

Motores de Indução Trifásicos

Parte I

Tópicos da Aula de Hoje

- ⇒ Necessidades de estudar os motores, do ponto de vista de eficiência energética
- ⇒ Conceitos básicos envolvendo o funcionamento dos motores de indução trifásicos em regime permanente
- ⇒ Perdas e circuito equivalente
- ⇒ Corrente, fator de potência e rendimento a partir do circuito equivalente
- ⇒ Análise de carregamento do motor

Introdução

- ⇒ Principais fatores que levam a estudar a eficiência energética nas aplicações que utilizam motores de indução trifásicos:
- Grande quantidade de motores instalados
 - Aplicação ineficiente dos mesmos: sobredimensionamento, acarretando baixos fatores de potência e rendimento

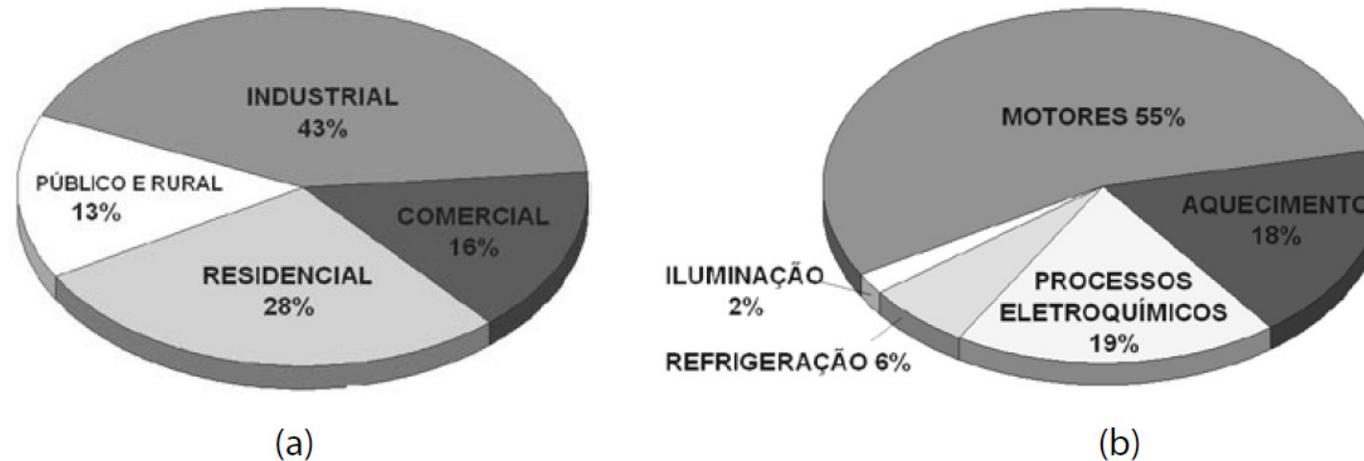


Figura 11.1 – Utilização da energia elétrica no País (a) e no setor industrial (b)

Introdução

⇒ Evolução tecnológica dos motores:

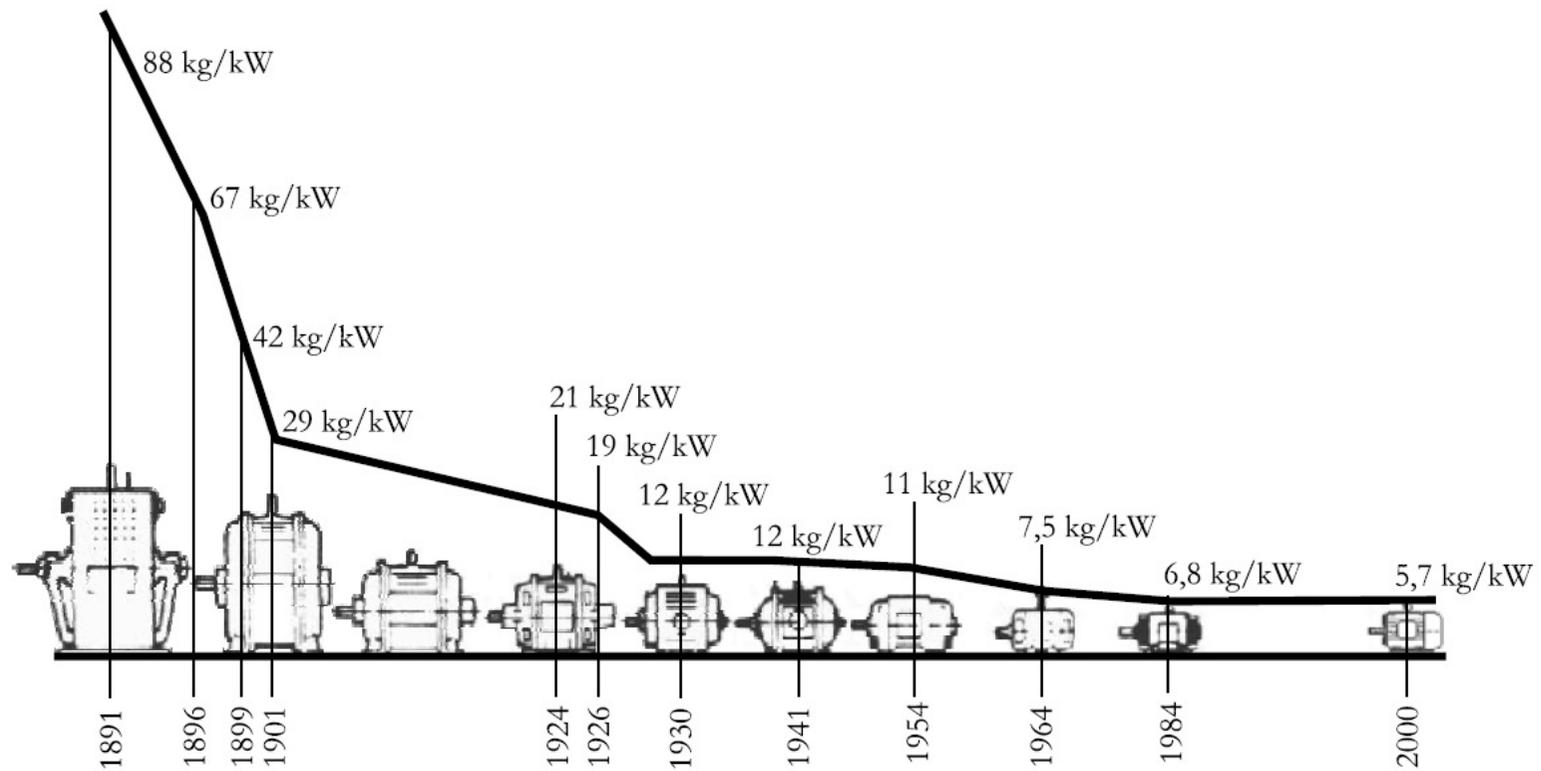


Figura 11.2 - Evolução dos motores elétricos

Conceitos Básicos: Motor de Indução Trifásico

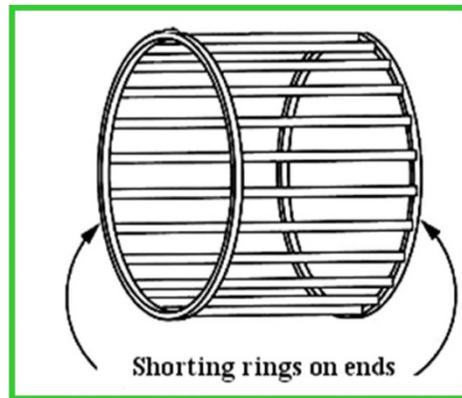
- ⇒ O estator é composto por três enrolamentos dispostos a 120° mecânicos (enrolamento trifásico)



- ⇒ Os enrolamentos do estator (armadura) são conectados a uma fonte de alimentação CA trifásica (três tensões defasadas de 120° elétricos)
- ⇒ O enrolamento trifásico pode ser conectado em Δ ou Y
- ⇒ O fluxo produzido nos enrolamentos do estator, e que atravessa o entreferro e o rotor, é girante com a velocidade da frequência da tensão de alimentação
- ⇒ O campo girante induz tensão no enrolamento do rotor, o qual não é alimentado diretamente, energização ocorre apenas por **indução**.

Conceitos Básicos: Motor de Indução Trifásico

- ⇒ O rotor pode ser composto por três enrolamentos similares ao do estator (rotor bobinado), ou pode ser composto por um conjunto de barras condutoras conectadas em seus extremos por dois anéis (rotor tipo gaiola de esquilo).

