

Motores Eléctricos



Tópicos

- 1. Introdução**
- 2. Tipos de motores elétricos**
- 3. Princípio de funcionamento**
- 4. Campo girante (2 polos)**
- 5. Motores de 4 polos**
- 6. Rotação síncrona**
- 7. Escorregamento**
- 8. Ligações do estator**
- 9. Conjugado desenvolvido pelo motor**
- 10. Corrente absorvida pelo motor**
- 11. Detalhes Construtivos**
- 12. Circuito Equivalente**

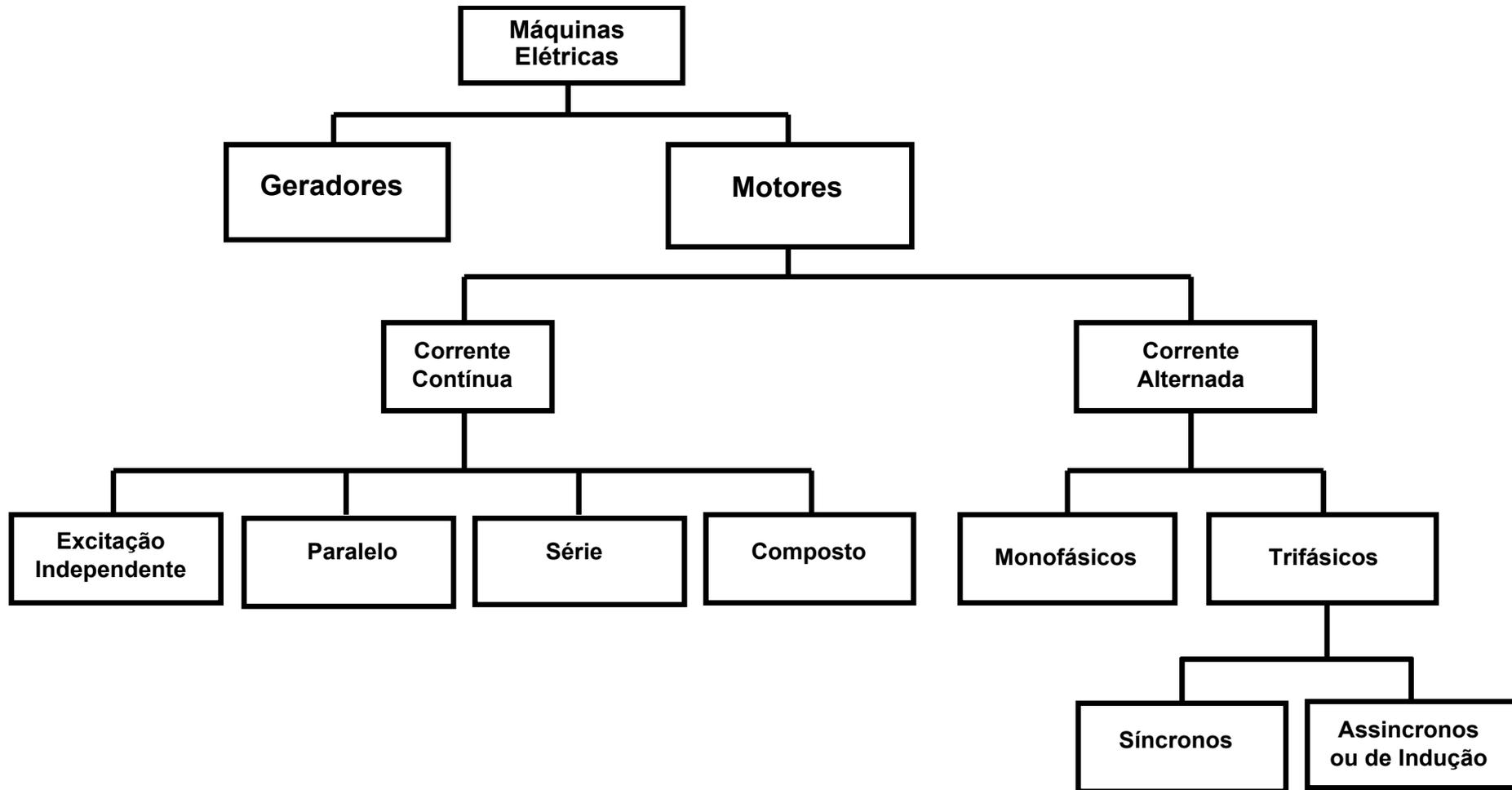
Introdução

- Máquinas elétricas rotativas:
 - MOTORES \Rightarrow conversão de energia elétrica em mecânica
 - GERADORES \Rightarrow conversão de energia mecânica em elétrica
- As conversões são feitas pela interação entre correntes elétricas e campos magnéticos.

