

Conversão Eletromecânica de Energia II

Prof. Victor Aguiar

Módulo III – Geradores Síncronos

Parte 1



Introdução

■ Aspectos na geração

$$E_a^{RMS} = 4,443 \cdot K_{enr} \cdot N_{fase} \cdot \phi_P \cdot f_e$$

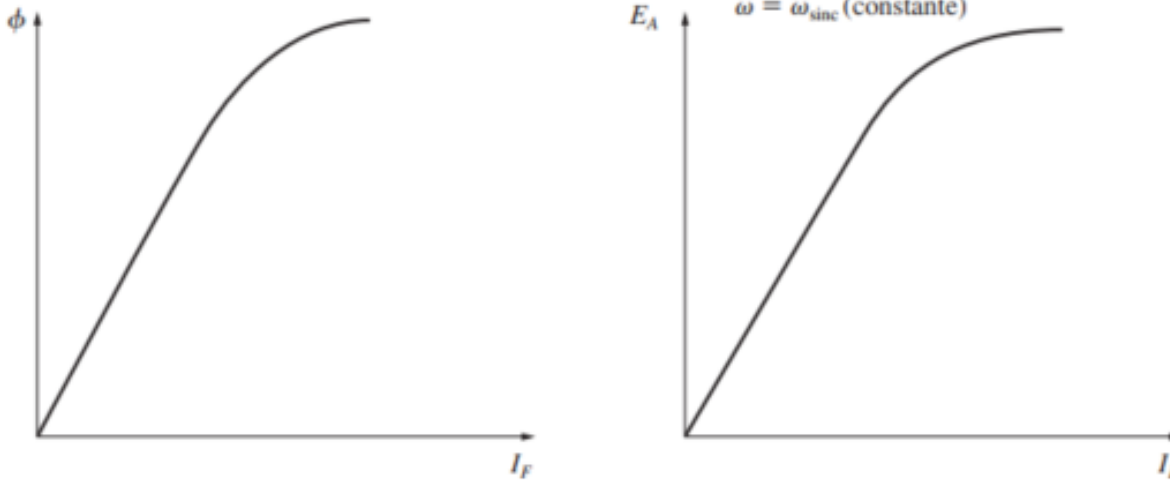
■ Amplitude da tensão gerada

- Proporcional a corrente de campo e a frequência elétrica

Introdução

■ Aspectos na geração

$$E_a^{RMS} = 4,443 \cdot K_{enr} \cdot N_{fase} \cdot \phi_P \cdot f_e$$



■ Amplitude da tensão gerada

- Proporcional a corrente de campo e a frequência elétrica

Introdução

■ Aspectos na geração

$$f_e = \left(\frac{P}{2}\right) \left(\frac{n}{60}\right) \longrightarrow E_a^{RMS} = 4,443 \cdot K_{enr} \cdot N_{fase} \cdot \phi_P \cdot f_e$$

■ Amplitude da tensão gerada

- Proporcional a corrente de campo e a frequência elétrica

Introdução

■ Aspectos na geração

$$f_e = \left(\frac{P}{2}\right) \left(\frac{n}{60}\right) \longrightarrow E_a^{RMS} = 4,443 \cdot K_{enr} \cdot N_{fase} \cdot \phi_P \cdot f_e$$

$$\phi_P = \left(\frac{2}{P}\right) \cdot 2B_{pico} \cdot l \cdot r$$

■ Amplitude da tensão gerada

- Proporcional a corrente de campo e a frequência elétrica

Introdução

■ Aspectos na geração

$$f_e = \left(\frac{P}{2}\right) \left(\frac{n}{60}\right) \rightarrow E_a^{RMS} = 4,443 \cdot K_{enr} \cdot N_{fase} \cdot \phi_P \cdot f_e$$
$$\phi_P = \left(\frac{2}{P}\right) \cdot 2B_{pico} \cdot l \cdot r \leftarrow B_{pico} = \frac{4\mu_0}{\pi g} \left(\frac{K_f N_f}{P}\right) I_f$$

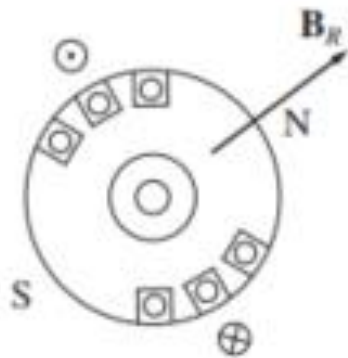
■ Amplitude da tensão gerada

- Proporcional a corrente de campo e a frequência elétrica

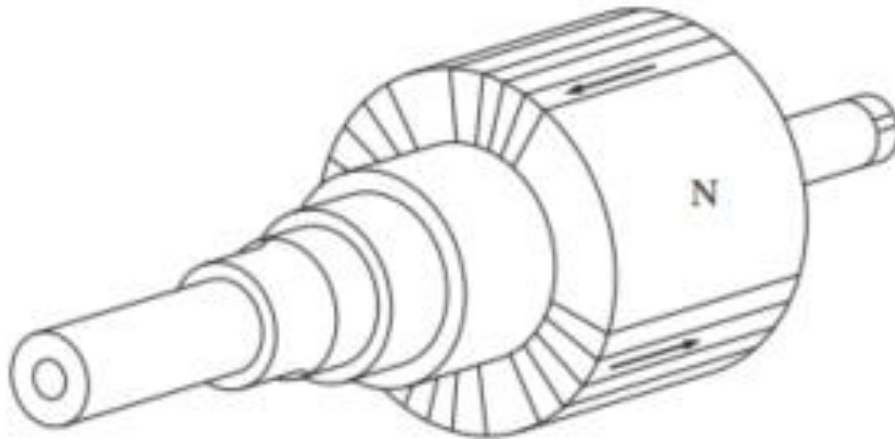
Aspectos Construtivos

■ Tipos de rotor

- Polos não saliente – polos lisos ou cilíndricos



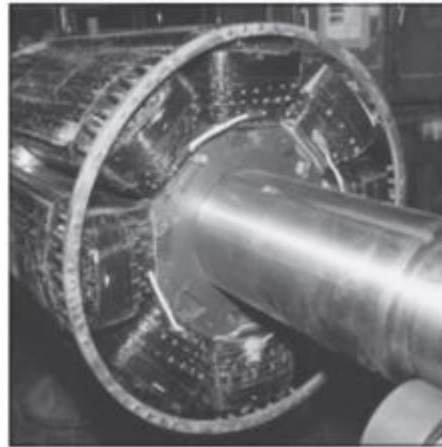
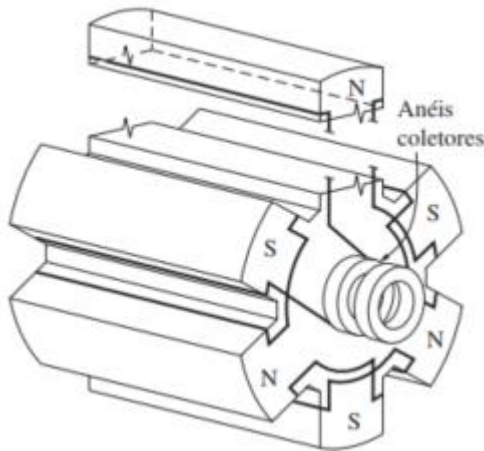
Vista frontal



Vista lateral

Aspectos Construtivos

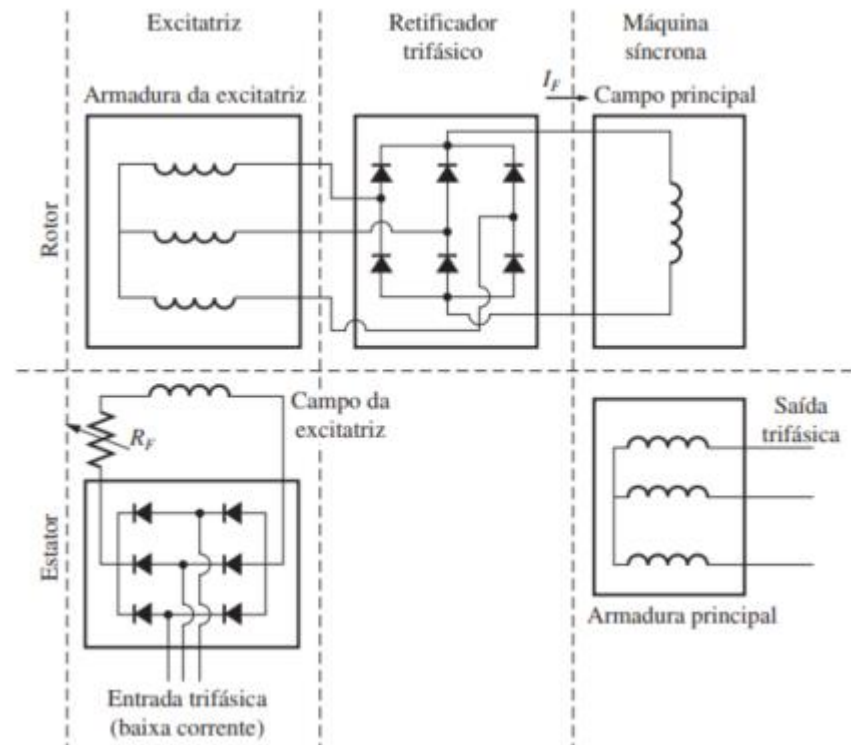
- Tipos de rotor
 - Polos salientes



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

Aspectos Construtivos

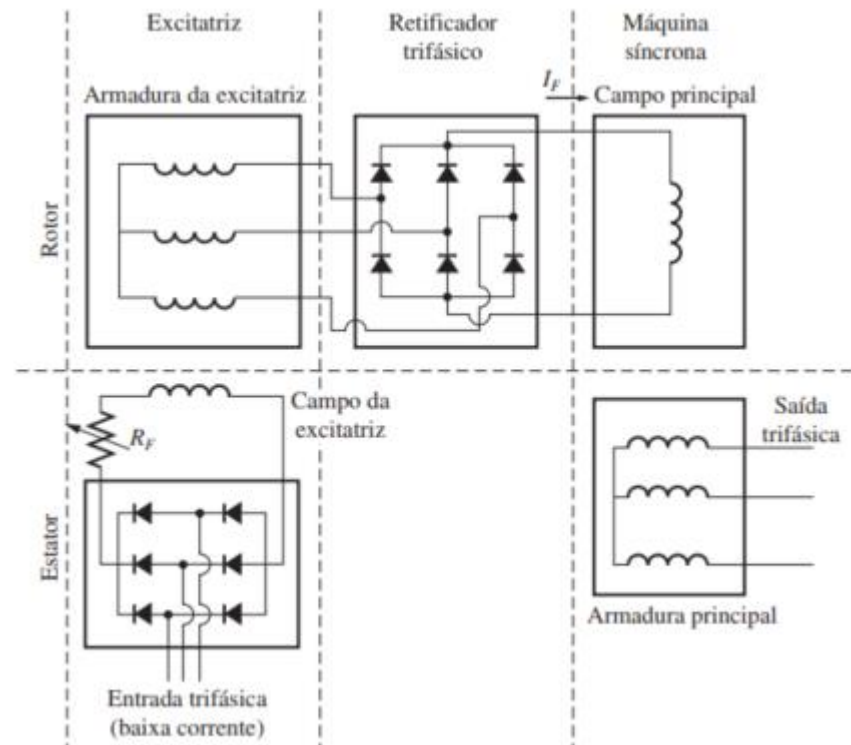
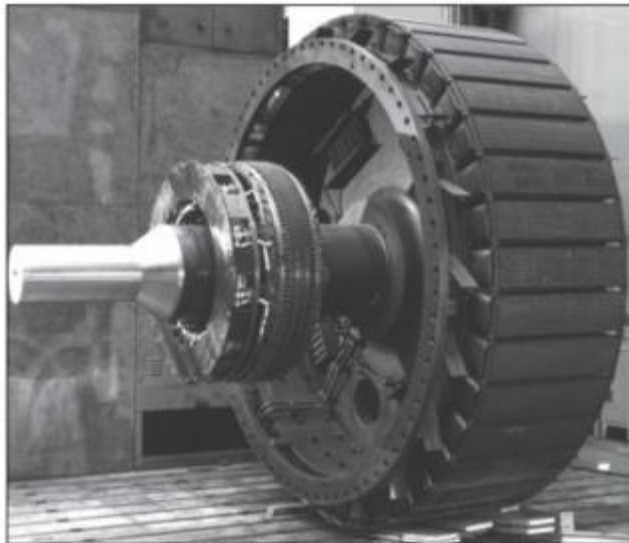
- Fornecimento de potência CC ao rotor
 - Fonte CC externa – por meio de escovas e anéis
 - Fonte CC especial – montada diretamente no eixo do gerador síncrono



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

Aspectos Construtivos

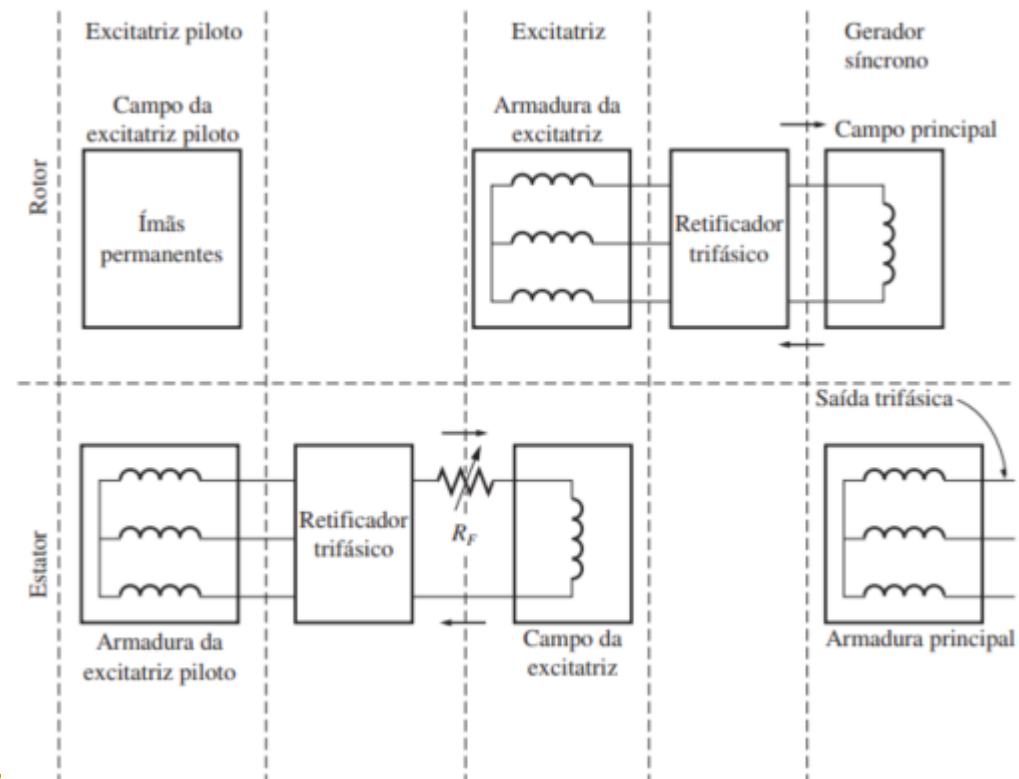
- Fornecimento de potência CC ao rotor
 - Fonte CC externa – por meio de escovas e anéis
 - Fonte CC especial – montada diretamente no eixo do gerador síncrono



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

Aspectos Construtivos

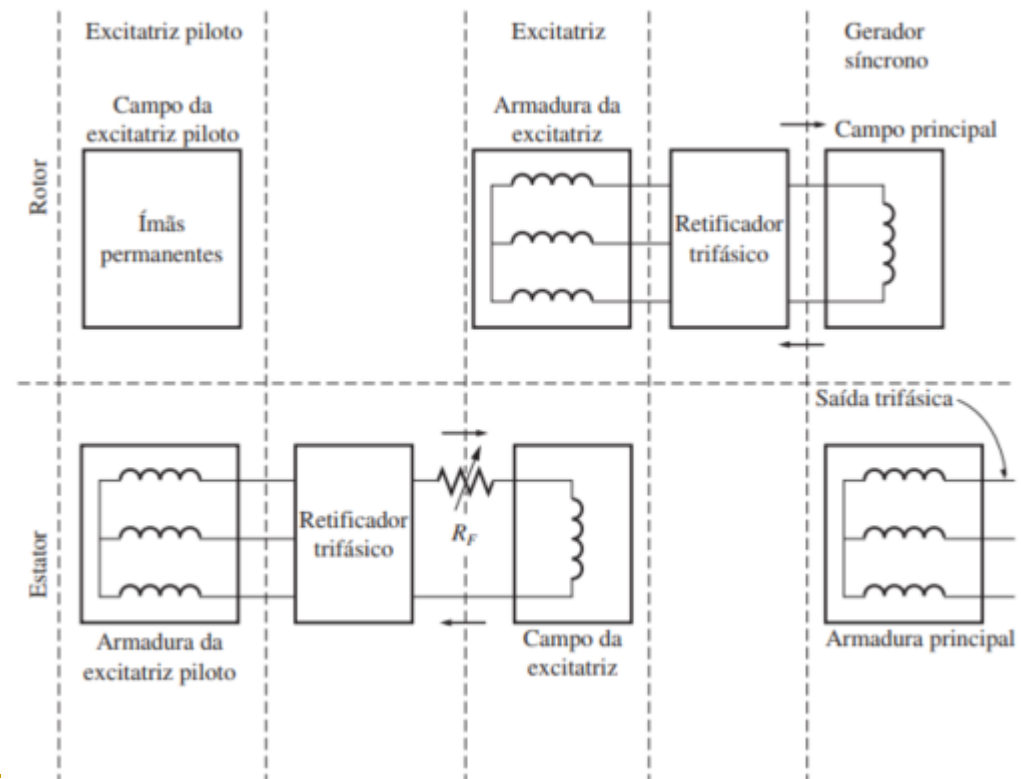
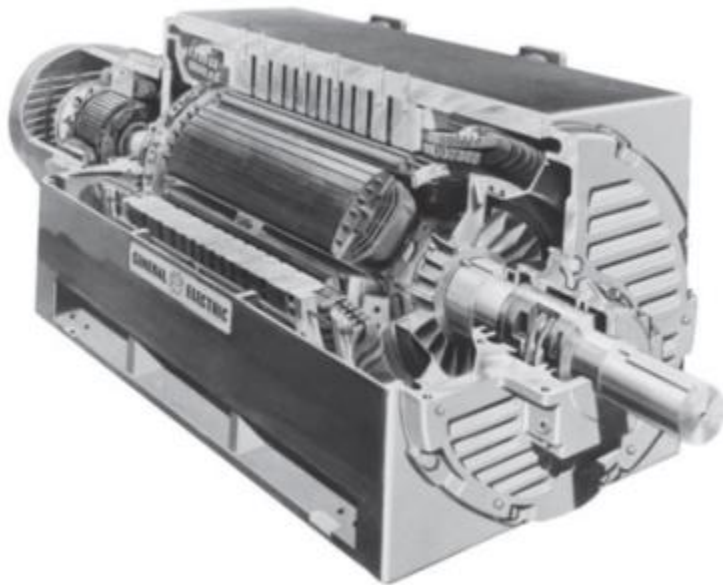
- Fornecimento de potência CC ao rotor
 - Fonte CC externa – por meio de escovas e anéis
 - Fonte CC especial – montada diretamente no eixo do gerador síncrono



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

Aspectos Construtivos

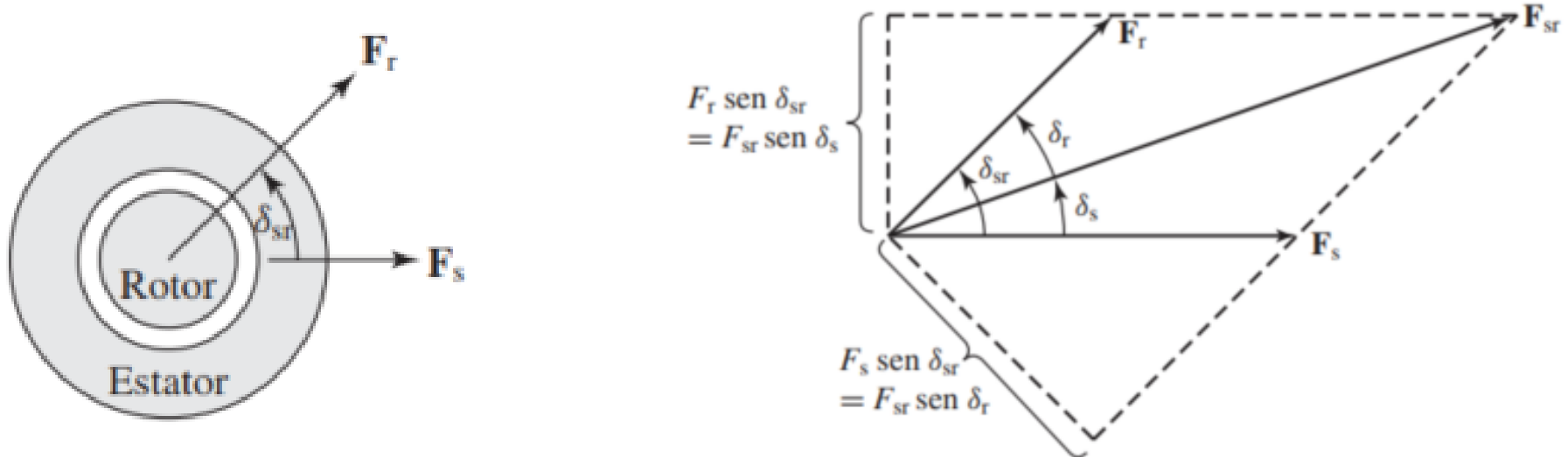
- Fornecimento de potência CC ao rotor
 - Fonte CC externa – por meio de escovas e anéis
 - Fonte CC especial – montada diretamente no eixo do gerador síncrono



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

Conceitos Introdutórios

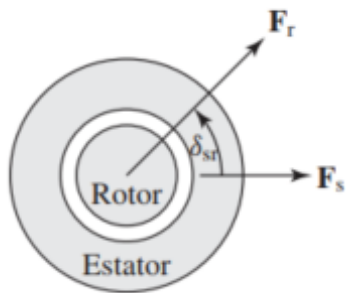
- Geração de torque a partir dos campos magnéticos interatuantes



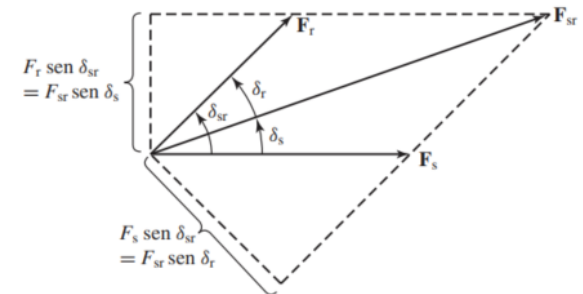
Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed.
Porto Alegre: AMGH, 2014.

Conceitos Introdutórios

- Geração de torque a partir dos campos magnéticos interatuantes



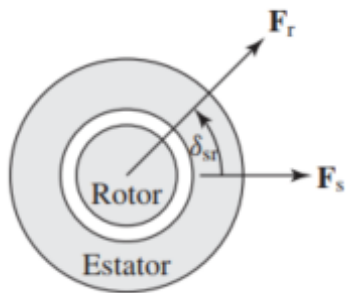
$$2 \cdot H_g \cdot g = F_{sr} \rightarrow H_g^{pico} = \frac{F_{sr}}{2g}$$



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

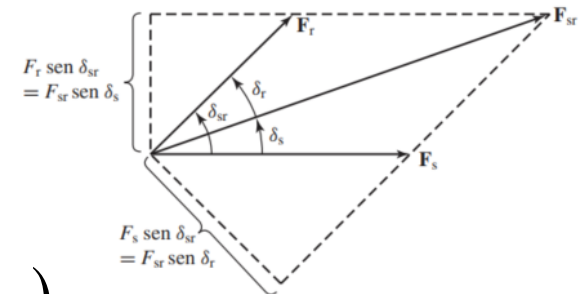
Conceitos Introdutórios

- Geração de torque a partir dos campos magnéticos interatuantes



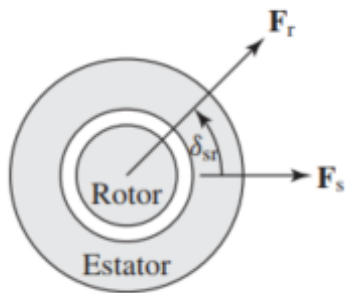
$$2 \cdot H_g \cdot g = F_{sr} \rightarrow H_g^{pico} = \frac{F_{sr}}{2g}$$

$$F_{sr}^2 = F_s^2 + F_r^2 + 2F_s F_r \cos(\delta_{sr})$$



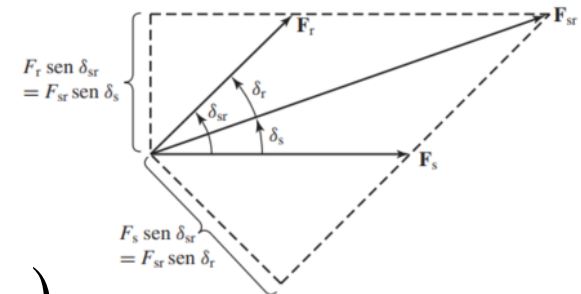
Conceitos Introdutórios

- Geração de torque a partir dos campos magnéticos interatuantes



$$2 \cdot H_g \cdot g = F_{sr} \rightarrow H_g^{pico} = \frac{F_{sr}}{2g}$$

$$F_{sr}^2 = F_s^2 + F_r^2 + 2F_s F_r \cos(\delta_{sr})$$



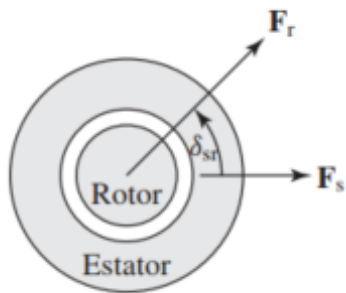
Densidade de coenergia

$$W'_{densidade} = \mu_0 \cdot \frac{(H_g^{pico})^2}{2} = \frac{\mu_0}{4} \cdot \left(\frac{F_{sr}}{g} \right)^2$$

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

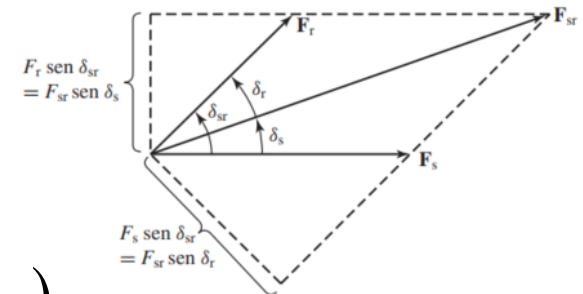
Conceitos Introdutórios

- Geração de torque a partir dos campos magnéticos interatuantes



$$2 \cdot H_g \cdot g = F_{sr} \rightarrow H_g^{pico} = \frac{F_{sr}}{2g}$$

$$F_{sr}^2 = F_s^2 + F_r^2 + 2F_s F_r \cos(\delta_{sr})$$



Densidade de coenergia

$$W'_{densidade} = \mu_0 \cdot \frac{(H_g^{pico})^2}{2} = \frac{\mu_0}{4} \cdot \left(\frac{F_{sr}}{g} \right)^2$$

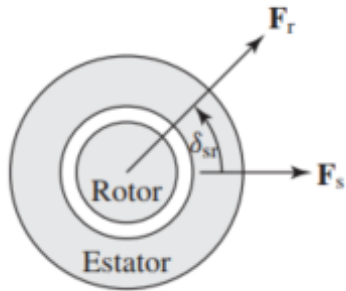
Coenergia

$$W' = \frac{\mu_0}{4} \cdot \left(\frac{F_{sr}}{g} \right)^2 \pi \cdot D \cdot l \cdot g = \frac{\mu_0 \pi D l}{4g} F_{sr}^2$$

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

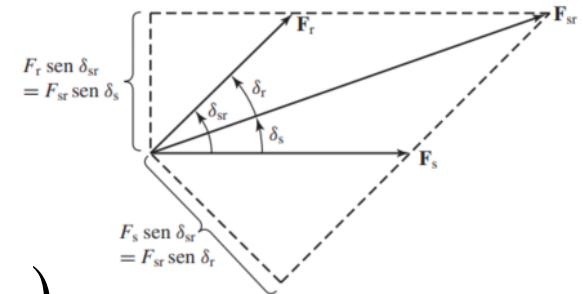
Conceitos Introdutórios

- Geração de torque a partir dos campos magnéticos interatuantes



$$2 \cdot H_g \cdot g = F_{sr} \rightarrow H_g^{pico} = \frac{F_{sr}}{2g}$$

$$F_{sr}^2 = F_s^2 + F_r^2 + 2F_s F_r \cos(\delta_{sr})$$



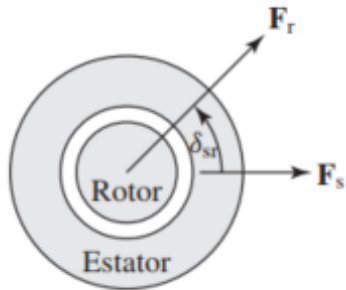
Coenergia

$$W' = \frac{\mu_0 \pi D l}{4g} \left[F_s^2 + F_r^2 + 2F_s F_r \cos(\delta_{sr}) \right]$$

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

Conceitos Introdutórios

- Geração de torque a partir dos campos magnéticos interatuantes



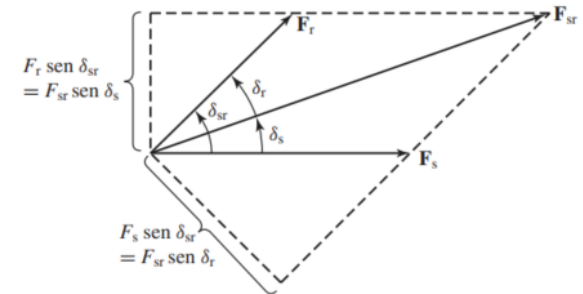
$$2 \cdot H_g \cdot g = F_{sr} \rightarrow H_g^{pico} = \frac{F_{sr}}{2g}$$

Coenergia

$$W' = \frac{\mu_0 \pi D l}{4g} \left[F_s^2 + F_r^2 + 2F_s F_r \cos(\delta_{sr}) \right]$$

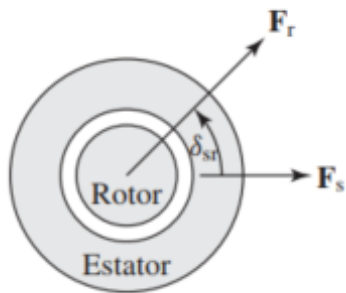
Torque:

$$T = \left. \frac{\partial W'}{\partial \delta_{sr}} \right|_{F_s = F_r = cte.} = - \frac{\mu_0 \pi D l}{2g} F_s F_r \sin(\delta_{sr})$$



Conceitos Introdutórios

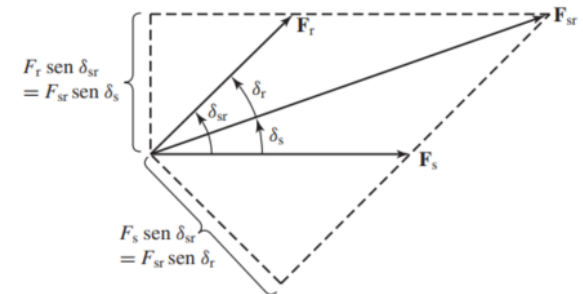
- Geração de torque a partir dos campos magnéticos interatuantes



$$2 \cdot H_g \cdot g = F_{sr} \rightarrow H_g^{pico} = \frac{F_{sr}}{2g}$$

Coenergia

$$W' = \frac{\mu_0 \pi D l}{4g} \left[F_s^2 + F_r^2 + 2F_s F_r \cos(\delta_{sr}) \right]$$



Máquinas de múltiplos polos:

$$T = \left(\frac{P}{2} \right) \left(\frac{\mu_0 \pi D l}{2g} \right) F_s F_r \sin(\delta_{sr})$$

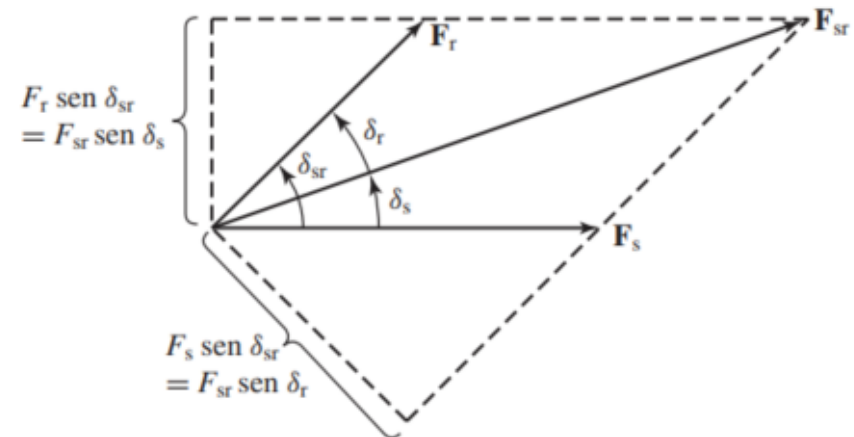
Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed.
Porto Alegre: AMGH, 2014.

