

Motores de indução (MOT12)

Princípios de funcionamento, ligações, operação e partida

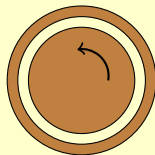
Eletrotécnica Geral

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

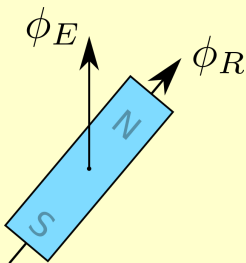
6 de março de 2017

Conceitos básicos

- Motor: converte energia elétrica em energia mecânica
- Gerador: converte energia mecânica em energia elétrica
- Estator: parte estacionária da máquina
- Rotor: parte rotativa da máquina
- Entreferro (*air-gap*): espaço entre o estator e o rotor, percorrido pelas linhas de fluxo magnético



Fluxos magnéticos no estator e rotor



- Máquinas de corrente contínua:
 - ϕ_E tem direção fixa
 - ϕ_R muda de direção em função de um comutador
- Máquinas de corrente alternada (síncronas e assíncronas):
 - ϕ_E gira com velocidade constante
 - ϕ_R segue ϕ_E
- Máquina síncrona: Rotor gira à mesma velocidade de ϕ_E e ϕ_R
- Máquina assíncrona (indução): Rotor gira a uma velocidade ligeiramente inferior à de ϕ_E e ϕ_R

Equação de Lorentz - força em uma espira fechada

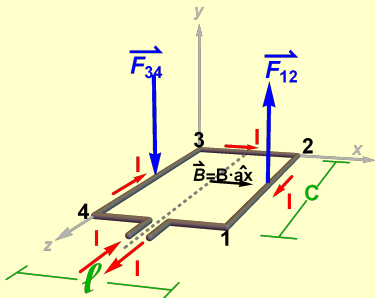
$$\vec{dF} = I \cdot \vec{dL} \times \vec{B}$$

$$\vec{F}_{12} = I \cdot C(a\hat{z}) \times (B \cdot a\hat{x}) = I \cdot C \cdot B \cdot a\hat{y}$$

$$\vec{F}_{23} = I \cdot \ell(a\hat{x}) \times (B \cdot a\hat{x}) = 0$$

$$\vec{F}_{34} = I \cdot C(-a\hat{z}) \times (B \cdot a\hat{x}) = -I \cdot C \cdot B \cdot a\hat{y}$$

$$\vec{F}_{41} = I \cdot \ell(-a\hat{x}) \times (B \cdot a\hat{x}) = 0$$

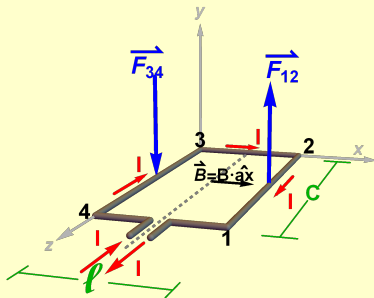


Torque em uma espira fechada

$$\vec{T} = \frac{\ell}{2} \cdot a\hat{x} \times \vec{F}_{12} + \frac{\ell}{2} \cdot (-a\hat{x}) \times \vec{F}_{34}$$

$$\vec{T} = \ell \cdot I \cdot z \cdot B \cdot a\hat{z}$$

- O torque gerado pela corrente tende a girar a espira no sentido anti-horário

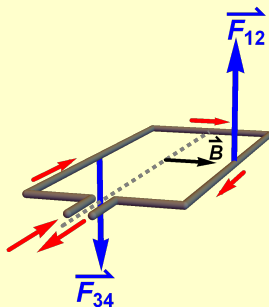


Como manter o movimento giratório?

Máquina CC

O sentido das correntes é invertido logo após o ponto de equilíbrio.

O mecanismo para essa inversão (anéis comutadores) está fora do escopo dessa aula.

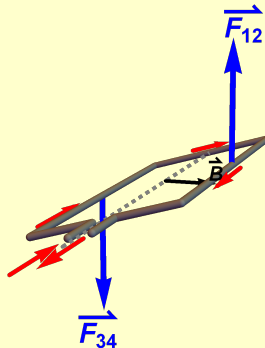


Como manter o movimento giratório?

Máquina CC

O sentido das correntes é invertido logo após o ponto de equilíbrio.

O mecanismo para essa inversão (anéis comutadores) está fora do escopo dessa aula.

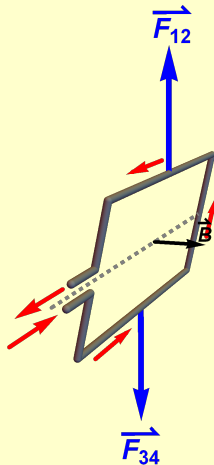


Como manter o movimento giratório?

Máquina CC

O sentido das correntes é invertido logo após o ponto de equilíbrio.

O mecanismo para essa inversão (anéis comutadores) está fora do escopo dessa aula.

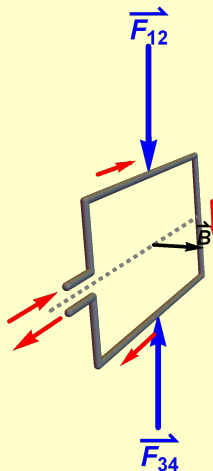


Como manter o movimento giratório?

Máquina CC

O sentido das correntes é invertido logo após o ponto de equilíbrio.

O mecanismo para essa inversão (anéis comutadores) está fora do escopo dessa aula.

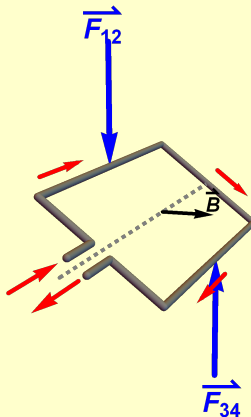


Como manter o movimento giratório?

Máquina CC

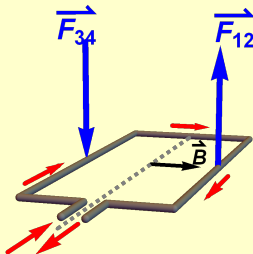
O sentido das correntes é invertido logo após o ponto de equilíbrio.

O mecanismo para essa inversão (anéis comutadores) está fora do escopo dessa aula.



Como manter o movimento giratório?

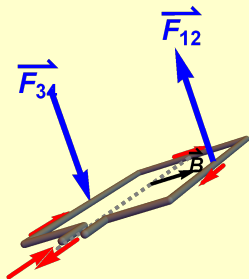
Máquina CA



Campo \vec{B} gira continuamente

Como manter o movimento giratório?

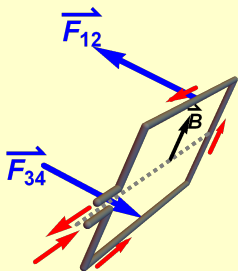
Máquina CA



Campo \vec{B} gira continuamente

Como manter o movimento giratório?

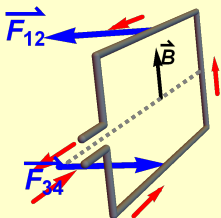
Máquina CA



Campo \vec{B} gira continuamente

Como manter o movimento giratório?

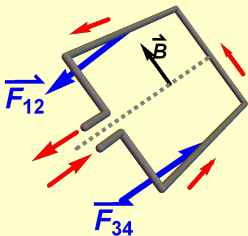
Máquina CA



Campo \vec{B} gira continuamente

Como manter o movimento giratório?

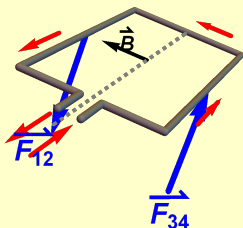
Máquina CA



Campo \vec{B} gira continuamente

Como manter o movimento giratório?