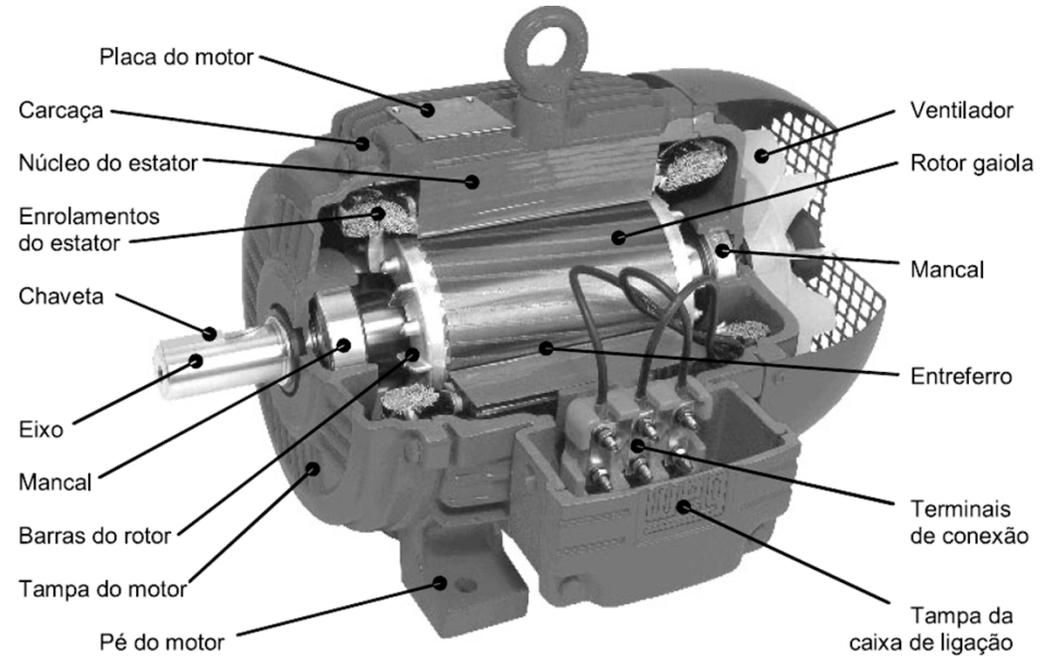


- ⇒ O campo girante do estator induz tensão no enrolamento do rotor.
- ⇒ Se o enrolamento do rotor for curto-circuitado (circuito fechado), surgirão correntes induzidas, que produzirão um campo magnético no rotor em oposição ao campo do estator, resultando na produção de torque e no giro do rotor em uma dada velocidade.
- ⇒ Para existirem correntes induzidas no rotor, a velocidade mecânica do eixo deverá ser sempre diferente da velocidade do campo girante, caso contrário, um condutor sobre o rotor estaria sujeito a campo fixo, e não haveria correntes induzidas. Daí a denominação de **máquina assíncrona**.

Conceitos Básicos: Motor de Indução Trifásico



Rotor bobinado



Conceitos Básicos: Motor de Indução Trifásico

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s}$$

$$n_s = \frac{120 f_1}{p}$$

p = no. de pólos

- ⇒ O campo girante do estator induz tensão no enrolamento do rotor. É produzido por tensões alternadas com frequência f_1 .
- ⇒ O rotor atinge uma velocidade de equilíbrio em regime permanente (n) menor do que a velocidade síncrona (n_s) do campo girante do estator.
- ⇒ Se $n = n_s$, não há corrente induzida no rotor, e o torque é nulo.
- ⇒ A diferença entre a velocidade do campo girante produzido pelo estator e do giro mecânico do rotor é denominada **escorregamento (slip)**.

Conceitos Básicos: Motor de Indução Trifásico

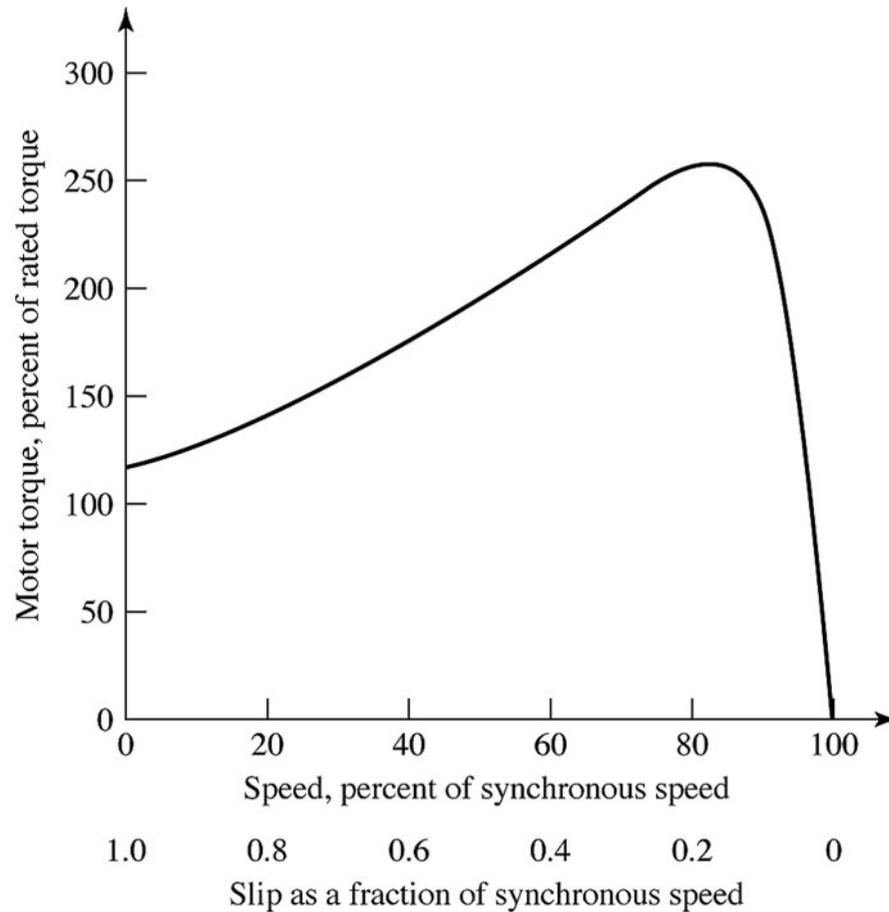
- ⇒ A frequência f_2 da tensão e corrente induzidas no rotor é determinada pela diferença de velocidade entre o campo girante e o rotor (escorregamento):

$$f_2 = \frac{p}{120} (n_s - n) = \frac{p}{120} s n_s = s f_1$$

- ⇒ Estator e rotor têm frequências diferentes!

Conceitos Básicos: Motor de Indução Trifásico

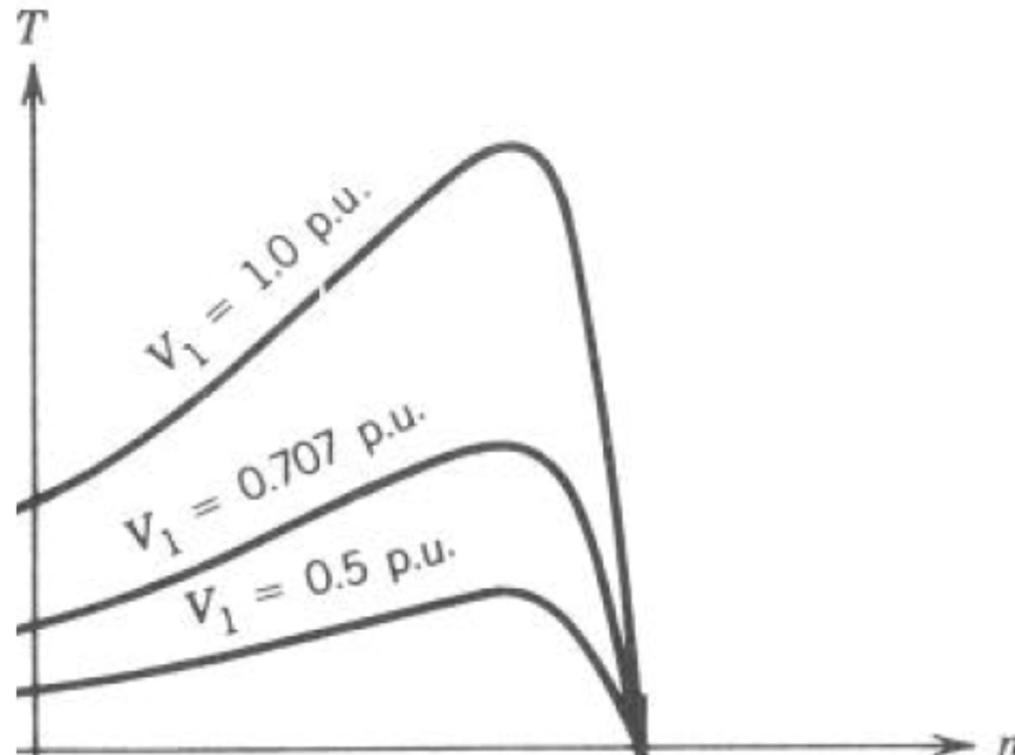
⇒ Curva **Torque x Velocidade** do motor de indução:



$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s}$$

Conceitos Básicos: Motor de Indução Trifásico

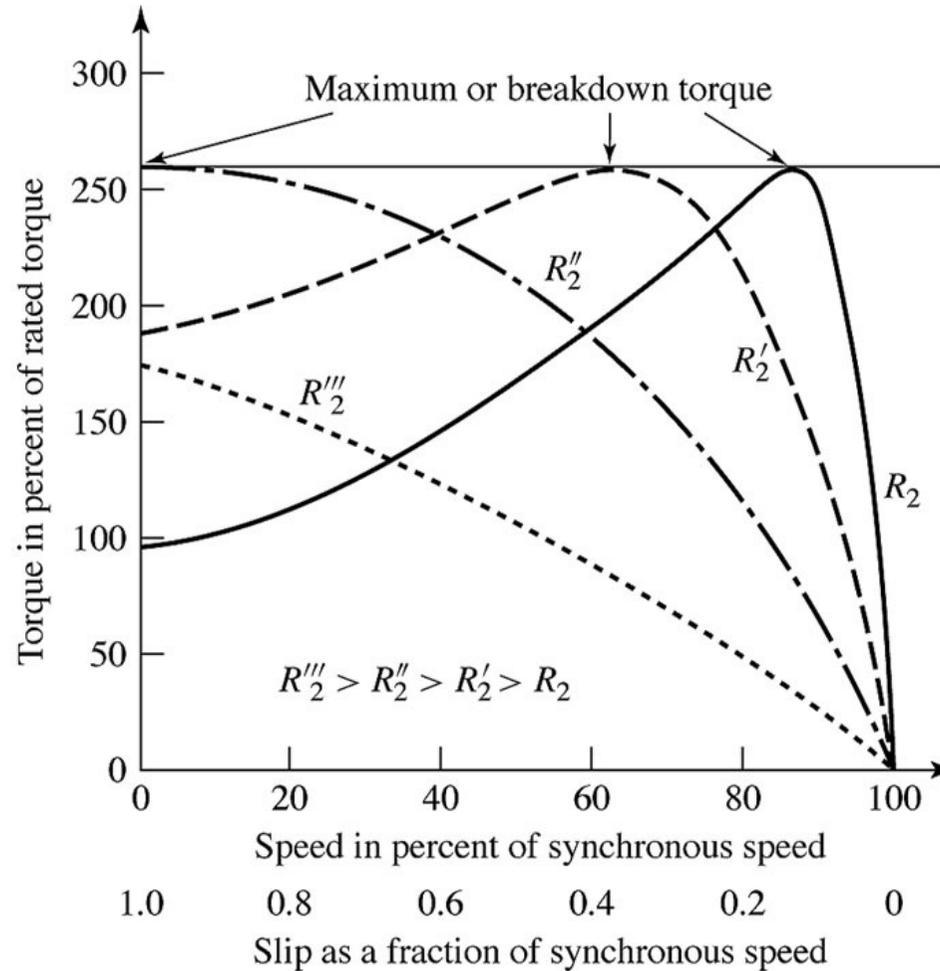
⇒ A curva **Torque x Velocidade** varia em função de tensão terminal:



- Nota: a tensão terminal pode ser ajustada para controlar a velocidade da máquina.

Conceitos Básicos: Motor de Indução Trifásico

⇒ A curva **Torque x Velocidade** varia em função da resistência do rotor:



Perdas

- ⇒ De maneira similar ao transformador, um motor de indução trifásico está sujeito aos seguintes tipos de perdas:
 - Perdas RI^2 nos enrolamentos do estator (**PJ1**)
 - Perdas RI^2 no rotor (**PJ2**)
 - Perdas por histerese e correntes parasitas de Foucault no núcleo (**PHF**)
- ⇒ Adicionalmente, há as perdas por atrito e ventilação ou perdas rotacionais (**PAV**)
- ⇒ Perdas adicionais: outros tipos de perdas que não se enquadrem nas anteriores (dispersão do fluxo magnético) (**PAD**)

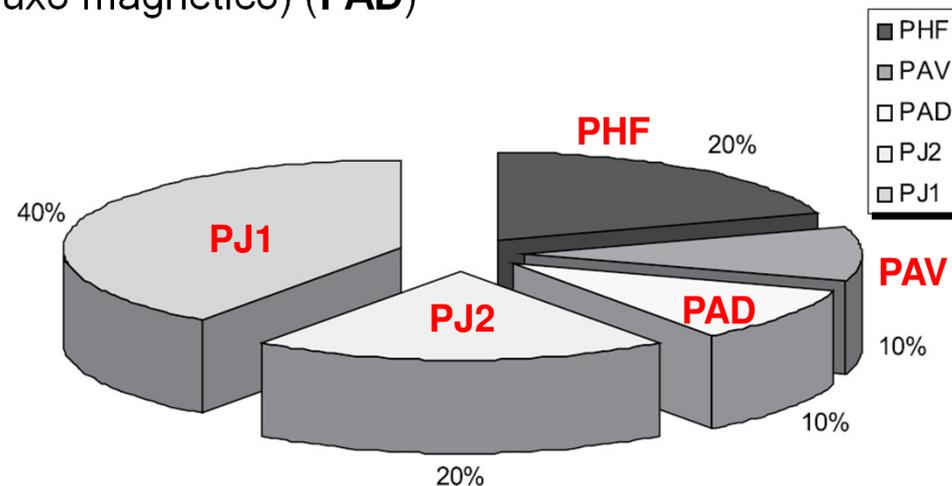
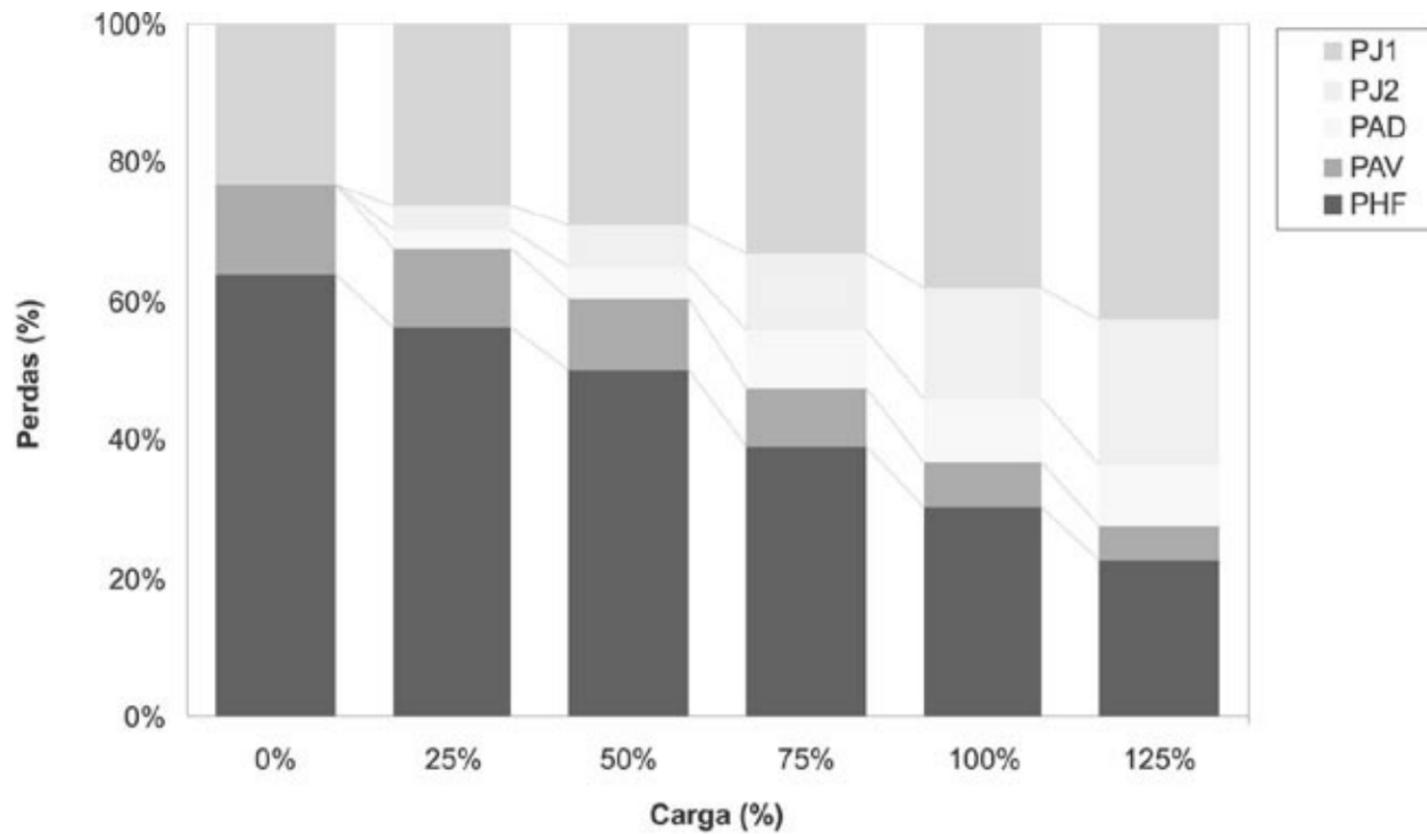


