

Conversão Eletromecânica de Energia II

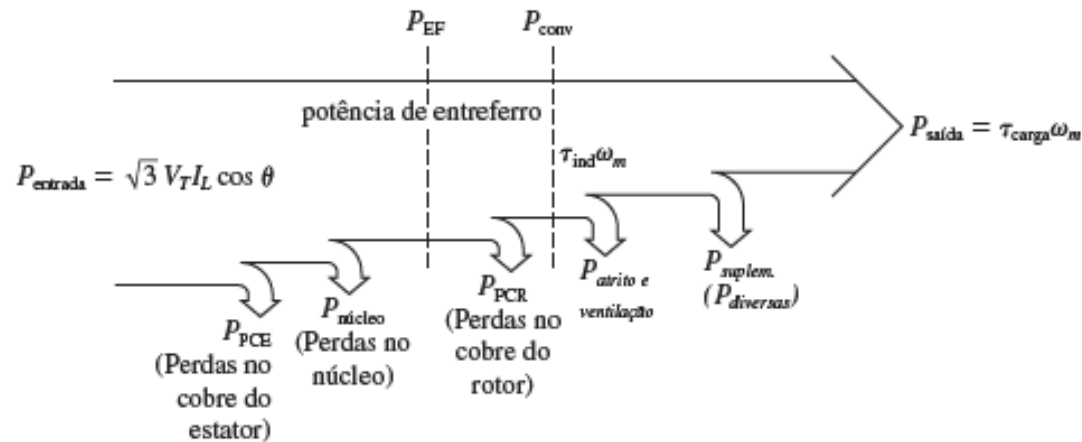
Prof. Victor Aguiar

Módulo V – Máquinas de Indução Trifásicas
Parte 2



Conjugado e Potência – Teorema de Thévenin

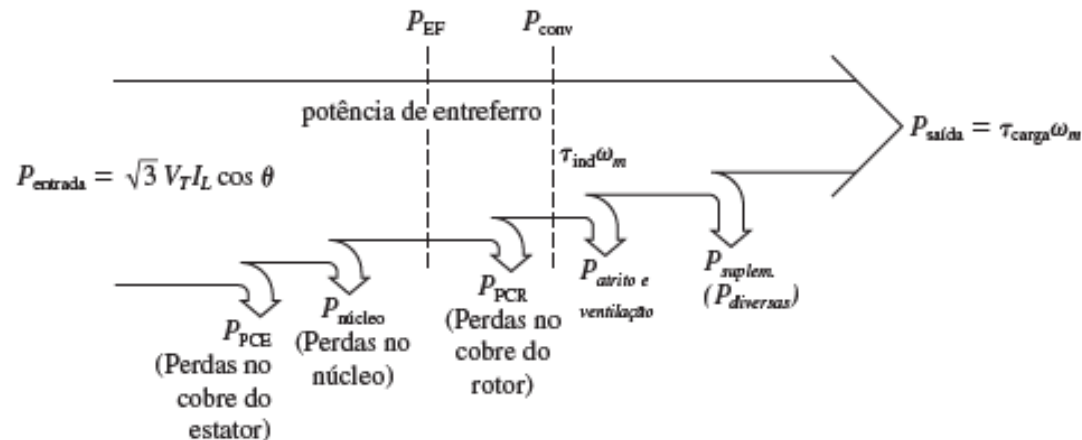
■ Diagrama de Perdas



Fonte: Chapman, S. Fundamentos de Máquinas Elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

Conjugado e Potência – Teorema de Thévenin

■ Diagrama de Perdas

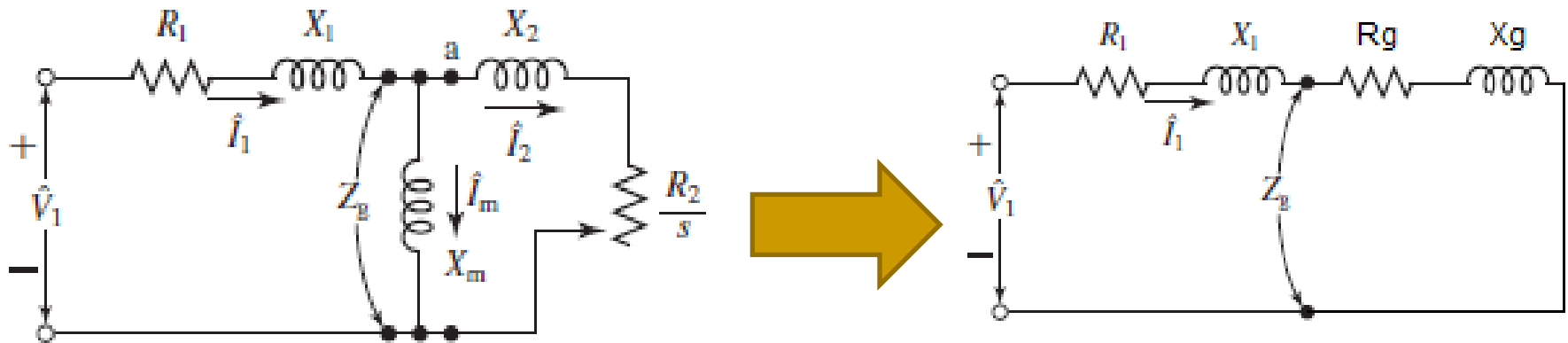


Fonte: Chapman, S. Fundamentos de Máquinas Elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

- **5 perdas** presentes na máquina.
- *Potência entregue ao entreferro e potência de conversão/potência mecânica.*

Conjugado e Potência – Teorema de Thévenin

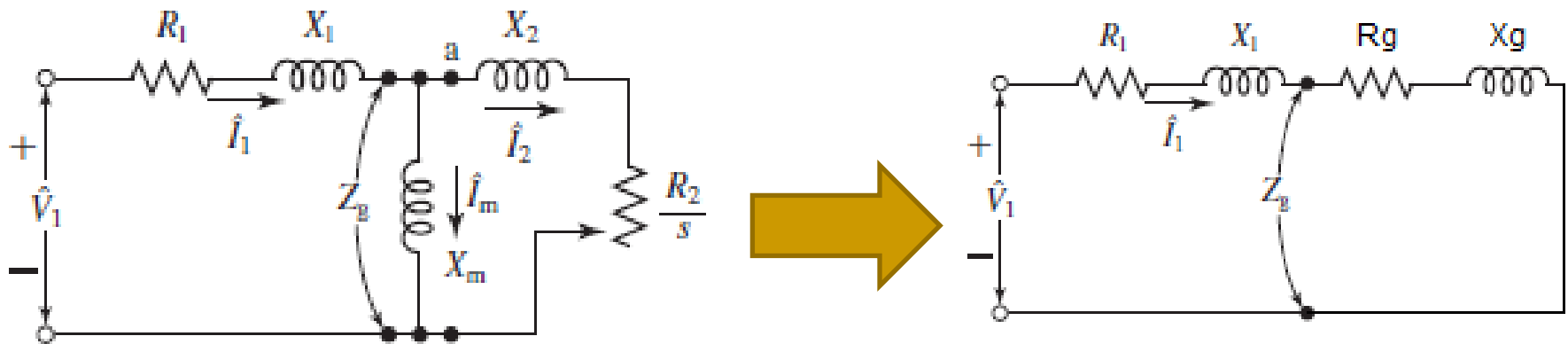
■ Na análise energética:



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

Conjugado e Potência – Teorema de Thévenin

■ Na análise energética:

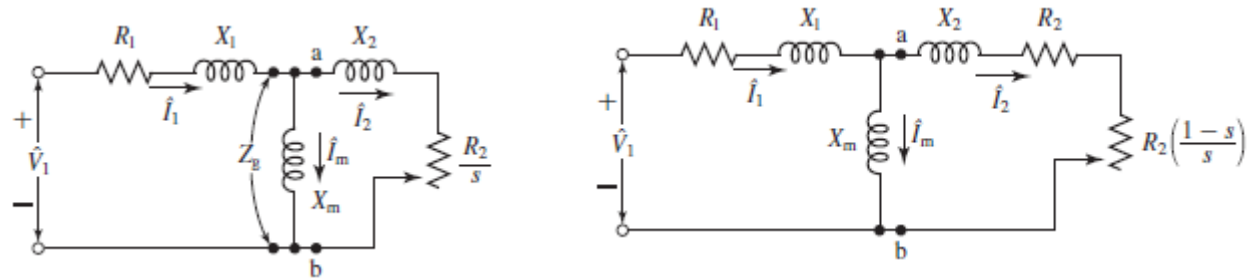


Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

- ❑ Possível verificar corrente do estator e fator de potência.
- ❑ Não considera a resistência equivalente as perdas no ferro.

Conjugado e Potência – Teorema de Thévenin

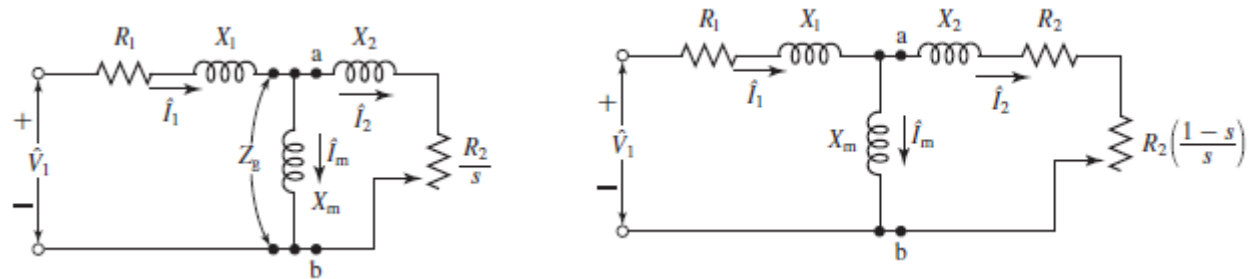
- Agora na análise de conjugado e potência por Thévenin:



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

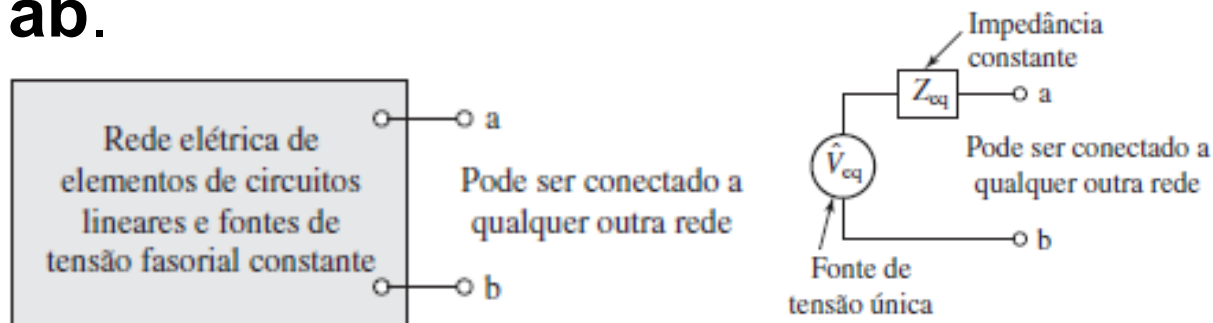
Conjugado e Potência – Teorema de Thévenin

- Agora na análise de conjugado e potência por Thévenin:



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

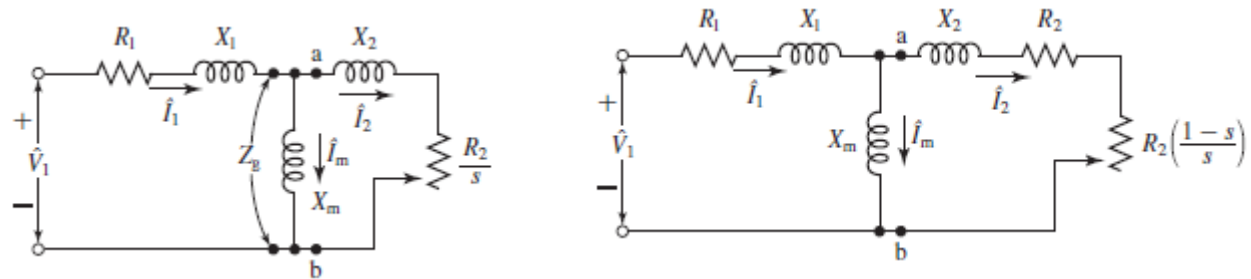
- Os CE devem ser definidos – do ramo de magnetização a carga ou **da fonte aos terminais ab.**



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

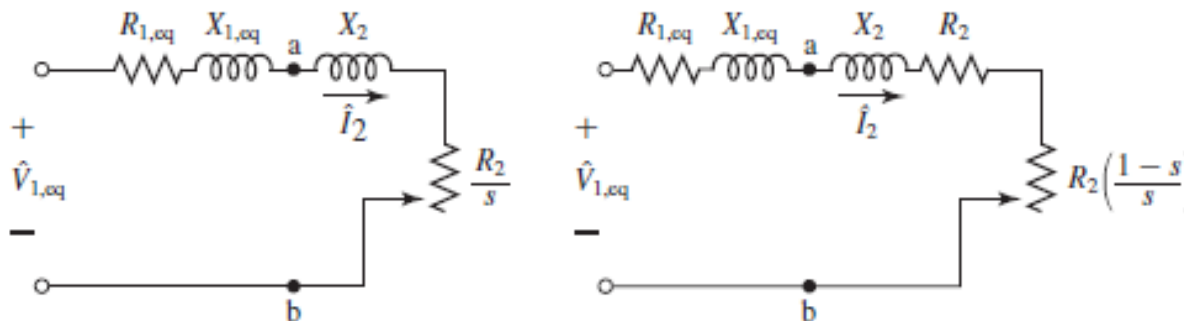
Conjugado e Potência – Teorema de Thévenin

■ Agora na análise de conjugado e potência por Thévenin:



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

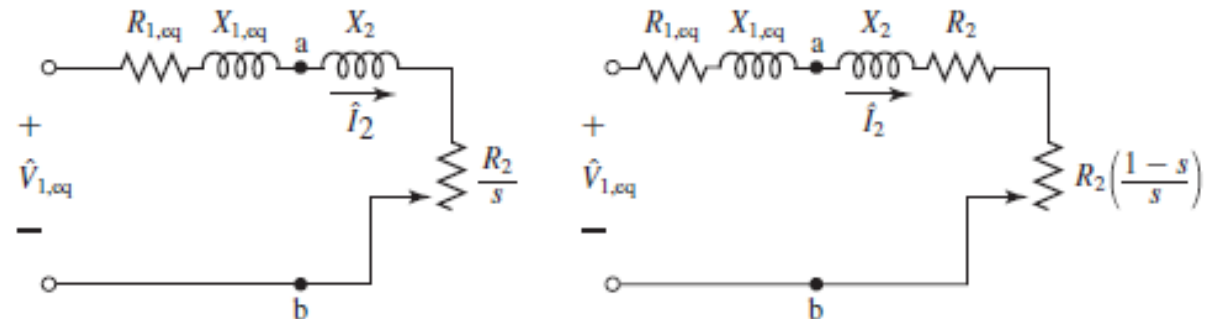
- Os CE devem ser definidos – do ramo de magnetização a carga ou **da fonte aos terminais ab.**



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

Conjugado e Potência – Teorema de Thévenin

- Agora na análise de conjugado e potência por Thévenin:



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

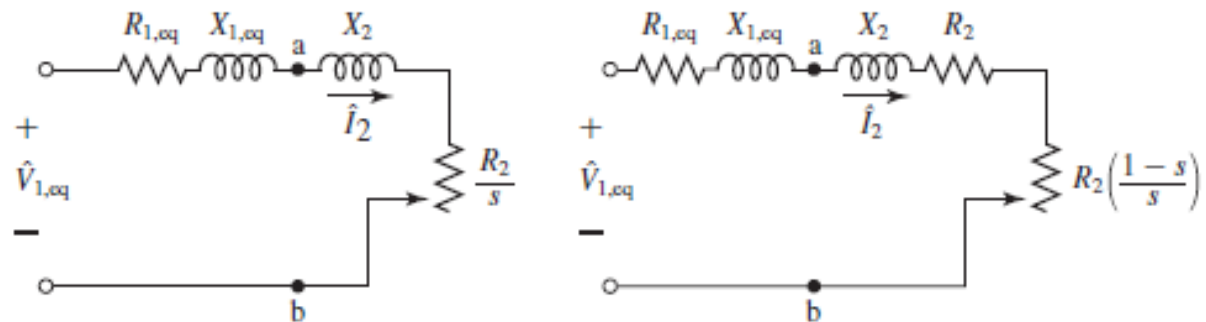
$$\hat{V}_{1,eq} = \hat{V}_1 \cdot \left[\frac{jX_m}{R_1 + j(X_1 + X_m)} \right]$$

$$Z_{1,eq} = \frac{jX_m (R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + X_m)}$$

Conjugado e Potência – Teorema de Thévenin

■ Agora na análise de conjugado e potência por Thévenin:

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



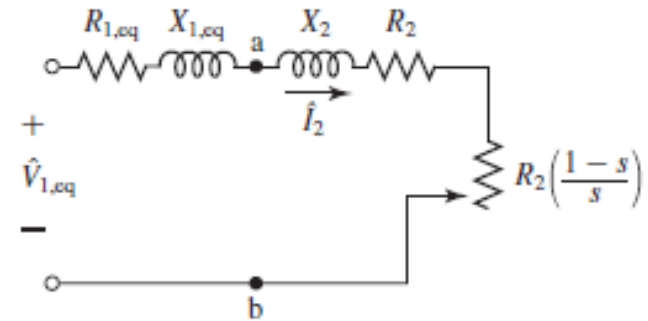
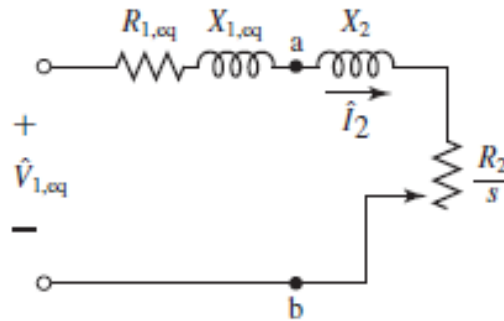
$$\hat{V}_{1,eq} = \hat{V}_1 \cdot \left[\frac{jX_m}{R_1 + j(X_1 + X_m)} \right] \quad Z_{1,eq} = \frac{jX_m (R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + X_m)} = R_{1,eq} + jX_{1,eq}$$

$$\hat{I}_2 = \frac{\hat{V}_{1,eq}}{\left(R_{1,eq} + R_2/s \right) + j(X_{1,eq} + X_2)}$$

Conjugado e Potência – Teorema de Thévenin

■ Agora na análise de conjugado e potência por Thévenin:

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



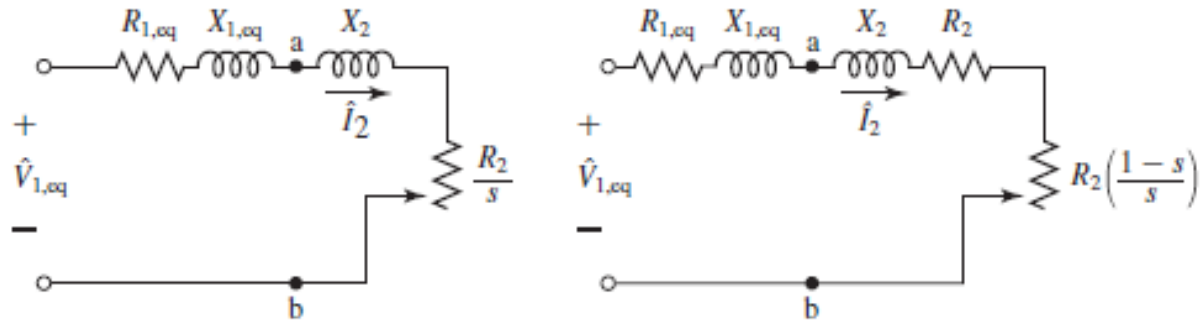
$$\hat{I}_2 = \frac{\hat{V}_{1,eq}}{\left(R_{1,eq} + R_2/s\right) + j\left(X_{1,eq} + X_2\right)}$$

$$I_2 = \frac{V_{1,eq}}{\sqrt{\left(R_{1,eq} + R_2/s\right)^2 + \left(X_{1,eq} + X_2\right)^2}}$$

Conjugado e Potência – Teorema de Thévenin

■ Agora na análise de conjugado e potência por Thévenin:

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



$$\hat{I}_2 = \frac{\hat{V}_{1,eq}}{\left(R_{1,eq} + R_2/s \right) + j \left(X_{1,eq} + X_2 \right)}$$

$$I_2 = \frac{V_{1,eq}}{\sqrt{\left(R_{1,eq} + R_2/s \right)^2 + \left(X_{1,eq} + X_2 \right)^2}}$$

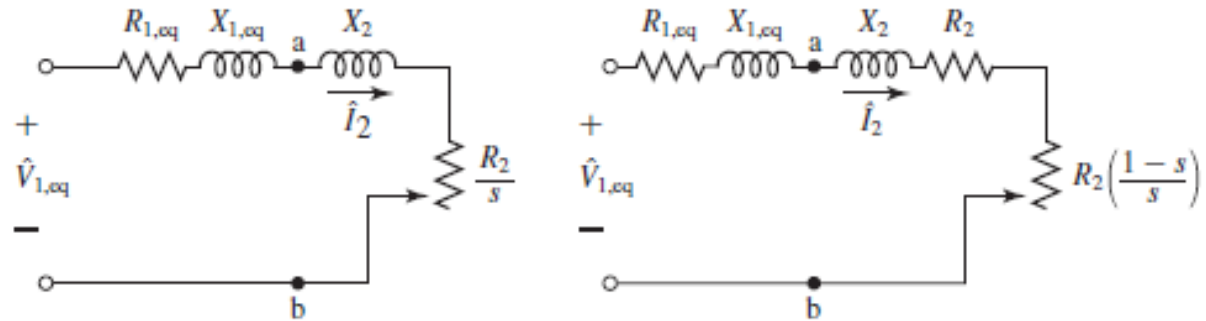
$$T_{mec} = \left(\frac{P}{2\omega_e} \right) \cdot 3 \cdot I_2^2 \cdot (R_2/s)$$