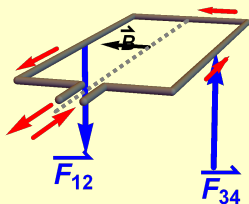
Máquina CA



Campo \vec{B} gira continuamente

Como manter o movimento giratório?

Máquina CA



Campo \vec{B} gira continuamente

Campo magnético girante

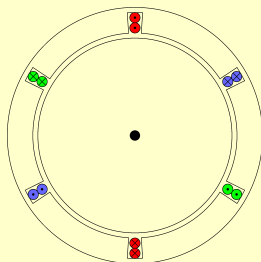
- Soma vetorial do campo produzido pelas bobinas de cada fase

$$\vec{H}_{res} = \vec{H}_A + \vec{H}_B + \vec{H}_C$$

$$\vec{H}_A = H(\cos \omega t) [\hat{a}_x]$$

$$\vec{H}_B = H(\cos \omega t - 120^\circ) [\cos(120^\circ)\hat{a}_x + \sin(120^\circ)\hat{a}_y]$$

$$\vec{H}_C = H(\cos \omega t + 120^\circ) [\cos(-120^\circ)\hat{a}_x + \sin(-120^\circ)\hat{a}_y]$$



Campo magnético girante - ilustração

Campo magnético girante - ilustração (cont.)

Decomposição de $H(t)$ no eixo x

$$\vec{H}_A = H(\cos \omega t) [\hat{a}_x]$$

$$\vec{H}_B = H(\cos \omega t - 120^\circ) [\cos(120^\circ)\hat{a}_x + \sin(120^\circ)\hat{a}_y]$$

$$\vec{H}_C = H(\cos \omega t + 120^\circ) [\cos(-120^\circ)\hat{a}_x + \sin(-120^\circ)\hat{a}_y]$$

$$H_{res,x} = H \cos \omega t$$

$$+ H [\cos(\omega t) \cos(120^\circ) + \cancel{\sin(\omega t) \sin(120^\circ)}] \cos(120^\circ)$$

$$+ H [\cos(\omega t) \cos(120^\circ) - \cancel{\sin(\omega t) \sin(120^\circ)}] \cos(-120^\circ)$$

$$= H \cos \omega t (1 + 2 \cdot \cos 120^\circ \cdot \cos 120^\circ) = H \cos \omega t \left(1 + 2 \cdot \frac{-1}{2} \cdot \frac{-1}{2} \right)$$

$$= \frac{3}{2} H \cos \omega t$$

Decomposição de $H(t)$ no eixo y

$$\vec{H}_A = H(\cos \omega t) [\hat{a}_x]$$

$$\vec{H}_B = H(\cos \omega t - 120^\circ) [\cos(120^\circ)\hat{a}_x + \sin(120^\circ)\hat{a}_y]$$

$$\vec{H}_C = H(\cos \omega t + 120^\circ) [\cos(-120^\circ)\hat{a}_x + \sin(-120^\circ)\hat{a}_y]$$

$$\begin{aligned} H_{res,y} &= H \left[\cancel{\cos(\omega t) \cos(120^\circ)} + \sin(\omega t) \sin(120^\circ) \right] \sin(120^\circ) \\ &+ H \left[\cancel{\cos(\omega t) \cos(120^\circ)} - \sin(\omega t) \sin(120^\circ) \right] \sin(-120^\circ) \\ &= 2H \sin \omega t \cdot \sin 120^\circ \cdot \sin 120^\circ = 2H \sin \omega t \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \\ &= \frac{3}{2} H \sin \omega t \end{aligned}$$

Campo magnético girante (cont.)

- Portanto:

$$\vec{H}_{res} = \frac{3}{2}H \left[\cos(\omega t)\hat{x} + \sin(\omega t)\hat{y} \right]$$

- H gira com velocidade ω no sentido anti-horário

Campo girante, máquina com quatro polos

Campo girante, máquina com quatro polos

Campo girante

Comparação 2 e 4 polos

Campo girante

6 polos, 8 polos...

Campo girante

Ligação correta x incorreta, 2 polos

Velocidade e pares de polos

- A velocidade do campo girante é proporcional ao inverso do número de pares de polos, isto é:

$$\omega_s = \frac{2\pi f}{\underbrace{p}_{[rad/s]}} \longrightarrow n_s = \frac{60 \cdot f}{\underbrace{p}_{[rpm]}}$$

- Exemplos:

- $f=60$ Hz, $p=1$ (2 polos) $\rightarrow \omega_s = 2\pi 60$ rad/s, $n_s = 3600$ rpm
- $f=60$ Hz, $p=2$ (4 polos) $\rightarrow \omega_s = 2\pi 30$ rad/s, $n_s = 1800$ rpm

Máquina assíncrona (de indução)

- Tensão induzida na espira

$$e_{ind} = (\vec{vel} \times \vec{B}) \cdot \vec{C}$$

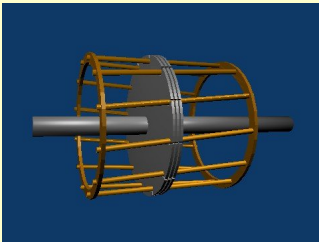
- Tensão induzida resulta em corrente i_{esp} na espira
- Geração de $\vec{B}_{esp} (\phi_{esp})$ a partir de i_{esp}

- A força eletromotriz induzida no enrolamento do rotor pode ser calculada a partir da equação de Lorentz e da definição de potencial elétrico:

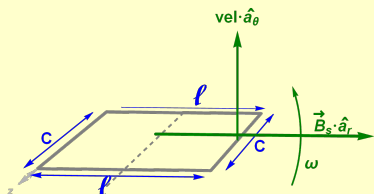
$$\vec{F} = q \cdot (\vec{E} + \underbrace{\vec{vel} \times \vec{B}}_{\substack{\text{dimensão} \\ \text{de campo} \\ \text{elétrico}}})$$

Tipos de rotores

- Gaiola de esquilo (*squirrel cage*)
- Rotor com anéis deslizantes (rotor bobinado)
 - Acesso externo às bobinas do rotor



'Squirrel cage' by en:User:Meggar. Licensed under CC BY-SA 3.0 via Wikimedia Commons
https://en.wikipedia.org/wiki/Squirrel-cage_rotor
<http://gemotors.com.br/products/motors/wound/>



- \vec{vel} é a velocidade (tangencial) relativa entre o rotor e a densidade de fluxo girante. A sua relação com a velocidade de rotação $\omega = \omega_s - \omega_r$ (relativa entre a espira e o campo do estator) é dada por:

$$\omega = \frac{vel}{\ell/2} \longrightarrow \vec{vel} = \omega \cdot \frac{\ell}{2} \hat{a}_\theta$$

- A força eletromotriz é dada por:

$$e = \left(\omega \frac{\ell}{2} \hat{a}_\theta \times B \cdot \hat{a}_r \right) C (-\hat{a}_z) = -\omega \frac{\ell}{2} \cdot B \cdot C = -(\omega_s - \omega_r) \frac{\ell}{2} \cdot B \cdot C$$

- Se o rotor estiver parado ($\omega_r = 0$), o campo girante "enxerga" o campo \vec{B} girando à velocidade síncrona ω_s

$$\vec{vel}_0 = \omega_s \frac{\ell}{2} \hat{a}_\theta \longrightarrow e_0 = \left(\vec{vel}_0 \times \vec{B} \cdot \right) dL = vel_0 \cdot B \cdot C$$

