

Motores de indução (MOT2)

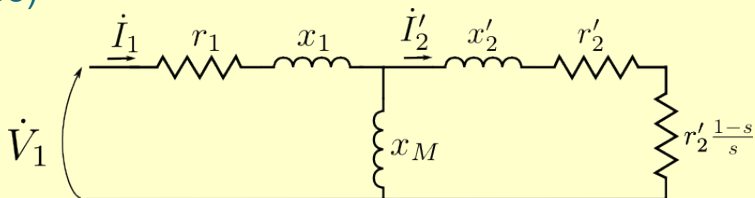
Operação e partida

Eletrotécnica Geral

Depto. de Engenharia de Energia e Automação Elétricas
Escola Politécnica da USP

20 de janeiro de 2017

Circuito equivalente de um motor de indução (por fase)

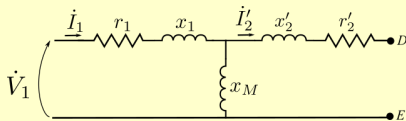


- r_1, r_2' : perdas Joule nas bobinas do estator e rotor, respectivamente;
- x_1, x_2' : reatâncias de dispersão das bobinas do estator e rotor, respectivamente;
- x_M : reatâncias de magnetização – alinhamento dos domínios magnéticos do estator e rotor;
- $r_2' \frac{1-s}{s}$: a potência elétrica dissipada nesse elemento representa a potência mecânica convertida no rotor (potência útil+perdas mecânicas).

Analogias do circuito elétrico equivalente, $s \rightarrow 0, (\omega_r \rightarrow \omega_s)$

Circuito elétrico equivalente

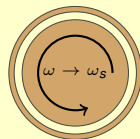
$$r'_2 \frac{1-s}{s} \rightarrow \infty$$



$$P_{elet(DE)} = V \cdot \overset{0}{I} \cdot \cos \phi = 0$$

Motor elétrico

Carga mecânica $\rightarrow 0$ no eixo

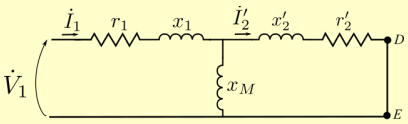


$$P_{mec} = \overset{0}{T} \cdot \omega_r = 0$$

Analogias do circuito elétrico equivalente, $s = 1, (\omega_r = 0)$

Circuito elétrico equivalente

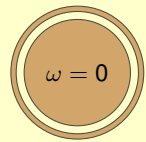
$$r'_2 \frac{1-s}{s} = 0$$



$$P_{elet(DE)} = \cancel{V} \cdot \cancel{I} \cos \phi = 0$$

Motor elétrico

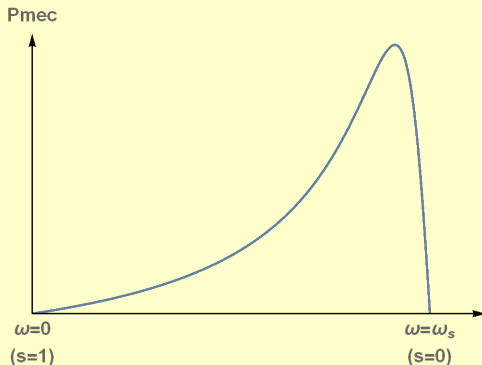
Giro do rotor bloqueado



$$P_{mec} = T \cdot \cancel{\omega_r} = 0$$

Potencia trifásica em $r_2' \frac{1-s}{s} \propto P_{mec}$

$$P_{mec} = 3 \cdot |I_2'|^2 r_2' \frac{1-s}{s}, \quad \text{rendimento} = \eta = \frac{P_{mec}}{P_{elet, entrada}}$$