Conjugado e Potência – Teorema de Thévenin

- Agora na análise de conjugado e potência por Thévenin:

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



$$T_{mec} = \left(\frac{P}{2\omega_e} \right) \cdot \frac{3 \cdot V_{1,eq}^2 \cdot (R_2/s)}{\left(R_{1,eq} + R_2/s \right)^2 + \left(X_{1,eq} + X_2 \right)^2}$$

Conjugado e Potência – Teorema de Thévenin

- Análise do torque mecânico, tensão e frequência:

$$T_{mec} = \left(\frac{P}{2\omega_e} \right) \cdot \frac{3 \cdot V_{1,eq}^2 \cdot (R_2/s)}{\left(R_{1,eq} + R_2/s \right)^2 + \left(X_{1,eq} + X_2 \right)^2}$$

- As curvas de torque-velocidade do motor
 - Dependem da tensão de alimentação e da frequência de alimentação;

Conjugado e Potência – Teorema de Thévenin

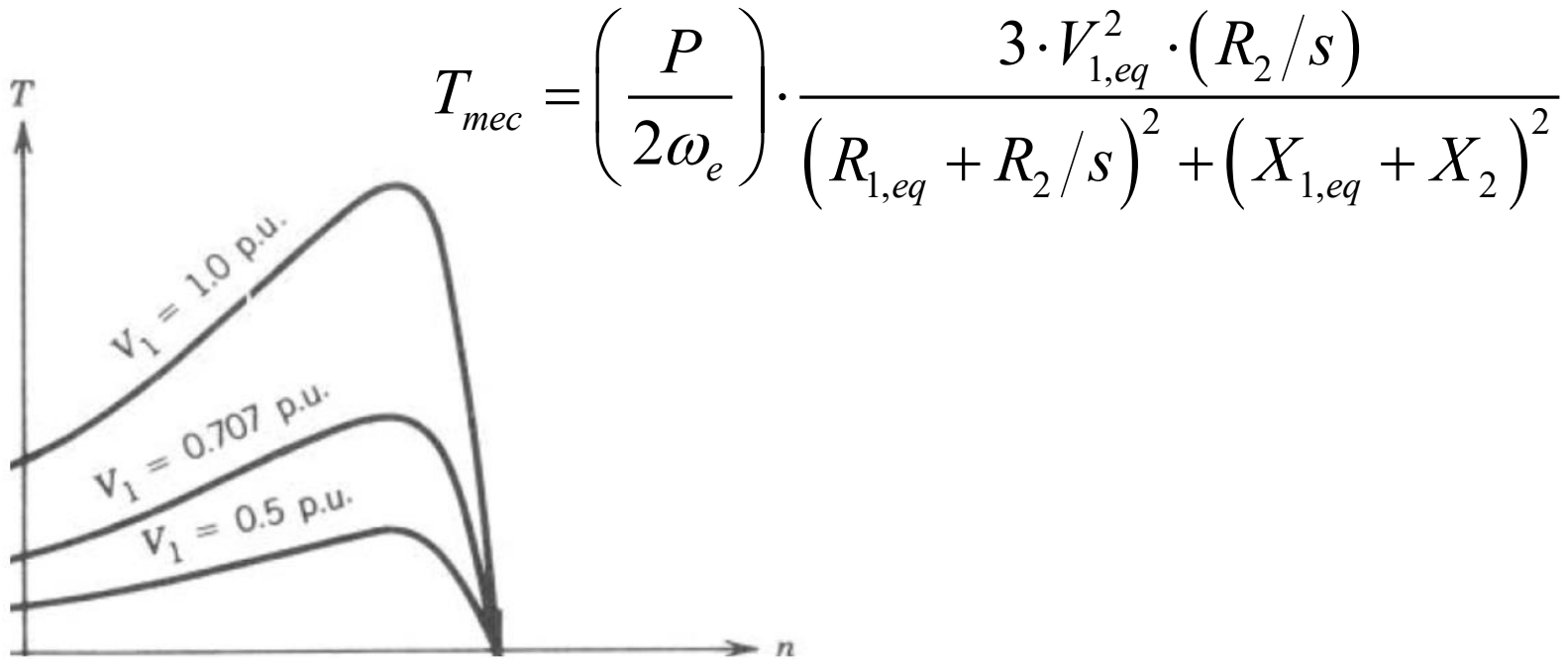
- Análise do torque mecânico, tensão e frequência:

$$T_{mec} = \left(\frac{P}{2\omega_e} \right) \cdot \frac{3 \cdot V_{1,eq}^2 \cdot (R_2/s)}{\left(R_{1,eq} + R_2/s \right)^2 + \left(X_{1,eq} + X_2 \right)^2}$$

- As curvas de torque-velocidade do motor
 - Dependem da tensão de alimentação e da frequência de alimentação;
 - Parâmetros de circuito são considerados invariantes, em geral.

Conjugado e Potência – Teorema de Thévenin

- Análise do torque mecânico, **tensão** e frequência:



Fonte: Sen, P. C.. Principles of Electric Machines and Power Electronics. 3ª Ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2014.

Conjugado e Potência – Teorema de Thévenin

- Análise do torque mecânico, tensão e **frequência**:

$$T_{mec} = \left(\frac{P}{2\omega_e} \right) \cdot \frac{3 \cdot V_{1,eq}^2 \cdot (R_2/s)}{\left(R_{1,eq} + R_2/s \right)^2 + \left(X_{1,eq} + X_2 \right)^2}$$

Conjugado e Potência – Teorema de Thévenin

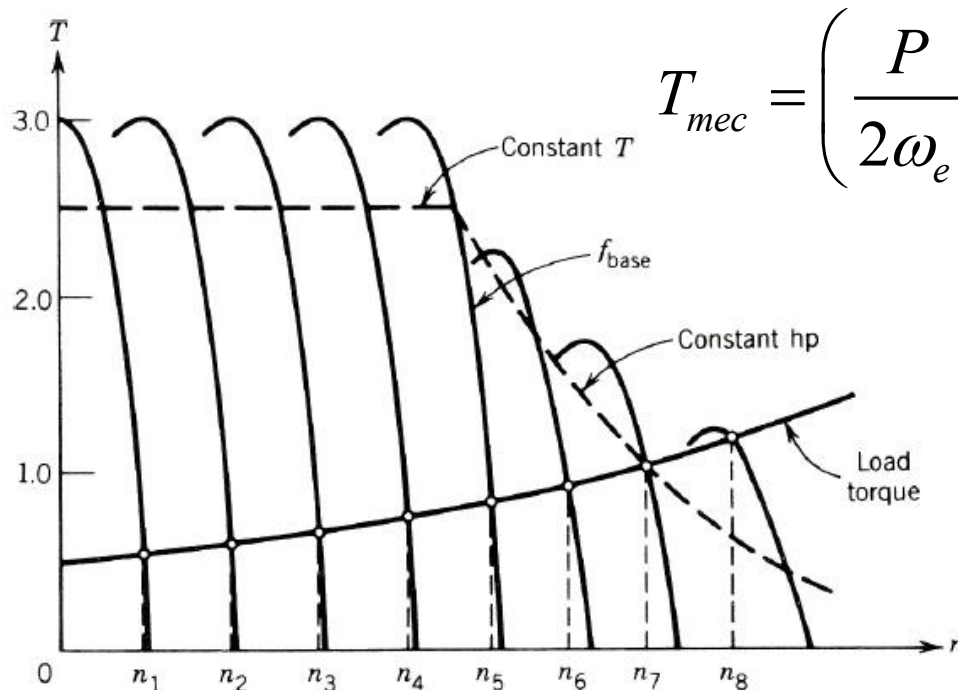
- Análise do torque mecânico, tensão e frequência:

$$T_{mec} = \left(\frac{P}{2\omega_e} \right) \cdot \frac{3 \cdot V_{1,eq}^2 \cdot (R_2/s)}{\left(R_{1,eq} + R_2/s \right)^2 + \left(X_{1,eq} + X_2 \right)^2}$$

- Não há lógica em falar disso, a não ser que:
 - Motor de 60 Hz opere em 50 Hz – O torque é maior em qualquer ponto da curva ‘T – n’, para a mesma tensão de alimentação e a velocidade síncrona é menor

Conjugado e Potência – Teorema de Thévenin

- Análise do torque mecânico, **tensão** e **frequência**:



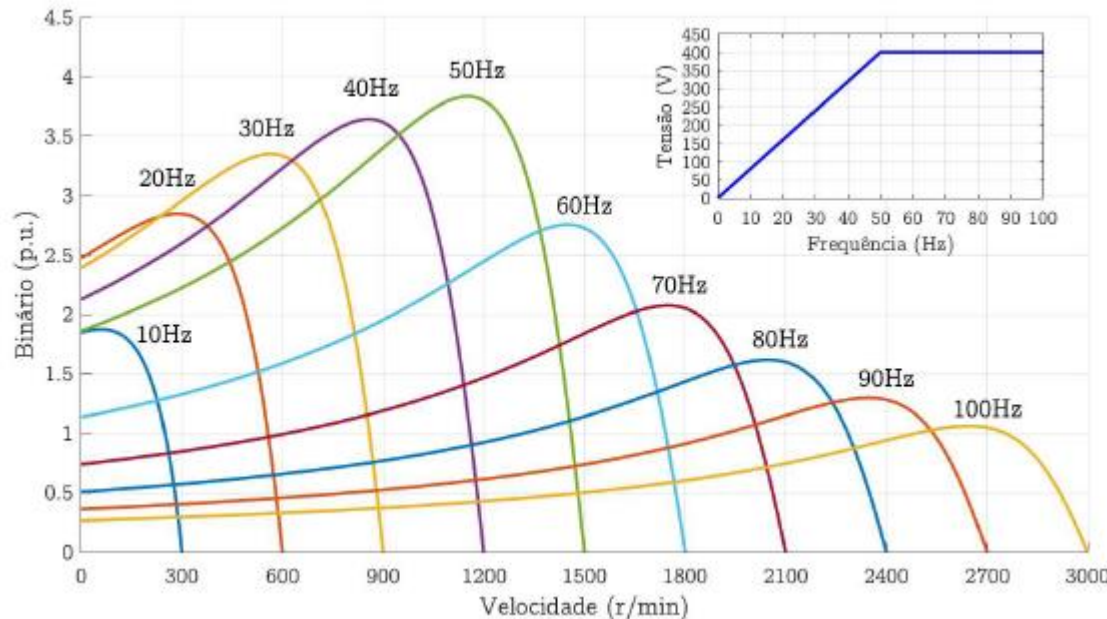
$$T_{mec} = \left(\frac{P}{2\omega_e} \right) \cdot \frac{3 \cdot V_{1,eq}^2 \cdot (R_2/s)}{\left(R_{1,eq} + R_2/s \right)^2 + \left(X_{1,eq} + X_2 \right)^2}$$

Fonte: Sen, P. C.. Principles of Electric Machines and Power Electronics. 3ª Ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2014.

Conjugado e Potência – Teorema de Thévenin

- Análise do torque mecânico, **tensão** e **frequência**:

$$T_{mec} = \left(\frac{P}{2\omega_e} \right) \cdot \frac{3 \cdot V_{1,eq}^2 \cdot (R_2/s)}{(R_{1,eq} + R_2/s)^2 + (X_{1,eq} + X_2)^2}$$

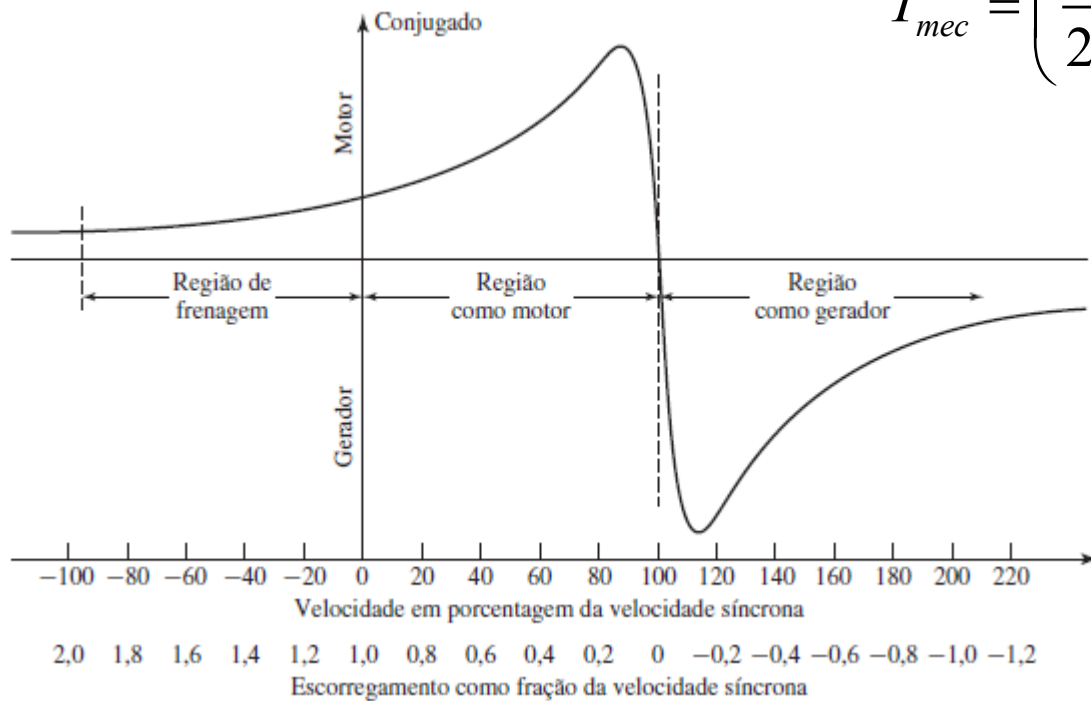


Fonte: ARTIGO.

Conjugado e Potência – Teorema de Thévenin

- Agora na análise de conjugado e potência por Thévenin:

$$T_{mec} = \left(\frac{P}{2\omega_e} \right) \cdot \frac{3 \cdot V_{1,eq}^2 \cdot (R_2/s)}{\left(R_{1,eq} + R_2/s \right)^2 + \left(X_{1,eq} + X_2 \right)^2}$$

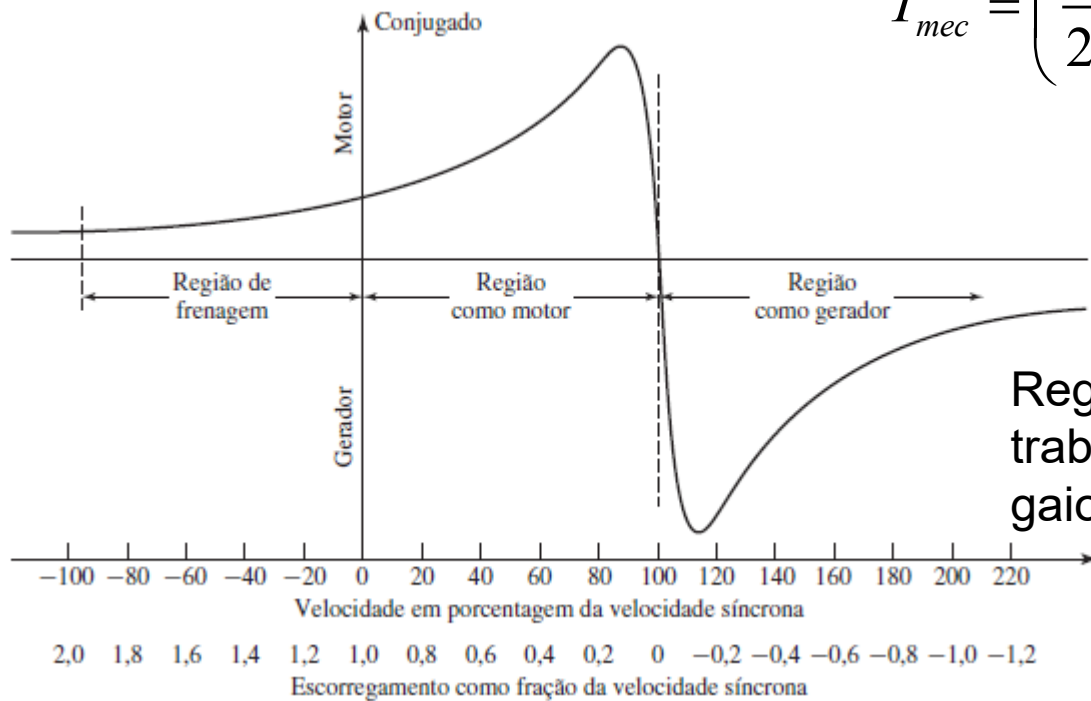


Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

Conjugado e Potência – Teorema de Thévenin

- Agora na análise de conjugado e potência por Thévenin:

$$T_{mec} = \left(\frac{P}{2\omega_e} \right) \cdot \frac{3 \cdot V_{1,eq}^2 \cdot (R_2/s)}{\left(R_{1,eq} + R_2/s \right)^2 + \left(X_{1,eq} + X_2 \right)^2}$$



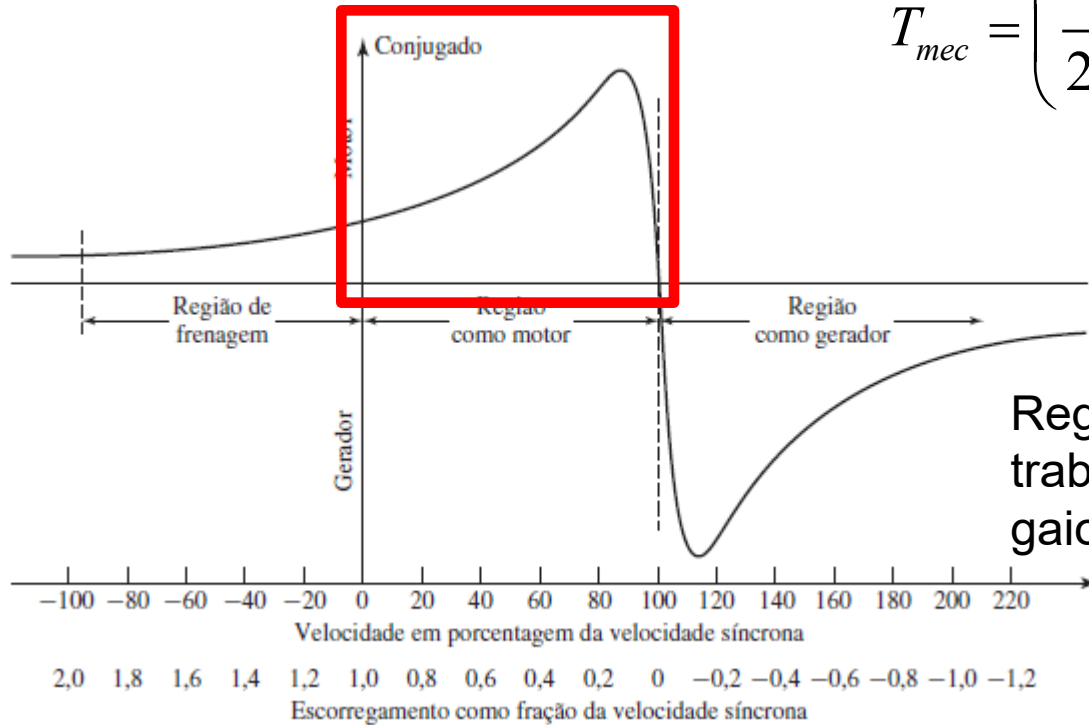
Região Motor é a região normal de trabalho para uma máquina com rotor gaiola de esquilo ou rotor bobinado.

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

Conjugado e Potência – Teorema de Thévenin

- Agora na análise de conjugado e potência por Thévenin:

$$T_{mec} = \left(\frac{P}{2\omega_e} \right) \cdot \frac{3 \cdot V_{1,eq}^2 \cdot (R_2/s)}{\left(R_{1,eq} + R_2/s \right)^2 + \left(X_{1,eq} + X_2 \right)^2}$$



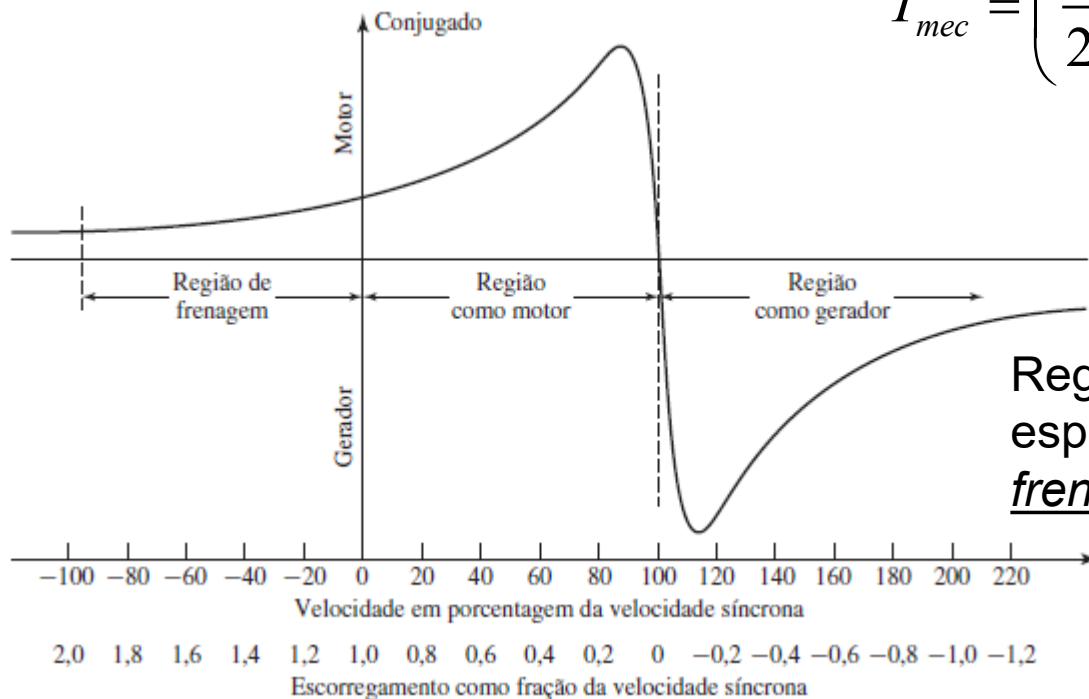
Região Motor é a região normal de trabalho para uma máquina com rotor gaiola de esquilo ou rotor bobinado.