Conceitos Introdutórios

- Geração de torque a partir dos campos magnéticos interatuantes

Torque em função do campo e da armadura:

$$T = \left(\frac{P}{2} \right) \left(\frac{\mu_0 \pi D l}{2g} \right) F_f F_a \sin(\delta_{af})$$



$$T = \left(\frac{P}{2} \right) \left(\frac{\mu_0 \pi D l}{2g} \right) F_R F_f \sin(\delta_f)$$

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

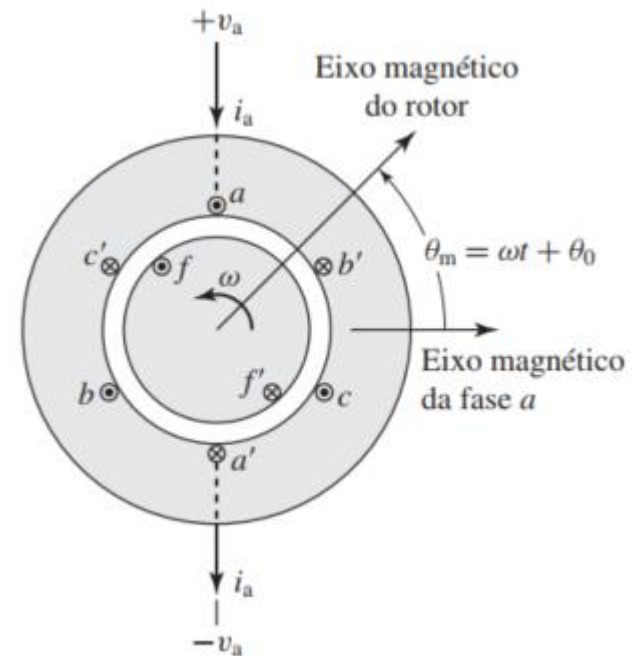
Conceitos Introdutórios

■ Geração de torque a partir dos campos magnéticos interatuantes

Torque em função do campo e da resultante:

$$T = \left(\frac{P}{2}\right) \left(\frac{\mu_0 \pi D l}{2g}\right) F_R F_f \sin(\delta_f)$$

$$\phi_R = \left(\frac{2}{P}\right) \cdot 2B_R \cdot l \cdot r \rightarrow \phi_R = \left(\frac{2Dl}{P}\right) \cdot B_R \rightarrow B_R = \mu_0 \frac{F_R}{g}$$



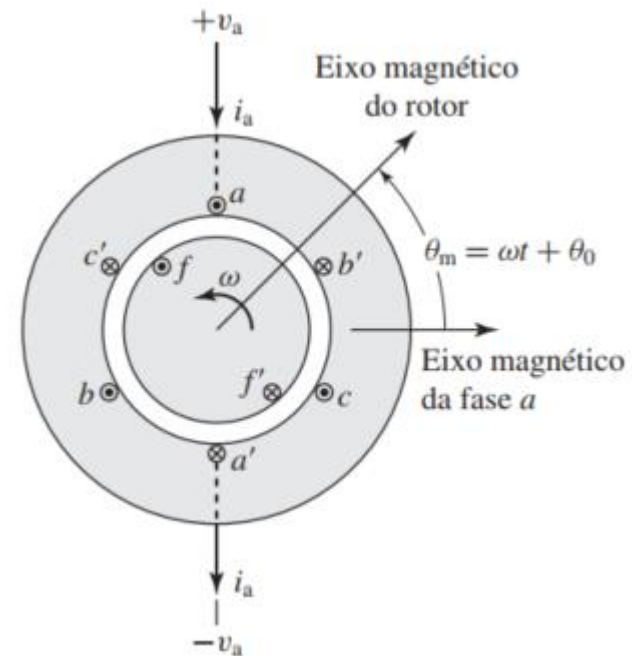
Conceitos Introdutórios

■ Geração de torque a partir dos campos magnéticos interatuantes

Torque em função do campo e da resultante:

$$T = \left(\frac{P}{2} \right) \left(\frac{\mu_0 \pi D l}{2g} \right) F_R F_f \sin(\delta_f)$$

$$\phi_R = \left(\frac{\mu_0 D l}{g \cdot P/2} \right) F_R$$



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

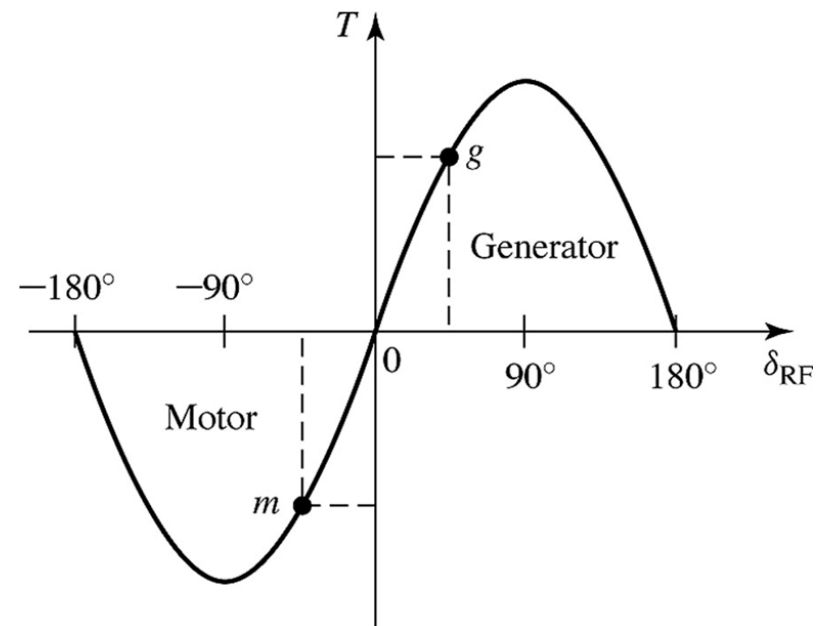
Conceitos Introdutórios

■ Funcionamento e Simbologia

- Geração de torque a partir dos campos magnéticos interatuantes

Torque em função do campo e da resultante:

$$T = \left(\frac{P}{2}\right)^2 \left(\frac{\pi}{2}\right) \phi_R F_f \text{sen}(\delta_{Rf})$$



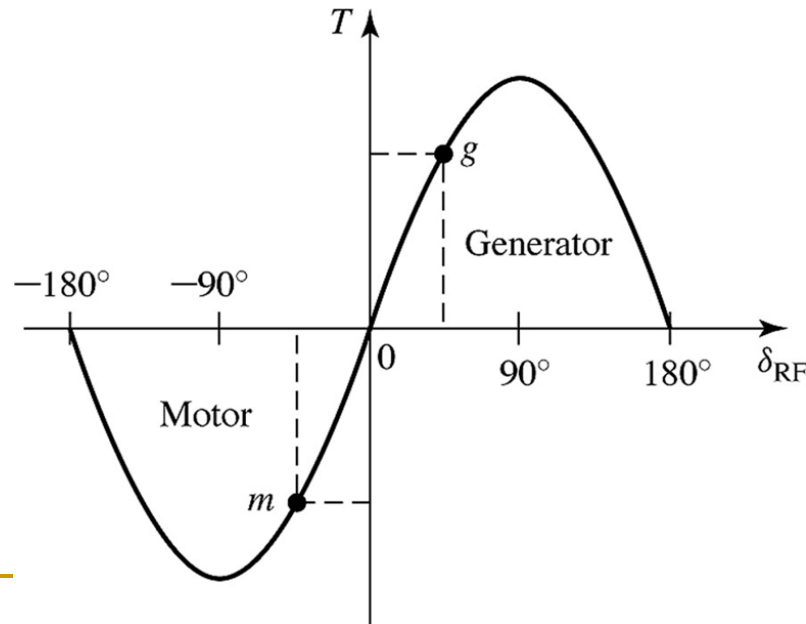
Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed.
Porto Alegre: AMGH, 2014.

Conceitos Introdutórios

■ Conjugado na geração

□ Máquina primária

- Controle da quantidade de potência mecânica disponível no eixo do gerador
- Conjugado eletromagnético contrabalança o conjugado no eixo



$$T = \frac{P}{2} \left(\frac{\pi}{2} \right) \phi_P \cdot F_f \cdot \text{sen}(\delta_{Pf})$$

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

Conceitos Introdutórios

■ Conjugado na geração

□ Dinâmica

- Aumento no conjugado da máquina primária
- Aumento do ângulo eletromagnético
- Contrabalanço entre o conjugado eletromagnético e mecânico

□ Transitório de ajustamento

- Variação na velocidade mecânica
- Oscilação mecânica amortecida do rotor
- Podem ocorrer alterações na densidade de fluxo resultante e na amplitude da onda de FMM do enrolamento de campo

Conceitos Introdutórios

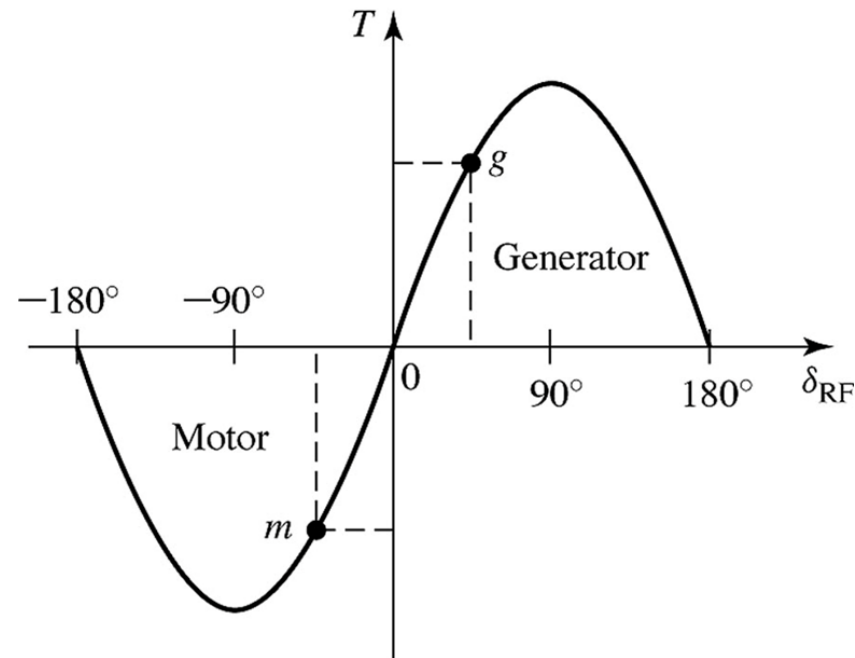
■ Características do conjugado da máquina

□ Quando o ângulo eletromagnético é de 90°

■ Valor máximo – Conjugado máximo em sincronismo

1) Aumento adicional de conjugado da máquina primária não será contrabalanceado pelo aumento de conjugado eletromagnético

2) Aceleração do rotor – **Perda de sincronismo**



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

Conceitos Introdutórios

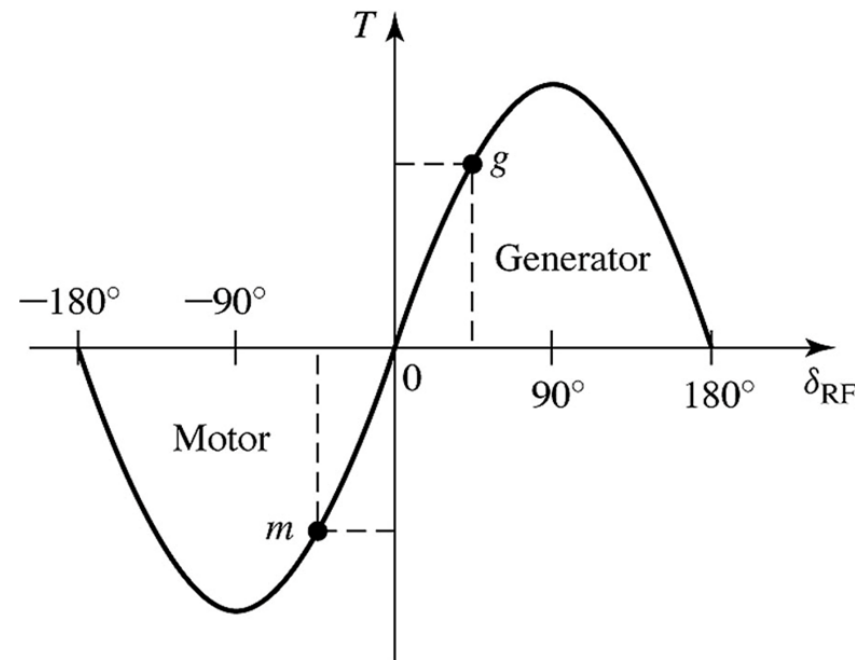
■ Características do conjugado da máquina

□ Esse aumento de corrente não é ilimitado, em operação

- Limite da capacidade de refrigeração do enrolamento de campo

1) Aumento do fluxo resultante de entreferro – Limite: Saturação do ferro da máquina

2) Controla-se esse valor máximo de conjugado a partir da **corrente de enrolamento** ou do fluxo resultante de entreferro



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

Conceitos Introdutórios

■ Características do conjugado no motor

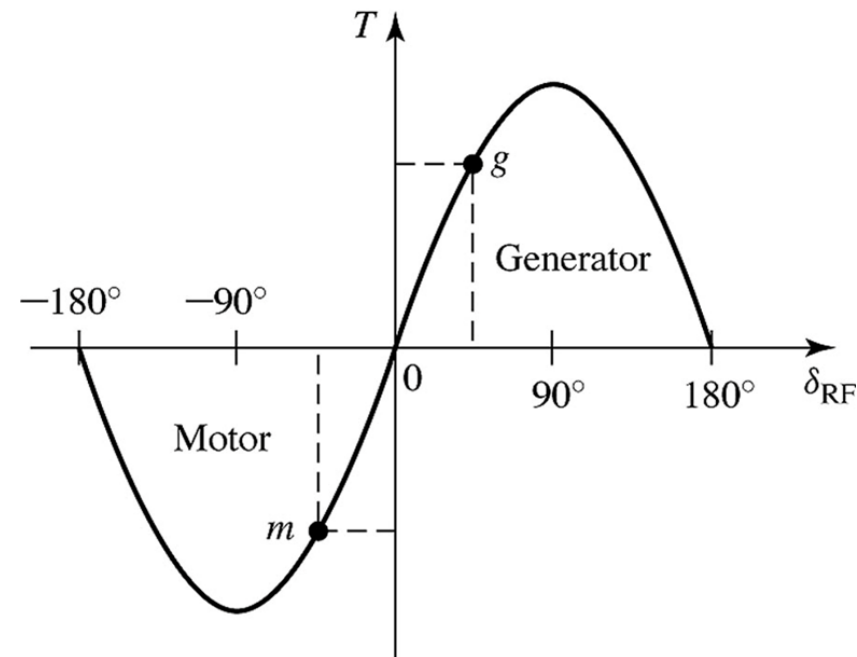
□ Aumento de conjugado de carga

■ Além do conjugado máximo de sincronismo

1) Perda de sincronismo, e o rotor desacelera, freia

2) Partida – Só há função motor na velocidade síncrona

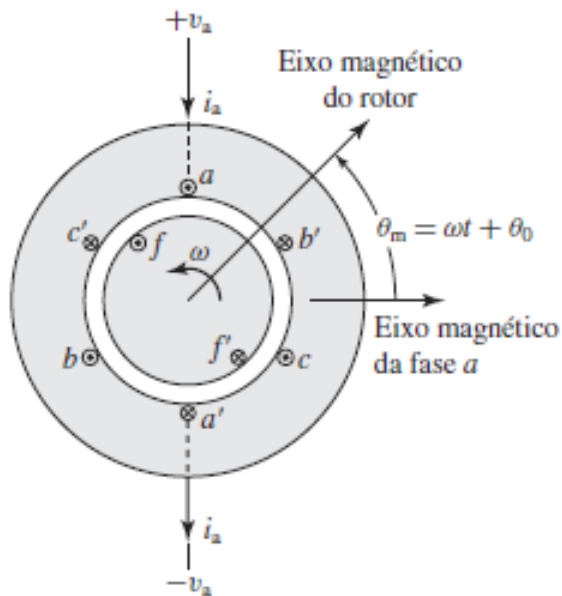
3) É necessária uma técnica de partida



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

Indutâncias na Máquina Síncrona

■ Máquina elementar de 2 pólos



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

$$\lambda_a = \ell_{aa}i_a + \ell_{ab}i_b + \ell_{ac}i_c + \ell_{af}i_f$$

$$\lambda_b = \ell_{ba}i_a + \ell_{bb}i_b + \ell_{bc}i_c + \ell_{bf}i_f$$

$$\lambda_c = \ell_{ca}i_a + \ell_{cb}i_b + \ell_{cc}i_c + \ell_{cf}i_f$$

$$\lambda_f = \ell_{fa}i_a + \ell_{fb}i_b + \ell_{fc}i_c + \ell_{ff}i_f$$

Indutâncias na Máquina Síncrona

■ Indutância própria do rotor

$$\ell_{ff} = L_{ff} = L_{ff0} + L_{fl}$$

- Indutâncias próprias não apresentam variação com o deslocamento angular do rotor
- Composta por:
 - Componente fundamental espacial do fluxo no entreferro – Indutância própria do enrolamento de campo – L_{ff0} .
 - Componente responsável pelo fluxo dispersivo do enrolamento de campo – Indutância de dispersão do enrolamento – L_{fl} .

Indutâncias na Máquina Síncrona

- Indutância mútua entre estator e rotor

$$\ell_{af} = \ell_{fa} = L_{af} \cdot \cos\left(\frac{P}{2} \theta_m\right)$$

- Indutância mútua apresenta variação com o deslocamento angular do rotor

$$\theta_m = \omega_m t + \delta_0 \qquad \left(\frac{P}{2}\right) \theta_m = \omega_e t + \delta'_0$$

$$\ell_{af} = \ell_{fa} = L_{af} \cdot \cos\left(\omega_e t + \delta'_0\right)$$

Indutâncias na Máquina Síncrona

■ Indutâncias do estator

□ Indutância própria do estator

$$\ell_{aa} = \ell_{bb} = \ell_{cc} = L_{aa} = L_{aa0} + L_{al}$$

- Definições das componentes igual a definição realizada para o enrolamento de campo

□ Fluxo mútuo depende exclusivamente

- Fluxo fundamental espacial do entreferro

□ Indutância mútua entre enrolamentos do estator

$$\ell_{ab} = \ell_{ba} = \ell_{ac} = \ell_{ca} = \ell_{bc} = \ell_{cb} = L_{aa0} \cdot \cos(\pm 120^\circ) = -\frac{1}{2} L_{aa0}$$

Indutâncias na Máquina Síncrona

- Indutâncias do estator

- Indutância síncrona

$$\lambda_a = \ell_{aa}i_a + \ell_{ab}i_b + \ell_{ac}i_c + \ell_{af}i_f$$

Indutâncias na Máquina Síncrona

■ Indutâncias do estator

□ Indutância síncrona

$$\lambda_a = \ell_{aa} i_a + \ell_{ab} i_b + \ell_{ac} i_c + \ell_{af} i_f$$

$$\lambda_a = (L_{aa0} + L_{al}) i_a - \frac{1}{2} L_{aa0} \cdot i_b - \frac{1}{2} L_{aa0} \cdot i_c + \ell_{af} \cdot i_f$$

Indutâncias na Máquina Síncrona

■ Indutâncias do estator

□ Indutância síncrona

$$\lambda_a = \ell_{aa} i_a + \ell_{ab} i_b + \ell_{ac} i_c + \ell_{af} i_f$$

$$\lambda_a = (L_{aa0} + L_{al}) i_a - \frac{1}{2} L_{aa0} \cdot i_b - \frac{1}{2} L_{aa0} \cdot i_c + \ell_{af} \cdot i_f$$

$$\lambda_a = (L_{aa0} + L_{al}) i_a - \frac{1}{2} L_{aa0} (i_b + i_c) + \ell_{af} \cdot i_f$$

Indutâncias na Máquina Síncrona

■ Indutâncias do estator

□ Indutância síncrona

$$\lambda_a = \ell_{aa} i_a + \ell_{ab} i_b + \ell_{ac} i_c + \ell_{af} i_f$$

$$\lambda_a = (L_{aa0} + L_{al}) i_a - \frac{1}{2} L_{aa0} \cdot i_b - \frac{1}{2} L_{aa0} \cdot i_c + \ell_{af} \cdot i_f$$

$$\lambda_a = (L_{aa0} + L_{al}) i_a - \frac{1}{2} L_{aa0} (i_b + i_c) + \ell_{af} \cdot i_f$$

$$i_a + i_b + i_c = 0 \rightarrow i_b + i_c = -i_a$$

Indutâncias na Máquina Síncrona

■ Indutâncias do estator

□ Indutância síncrona

$$i_a + i_b + i_c = 0 \rightarrow i_b + i_c = -i_a$$

$$\lambda_a = (L_{aa0} + L_{al})i_a + \frac{1}{2}L_{aa0} \cdot i_a + \ell_{af} \cdot i_f$$

Indutâncias na Máquina Síncrona

■ Indutâncias do estator

□ Indutância síncrona

$$i_a + i_b + i_c = 0 \rightarrow i_b + i_c = -i_a$$

$$\lambda_a = (L_{aa0} + L_{al})i_a + \frac{1}{2}L_{aa0} \cdot i_a + \ell_{af} \cdot i_f$$

$$\lambda_a = \left(\frac{3}{2}L_{aa0} + L_{al} \right) i_a + \ell_{af} \cdot i_f$$

Indutâncias na Máquina Síncrona

■ Indutâncias do estator

□ Indutância síncrona

$$i_a + i_b + i_c = 0 \rightarrow i_b + i_c = -i_a$$

$$\lambda_a = (L_{aa0} + L_{al})i_a + \frac{1}{2}L_{aa0} \cdot i_a + \ell_{af} \cdot i_f$$

$$\lambda_a = \left(\frac{3}{2}L_{aa0} + L_{al} \right) i_a + \ell_{af} \cdot i_f$$

$$L_s = \frac{3}{2} \cdot L_{aa0} + L_{al}$$

Indutância síncrona

Indutâncias na Máquina Síncrona

■ Indutâncias do estator

□ Indutância síncrona

$$i_a + i_b + i_c = 0 \rightarrow i_b + i_c = -i_a$$

$$\lambda_a = (L_{aa0} + L_{al})i_a + \frac{1}{2}L_{aa0} \cdot i_a + \ell_{af} \cdot i_f$$

$$\lambda_a = \left(\frac{3}{2}L_{aa0} + L_{al} \right) i_a + \ell_{af} \cdot i_f$$

$$L_s = \frac{3}{2} \cdot L_{aa0} + L_{al}$$

Indutância síncrona

$$\lambda_a = L_s \cdot i_a + \ell_{af} \cdot i_f$$

Circuito Equivalente

■ Circuito Equivalente

- Tensão induzida no enrolamento de fase a

$$e_{af} = \frac{d}{dt}(\ell_{af} \cdot i_f) = \frac{d}{dt} \left[L_{af} \cdot \cos(\omega_e t + \delta'_0) \cdot i_f \right]$$

Circuito Equivalente

■ Circuito Equivalente

- Tensão induzida no enrolamento de fase a

$$e_{af} = \frac{d}{dt}(\ell_{af} \cdot i_f) = \frac{d}{dt} \left[L_{af} \cdot \cos(\omega_e t + \delta'_0) \cdot i_f \right]$$

$$e_{af} = \frac{d}{dt}(\ell_{af} \cdot i_f) = -\omega_e \cdot L_{af} \cdot I_f \cdot \text{sen}(\omega_e t + \delta'_0)$$

Circuito Equivalente

■ Circuito Equivalente

- Tensão induzida no enrolamento de fase a

$$e_{af} = \frac{d}{dt}(\ell_{af} \cdot i_f) = \frac{d}{dt} \left[L_{af} \cdot \cos(\omega_e t + \delta'_0) \cdot i_f \right]$$

$$e_{af} = \frac{d}{dt}(\ell_{af} \cdot i_f) = -\omega_e \cdot L_{af} \cdot I_f \cdot \text{sen}(\omega_e t + \delta'_0)$$

$$e_{af} = \frac{d}{dt}(\ell_{af} \cdot i_f) = \omega_e \cdot L_{af} \cdot I_f \cdot \text{sen}(-\omega_e t - \delta'_0)$$

Circuito Equivalente

■ Circuito Equivalente

- Tensão induzida no enrolamento de fase a

$$e_{af} = \frac{d}{dt}(\ell_{af} \cdot i_f) = \frac{d}{dt} \left[L_{af} \cdot \cos(\omega_e t + \delta'_0) \cdot i_f \right]$$

$$e_{af} = \frac{d}{dt}(\ell_{af} \cdot i_f) = -\omega_e \cdot L_{af} \cdot I_f \cdot \text{sen}(\omega_e t + \delta'_0)$$

$$e_{af} = \frac{d}{dt}(\ell_{af} \cdot i_f) = \omega_e \cdot L_{af} \cdot I_f \cdot \text{sen}(-\omega_e t - \delta'_0)$$

$$e_{af} = \frac{d}{dt}(\ell_{af} \cdot i_f) = \omega_e \cdot L_{af} \cdot I_f \cdot \cos \left[\frac{\pi}{2} - (-\omega_e t - \delta'_0) \right]$$

Circuito Equivalente

■ Circuito Equivalente

- Tensão induzida no enrolamento de fase a

$$e_{af} = \frac{d}{dt}(\ell_{af} \cdot i_f) = \omega_e \cdot L_{af} \cdot I_f \cdot \cos\left[\frac{\pi}{2} + \omega_e t + \delta'_0\right]$$

Circuito Equivalente

■ Circuito Equivalente

- Tensão induzida no enrolamento de fase a

$$e_{af} = \frac{d}{dt}(\ell_{af} \cdot i_f) = \omega_e \cdot L_{af} \cdot I_f \cdot \cos\left[\frac{\pi}{2} + \omega_e t + \delta'_0\right]$$

$$e_{af} = \frac{d}{dt}(\ell_{af} \cdot i_f) = \omega_e \cdot L_{af} \cdot I_f \cdot \cos\left[\omega_e t + \left(\frac{\pi}{2} + \delta'_0\right)\right]$$