Escorregamento

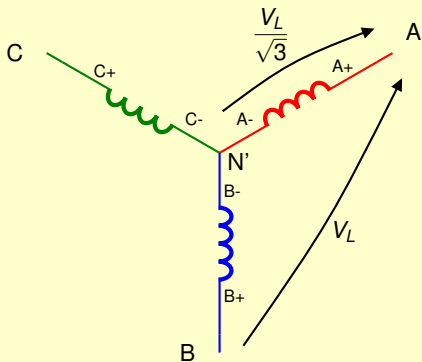
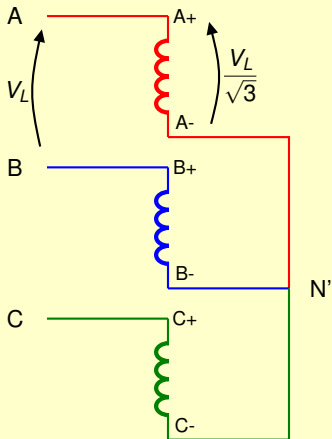
- Quantifica a diferença de velocidade do campo girante (velocidade síncrona) e a velocidade do rotor:

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} (\times 100\%)$$

- rotor parado, $s=1$
- $\omega_r \rightarrow \omega_s, s \rightarrow 0$

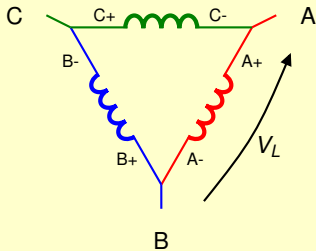
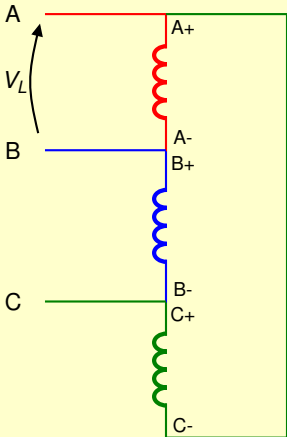
Motor com 6 terminais

Motor com 6 terminais, ligação estrela



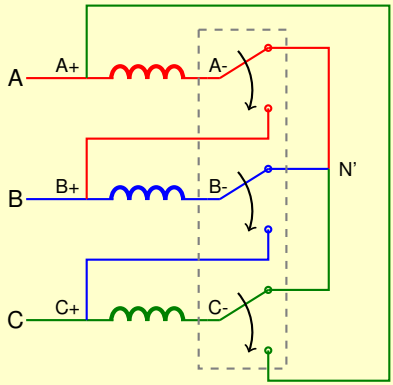
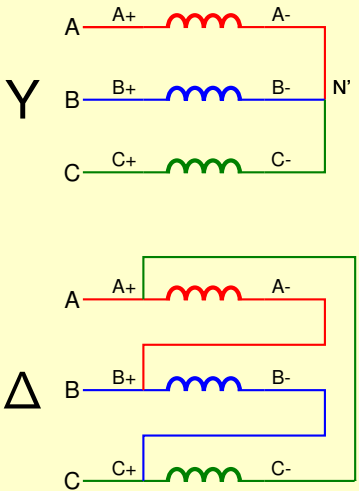
Motor com 6 terminais

Motor com 6 terminais, ligação triângulo



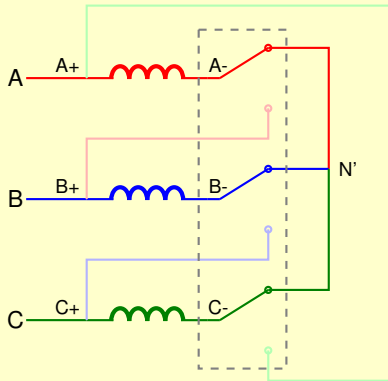
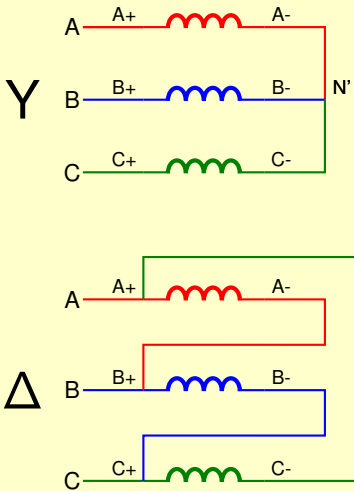
Motor com 6 terminais

Chave estrela-triângulo



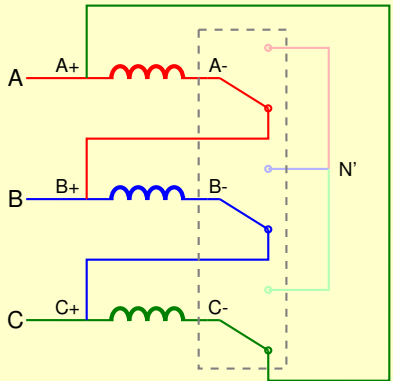
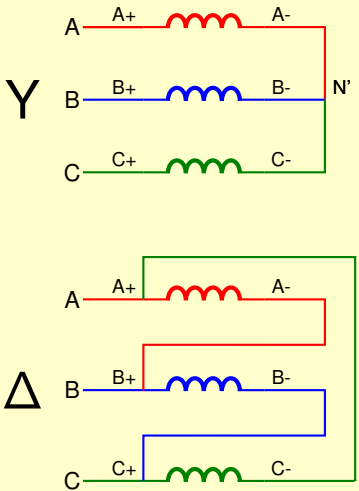
Motor com 6 terminais

Chave estrela-triângulo



Motor com 6 terminais

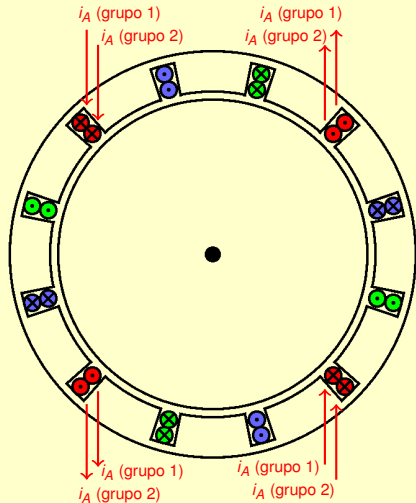
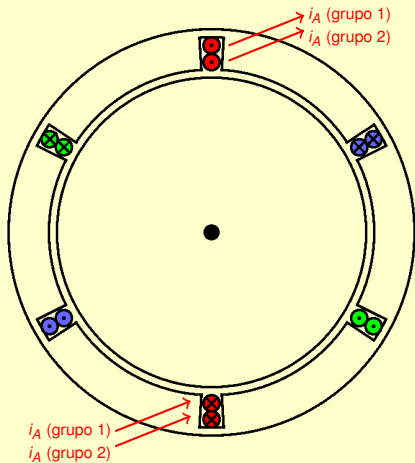
Chave estrela-triângulo



Motor com 12 terminais

Motor com 12 terminais

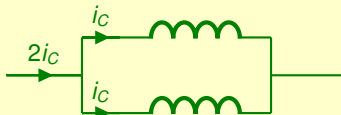
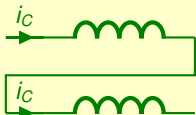
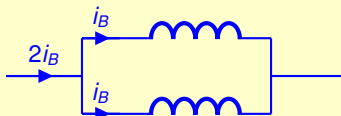
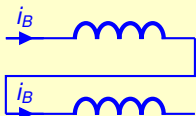
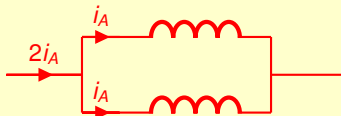
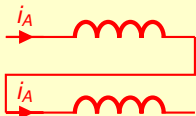
2 grupos de bobinas por fase



