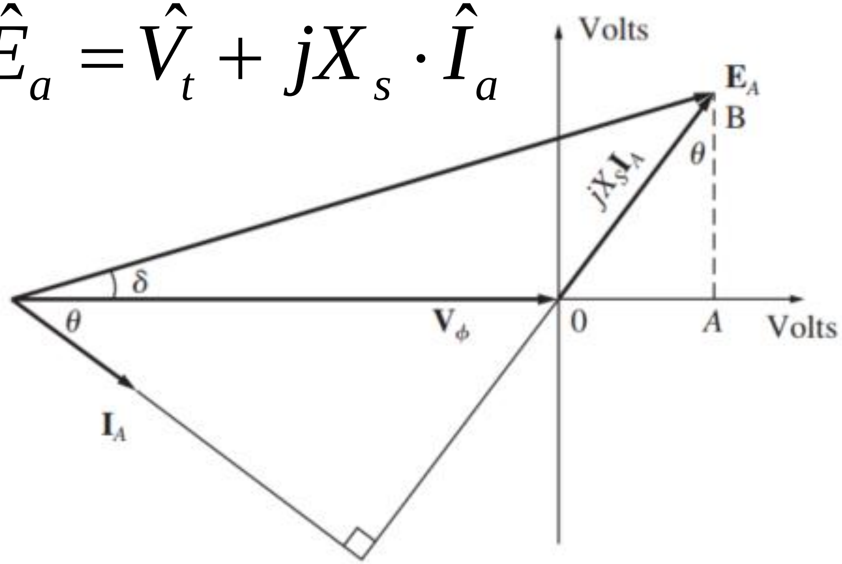
- 0A – $X_s \cdot I_a \cdot \mathrm{sen}(\theta)$
- AB – $X_s \cdot I_a \cdot \cos(\theta)$

Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

Especificações Nominais

- Curvas de capacidade do gerador síncrono
  - Todos os limites a um gerador podem ser representados graficamente pelo *diagrama de capacidade*

$$\hat{E}_a = \hat{V}_t + jX_s \cdot \hat{I}_a$$



$$P = 3 \cdot V_{F,n} \cdot I_a \cdot \cos(\theta)$$

$$Q = 3 \cdot V_{F,n} \cdot I_a \cdot \mathrm{sen}(\theta)$$

$$S = 3 \cdot V_{F,n} \cdot I_a$$

- 0A – $X_s \cdot I_a \cdot \mathrm{sen}(\theta)$
- AB – $X_s \cdot I_a \cdot \cos(\theta)$

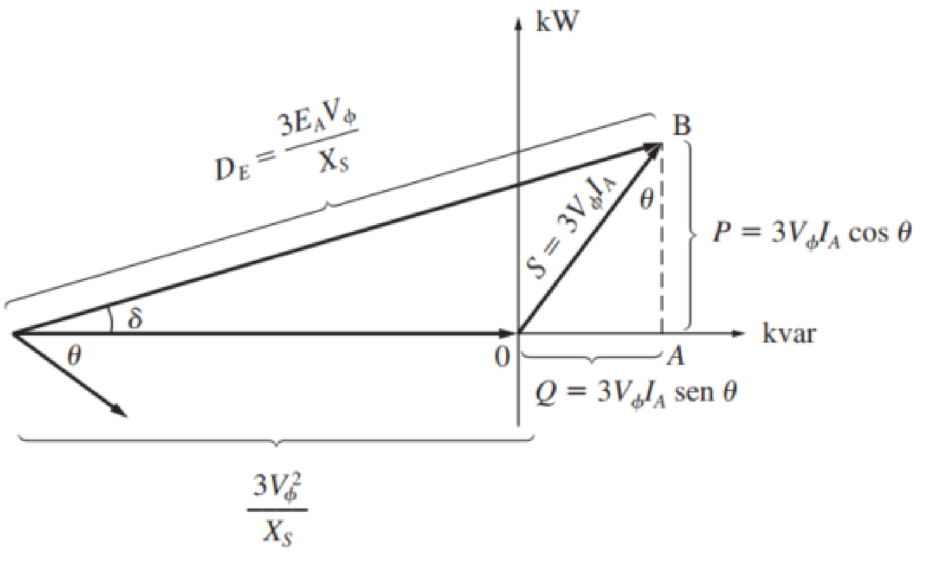
$$P = \frac{3 \cdot V_{F,n}}{X_s} \cdot \left[X_s I_a \cdot \cos(\theta) \right]$$

$$Q = \frac{3 \cdot V_{F,n}}{X_s} \cdot \left[X_s I_a \cdot \mathrm{sen}(\theta) \right]$$

Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

Especificações Nominais

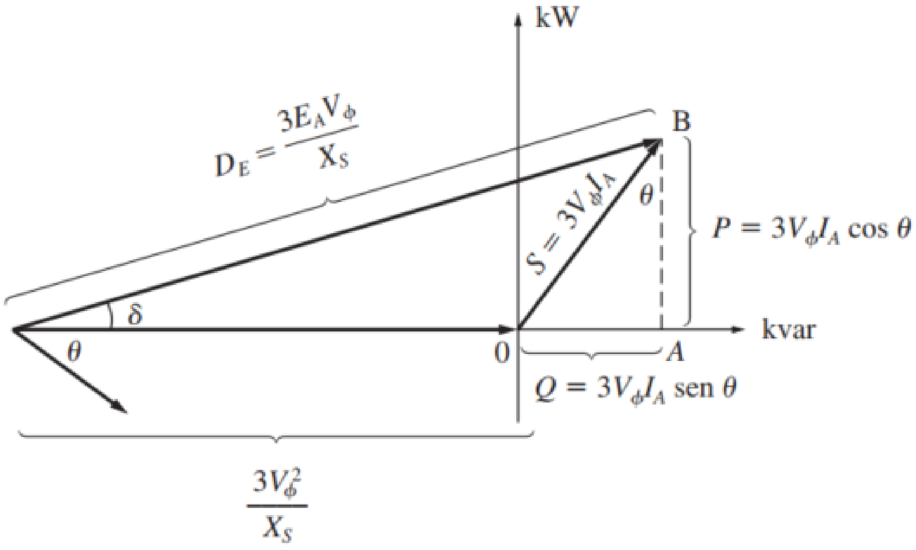
- Curvas de capacidade do gerador síncrono



Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

Especificações Nominais

- Curvas de capacidade do gerador síncrono
  - A origem do diagrama não é em 0 – a tensão fica na posição $-V_{F,n}$

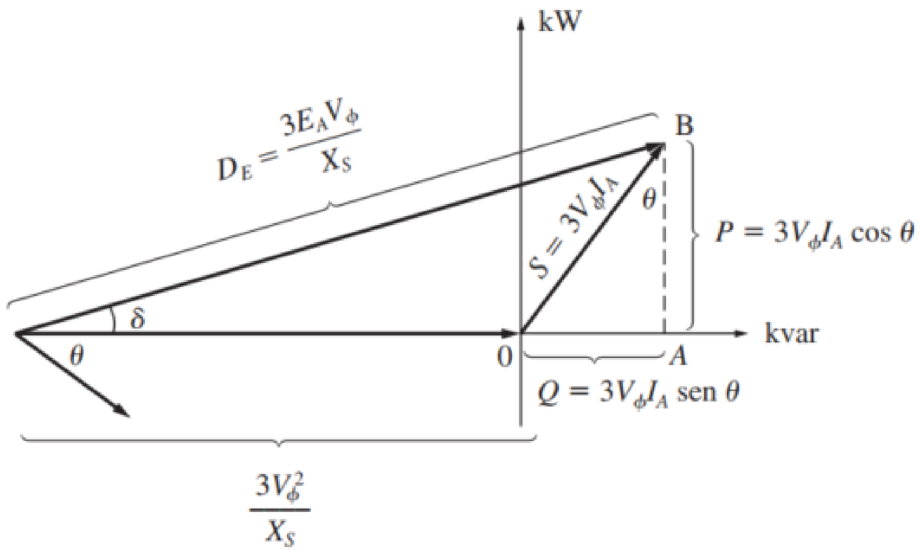


$$Q = \frac{3 \cdot V_{F,n}}{X_s} \cdot \left(-V_{F,n}\right) = -\frac{3 \cdot V_{F,n}^2}{X_s}$$

Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

Especificações Nominais

- Curvas de capacidade do gerador síncrono
  - A origem do diagrama não é em 0 – a tensão fica na posição $-V_{F,n}$



$$Q = \frac{3 \cdot V_{F,n}}{X_s} \cdot \left(-V_{F,n}\right) = -\frac{3 \cdot V_{F,n}^2}{X_s}$$

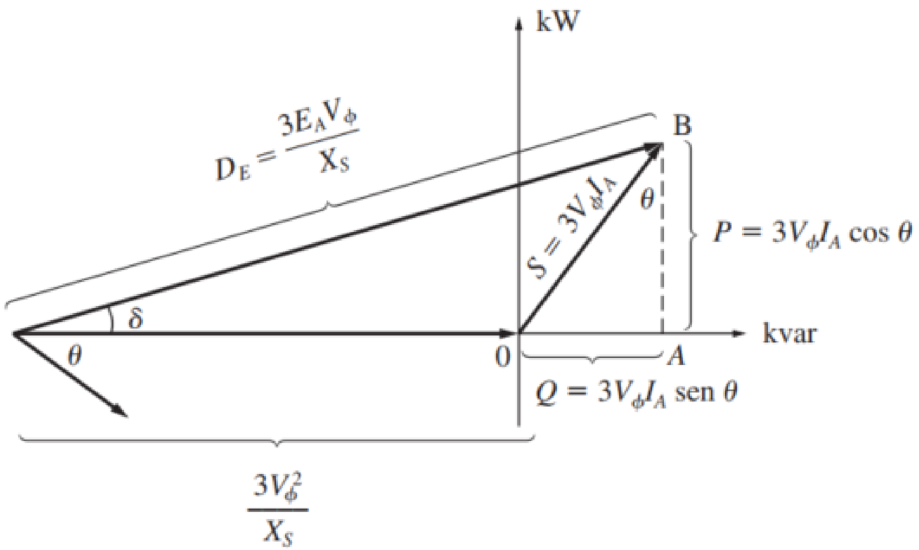
$$D_E = \frac{3 \cdot V_{F,n}}{X_s} \cdot \left(E_a\right) = \frac{3 \cdot V_{F,n} \cdot E_a}{X_s}$$