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

Conjugado e Potência – Teorema de Thévenin

- Agora na análise de conjugado e potência por Thévenin:

$$T_{mec} = \left(\frac{P}{2\omega_e} \right) \cdot \frac{3 \cdot V_{1,eq}^2 \cdot (R_2/s)}{\left(R_{1,eq} + R_2/s \right)^2 + \left(X_{1,eq} + X_2 \right)^2}$$



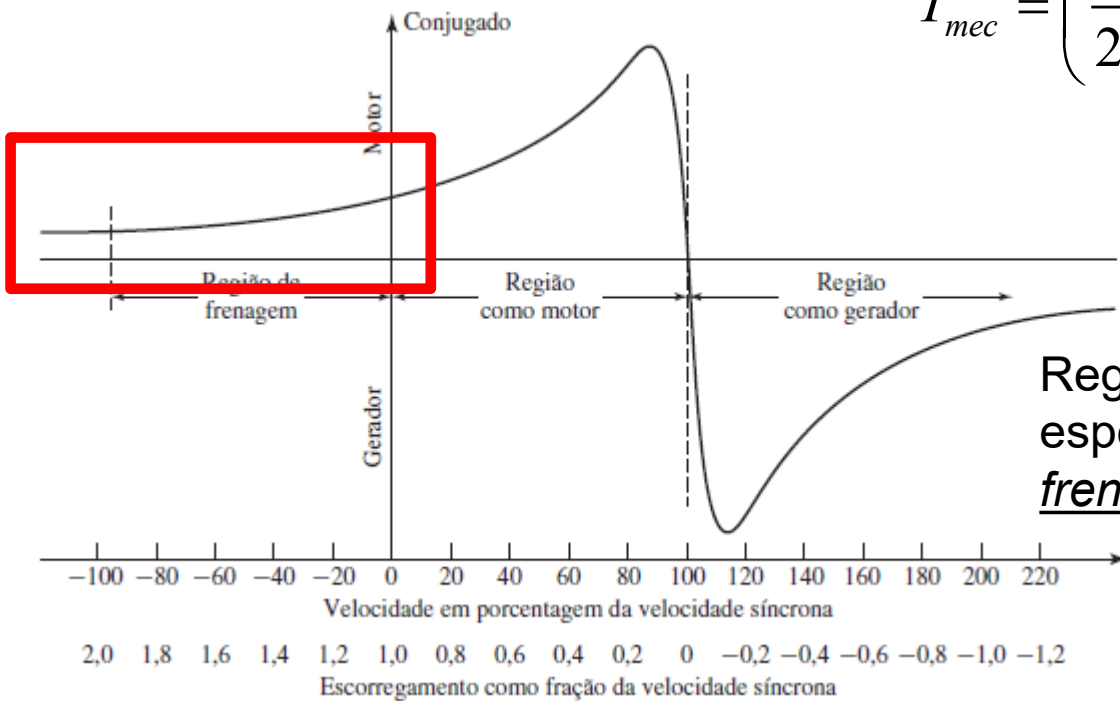
Região de Frenagem é uma região especial, quando se utiliza o método de frenagem por inversão de fases.

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

Conjugado e Potência – Teorema de Thévenin

- Agora na análise de conjugado e potência por Thévenin:

$$T_{mec} = \left(\frac{P}{2\omega_e} \right) \cdot \frac{3 \cdot V_{1,eq}^2 \cdot (R_2/s)}{\left(R_{1,eq} + R_2/s \right)^2 + \left(X_{1,eq} + X_2 \right)^2}$$



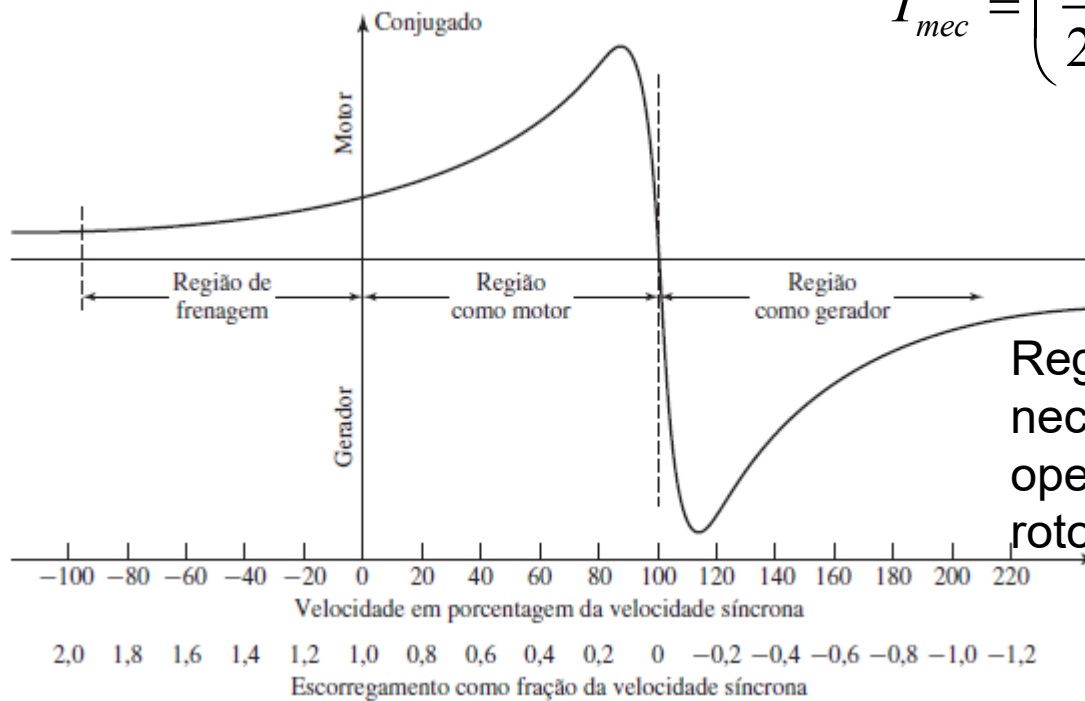
Região de Frenagem é uma região especial, quando se utiliza o método de frenagem por inversão de fases.

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

Conjugado e Potência – Teorema de Thévenin

- Agora na análise de conjugado e potência por Thévenin:

$$T_{mec} = \left(\frac{P}{2\omega_e} \right) \cdot \frac{3 \cdot V_{1,eq}^2 \cdot (R_2/s)}{\left(R_{1,eq} + R_2/s \right)^2 + \left(X_{1,eq} + X_2 \right)^2}$$



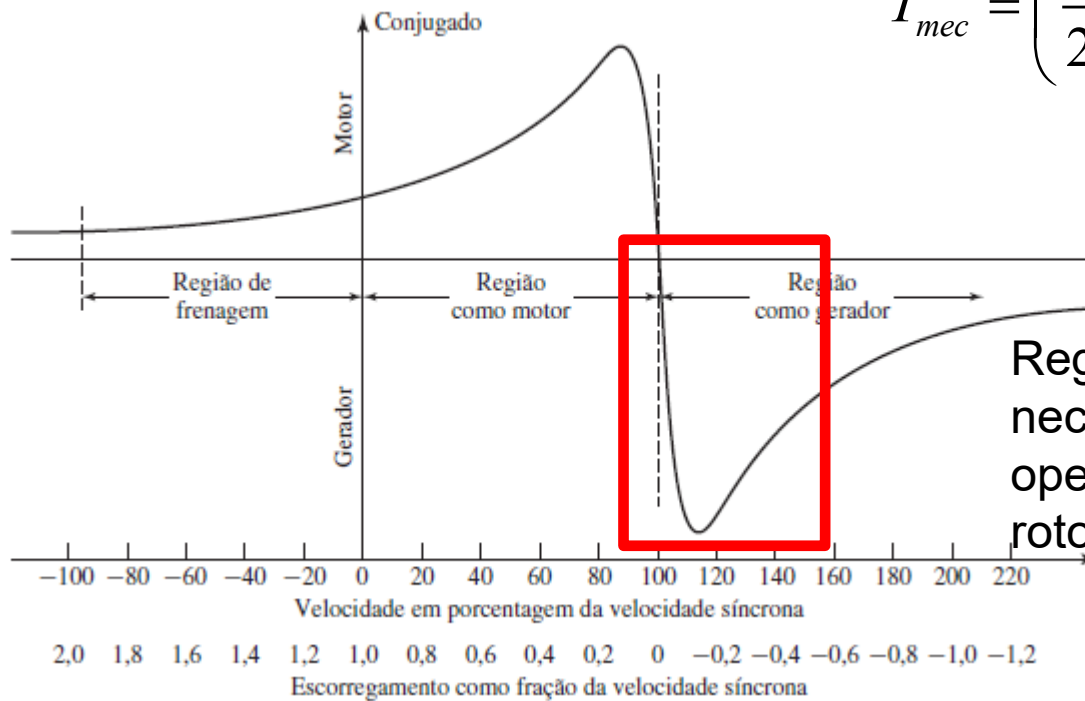
Região Gerador é uma região que necessita de condições especiais de operação, independente do tipo de rotor.

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

Conjugado e Potência – Teorema de Thévenin

- Agora na análise de conjugado e potência por Thévenin:

$$T_{mec} = \left(\frac{P}{2\omega_e} \right) \cdot \frac{3 \cdot V_{1,eq}^2 \cdot (R_2/s)}{\left(R_{1,eq} + R_2/s \right)^2 + \left(X_{1,eq} + X_2 \right)^2}$$

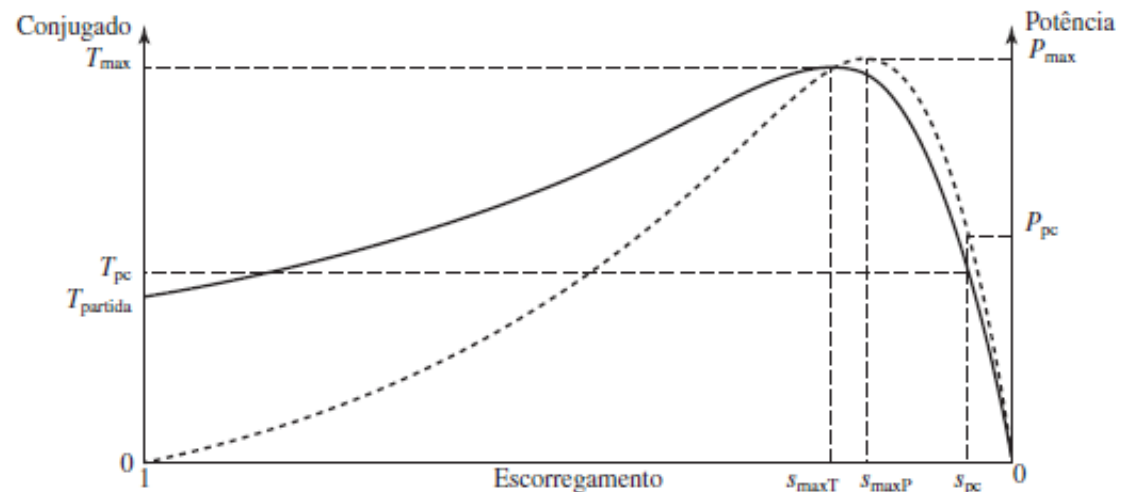


Região Gerador é uma região que necessita de condições especiais de operação, independente do tipo de rotor.

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

Conjugado e Potência – Teorema de Thévenin

- Agora na análise de conjugado e potência por Thévenin:

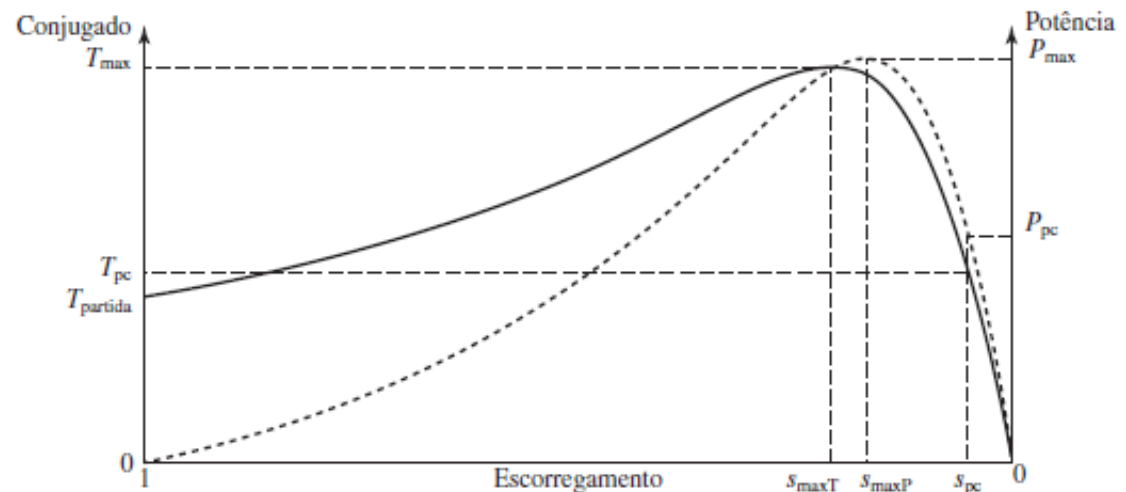


Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

Escorregamento para torque máximo é diferente do escorregamento para potência máxima.

Conjugado e Potência – Teorema de Thévenin

- Agora na análise de conjugado e potência por Thévenin:



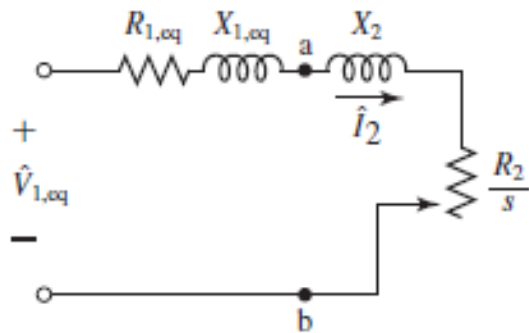
Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

Escorregamento para torque máximo é diferente do escorregamento para potência máxima.

Escorregamento a plena carga é o **escorregamento nominal**, presente nas placas de identificação dos motores de indução trifásicos.

Conjugado e Potência – Teorema de Thévenin

■ Torque máximo:

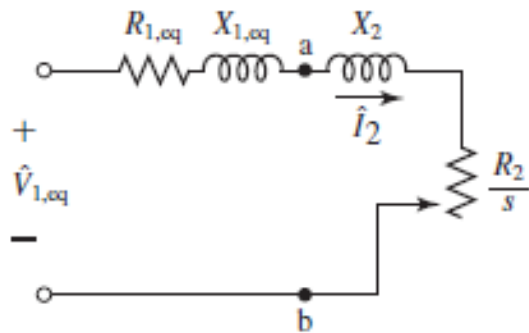


Pelo teorema da máxima transferência de potência, isso ocorre quando:

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

Conjugado e Potência – Teorema de Thévenin

■ Torque máximo:



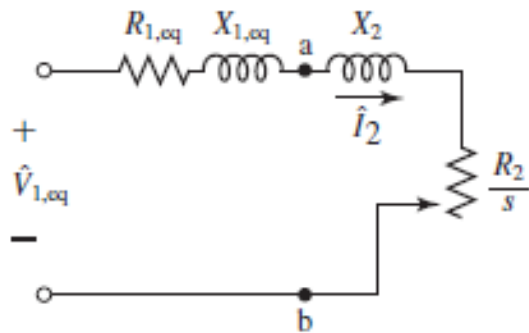
Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

Pelo teorema da máxima transferência de potência, isso ocorre quando:

$$T_{m\acute{a}x} = \frac{P_g^{m\acute{a}x}}{\omega_s} = \frac{3 \cdot \left[I_2^2 \cdot (R_2/s) \right]_{m\acute{a}x}}{\omega_s}$$

Conjugado e Potência – Teorema de Thévenin

■ Torque máximo:



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

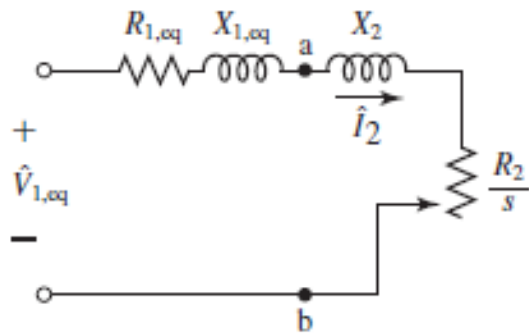
Pelo teorema da máxima transferência de potência, isso ocorre quando:

$$T_{\max} = \frac{P_g^{\max}}{\omega_s} = \frac{3 \cdot \left[I_2^2 \cdot (R_2/s) \right]_{\max}}{\omega_s}$$

$$\frac{R_2}{s} = R_{1,eq} + j(X_{1,eq} + X_2)$$

Conjugado e Potência – Teorema de Thévenin

■ Torque máximo:



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

Pelo teorema da máxima transferência de potência, isso ocorre quando:

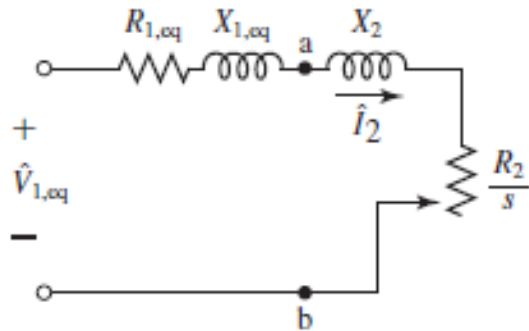
$$T_{\text{máx}} = \frac{P_g^{\text{máx}}}{\omega_s} = \frac{3 \cdot \left[I_2^2 \cdot (R_2/s) \right]_{\text{máx}}}{\omega_s}$$

$$\frac{R_2}{s} = R_{1,eq} + j(X_{1,eq} + X_2)$$

$$\frac{R_2}{s_{\text{máxT}}} = \sqrt{R_{1,eq}^2 + (X_{1,eq} + X_2)^2}$$

Conjugado e Potência – Teorema de Thévenin

■ Torque máximo:



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

Pelo teorema da máxima transferência de potência, isso ocorre quando:

$$T_{m\acute{a}x} = \frac{P_g^{m\acute{a}x}}{\omega_s} = \frac{3 \cdot [I_2^2 \cdot (R_2/s)]_{m\acute{a}x}}{\omega_s}$$

$$\frac{R_2}{s} = R_{1,eq} + j(X_{1,eq} + X_2)$$

$$\frac{R_2}{s_{m\acute{a}xT}} = \sqrt{R_{1,eq}^2 + (X_{1,eq} + X_2)^2}$$


E agora, é possível substituir este escorregamento na equação do torque

$$S_{m\acute{a}xT} = \frac{R_2}{\sqrt{R_{1,eq}^2 + (X_{1,eq} + X_2)^2}}$$

Conjugado e Potência – Teorema de Thévenin


■ Torque máximo:

$$T_{mec} = \left(\frac{P}{2\omega_e} \right) \cdot \frac{3 \cdot V_{1,eq}^2 \cdot (R_2/s)}{\left(R_{1,eq} + R_2/s \right)^2 + \left(X_{1,eq} + X_2 \right)^2}$$

$$\frac{R_2}{s_{\max T}} = \sqrt{R_{1,eq}^2 + \left(X_{1,eq} + X_2 \right)^2}$$


Conjugado e Potência – Teorema de Thévenin

■ Torque máximo:

$$T_{mec} = \left(\frac{P}{2\omega_e} \right) \cdot \frac{3 \cdot V_{1,eq}^2 \cdot (R_2/s)}{\left(R_{1,eq} + R_2/s \right)^2 + \left(X_{1,eq} + X_2 \right)^2}$$


$$\frac{R_2}{s_{\max T}} = \sqrt{R_{1,eq}^2 + \left(X_{1,eq} + X_2 \right)^2}$$

$$T_{\max} = \left(\frac{P}{2\omega_e} \right) \cdot \frac{3 \cdot V_{1,eq}^2 \cdot \sqrt{R_{1,eq}^2 + \left(X_{1,eq} + X_2 \right)^2}}{\left(R_{1,eq} + \sqrt{R_{1,eq}^2 + \left(X_{1,eq} + X_2 \right)^2} \right)^2 + \left(X_{1,eq} + X_2 \right)^2}$$