Motor com 12 terminais

Motor com 12 terminais

Grupos de bobinas de cada fase: ligação série ou paralelo

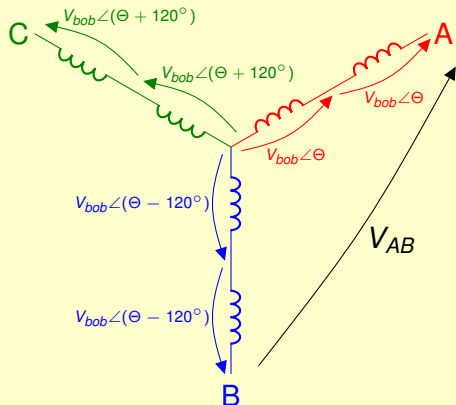


Motor com 12 terminais

Motor com 12 terminais

Estrela série

V_{bob} = tensão nominal de cada grupo de bobina



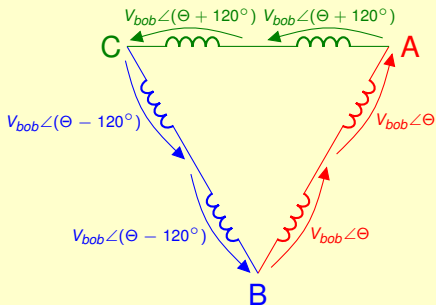
$$|V_{AB}|_{(nom)} = 2\sqrt{3}V_{bob}$$

Motor com 12 terminais

Motor com 12 terminais

Triângulo série

V_{bob} = tensão nominal de cada grupo de bobina



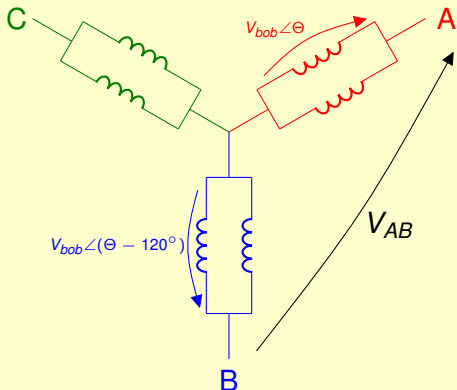
$$|V_{AB}|_{(nom)} = 2V_{bob}$$

Motor com 12 terminais

Motor com 12 terminais

Estrela em paralelo ("dupla estrela")

V_{bob} = tensão nominal de cada grupo de bobina

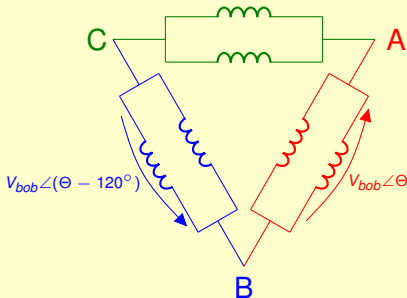


$$|V_{AB}|_{(nom)} = \sqrt{3} V_{bob}$$

Motor com 12 terminais

Motor com 12 terminais

Triângulo em paralelo ("duplo triângulo")

 V_{bob} = tensão nominal de cada grupo de bobina

$$|V_{AB}|_{(nom)} = V_{bob}$$

Motor com 12 terminais

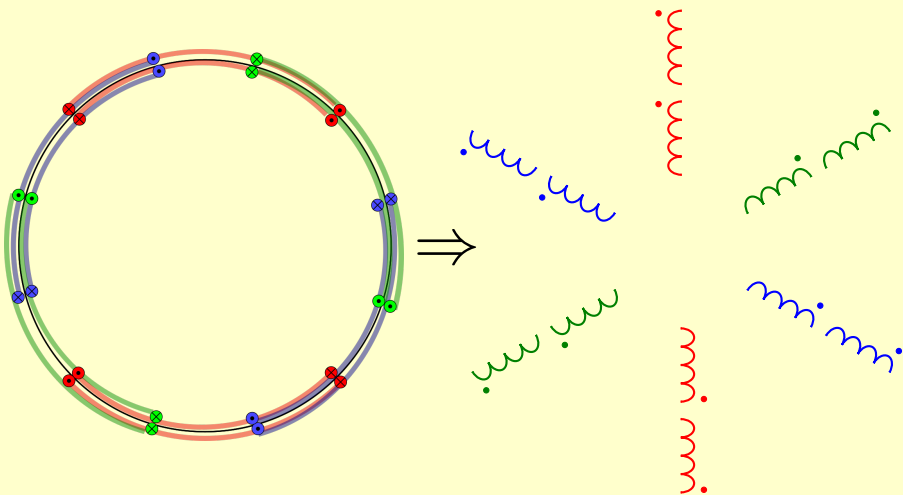
Aplicação

- 4 possibilidades de tensão nominal (linha)
- mesma potência mecânica, conjugado nominal e rendimento para todas as tensões, se usada a ligação adequada entre os terminais
- exemplo:
 - $V_{bob} = 220\text{ V}$;
 - para um certo valor de conjugado resistente (carga), $I = I_{bob}$ em cada grupo de bobinas;
 - $V_L = 220\text{ V}$: duplo triangulo, $I_L = 2\sqrt{3} \cdot I_{bob}$;
 - $V_L = 380\text{ V} = \sqrt{3} \cdot 220\text{ V}$: dupla estrela, $I_L = 2I_{bob}$;
 - $V_L = 440\text{ V} = 2 \cdot 220\text{ V}$: triangulo, $I_L = \sqrt{3} \cdot I_{bob}$;
 - $V_L = 760\text{ V} = 2\sqrt{3} \cdot 220\text{ V}$: estrela, $I_L = I_{bob}$.

Motor com 12 terminais

Motor com 12 terminais

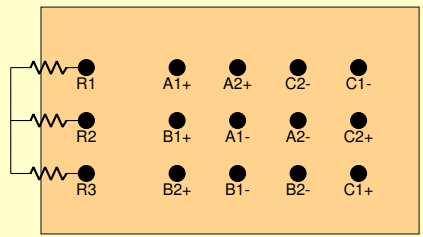
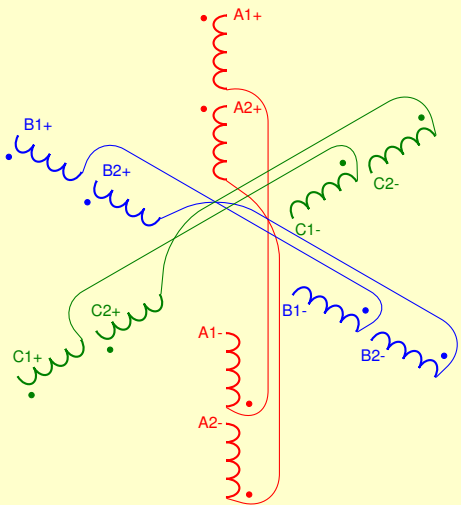
Diagramas de ligação



Motor com 12 terminais

Motor com 12 terminais

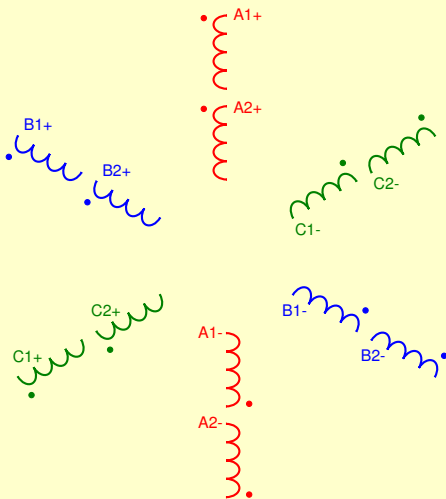
Diagramas de ligação (cont.)