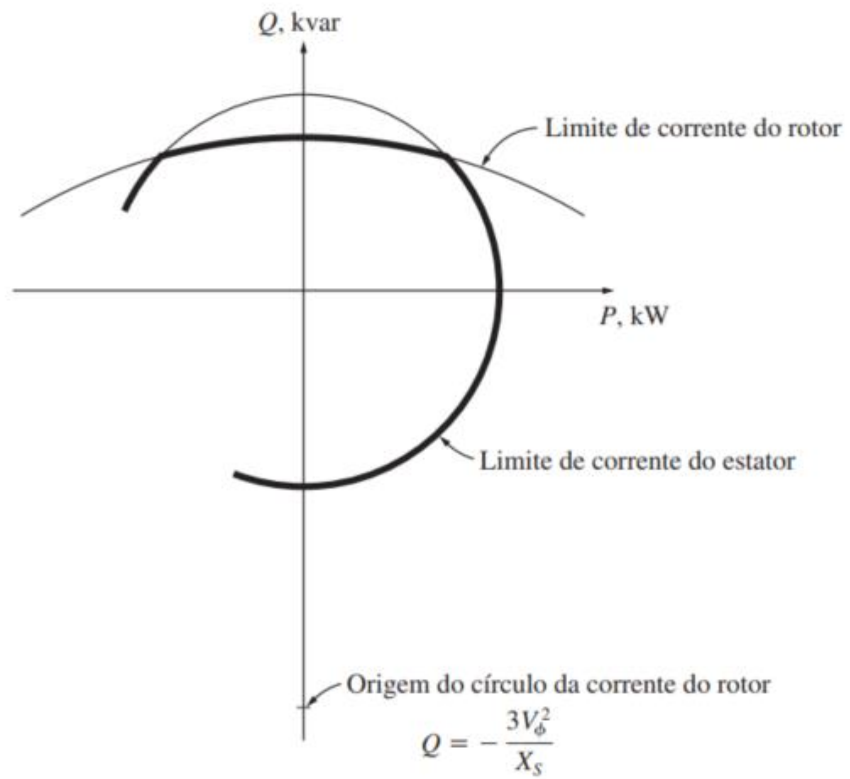
  - De $-V_{F,n}$ até B tem-se a distância proporcional da tensão induzida a corrente máxima do campo

Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

Especificações Nominais

- Curvas de capacidade do gerador síncrono





Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

Especificações Nominais

- Obtenção das curvas de capacidade
  - Condição
    - Tensão terminal e corrente de armadura constantes

Especificações Nominais

- Obtenção das curvas de capacidade
  - Condição
    - Tensão terminal e corrente de armadura constantes

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = 3V_{F,n} I_{a,máx} \qquad S = \sqrt{P^2 + Q^2} = V_{F,n} I_{a,máx} \left(\text{p.u.}\right)$$

  - Limite da armadura:

Especificações Nominais

- Obtenção das curvas de capacidade
  - Condição
    - Tensão terminal e corrente de armadura constantes

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = 3V_{F,n} I_{a,máx} \qquad S = \sqrt{P^2 + Q^2} = V_{F,n} I_{a,máx} \left(\text{p.u.}\right)$$

  - Limite da armadura:
  - Limite do campo:

$$P = \frac{3V_{F,n} \cdot E_{af}}{X_s} \operatorname{sen}\left(\delta\right)$$

$$Q + \frac{3V_{F,n}^2}{X_s} = \frac{3 \cdot V_{F,n} \cdot E_{af}}{X_s} \cos\left(\delta\right)$$

Especificações Nominais

- Obtenção das curvas de capacidade
  - Condição
    - Tensão terminal e corrente de armadura constantes

$$S=\sqrt{P^2+Q^2}=3V_{F,n}I_{a,máx} \qquad S=\sqrt{P^2+Q^2}=V_{F,n}I_{a,máx}\left(\text{p.u.}\right)$$

  - Limite da armadura:
  - Limite do campo:

$$P=\frac{3V_{F,n}\cdot E_{af}}{X_s}\operatorname{sen}\left(\delta\right) \qquad S_f^2=P^2+\left(Q+\frac{3\cdot V_{F,n}^2}{X_s}\right)^2=\left(\frac{3\cdot V_{F,n}\cdot E_{af}}{X_s}\right)^2$$

$$Q+\frac{3V_{F,n}^2}{X_s}=\frac{3\cdot V_{F,n}\cdot E_{af}}{X_s}\cos\left(\delta\right)$$

Especificações Nominais

- Obtenção das curvas de capacidade
  - Limite da armadura:

$$S_a^2 = P^2 + Q^2 = \left(V_a I_a\right)^2$$

  - Limite do campo:

$$P^2 = \left(\frac{3 \cdot V_{F,n} \cdot E_{af}}{X_s}\right)^2 \operatorname{sen}^2(\delta) \qquad \left(Q + \frac{3 \cdot V_{F,n}^2}{X_s}\right)^2 = \left(\frac{3 \cdot V_{F,n} \cdot E_{af}}{X_s}\right)^2 \cos^2(\delta)$$

Especificações Nominais

- Obtenção das curvas de capacidade
  - Limite da armadura:

$$S_a^2 = P^2 + Q^2 = \left(V_a I_a\right)^2$$

  - Limite do campo:

$$P^2 = \left(\frac{3 \cdot V_{F,n} \cdot E_{af}}{X_s}\right)^2 \operatorname{sen}^2(\delta) \qquad \left(Q + \frac{3 \cdot V_{F,n}^2}{X_s}\right)^2 = \left(\frac{3 \cdot V_{F,n} \cdot E_{af}}{X_s}\right)^2 \cos^2(\delta)$$

$$P^2 + \left(Q + \frac{3 \cdot V_{F,n}^2}{X_s}\right)^2 = \left(\frac{3 \cdot V_{F,n} \cdot E_{af}}{X_s}\right)^2 \operatorname{sen}^2(\delta) + \left(\frac{3 \cdot V_{F,n} \cdot E_{af}}{X_s}\right)^2 \cos^2(\delta)$$