Potência mecânica de saída de um motor

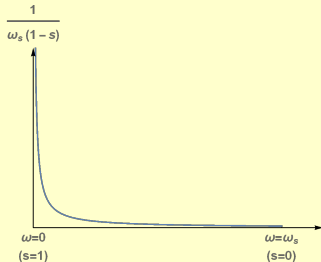
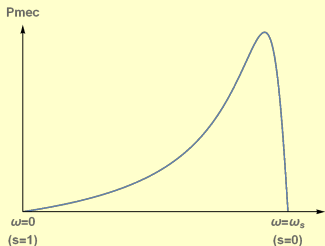
$$P_{mec} = \frac{d\text{Trabalho}}{dt} = \frac{d(F \cdot d)}{dt} = F \cdot vel = F \cdot \frac{\ell}{2} \cdot \omega_r$$

$$P_{mec} = T \cdot \omega_r$$

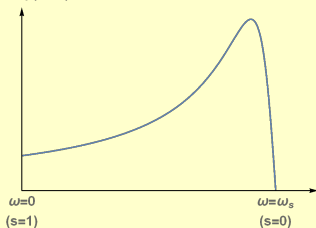
$$\text{Conjugado} = T = \frac{P_{mec}}{\omega_r} = \frac{P_{mec}}{(1-s)\omega_s}$$

- Conjugado = torque (sinônimos)

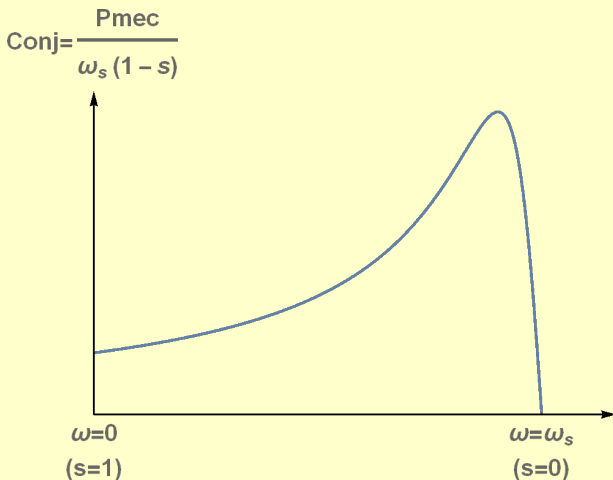
Potência mecânica, $1/\omega_r$, Conjugado



$$\text{Conj} = \frac{P_{mec}}{\omega_s(1-s)}$$



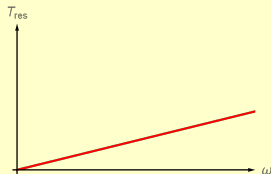
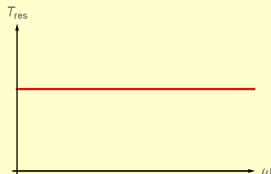
Curva conjugado x velocidade



Cargas mecânicas, torque resistente

- Conjugado constante
 - ex. transportadores de correias sob carga constante

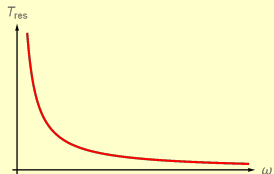
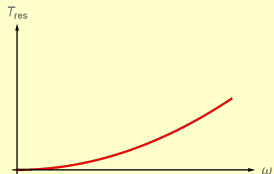
- Conjugado com variação linear com a rotação
 - ex. moinhos



Cargas mecânicas (continuação)

- Conjugado com variação quadrática com a rotação
 - ex. ventiladores

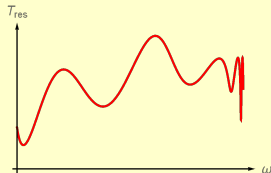
- Conjugado que varia inversamente com a rotação
 - ex. fresadoras



Outros tipos de cargas mecânicas

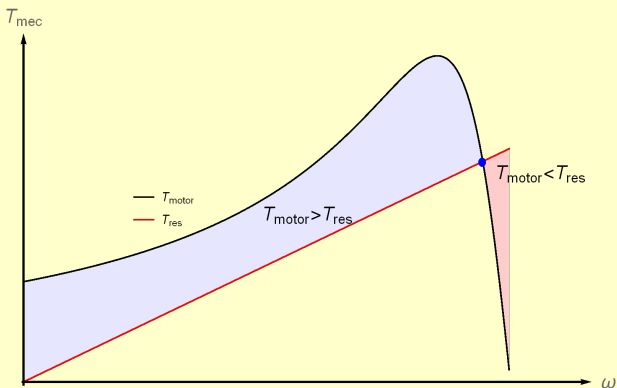
- Conjugado bastante variável
 - ex. forno rotativo