Motor com 12 terminais

Motor com 12 terminais

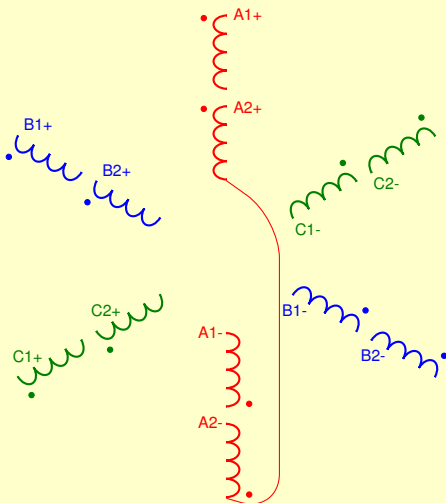
Diagramas de ligação (cont.)



Motor com 12 terminais

Motor com 12 terminais

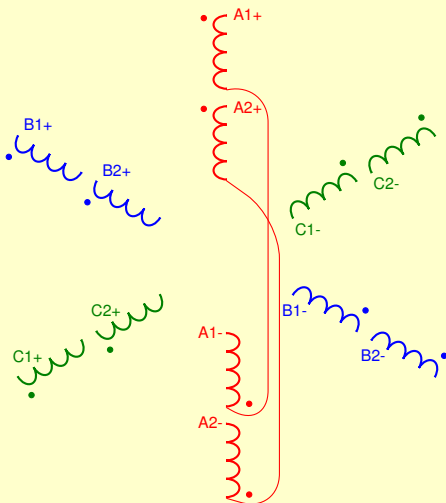
Diagramas de ligação (cont.)



Motor com 12 terminais

Motor com 12 terminais

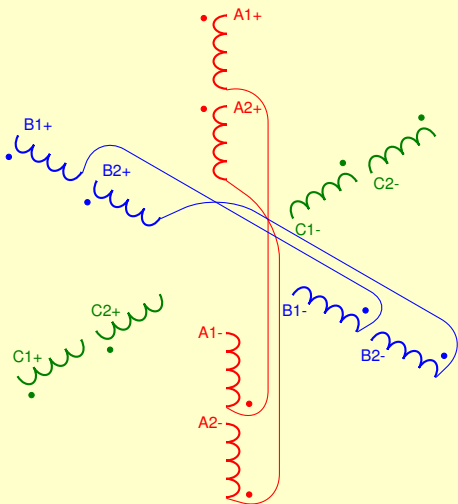
Diagramas de ligação (cont.)



Motor com 12 terminais

Motor com 12 terminais

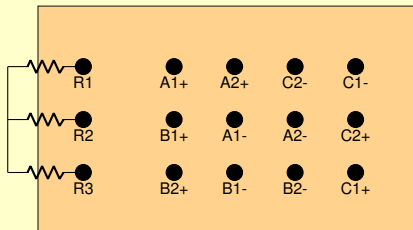
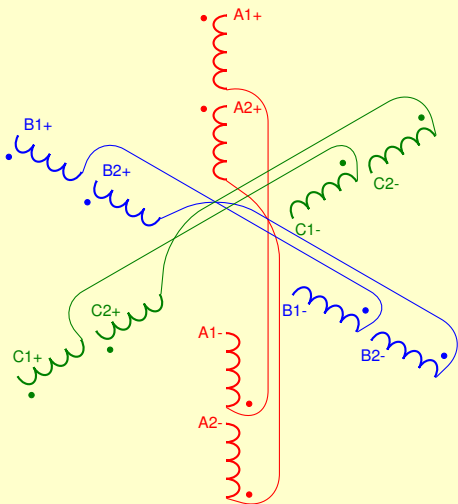
Diagramas de ligação (cont.)



Motor com 12 terminais

Motor com 12 terminais

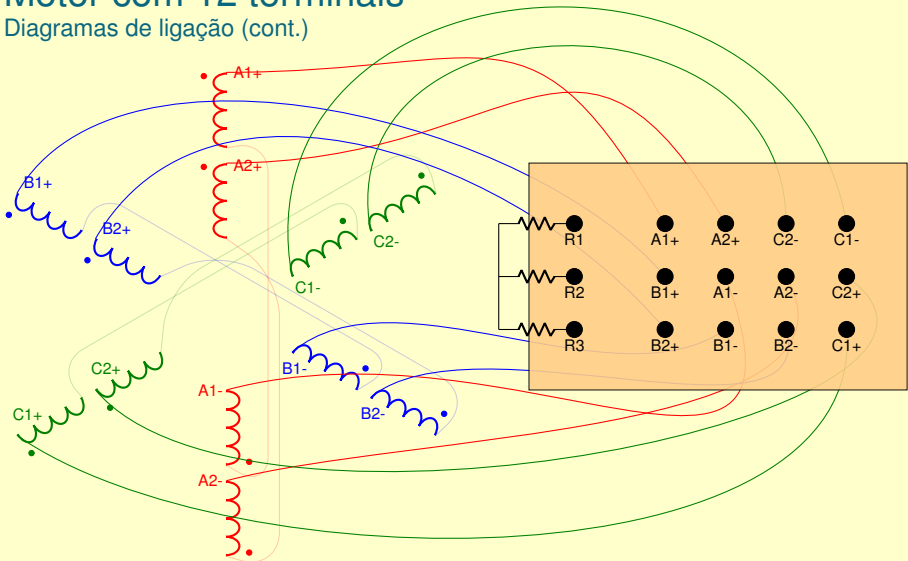
Diagramas de ligação (cont.)



Motor com 12 terminais

Motor com 12 terminais

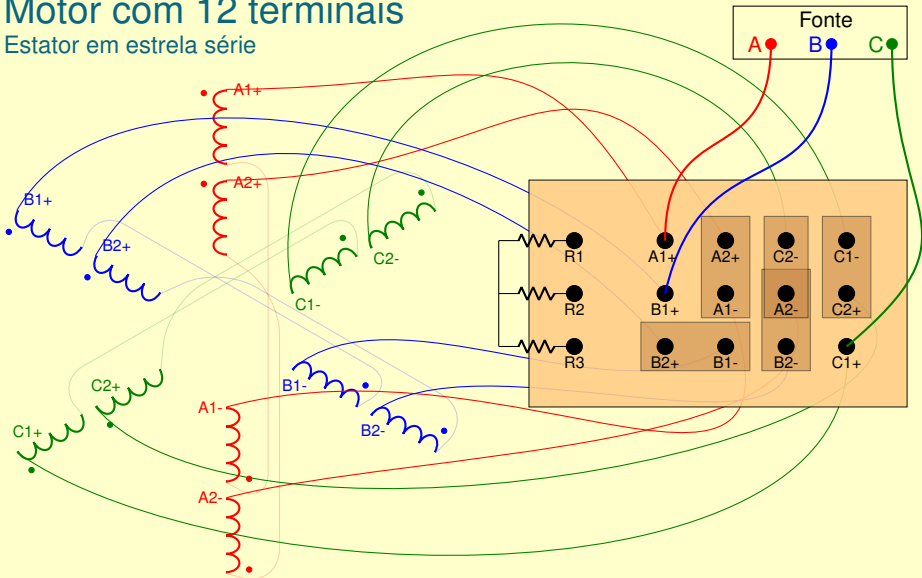
Diagramas de ligação (cont.)