Especificações Nominais

- Obtenção das curvas de capacidade
  - Limite da armadura:

$$S_a^2 = P^2 + Q^2 = \left(V_a I_a\right)^2$$

  - Limite do campo:

$$P^2 = \left(\frac{3 \cdot V_{F,n} \cdot E_{af}}{X_s}\right)^2 \operatorname{sen}^2(\delta) \qquad \left(Q + \frac{3 \cdot V_{F,n}^2}{X_s}\right)^2 = \left(\frac{3 \cdot V_{F,n} \cdot E_{af}}{X_s}\right)^2 \cos^2(\delta)$$

$$P^2 + \left(Q + \frac{3 \cdot V_{F,n}^2}{X_s}\right)^2 = \left(\frac{3 \cdot V_{F,n} \cdot E_{af}}{X_s}\right)^2 \operatorname{sen}^2(\delta) + \left(\frac{3 \cdot V_{F,n} \cdot E_{af}}{X_s}\right)^2 \cos^2(\delta)$$

$$P^2 + \left(Q + \frac{3 \cdot V_{F,n}^2}{X_s}\right)^2 = \left(\frac{3 \cdot V_{F,n} \cdot E_{af}}{X_s}\right)^2 \left[\operatorname{sen}^2(\delta) + \cos^2(\delta)\right]$$

Especificações Nominais

- Obtenção das curvas de capacidade
  - Limite da armadura:

$$S_a^2 = P^2 + Q^2 = \left(V_a I_a\right)^2$$

  - Limite do campo:

$$P^2 = \left(\frac{3 \cdot V_{F,n} \cdot E_{af}}{X_s}\right)^2 \operatorname{sen}^2(\delta) \qquad \left(Q + \frac{3 \cdot V_{F,n}^2}{X_s}\right)^2 = \left(\frac{3 \cdot V_{F,n} \cdot E_{af}}{X_s}\right)^2 \cos^2(\delta)$$

$$P^2 + \left(Q + \frac{3 \cdot V_{F,n}^2}{X_s}\right)^2 = \left(\frac{3 \cdot V_{F,n} \cdot E_{af}}{X_s}\right)^2 \operatorname{sen}^2(\delta) + \left(\frac{3 \cdot V_{F,n} \cdot E_{af}}{X_s}\right)^2 \cos^2(\delta)$$

$$S_f^2 = P^2 + \left(Q + \frac{3 \cdot V_{F,n}^2}{X_s}\right)^2 = \left(\frac{3 \cdot V_{F,n} \cdot E_{af}}{X_s}\right)^2$$

Especificações Nominais

- Obtenção das curvas de capacidade
  - Limite da armadura:

$$S^2 = P^2 + Q^2 = 3V_{F,n} I_{a,máx}$$

  - Limite do campo:

$$S_f^2 = P^2 + \left(Q + \frac{3 \cdot V_{F,n}^2}{X_s} \right)^2 = \left(\frac{3 \cdot V_{F,n} \cdot E_{af}}{X_s} \right)^2$$

Especificações Nominais

- Obtenção das curvas de capacidade
  - Limite da armadura:

$$S^2 = P^2 + Q^2 = 3V_{F,n} I_{a,máx}$$

  - Limite do campo:

$$S_f^2 = P^2 + \left(Q + \frac{3 \cdot V_{F,n}^2}{X_s} \right)^2 = \left(\frac{3 \cdot V_{F,n} \cdot E_{af}}{X_s} \right)^2$$

- Observe no plano P-Q

$$r^2 = \left(P - P_0\right)^2 + \left(Q - Q_0\right)^2$$

Especificações Nominais

- Obtenção das curvas de capacidade
  - Limite da armadura:

$$S^2 = P^2 + Q^2 = 3V_{F,n} I_{a,máx}$$

  - Limite do campo:

$$S_f^2 = P^2 + \left(Q + \frac{3 \cdot V_{F,n}^2}{X_s} \right)^2 = \left(\frac{3 \cdot V_{F,n} \cdot E_{af}}{X_s} \right)^2$$