Circuito Equivalente

■ Circuito Equivalente

□ Tensão induzida no enrolamento de fase a

$$e_{af} = \frac{d}{dt}(\ell_{af} \cdot i_f) = \omega_e \cdot L_{af} \cdot I_f \cdot \cos\left[\frac{\pi}{2} + \omega_e t + \delta'_0\right]$$

$$e_{af} = \frac{d}{dt}(\ell_{af} \cdot i_f) = \omega_e \cdot L_{af} \cdot I_f \cdot \cos\left[\omega_e t + \left(\frac{\pi}{2} + \delta'_0\right)\right]$$

$$\hat{E}_{af} = \frac{\omega_e \cdot L_{af} \cdot I_f}{\sqrt{2}} \left| \frac{\pi}{2} + \delta'_0 \right|$$

Recomenda-se a partida desta máquina com o rotor alinhado ao eixo preferencial de magnetização

Circuito Equivalente

■ Circuito Equivalente

- Tensão induzida no enrolamento de fase a

$$E_{af} = \frac{\omega_e \cdot L_{af} \cdot I_f}{\sqrt{2}}$$

O ângulo da tensão induzida é arbitrário, visto que é uma constante, mas a tensão induzida eficaz é dada pela expressão acima

Circuito Equivalente

■ Circuito Equivalente

- Tensão induzida no enrolamento de fase a

$$E_{af} = \frac{\omega_e \cdot L_{af} \cdot I_f}{\sqrt{2}}$$

O ângulo da tensão induzida é arbitrário, visto que é uma constante, mas a tensão induzida eficaz é dada pela expressão acima

$$v_a = R_a i_a + \frac{d\lambda_a}{dt}$$


Circuito Equivalente

■ Circuito Equivalente

- Tensão induzida no enrolamento de fase a

$$E_{af} = \frac{\omega_e \cdot L_{af} \cdot I_f}{\sqrt{2}}$$


O ângulo da tensão induzida é arbitrário, visto que é uma constante, mas a tensão induzida eficaz é dada pela expressão acima

$$v_a = R_a i_a + \frac{d\lambda_a}{dt} \quad \longrightarrow \quad v_a = R_a i_a + \frac{d(L_s \cdot i_a + \ell_{af} \cdot i_f)}{dt}$$

Circuito Equivalente

■ Circuito Equivalente

- Tensão induzida no enrolamento de fase a

$$v_a = R_a i_a + \frac{d(L_s \cdot i_a)}{dt} + \frac{d(\ell_{af} \cdot i_f)}{dt}$$


Circuito Equivalente

■ Circuito Equivalente

- Tensão induzida no enrolamento de fase a

$$v_a = R_a i_a + \frac{d(L_s \cdot i_a)}{dt} + \frac{d(\ell_{af} \cdot i_f)}{dt} \quad \longrightarrow \quad v_a = R_a i_a + L_s \frac{di_a}{dt} + e_{af}$$

Circuito Equivalente

■ Circuito Equivalente

- Tensão induzida no enrolamento de fase a

$$v_a = R_a i_a + \frac{d(L_s \cdot i_a)}{dt} + \frac{d(\ell_{af} \cdot i_f)}{dt} \quad \longrightarrow \quad v_a = R_a i_a + L_s \frac{di_a}{dt} + e_{af}$$

$$\hat{V}_a = R_a \hat{I}_a + jX_s \hat{I}_a + \hat{E}_{af}$$

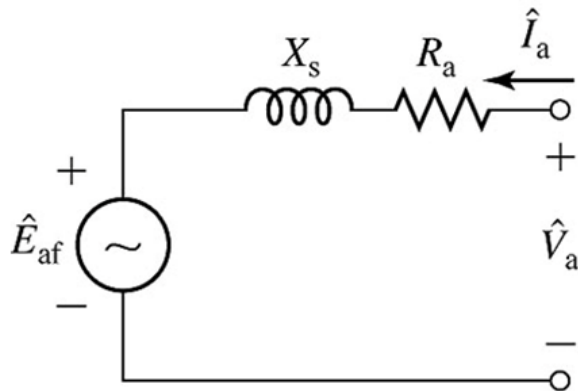
$$E_{af} = \frac{\omega_e \cdot L_{af} \cdot I_f}{\sqrt{2}}$$

Circuito Equivalente

■ Circuito Equivalente

□ Tensão induzida no enrolamento de fase a

$$v_a = R_a i_a + \frac{d(L_s \cdot i_a)}{dt} + \frac{d(\ell_{af} \cdot i_f)}{dt} \quad \longrightarrow \quad v_a = R_a i_a + L_s \frac{di_a}{dt} + e_{af}$$



$$E_{af} = \frac{\omega_e \cdot L_{af} \cdot I_f}{\sqrt{2}}$$

$$\hat{V}_a = R_a \hat{I}_a + jX_s \hat{I}_a + \hat{E}_{af}$$

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

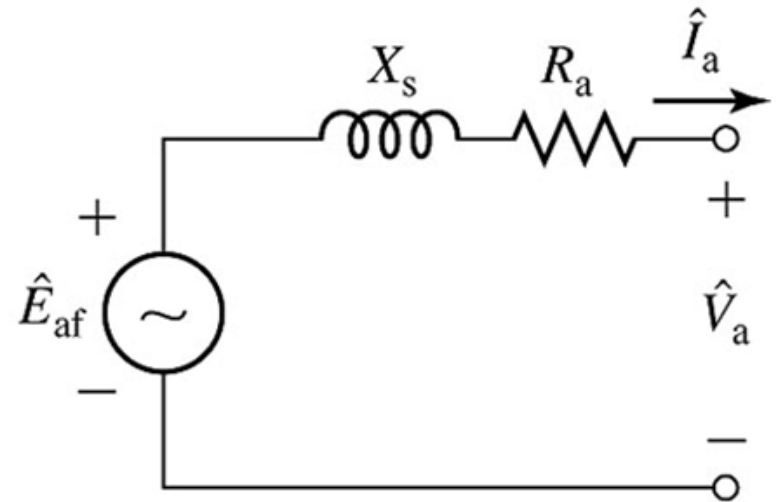
Circuito Equivalente

■ Circuito Equivalente

□ Como gerador:

$$\hat{E}_{af} = R_a \hat{I}_a + jX_s \hat{I}_a + \hat{V}_a$$

$$E_{af} = \frac{\omega_e \cdot L_{af} \cdot I_f}{\sqrt{2}}$$



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

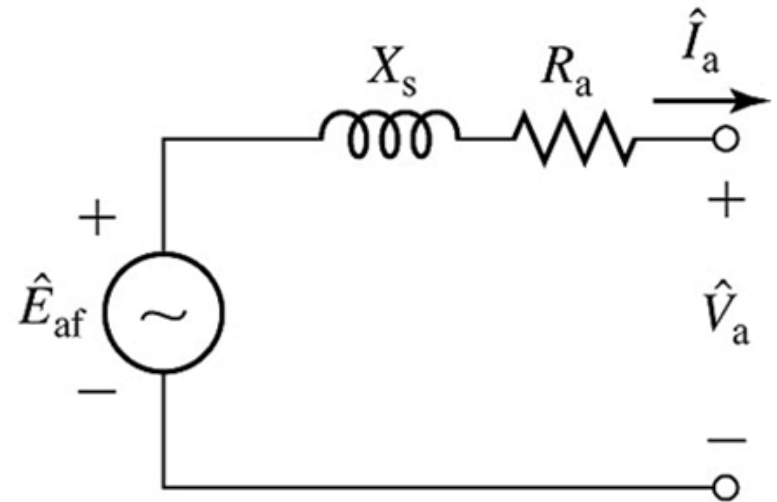
Circuito Equivalente

■ Circuito Equivalente

□ Como gerador:

$$\hat{E}_{af} = R_a \hat{I}_a + jX_s \hat{I}_a + \hat{V}_a$$

$$E_{af} = \frac{\omega_e \cdot L_{af} \cdot I_f}{\sqrt{2}}$$



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

$$X_s = \omega_e L_s = \omega_e L_{al} + \omega_e \left(\frac{3}{2} L_{aa0} \right)$$

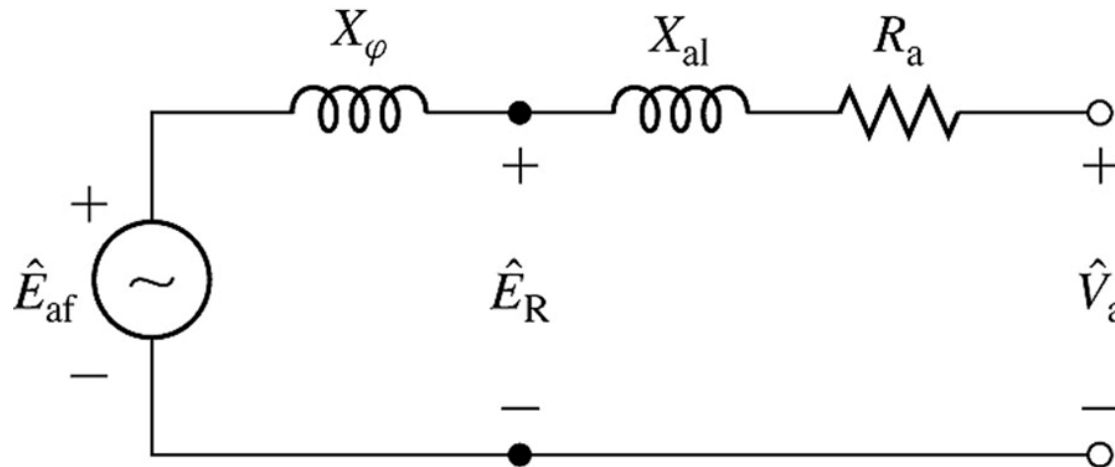
$$X_s = X_{al} + X_\phi$$

Reatância de magnetização efetiva
do enrolamento de armadura

Circuito Equivalente

■ Circuito Equivalente Especial

□ Com tensão de entreferro:

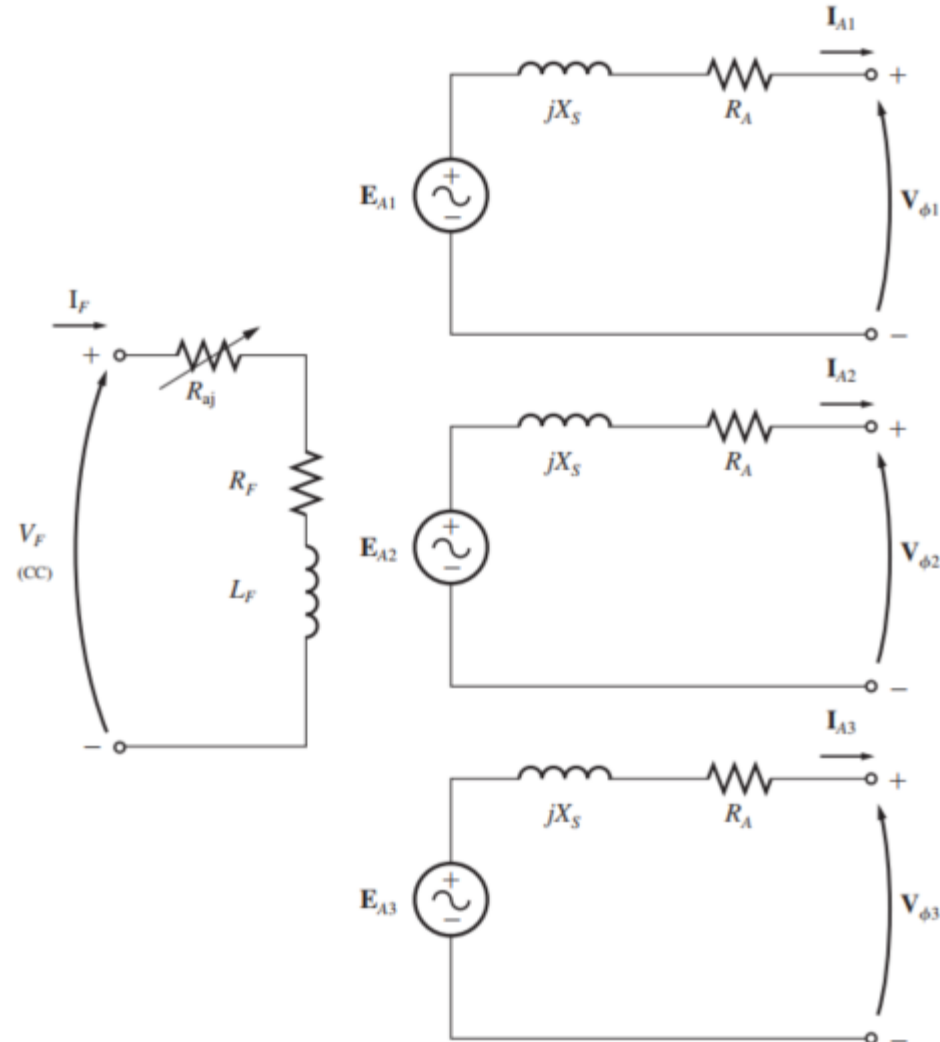


Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

\hat{E}_R é a tensão de entreferro – Circuito equivalente monofásico, entre a linha e neutro de uma máquina trifásica que opera em condições de equilíbrio trifásico

Circuito Equivalente

- Circuito Equivalente Trifásico
 - Para estudos em sistema desequilibrado



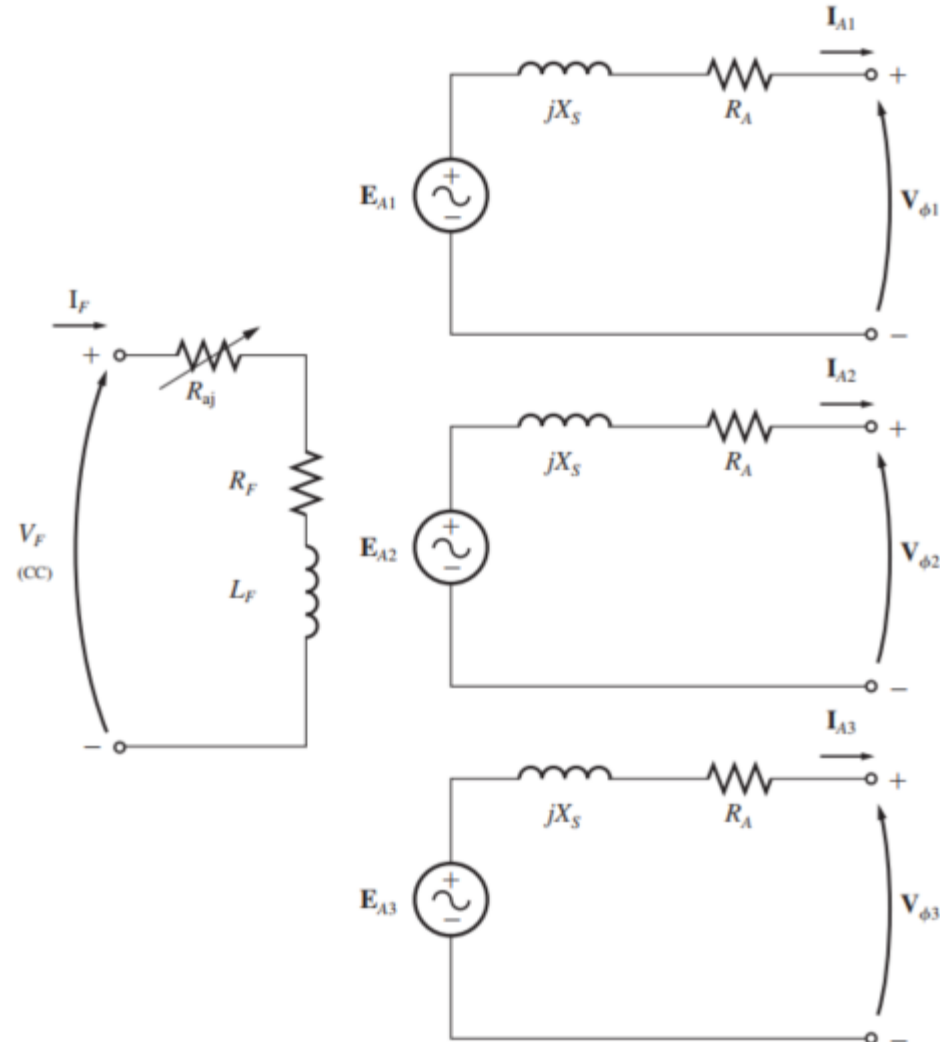
Adaptado de: Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

Circuito Equivalente

■ Circuito Equivalente Trifásico

□ Mas em sistemas equilibrados:

- Quem é a tensão de terminal no circuito equivalente monofásico?



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

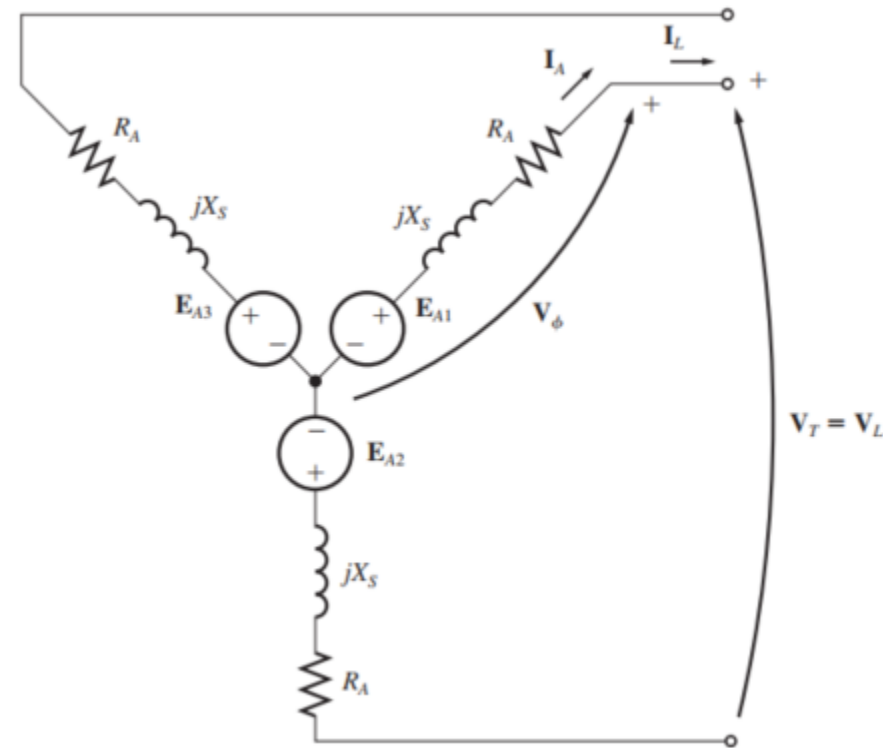
Circuito Equivalente

■ Circuito Equivalente Trifásico

- Para estudos em sistema desequilibrado
- Quem é a tensão de terminal no circuito?

■ Ligação Y

$$V_t = \frac{V_L}{\sqrt{3}}$$

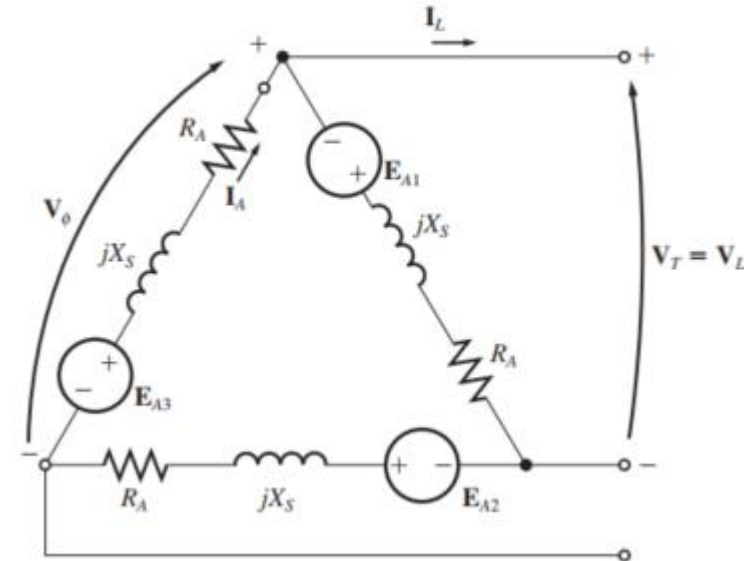


Circuito Equivalente

■ Circuito Equivalente Trifásico

- Para estudos em sistema desequilibrado
- Quem é a tensão de terminal no circuito?

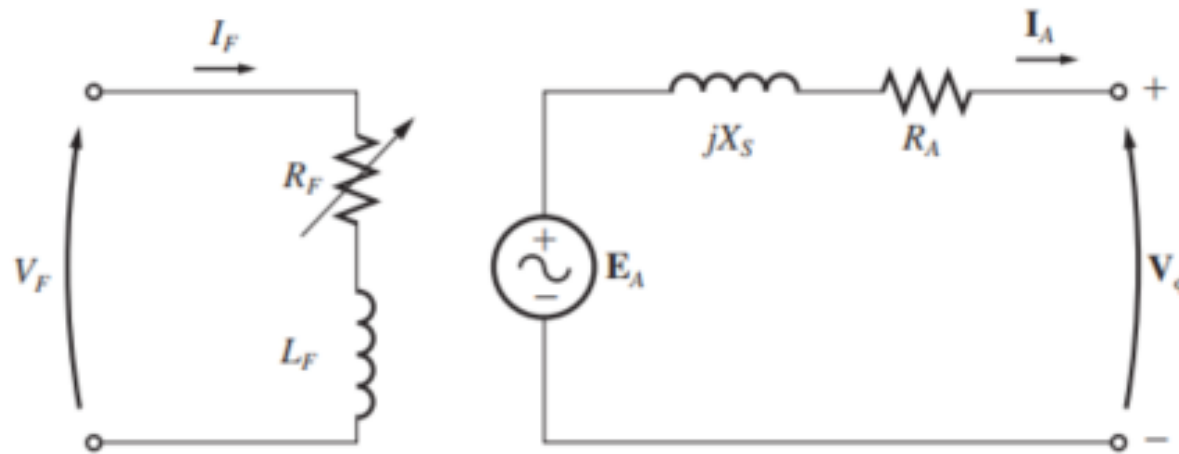
■ Ligação Delta



$$V_t = V_L$$

Circuito Equivalente

■ Circuito Equivalente Monofásico

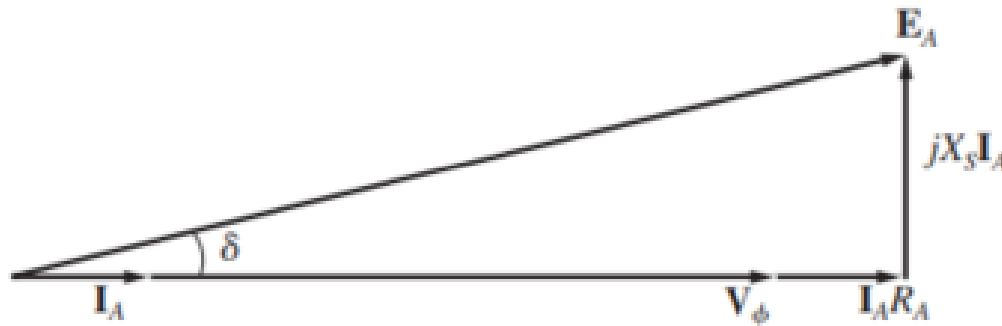


- Claramente, é possível dispensar o campo, pois já conhecemos a influência da corrente de campo sobre a tensão induzida

$$V_t = V_\phi$$

Circuito Equivalente

■ Circuito Equivalente Monofásico

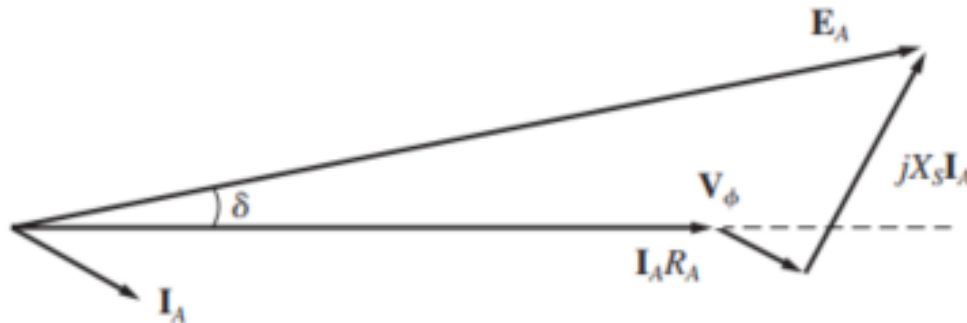


- Este é o diagrama fasorial para o caso do fator de potência unitário de um gerador

$$V_t = V_\phi$$

Circuito Equivalente

■ Circuito Equivalente Monofásico

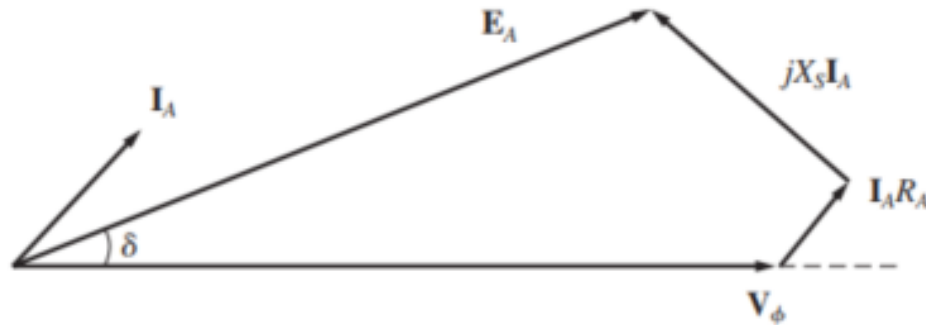


- Este é o diagrama fasorial para o caso do fator de potência indutivo de um gerador

$$V_t = V_\phi$$

Circuito Equivalente

■ Circuito Equivalente Monofásico



- Este é o diagrama fasorial para o caso do fator de potência capacitivo de um gerador

$$V_t = V_\phi$$

Exercício 1

Um gerador síncrono trifásico de 60 Hz tem uma tensão de linha de 460 V nos terminais. Calcule a corrente de campo necessária para abastecer uma carga com 85 kW e um fator de potência indutivo (adiantado) de 0,95. A reatância síncrona da máquina é igual a $1,68 \Omega$. Indutância mútua entre armadura e campo é 22,3 mH.

Exercício 1

Um gerador síncrono trifásico de 60 Hz tem uma tensão de linha de 460 V nos terminais. Calcule a corrente de campo necessária para abastecer uma carga com 85 kW e um fator de potência indutivo (adiantado) de 0,95. A reatância síncrona da máquina é igual a 1,68 Ω . Indutância mútua entre armadura e campo é 22,3 mH.

$$\hat{E}_{af} = \hat{V}_a + jX_s \hat{I}_a$$

$$I_a = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot V_L \cdot FP} = \frac{85000}{\sqrt{3} \cdot 460 \cdot 0,95} = 112,3 \text{ A}$$

Exercício 1

Um gerador síncrono trifásico de 60 Hz tem uma tensão de linha de 460 V nos terminais. Calcule a corrente de campo necessária para abastecer uma carga com 85 kW e um fator de potência indutivo (adiantado) de 0,95. A reatância síncrona da máquina é igual a 1,68 Ω . Indutância mútua entre armadura e campo é 22,3 mH.

$$\hat{E}_{af} = \hat{V}_a + jX_s \hat{I}_a \qquad I_a = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot V_L \cdot FP} = \frac{85000}{\sqrt{3} \cdot 460 \cdot 0,95} = 112,3 \text{ A}$$

$$\hat{E}_{af} = \frac{460}{\sqrt{3}} + j1,68 \cdot 112,3 \angle -\arccos(0,95)$$

Exercício 1

Um gerador síncrono trifásico de 60 Hz tem uma tensão de linha de 460 V nos terminais. Calcule a corrente de campo necessária para abastecer uma carga com 85 kW e um fator de potência indutivo (adiantado) de 0,95. A reatância síncrona da máquina é igual a 1,68 Ω . Indutância mútua entre armadura e campo é 22,3 mH.

$$\hat{E}_{af} = \hat{V}_a + jX_s \hat{I}_a \qquad I_a = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot V_L \cdot FP} = \frac{85000}{\sqrt{3} \cdot 460 \cdot 0,95} = 112,3 \text{ A}$$

$$\hat{E}_{af} = \frac{460}{\sqrt{3}} + j1,68 \cdot 112,3 \angle -\arccos(0,95)$$

$$\begin{aligned} \hat{E}_{af} &= 265,6 + j1,68 \cdot 112,3 \angle -18,2^\circ = 265,5 + 188,7 \angle 71,8^\circ = \dots \\ &\dots = 324,4 + j179,3 = 370,7 \angle 28,9^\circ \end{aligned}$$

Exercício 1

Um gerador síncrono trifásico de 60 Hz tem uma tensão de linha de 460 V nos terminais. Calcule a corrente de campo necessária para abastecer uma carga com 85 kW e um fator de potência indutivo (adiantado) de 0,95. A reatância síncrona da máquina é igual a 1,68 Ω . Indutância mútua entre armadura e campo é 22,3 mH.

$$\hat{E}_{af} = \hat{V}_a + jX_s \hat{I}_a \qquad I_a = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot V_L \cdot FP} = \frac{85000}{\sqrt{3} \cdot 460 \cdot 0,95} = 112,3 \text{ A}$$

$$\hat{E}_{af} = \frac{460}{\sqrt{3}} + j1,68 \cdot 112,3 \angle -\arccos(0,95)$$

$$\begin{aligned} \hat{E}_{af} &= 265,6 + j1,68 \cdot 112,3 \angle -18,2^\circ = 265,5 + 188,7 \angle 71,8^\circ = \dots \\ &\dots = 324,4 + j179,3 = 370,7 \angle 28,9^\circ \end{aligned}$$

$$E_{af} = 370,7 \text{ V}$$

Exercício 1

Um gerador síncrono trifásico de 60 Hz tem uma tensão de linha de 460 V nos terminais. Calcule a corrente de campo necessária para abastecer uma carga com 85 kW e um fator de potência indutivo (adiantado) de 0,95. A reatância síncrona da máquina é igual a 1,68 Ω . Indutância mútua entre armadura e campo é 22,3 mH.

$$E_{af} = 370,7 \text{ V}$$

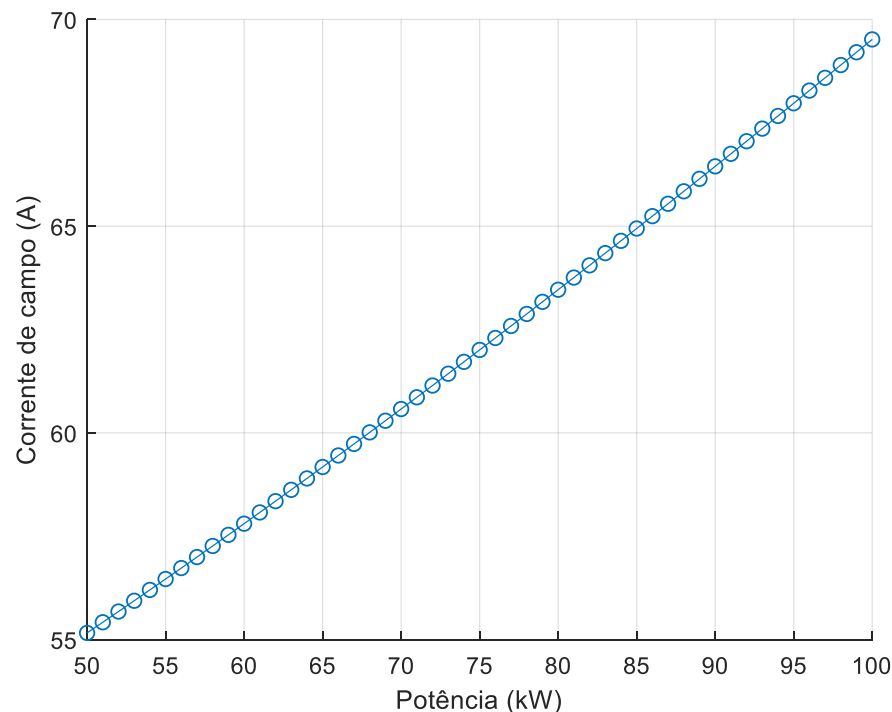
$$I_f = \frac{E_{af} \sqrt{2}}{\omega_e L_{af}} = \frac{370,7 \sqrt{2}}{120\pi \cdot 0,0223} = 62,4 \text{ A}$$

Exercício 2

Um gerador síncrono trifásico de 60 Hz tem uma tensão de linha de 460 V nos terminais. Utilizando o MATLAB ou SCILAB, plote a curva da corrente de campo necessária para abastecer uma carga que varia de 50 kW a 100 kW e um fator de potência indutivo (adiantado) de 0,92. A reatância síncrona da máquina é igual a 1,68 Ω . Indutância mútua entre armadura e campo é 22,3 mH.