Importância

- No setor industrial ($\approx 40\%$ a 50% da energia elétrica consumida no país) $\Rightarrow 70\%$ a 80% do total para o acionamento de motores.
- \therefore Os motores representam cerca de 30 a 40 % da energia elétrica consumida no país.
- Isto evidencia a grande importância do conhecimento deste tipo de equipamento pelos engenheiros.

CLASSIFICAÇÃO DAS MÁQUINAS ELÉTRICAS ROTATIVAS

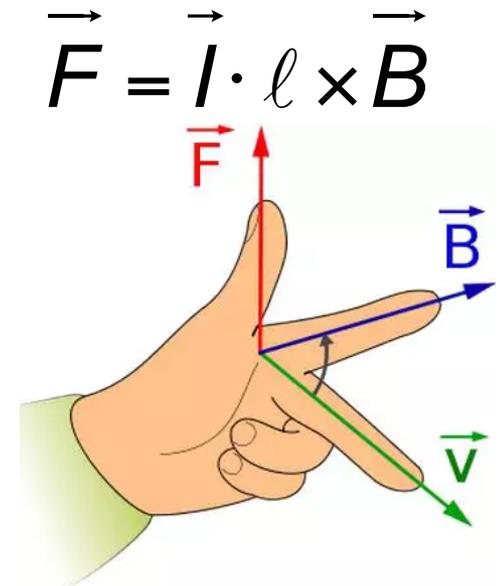
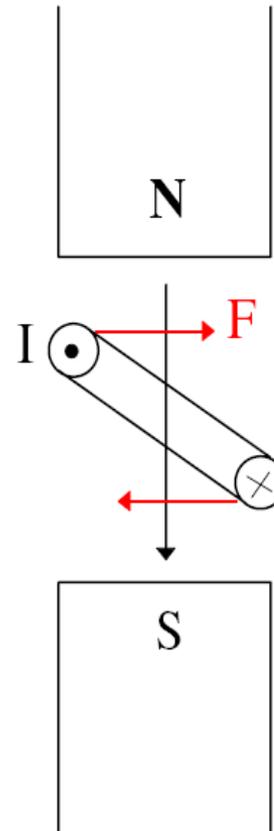
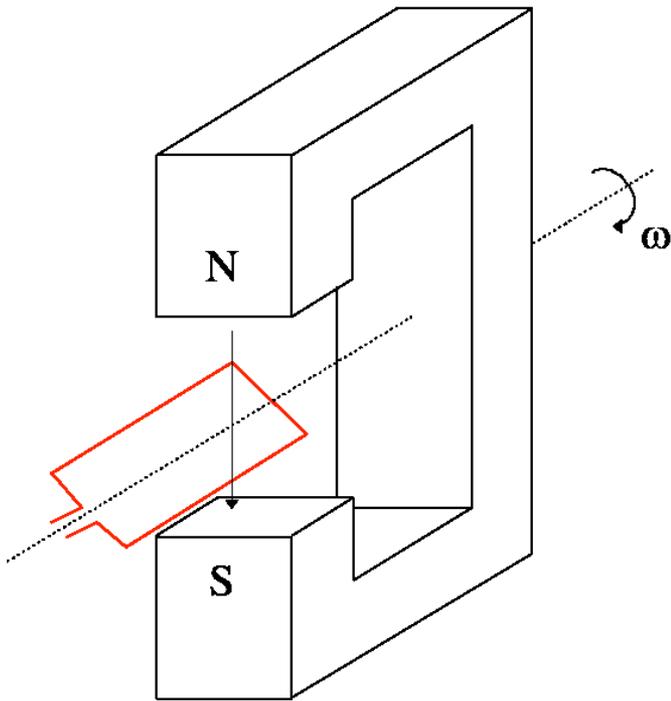