- Observe no plano P-Q

$$r^2 = \left(P - P_0\right)^2 + \left(Q - Q_0\right)^2$$

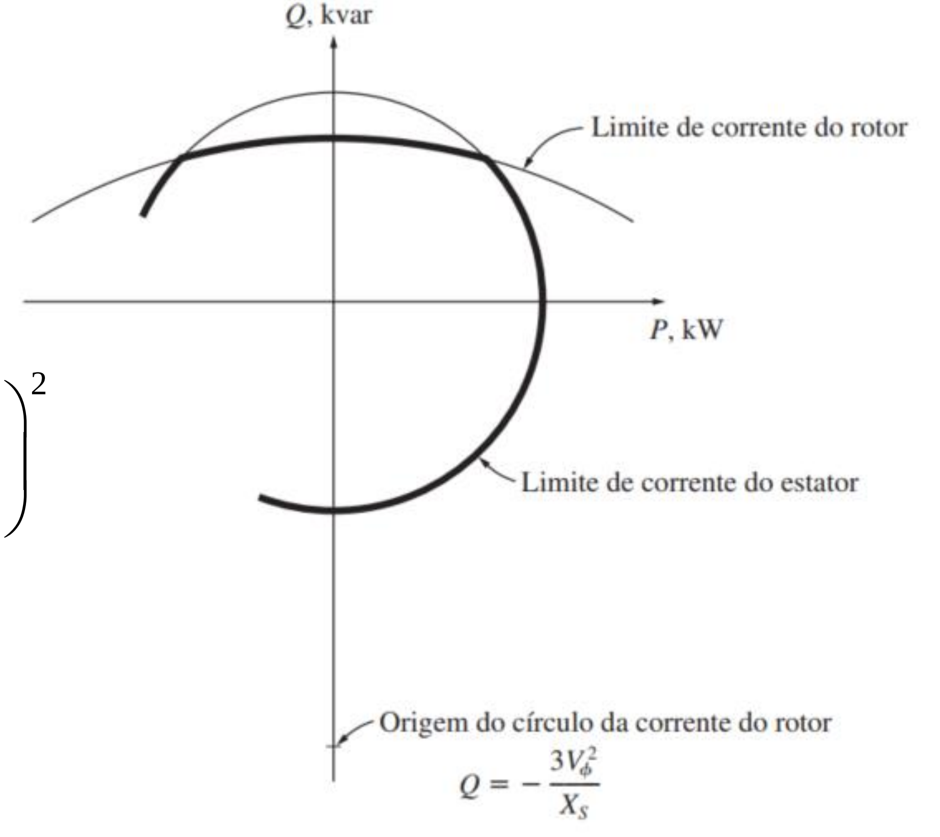
$$P_{0a} = P_{0f} = 0 \qquad Q_{0a} = 0 \rightarrow Q_{0f} = \frac{V_{F,n}^2}{X_s} \qquad r_a = V_a I_a \rightarrow r_f = \frac{V_{F,n} E_{af}}{X_s}$$

Especificações Nominais

- Obtenção das curvas de capacidade
  - Limites formais:

$$S^2 = P^2 + Q^2 = 3V_{F,n} I_{a,máx}$$

$$S_f^2 = P^2 + \left(Q + \frac{3 \cdot V_{F,n}^2}{X_s} \right)^2 = \left(\frac{3 \cdot V_{F,n} \cdot E_{af}}{X_s} \right)^2$$



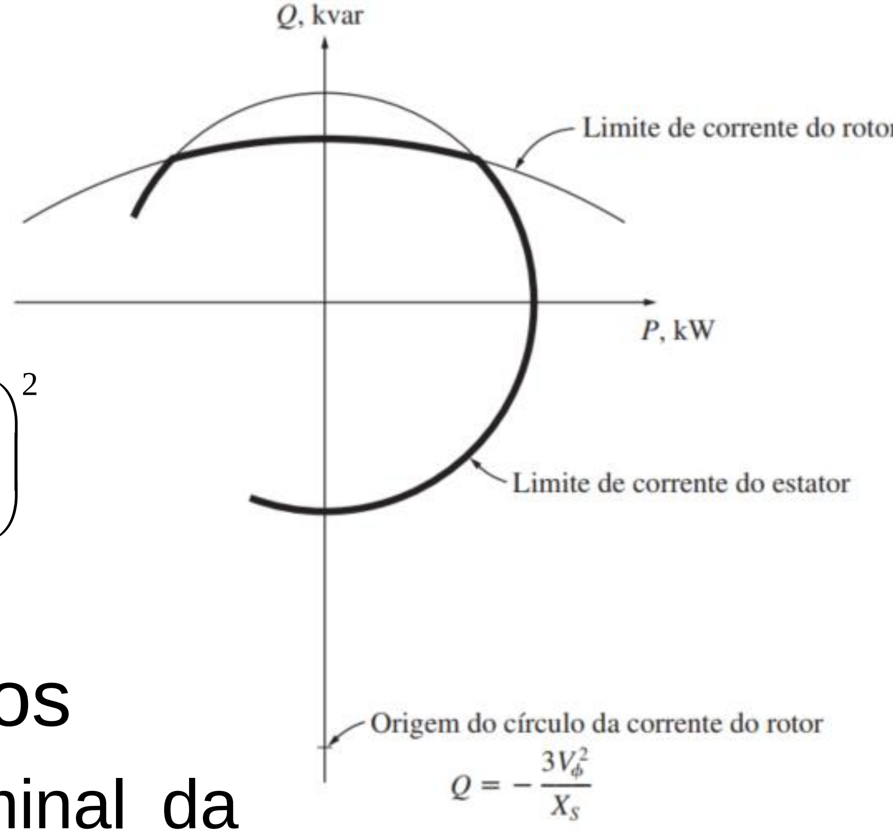
Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

Especificações Nominais

- Obtenção das curvas de capacidade
  - Limites formais:

$$S^2 = P^2 + Q^2 = 3V_{F,n} I_{a,máx}$$

$$S_f^2 = P^2 + \left(Q + \frac{3 \cdot V_{F,n}^2}{X_s} \right)^2 = \left(\frac{3 \cdot V_{F,n} \cdot E_{af}}{X_s} \right)^2$$