Figura 11.4 – Distribuição das perdas em um motor de indução trifásico

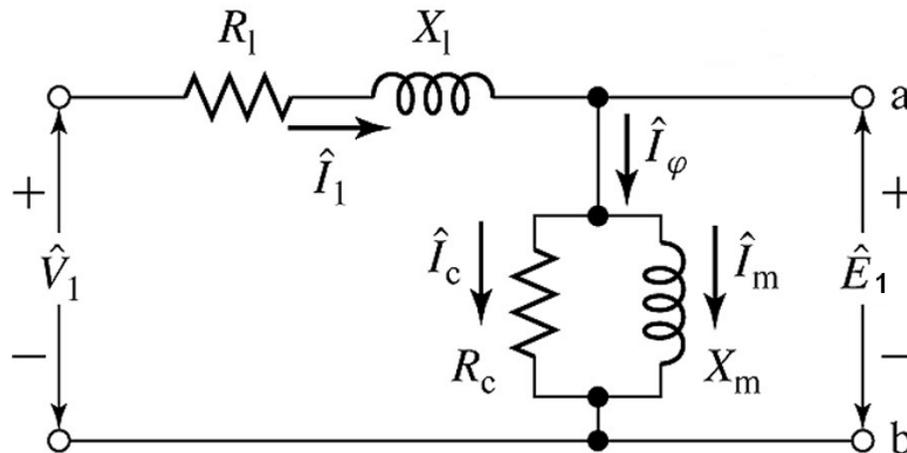
Perdas

⇒ Variação das perdas em função do carregamento (motor de 15 cv):



Circuito Equivalente do Motor de Indução

⇒ Circuito equivalente do estator por fase:

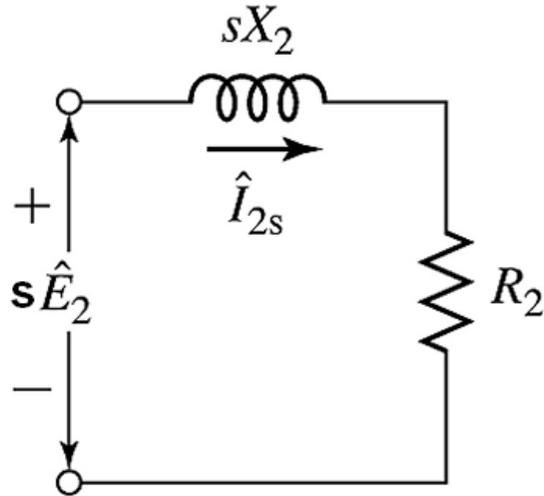


A corrente de magnetização varia de 30 a 50% da corrente nominal

- ⇒ V_1 → Tensão terminal por fase;
- ⇒ E_1 → Tensão induzida no estator por fase;
- ⇒ R_1 → resistência do enrolamento do estator por fase (perda cobre);
- ⇒ X_1 → reatância de dispersão do estator por fase: $X_1=2\pi f_1 L_1$
- ⇒ X_m → reatância de magnetização por fase: $X_m=2\pi f_1 L_m$
- ⇒ R_c → perda no núcleo do estator por fase.

Circuito Equivalente do Motor de Indução

⇒ Circuito equivalente do rotor por fase:



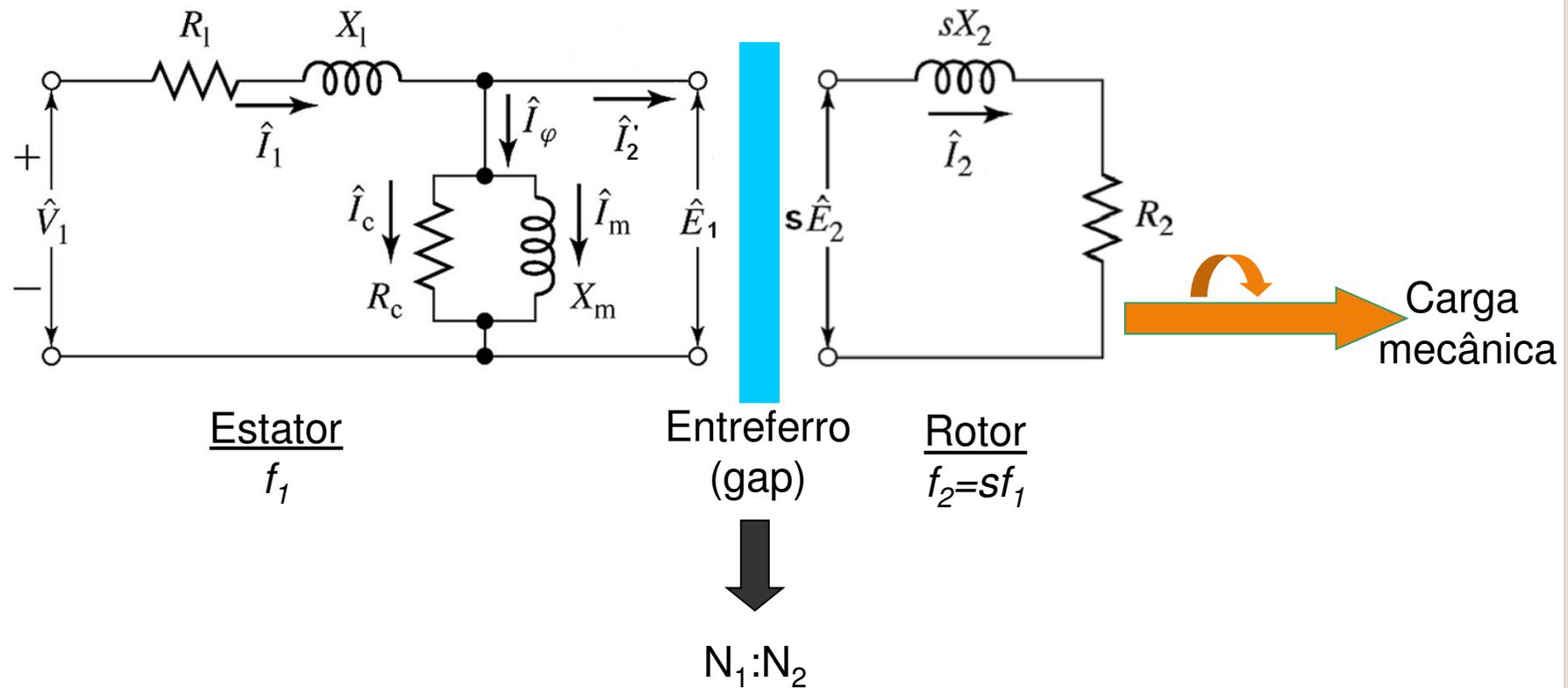
$$E_2|_s = 4,44 f_2 N_2 \phi_p k_{w2} = 4,44 s f_1 N_2 \phi_p k_{w2} = s E_2|_{\substack{s=1 \\ n=0}}$$

$$X_2|_s = 2\pi f_2 L_2 = 2\pi s f_1 L_2 = s X_2|_{\substack{s=1 \\ n=0}}$$

- $E_2 \rightarrow$ Tensão induzida no enrolamento do rotor parado ($s=1, n=0$);
- $R_2 \rightarrow$ resistência do enrolamento do rotor por fase (perda cobre);
- $X_2 \rightarrow$ reatância de dispersão do rotor parado por fase ($s=1, n=0$);
- $I_2 \rightarrow$ corrente por fase no rotor
- $f_2 \rightarrow$ frequência do circuito do rotor \neq da frequência do estator f_1

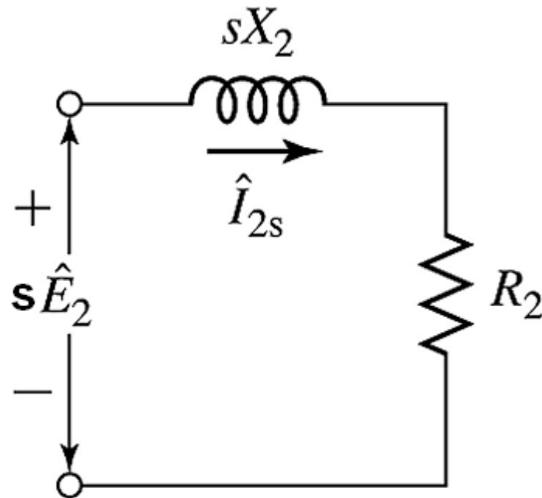
Circuito Equivalente do Motor de Indução

⇒ Circuito equivalente completo por fase:



Circuito Equivalente do Motor de Indução

⇒ Analisando o circuito do rotor, temos que:



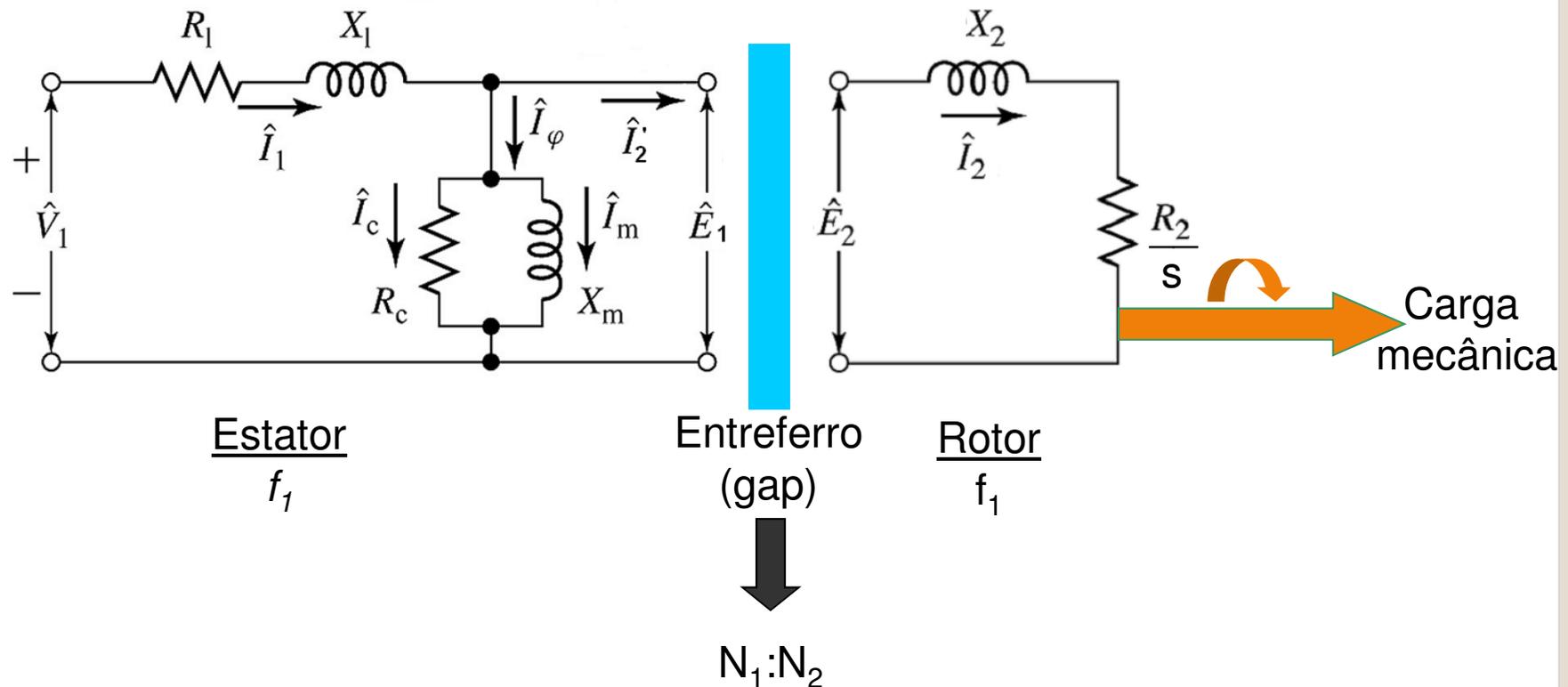
$$I_{2s} = \frac{sE_2}{R_2 + jsX_2}$$

⇒ Dividindo a expressão anterior por “s” no numerador e denominador, temos:

$$I_2 = \frac{E_2}{\frac{R_2}{s} + jX_2}$$

Circuito Equivalente do Motor de Indução

⇒ Portanto, podemos representar o circuito equivalente anterior, por um circuito equivalente em que o estator e o rotor têm a mesma frequência.



Circuito Equivalente do Motor de Indução

⇒ Do circuito anterior, temos que:

- R_2/s depende da carga mecânica;
- Com o aumento da carga mecânica n diminui $\rightarrow s$ aumenta $\rightarrow R_2/s$ diminui $\rightarrow I_2$ aumenta;

- R_2/s pode ser dividido em:
$$\frac{R_2}{s} = R_2 + \left(\frac{R_2}{s} - R_2\right) = R_2 + \frac{1-s}{s} R_2$$

Perdas no
Cobre

Potência
Mecânica
+
Perdas Rotacionais

Circuito Equivalente do Motor de Indução

⇒ Portanto, a potência por fase associada ao rotor é:

$$P_{rotor} = P_{gap} = P_{cobre} + P_{mec} = R_2 I_2^2 + \frac{1-s}{s} R_2 I_2^2 = \frac{R_2}{s} I_2^2$$

⇒ Essa potência também é denominada potência no entreferro (gap), pois é a potência transferida do estator ao rotor pelo campo magnético do entreferro.

⇒ **Conclusão:**

$$P_{cobre} = R_2 I_2^2 = s \frac{R_2 I_2^2}{s} = s P_{gap}$$

A perda no cobre aumenta
com o escorregamento

$$P_{mec} = \frac{1-s}{s} R_2 I_2^2 = (1-s) P_{gap}$$

Perdas rotacionais
+
Carga mecânica

Circuito Equivalente do Motor de Indução

⇒ O circuito do rotor ainda pode ser refletido para o lado do estator (primário) através da relação de espiras $a = N_1/N_2$:

$$E_2 \text{ refletido ao primário} \Rightarrow aE_2 = E_2'$$

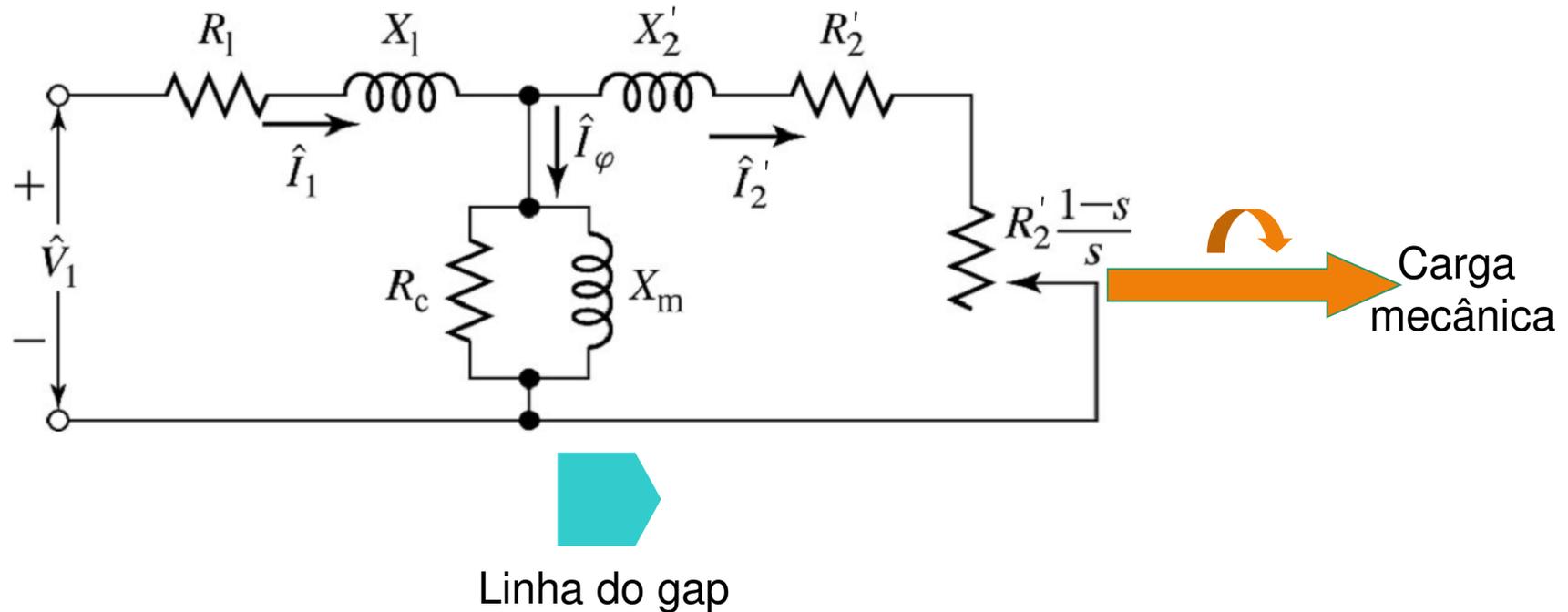
$$I_2 \text{ refletido ao primário} \Rightarrow I_2 / a = I_2'$$

$$X_2 \text{ refletido ao primário} \Rightarrow a^2 X_2 = X_2'$$

$$R_2 \text{ refletido ao primário} \Rightarrow a^2 R_2 = R_2'$$

$$\frac{R_2(1-s)}{s} \text{ refletido ao primário} \Rightarrow \frac{a^2 R_2(1-s)}{s} = \frac{R_2'(1-s)}{s}$$

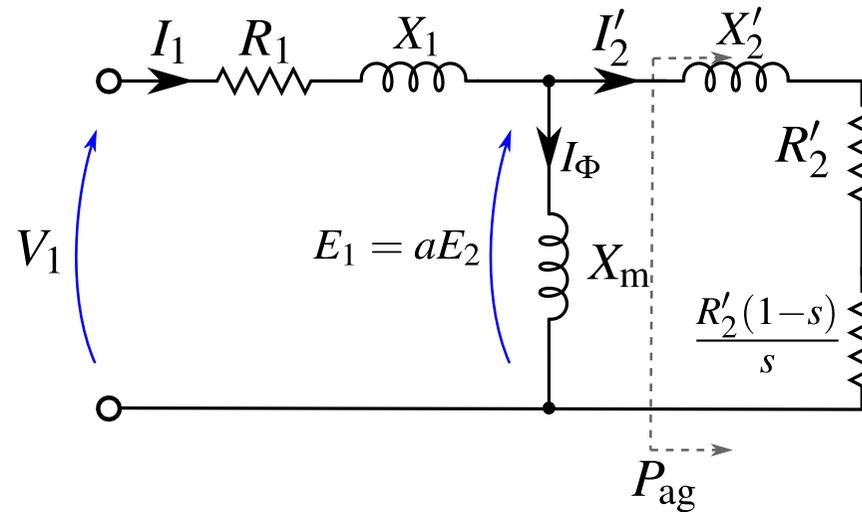
Circuito Equivalente do Motor de Indução



- ⇒ Com isso, o circuito fica representado na mesma frequência e refletido para um único lado, o lado do estator.
- ⇒ Deve ser lembrado que a transferência de energia se dá pelo campo magnético do gap, mas isto não necessita ser explicitamente representado no circuito equivalente.