Motor com 12 terminais

Motor com 12 terminais

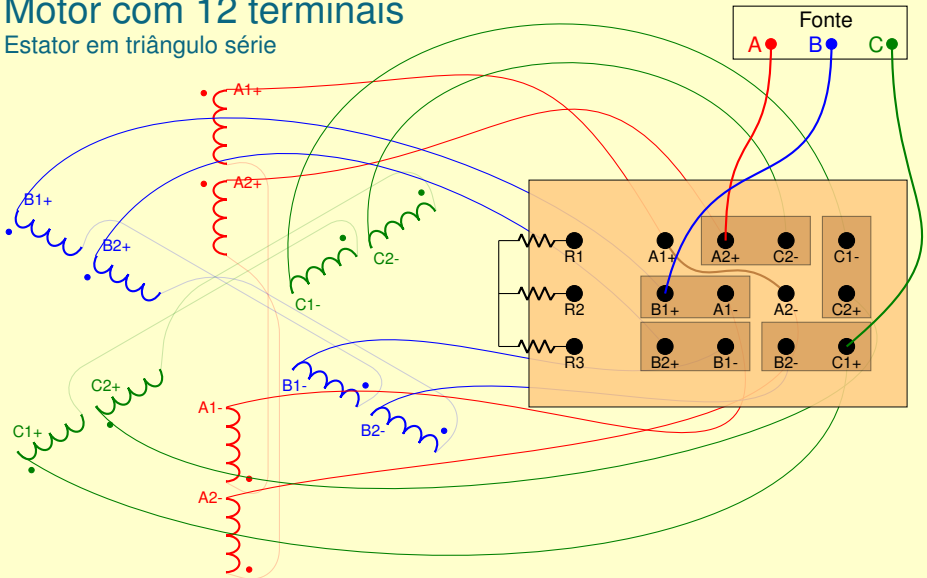
Estator em estrela série



Motor com 12 terminais

Motor com 12 terminais

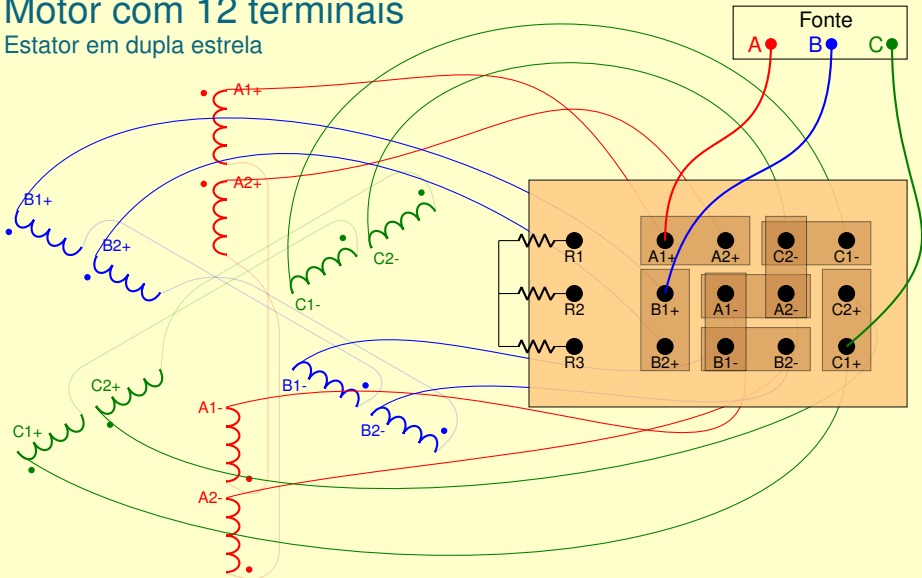
Estator em triângulo série



Motor com 12 terminais

Motor com 12 terminais

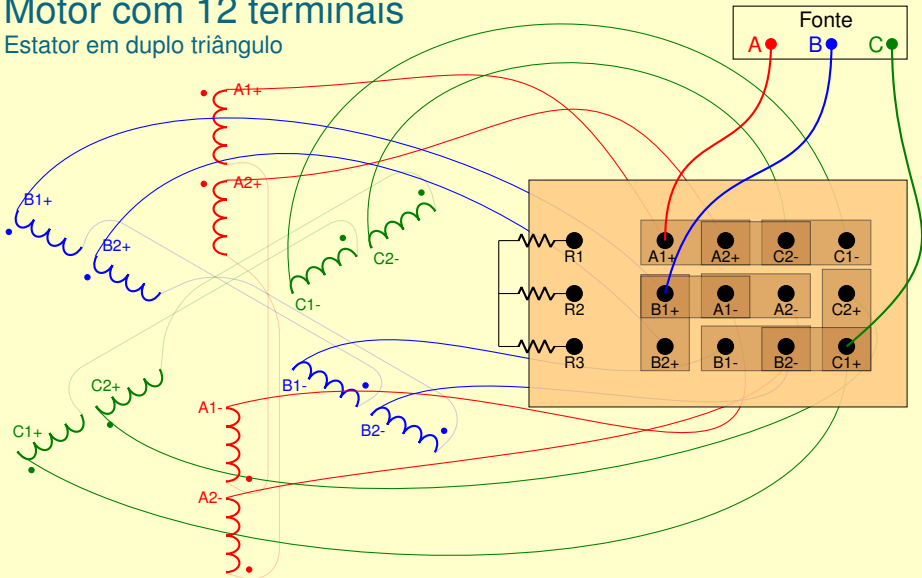
Estator em dupla estrela



Motor com 12 terminais

Motor com 12 terminais

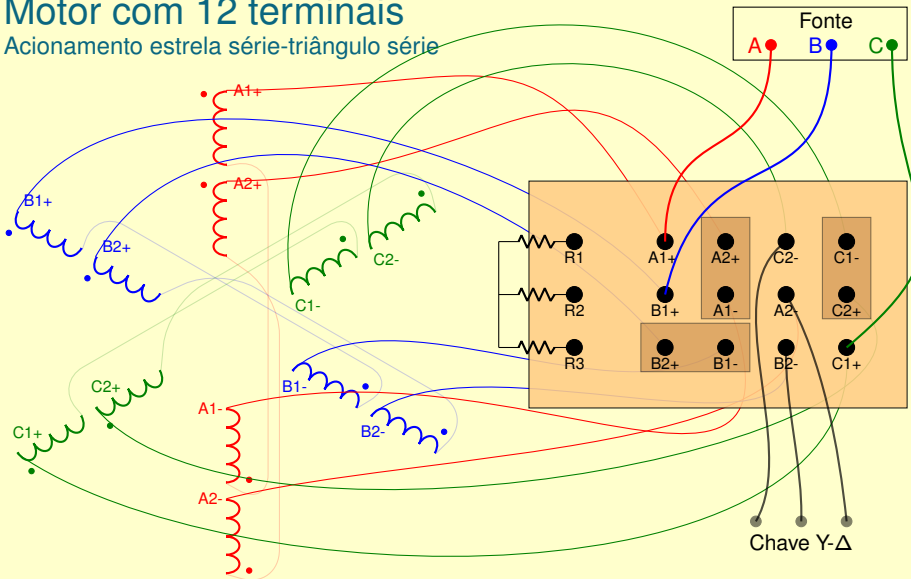
Estator em duplo triângulo



Motor com 12 terminais

Motor com 12 terminais

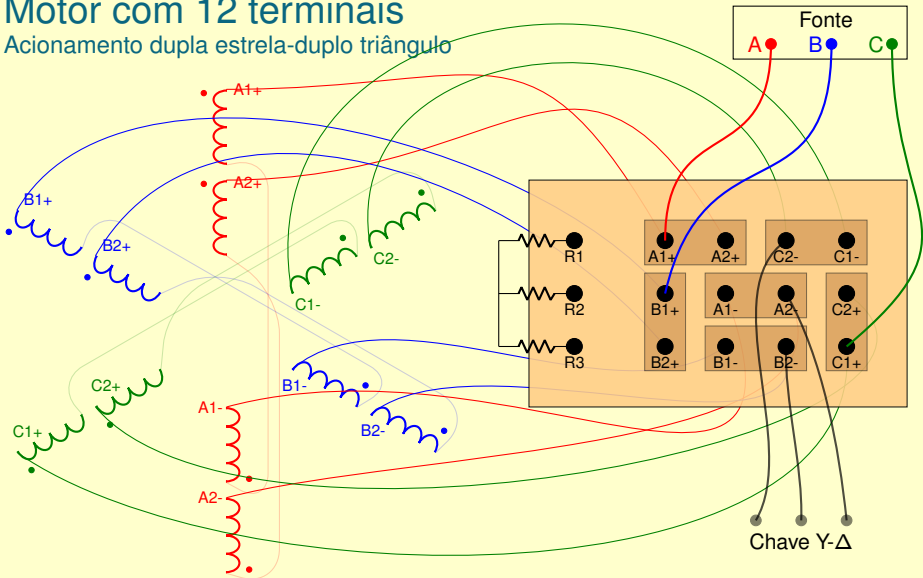
Acionamento estrela série-triângulo série