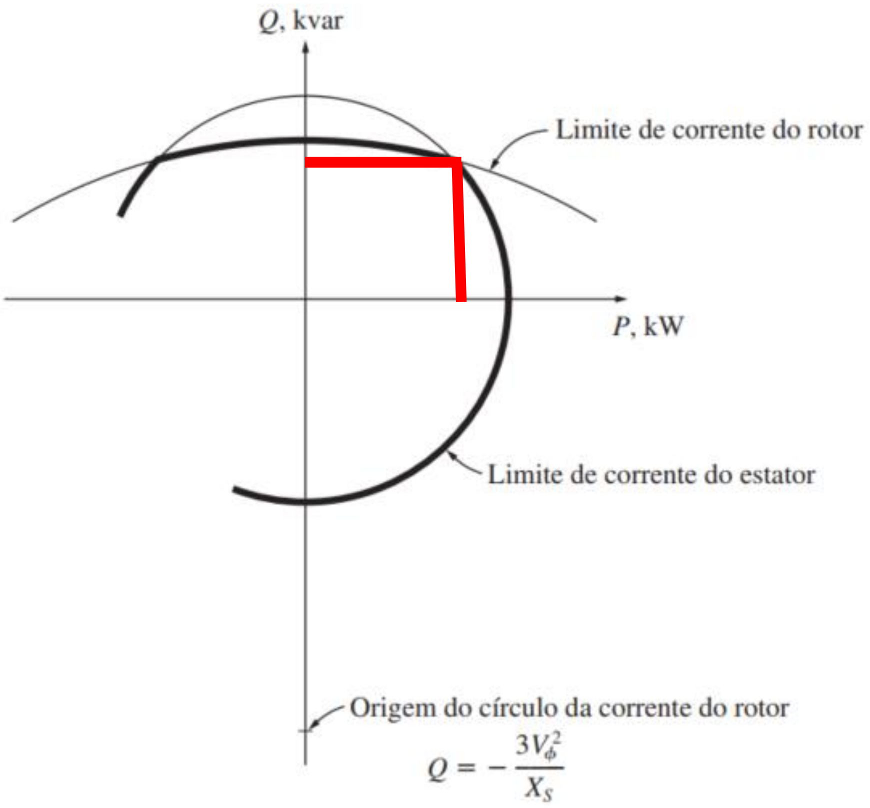


- Intersecção entre círculos
  - Fornece a potência nominal da máquina e fator de potência.

Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

Especificações Nominais

- Intersecção entre círculos
  - Fornece a potência nominal da máquina e fator de potência.



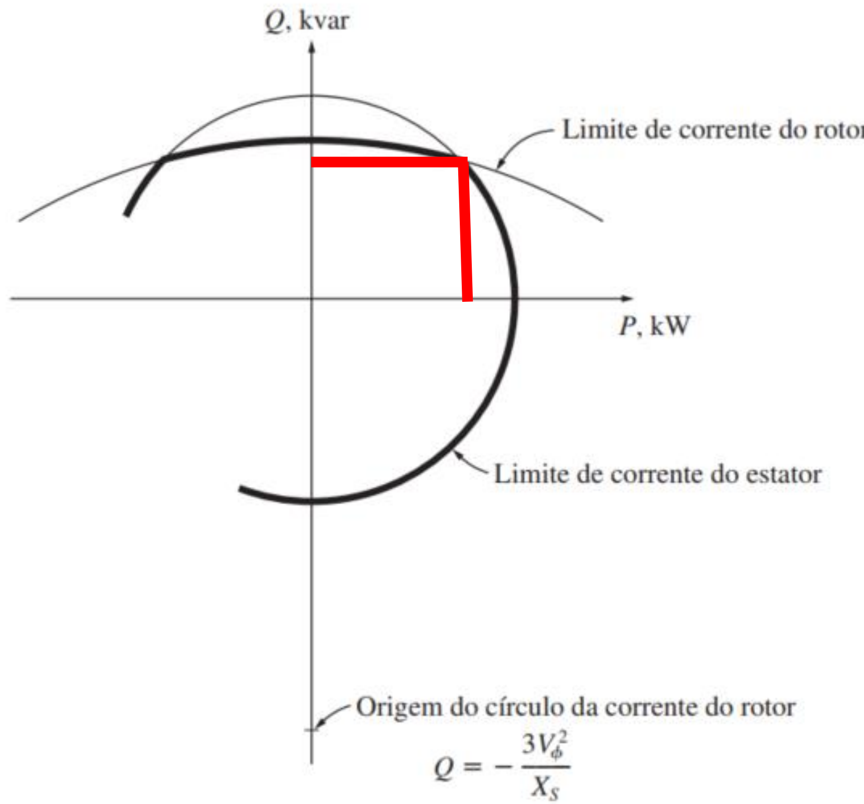
Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

Especificações Nominais

- Intersecção entre círculos
  - Fornece a potência nominal da máquina e fator de potência.