Conjugado e Potência – Teorema de Thévenin

■ Torque máximo:

$$\frac{R_2}{s_{\max T}} = \sqrt{R_{1,eq}^2 + (X_{1,eq} + X_2)^2}$$

$$T_{mec} = \left(\frac{P}{2\omega_e} \right) \cdot \frac{3 \cdot V_{1,eq}^2 \cdot (R_2/s)}{(R_{1,eq} + R_2/s)^2 + (X_{1,eq} + X_2)^2}$$

$$T_{\max} = \left(\frac{P}{2\omega_e} \right) \cdot \frac{3 \cdot V_{1,eq}^2 \cdot \sqrt{R_{1,eq}^2 + (X_{1,eq} + X_2)^2}}{\left(R_{1,eq} + \sqrt{R_{1,eq}^2 + (X_{1,eq} + X_2)^2} \right)^2 + (X_{1,eq} + X_2)^2}$$

$$T_{\max} = \left(\frac{P}{2\omega_e} \right) \cdot \frac{3 \cdot V_{1,eq}^2 \cdot \sqrt{R_{1,eq}^2 + (X_{1,eq} + X_2)^2}}{2 \cdot R_{1,eq}^2 + 2 \cdot R_{1,eq} \sqrt{R_{1,eq}^2 + (X_{1,eq} + X_2)^2} + 2 \cdot (X_{1,eq} + X_2)^2}$$

Conjugado e Potência – Teorema de Thévenin

■ Torque máximo:

$$T_{\max} = \left(\frac{P}{2\omega_e} \right) \cdot \frac{3 \cdot V_{1,eq}^2 \cdot \sqrt{R_{1,eq}^2 + (X_{1,eq} + X_2)^2}}{2 \cdot R_{1,eq}^2 + 2 \cdot R_{1,eq} \sqrt{R_{1,eq}^2 + (X_{1,eq} + X_2)^2} + 2 \cdot (X_{1,eq} + X_2)^2}$$

$$T_{\max} = \left(\frac{P}{2\omega_e} \right) \cdot \frac{\frac{3}{2} \cdot V_{1,eq}^2 \cdot \sqrt{R_{1,eq}^2 + (X_{1,eq} + X_2)^2}}{R_{1,eq}^2 + R_{1,eq} \sqrt{R_{1,eq}^2 + (X_{1,eq} + X_2)^2} + (X_{1,eq} + X_2)^2}$$

Conjugado e Potência – Teorema de Thévenin

■ Torque máximo:

$$T_{\max} = \left(\frac{P}{2\omega_e} \right) \cdot \frac{3 \cdot V_{1,eq}^2 \cdot \sqrt{R_{1,eq}^2 + (X_{1,eq} + X_2)^2}}{2 \cdot R_{1,eq}^2 + 2 \cdot R_{1,eq} \sqrt{R_{1,eq}^2 + (X_{1,eq} + X_2)^2} + 2 \cdot (X_{1,eq} + X_2)^2}$$

$$T_{\max} = \left(\frac{P}{2\omega_e} \right) \cdot \frac{\frac{3}{2} \cdot V_{1,eq}^2 \cdot \sqrt{R_{1,eq}^2 + (X_{1,eq} + X_2)^2}}{R_{1,eq}^2 + R_{1,eq} \sqrt{R_{1,eq}^2 + (X_{1,eq} + X_2)^2} + (X_{1,eq} + X_2)^2}$$

$$T_{\max} = \left(\frac{P}{2\omega_e} \right) \cdot \frac{\frac{3}{2} \cdot V_{1,eq}^2 \cdot \sqrt{R_{1,eq}^2 + (X_{1,eq} + X_2)^2}}{R_{1,eq} \sqrt{R_{1,eq}^2 + (X_{1,eq} + X_2)^2} + R_{1,eq}^2 + (X_{1,eq} + X_2)^2}$$

$$T_{\max} = \left(\frac{P}{2\omega_e} \right) \cdot \frac{\frac{3}{2} \cdot V_{1,eq}^2 \cdot \sqrt{R_{1,eq}^2 + (X_{1,eq} + X_2)^2}}{R_{1,eq} + \sqrt{R_{1,eq}^2 + (X_{1,eq} + X_2)^2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{R_{1,eq}^2 + (X_{1,eq} + X_2)^2}}$$

$$T_{\max} = \left(\frac{P}{2\omega_e} \right) \cdot \frac{\frac{3}{2} \cdot V_{1,eq}^2}{R_{1,eq} + \sqrt{R_{1,eq}^2 + (X_{1,eq} + X_2)^2}}$$

Conjugado e Potência – Teorema de Thévenin

- Torque máximo ou de ruptura:

$$T_{m\acute{a}x} = \left(\frac{P}{2\omega_e} \right) \cdot \frac{\frac{3}{2} \cdot V_{1,eq}^2}{R_{1,eq} + \sqrt{R_{1,eq}^2 + (X_{1,eq} + X_2)^2}}$$

- Torque máximo independe da **resistência rotórica**

Conjugado e Potência – Teorema de Thévenin

■ Torque máximo ou de ruptura:

$$T_{m\acute{a}x} = \left(\frac{P}{2\omega_e} \right) \cdot \frac{\frac{3}{2} \cdot V_{1,eq}^2}{R_{1,eq} + \sqrt{R_{1,eq}^2 + (X_{1,eq} + X_2)^2}}$$

- Torque máximo independe da **resistência rotórica**
- Entretanto, a **resistência rotórica** influencia no **escorregamento** em que ocorre o torque máximo.

$$s_{m\acute{a}xT} = \frac{R_2}{\sqrt{R_{1,eq}^2 + (X_{1,eq} + X_2)^2}}$$

Exercício 5

Motor de indução trifásico, ligado em Y, 6 pólos, 460 V (tensão de linha), 20 KW e 60 Hz têm os seguintes valores de parâmetros em Ω /fase, referidos ao estator. Determine: (a) a componente de carga I_2 da corrente do estator, o conjugado mecânico e a potência mecânica para um escorregamento $s=0,02$; (b) O conjugado mecânico máximo e respectiva velocidade e; (c) o conjugado de partida e a respectiva corrente de partida do estator (componente de carga).

$$R_1 = 0,271 \quad R_2 = 0,188 \quad X_1 = 1,12 \quad X_2 = 1,91 \quad X_m = 23,1$$

Exercício 5

Motor de indução trifásico, ligado em Y, 6 pólos, 460 V (tensão de linha), 20 KW e 60 Hz têm os seguintes valores de parâmetros em Ω /fase, referidos ao estator. Determine: (a) a componente de carga I_2 da corrente do estator, o conjugado mecânico e a potência mecânica para um escorregamento $s=0,02$; (b) O conjugado mecânico máximo e respectiva velocidade e; (c) o conjugado de partida e a respectiva corrente de partida do estator (componente de carga).

$$R_1 = 0,271 \quad R_2 = 0,188 \quad X_1 = 1,12 \quad X_2 = 1,91 \quad X_m = 23,1$$

$$\hat{V}_{1,eq} = \frac{460}{\sqrt{3}} \cdot \left[\frac{j23,1}{0,271 + j(1,12 + 23,1)} \right] = 253,3 \angle 0,6^\circ$$

Exercício 5

Motor de indução trifásico, ligado em Y, 6 pólos, 460 V (tensão de linha), 20 KW e 60 Hz têm os seguintes valores de parâmetros em Ω /fase, referidos ao estator. Determine: (a) a componente de carga I_2 da corrente do estator, o conjugado mecânico e a potência mecânica para um escorregamento $s=0,02$; (b) O conjugado mecânico máximo e respectiva velocidade e; (c) o conjugado de partida e a respectiva corrente de partida do estator (componente de carga).

$$R_1 = 0,271 \quad R_2 = 0,188 \quad X_1 = 1,12 \quad X_2 = 1,91 \quad X_m = 23,1$$

$$\hat{V}_{1,eq} = \frac{460}{\sqrt{3}} \cdot \left[\frac{j23,1}{0,271 + j(1,12 + 23,1)} \right] = 253,3 \angle 0,6^\circ$$

$$Z_{1,eq} = \frac{jX_m (R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + X_m)} = \frac{j23,1 \cdot (0,271 + j1,12)}{0,271 + j(1,12 + 23,1)} = 0,2465 + 1,071j$$

Exercício 5

Motor de indução trifásico, ligado em Y, 6 pólos, 460 V (tensão de linha), 20 KW e 60 Hz têm os seguintes valores de parâmetros em Ω /fase, referidos ao estator. Determine: (a) a componente de carga I_2 da corrente do estator, o conjugado mecânico e a potência mecânica para um escorregamento $s=0,02$; (b) O conjugado mecânico máximo e respectiva velocidade e; (c) o conjugado de partida e a respectiva corrente de partida do estator (componente de carga).

$$R_1 = 0,271 \quad R_2 = 0,188 \quad X_1 = 1,12 \quad X_2 = 1,91 \quad X_m = 23,1$$

$$\hat{I}_2 = \frac{253,3 \angle 0,6^\circ}{\left(0,2465 + \frac{0,188}{0,02}\right) + j(1,071 + 1,91)} = \frac{253,3 \angle 0,6^\circ}{9,6465 + j2,981}$$

$$\hat{I}_2 = \frac{253,3 \angle 0,6^\circ}{10,1 \angle 17,17^\circ} = 25,1 \angle -16,57^\circ$$

Exercício 5

Motor de indução trifásico, ligado em Y, 6 pólos, 460 V (tensão de linha), 20 KW e 60 Hz têm os seguintes valores de parâmetros em Ω /fase, referidos ao estator. Determine: (a) a componente de carga I_2 da corrente do estator, o conjugado mecânico e a potência mecânica para um escorregamento $s=0,02$; (b) O conjugado mecânico máximo e respectiva velocidade e; (c) o conjugado de partida e a respectiva corrente de partida do estator (componente de carga).

$$R_1 = 0,271 \quad R_2 = 0,188 \quad X_1 = 1,12 \quad X_2 = 1,91 \quad X_m = 23,1$$

$$T_{mec} = \left(\frac{6}{2 \cdot 2\pi 60} \right) \cdot 3 \cdot 25,1^2 \cdot \frac{0,188}{0,02}$$

$$T_{mec} = 141,4 \text{ N.m}$$

Exercício 5

Motor de indução trifásico, ligado em Y, 6 pólos, 460 V (tensão de linha), 20 KW e 60 Hz têm os seguintes valores de parâmetros em Ω /fase, referidos ao estator. Determine: (a) a componente de carga I_2 da corrente do estator, o conjugado mecânico e a potência mecânica para um escorregamento $s=0,02$; (b) O conjugado mecânico máximo e respectiva velocidade e; (c) o conjugado de partida e a respectiva corrente de partida do estator (componente de carga).

$$R_1 = 0,271 \quad R_2 = 0,188 \quad X_1 = 1,12 \quad X_2 = 1,91 \quad X_m = 23,1$$

$$T_{mec} = \left(\frac{6}{2 \cdot 2\pi 60} \right) \cdot 3 \cdot 25,1^2 \cdot \frac{0,188}{0,02}$$

$$T_{mec} = 141,4 \text{ N.m}$$

$$\omega_m = (1 - 0,02) \cdot (2\pi \cdot 60) \frac{2}{P} = 123,2 \text{ rad/s}$$

Exercício 5

Motor de indução trifásico, ligado em Y, 6 pólos, 460 V (tensão de linha), 20 KW e 60 Hz têm os seguintes valores de parâmetros em Ω /fase, referidos ao estator. Determine: (a) a componente de carga I_2 da corrente do estator, o conjugado mecânico e a potência mecânica para um escorregamento $s=0,02$; (b) O conjugado mecânico máximo e respectiva velocidade e; (c) o conjugado de partida e a respectiva corrente de partida do estator (componente de carga).

$$R_1 = 0,271 \quad R_2 = 0,188 \quad X_1 = 1,12 \quad X_2 = 1,91 \quad X_m = 23,1$$

$$T_{mec} = \left(\frac{6}{2 \cdot 2\pi 60} \right) \cdot 3 \cdot 25,1^2 \cdot \frac{0,188}{0,02}$$

$$T_{mec} = 141,4 \text{ N.m}$$

$$\omega_m = (1 - 0,02) \cdot (2\pi \cdot 60) \frac{2}{P} = 123,2 \text{ rad/s}$$

$$P_{mec} = T_{mec} \cdot \omega_m$$

$$P_{mec} = 141,4 \cdot 123,2 = 17,42 \text{ kW}$$

Exercício 5

Motor de indução trifásico, ligado em Y, 6 pólos, 460 V (tensão de linha), 20 KW e 60 Hz têm os seguintes valores de parâmetros em Ω /fase, referidos ao estator. Determine: (a) a componente de carga I_2 da corrente do estator, o conjugado mecânico e a potência mecânica para um escorregamento $s=0,02$; (b) O conjugado mecânico máximo e respectiva velocidade e; (c) o conjugado de partida e a respectiva corrente de partida do estator (componente de carga).

$$R_1 = 0,271 \quad R_2 = 0,188 \quad X_1 = 1,12 \quad X_2 = 1,91 \quad X_m = 23,1$$

$$s_{máxT} = \frac{0,188}{\sqrt{0,2465^2 + (1,071 + 1,91)^2}} = 6,3\%$$

Exercício 5

Motor de indução trifásico, ligado em Y, 6 pólos, 460 V (tensão de linha), 20 KW e 60 Hz têm os seguintes valores de parâmetros em Ω /fase, referidos ao estator. Determine: (a) a componente de carga I_2 da corrente do estator, o conjugado mecânico e a potência mecânica para um escorregamento $s=0,02$; (b) O conjugado mecânico máximo e respectiva velocidade e; (c) o conjugado de partida e a respectiva corrente de partida do estator (componente de carga).

$$R_1 = 0,271 \quad R_2 = 0,188 \quad X_1 = 1,12 \quad X_2 = 1,91 \quad X_m = 23,1$$

$$s_{\max T} = \frac{0,188}{\sqrt{0,2465^2 + (1,071 + 1,91)^2}} = 6,3\%$$

$$T_{\max} = \left(\frac{P}{2\omega_e} \right) \cdot \frac{\frac{3}{2} \cdot V_{1,eq}^2}{R_{1,eq} + \sqrt{R_{1,eq}^2 + (X_{1,eq} + X_2)^2}} = \left(\frac{6}{2 \cdot 377} \right) \frac{\frac{3}{2} \cdot 253,3^2}{0,2465 + \sqrt{0,2465^2 + (1,071 + 1,91)^2}}$$

$$T_{\max} = 236,5 \text{ N.m}$$

Exercício 5

Motor de indução trifásico, ligado em Y, 6 pólos, 460 V (tensão de linha), 20 KW e 60 Hz têm os seguintes valores de parâmetros em Ω /fase, referidos ao estator. Determine: (a) a componente de carga I_2 da corrente do estator, o conjugado mecânico e a potência mecânica para um escorregamento $s=0,02$; (b) O conjugado mecânico máximo e respectiva velocidade e; (c) o conjugado de partida e a respectiva corrente de partida do estator (componente de carga).

$$R_1 = 0,271 \quad R_2 = 0,188 \quad X_1 = 1,12 \quad X_2 = 1,91 \quad X_m = 23,1$$

$$\hat{I}_{2p} = \frac{253,3 \angle 0,6^\circ}{(0,2465 + 0,188) + j(1,071 + 1,91)} = \frac{253,3 \angle 0,6^\circ}{0,4345 + j2,981}$$

$$\hat{I}_{2p} = \frac{253,3 \angle 0,6^\circ}{3,0125 \angle 81,71^\circ} = 84,08 \angle -81,11^\circ$$

Exercício 5

Motor de indução trifásico, ligado em Y, 6 pólos, 460 V (tensão de linha), 20 KW e 60 Hz têm os seguintes valores de parâmetros em Ω /fase, referidos ao estator. Determine: (a) a componente de carga I_2 da corrente do estator, o conjugado mecânico e a potência mecânica para um escorregamento $s=0,02$; (b) O conjugado mecânico máximo e respectiva velocidade e; (c) o conjugado de partida e a respectiva corrente de partida do estator (componente de carga).

$$R_1 = 0,271 \quad R_2 = 0,188 \quad X_1 = 1,12 \quad X_2 = 1,91 \quad X_m = 23,1$$

$$T_p = \left(\frac{6}{2 \cdot 377} \right) \cdot 3 \cdot 84,08^2 \cdot 0,188$$

$$T_p = 31,72 \text{ N.m}$$

Exercício 6

Motor de indução trifásico, ligado em Y, 6 pólos, 460 V (tensão de linha), 20 KW e 60 Hz têm os seguintes valores de parâmetros em Ω /fase, referidos ao estator. Determine: (a) a componente de carga I_2 da corrente do estator, o conjugado mecânico e a potência mecânica para um escorregamento $s=0,02$; (b) O conjugado mecânico máximo e respectiva velocidade e; (c) o conjugado de partida e a respectiva corrente de partida do estator (componente de carga).

$$R_1 = 0,271 \quad R_2 = 0,376 \quad X_1 = 1,12 \quad X_2 = 1,91 \quad X_m = 23,1$$

Exercício 6

Motor de indução trifásico, ligado em Y, 6 pólos, 460 V (tensão de linha), 20 KW e 60 Hz têm os seguintes valores de parâmetros em Ω /fase, referidos ao estator. Determine: (a) a componente de carga I_2 da corrente do estator, o conjugado mecânico e a potência mecânica para um escorregamento $s=0,02$; (b) O conjugado mecânico máximo e respectiva velocidade e; (c) o conjugado de partida e a respectiva corrente de partida do estator (componente de carga).

$$R_1 = 0,271 \quad R_2 = 0,376 \quad X_1 = 1,12 \quad X_2 = 1,91 \quad X_m = 23,1$$

$$\hat{V}_{1,eq} = \frac{460}{\sqrt{3}} \cdot \left[\frac{j23,1}{0,271 + j(1,12 + 23,1)} \right] = 253,3 \angle 0,6^\circ$$

Exercício 6

Motor de indução trifásico, ligado em Y, 6 pólos, 460 V (tensão de linha), 20 KW e 60 Hz têm os seguintes valores de parâmetros em Ω /fase, referidos ao estator. Determine: (a) a componente de carga I_2 da corrente do estator, o conjugado mecânico e a potência mecânica para um escorregamento $s=0,02$; (b) O conjugado mecânico máximo e respectiva velocidade e; (c) o conjugado de partida e a respectiva corrente de partida do estator (componente de carga).

$$R_1 = 0,271 \quad R_2 = 0,376 \quad X_1 = 1,12 \quad X_2 = 1,91 \quad X_m = 23,1$$

$$\hat{V}_{1,eq} = \frac{460}{\sqrt{3}} \cdot \left[\frac{j23,1}{0,271 + j(1,12 + 23,1)} \right] = 253,3 \angle 0,6^\circ$$

$$Z_{1,eq} = \frac{jX_m (R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + X_m)} = \frac{j23,1 \cdot (0,271 + j1,12)}{0,271 + j(1,12 + 23,1)} = 0,2465 + 1,071j$$

Exercício 6

Motor de indução trifásico, ligado em Y, 6 pólos, 460 V (tensão de linha), 20 KW e 60 Hz têm os seguintes valores de parâmetros em Ω /fase, referidos ao estator. Determine: (a) a componente de carga I_2 da corrente do estator, o conjugado mecânico e a potência mecânica para um escorregamento $s=0,02$; (b) O conjugado mecânico máximo e respectiva velocidade e; (c) o conjugado de partida e a respectiva corrente de partida do estator (componente de carga).

$$R_1 = 0,271 \quad R_2 = 0,376 \quad X_1 = 1,12 \quad X_2 = 1,91 \quad X_m = 23,1$$

$$\hat{I}_2 = \frac{253,3 \angle 0,6^\circ}{\left(0,2465 + \frac{0,376}{0,02}\right) + j(1,071 + 1,91)} = \frac{253,3 \angle 0,6^\circ}{19,05 + j2,981}$$

$$\hat{I}_2 = \frac{253,3 \angle 0,6^\circ}{19,3 \angle 8,9^\circ} = 13,12 \angle -8,3^\circ$$

Exercício 6

Motor de indução trifásico, ligado em Y, 6 pólos, 460 V (tensão de linha), 20 KW e 60 Hz têm os seguintes valores de parâmetros em Ω /fase, referidos ao estator. Determine: (a) a componente de carga I_2 da corrente do estator, o conjugado mecânico e a potência mecânica para um escorregamento $s=0,02$; (b) O conjugado mecânico máximo e respectiva velocidade e; (c) o conjugado de partida e a respectiva corrente de partida do estator (componente de carga).

$$R_1 = 0,271 \quad R_2 = 0,376 \quad X_1 = 1,12 \quad X_2 = 1,91 \quad X_m = 23,1$$

$$T_{mec} = \left(\frac{6}{2 \cdot 2\pi 60} \right) \cdot 3 \cdot 13,12^2 \cdot \frac{0,376}{0,02}$$

$$T_{mec} = 77,3 \text{ N.m}$$

Exercício 6

Motor de indução trifásico, ligado em Y, 6 pólos, 460 V (tensão de linha), 20 KW e 60 Hz têm os seguintes valores de parâmetros em Ω /fase, referidos ao estator. Determine: (a) a componente de carga I_2 da corrente do estator, o conjugado mecânico e a potência mecânica para um escorregamento $s=0,02$; (b) O conjugado mecânico máximo e respectiva velocidade e; (c) o conjugado de partida e a respectiva corrente de partida do estator (componente de carga).