Análise da Corrente

⇒ Resolvendo o circuito equivalente do motor de indução, é possível obter a variação da corrente do estator em relação à velocidade (escorregamento):



$$Z_1 = R_1 + jX_1 + jX_m \parallel \left(\frac{R'_2}{s} + jX'_2 \right)$$

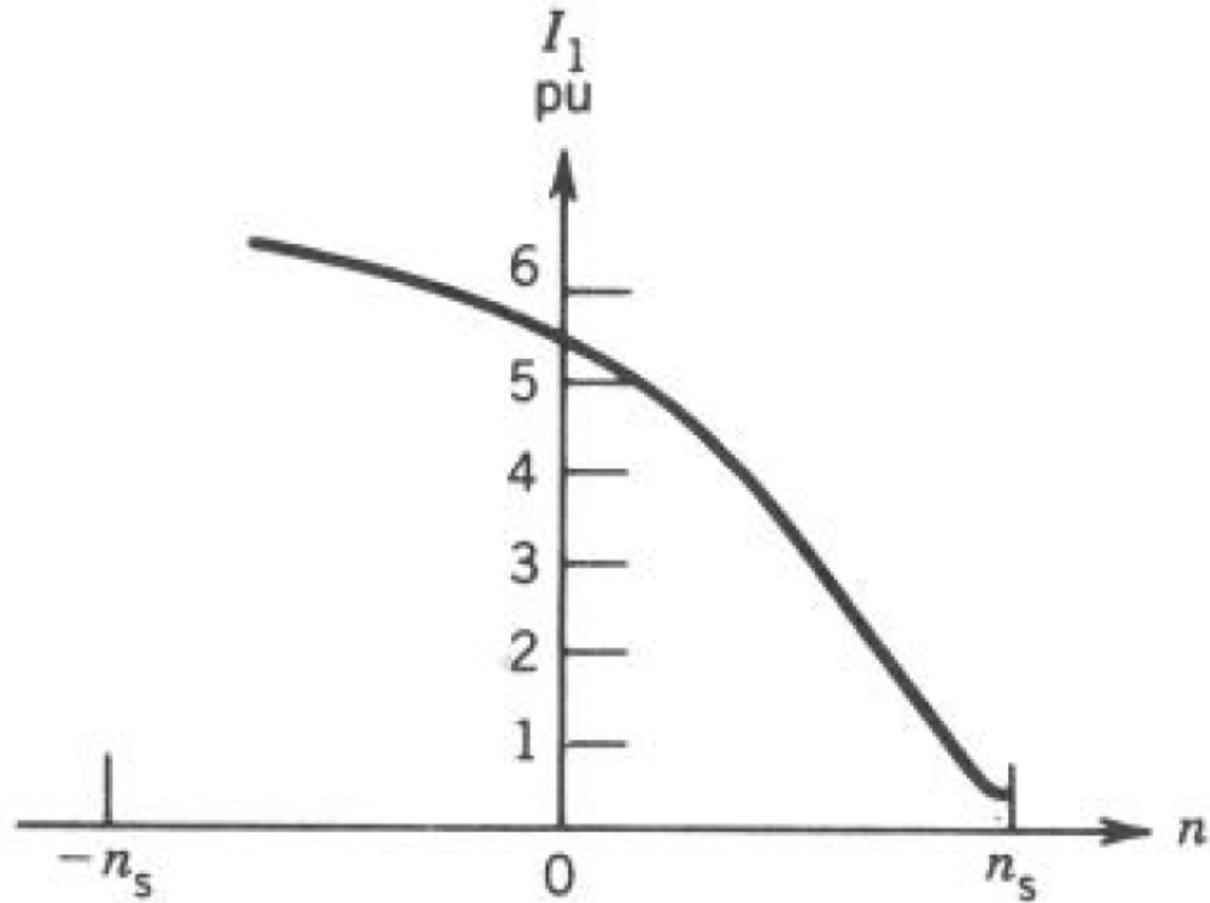
$$Z_1 = |Z_1| \angle \theta_1$$



$$I_1 = \frac{V_1}{Z_1} = I_\Phi + I'_2$$

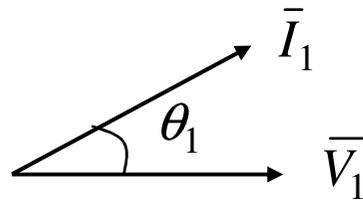
Análise da Corrente

⇒ Portanto:



Fator de Potência

⇒ É dado pelo cosseno do ângulo entre a tensão de alimentação (terminal) e a corrente do estator (terminal) :



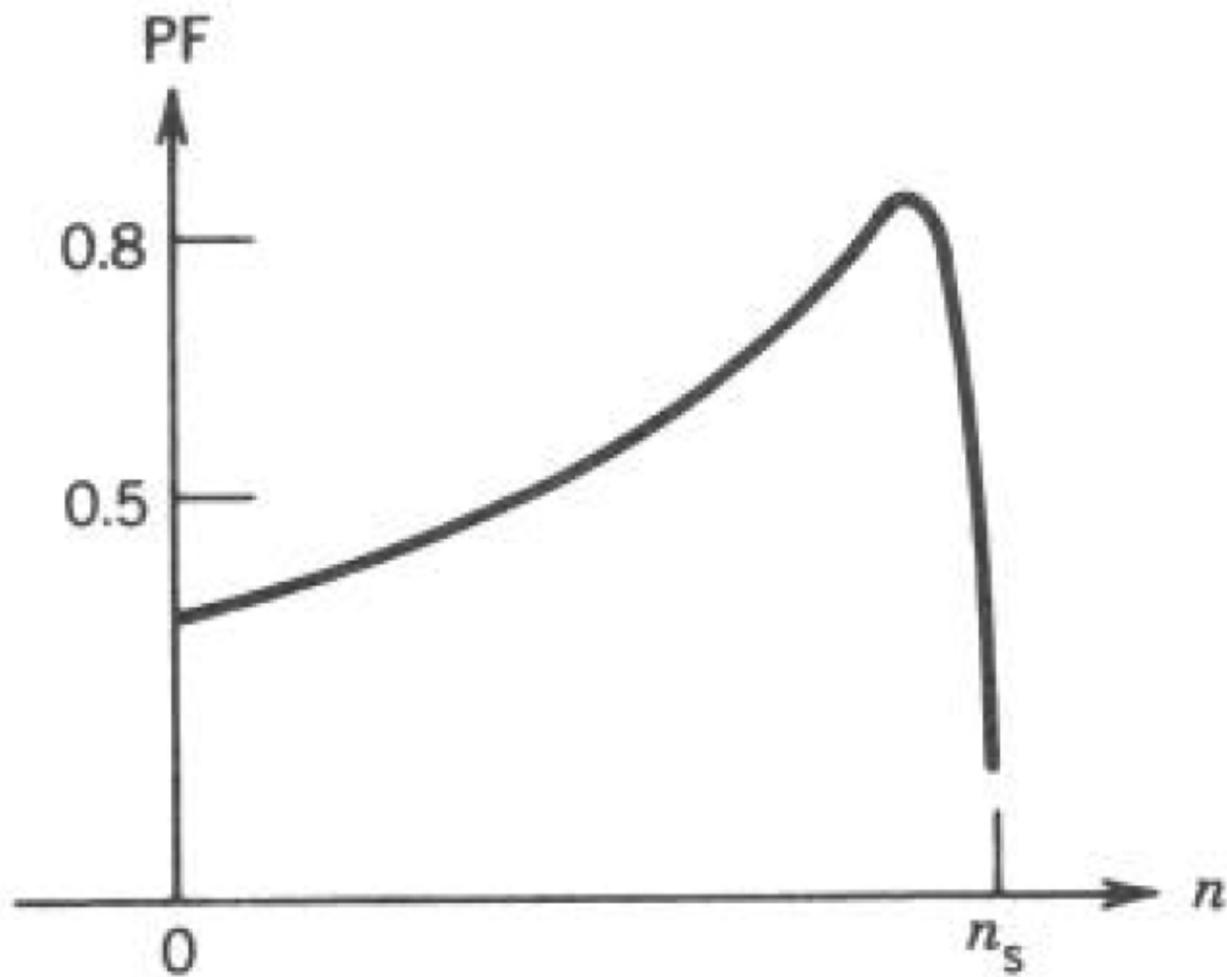
⇒ Ou seja, o fator de potência é dado pelo cosseno do ângulo da impedância total (equivalente) vista da fonte: $Z_1 = |Z_1| \angle \theta_1$

$$FP = \cos \theta_1$$

⇒ Portanto, como a impedância equivalente da máquina depende da velocidade, o fator de potência também dependerá.

Fator de Potência

⇒ Logo:



Rendimento

⇒ Vimos que as perdas nos enrolamentos do rotor dependem da velocidade (escorregamento) do motor. Consequentemente, o rendimento também dependerá.