$$S_n = \sqrt{P_{op}^2 + Q_{op}^2}$$

$$FP_{nom} = \frac{P_{op}}{S_n}$$



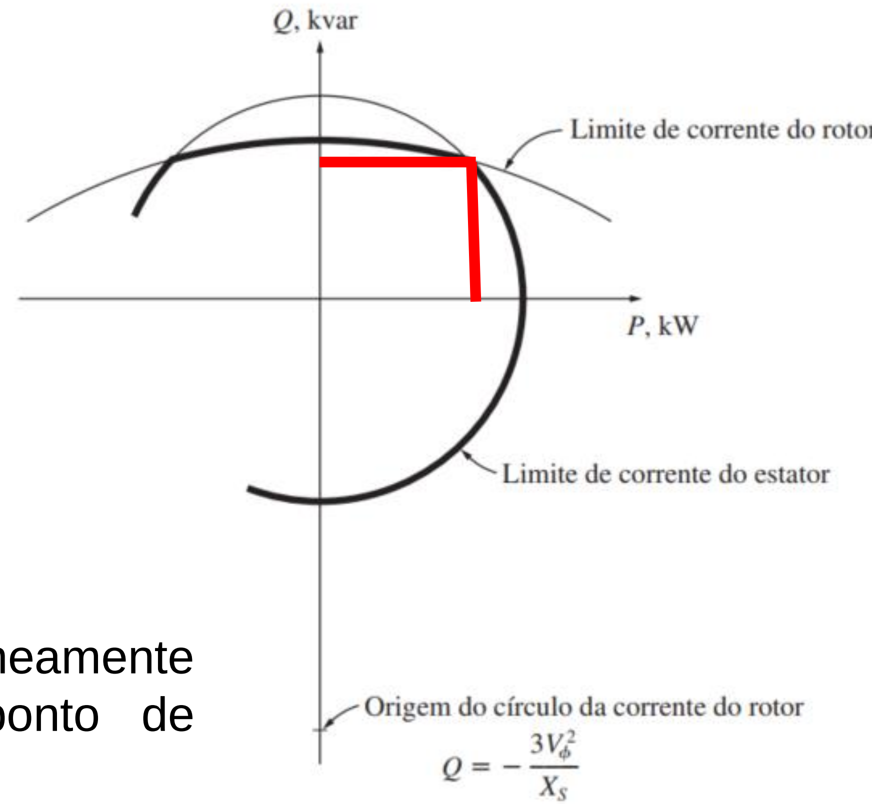
Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

Especificações Nominais

- Intersecção entre círculos
  - Fornece a potência nominal da máquina e fator de potência.

$$S_n = \sqrt{P_{op}^2 + Q_{op}^2}$$

$$FP_{nom} = \frac{P_{op}}{S_n}$$



Qualquer ponto que estiver simultaneamente dentro desses dois círculos é um ponto de operação seguro para o gerador

Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

Exemplo 4

Um gerador síncrono tem especificações nominais de 13,8 kV, 150 MVA, 0,9 de fator de potência (FP) com uma reatância síncrona de 1,18 p.u. e CCAV = 680 A. Sabendo que o fator de potência nominal do gerador é determinado pela intersecção das curvas-limites de aquecimento da armadura e do campo, calcule a corrente de campo máxima que pode ser fornecida ao gerador sem ultrapassar o limite de aquecimento do campo.

Exemplo 4

Um gerador síncrono tem especificações nominais de 13,8 kV, 150 MVA, 0,9 de fator de potência (FP) com uma reatância síncrona de 1,18 p.u. e CCAV = 680 A. Sabendo que o fator de potência nominal do gerador é determinado pela intersecção das curvas-limites de aquecimento da armadura e do campo, calcule a corrente de campo máxima que pode ser fornecida ao gerador sem ultrapassar o limite de aquecimento do campo.

No ponto em que o fator de potência é nominal, há tensão nominal e corrente nominal $V_a = 1,0$

$$I_a = 1,0\angle{-\arccos(0,9)} = 1,0\angle{-25,84^\circ}$$

$$\hat{E}_{af} = 1,0 + j1,18 \cdot 1,0\angle{-25,84^\circ}$$

$$\hat{E}_{af} = 1,0 + 1,18\angle{64,16^\circ} = 1,514 + j1,062$$

$$\hat{E}_{af} = 1,85\angle{35,04^\circ}$$

Exemplo 4

Um gerador síncrono tem especificações nominais de 13,8 kV, 150 MVA, 0,9 de fator de potência (FP) com uma reatância síncrona de 1,18 p.u. e CCAV = 680 A. Sabendo que o fator de potência nominal do gerador é determinado pela intersecção das curvas-limites de aquecimento da armadura e do campo, calcule a corrente de campo máxima que pode ser fornecida ao gerador sem ultrapassar o limite de aquecimento do campo.

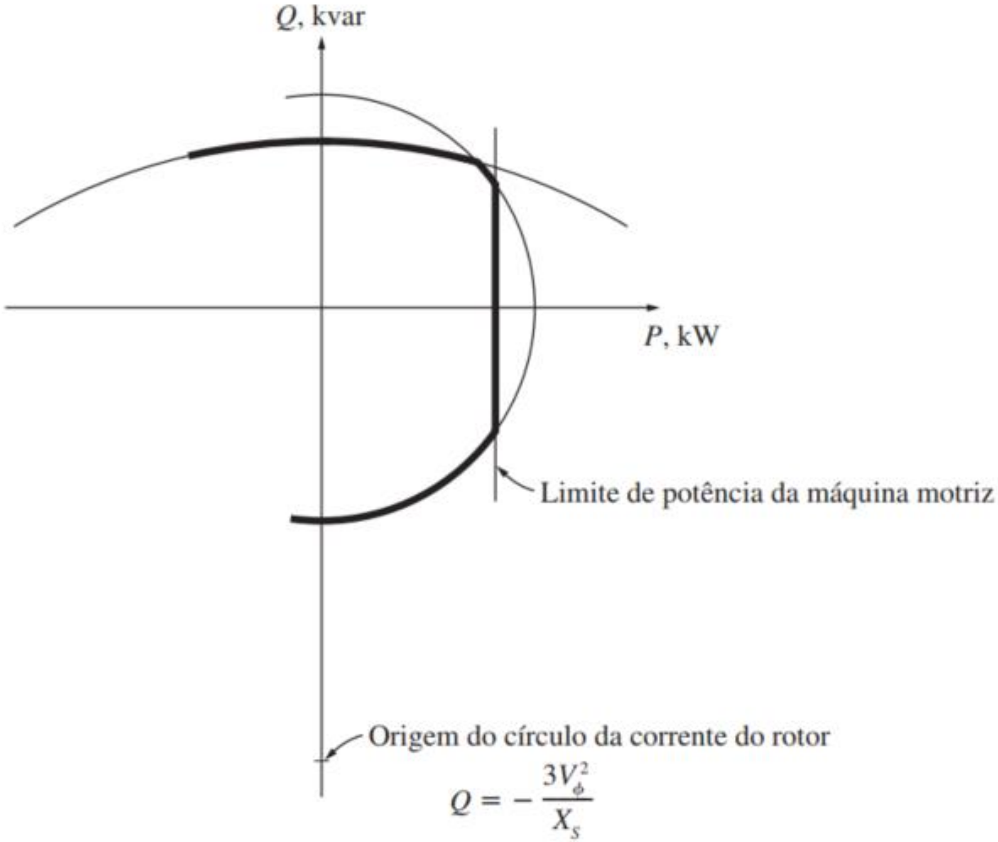
$$\hat{E}_{af} = 1,85\underline{\left|35,04^\circ\right.}$$