- Cargas com baixíssimos conjugados (volantes)
 - ex. armazenamento de energia



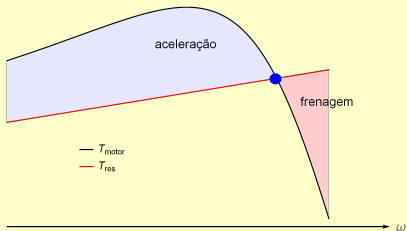
Modos de funcionamento

- Aceleração: $T_{motor} > T_{res}$
- Frenagem: $T_{motor} < T_{res}$
- Velocidade constante: $T_{motor} = T_{res}$

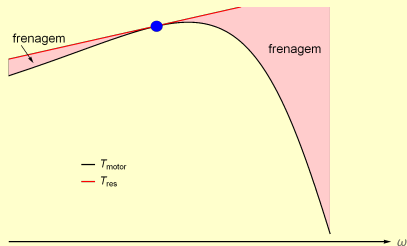


Funcionamento estável/instável

Torque máximo admissível

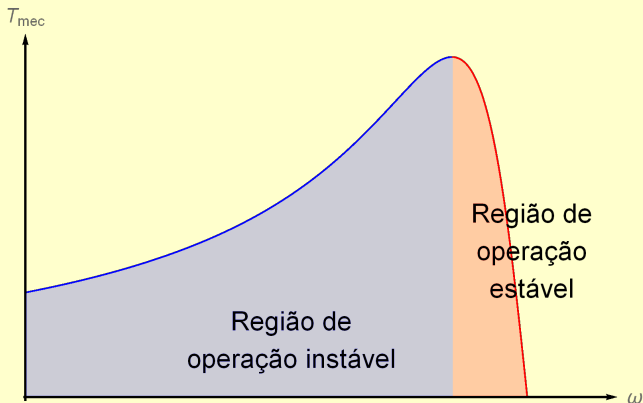


● estável

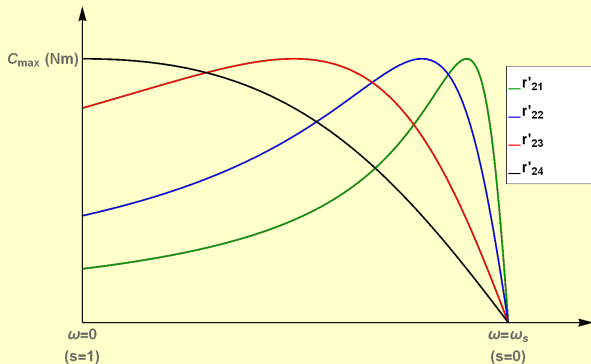


● instável

Funcionamento estável/instável

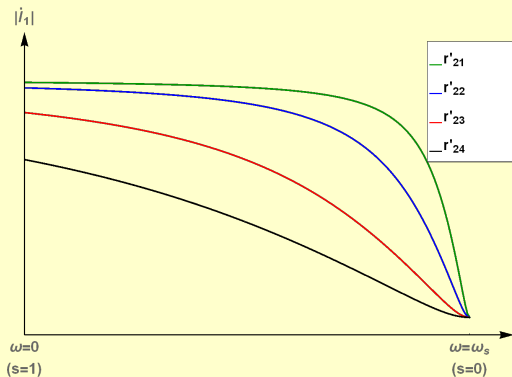


Sensibilidade da curva de conjugado

Influência de r'_2 

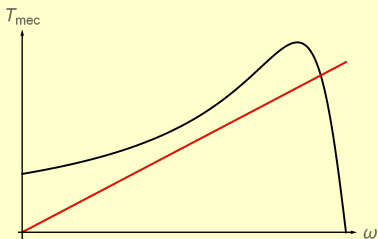
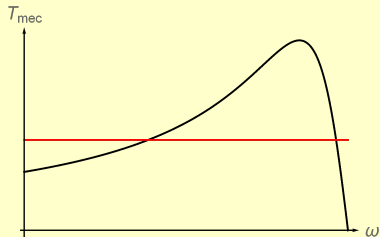
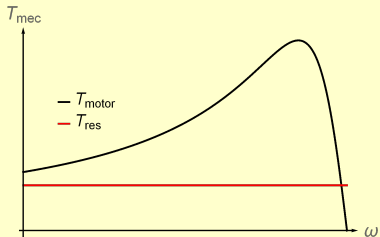
$$r'_{21} < r'_{22} < r'_{23} < r'_{24}$$