Princípio de Funcionamento

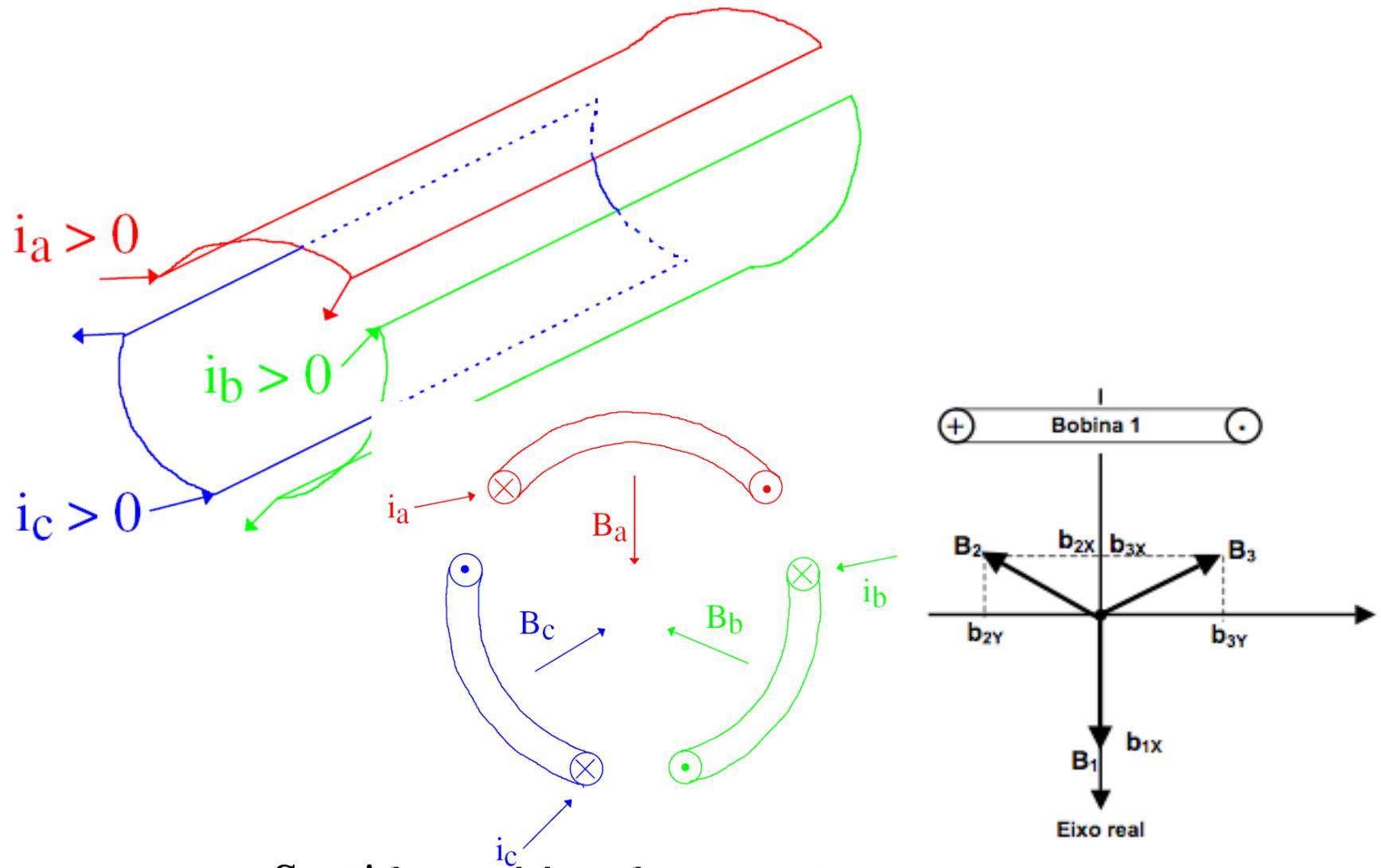
- Associado a forças de origem eletromagnética, produzidas pela interação dos campos magnéticos gerados dos por dois tipos de **enrolamentos**, as
- **BOBINAS:**
 - ESTATOR: bobina que permanece fixa
 - ROTOR: bobina que gira solidária ao eixo da máquina (parte móvel)

PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Espira em curto-circuito imersa em campo girante