Exercício 2

Um gerador síncrono trifásico de 60 Hz tem uma tensão de linha de 460 V nos terminais. Utilizando o MATLAB ou SCILAB, plote a curva da corrente de campo necessária para abastecer uma carga que varia de 50 kW a 100 kW e um fator de potência indutivo (adiantado) de 0,92. A reatância síncrona da máquina é igual a $1,68 \, \Omega$. Indutância mútua entre armadura e campo é $22,3 \, \text{mH}$.



Exercício 2

Um gerador síncrono trifásico de 60 Hz tem uma tensão de linha de 460 V nos terminais. Utilizando o MATLAB ou SCILAB, plote a curva da corrente de campo necessária para abastecer uma carga que varia de 50 kW a 100 kW e um fator de potência indutivo (adiantado) de 0,92. A reatância síncrona da máquina é igual a 1,68 Ω . Indutância mútua entre armadura e campo é 22,3 mH.

```
clc
close all
clear all

f=60;
Va=460;
Xs=1.68;
Laf=0.0223;

fp=0.92;
tipo=1;

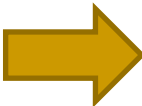

if tipo == 1
    teta=-acosd(fp);%indutivo
else
    teta=acosd(fp);%capacitivo
end

P=50000:1000:100000;

Ia=P./(sqrt(3)*Va*fp);

Ia_fasor=Ia.*(cosd(teta)+1i*sind(teta));

Eaf_fasor=Va/sqrt(3)+(1i*Xs.*Ia_fasor);
```



Exercício 2

Um gerador síncrono trifásico de 60 Hz tem uma tensão de linha de 460 V nos terminais. Utilizando o MATLAB ou SCILAB, plote a curva da corrente de campo necessária para abastecer uma carga que varia de 50 kW a 100 kW e um fator de potência indutivo (adiantado) de 0,92. A reatância síncrona da máquina é igual a 1,68 Ω . Indutância mútua entre armadura e campo é 22,3 mH.

```
Eaf=abs(Eaf_fasor);
```

```
If=Eaf.*sqrt(2)./(2*pi*f*Laf);
```



```
hold on  
figure(1), plot(P./1000,If,'-o')  
grid on  
xlabel('Potência (kW)')  
ylabel('Corrente de campo (A)')
```

Exercício 3

Agora, plote a curva da corrente de campo necessária para abastecer uma carga que varia de 50 kW a 100 kW e um fator de potência capacitivo (atrasado) de 0,92. Compare a nova curva com a curva do Exercício 2.

Exercício 3

Agora, plote a curva da corrente de campo necessária para abastecer uma carga que varia de 50 kW a 100 kW e um fator de potência capacitivo (atrasado) de 0,92. Compare a nova curva com a curva do Exercício 2.

```
tipo=2;

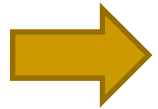
if tipo == 1
    teta=-acosd(fp);%indutivo
else
    teta=acosd(fp);%capacitivo
end

Ia=P./(sqrt(3)*Va*fp);

Ia_fasor=Ia.*(cosd(teta)+1i*sind(teta));

Eaf_fasor=Va/sqrt(3)+(1i*Xs.*Ia_fasor);

Eaf=abs(Eaf_fasor);
```



Exercício 3

Agora, plote a curva da corrente de campo necessária para abastecer uma carga que varia de 50 kW a 100 kW e um fator de potência capacitivo (atrasado) de 0,92. Compare a nova curva com a curva do Exercício 2.

```
If=Eaf.*sqrt(2)./(2*pi*f*Laf);
```

```
plot(P./1000,If,'-or')
```

```
grid on
```

```
xlabel('Potência (kW)')
```

```
ylabel('Corrente de campo (A)')
```

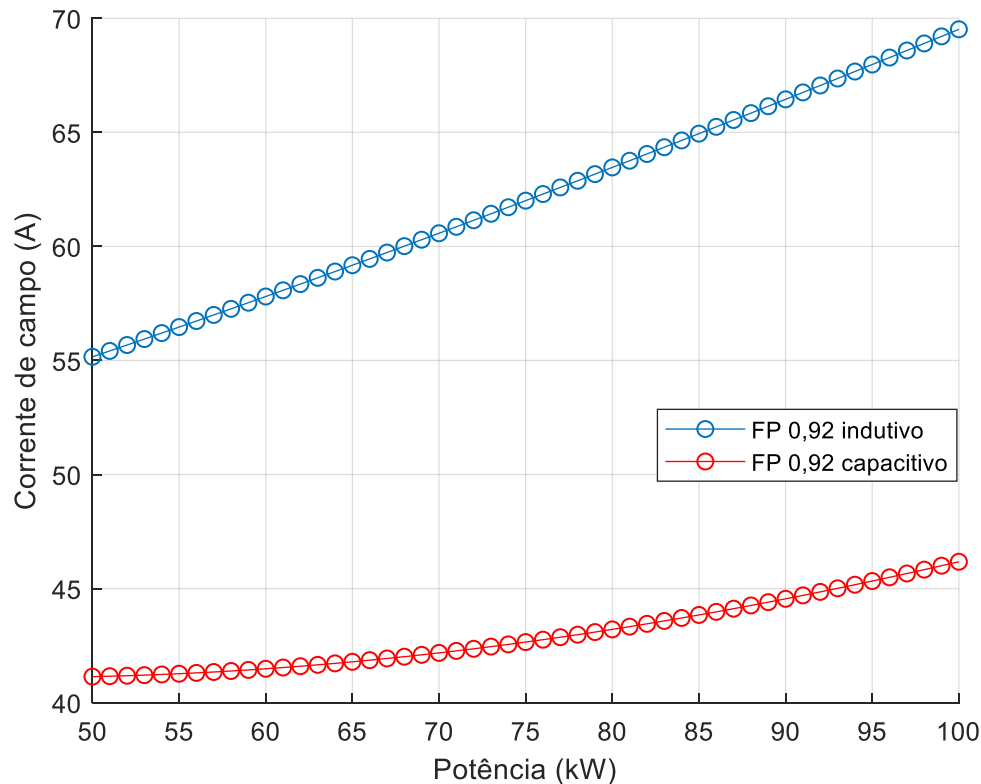
```
legend('FP indutivo', 'FP capacitivo')
```

```
hold off
```



Exercício 3

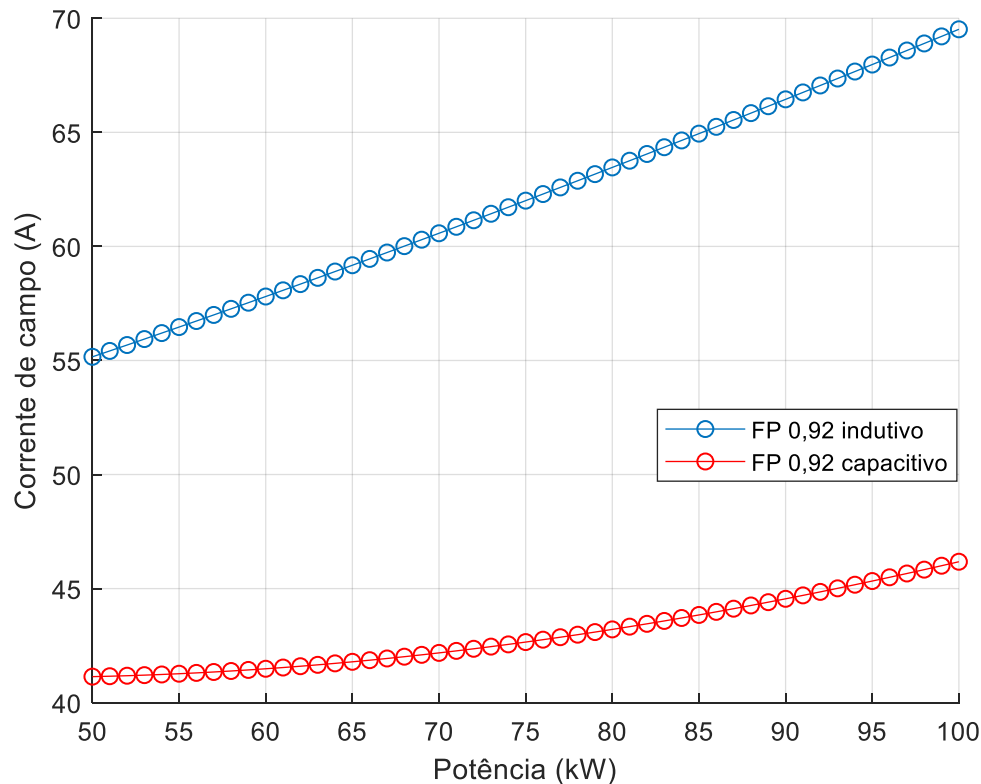
Agora, plote a curva da corrente de campo necessária para abastecer uma carga que varia de 50 kW a 100 kW e um fator de potência capacitivo (atrasado) de 0,92. Compare a nova curva com a curva do Exercício 2.



**Quanto maior a carga,
maior a corrente de campo**

Exercício 3

Agora, plote a curva da corrente de campo necessária para abastecer uma carga que varia de 50 kW a 100 kW e um fator de potência capacitivo (atrasado) de 0,92. Compare a nova curva com a curva do Exercício 2.

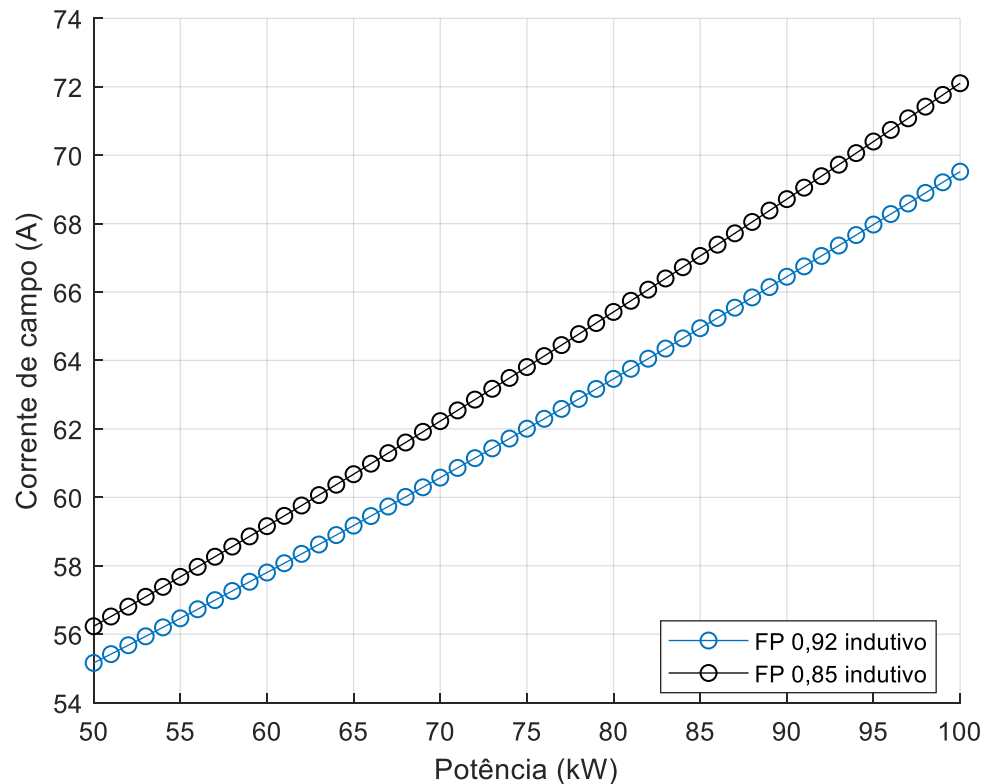


Quanto **maior a carga**,
maior a corrente de campo

Na geração com máquina síncrona, são gastos mais recursos para manter a corrente de campo alta para fator de potência indutivo.

Fator de Potência na Geração

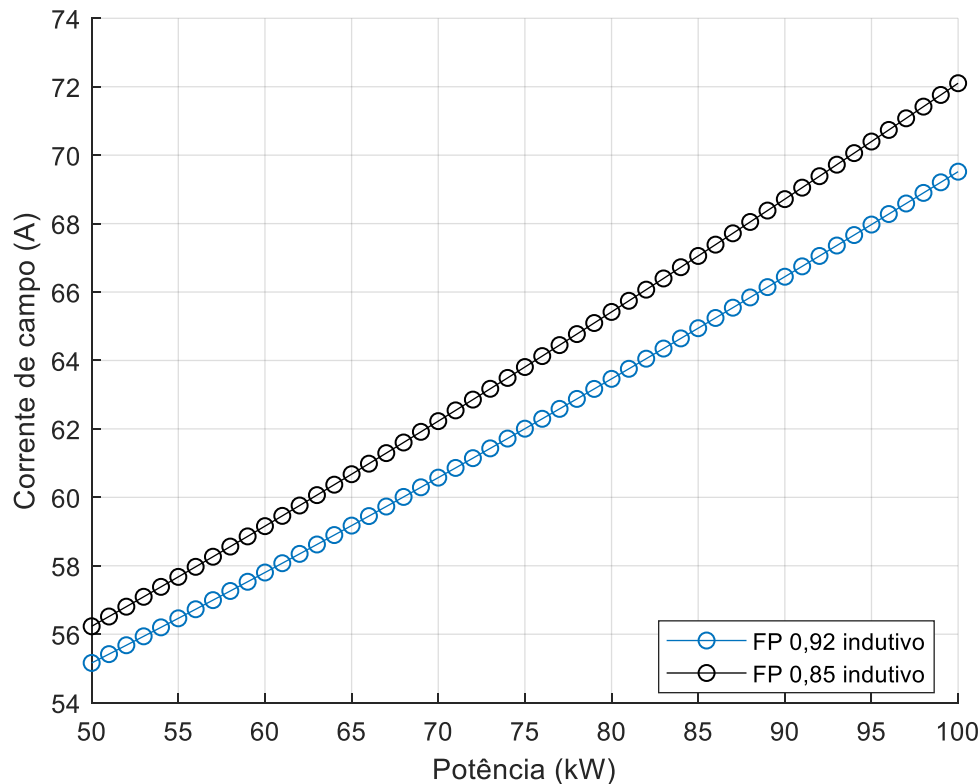
Ao reduzir o fator de potência para um valor abaixo de 0,92 indutivo, observe o comportamento da corrente de campo para o FP 0,85 indutivo (linha com marcadores pretos)



Quanto **menor o FP**, maior a corrente de campo

Fator de Potência na Geração

Ao reduzir o fator de potência para um valor abaixo de 0,92 indutivo, observe o comportamento da corrente de campo para o FP 0,85 indutivo (linha com marcadores pretos)

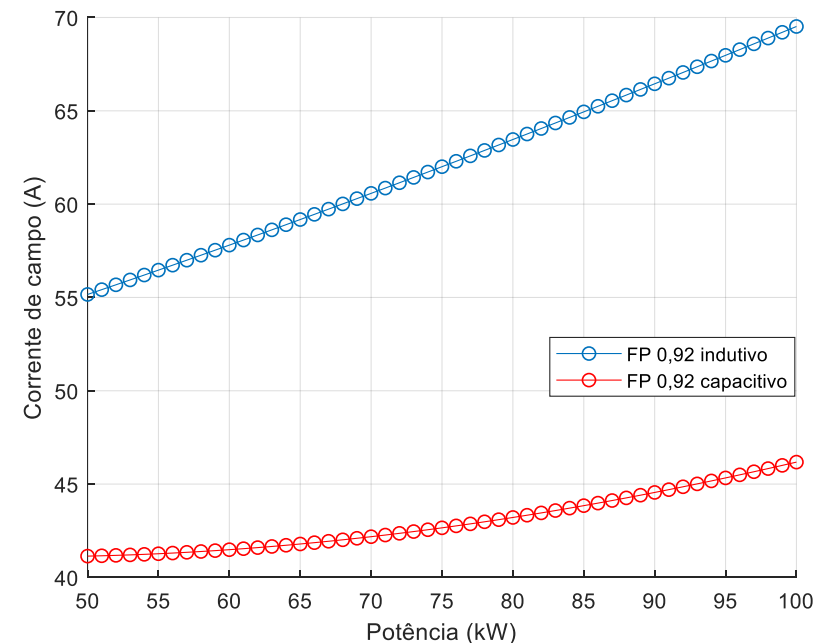
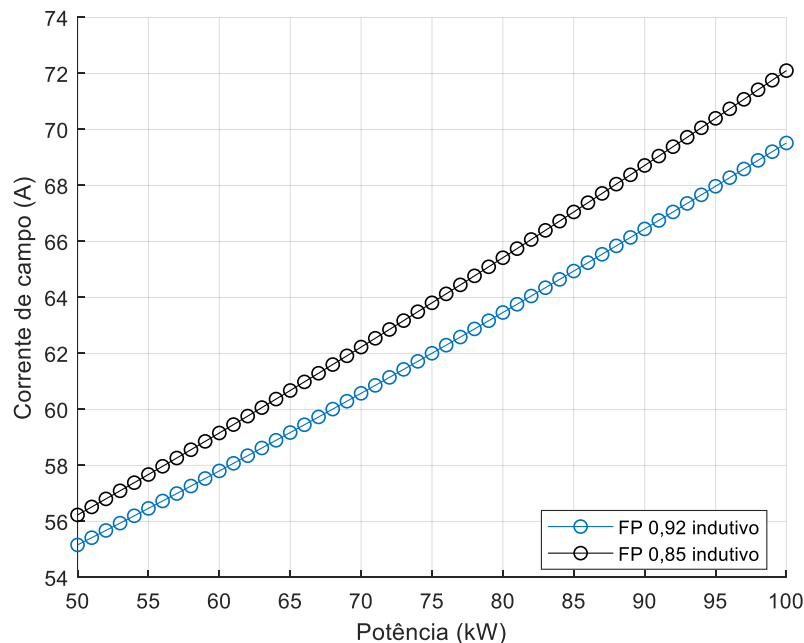


Quanto **menor o FP**, maior a corrente de campo

Na geração com máquina síncrona, são gastos mais recursos para manter a corrente de campo alta para fator de potência indutivo.

Fator de Potência na Geração

Mostra a importância de manter o FP indutivo acima de 0,92: não causar um gasto exacerbado de recursos para manter a corrente de campo alta nos geradores síncronos.



Potência no Gerador Síncrono

- Conceitos básicos

- Fonte de potência mecânica ao eixo solidário a máquina síncrona – máquina primária

Potência no Gerador Síncrono

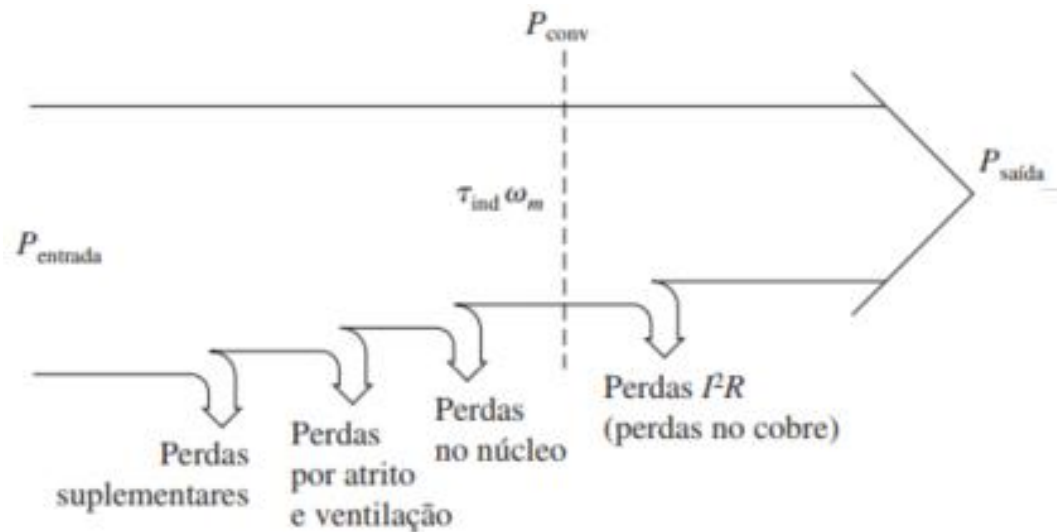
- Conceitos básicos

- Fonte de potência mecânica ao eixo solidário a máquina síncrona – máquina primária
 - A velocidade deve ser mantida constante, independente do tipo de máquina primária

Potência no Gerador Síncrono

■ Conceitos básicos

- Fonte de potência mecânica ao eixo solidário a máquina síncrona – máquina primária
- A velocidade deve ser mantida constante, independente do tipo de máquina primária



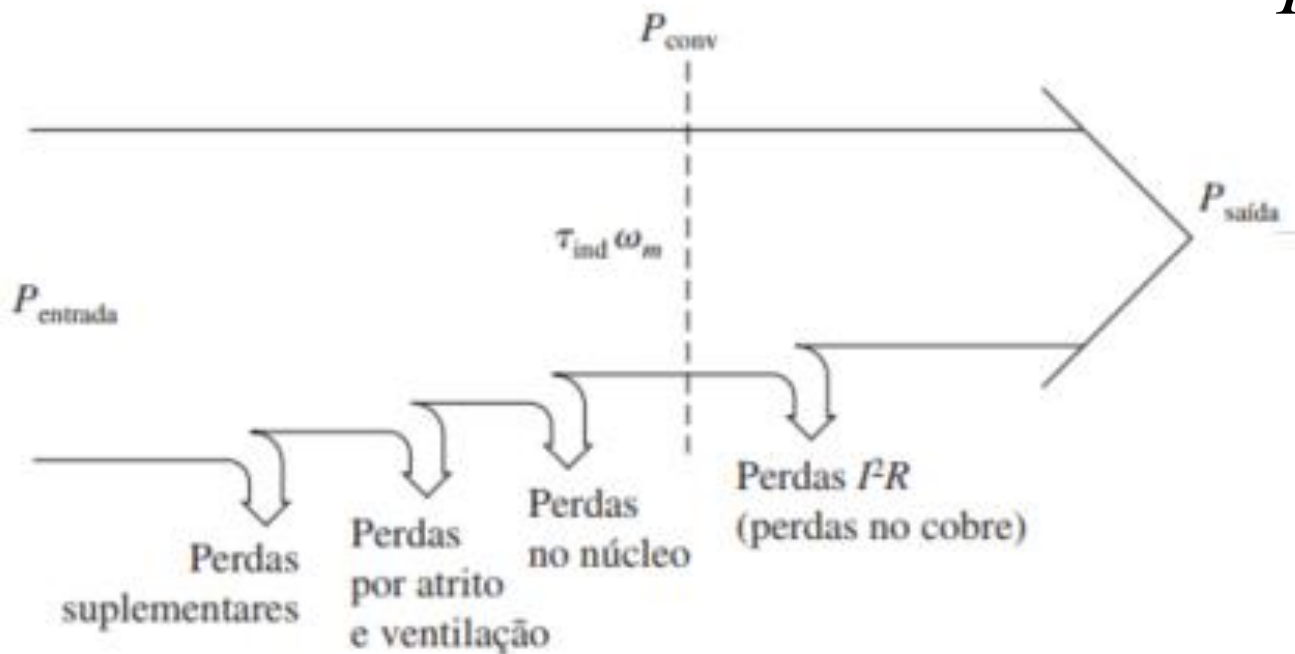
■ Diagrama de Sankey

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

Potência no Gerador Síncrono

- Conceitos básicos
 - Diagrama de fluxo de potência

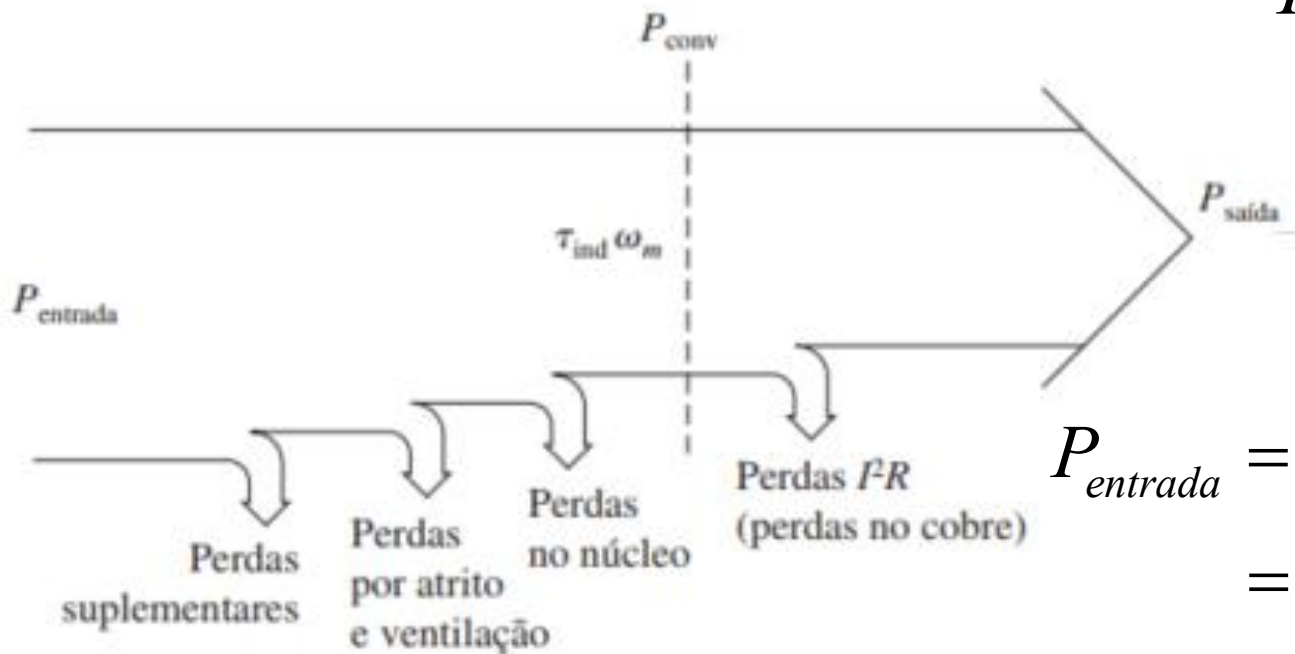
$$P_{saída} = 3 \cdot V_t I_a \cos \phi$$