⇒ Analisando novamente o circuito equivalente da máquina, só que desprezando o circuito do estator, podemos estimar seu rendimento ideal:

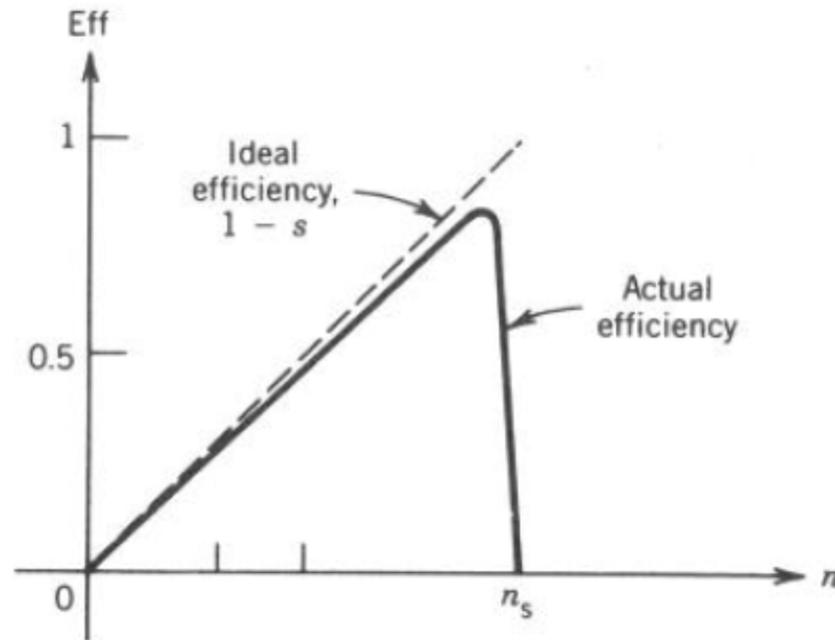
$$\Rightarrow P_{\text{entrada}} = P_{\text{entreferro}} = P_{\text{gap}}$$

$$\Rightarrow \text{Perdas no rotor: } R_2 I_2^2 = s P_{\text{gap}}$$

$$\Rightarrow P_{\text{saída}} = P_{\text{gap}} - s P_{\text{gap}} = (1-s) P_{\text{gap}}$$

$$\eta_{\text{ideal}} = \frac{P_{\text{saída}}}{P_{\text{entrada}}} = \frac{(1-s) \cdot P_{\text{gap}}}{P_{\text{gap}}} = 1 - s$$

Rendimento



$$\eta_{real} = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}} = \frac{P_{saída}}{P_{saída} + PJ_1 + PJ_2 + PHF + PAV + PAD}$$

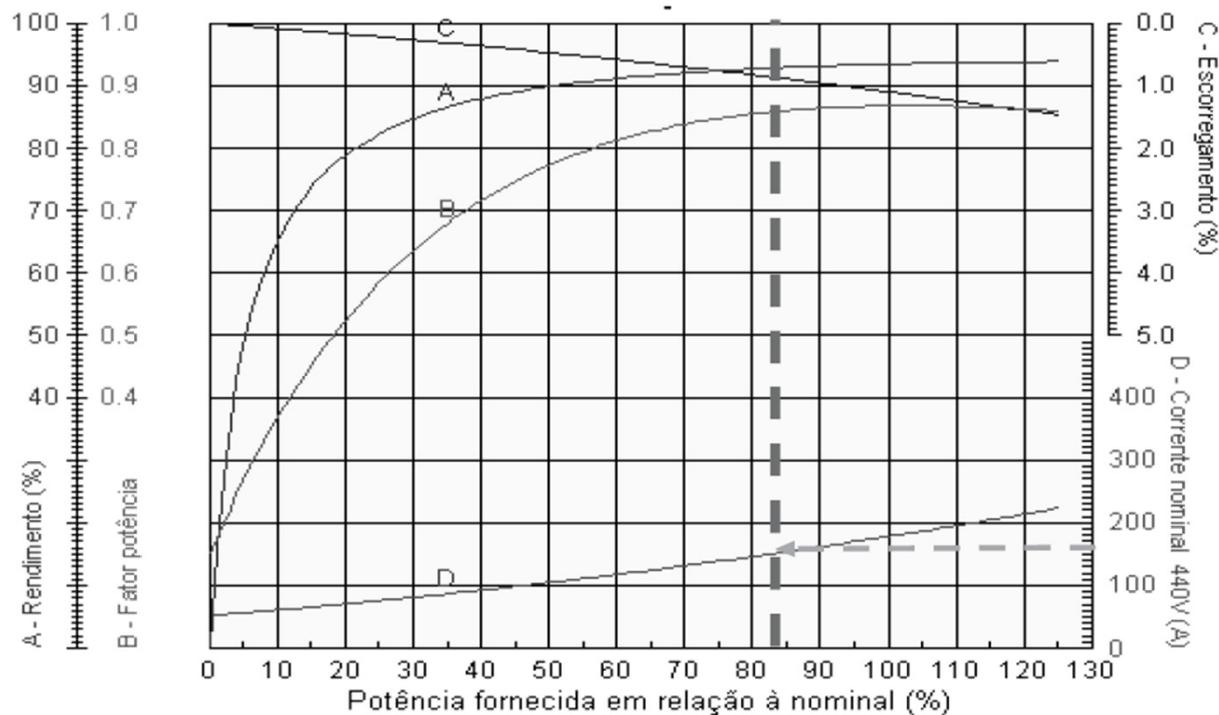
⇒ Com a inclusão das demais perdas, a eficiência real da máquina sempre será menor do que a eficiência ideal.

⇒ Para manter alta eficiência, o motor de indução deve operar próximo a velocidade síncrona

Análise de Carregamento do MI

⇒ **A partir dos dados nominais fornecidos pelo fabricante:** a análise depende de medições de corrente, tensão, potência, velocidade realizadas no motor.

⇒ **Ex.:** mediu-se 150 A no motor de 100 cv cujos dados nominais são apresentados nas curvas abaixo. Essa é a condição de operação contínua do motor.



Corrente: 150 A

F. Potência: 0,86

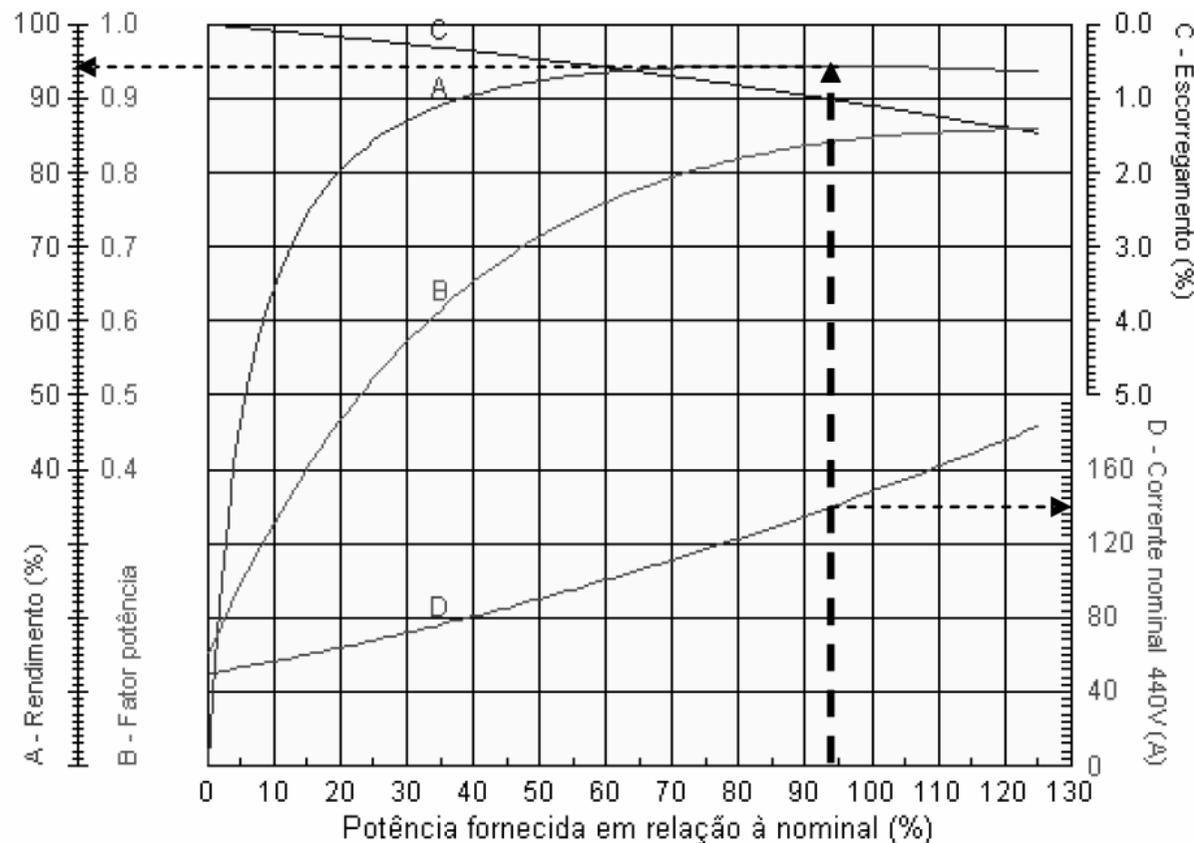
Potência: 83%

Rendimento: 93 %

Escorregamento: 0,8%

Análise de Carregamento do MI

⇒ No exemplo anterior, como o motor opera com 83% da potência nominal (ou seja, 83 cv), pode-se empregar um motor de 90 cv, conforme análise a seguir (mantendo a mesma potência fornecida – 83 cv):