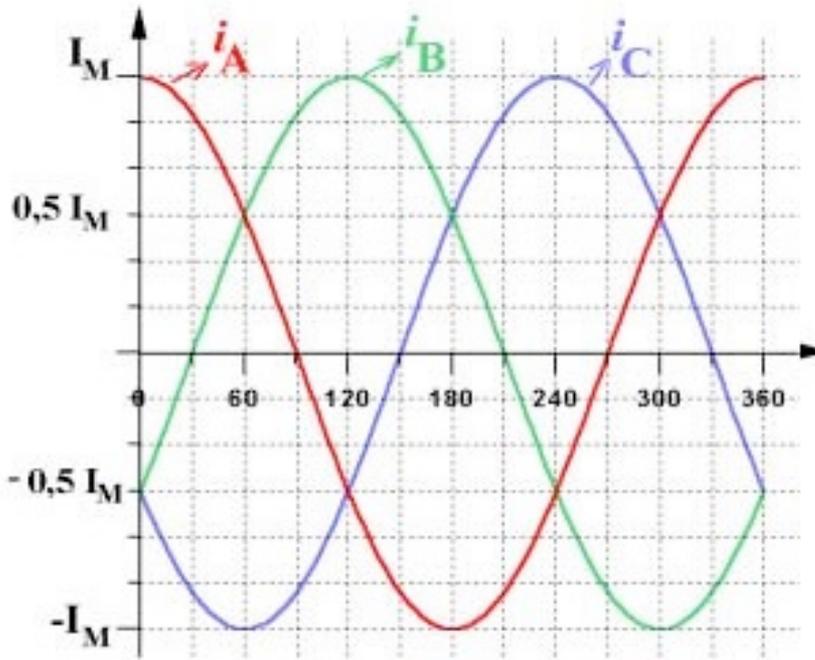


Campo girante (2 pólos)



Sentido positivo de correntes e campos

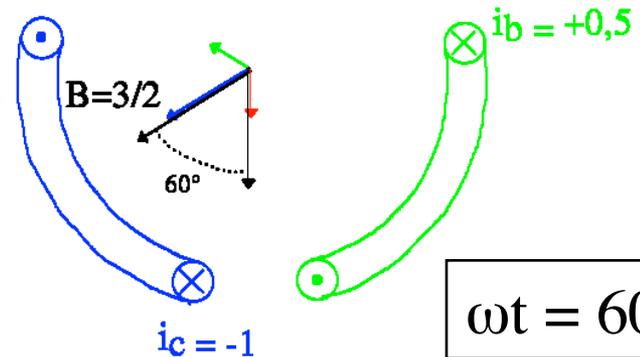
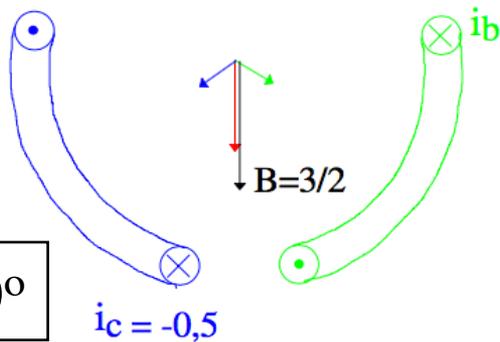
Correntes 3φ em 3 bobinas defasadas de 120°



$$|\vec{b}_1| = b_1 = K I_{M\acute{a}x} \text{ sen } \omega t = B_{M\acute{a}x} \text{ sen } \omega t$$

$$|\vec{b}_2| = b_2 = K I_{M\acute{a}x} \text{ sen } (\omega t - 120^\circ) = B_{M\acute{a}x} \text{ sen } (\omega t - 120^\circ)$$