Potência no Gerador Síncrono

- Conceitos básicos
 - Diagrama de fluxo de potência

$$P_{saída} = 3 \cdot V_t I_a \cos \phi$$

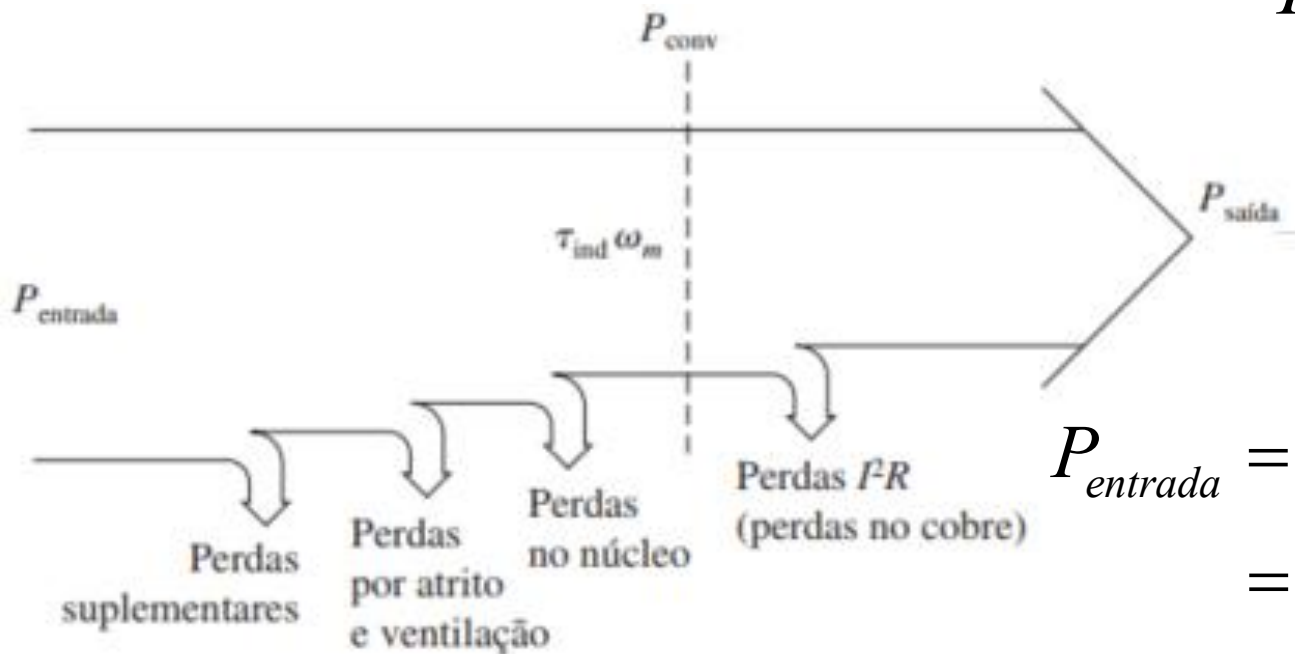


$$\begin{aligned} P_{entrada} &= \tau_{eixo} \cdot \omega_m + V_f I_f \\ &= P_{eixo} + V_f I_f \end{aligned}$$

Potência no Gerador Síncrono

- Conceitos básicos
 - Diagrama de fluxo de potência

$$P_{saída} = 3 \cdot V_t I_a \text{fp}$$



$$\begin{aligned} P_{entrada} &= \tau_{eixo} \cdot \omega_m + V_f I_f \\ &= P_{eixo} + V_f I_f \end{aligned}$$

$$\tau_{ind} = \tau_{mec} = \tau_{eletromag} \rightarrow P_{conv} = P_{mec} = \tau_{ind} \cdot \omega_m = 3 \cdot E_a \cdot I_a \text{fp}$$

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

Potência no Gerador Síncrono

■ Conceitos básicos

□ Rendimento

$$\eta = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}} \times 100\% = \frac{P_{entrada} - \sum P_{perdas}}{P_{entrada}} \times 100\% = \frac{P_{saída}}{P_{saída} + \sum P_{perdas}} \times 100\%$$

Potência no Gerador Síncrono

■ Conceitos básicos

□ Rendimento

$$\eta = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}} \times 100\% = \frac{P_{entrada} - \sum P_{perdas}}{P_{entrada}} \times 100\% = \frac{P_{saída}}{P_{saída} + \sum P_{perdas}} \times 100\%$$

$$\begin{cases} P_a = 3I_a^2 R_a \\ P_f = I_f^2 R_f \end{cases}$$

Potência no Gerador Síncrono

■ Conceitos básicos

□ Rendimento

$$\eta = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}} \times 100\% = \frac{P_{entrada} - \sum P_{perdas}}{P_{entrada}} \times 100\% = \frac{P_{saída}}{P_{saída} + \sum P_{perdas}} \times 100\%$$

$$\begin{cases} P_a = 3I_a^2 R_a \\ P_f = I_f^2 R_f \end{cases}$$

$$P_{\Delta V(\text{escovas})} = \Delta V_{\text{escovas}} \cdot I_a$$

Potência no Gerador Síncrono

■ Conceitos básicos

□ Rendimento

$$\eta = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}} \times 100\% = \frac{P_{entrada} - \sum P_{perdas}}{P_{entrada}} \times 100\% = \frac{P_{saída}}{P_{saída} + \sum P_{perdas}} \times 100\%$$

$$\begin{cases} P_a = 3I_a^2 R_a \\ P_f = I_f^2 R_f \end{cases}$$

$$\begin{aligned} \sum P_{perdas} &= 3I_a^2 R_a + I_f^2 R_f + \dots \\ &\dots + P_{\Delta V(\text{escovas})} + P_{fe} + P_{AV} + P_{sup} \end{aligned}$$

$$P_{\Delta V(\text{escovas})} = \Delta V_{\text{escovas}} \cdot I_a$$

Potência no Gerador Síncrono

■ Conceitos básicos

□ Rendimento

$$\eta = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}} \times 100\% = \frac{P_{entrada} - \sum P_{perdas}}{P_{entrada}} \times 100\% = \frac{P_{saída}}{P_{saída} + \sum P_{perdas}} \times 100\%$$

$$\begin{cases} P_a = 3I_a^2 R_a \\ P_f = I_f^2 R_f \end{cases}$$

$$\begin{aligned} \sum P_{perdas} &= 3I_a^2 R_a + I_f^2 R_f + \dots \\ &\dots + P_{\Delta V(\text{escovas})} + P_{fe} + P_{AV} + P_{sup} \end{aligned}$$

$$P_{\Delta V(\text{escovas})} = \Delta V_{\text{escovas}} \cdot I_a$$

$$\begin{aligned} P_{conv} &= P_{entrada} - P_{fe} - P_{AV} - P_{sup} \\ &= P_{saída} + 3I_a^2 R_a + I_f^2 R_f \end{aligned}$$

Sistema P.U. – Por Unidade

■ Sistemas monofásicos

$$P_{base}, Q_{base}, S_{base} = V_{base} \cdot I_{base}$$

$$R_{base}, X_{base}, Z_{base} = \frac{V_{base}}{I_{base}}$$

Sistema P.U. – Por Unidade

■ Sistemas monofásicos

$$P_{base}, Q_{base}, S_{base} = V_{base} \cdot I_{base}$$

$$R_{base}, X_{base}, Z_{base} = \frac{V_{base}}{I_{base}}$$

□ Mudança de bases

$$V_{pu}^{b2} = V_{pu}^{b1} \cdot \left(\frac{V_{b1}}{V_{b2}} \right)$$

$$I_{pu}^{b2} = I_{pu}^{b1} \cdot \left(\frac{V_{b2} \cdot S_{b1}}{V_{b1} \cdot S_{b2}} \right)$$

Sistema P.U. – Por Unidade

■ Sistemas monofásicos

$$P_{base}, Q_{base}, S_{base} = V_{base} \cdot I_{base}$$

$$R_{base}, X_{base}, Z_{base} = \frac{V_{base}}{I_{base}}$$

□ Mudança de bases

$$(P_{b2}, Q_{b2}, S_{b2}) = (P_{b1}, Q_{b1}, S_{b1}) \cdot \frac{S_{b1}}{S_{b2}}$$

$$V_{pu}^{b2} = V_{pu}^{b1} \cdot \left(\frac{V_{b1}}{V_{b2}} \right)$$

$$I_{pu}^{b2} = I_{pu}^{b1} \cdot \left(\frac{V_{b2} \cdot S_{b1}}{V_{b1} \cdot S_{b2}} \right)$$

Sistema P.U. – Por Unidade

■ Sistemas monofásicos

$$P_{base}, Q_{base}, S_{base} = V_{base} \cdot I_{base}$$

$$R_{base}, X_{base}, Z_{base} = \frac{V_{base}}{I_{base}}$$

□ Mudança de bases

$$(P_{b2}, Q_{b2}, S_{b2}) = (P_{b1}, Q_{b1}, S_{b1}) \cdot \frac{S_{b1}}{S_{b2}}$$

$$V_{pu}^{b2} = V_{pu}^{b1} \cdot \left(\frac{V_{b1}}{V_{b2}} \right)$$

$$(R_{b2}, X_{b2}, Z_{b2}) = (R_{b1}, X_{b1}, Z_{b1}) \cdot \frac{S_{b2}}{S_{b1}} \cdot \left(\frac{V_{b1}}{V_{b2}} \right)^2$$

$$I_{pu}^{b2} = I_{pu}^{b1} \cdot \left(\frac{V_{b2} \cdot S_{b1}}{V_{b1} \cdot S_{b2}} \right)$$

Sistema P.U. – Por Unidade

■ Sistemas trifásicos

$$P_{b-3\phi}, Q_{b-3\phi}, S_{b-3\phi} = 3 \cdot V_{base1-n} \cdot I_{base}$$

$$V_{base1-n} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot V_{base1-1}$$

$$I_{base} = \frac{S_{b-3\phi}}{\sqrt{3} \cdot V_{base1-1}}$$

Sistema P.U. – Por Unidade

■ Sistemas trifásicos

$$P_{b-3\phi}, Q_{b-3\phi}, S_{b-3\phi} = 3 \cdot V_{base1-n} \cdot I_{base}$$

$$Z_{base} = \frac{V_{base1-n}}{I_{base}} = \frac{V_{base1-1}}{\sqrt{3} \cdot I_{base}} = \frac{(V_{base1-1})^2}{S_{b-3\phi}}$$

$$V_{base1-n} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot V_{base1-1}$$

$$I_{base} = \frac{S_{b-3\phi}}{\sqrt{3} \cdot V_{base1-1}}$$

Sistema P.U. – Por Unidade

■ Sistemas trifásicos

$$P_{b-3\phi}, Q_{b-3\phi}, S_{b-3\phi} = 3 \cdot V_{base1-n} \cdot I_{base}$$

$$Z_{base} = \frac{V_{base1-n}}{I_{base}} = \frac{V_{base1-1}}{\sqrt{3} \cdot I_{base}} = \frac{(V_{base1-1})^2}{S_{b-3\phi}}$$

$$V_{base1-n} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot V_{base1-1}$$

$$I_{base} = \frac{S_{b-3\phi}}{\sqrt{3} \cdot V_{base1-1}}$$

□ Mudança de bases

$$V_{pu}^{b2} = V_{pu}^{b1} \cdot \left(\frac{V_{b1}}{V_{b2}} \right)$$

$$I_{pu}^{b2} = I_{pu}^{b1} \cdot \left(\frac{V_{b2} \cdot S_{b1}}{V_{b1} \cdot S_{b2}} \right)$$

Sistema P.U. – Por Unidade

■ Sistemas trifásicos

$$P_{b-3\phi}, Q_{b-3\phi}, S_{b-3\phi} = 3 \cdot V_{base1-n} \cdot I_{base}$$

$$Z_{base} = \frac{V_{base1-n}}{I_{base}} = \frac{V_{base1-1}}{\sqrt{3} \cdot I_{base}} = \frac{(V_{base1-1})^2}{S_{b-3\phi}}$$

$$V_{base1-n} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot V_{base1-1}$$

$$I_{base} = \frac{S_{b-3\phi}}{\sqrt{3} \cdot V_{base1-1}}$$

□ Mudança de bases

$$(P_{b2}, Q_{b2}, S_{b2}) = (P_{b1}, Q_{b1}, S_{b1}) \cdot \frac{S_{b1}}{S_{b2}}$$

$$V_{pu}^{b2} = V_{pu}^{b1} \cdot \left(\frac{V_{b1}}{V_{b2}} \right)$$

$$I_{pu}^{b2} = I_{pu}^{b1} \cdot \left(\frac{V_{b2} \cdot S_{b1}}{V_{b1} \cdot S_{b2}} \right)$$

Sistema P.U. – Por Unidade

■ Sistemas trifásicos

$$P_{b-3\phi}, Q_{b-3\phi}, S_{b-3\phi} = 3 \cdot V_{base1-n} \cdot I_{base}$$

$$Z_{base} = \frac{V_{base1-n}}{I_{base}} = \frac{V_{base1-1}}{\sqrt{3} \cdot I_{base}} = \frac{(V_{base1-1})^2}{S_{b-3\phi}}$$

$$V_{base1-n} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot V_{base1-1}$$

$$I_{base} = \frac{S_{b-3\phi}}{\sqrt{3} \cdot V_{base1-1}}$$

□ Mudança de bases

$$(P_{b2}, Q_{b2}, S_{b2}) = (P_{b1}, Q_{b1}, S_{b1}) \cdot \frac{S_{b1}}{S_{b2}}$$

$$(R_{b2}, X_{b2}, Z_{b2}) = (R_{b1}, X_{b1}, Z_{b1}) \cdot \frac{S_{b2}}{S_{b1}} \cdot \left(\frac{V_{b1}}{V_{b2}} \right)^2$$

$$V_{pu}^{b2} = V_{pu}^{b1} \cdot \left(\frac{V_{b1}}{V_{b2}} \right)$$

$$I_{pu}^{b2} = I_{pu}^{b1} \cdot \left(\frac{V_{b2} \cdot S_{b1}}{V_{b1} \cdot S_{b2}} \right)$$

Exemplo 1

Um gerador síncrono, trifásico, 60 Hz, 75 MVA e 13,8 kV, tem uma reatância síncrona de 1,35 p.u. na própria base. Este gerador é conectado a um motor síncrono, 60 Hz, 50 MVA, 13,8 kV e o motor possui reatância síncrona de 1,2 p.u. na sua própria base. Determine a tensão em p.u. induzida no gerador para o motor ser alimentado com corrente 0,5 p.u., na base do motor, fator de potência unitário nos terminais e tensão nominal nos terminais.

Exemplo 1

Um gerador síncrono, trifásico, 60 Hz, 75 MVA e 13,8 kV, tem uma reatância síncrona de 1,35 p.u. na própria base. Este gerador é conectado a um motor síncrono, 60 Hz, 50 MVA, 13,8 kV e o motor possui reatância síncrona de 1,2 p.u. na sua própria base. Determine a tensão em p.u. induzida no gerador para o motor ser alimentado com corrente 0,5 p.u., na base do motor, fator de potência unitário nos terminais e tensão nominal nos terminais.

Base 1 - Gerador:

$$VA_{b1} = 75 \text{ MVA}$$

$$V_{3\phi, b1} = 13,8 \text{ kV}$$

Base 2 - Motor:

$$VA_{b2} = 50 \text{ MVA}$$

$$V_{3\phi, b2} = 13,8 \text{ kV}$$

Exemplo 1

Um gerador síncrono, trifásico, 60 Hz, 75 MVA e 13,8 kV, tem uma reatância síncrona de 1,35 p.u. na própria base. Este gerador é conectado a um motor síncrono, 60 Hz, 50 MVA, 13,8 kV e o motor possui reatância síncrona de 1,2 p.u. na sua própria base. Determine a tensão em p.u. induzida no gerador para o motor ser alimentado com corrente 0,5 p.u., na base do motor, fator de potência unitário nos terminais e tensão nominal nos terminais.

Base 1 - Gerador:

$$VA_{b1} = 75 \text{ MVA}$$

$$V_{3\phi, b1} = 13,8 \text{ kV}$$

$$I_{3\phi, b1} = \frac{75000k}{\sqrt{3} \cdot 13,8k} = 3137,8 \text{ A}$$

Base 2 - Motor:

$$VA_{b2} = 50 \text{ MVA}$$

$$V_{3\phi, b2} = 13,8 \text{ kV}$$

$$I_{3\phi, b2} = \frac{50000k}{\sqrt{3} \cdot 13,8k} = 2091,8 \text{ A}$$

Exemplo 1

Um gerador síncrono, trifásico, 60 Hz, 75 MVA e 13,8 kV, tem uma reatância síncrona de 1,35 p.u. na própria base. Este gerador é conectado a um motor síncrono, 60 Hz, 50 MVA, 13,8 kV e o motor possui reatância síncrona de 1,2 p.u. na sua própria base. Determine a tensão em p.u. induzida no gerador para o motor ser alimentado com corrente 0,5 p.u., na base do motor, fator de potência unitário nos terminais e tensão nominal nos terminais.

Base 1 - Gerador:

$$VA_{b1} = 75 \text{ MVA}$$

$$V_{3\phi, b1} = 13,8 \text{ kV}$$

$$I_{3\phi, b1} = \frac{75000k}{\sqrt{3} \cdot 13,8k} = 3137,8 \text{ A}$$

$$Z_{3\phi, b1} = \frac{13800}{\sqrt{3} \cdot 3137,8} = 2,5392 \Omega$$

Base 2 - Motor:

$$VA_{b2} = 50 \text{ MVA}$$

$$V_{3\phi, b2} = 13,8 \text{ kV}$$

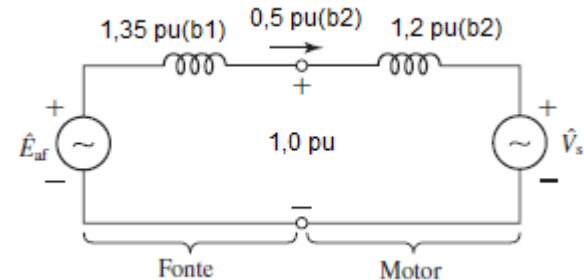
$$I_{3\phi, b2} = \frac{50000k}{\sqrt{3} \cdot 13,8k} = 2091,8 \text{ A}$$

$$Z_{3\phi, b2} = \frac{13800}{\sqrt{3} \cdot 2091,8} = 3,8089 \Omega$$

Exemplo 1

Um gerador síncrono, trifásico, 60 Hz, 75 MVA e 13,8 kV, tem uma reatância síncrona de 1,35 p.u. na própria base. Este gerador é conectado a um motor síncrono, 60 Hz, 50 MVA, 13,8 kV e o motor possui reatância síncrona de 1,2 p.u. na sua própria base. Determine a tensão em p.u. induzida no gerador para o motor ser alimentado com corrente 0,5 p.u., na base do motor, fator de potência unitário nos terminais e tensão nominal nos terminais.

Trazer os valores da base do motor para base do gerador:

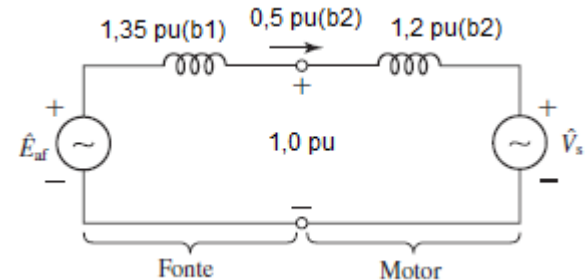


Exemplo 1

Um gerador síncrono, trifásico, 60 Hz, 75 MVA e 13,8 kV, tem uma reatância síncrona de 1,35 p.u. na própria base. Este gerador é conectado a um motor síncrono, 60 Hz, 50 MVA, 13,8 kV e o motor possui reatância síncrona de 1,2 p.u. na sua própria base. Determine a tensão em p.u. induzida no gerador para o motor ser alimentado com corrente 0,5 p.u., na base do motor, fator de potência unitário nos terminais e tensão nominal nos terminais.

Trazer os valores da base do motor para base do gerador:

$$I_{a,pu,b1} = 0,5_{pu,b2} \cdot \left(\frac{13,8k}{13,8k} \frac{50M}{75M} \right) = 0,3333_{pu,b1}$$



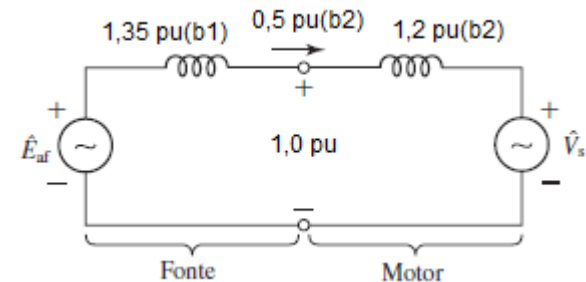
Exemplo 1

Um gerador síncrono, trifásico, 60 Hz, 75 MVA e 13,8 kV, tem uma reatância síncrona de 1,35 p.u. na própria base. Este gerador é conectado a um motor síncrono, 60 Hz, 50 MVA, 13,8 kV e o motor possui reatância síncrona de 1,2 p.u. na sua própria base. Determine a tensão em p.u. induzida no gerador para o motor ser alimentado com corrente 0,5 p.u., na base do motor, fator de potência unitário nos terminais e tensão nominal nos terminais.

Trazer os valores da base do motor para base do gerador:

$$I_{a,pu,b1} = 0,5_{pu,b2} \cdot \left(\frac{13,8k}{13,8k} \frac{50M}{75M} \right) = 0,3333_{pu,b1}$$

$$X_{s,3\phi,b1} = 1,2_{pu,b2} \cdot \left(\frac{13,8k}{13,8k} \right)^2 \left(\frac{50M}{75M} \right) = 0,8_{pu,b1}$$



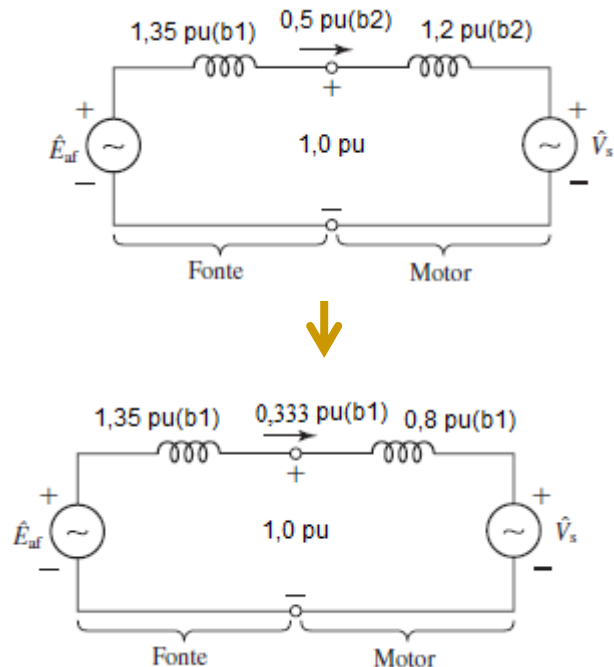
Exemplo 1

Um gerador síncrono, trifásico, 60 Hz, 75 MVA e 13,8 kV, tem uma reatância síncrona de 1,35 p.u. na própria base. Este gerador é conectado a um motor síncrono, 60 Hz, 50 MVA, 13,8 kV e o motor possui reatância síncrona de 1,2 p.u. na sua própria base. Determine a tensão em p.u. induzida no gerador para o motor ser alimentado com corrente 0,5 p.u., na base do motor, fator de potência unitário nos terminais e tensão nominal nos terminais.

Trazer os valores da base do motor para base do gerador:

$$I_{a,pu,b1} = 0,5_{pu,b2} \cdot \left(\frac{13,8k}{13,8k} \frac{50M}{75M} \right) = 0,3333_{pu,b1}$$

$$X_{s,3\phi,b1} = 1,2_{pu,b2} \cdot \left(\frac{13,8k}{13,8k} \right)^2 \left(\frac{50M}{75M} \right) = 0,8_{pu,b1}$$



Exemplo 1

Um gerador síncrono, trifásico, 60 Hz, 75 MVA e 13,8 kV, tem uma reatância síncrona de 1,35 p.u. na própria base. Este gerador é conectado a um motor síncrono, 60 Hz, 50 MVA, 13,8 kV e o motor possui reatância síncrona de 1,2 p.u. na sua própria base. Determine a tensão em p.u. induzida no gerador para o motor ser alimentado com corrente 0,5 p.u., na base do motor, fator de potência unitário nos terminais e tensão nominal nos terminais.

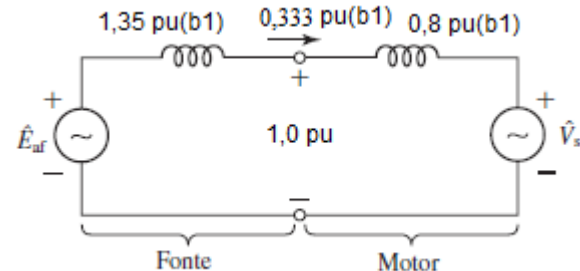
Tensão induzida no gerador

$$\hat{E}_{af} = X_{s,b1} \cdot \hat{I}_{a,b1} + \hat{V}_a$$

$$\hat{E}_{af} = 1,35j \cdot 0,3333 + 1,0$$

$$\hat{E}_{af} = 1,09657 \angle 24,2^\circ$$

$$E_{af} = 1,09657 \text{ pu}_{b1}$$



Exemplo 1

Um gerador síncrono, trifásico, 60 Hz, 75 MVA e 13,8 kV, tem uma reatância síncrona de 1,35 p.u. na própria base. Este gerador é conectado a um motor síncrono, 60 Hz, 50 MVA, 13,8 kV e o motor possui reatância síncrona de 1,2 p.u. na sua própria base. Determine a tensão em p.u. induzida no gerador para o motor ser alimentado com corrente 0,5 p.u., na base do motor, fator de potência unitário nos terminais e tensão nominal nos terminais.

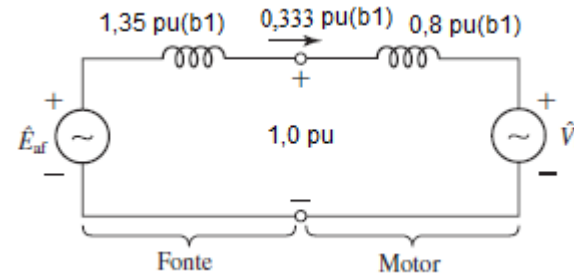
Tensão induzida no gerador

$$\hat{E}_{af} = X_{s,b1} \cdot \hat{I}_{a,b1} + \hat{V}_a$$

$$\hat{E}_{af} = 1,35j \cdot 0,3333 + 1,0$$

$$\hat{E}_{af} = 1,09657 \angle 24,2^\circ$$

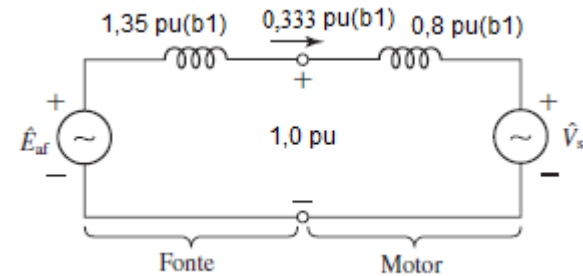
$$E_{af} = 1,09657 \text{ pu}_{b1}$$



$$\begin{aligned} \text{Potência } P &= V_t \cdot I_a \cdot \text{fp} = 1,0 \cdot 0,3333 \cdot 1,0 = 0,3333 \text{ pu} \\ &= 75 \text{ M} \cdot 0,3333 = 25 \text{ MW} \end{aligned}$$

Exemplo 2

A partir do exercício anterior, qual a tensão induzida no motor, em relação a própria base?



Exemplo 2

A partir do exercício anterior, qual a tensão induzida no motor, em relação a própria base?

Tensão induzida no motor

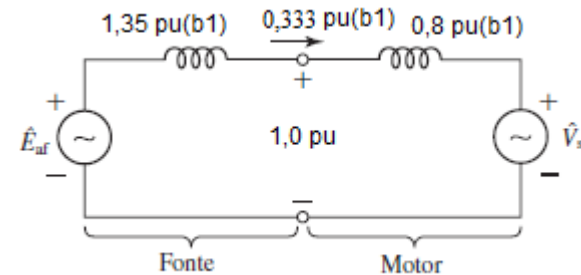
$$\hat{V}_a = \hat{E}_{af} + X_{s,b1} \cdot \hat{I}_{a,b1}$$

$$\hat{E}_{af} = \hat{V}_a - X_{s,b1} \cdot \hat{I}_{a,b1}$$

$$\hat{E}_{af} = 1,0 - 0,8571j \cdot 0,3571$$

$$\hat{E}_{af} = 1,0 - 0,3061j = 1,0458 \angle -17,02^\circ$$

$$E_{af} = 1,0458 \text{ pu}_{b1} = 1,0458 \text{ pu}_{b2}$$



Exemplo 2

A partir do exercício anterior, qual a tensão induzida no motor, em relação a própria base?