$$R_1 = 0,271 \quad R_2 = 0,376 \quad X_1 = 1,12 \quad X_2 = 1,91 \quad X_m = 23,1$$

$$T_{mec} = \left(\frac{6}{2 \cdot 2\pi 60} \right) \cdot 3 \cdot 13,12^2 \cdot \frac{0,376}{0,02}$$

$$T_{mec} = 77,3 \text{ N.m}$$

$$\omega_m = (1 - 0,02) \cdot (2\pi \cdot 60) \frac{2}{P} = 123,2 \text{ rad/s}$$

Exercício 6

Motor de indução trifásico, ligado em Y, 6 pólos, 460 V (tensão de linha), 20 KW e 60 Hz têm os seguintes valores de parâmetros em Ω /fase, referidos ao estator. Determine: (a) a componente de carga I_2 da corrente do estator, o conjugado mecânico e a potência mecânica para um escorregamento $s=0,02$; (b) O conjugado mecânico máximo e respectiva velocidade e; (c) o conjugado de partida e a respectiva corrente de partida do estator (componente de carga).

$$R_1 = 0,271 \quad R_2 = 0,376 \quad X_1 = 1,12 \quad X_2 = 1,91 \quad X_m = 23,1$$

$$T_{mec} = \left(\frac{6}{2 \cdot 2\pi 60} \right) \cdot 3 \cdot 13,12^2 \cdot \frac{0,376}{0,02}$$

$$T_{mec} = 77,3 \text{ N.m}$$

$$\omega_m = (1 - 0,02) \cdot (2\pi \cdot 60) \frac{2}{P} = 123,2 \text{ rad/s}$$

$$P_{mec} = T_{mec} \cdot \omega_m$$

$$P_{mec} = 77,3 \cdot 123,2 = 9,52 \text{ kW}$$

Exercício 6

Motor de indução trifásico, ligado em Y, 6 pólos, 460 V (tensão de linha), 20 KW e 60 Hz têm os seguintes valores de parâmetros em Ω /fase, referidos ao estator. Determine: (a) a componente de carga I_2 da corrente do estator, o conjugado mecânico e a potência mecânica para um escorregamento $s=0,02$; (b) O conjugado mecânico máximo e respectiva velocidade e; (c) o conjugado de partida e a respectiva corrente de partida do estator (componente de carga).

$$R_1 = 0,271 \quad R_2 = 0,376 \quad X_1 = 1,12 \quad X_2 = 1,91 \quad X_m = 23,1$$

$$s_{\max T} = \frac{0,376}{\sqrt{0,2465^2 + (1,071 + 1,91)^2}} = 12,6\%$$

Exercício 6

Motor de indução trifásico, ligado em Y, 6 pólos, 460 V (tensão de linha), 20 KW e 60 Hz têm os seguintes valores de parâmetros em Ω /fase, referidos ao estator. Determine: (a) a componente de carga I_2 da corrente do estator, o conjugado mecânico e a potência mecânica para um escorregamento $s=0,02$; (b) O conjugado mecânico máximo e respectiva velocidade e; (c) o conjugado de partida e a respectiva corrente de partida do estator (componente de carga).

$$R_1 = 0,271 \quad R_2 = 0,376 \quad X_1 = 1,12 \quad X_2 = 1,91 \quad X_m = 23,1$$

$$s_{maxT} = \frac{0,376}{\sqrt{0,2465^2 + (1,071 + 1,91)^2}} = 12,6\%$$

$$T_{max} = \left(\frac{P}{2\omega_e} \right) \cdot \frac{\frac{3}{2} \cdot V_{1,eq}^2}{R_{1,eq} + \sqrt{R_{1,eq}^2 + (X_{1,eq} + X_2)^2}} = \left(\frac{6}{2 \cdot 377} \right) \frac{\frac{3}{2} \cdot 253,3^2}{0,2465 + \sqrt{0,2465^2 + (1,071 + 1,91)^2}}$$

$$T_{max} = 236,5 \text{ N.m}$$

Exercício 6

Motor de indução trifásico, ligado em Y, 6 pólos, 460 V (tensão de linha), 20 KW e 60 Hz têm os seguintes valores de parâmetros em Ω /fase, referidos ao estator. Determine: (a) a componente de carga I_2 da corrente do estator, o conjugado mecânico e a potência mecânica para um escorregamento $s=0,02$; (b) O conjugado mecânico máximo e respectiva velocidade e; (c) o conjugado de partida e a respectiva corrente de partida do estator (componente de carga).

$$R_1 = 0,271 \quad R_2 = 0,376 \quad X_1 = 1,12 \quad X_2 = 1,91 \quad X_m = 23,1$$

$$\hat{I}_{2p} = \frac{253,3 \angle 0,6^\circ}{(0,2465 + 0,376) + j(1,071 + 1,91)} = \frac{253,3 \angle 0,6^\circ}{0,6225 + j2,981}$$

$$\hat{I}_{2p} = \frac{253,3 \angle 0,6^\circ}{3,0453 \angle 78,2^\circ} = 83,2 \angle -77,6^\circ$$

Exercício 6

Motor de indução trifásico, ligado em Y, 6 pólos, 460 V (tensão de linha), 20 KW e 60 Hz têm os seguintes valores de parâmetros em Ω /fase, referidos ao estator. Determine: (a) a componente de carga I_2 da corrente do estator, o conjugado mecânico e a potência mecânica para um escorregamento $s=0,02$; (b) O conjugado mecânico máximo e respectiva velocidade e; (c) o conjugado de partida e a respectiva corrente de partida do estator (componente de carga).

$$R_1 = 0,271 \quad R_2 = 0,376 \quad X_1 = 1,12 \quad X_2 = 1,91 \quad X_m = 23,1$$

$$T_p = \left(\frac{6}{2 \cdot 377} \right) \cdot 3 \cdot 83,2^2 \cdot 0,376$$

$$T_p = 62,13 \text{ N.m}$$

Exercício 7

Motor de indução trifásico, ligado em Y, 6 pólos, 460 V (tensão de linha), 20 KW e 60 Hz têm os seguintes valores de parâmetros em Ω /fase, referidos ao estator. Determine o valor da resistência rotórica requerida para que o torque máximo esteja na partida.

$$R_1 = 0,271 \quad X_1 = 1,12 \quad X_2 = 1,91 \quad X_m = 23,1$$

Exercício 7

Motor de indução trifásico, ligado em Y, 6 pólos, 460 V (tensão de linha), 20 KW e 60 Hz têm os seguintes valores de parâmetros em Ω /fase, referidos ao estator. Determine o valor da resistência rotórica requerida para que o torque máximo esteja na partida.

$$R_1 = 0,271 \quad X_1 = 1,12 \quad X_2 = 1,91 \quad X_m = 23,1$$

$$R_2 = \sqrt{0,2465^2 + (1,071 + 1,91)^2} \cdot (1,0)$$

$$R_2 = 2,99 \, \Omega$$

Exercício 7

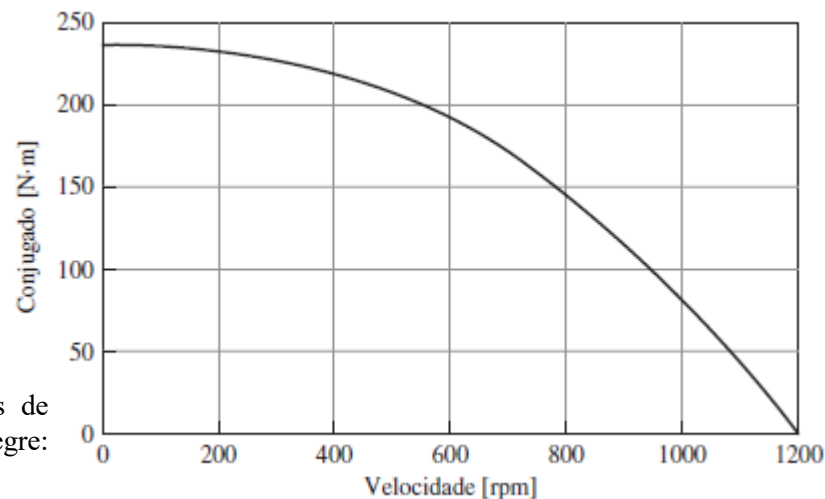
Motor de indução trifásico, ligado em Y, 6 pólos, 460 V (tensão de linha), 20 KW e 60 Hz têm os seguintes valores de parâmetros em Ω /fase, referidos ao estator. Determine o valor da resistência rotórica requerida para que o torque máximo esteja na partida.

$$R_1 = 0,271 \quad X_1 = 1,12 \quad X_2 = 1,91 \quad X_m = 23,1$$

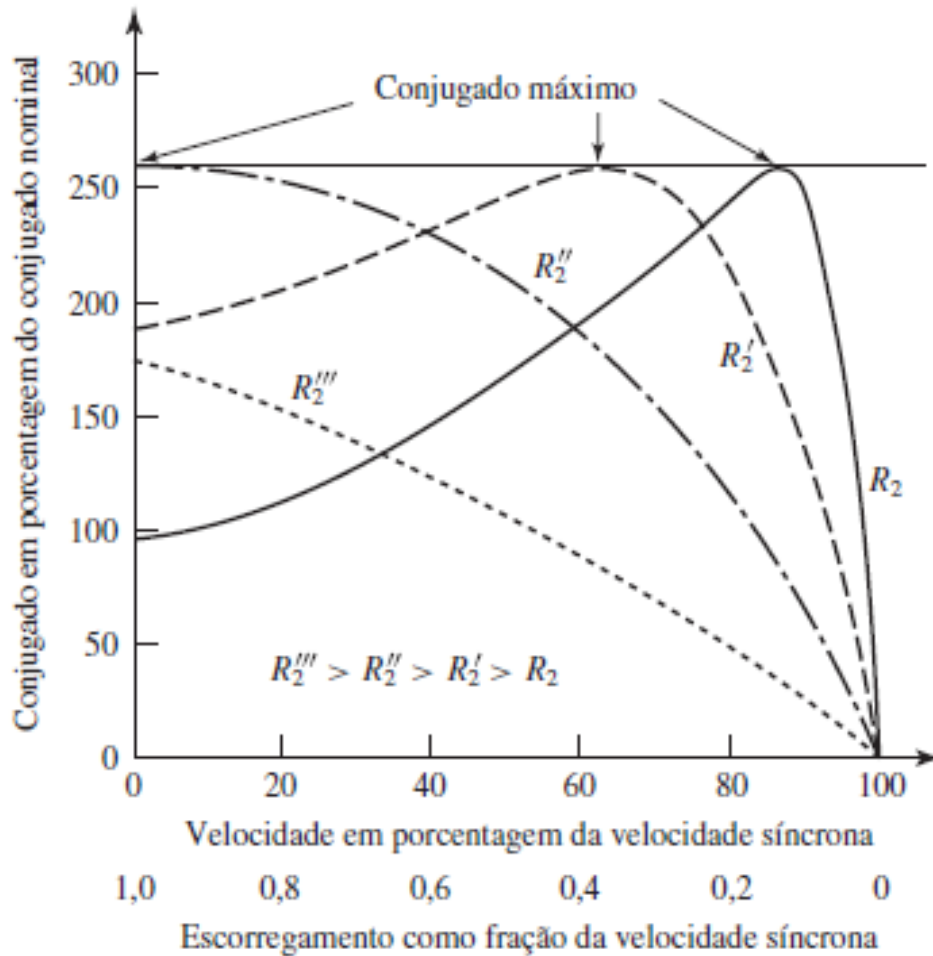
$$R_2 = \sqrt{0,2465^2 + (1,071 + 1,91)^2} \cdot (1,0)$$

$$R_2 = 2,99 \, \Omega$$

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



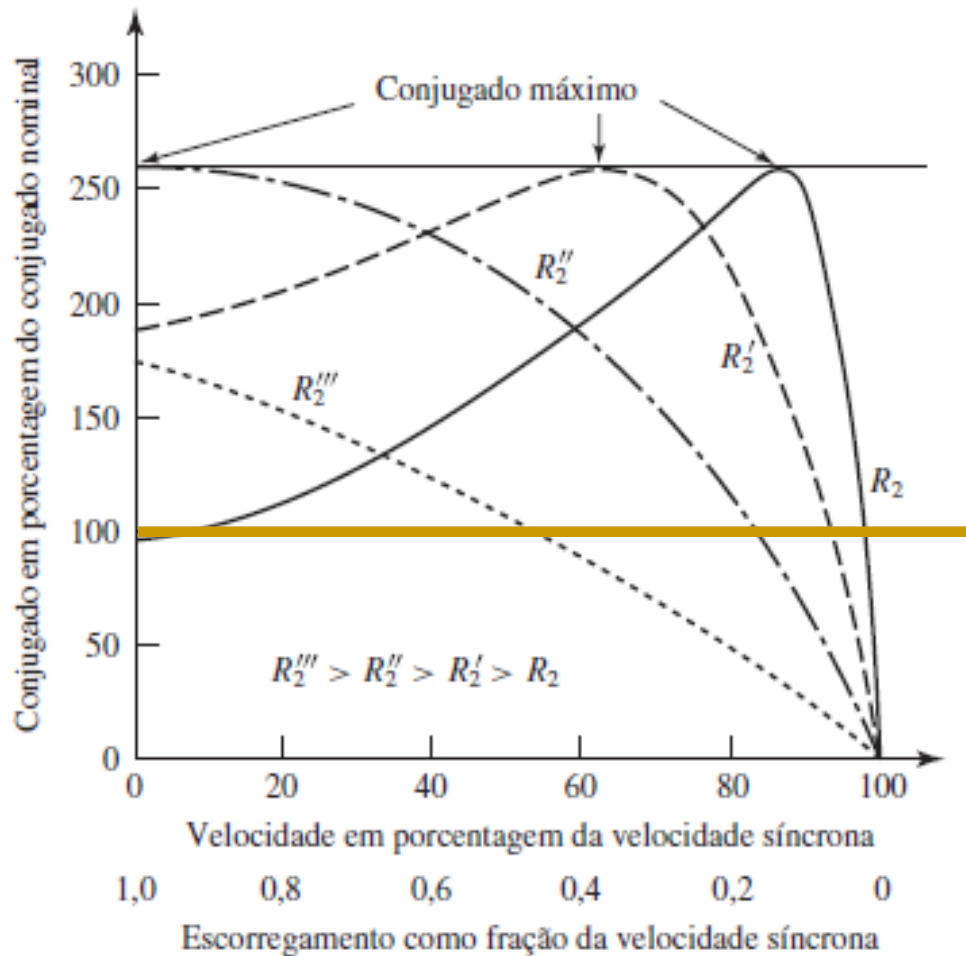
Variação da Resistência Rotórica



A variação da resistência rotórica pode ser feita em motores de indução trifásicos com rotor bobinado, onde há acesso aos terminais do rotor.

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

Variação da Resistência Rotórica

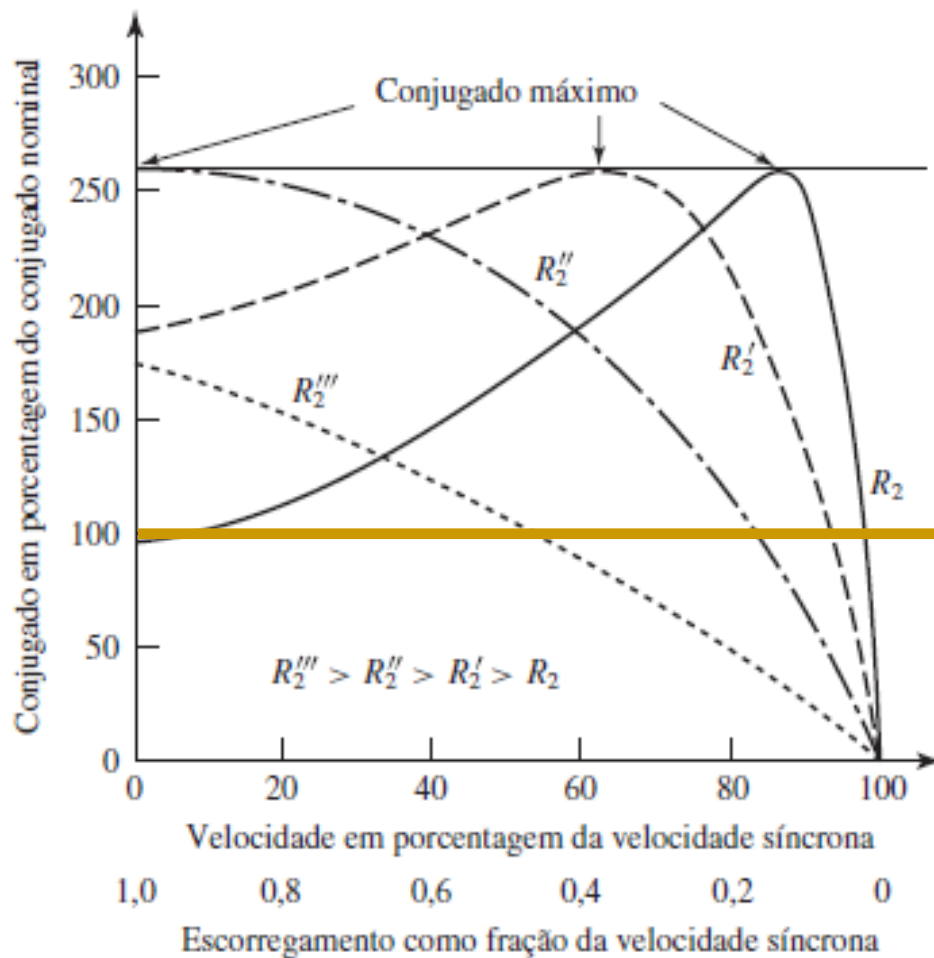


A variação da resistência rotórica pode ser feita em motores de indução trifásicos com rotor bobinado, onde há acesso aos terminais do rotor.

Mudança do torque nominal e escorregamento nominal do motor, para cada condição

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

Variação da Resistência Rotórica



A variação da resistência rotórica pode ser feita em motores de indução trifásicos com rotor bobinado, onde há acesso aos terminais do rotor.

Mudança do torque nominal e escorregamento nominal do motor, para cada condição

Em manutenção, a troca de rotores em motores com quebra de barras deve ser realizada com critério!

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

Exercício 8

Motor de indução trifásico de rotor bobinado, 4 pólos, 460 V, 60 Hz e 40 kW, tem os seguintes parâmetros, expressos em Ω /fase, referidos ao estator. Usando MATLAB, plote conjugado mecânico em função da velocidade do rotor em rpm para as resistências do rotor: 0,1, 0,2, 0,5, 1,0 e 1,5 Ω /fase.

$$R_1 = 0,163 \quad X_1 = 0,793 \quad X_2 = 1,101 \quad X_m = 18,9$$

Exercício 8

Motor de indução trifásico de rotor bobinado, 4 pólos, 460 V, 60 Hz e 40 kW, tem os seguintes parâmetros, expressos em Ω /fase, referidos ao estator. Usando MATLAB, plote conjugado mecânico em função da velocidade do rotor em rpm para as resistências do rotor: 0,1, 0,2, 0,5, 1,0 e 1,5 Ω /fase.

```
clc
clear
% Aqui estão os parâmetros do motor
V1 = 460/sqrt(3);
Nph = 3; %número de fases (phases)
poles = 4;
fe = 60;
R1 = 0.163;
X1 = 0.793;
X2 = 1.101;
Xm = 18.87;
```

Exercício 8

Motor de indução trifásico de rotor bobinado, 4 pólos, 460 V, 60 Hz e 40 kW, tem os seguintes parâmetros, expressos em Ω /fase, referidos ao estator. Usando MATLAB, plote conjugado mecânico em função da velocidade do rotor em rpm para as resistências do rotor: 0,1, 0,2, 0,5, 1,0 e 1,5 Ω /fase.

%Calcule a velocidade síncrona

omegas = 4*pi*fe/poles;

ns = 120*fe/poles;

%Calcule o equivalente Thévenin do estator

Z1eq = j*Xm*(R1+j*X1)/(R1 + j*(X1+Xm));

R1eq = real(Z1eq);

X1eq = imag(Z1eq);

V1eq = abs(V1*j*Xm/(R1 + j*(X1+Xm)));

Exercício 8

Motor de indução trifásico de rotor bobinado, 4 pólos, 460 V, 60 Hz e 40 kW, tem os seguintes parâmetros, expressos em Ω /fase, referidos ao estator. Usando MATLAB, plote conjugado mecânico em função da velocidade do rotor em rpm para as resistências do rotor: 0,1, 0,2, 0,5, 1,0 e 1,5 Ω /fase.