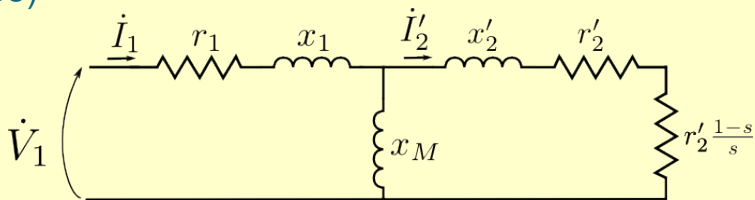
Motor com 12 terminais

Motor com 12 terminais

Acionamento dupla estrela-duplo triângulo



Circuito equivalente de um motor de indução (por fase)

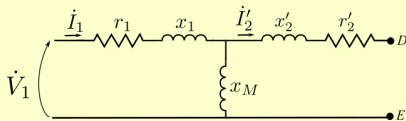


- r_1, r'_2 : perdas Joule nas bobinas do estator e rotor, respectivamente;
- x_1, x'_2 : reatâncias de dispersão das bobinas do estator e rotor, respectivamente;
- x_M : reatâncias de magnetização – alinhamento dos domínios magnéticos do estator e rotor;
- $r'_2 \frac{1-s}{s}$: a potência elétrica dissipada 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

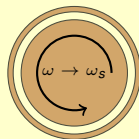
$$r'_2 \frac{1-s}{s} \rightarrow \infty$$



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

Motor elétrico

Carga mecânica $\rightarrow 0$ no eixo

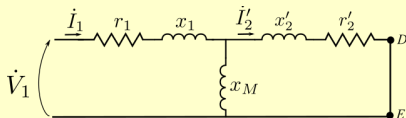


$$P_{mec} = T \cdot \overset{0}{\omega_r} = 0$$

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

Circuito elétrico equivalente

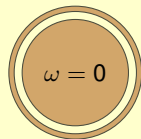
$$r'_2 \frac{1-s}{s} = 0$$



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

Motor elétrico

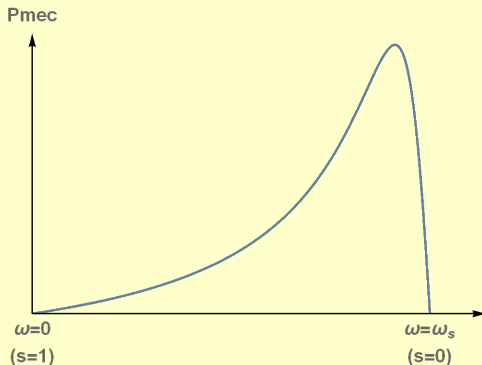
Giro do rotor bloqueado



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

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

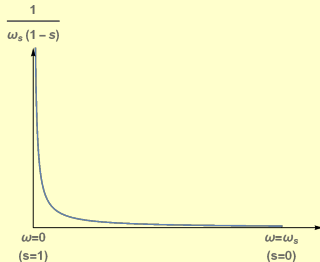
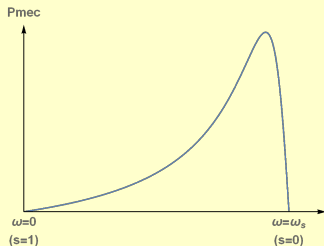
$$P_{mec} = \frac{d\text{Trabalho}}{dt} = \frac{d(F \cdot d)}{dt} = F \cdot vel = F \cdot \frac{\ell}{2} \cdot \omega_r$$

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

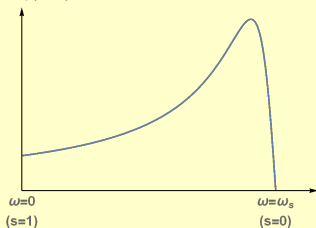
$$\text{Conjugado} = T = \frac{P_{mec}}{\omega_r} = \frac{P_{mec}}{(1-s)\omega_s}$$

- Conjugado = torque (sinônimos)

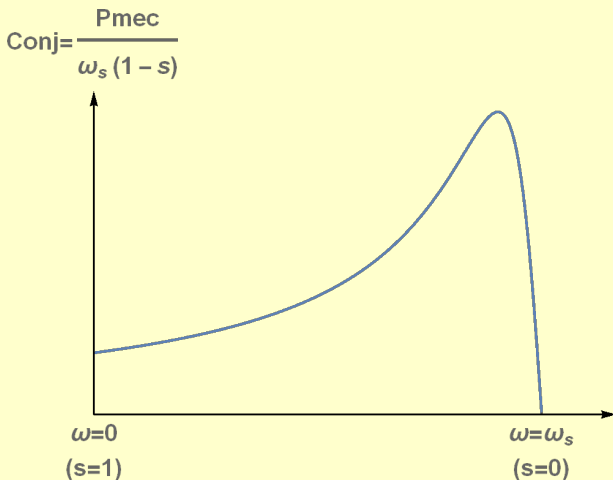
Potência mecânica, $1/\omega_r$, Conjugado



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



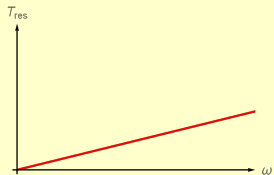
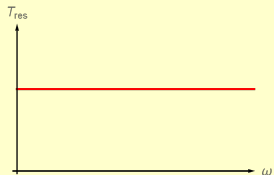
Curva conjugado x velocidade



Cargas mecânicas, torque resistente

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

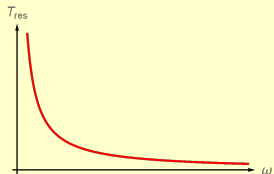
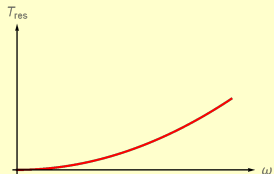
- Conjugado com variação linear com a rotação
 - ex. moinhos



Cargas mecânicas (continuação)

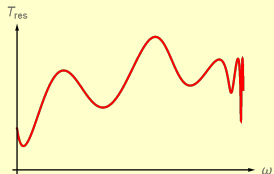
- Conjugado com variação quadrática com a rotação
 - ex. ventiladores