Tensão induzida no motor

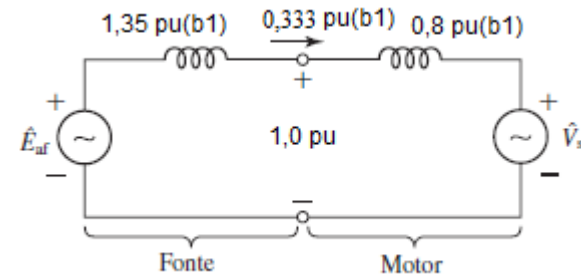
$$\hat{V}_a = \hat{E}_{af} + X_{s,b1} \cdot \hat{I}_{a,b1}$$

$$\hat{E}_{af} = \hat{V}_a - X_{s,b1} \cdot \hat{I}_{a,b1}$$

$$\hat{E}_{af} = 1,0 - 0,8571j \cdot 0,3571$$

$$\hat{E}_{af} = 1,0 - 0,3061j = 1,0458 \angle -17,02^\circ$$

$$E_{af} = 1,0458 \text{ pu}_{b1} = 1,0458 \text{ pu}_{b2}$$



Base 1 - Gerador:

$$VA_{b1} = 75 \text{ MVA}$$

$$V_{3\phi,b1} = 13,8 \text{ kV}$$

Base 2 - Motor:

$$VA_{b2} = 50 \text{ MVA}$$

$$V_{3\phi,b2} = 13,8 \text{ kV}$$

Indutâncias na Máquina Síncrona

- Ordem de grandeza (centenas de KVA)
 - Queda de tensão na resistência de armadura: 0,01 pu

Indutâncias na Máquina Síncrona

- Ordem de grandeza (centenas de KVA)
 - Queda de tensão na resistência de armadura: 0,01 pu
 - Reatância de dispersão da armadura (0,1 a 0,2 pu)
 - Reatância síncrona (1 a 2 pu)

Indutâncias na Máquina Síncrona

- Ordem de grandeza (centenas de KVA)
 - Queda de tensão na resistência de armadura: 0,01 pu
 - Reatância de dispersão da armadura (0,1 a 0,2 pu)
 - Reatância síncrona (1 a 2 pu)
- Máquinas de pequeno porte
 - Resistência de armadura: 0,05 pu

Indutâncias na Máquina Síncrona

- Ordem de grandeza (centenas de KVA)
 - Queda de tensão na resistência de armadura: 0,01 pu
 - Reatância de dispersão da armadura (0,1 a 0,2 pu)
 - Reatância síncrona (1 a 2 pu)
- Máquinas de pequeno porte
 - Resistência de armadura: 0,05 pu
 - Reatância síncrona, por volta de 0,5 pu
 - Em todas as máquinas, exceto as pequenas, despreza-se a resistência de armadura

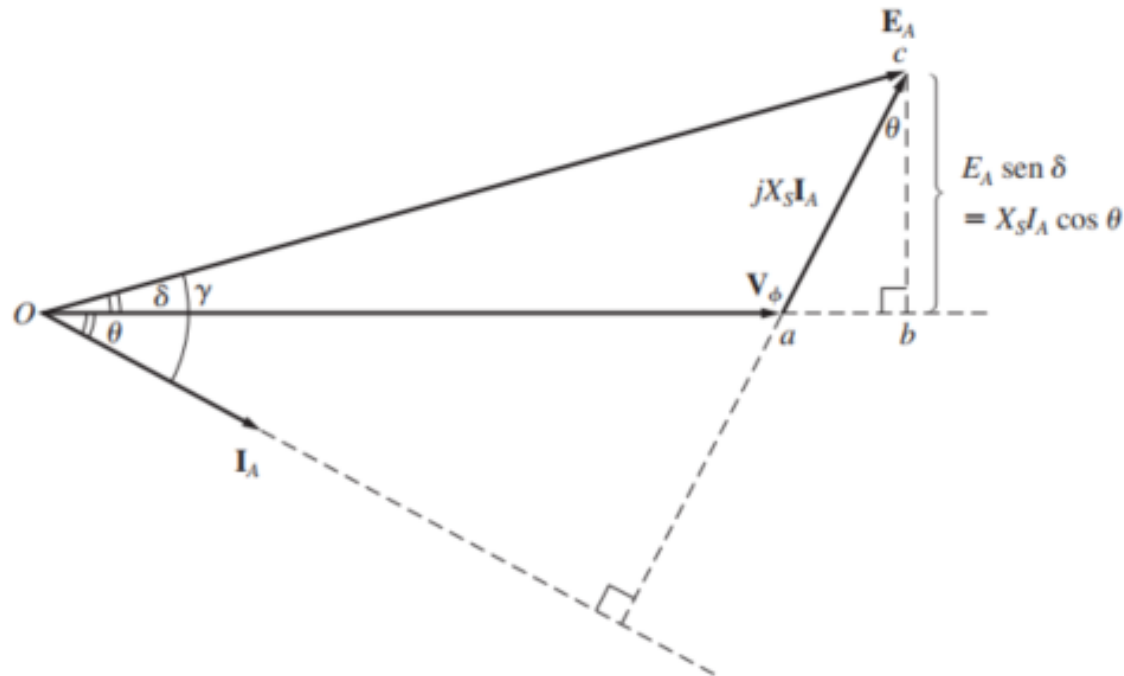
Indutâncias na Máquina Síncrona

■ Exceções:

❑ Máquinas de pequeno porte

- Resistência de armadura: 0,05 pu

❑ Resistência da armadura é desprezada



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

Avaliação A

Baseado no diagrama representado no slide anterior, com a mesma simplificação (desprezar resistência da armadura) refaça os diagramas fasorial para o caso fator de potência unitário e fator de potência capacitivo.

Avaliação B

Baseado nos exercícios 4 e 5 e utilizando o MATLAB ou SCILAB plote a curva da corrente de campo necessária para abastecer o gerador abastecer uma carga que varia de 50 kW a 100 kW e os seguintes fatores de potência:

Indutivo (adiantado) de 0,87.

Indutivo de 0,92.

Indutivo de 0,95.

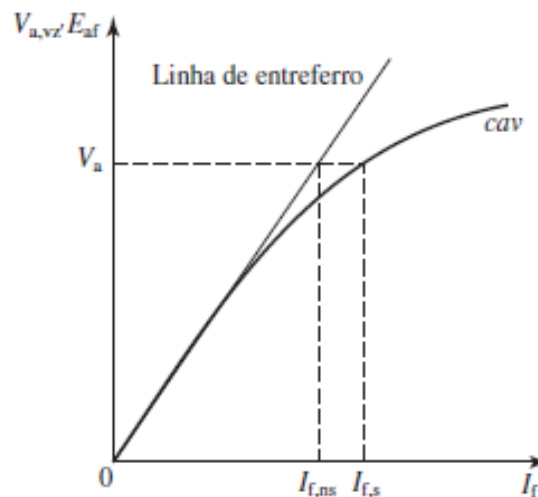
Unitário.

Característica a Vazio

- Ensaios para determinar características
 - Válido para rotor cilíndrico e pólos salientes

Característica a Vazio

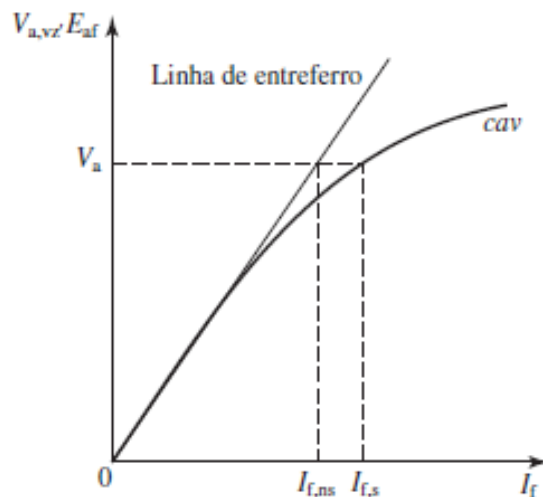
- Ensaios para determinar características
 - Válido para rotor cilíndrico e pólos salientes
- Característica de saturação a vazio (*cav*)
 - Perdas rotacionais mecânicas



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

Característica a Vazio

- Ensaios para determinar características
 - Válido para rotor cilíndrico e pólos salientes
- Característica de saturação a vazio (*cav*)
 - Perdas rotacionais mecânicas



$$P_{vazio} = P_{AV} + P_{fe}$$

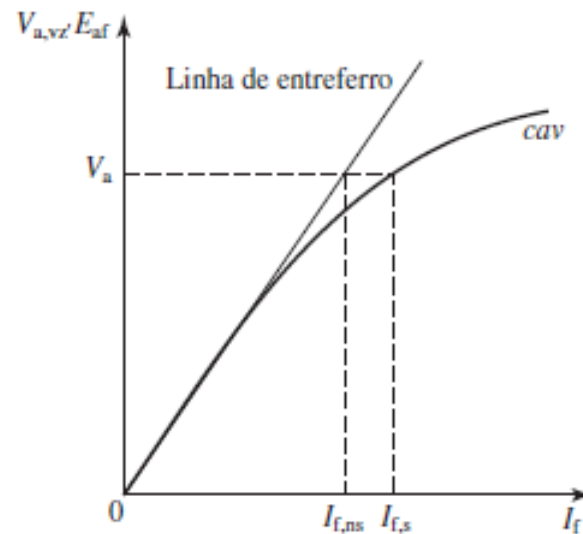


Perdas por atrito e ventilação

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

Característica a Vazio

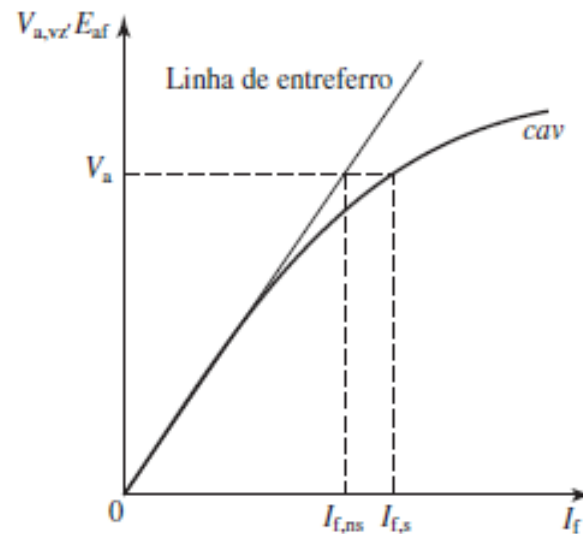
■ Característica de saturação a vazio (*cav*)



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

Característica a Vazio

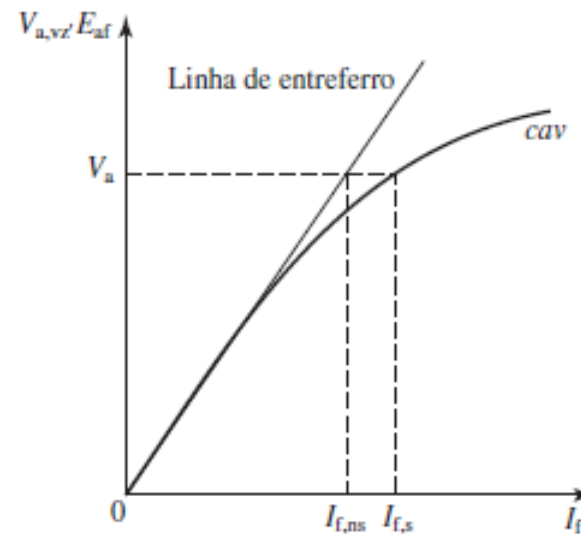
- Característica de saturação a vazio (*cav*)
 - V_a é a tensão de referência da máquina



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

Característica a Vazio

- Característica de saturação a vazio (*cav*)
 - V_a é a tensão de referência da máquina
 - $I_{f,s}$ é a corrente de campo de referência, saturada e $I_{f,ns}$ a não saturada.



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

Característica a Vazio

- Como fazer o ensaio?

Característica a Vazio

■ Passos:

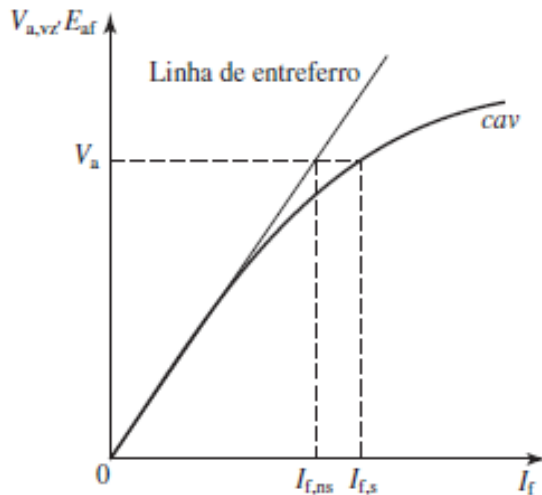
- Em velocidade síncrona
- Variar a corrente de campo e medir a tensão gerada

Característica a Vazio

■ Passos:

- Em velocidade síncrona
- Variar a corrente de campo e medir a tensão gerada

$$V_a = E_{af} = \frac{\omega_e \cdot L_{af} \cdot I_f}{\sqrt{2}}$$



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

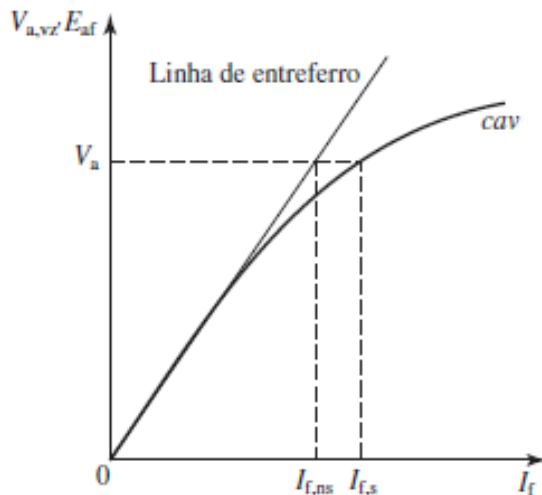
Característica a Vazio

■ Passos:

- ❑ Em velocidade síncrona
- ❑ Variar a corrente de campo e medir a tensão gerada

$$V_a = E_{af} = \frac{\omega_e \cdot L_{af} \cdot I_f}{\sqrt{2}}$$

$$L_{af} = \frac{E_{af} \sqrt{2}}{\omega_e \cdot I_f}$$



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

Cálculo de duas indutâncias mútuas, a saturada e a não saturada.

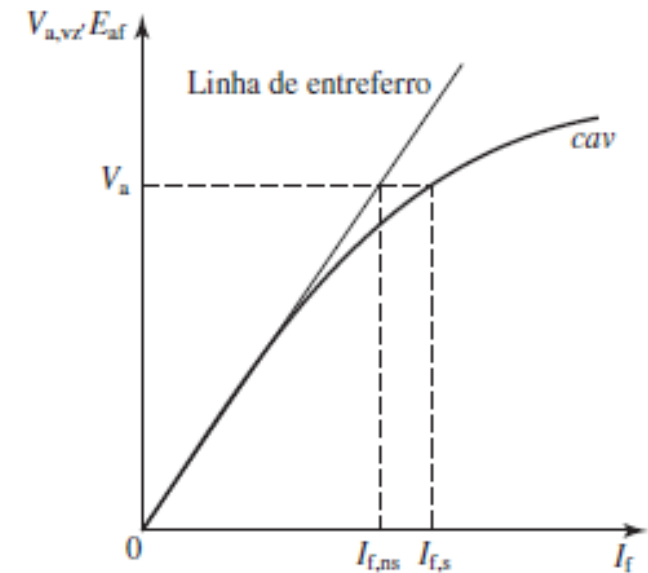
Característica a Vazio

■ Passo a passo:

- ❑ Aciona a máquina, mecanicamente, na velocidade síncrona
- ❑ Terminais de armadura a vazio
 - Ler a tensão terminal para vários valores de campo
- ❑ Potência de acionamento medida
 - Calcula-se as perdas por ventilação e atrito
 - Na **velocidade síncrona**, são **constantes**
- ❑ Perdas no núcleo
 - Função do fluxo, proporcional a tensão a vazio

Característica a Vazio

- Enrolamento de campo
 - Única fonte
 - FMM no entreferro x FMM total



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

Característica a Vazio

■ Enrolamento de campo

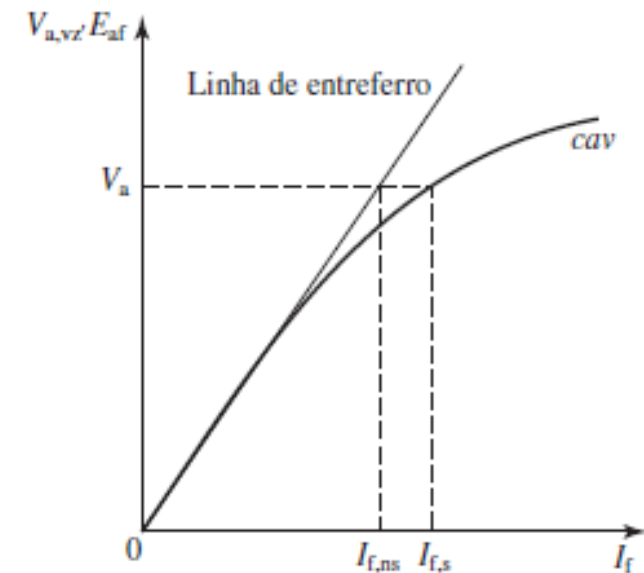
□ Única fonte

- FMM no entreferro x FMM total

■ Efeitos de saturação

□ Aumento da relutância — redução da indutância

- Nos caminhos de fluxo da máquina



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

Característica a Vazio

■ Enrolamento de campo

□ Única fonte

- FMM no entreferro x FMM total

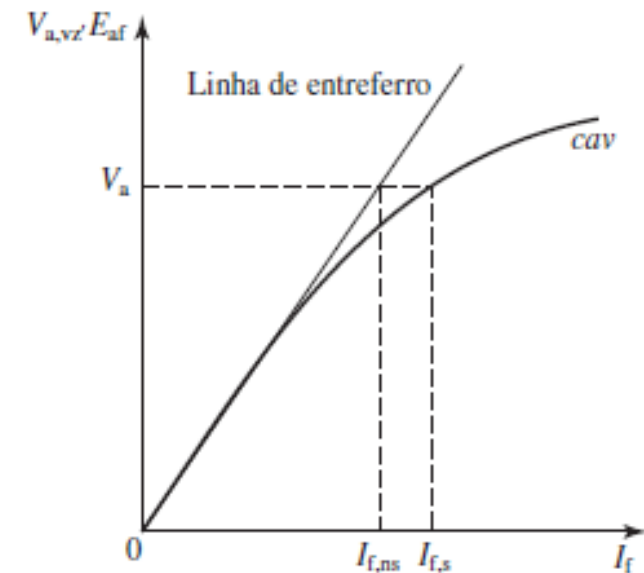
■ Efeitos de saturação

□ Aumento da relutância – redução da indutância

- Nos caminhos de fluxo da máquina

■ Linha de entreferro

- Válida para região linear – é uma extrapolação dos valores lineares em baixas correntes de campo



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

Exemplo 3

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. Calcule os valores saturado e não saturado de L_{af} .

Exemplo 3

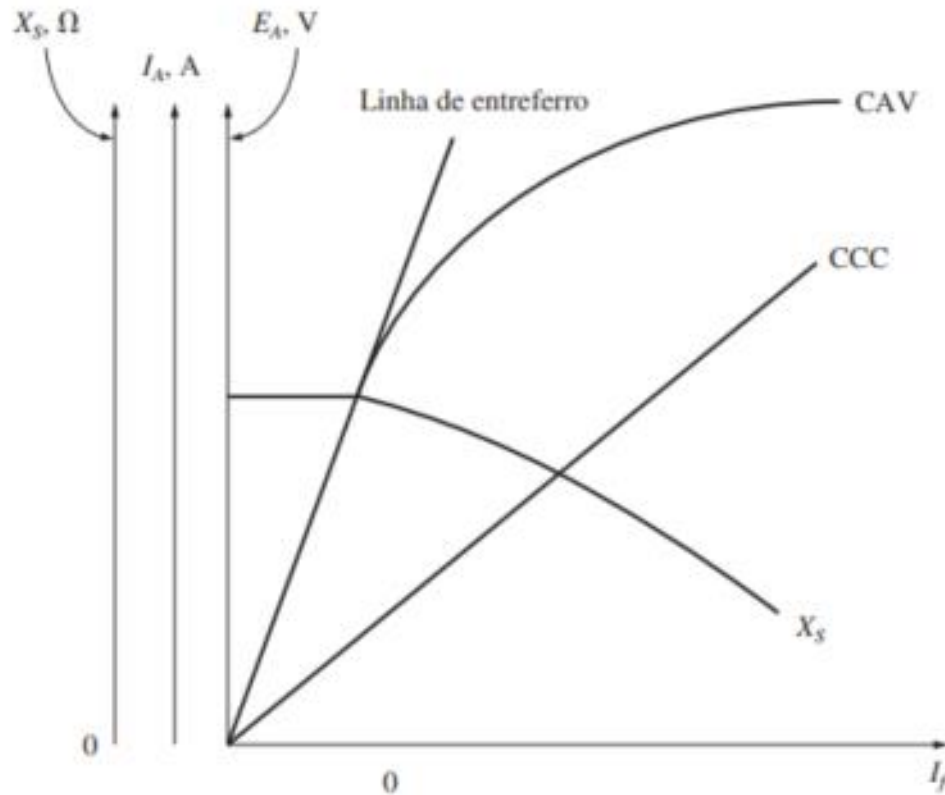
Um ensaio a vazio em um gerador síncrono trifásico de 60 Hz, mostra que uma tensão nominal a vazio de 13,8 KV é produzida por uma corrente de campo de 318 A. Extrapolando a linha do entreferro a partir do conjunto de medidas feitas na máquina, pode-se mostrar que a corrente de campo correspondente a 13,8 KV sobre a linha de entreferro é 263 A. Calcule os valores saturado e não saturado de L_{af} .

$$L_{af,s} = \frac{\sqrt{2} \cdot E_{af}}{\omega_e \cdot I_f} = \frac{\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} 13,8 \cdot 10^3}{377 \cdot 318} = 94 \text{ mH}$$

$$L_{af,ns} = \frac{\sqrt{2} \cdot E_{af}}{\omega_e \cdot I_f} = \frac{\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} 13,8 \cdot 10^3}{377 \cdot 263} = 114 \text{ mH}$$

Característica a Vazio

- Impacto da variação na indutância mútua
 - Saturada e não saturada, na reatância síncrona:



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

Características a Vazio

- Quando o campo é excitado
 - Potência mecânica é igual as perdas mecânicas e perdas no núcleo

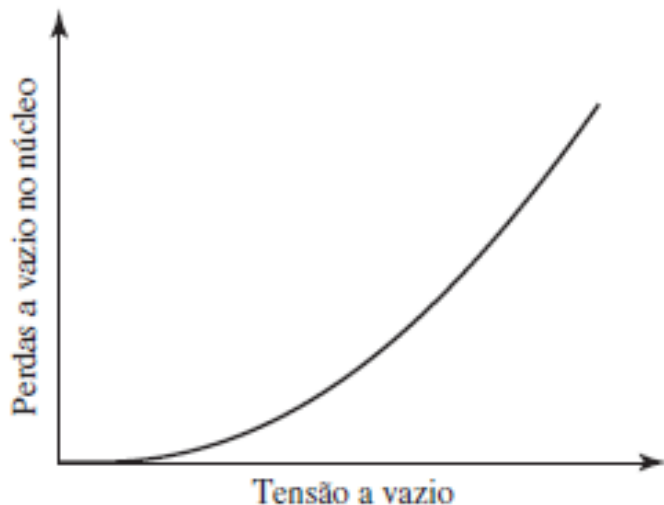


$$P_{mec} = P_{vazio}$$

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

Características a Vazio

- Quando o campo é excitado
 - Potência mecânica é igual as perdas mecânicas e perdas no núcleo



$$P_{mec} = P_{vazio}$$

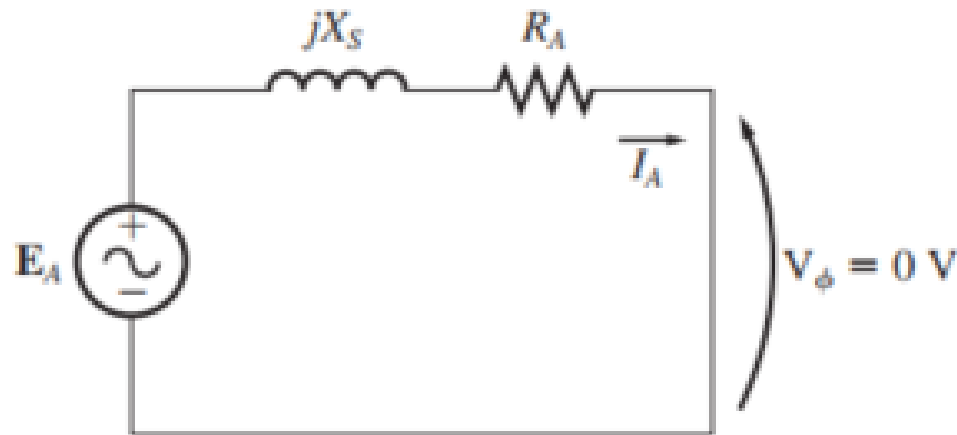
$$P_{fe} = P_{mec} - P_{AV}$$

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

- Perdas no ferro de interesse em determinada tensão, geralmente

Característica de Curto-Circuito

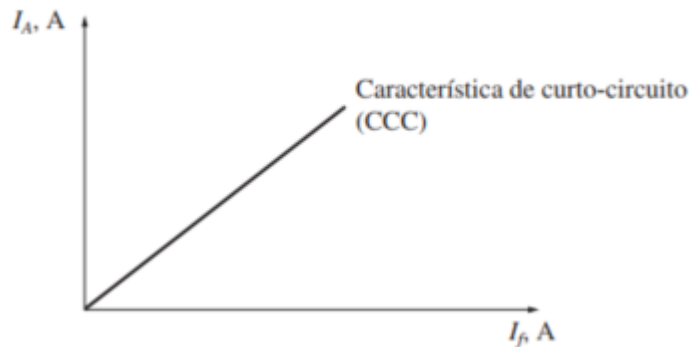
- Ensaio de Curto-Circuito
 - Aplicação de curto-circuito nos terminais da armadura



$$I_A = \frac{E_A}{R_A + jX_S}$$

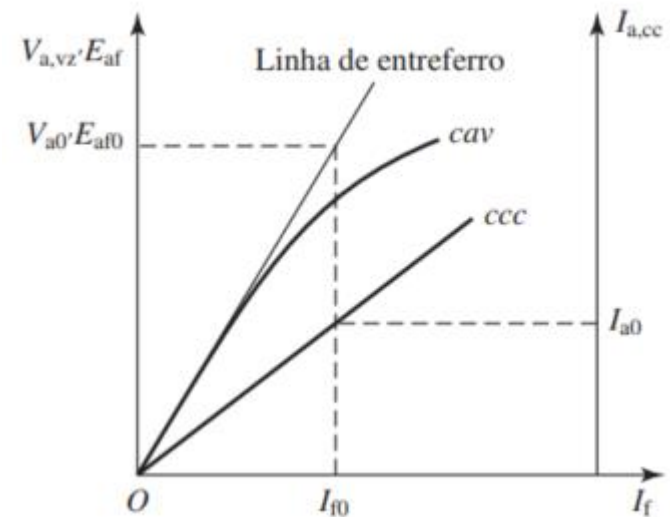
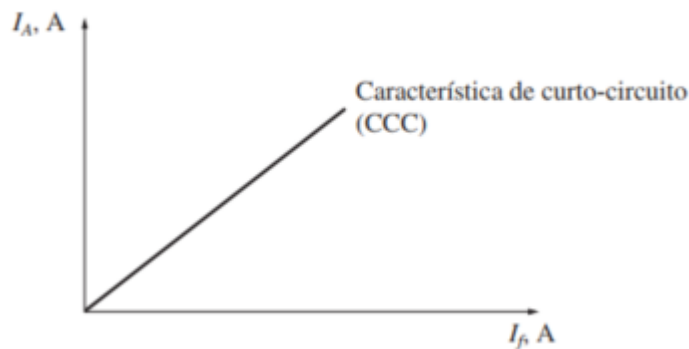
Característica de Curto-Circuito

- Ensaio de Curto-Circuito
 - Gerar a característica de curto-circuito (*ccv*)



Característica de Curto-Circuito

- Ensaio de Curto-Circuito
 - Gerar a característica de curto-circuito (*ccv*)



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

Característica de Curto-Circuito

- Ensaio de Curto-Circuito
 - Aplicação de curto-circuito nos terminais do gerador
 - Máquina já acionada na velocidade síncrona

Característica de Curto-Circuito

- Ensaio de Curto-Circuito
 - Aplicação de curto-circuito nos terminais do gerador
 - Máquina já acionada na velocidade síncrona
 - Monta-se o gráfico
 - Corrente de excitação por corrente de armadura

Característica de Curto-Circuito

■ Ensaio de Curto-Circuito

- ❑ Aplicação de curto-circuito nos terminais do gerador
- ❑ Máquina já acionada na velocidade síncrona
- ❑ Monta-se o gráfico
 - Corrente de excitação por corrente de armadura
- ❑ Armadura em curto-circuito
 - Tensão terminal nula

$$\hat{E}_{af} = \hat{I}_a \cdot (R_a + jX_s)$$

Característica de Curto-Circuito

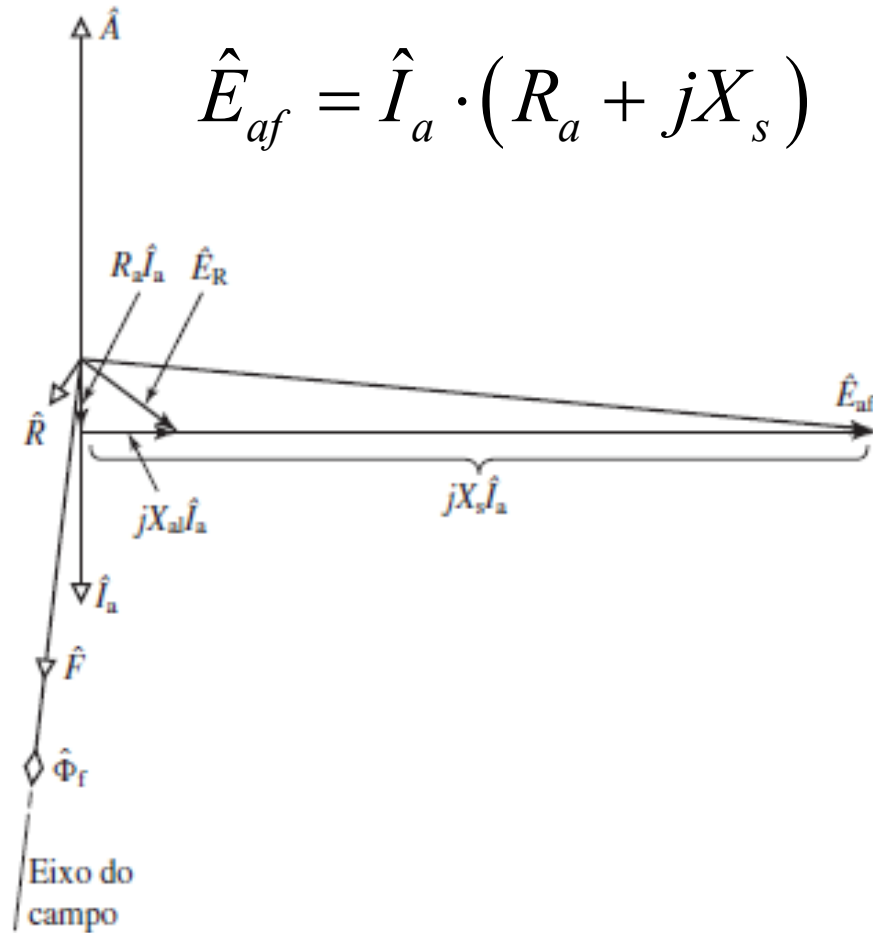
- Característica de $\hat{E}_{af} = \hat{I}_a \cdot (R_a + jX_s)$ curto-circuito
 - Diagrama fasorial