%Aqui está o laço de repetição da resistência do rotor

for m = 1:5

if m == 1

R2 = 0.1;

elseif m==2

R2 = 0.2;

elseif m==3

R2 = 0.5;

elseif m==4

R2 = 1.0;

else

R2 = 1.5;

end

Exercício 8

Motor de indução trifásico de rotor bobinado, 4 pólos, 460 V, 60 Hz e 40 kW, tem os seguintes parâmetros, expressos em Ω /fase, referidos ao estator. Usando MATLAB, plote conjugado mecânico em função da velocidade do rotor em rpm para as resistências do rotor: 0,1, 0,2, 0,5, 1,0 e 1,5 Ω /fase.

```
% Calcule o conjugado
s = 0:.001:1; %Escorregamento
rpm = ns*(1-s);
I2 = abs(V1eq./(Z1eq + j*X2 + R2./s)); %I2
Tmech = Nph*I2.^2*R2./(s*omegas); %Conjugado eletromecânico
%Agora plote
plot(rpm,Tmech,'LineWidth',2)
if m ==1
hold on
end
end %Fim do laço de repetição da resistência
```

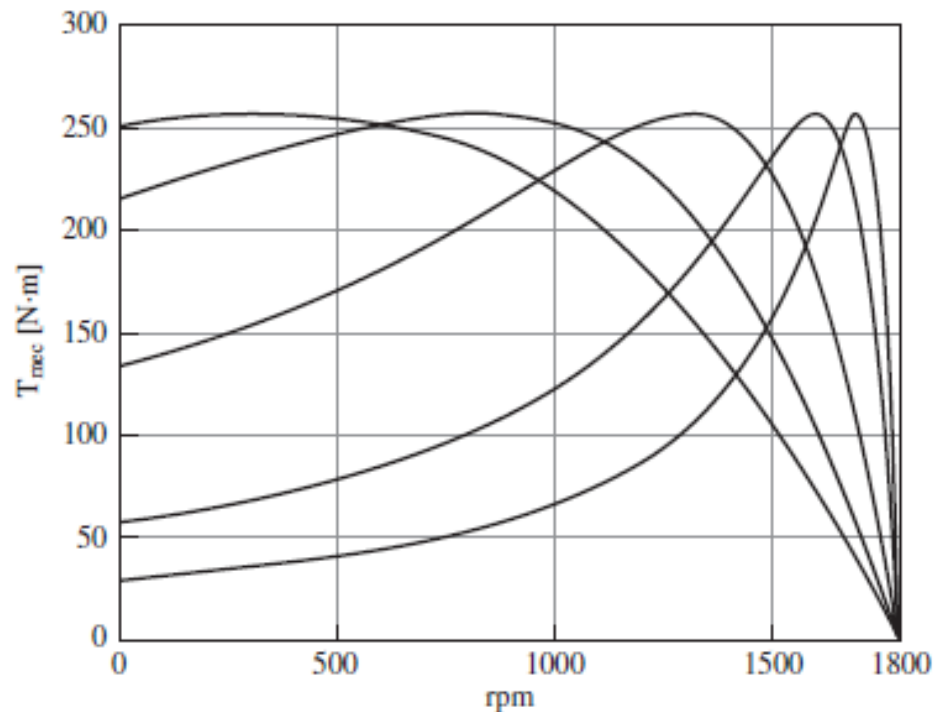
Exercício 8

Motor de indução trifásico de rotor bobinado, 4 pólos, 460 V, 60 Hz e 40 kW, tem os seguintes parâmetros, expressos em Ω /fase, referidos ao estator. Usando MATLAB, plote conjugado mecânico em função da velocidade do rotor em rpm para as resistências do rotor: 0,1, 0,2, 0,5, 1,0 e 1,5 Ω /fase.

```
hold off
xlabel('rpm','FontSize',20)
ylabel('T_{mec} [N\cdot m]','FontSize',20)
xlim([0 1800])
set(gca,'FontSize',20);
set(gca,'xtick',[0 500 1000 1500 1800])
set(gca,'ytick',[0 50 100 150 200 250 300])
grid on
```

Exercício 8

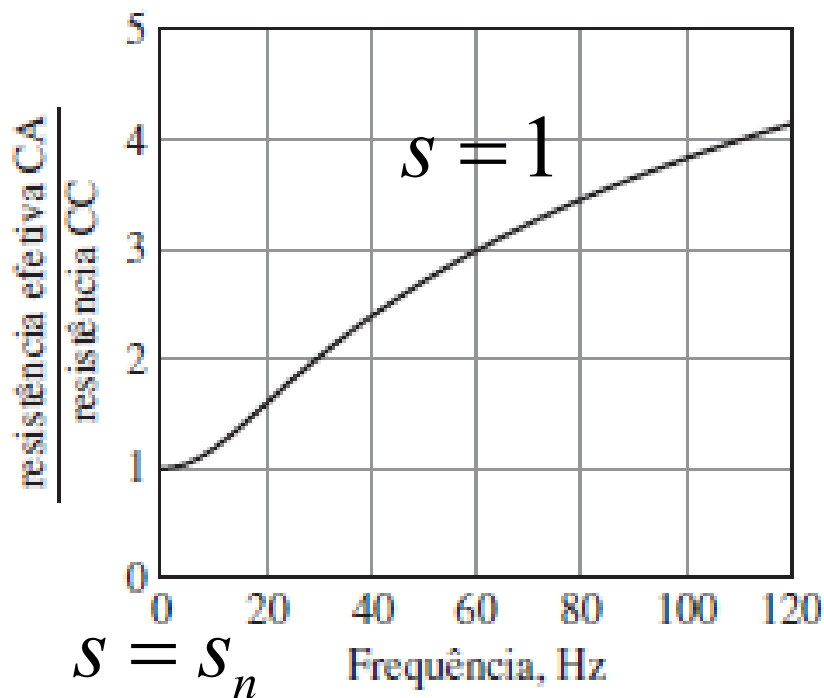
Motor de indução trifásico de rotor bobinado, 4 pólos, 460 V, 60 Hz e 40 kW, tem os seguintes parâmetros, expressos em Ω /fase, referidos ao estator. Usando MATLAB, plote conjugado mecânico em função da velocidade do rotor em rpm para as resistências do rotor: 0,1, 0,2, 0,5, 1,0 e 1,5 Ω /fase.



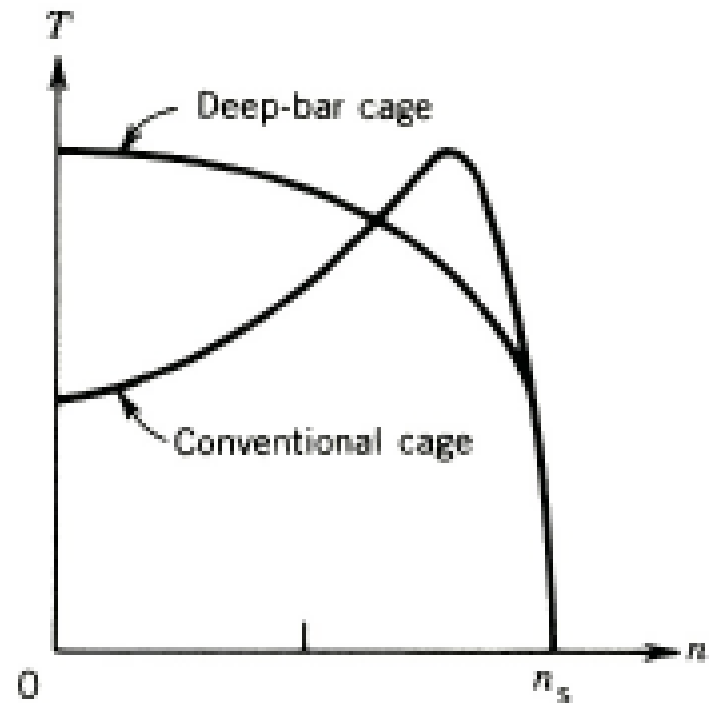
Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

Rotor com barras profundas ou dupla gaiola

- Efeito geral: reduzir resistência rotórica na partida



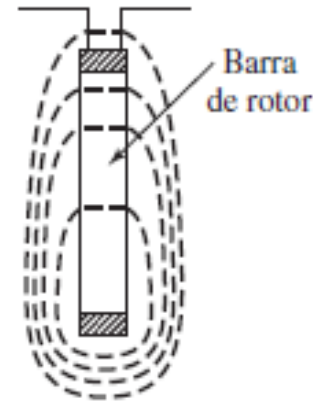
Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.



Fonte: Sen, P. C.. Principles of Electric Machines and Power Electronics. 3ª Ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2014.

Rotor com barras profundas ou dupla gaiola

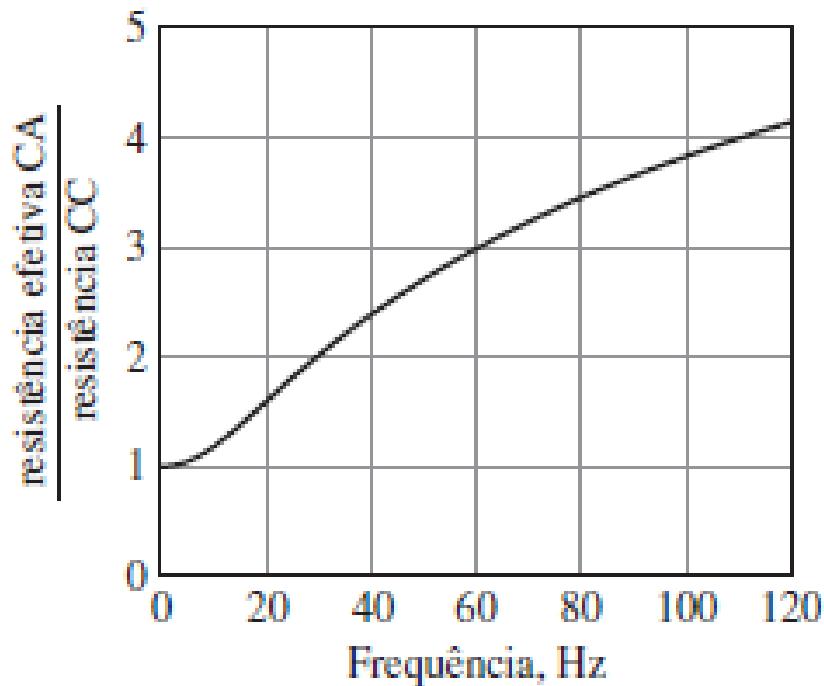
■ Esquemático: barra profunda



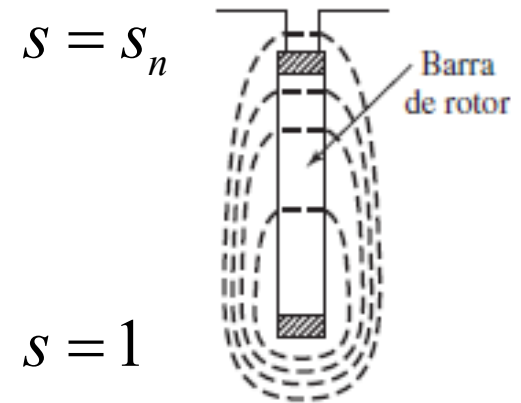
Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

Rotor com barras profundas ou dupla gaiola

■ Esquemático: barra profunda



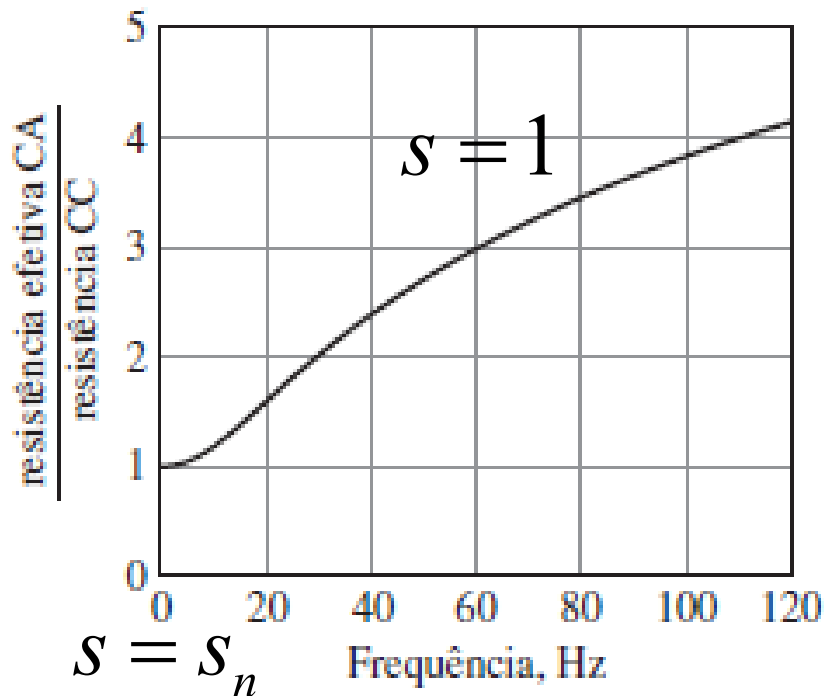
Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.



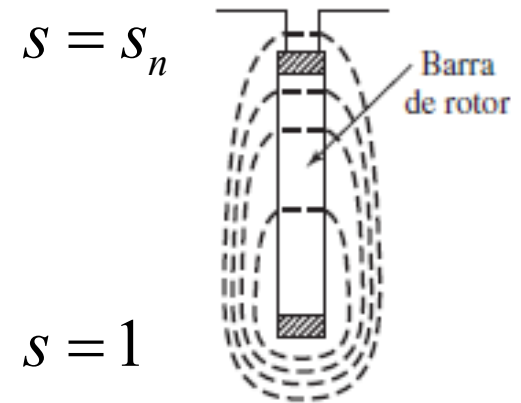
Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

Rotor com barras profundas ou dupla gaiola

■ Esquemático: barra profunda



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

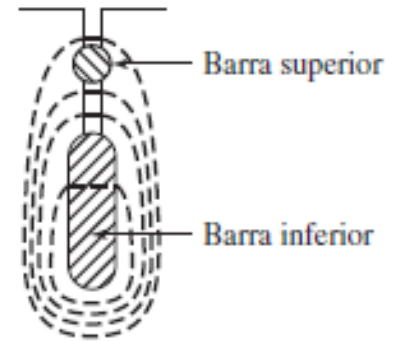


Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

Redução da corrente de partida pensando apenas no projeto do MIT

Rotor com barras profundas ou dupla gaiola

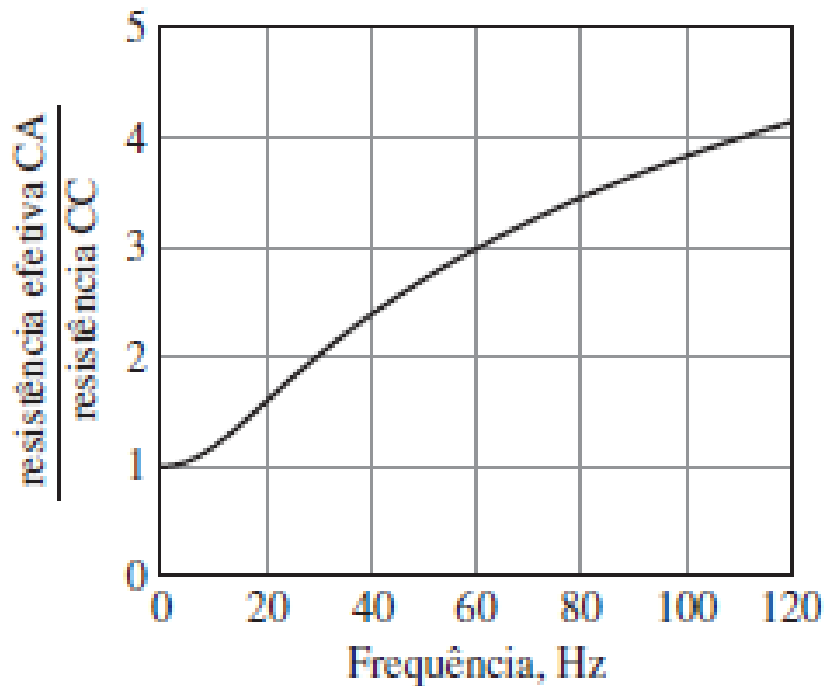
■ Esquemático: dupla gaiola



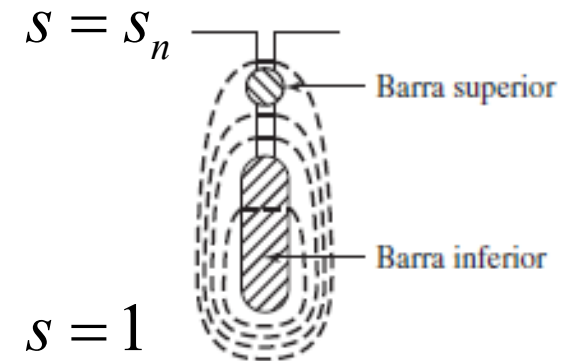
Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

Rotor com barras profundas ou dupla gaiola

■ Esquemático: dupla gaiola



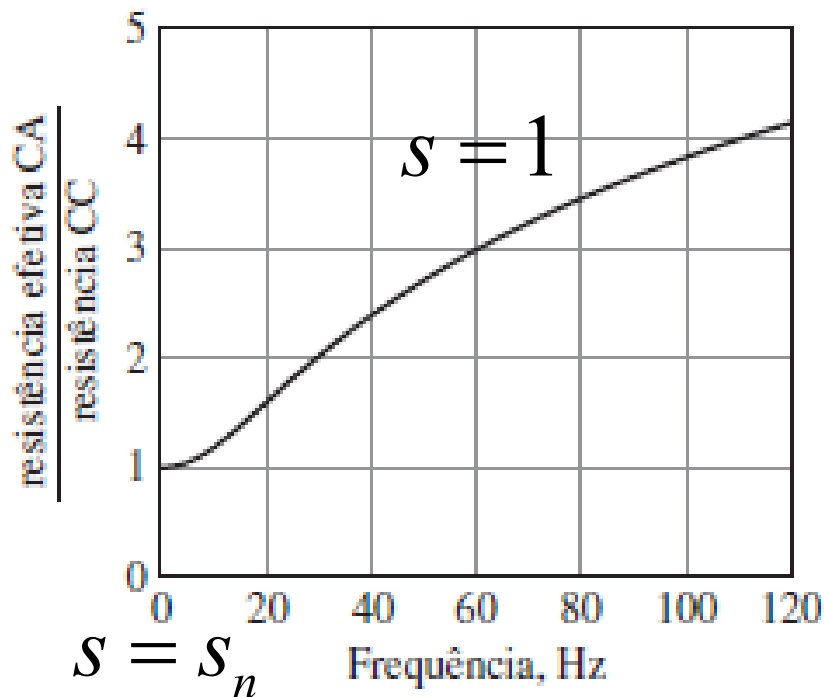
Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.



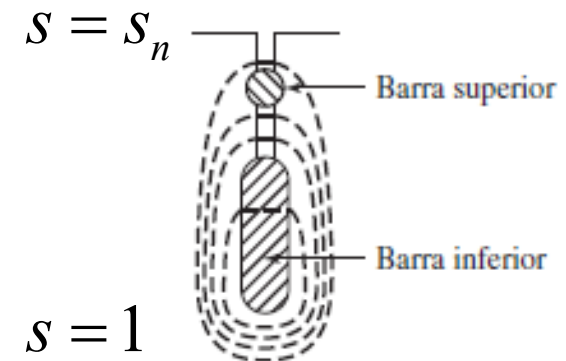
Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

Rotor com barras profundas ou dupla gaiola

■ Esquemático: dupla gaiola



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



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

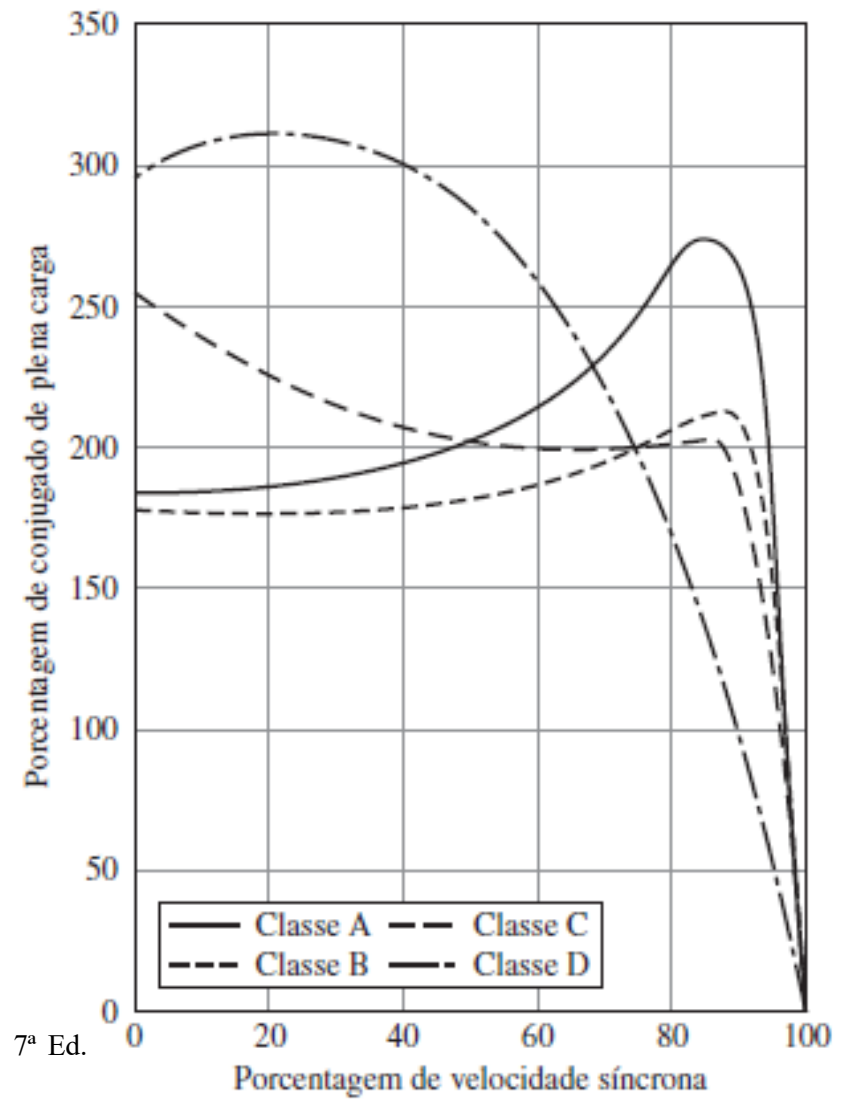
Redução da corrente de partida pensando apenas no projeto do MIT

Tipos de MITs

Gráfico com características

■ NEMA:

- A ou B
- C
- D



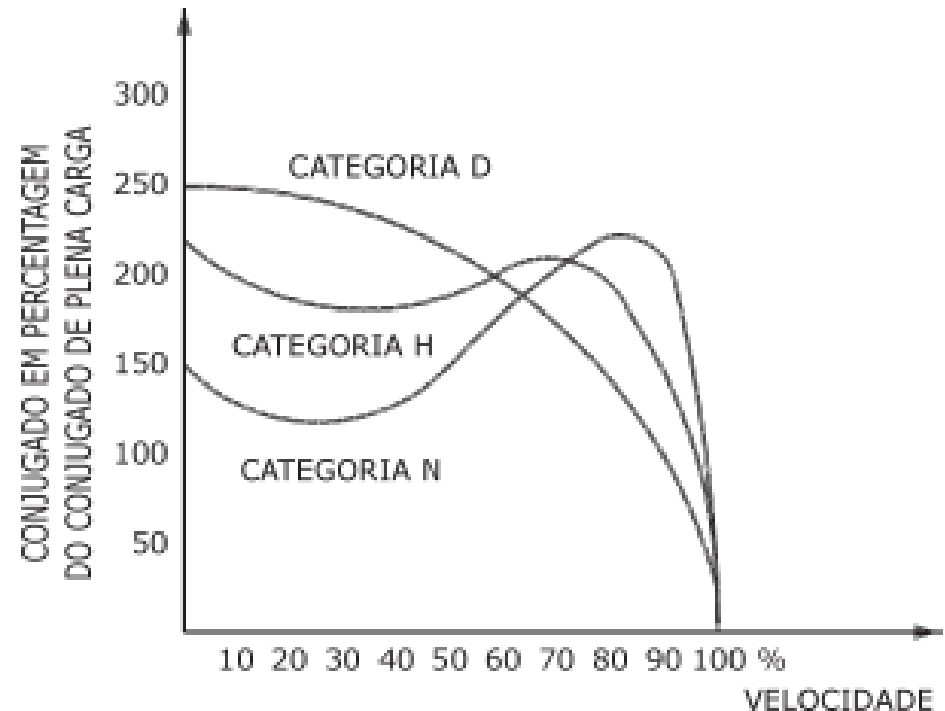
Fonte: Umans, S. D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. 7ª Ed.
Porto Alegre: AMGH, 2014.