Corrente no estator



$$r'_{21} < r'_{22} < r'_{23} < r'_{24}$$

Partida de motores



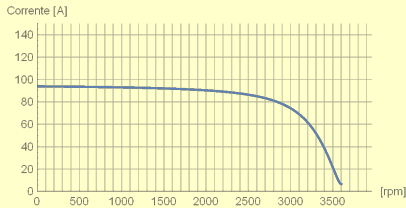
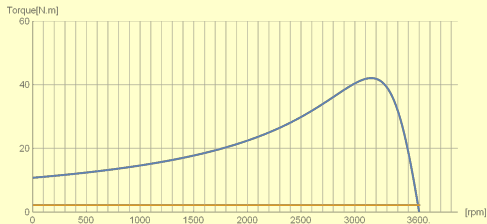
Métodos de partida: redução da corrente de partida

- Tensão \dot{V}_1 reduzida na partida
 - Corrente é reduzida proporcionalmente à tensão
 - Conjugado é reduzido proporcionalmente ao quadrado da tensão
 - Opção: autotransformador, relação de transformação variável
 - Opção: chave estrela-triângulo

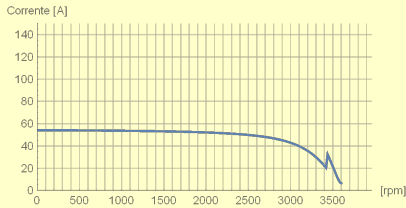
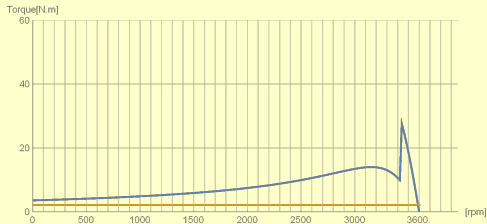
Métodos de partida

(Curvas obtidas a partir de *software* elaborado por Vinicius Toquetti de Melo, Milana Lima dos Santos e Silvio Giuseppe Di Santo)

● Partida direta



● Partida estrela-triângulo

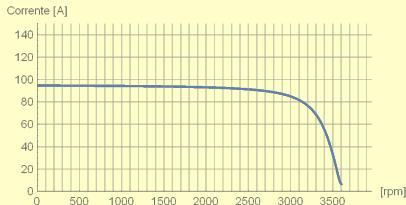
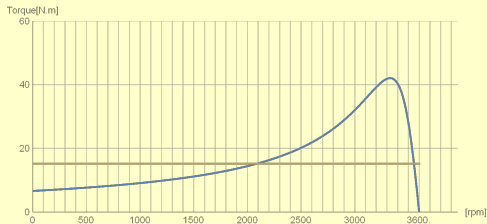


Métodos de partida: aumento do conjugado de partida

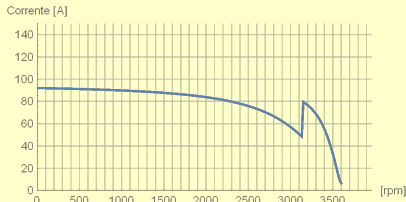
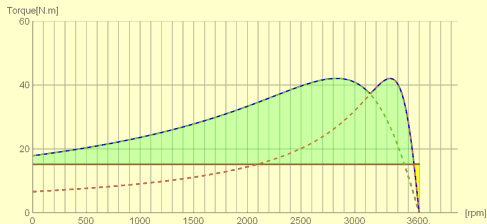
- Reostato (=resistor variável) de partida
 - Corrente diminui com aumento da resistência (ver curvas)
 - Conjugado de partida aumenta com aumento da resistência (ver curvas)
 - Velocidade em regime diminui com aumento da resistência → reduzir resistência após partida
 - Terminais do rotor devem estar disponíveis (apenas rotor bobinado/com anéis)

Métodos de partida

● Partida direta (sem sucesso, nesse caso...)



● Inserção de reostato



OBRIGADO!

Este material é resultado da modernização dos materiais elaborados pelos professores do Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para as diversas disciplinas da área de Eletrotécnica Geral. Foi desenvolvido pelos professores Milana Lima dos Santos e Giovanni Manassero Junior, com a coordenação do professor Hernán Prieto Schmidt e colaboração dos professores Eduardo Lorenzetti Pellini, Luiz Lebensztajn e Silvio Ikuyo Nabeta.