Característica de Curto-Circuito

- Característica curto-circuito
 - Diagrama fasorial

de

$$\hat{E}_{af} = \hat{I}_a \cdot (R_a + jX_s)$$



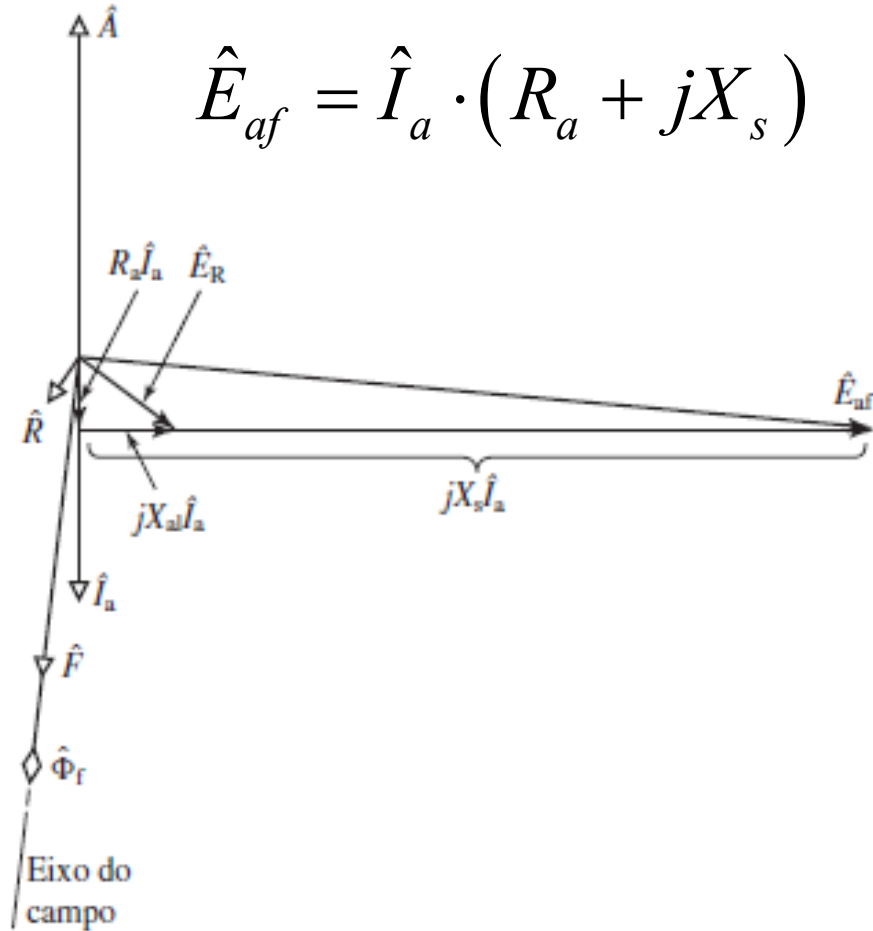
Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

Característica de Curto-Circuito

■ Característica de curto-circuito

- ❑ Diagrama fasorial
- ❑ FMM de armadura oposta ao campo (eixos A e F)

$$\hat{E}_{af} = \hat{I}_a \cdot (R_a + jX_s)$$



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

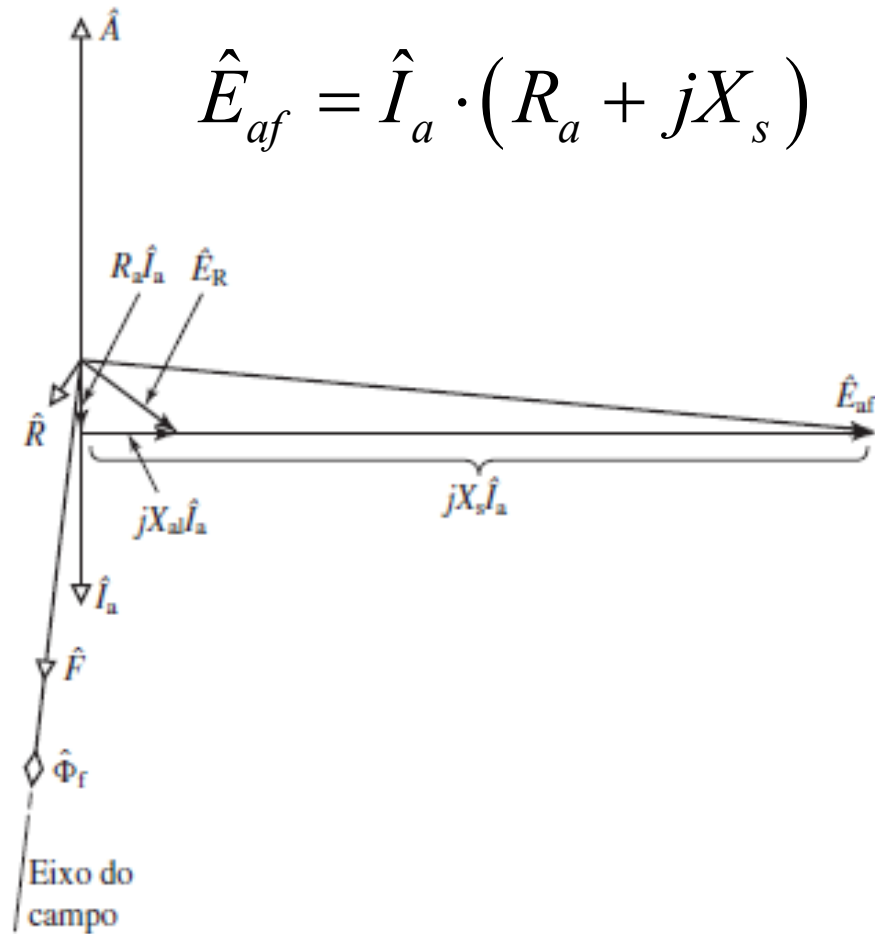
Característica de Curto-Circuito

- Característica de curto-circuito
 - Diagrama fasorial
 - FMM de armadura oposta ao campo (eixos A e F)

$$\hat{E}_{af} = \hat{I}_a R_a + jX_s \hat{I}_a = \hat{I}_a R_a + jX_{sl} \hat{I}_a + jX_{s0} \hat{I}_a$$

$$\hat{E}_{af} = \hat{I}_a R_a + jX_{sl} \hat{I}_a + jX_{s0} \hat{I}_a$$

$$\hat{E}_{af} = \hat{E}_R + jX_{s0} \hat{I}_a$$

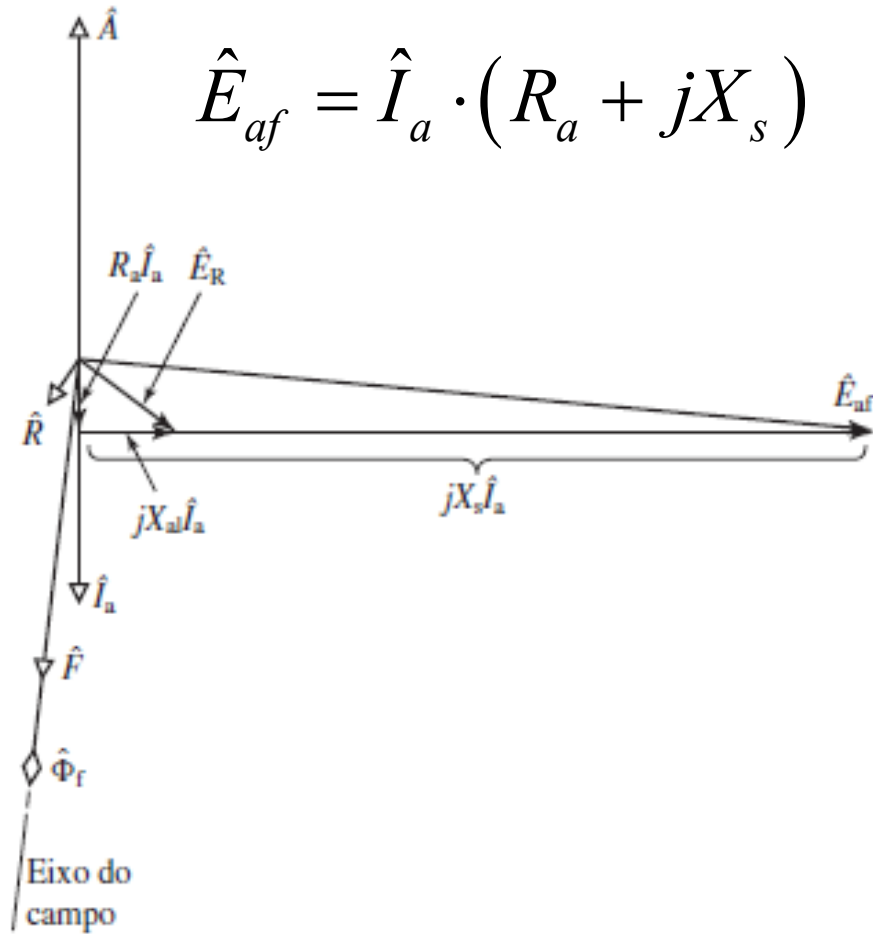
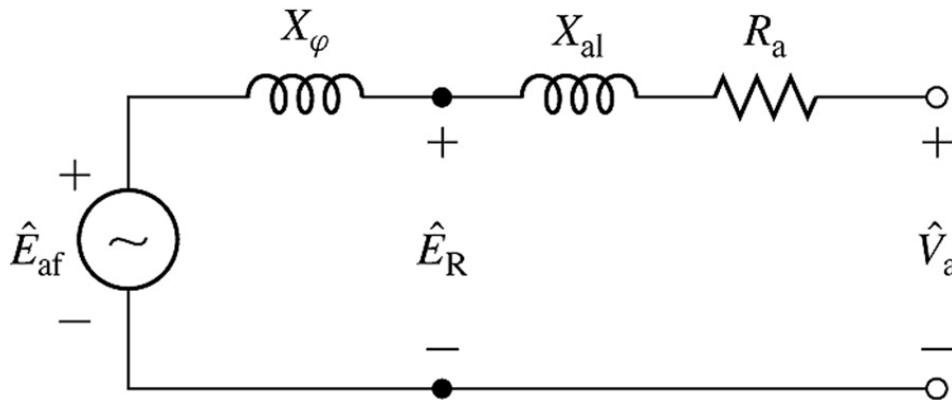


Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

- **Característica curto-circuito**

$$\hat{E}_{af} = \hat{I}_a \cdot (R_a + jX_s)$$

$$\hat{E}_{af} - jX_{s0}\hat{I}_a = \hat{I}_a R_a + jX_{sl}\hat{I}_a$$



154

Característica de Curto-Circuito

■ Característica curto-circuito

de

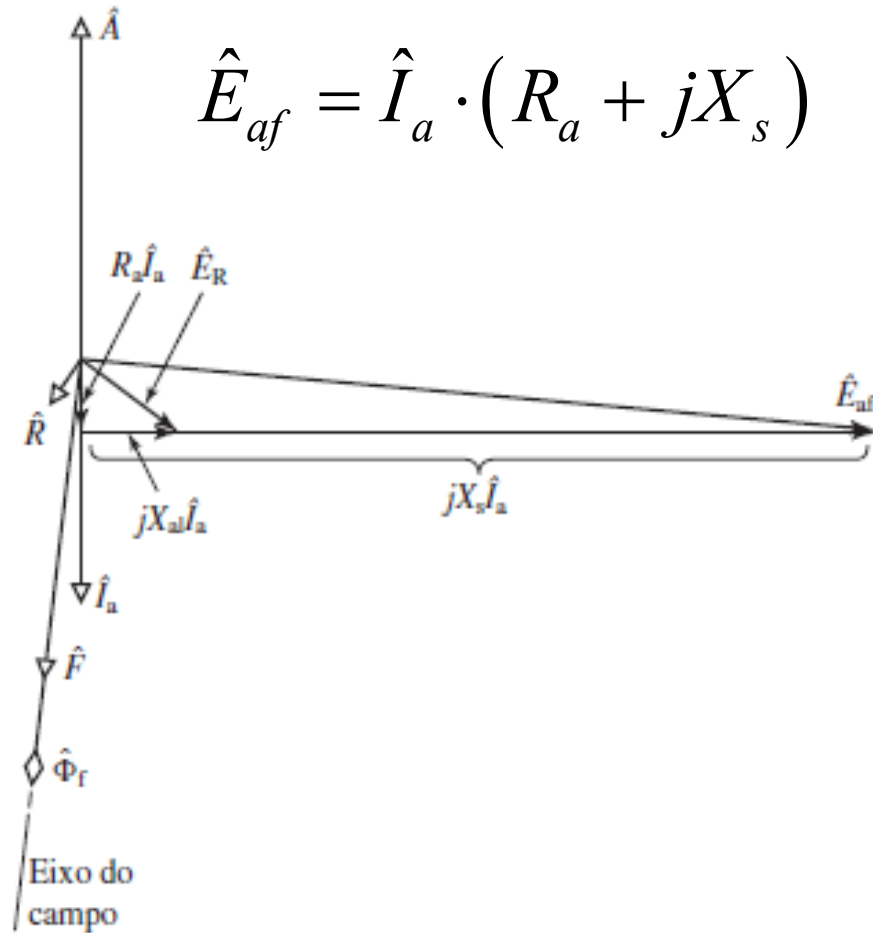
$$\hat{E}_{af} = \hat{I}_a \cdot (R_a + jX_s)$$

$$\hat{E}_{af} - jX_{s0}\hat{I}_a = \hat{I}_a R_a + jX_{sl}\hat{I}_a$$

$$\hat{E}_{af} - jX_{s0}\hat{I}_a = \hat{E}_R$$

$$\hat{E}_R = \hat{I}_a R_a + jX_{sl}\hat{I}_a$$

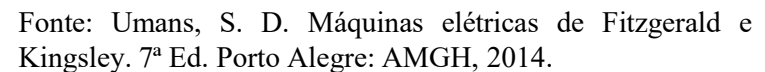
$$\hat{E}_R = \hat{I}_a \cdot (R_a + jX_{sl})$$



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

■ Característica de curto-circuito

- $$\hat{E}_R = \hat{I}_a \cdot (R_a + jX_{sl})$$



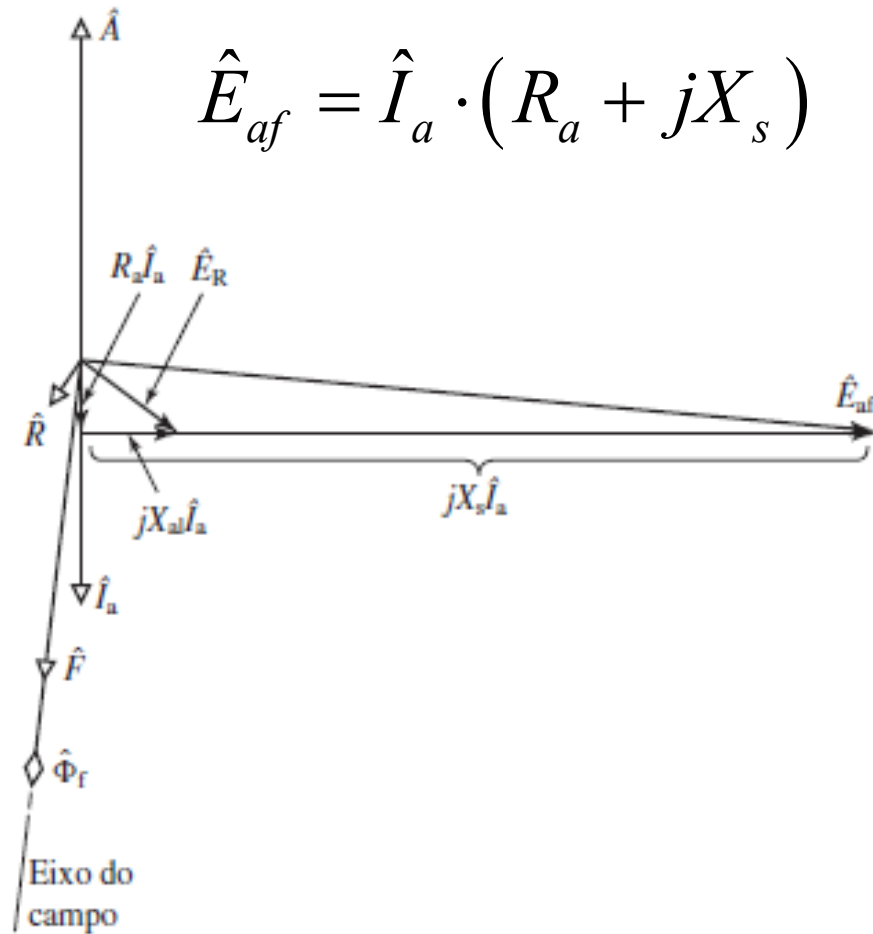
Característica de Curto-Circuito

■ Característica de curto-circuito

- \hat{E}_R é mais relacionado a magnetização que \hat{E}_{af}

$$\hat{E}_R = \hat{I}_a \cdot (R_a + jX_{sl})$$

$$\hat{E}_R = \hat{I}_a \cdot jX_{sl}$$



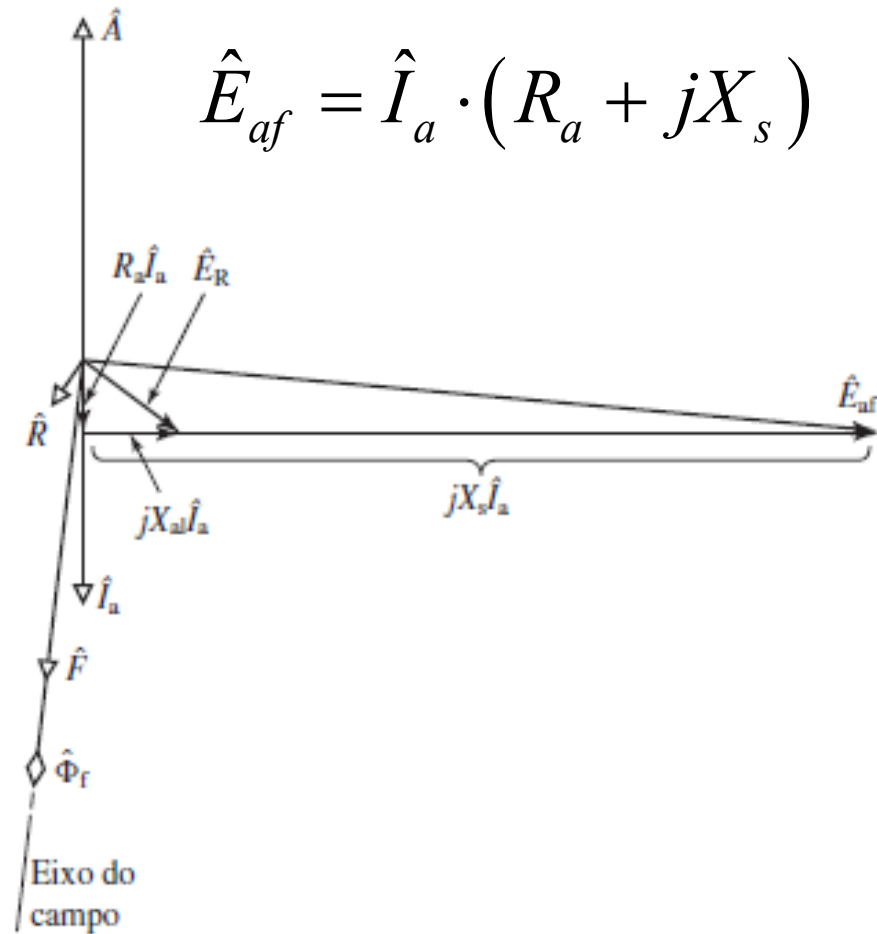
Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

Característica de Curto-Circuito

- Característica de curto-circuito
 - \hat{E}_R é mais relacionado a magnetização que \hat{E}_{af}
 - Curva da corrente de campo em função da corrente de armadura

$$\hat{E}_R = \hat{I}_a \cdot (R_a + jX_{sl})$$

$$\hat{E}_R = \hat{I}_a \cdot jX_{sl}$$



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

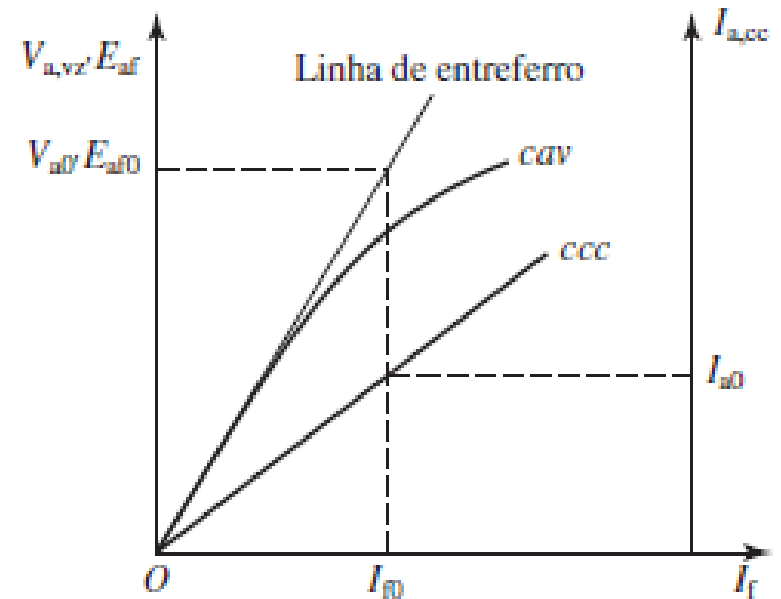
Característica de Curto-Circuito

■ Característica de curto-circuito

- Curva da corrente de campo em função da corrente de armadura

$$\hat{E}_R = \hat{I}_a \cdot jX_{sl}$$

$$E_R \propto I_a$$

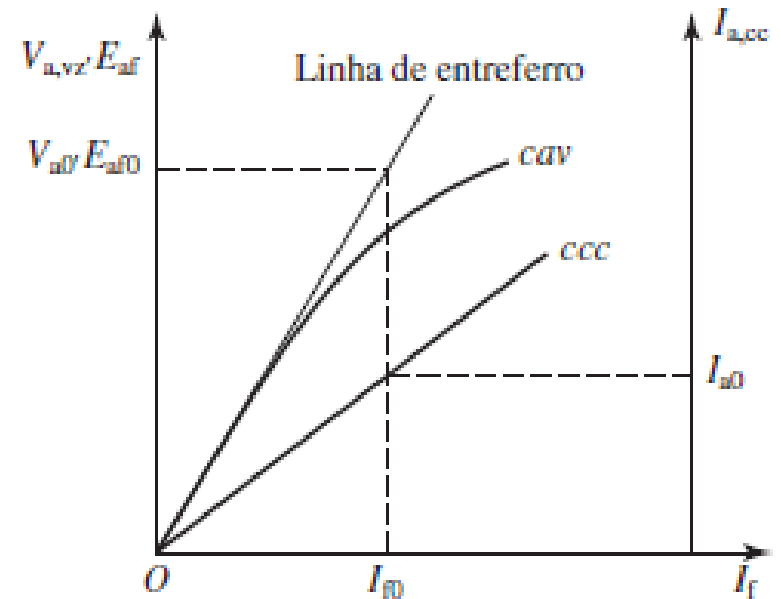


Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

Característica de Curto-Circuito

■ Característica de curto-circuito

- Devido a baixas tensões de armadura envolvidas no ensaio
- Tensão de armadura é próxima da tensão de entreferro



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

$$\hat{E}_{af} - jX_{s0} \Downarrow \cdot \hat{I}_a = \hat{E}_R \rightarrow \hat{E}_{af} \approx \hat{E}_R$$

Característica de Curto-Circuito

- Ordem de grandezas
 - Reatância de dispersão:
0,1 a 0,2 pu

Característica de Curto-Circuito

- Ordem de grandezas
 - Reatância de dispersão:
0,1 a 0,2 pu
 - Tensão de entreferro:
0,1 a 0,2 pu

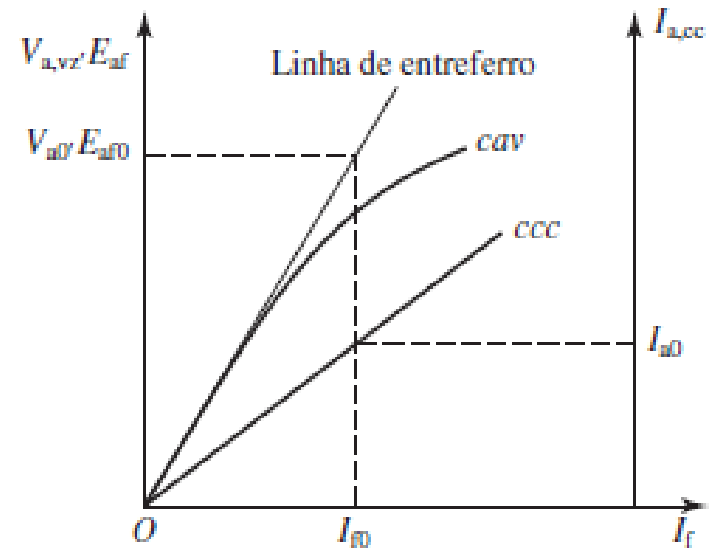
Característica de Curto-Circuito

- Ordem de grandezas
 - ❑ Reatância de dispersão:
0,1 a 0,2 pu
 - ❑ Tensão de entreferro:
0,1 a 0,2 pu
 - ❑ Máquina operando em condições não saturadas

Característica de Curto-Circuito

■ Ordem de grandezas

- ❑ Reatância de dispersão: 0,1 a 0,2 pu
- ❑ Tensão de entreferro: 0,1 a 0,2 pu
- ❑ Máquina operando em condições não saturadas



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

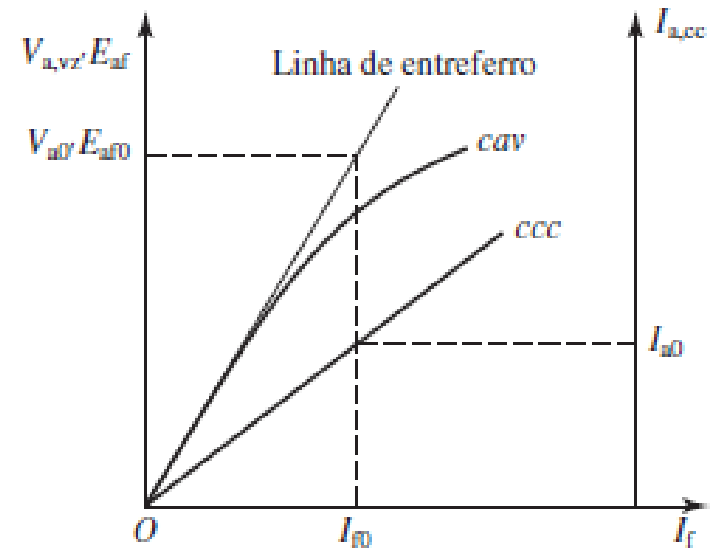
Característica de Curto-Circuito

■ Ordem de grandezas

- ❑ Reatância de dispersão: 0,1 a 0,2 pu
- ❑ Tensão de entreferro: 0,1 a 0,2 pu
- ❑ Máquina operando em condições não saturadas