Tipos de MITs

■ Gráfico com características

□ NBR 17094:

- N
- H
- D
- Para partida Y-Delta:
 - NY
 - HY
- Segurança aumentada

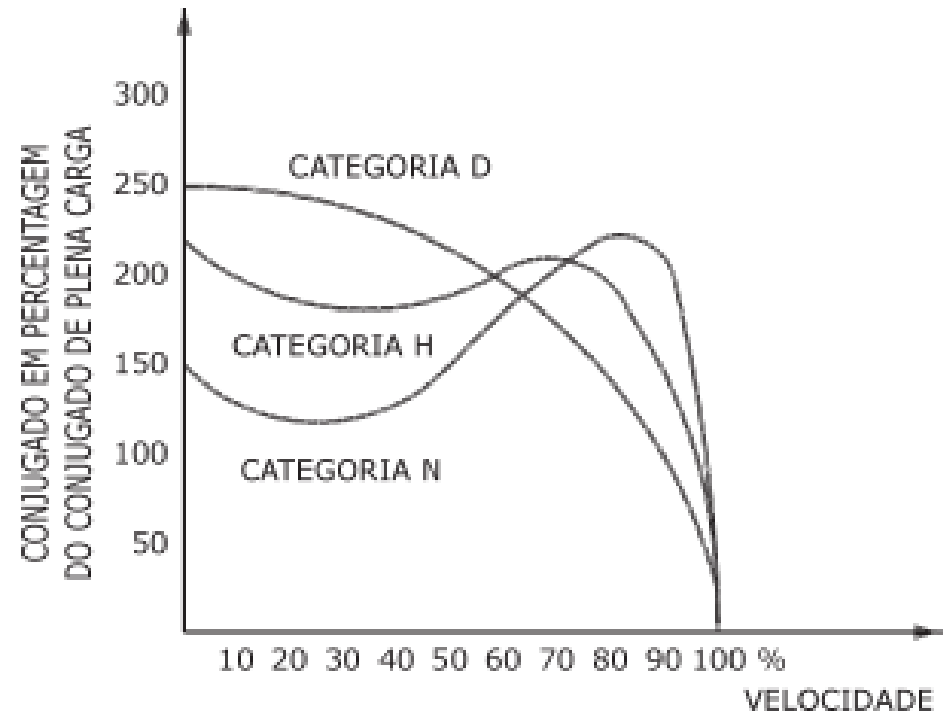


Tipos de MITs

■ Gráfico com características

■ NBR 17094:

- N
- H
- D
- Para partida Y-Delta:
 - NY
 - HY
- Segurança aumentada



Categorias de partida	Torque de partida	Corrente de partida	Escoressamento
N	Normal	Normal	Baixo
H	Alto	Normal	Baixo
D	Alto	Normal	Alto

Fonte: WEG. Guia de Aplicação Inversores de Frequência. 3ª. Edição .

Partida do MIT

■ Características:

Partida do MIT

■ Características:

- ❑ Tempo de rotor bloqueado é o tempo máximo que o rotor de uma máquina de indução pode ficar travado sem que o mesmo sofra danos devido o calor dissipado pelas altas correntes nas barras/anéis de curto.

Partida do MIT

■ Características:

- ❑ Tempo de rotor bloqueado é o tempo máximo que o rotor de uma máquina de indução pode ficar travado sem que o mesmo sofra danos devido o calor dissipado pelas altas correntes nas barras/anéis de curto.
- À frio: tempo relativo a primeira partida ou motor em sua operação com partidas sucedidas de grandes intervalos de operação a vazio (tempo a vazio 10x maior que o tempo de partida);

Partida do MIT

■ Características:

- Tempo de rotor bloqueado é o tempo máximo que o rotor de uma máquina de indução pode ficar travado sem que o mesmo sofra danos devido o calor dissipado pelas altas correntes nas barras/anéis de curto.
- À frio: tempo relativo a primeira partida ou motor em sua operação com partidas sucedidas de grandes intervalos de operação a vazio (tempo a vazio 10x maior que o tempo de partida);
- À quente: tempo relativo ao motor que em sua operação necessita de partidas sucessivas sem grandes intervalos de operação a vazio.

Partida do MIT

■ Características:

$$T_{mec} = \left(\frac{P}{2\omega_e} \right) \cdot \frac{3 \cdot V_{1,eq}^2 \cdot (R_2/s)}{\left(R_{1,eq} + R_2/s \right)^2 + \left(X_{1,eq} + X_2 \right)^2}$$

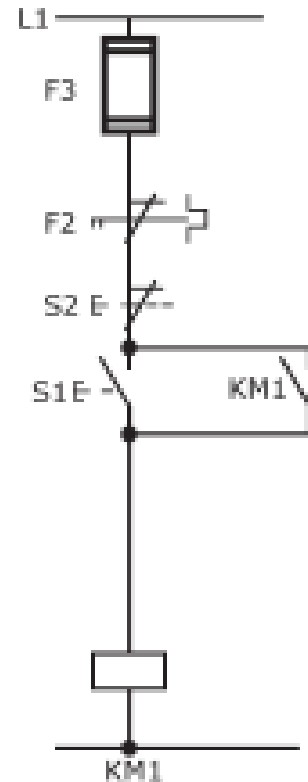
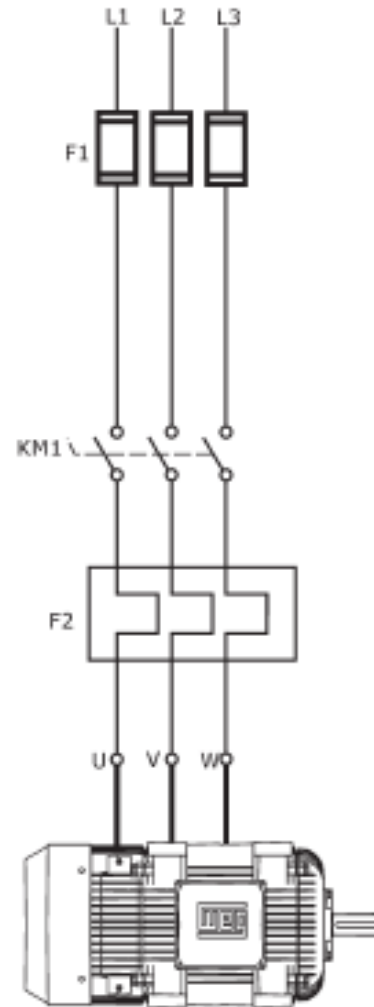
- Qualquer redução de tensão, gera uma redução no torque e viabiliza a partida.

Partida do MIT

■ Características:

$$T_{mec} = \left(\frac{P}{2\omega_e} \right) \cdot \frac{3 \cdot V_{1,eq}^2 \cdot (R_2/s)}{(R_{1,eq} + R_2/s)^2 + (X_{1,eq} + X_2)^2}$$

- ❑ Qualquer redução de tensão, gera uma redução no torque e viabiliza a partida.
- ❑ Devido a PARTIDA DIRETA



Partida do MIT – Estrela-Triângulo

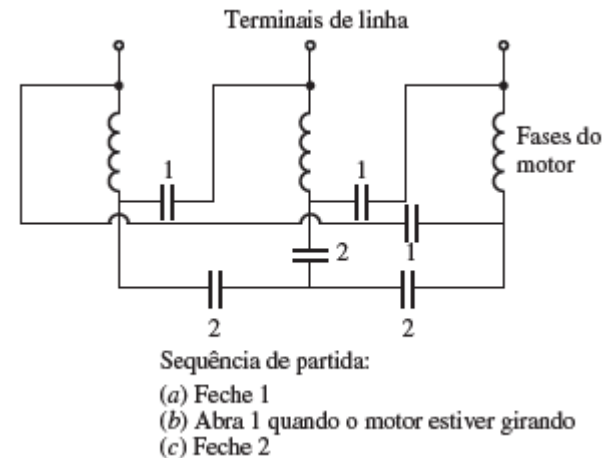
■ Características:

$$T_{mec} = \left(\frac{P}{2\omega_e} \right) \cdot \frac{3 \cdot V_{1,eq}^2 \cdot (R_2/s)}{(R_{1,eq} + R_2/s)^2 + (X_{1,eq} + X_2)^2}$$

- Qualquer redução de tensão, gera uma redução no torque e viabiliza a partida.

■ Estrela-triângulo:

$$\frac{T_Y}{V_Y^2} = \frac{T_\Delta}{V_\Delta^2} \rightarrow T_Y = \frac{T_\Delta}{3}$$



Fonte: Chapman, S. Fundamentos de Máquinas Elétricas. 5ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

Partida do MIT – Estrela-Triângulo

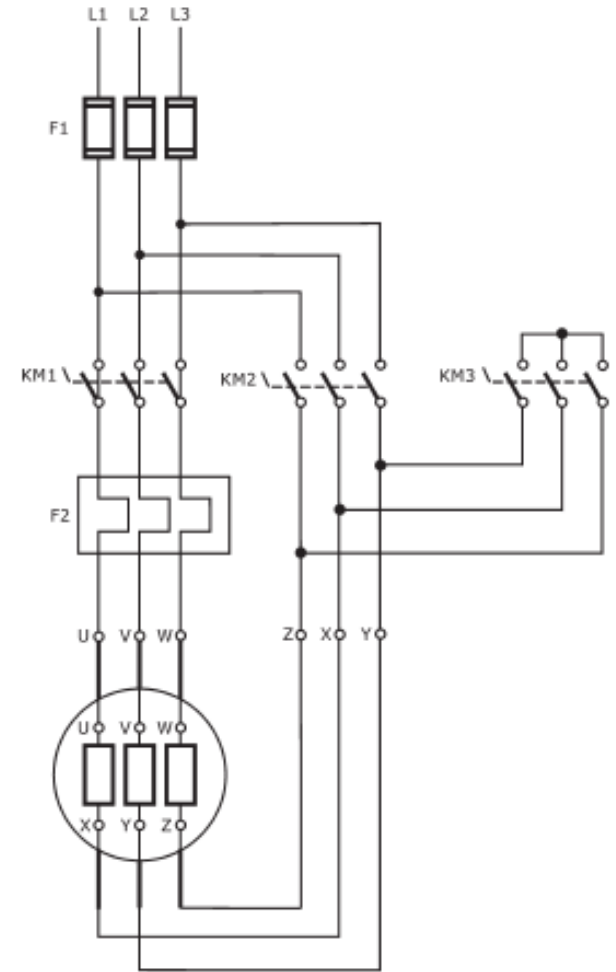
■ Características:

$$T_{mec} = \left(\frac{P}{2\omega_e} \right) \cdot \frac{3 \cdot V_{1,eq}^2 \cdot (R_2/s)}{(R_{1,eq} + R_2/s)^2 + (X_{1,eq} + X_2)^2}$$

- Qualquer redução de tensão, gera uma redução no torque e viabiliza a partida.

■ Estrela-triângulo:

$$\frac{T_Y}{V_Y^2} = \frac{T_\Delta}{V_\Delta^2} \rightarrow T_Y = \frac{T_\Delta}{3}$$



Fonte: WEG. Guia de Aplicação Inversores de Frequência. 3ª. Edição .

Partida do MIT – Estrela-Triângulo

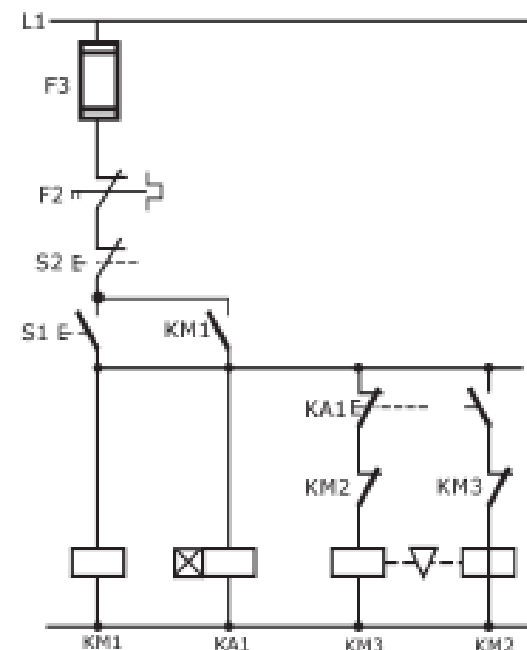
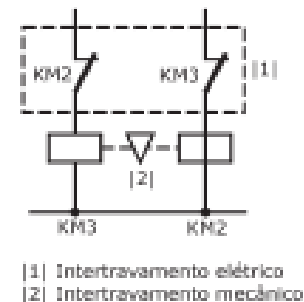
■ Características:

$$T_{mec} = \left(\frac{P}{2\omega_e} \right) \cdot \frac{3 \cdot V_{1,eq}^2 \cdot (R_2/s)}{(R_{1,eq} + R_2/s)^2 + (X_{1,eq} + X_2)^2}$$

- Qualquer redução de tensão, gera uma redução no torque e viabiliza a partida.

■ Estrela-triângulo:

$$\frac{T_Y}{V_Y^2} = \frac{T_\Delta}{V_\Delta^2} \rightarrow T_Y = \frac{T_\Delta}{3}$$



Fonte: WEG. Guia de Aplicação Inversores de Frequência. 3ª. Edição .

Partida do MIT – Estrela-Triângulo

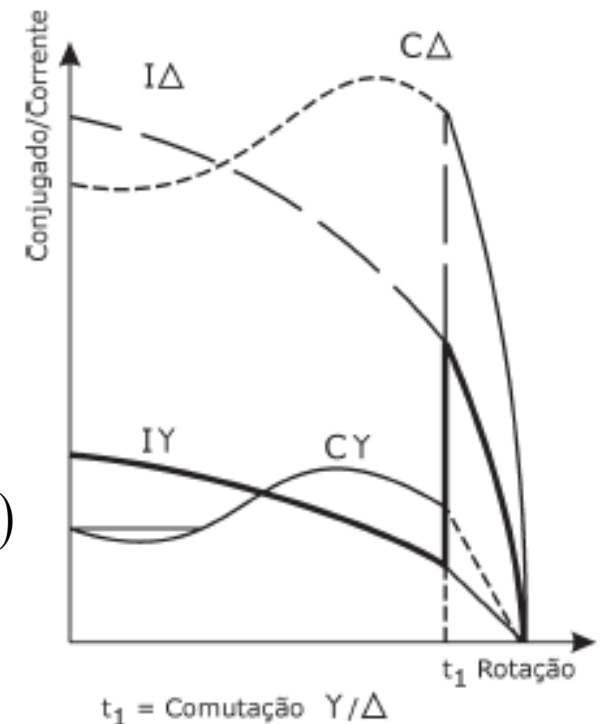
■ Características:

$$T_{mec} = \left(\frac{P}{2\omega_e} \right) \cdot \frac{3 \cdot V_{1,eq}^2 \cdot (R_2/s)}{\left(R_{1,eq} + R_2/s \right)^2 + \left(X_{1,eq} + X_2 \right)^2}$$

- Qualquer redução de tensão, gera uma redução no torque e viabiliza a partida.

- Estrela-triângulo: $T_{mec} = \left(\frac{P}{2\omega_e} \right) \cdot 3 \cdot I_2^2 \cdot (R_2/s)$

$$T_Y = \frac{T_\Delta}{3} \rightarrow \frac{T_Y}{I_Y^2} = \frac{T_\Delta}{I_\Delta^2} \rightarrow I_Y = \frac{I_\Delta}{\sqrt{3}}$$



Fonte: WEG. Guia de Aplicação Inversores de Frequência. 3ª. Edição .

Partida do MIT – Chave Compensadora

Características:

$$T_{mec} = \left(\frac{P}{2\omega_e} \right) \cdot \frac{3 \cdot V_{1,eq}^2 \cdot (R_2/s)}{\left(R_{1,eq} + R_2/s \right)^2 + \left(X_{1,eq} + X_2 \right)^2}$$

- Qualquer redução de tensão, gera uma redução no torque e viabiliza a partida.

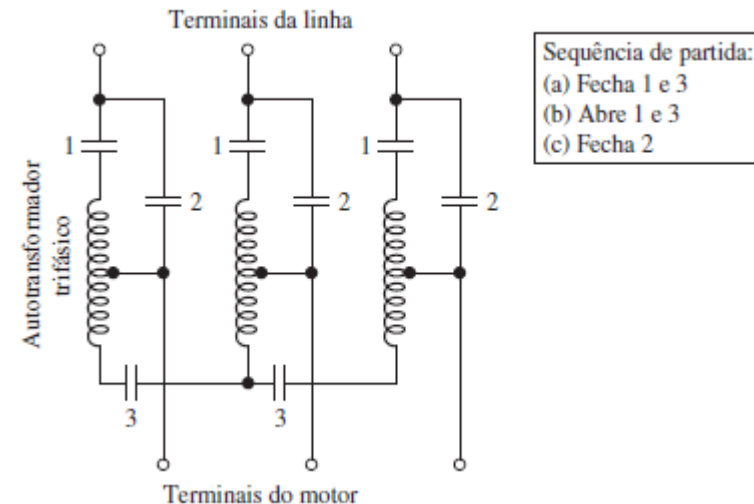
Chave compensadora:

$$\frac{T_I}{V_I^2} = \frac{T_F}{V_F^2} \rightarrow V_I = k \cdot V_F$$

$$\therefore 0 \leq k < 1$$

$$T_I = \frac{T_F}{k^2}$$

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



Partida do MIT – Chave Compensadora

■ Características:

$$T_{mec} = \left(\frac{P}{2\omega_e} \right) \cdot \frac{3 \cdot V_{1,eq}^2 \cdot (R_2/s)}{\left(R_{1,eq} + R_2/s \right)^2 + \left(X_{1,eq} + X_2 \right)^2}$$

- Qualquer redução de tensão, gera uma redução no torque e viabiliza a partida.

$$\frac{T_I}{V_I^2} = \frac{T_F}{V_F^2} \rightarrow V_I = k \cdot V_F$$

$$\therefore 0 \leq k < 1$$

$$T_I = \frac{T_F}{k^2}$$

- Chave compensadora:
- Em geral: k é 90%, 80% e 70% da tensão final

$$T_{mec} = \left(\frac{P}{2\omega_e} \right) \cdot 3 \cdot I_2^2 \cdot (R_2/s)$$

$$T_I = \frac{T_F}{k^2} \rightarrow \frac{T_I}{I_I^2} = \frac{T_F}{I_F^2} \rightarrow I_I = \frac{I_F}{k}$$

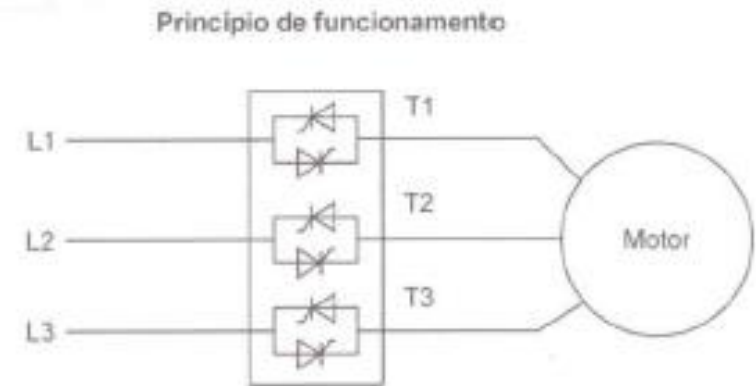
Partida do MIT – Soft Starter

■ Características:

$$T_{mec} = \left(\frac{P}{2\omega_e} \right) \cdot \frac{3 \cdot V_{1,eq}^2 \cdot (R_2/s)}{\left(R_{1,eq} + R_2/s \right)^2 + \left(X_{1,eq} + X_2 \right)^2}$$

- Qualquer redução de tensão, gera uma redução no torque e viabiliza a partida.