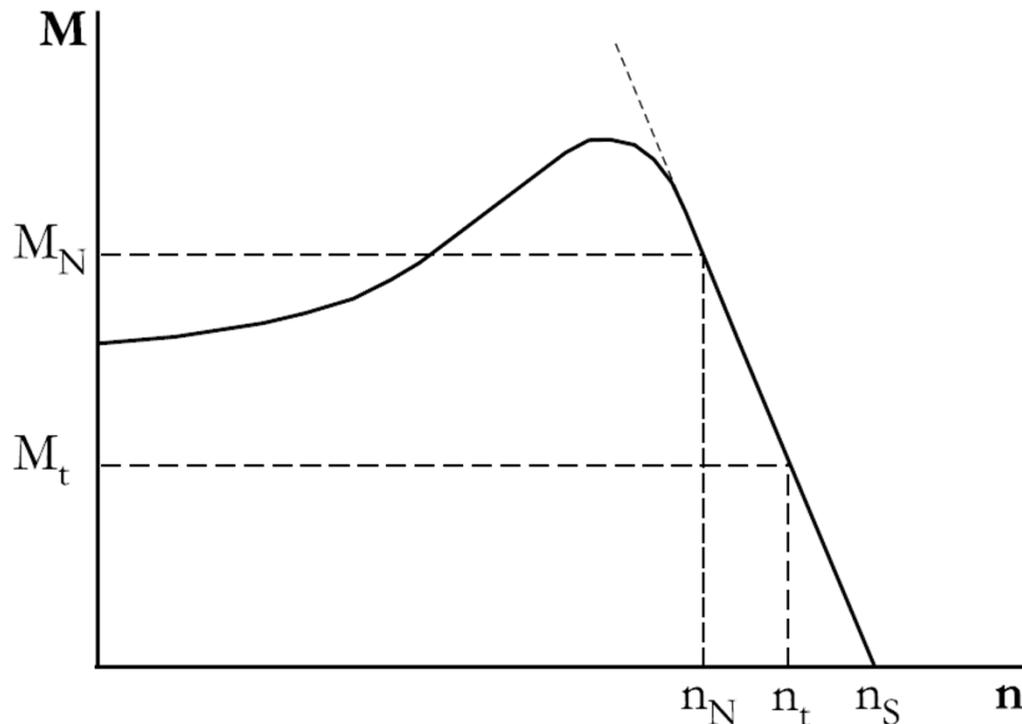


Corrente: 140 A
F. Potência: 0,85
Potência: 92%
Rendimento: 95 %
Escorregamento: 0,5%

Análise de Carregamento do MI

⇒ Método da Linearização

- A curva de conjugado *versus* rotação do MI pode ser aproximada por uma reta na região de operação da máquina. A partir daí, bastam algumas medições para estimar o seu carregamento considerando as condições reais de operação.



M_N – conjugado nominal
 M_t – conjugado de trabalho
 n_s – velocidade síncrona
 n_N – velocidade nominal
 n_t – velocidade de trabalho

Análise de Carregamento do MI

⇒ Método da Linearização

- Logo, conhecendo-se a velocidade de trabalho, a velocidade nominal e o conjugado nominal, pode-se determinar o conjugado de trabalho pela equação da reta.

$$M_t = M_N \cdot \left(\frac{n_s - n_t}{n_s - n_N} \right)$$

- Como a potência de trabalho é dada por $P_t = M_t \times n_t$, podemos definir Fc como fator de carregamento:

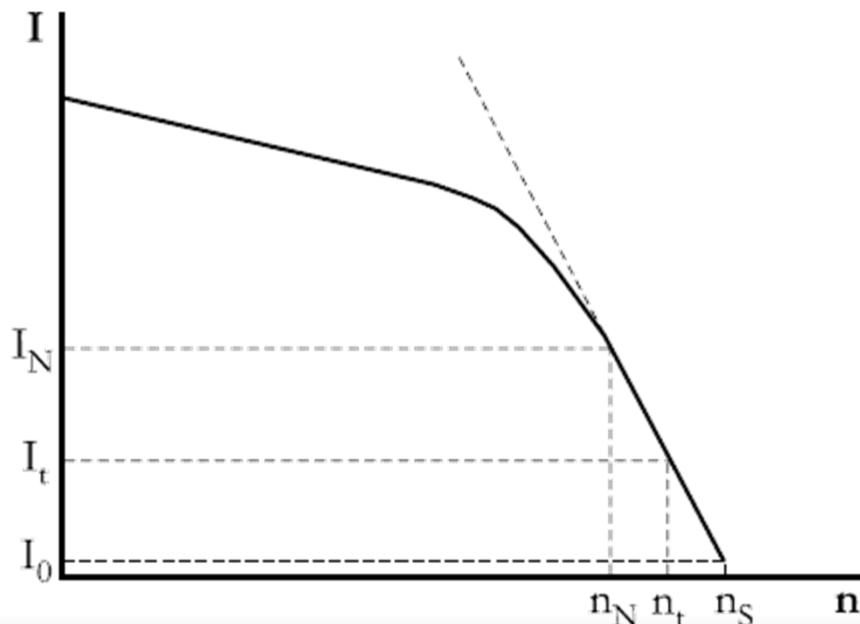
$$F_c = P_t / P_N$$

- Usualmente, se Fc for maior que **0,75** significa que o motor está bem dimensionado. Caso contrário, não se pode, de imediato, dizer que o mesmo está inadequado. Deve-se analisar o regime de operação da máquina, pois existem situações em que o uso de motores sobredimensionados se faz necessário. É o caso de acionamento de cargas de alta inércia ou ciclos de cargas severos. Recomenda-se uma análise térmica nesses casos.

Análise de Carregamento do MI

⇒ Método da Linearização

- A potência de trabalho também pode ser medida com o uso de Wattímetros.
- Existem situações em que não é possível medir a velocidade, mas a mesma pode ser estimada linearizando a curva da corrente, da seguinte forma:



$$n_t = n_s - \left(\frac{I_t - I_0}{I_N - I_0} \right) \cdot (n_s - n_N)$$

I_0 – corrente em vazio
 I_t – corrente de trabalho
 I_N – corrente nominal

Análise de Carregamento do MI

⇒ Método da Linearização

- Para determinar a corrente em vazio, pode-se usar os resultados dos **teste em vazio** ou desacoplar a carga e medir a corrente. Caso não seja possível desacoplar a carga, pode-se recorrer a fórmulas empíricas, tal como a apresentada a seguir:

$$I_0/I_N = A_0 + B_0 \ln(P_N) (\%)$$

No. de Pólos	A ₀	B ₀
8	77,463	-7,145
6	72,110	-7,413
4	67,484	-7,490
2	56,855	-6,866

Análise de Carregamento do MI

⇒ Exemplo

- Um MI trifásico tem registrado na sua folha de dados os seguintes valores nominais: 15 cv, 4 pólos, 22 A e 1740 rpm. Necessita-se determinar seu carregamento atual dispondo-se apenas da corrente trabalho medida, que foi igual a 18 A.

Solução:

- O primeiro passo é determinar a corrente em vazio (I_0). Aplicando a fórmula empírica mostrada no slide anterior, temos:

$$I_0/I_N = 67,484 - 7,490 \times \ln(15) = 47,20 \%$$

$$I_0 = 10,4 \text{ A}$$

- Em seguida, determina-se a velocidade de trabalho

$$n_t = 1800 - (18-10,4) / (22-10,4) \cdot (1800-1740) \cong 1760 \text{ (rpm)}$$

Análise de Carregamento do MI

⇒ Solução do Exemplo

- A partir da rotação de trabalho, determina-se o conjugado e a potência de trabalho:

$$M_t = 15/1740 \cdot (1800-1760) / (1800-1740) = 10 / 1740 \text{ (cv/rpm)}$$

$$P_t = 1760 \cdot 10 / 1740 = 10,11 \text{ (cv)}$$

- Finalmente,

$$F_c = 10,11 / 15 = 0,674$$

- Sendo o fator de carregamento igual a 67,4% há indícios de que o motor esteja sobredimensionado. Contudo, deve-se conhecer o ciclo de carga e o tipo de carga acionada do mesmo antes de chegar a uma conclusão. Deve-se então efetuar uma análise térmica para avaliar o perfil de elevação da máquina durante o ciclo de trabalho, e uma análise da partida, identificando a curva do conjugado de carga e estimando seu tempo de partida.

Próxima Aula

⇒ **Análise da Partida do MI**

⇒ **Análise Térmica**

Maiores Detalhes:

⇒ P. C. Sen. *Principles of Electric Machines and Power Electronics*. John Wiley & Sons, Inc. 2nd. 1997. (**ver Capítulo 5**)

⇒ A. E. FITZGERALD, C. KINGSLEY, S. D. UMANS, *Máquinas Elétricas*, 5a edição, Bookman. (**ver Capítulo 7**)