■ Reatância síncrona não saturada

- ❑ E_{af0} e I_{a0} quaisquer

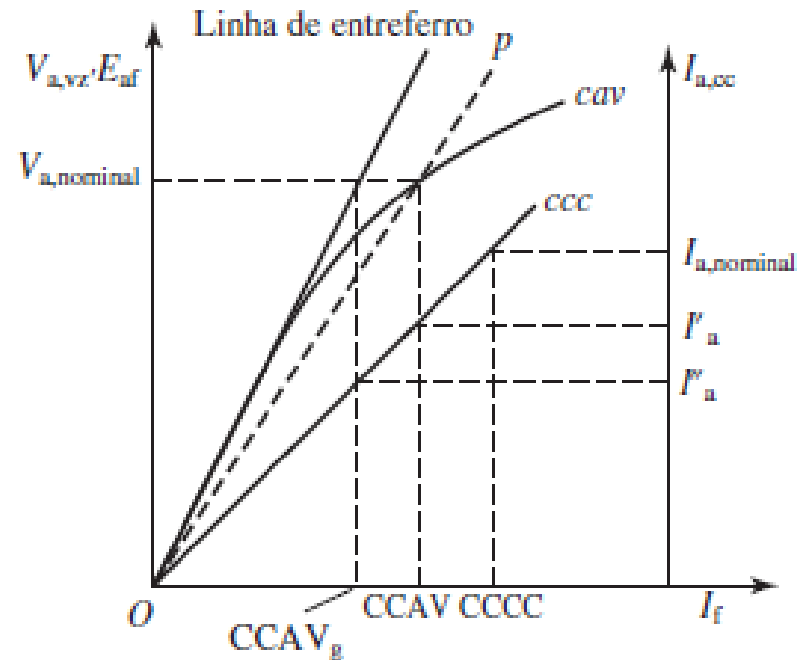


Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

$$X_{s,ns} = \frac{E_{af0}}{I_{a0}}$$

Característica de Curto-Circuito

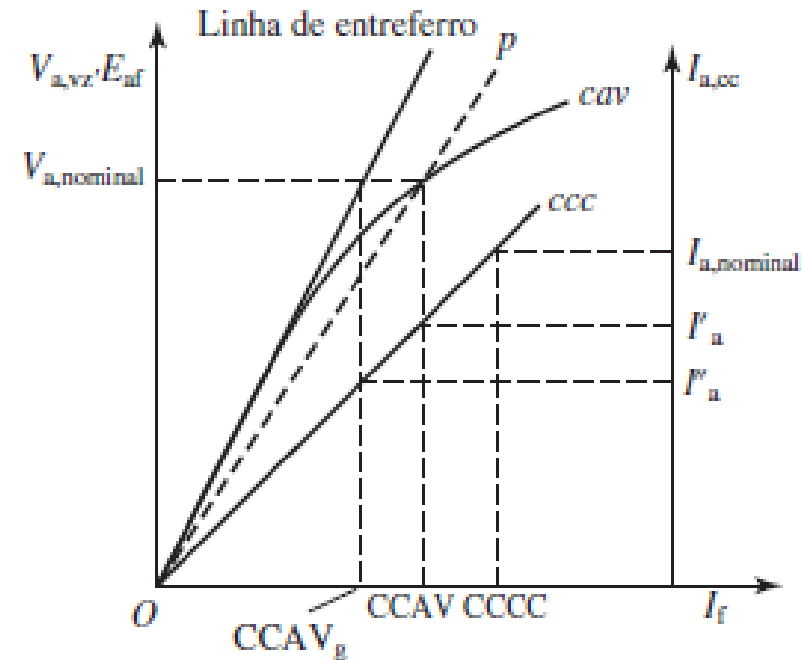
- Máquina operando na tensão nominal



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

Característica de Curto-Circuito

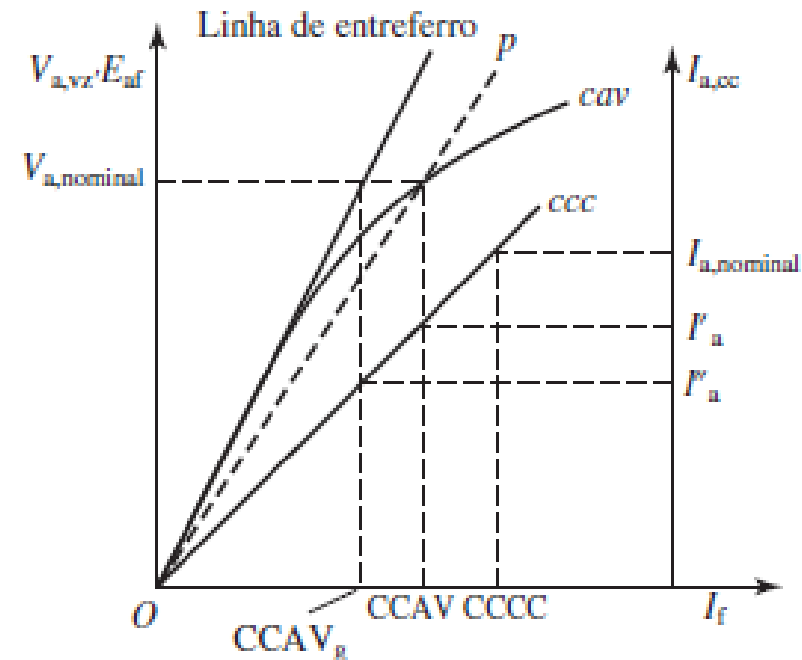
- Máquina operando na tensão nominal
 - Considera-se equivalente a uma máquina não-saturada (linha 0p)



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

Característica de Curto-Circuito

- Máquina operando na tensão nominal
 - Considera-se equivalente a uma máquina não-saturada (linha 0p)
 - Possibilita utilizar o circuito equivalente



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

Característica de Curto-Circuito

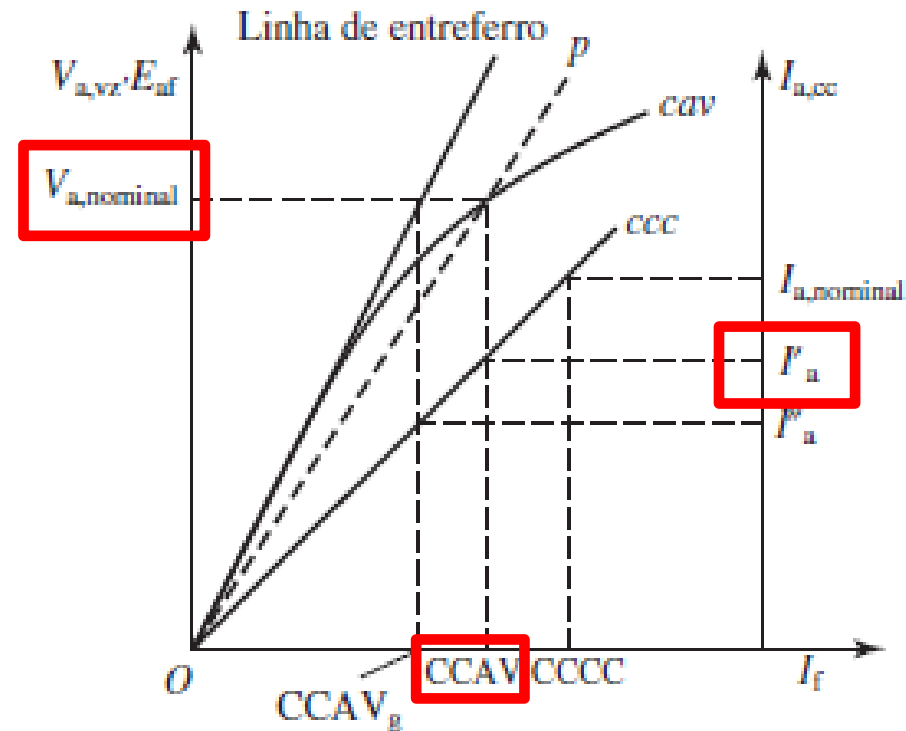
■ Máquina operando na tensão nominal

- Considera-se equivalente a uma máquina não-saturada (linha 0p)

- Possibilita utilizar o circuito equivalente

- Reatância síncrona saturada

$$X_s = X_{s,s} = \frac{V_{a,nominal}}{I'_a}$$

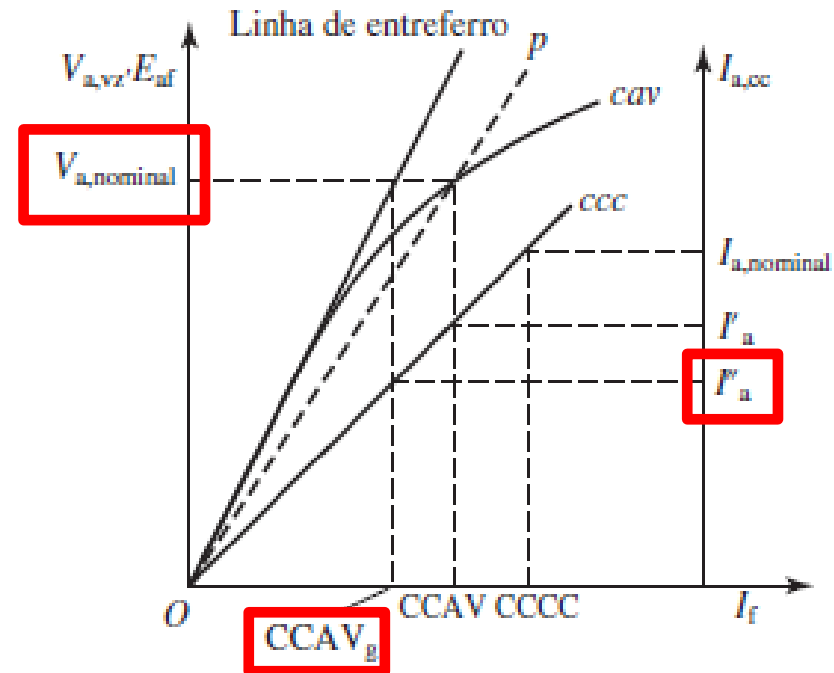


Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

Característica de Curto-Circuito

- Reatância síncrona não saturada:

$$X_{s,ns} = \frac{E_{af0}}{I_{a0}} = \frac{V_{a,nominal}}{I_a''}$$



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

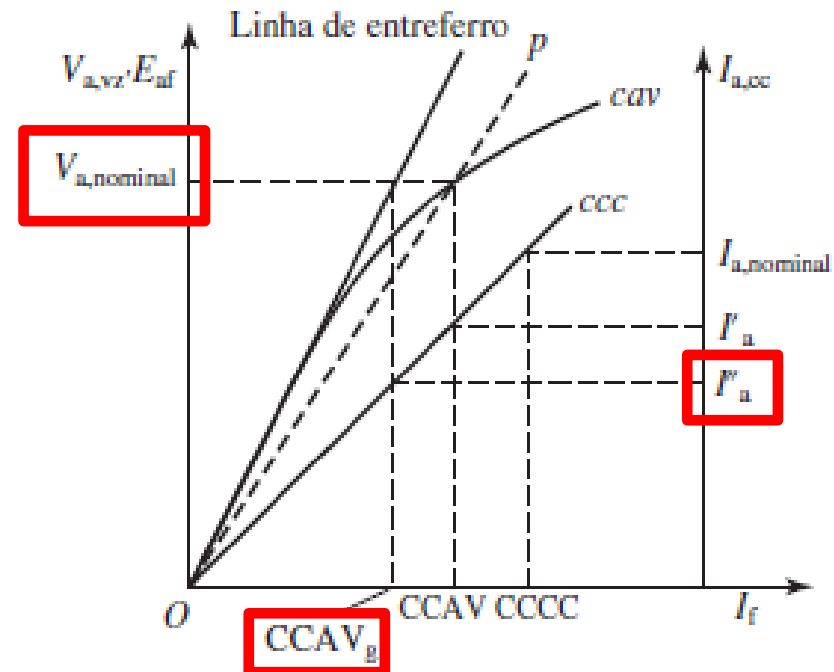
Característica de Curto-Circuito

- Reatância síncrona não saturada:

$$X_{s,ns} = \frac{E_{af0}}{I_{a0}} = \frac{V_{a,nominal}}{I_a''}$$

- Fluxo no entreferro e nível de saturação:

- Em torno de um tensão constante, é quase invariável



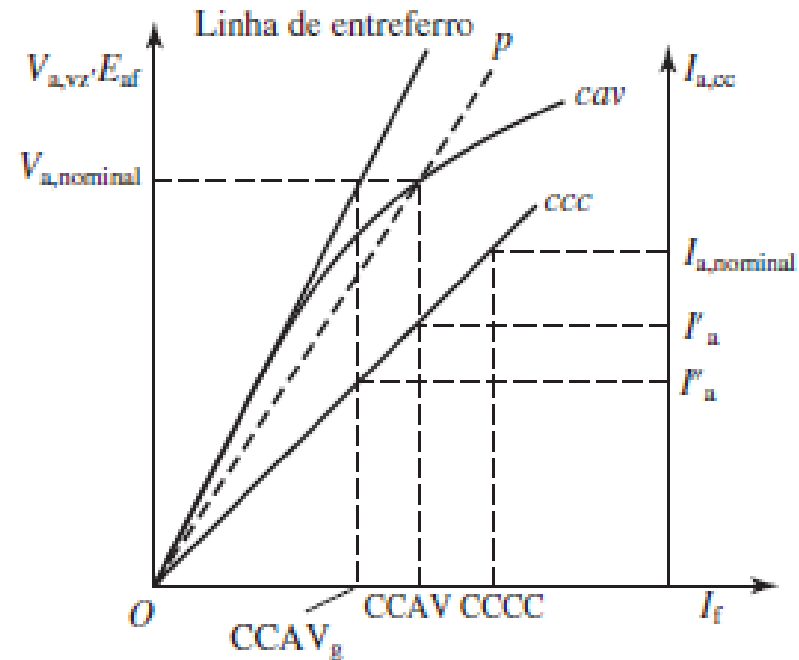
Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

Relação linear entre I_f e E_{af}

Característica de Curto-Circuito

■ Nomeando:

- CCAV: Corrente de Campo A Vazio (I'_a)

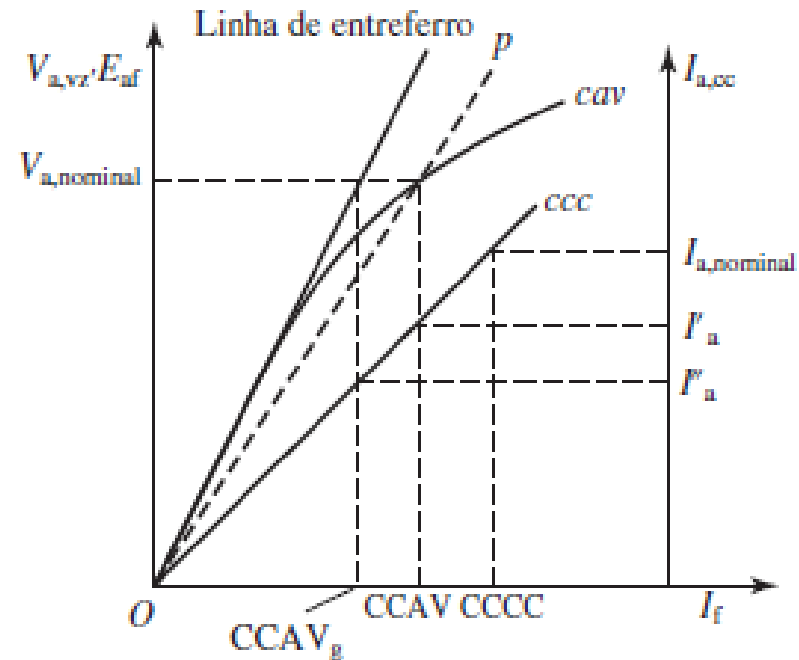


Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

Característica de Curto-Circuito

■ Nomeando:

- CCAV: Corrente de Campo A Vazio (I'_a)
- CCCC: Corrente de Campo em Curto-Circuito ($I_{a,nominal}$)

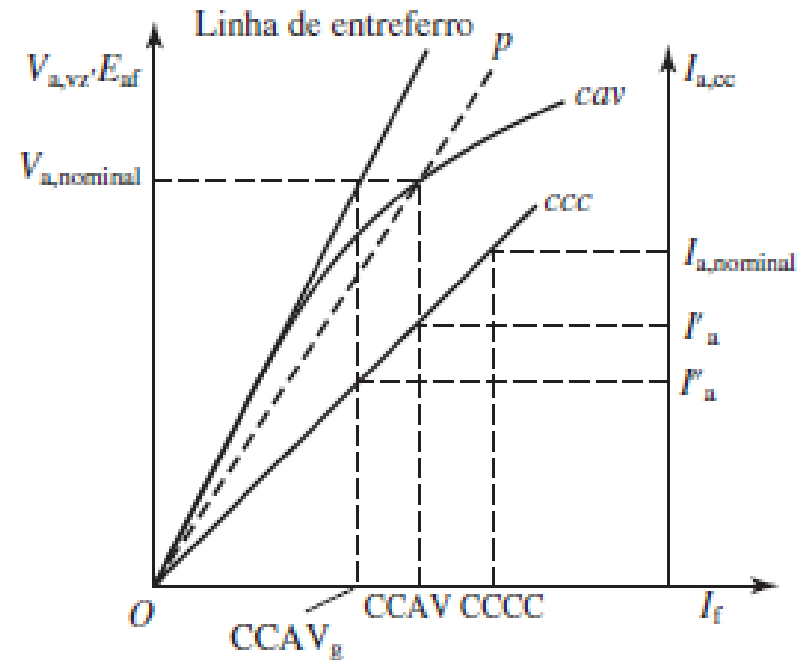


Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

Característica de Curto-Circuito

■ Nomeando:

- CCAV: Corrente de Campo A Vazio (I'_a)
- CCCC: Corrente de Campo em Curto-Circuito ($I_{a,nominal}$)
- CCAV_g: Corrente de Campo A Vazio na linha do entreferro (**g**) (I''_a)

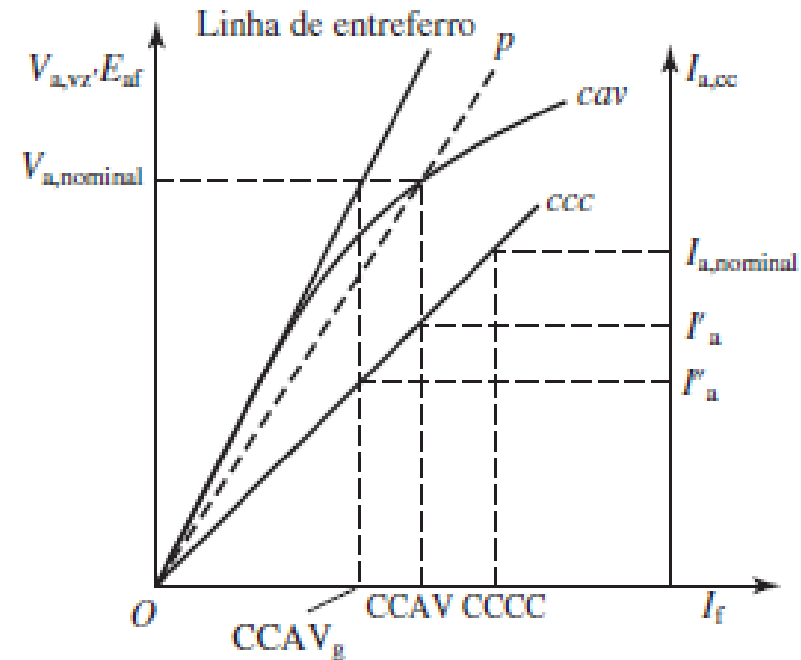


Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

Característica de Curto-Circuito

- Observando a ccc, $I_{a,cc}$ e I_f

$$\frac{I_{a,cc}}{I_{a,nominal}} = \frac{I_f}{CCCC}$$



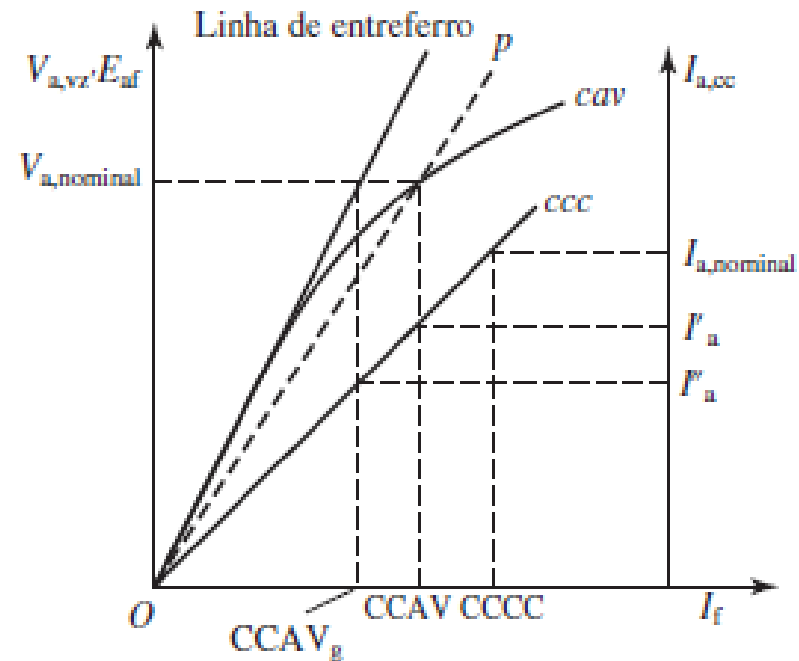
Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

Característica de Curto-Circuito

- Observando a ccc, $I_{a,cc}$ e I_f em p.u. e considerando valores nominais como base:

$$\frac{I_{a,cc}}{I_{a,nominal}} = \frac{I_f}{C CCC}$$

$$\frac{I_a''}{1,0} = \frac{CCAV_g}{C CCC} \rightarrow I_a'' = \frac{CCAV_g}{C CCC}$$



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

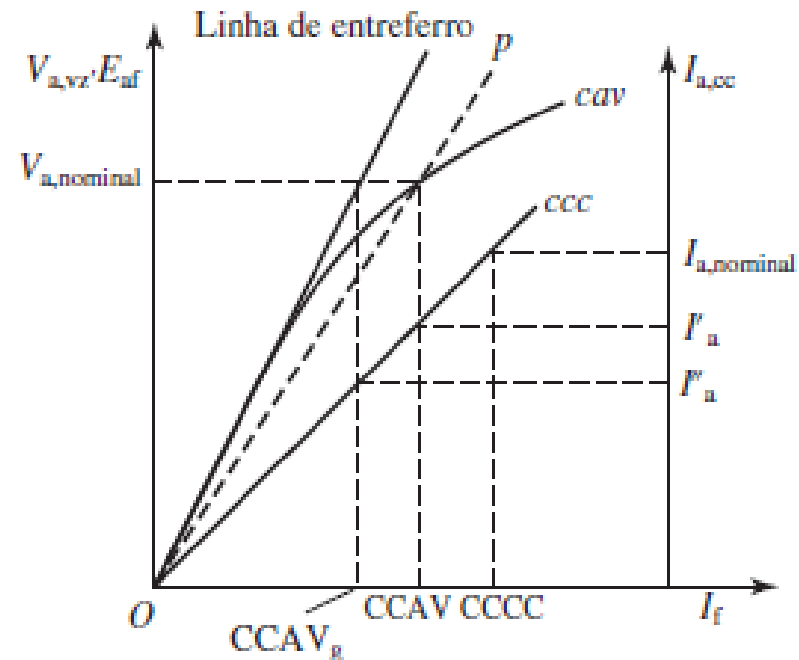
Característica de Curto-Circuito

- Observando a ccc, $I_{a,cc}$ e I_f em p.u. e considerando valores nominais como base:

$$I_{a,cc} = \frac{I_f}{C_{CCC}}$$

$$I_a'' = \frac{C_{CAV_g}}{C_{CCC}}$$

$$I_a' = \frac{C_{CAV}}{C_{CCC}}$$



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

Característica de Curto-Circuito

- Observando a ccc, $I_{a,cc}$ e I_f em p.u. e considerando valores nominais como base:

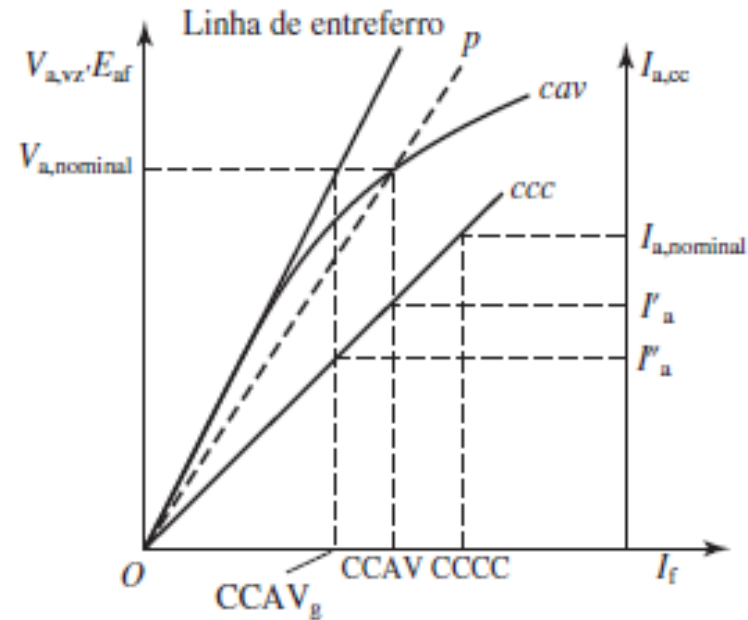
$$I_{a,cc} = \frac{I_f}{C CCC}$$

$$I_a'' = \frac{C CAV_g}{C CCC}$$

$$I_a' = \frac{C CAV}{C CCC}$$

$$X_{s,ns} (pu) = \frac{V_{a,nominal}}{I_a''} (pu) = \frac{C CCC}{C CAV_g}$$

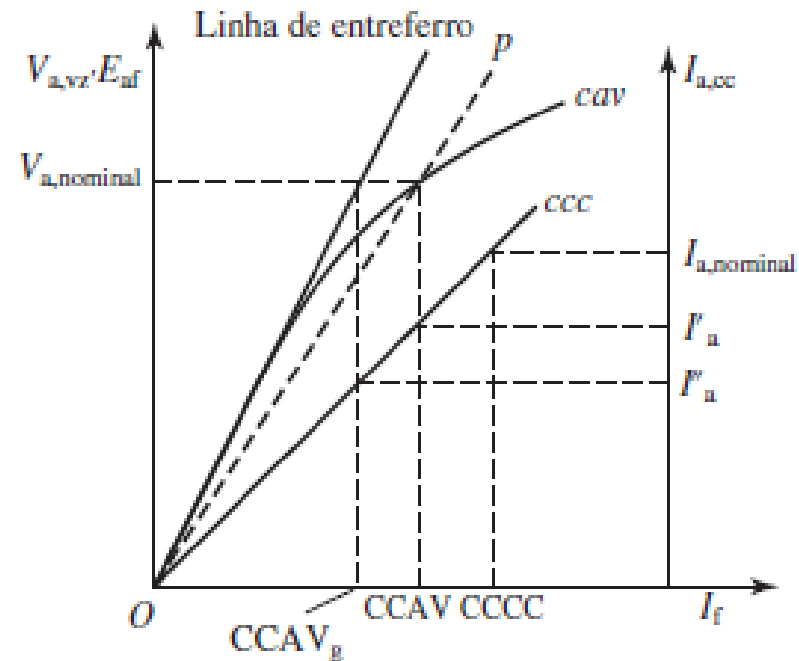
$$X_s (pu) = \frac{V_{a,nominal}}{I_a'} (pu) = \frac{C CCC}{C CAV}$$



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

Característica de Curto-Circuito

- Observando a *ccc*, $I_{a,cc}$ e I_f em p.u. e considerando valores nominais como base:
- Relação de curto-circuito (RCC)



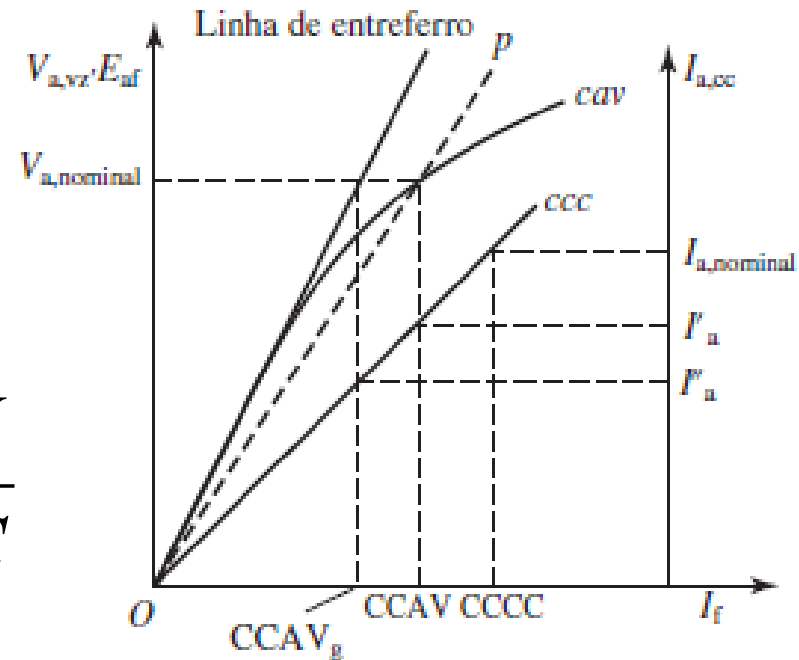
Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

$$RCC = \frac{1}{X_s (pu)} = \frac{I'_a}{V_{a,nominal}} = \frac{CCAV}{CCCC}$$

Característica de Curto-Circuito

■ Relação de curto-circuito (RCC)

$$RCC = \frac{1}{X_s} = \frac{I'_a}{V_{a,nominal}} = \frac{CCAV}{CCCC}$$



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

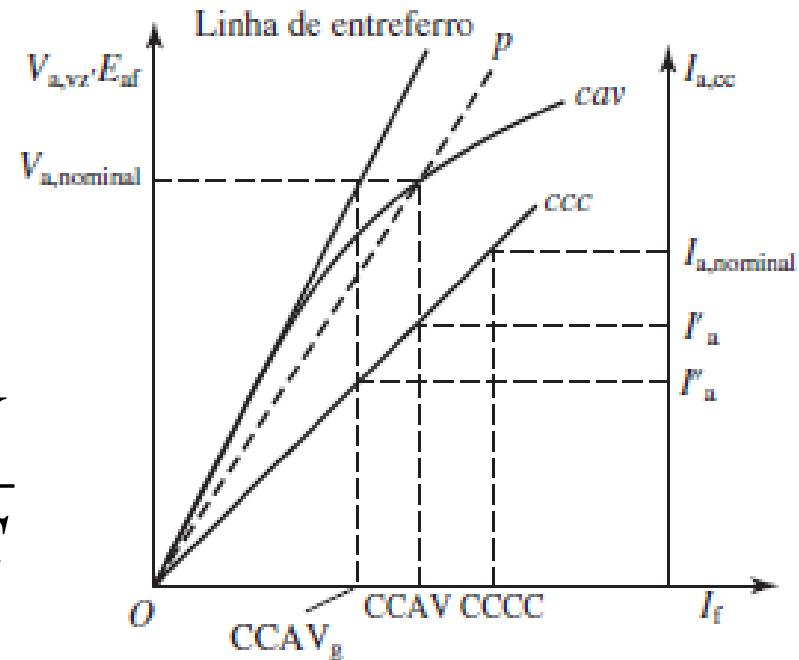
Característica de Curto-Circuito

■ Relação de curto-circuito (RCC)

$$RCC = \frac{1}{X_s} = \frac{I'_a}{V_{a,nominal}} = \frac{CCAV}{C CCC}$$

□ Devido a linha 0p:

Relação linear entre I_f e E_{af} $I_f [A] = E_{af} [pu] \cdot CCAV [A]$



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



FIM DO MÓDULO III – PARTE 1



Avaliação

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