- Soft Starter:
- Aumento contínuo da tensão de alimentação



Soft-starters basicamente reduzem a corrente de partida do motor, controlando a tensão.

O controle é feito por tiristores

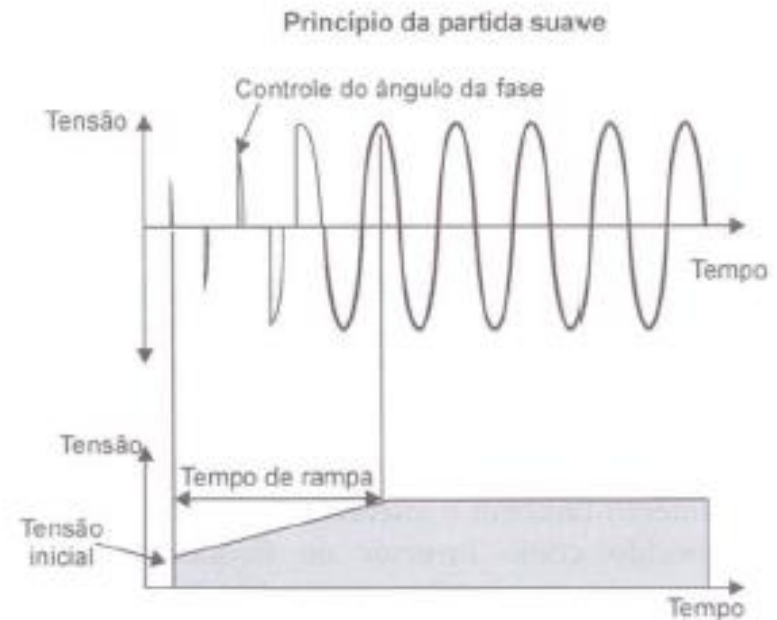
Partida do MIT – Soft Starter

■ Características:

$$T_{mec} = \left(\frac{P}{2\omega_e} \right) \cdot \frac{3 \cdot V_{1,eq}^2 \cdot (R_2/s)}{\left(R_{1,eq} + R_2/s \right)^2 + \left(X_{1,eq} + X_2 \right)^2}$$

- Qualquer redução de tensão, gera uma redução no torque e viabiliza a partida.

- Soft Starter:
- Aumento contínuo da tensão de alimentação

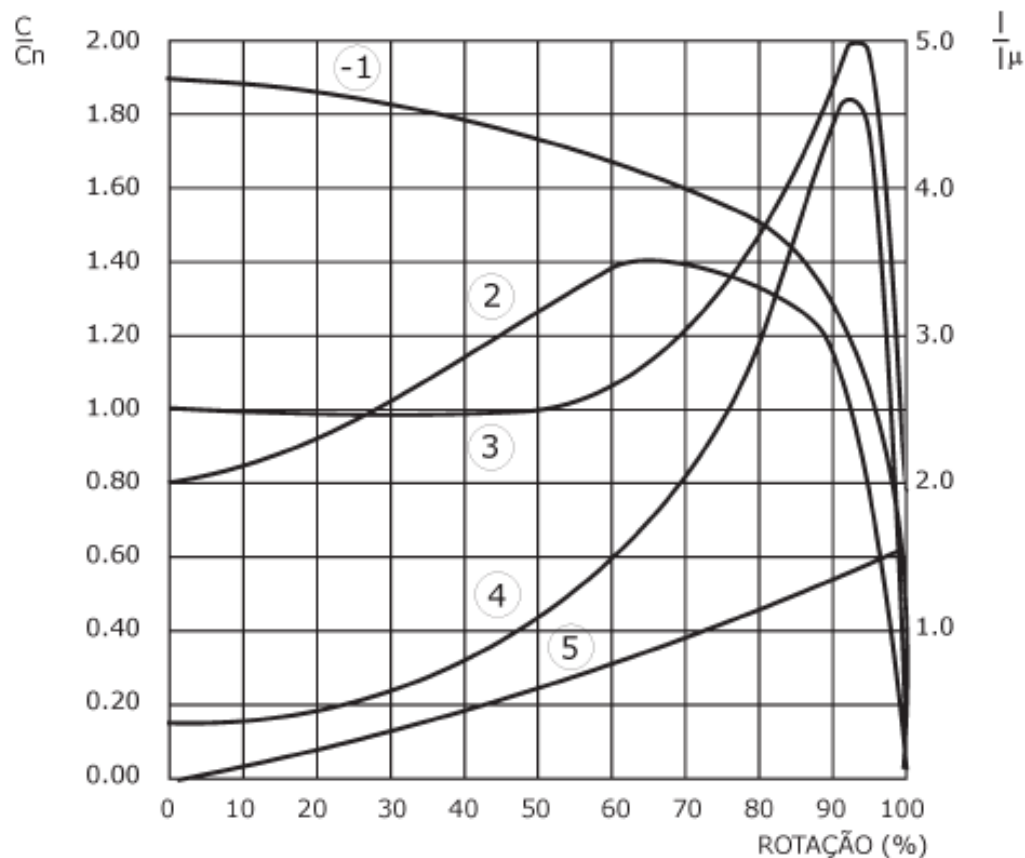


Fonte: VIEIRA Jr., J. C. M. Aulas 09 e 10 curso SEL-0437 Eficiência Energética, USP, 2019 .

Partida do MIT

■ Características diversas

- “ROTAÇÃO (%) – C/C_n ” (1)
- “ROTAÇÃO (%) – I/I_μ ” (2)



1 - CORRENTE DE PARTIDA DIRETA
2 - CORRENTE DE PARTIDA C/SOFT-STARTER
3 - CONJUGADO COM PARTIDA DIRETA
4 - CONJUGADO COM SOFT-STARTER
5 - CONJUGADO DA CARGA

Fonte: WEG. Guia de Aplicação Inversores de Frequência. 3ª. Edição .

Avaliação 5

Motor de indução trifásico de rotor bobinado, 4 pólos, 460 V, 60 Hz e 40 kW, tem os seguintes parâmetros, expressos em Ω /fase, referidos ao estator. Usando MATLAB, plote corrente terminal em função da velocidade do rotor em rpm para as resistências do rotor: 0,1, 0,2, 0,5, 1,0 e 1,5 Ω /fase.

Avaliação 6

Motor de indução trifásico de rotor bobinado, 4 pólos, 460 V, 60 Hz e 500 HP, com anéis deslizantes curto-circuitados, têm as seguintes propriedades:

- Escorregamento em plena carga = 1,5 %;
- Perdas rotóricas (ôhmicas) para conjugado a plena carga = 5,69 kW;
- Escorregamento para o conjugado máximo é 6%;
- Corrente de rotor em conjugado máximo é 2,82 vezes a corrente de rotor a plena carga;
- Conjugado com 20% de escorregamento é 20% a mais que o conjugado a plena carga.
- Corrente do rotor com 20% de escorregamento é 3,95 vezes a corrente de rotor a plena carga.

Se a resistência do circuito do rotor for incrementada para 5 vezes maior que a atual, conectando resistências não indutivas em série com cada anel deslizante do rotor, determine: (A) para qual escorregamento o motor desenvolve o mesmo conjugado de plena carga, (b) as perdas ôhmicas totais do circuito do rotor para o conjugado a plena carga, (c) a saída em HPs no conjugado de plena carga, (d) escorregamento para o conjugado máximo, (e) corrente de rotor para o conjugado máximo, (f) conjugado de partida e (G) corrente de rotor na partida. Expresse os conjugados e corrente de rotor por unidade, com base nos valores de conjugado de plena carga

Avaliação 7

Um motor de indução trifásico industrial com rotor bobinado, ligação em Y no estator e no rotor, alimentado com tensão e frequência nominais, foi projetado para que o torque máximo fosse alcançado durante o ciclo de carga, ou seja, com um tacômetro medindo a velocidade do motor, o mínimo valor medido é a tal velocidade onde ocorre o torque máximo. O valor desta medição foi 1570 RPM, com os enrolamentos do rotor curto-circuitados. Não se conhece o valor da resistência rotórica deste motor, entretanto tem-se um banco de resistores trifásico de $3,5 \Omega/\text{fase}$ conectado em estrela. O motor foi desligado, o curto-circuito nos enrolamentos do rotor desfeito, e o enrolamento rotórico conectado a este banco de resistores. O motor foi conectado a carga novamente e, desta vez, a velocidade medida foi de 1420 RPM em frequência e tensão nominais. Qual a resistência rotórica deste motor de 4 pólos, alimentado em 60 Hz?

Avaliação 8

Numa partida estrela-triângulo, qual a redução no conjugado, quando o motor encontra-se ainda em ligação estrela? E a corrente de partida, qual a redução para o motor ainda em ligação estrela?

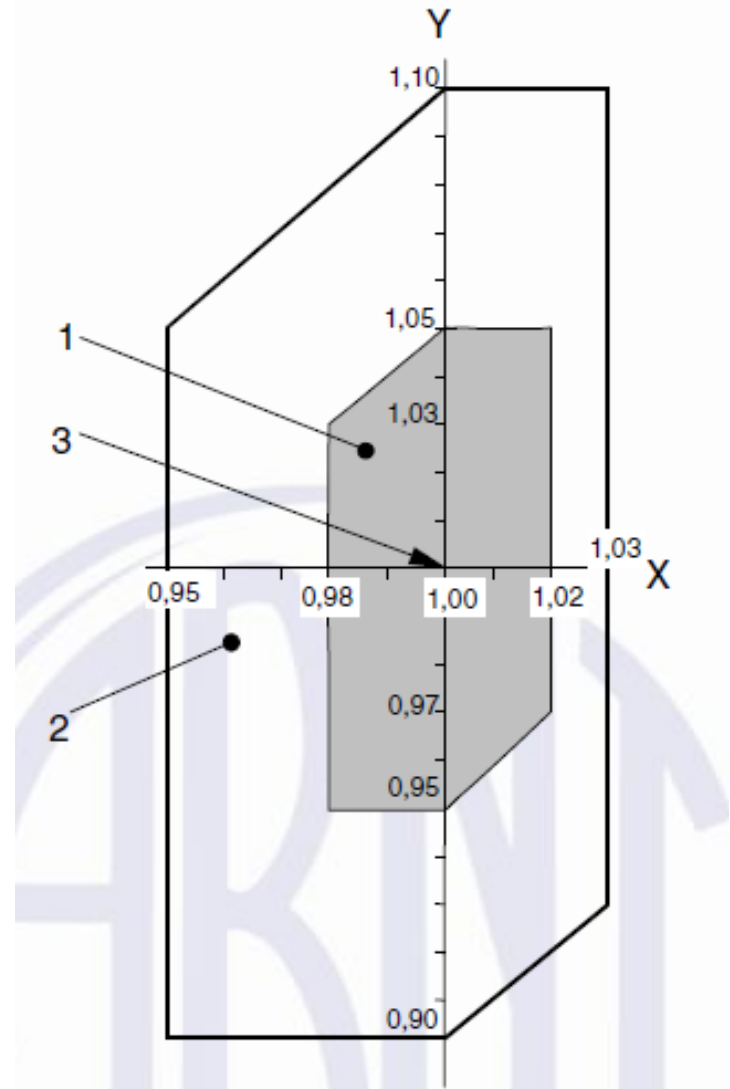
Tensões Desbalanceadas

■ ABN NBR 17094-1:

Legenda

- 1 zona A
- 2 zona B (exterior a zona A)
- 3 ponto de características nominais

X frequência – (p.u.)
Y tensão – (p.u.)



Tensões Desbalanceadas

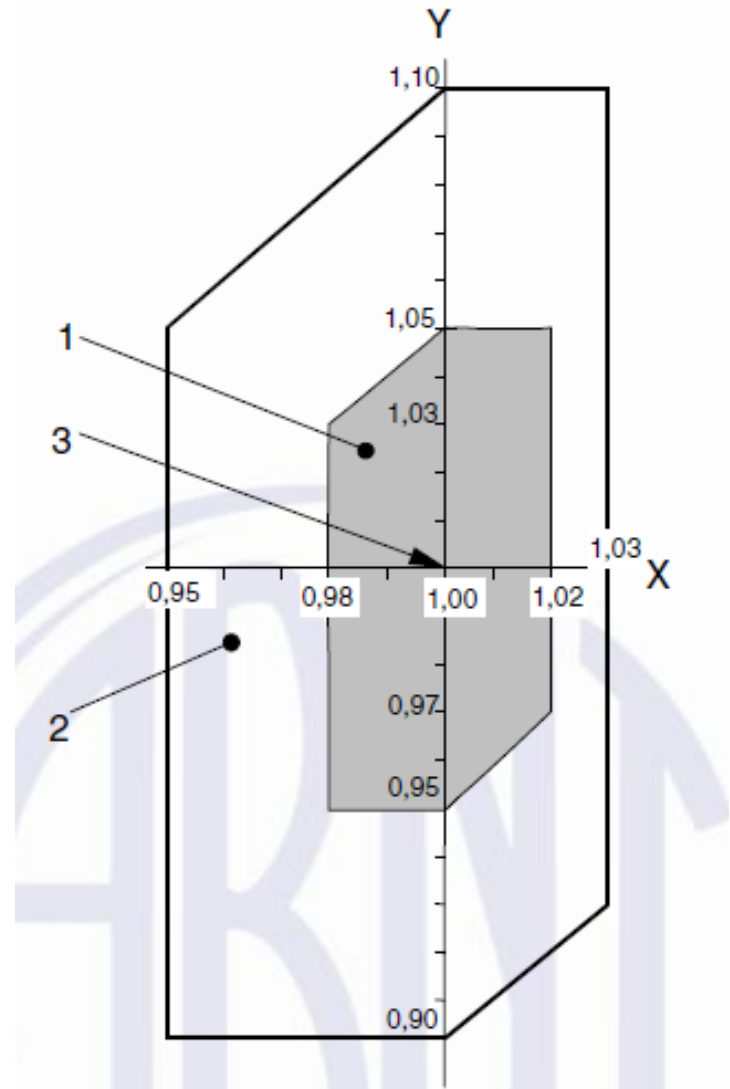
■ ABN NBR 17094-1:

Legenda

- 1 zona A
- 2 zona B (exterior a zona A)
- 3 ponto de características nominais

X frequência – (p.u.)
Y tensão – (p.u.)

■ Deve prover torque nominal contínuo na zona A



Tensões Desbalanceadas

■ ABN NBR 17094-1:

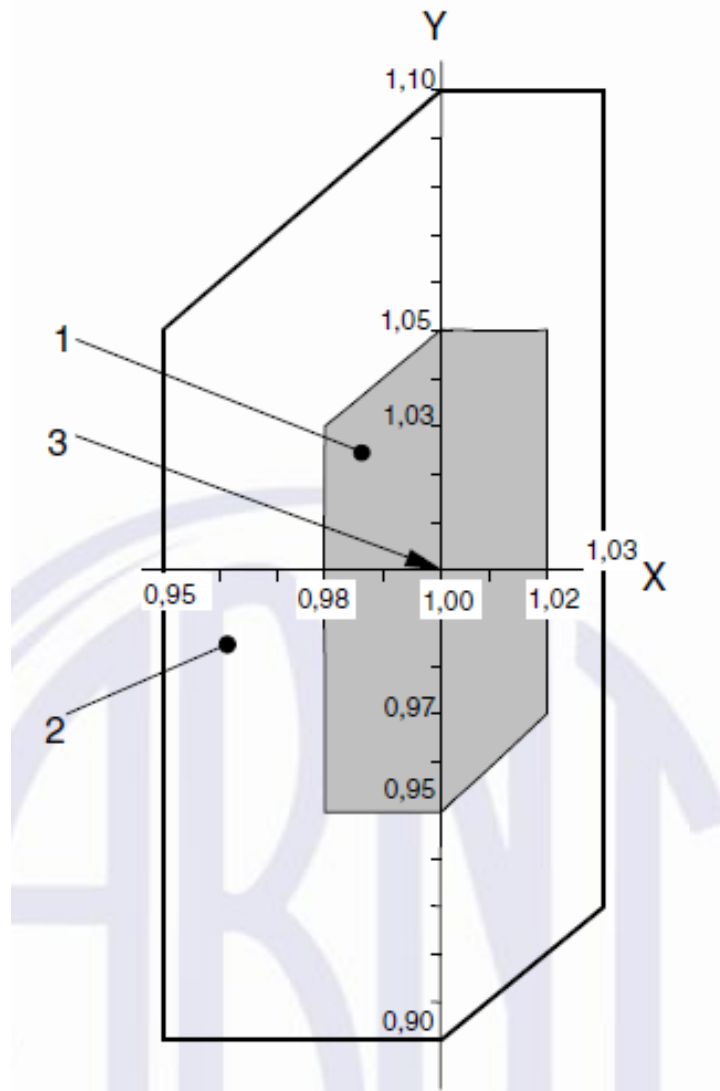
Legenda

- 1 zona A
- 2 zona B (exterior a zona A)
- 3 ponto de características nominais

X frequência – (p.u.)
Y tensão – (p.u.)

■ Deve prover torque nominal contínuo na zona A e B

■ Operação prolongada na zona B não é recomendado



Tensões Desbalanceadas

- ABN NBR 17094-1:
- Cálculo:

$$V_m = \frac{V_a + V_b + V_c}{3}$$

Tensões Desbalanceadas

- ABN NBR 17094-1:
- Cálculo:

$$V_m = \frac{V_a + V_b + V_c}{3} \quad \Delta V_{m\acute{a}x} = m\acute{a}x(|V_m - V_a|, |V_m - V_b|, |V_m - V_c|)$$

Tensões Desbalanceadas

- ABN NBR 17094-1:
- Cálculo:

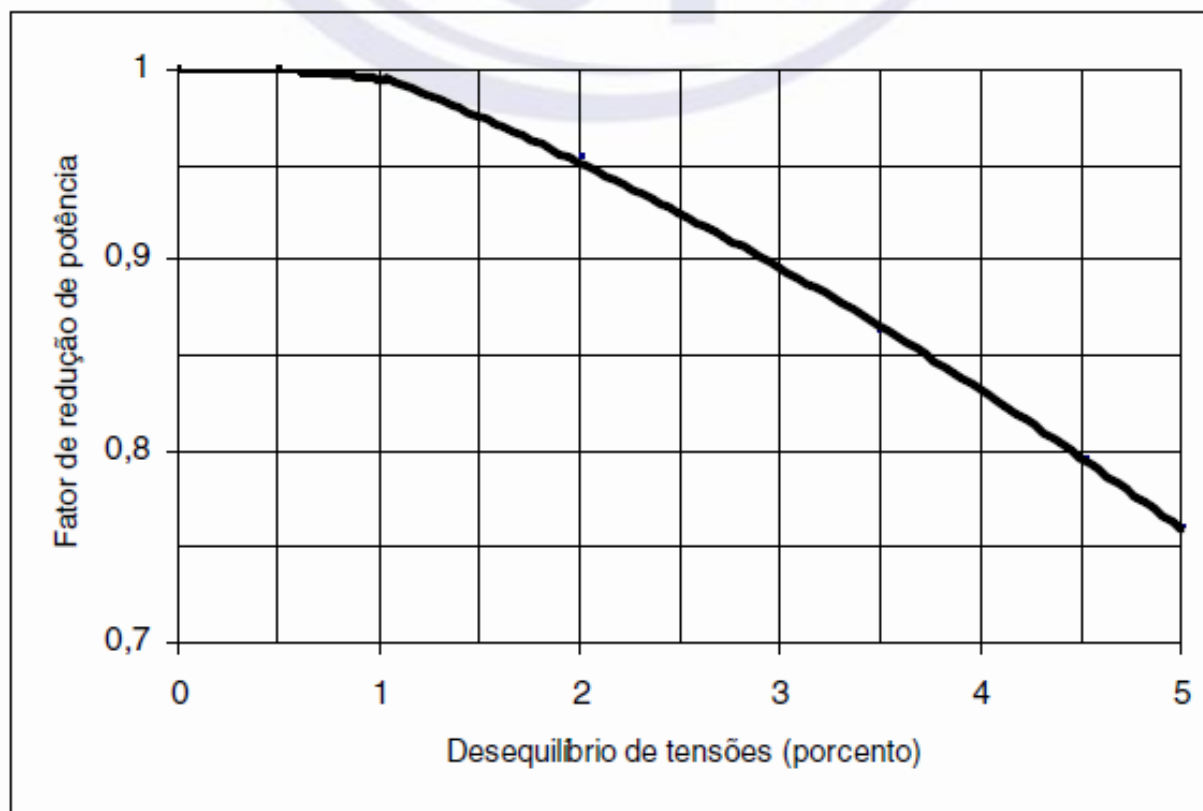
$$V_m = \frac{V_a + V_b + V_c}{3} \quad \Delta V_{m\acute{a}x} = m\acute{a}x(|V_m - V_a|, |V_m - V_b|, |V_m - V_c|)$$

- Desequilíbrio de tensão percentual:

$$DT\% = \frac{\Delta V_{m\acute{a}x}}{V_m} \cdot 100\%$$

Tensões Desbalanceadas

- ABN NBR 17094-1:
- Redução na potência útil do motor:



Fonte: ABNT NBR 17094-1 Máquinas Elétricas Girantes Parte 1: motores de indução trifásicos – Requisitos. 2018 .



FIM DO MÓDULO V – PARTE 2



Avaliação

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