Baseado nos dados nominais da máquina, o limite de corrente de campo ocorre 1,85 vezes a CCAV, isto é:

$$I_f = 1,85 \cdot 680 = 1258 \text{ A}$$

Especificações Nominais

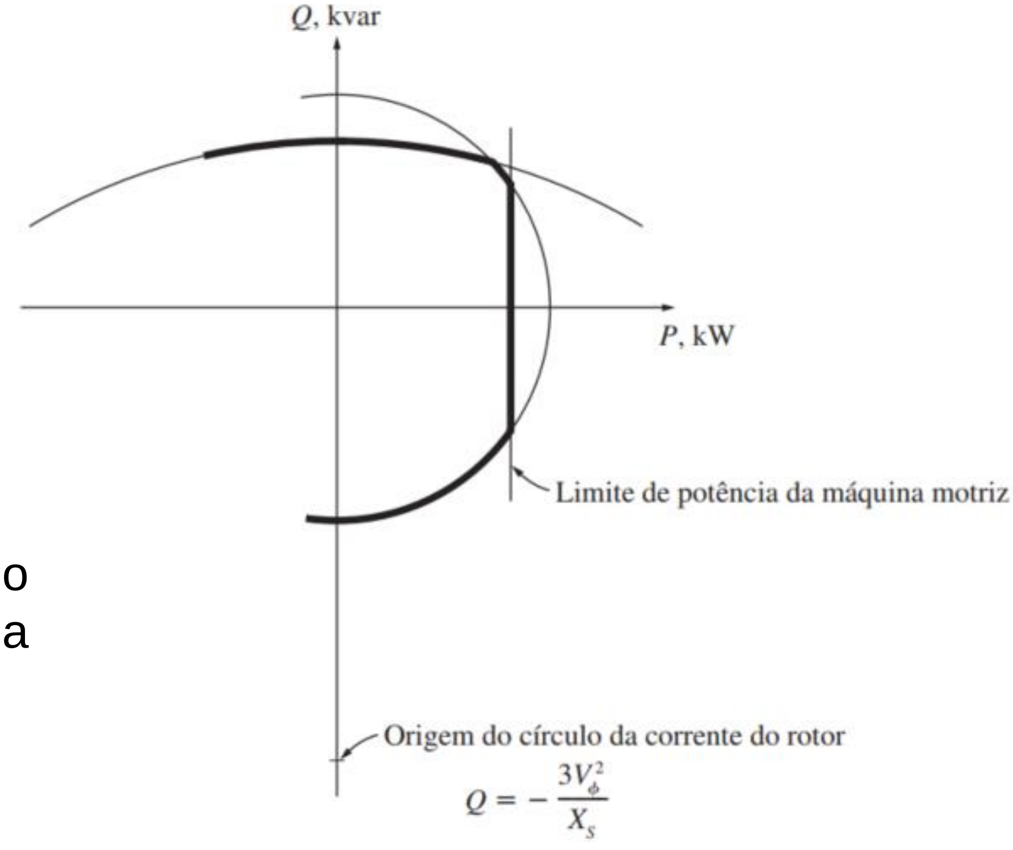
- Outros tipos de restrição
  - Restrição na potência da máquina motriz



Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

Especificações Nominais

- Outros tipos de restrição
  - Restrição na potência da máquina motriz



Outro tipo de restrição: restrição no limite de estabilidade estática da máquina:
Não apresentado neste trabalho

Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

Avaliação G

Um gerador síncrono de 480 V, 50 Hz, ligado em Y e de seis polos tem uma especificação nominal de 50 kVA, com FP 0,8 atrasado. Sua reatância síncrona é 1,0 Ω por fase. Assuma que esse gerador está ligado a uma turbina a vapor, capaz de fornecer até 45 kW. As perdas por atrito e ventilação são 1,5 kW e as perdas no núcleo são 1,0 kW.

(A) Construa a curva de capacidade desse gerador, sem o limite de potência da máquina motriz.

(B) Construa a curva de capacidade desse gerador, incluindo o limite de potência da máquina motriz.

FIM DO MÓDULO III – PARTE 2

Avaliação

A ser descrito pelo professor/instrutor na plataforma SIGAA/UFERSA