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



Outros tipos de cargas mecânicas

- Conjugado bastante variável
 - ex. forno rotativo

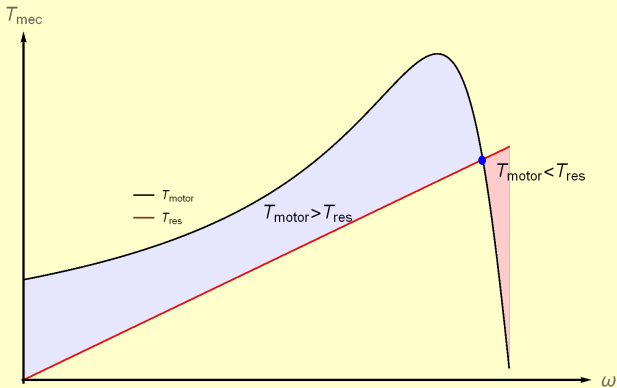


- Cargas com baixíssimos conjugados (volantes)
 - ex. armazenamento de energia



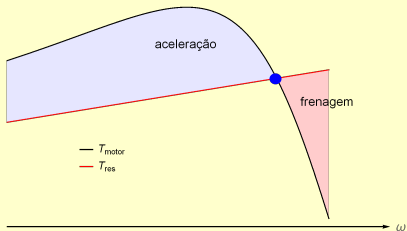
Modos de funcionamento

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

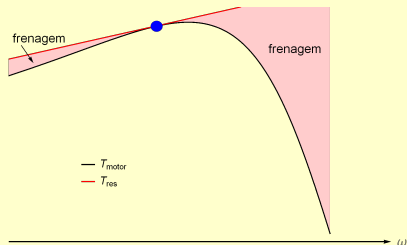


Funcionamento estável/instável

Torque máximo admissível

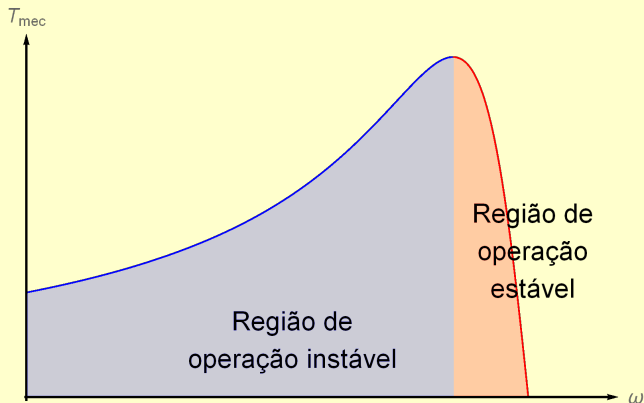


● estável



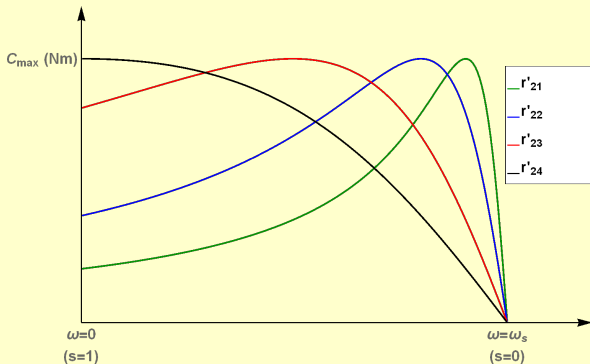
● instável

Funcionamento estável/instável



Sensibilidade da curva de conjugado

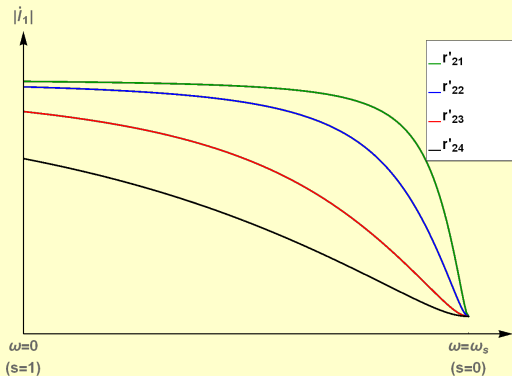
Influência de r'_2



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

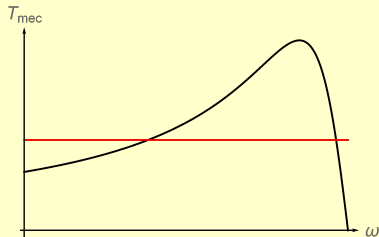
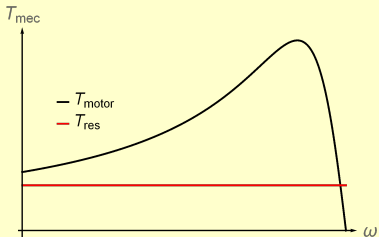
Sensibilidade da curva de conjugado

Corrente no estator

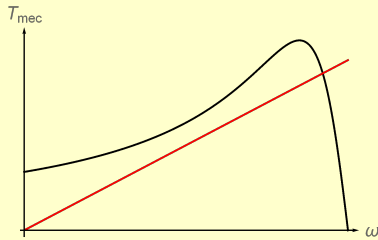


$$r'_{21} < r'_{22} < r'_{23} < r'_{24}$$

Partida de motores



Motor não parte!



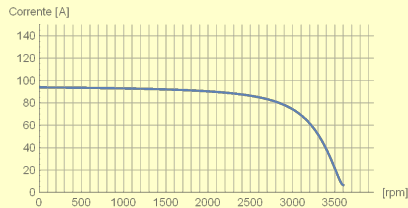
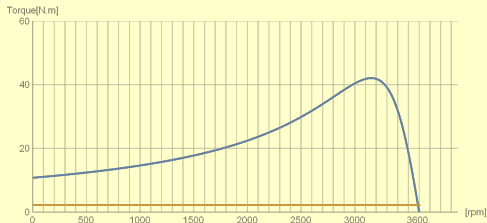
Métodos de partida: redução da corrente de partida

- 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

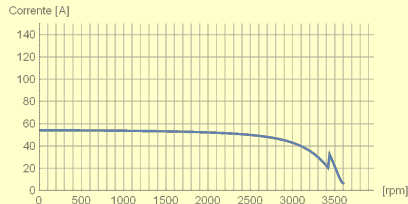
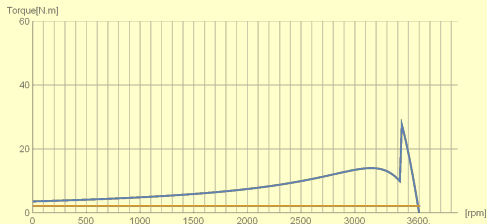
Métodos de partida

(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

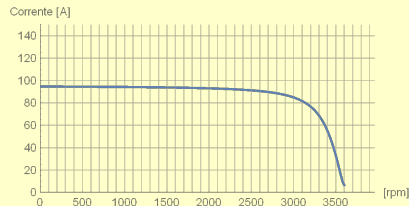
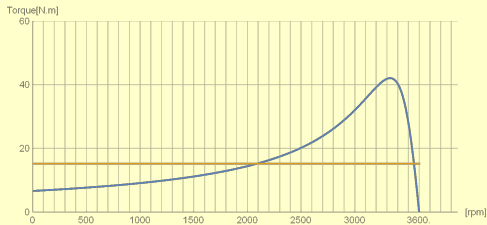


Métodos de partida: aumento do conjugado de partida

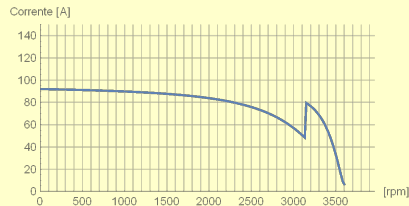
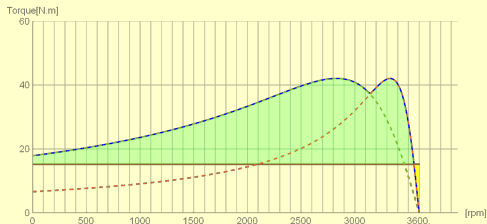
- Reostato (=resistor variável) de partida
 - Corrente diminui com aumento da resistência (ver curvas)
 - Conjugado de partida aumenta com aumento da resistência (ver curvas)
 - Velocidade em regime diminui com aumento da resistência → reduzir resistência após partida
 - Terminais do rotor devem estar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