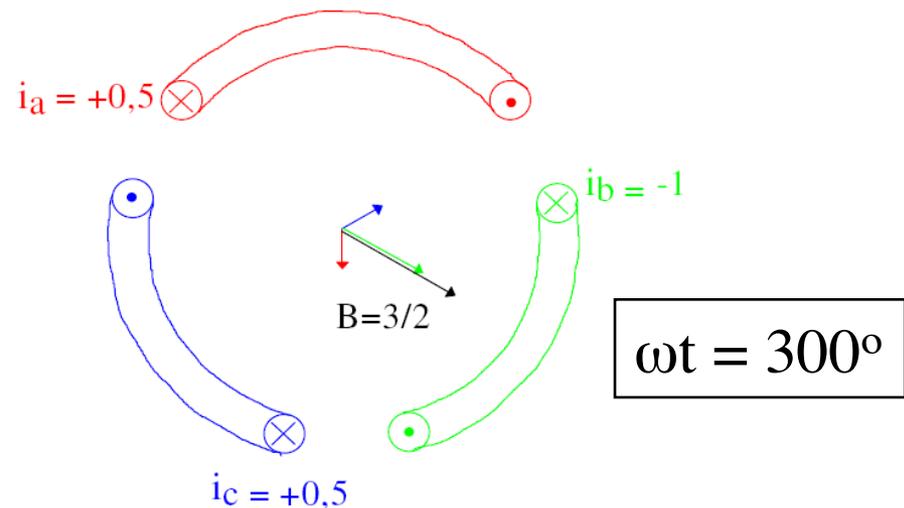
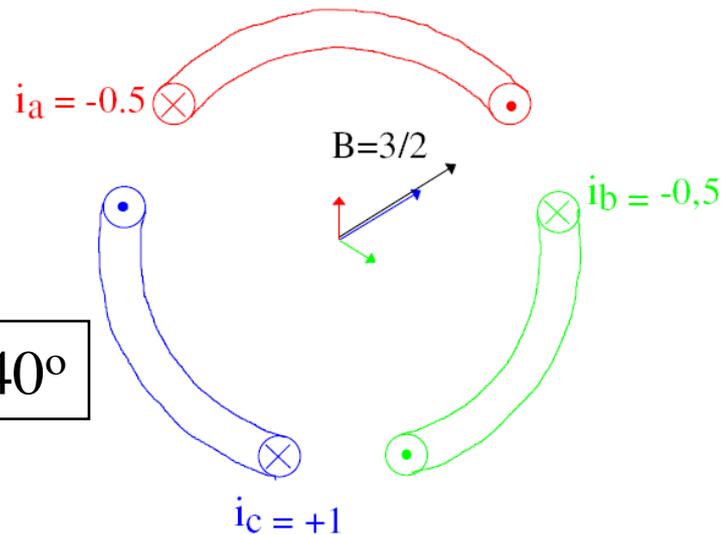
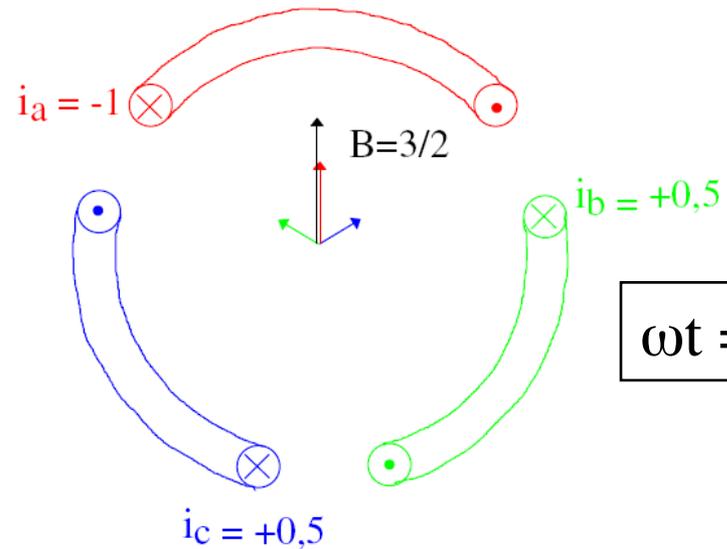
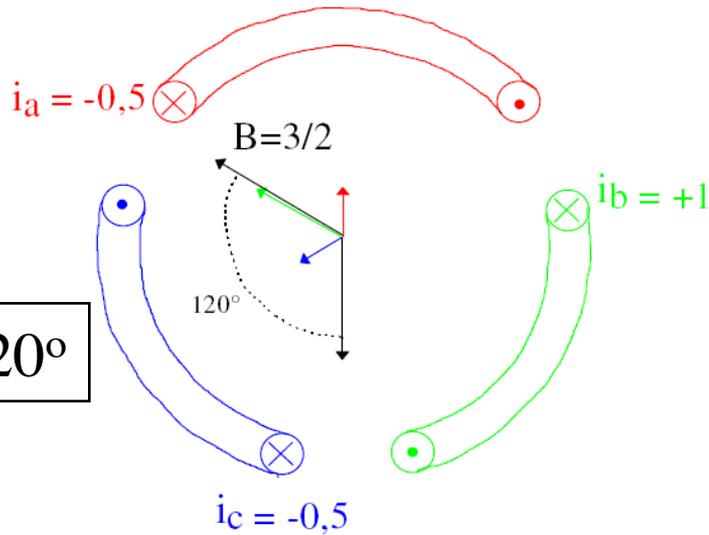
$$|\vec{b}_3| = b_3 = K I_{M\acute{a}x} \text{ sen } (\omega t + 120^\circ) = B_{M\acute{a}x} \text{ sen } (\omega t + 120^\circ)$$



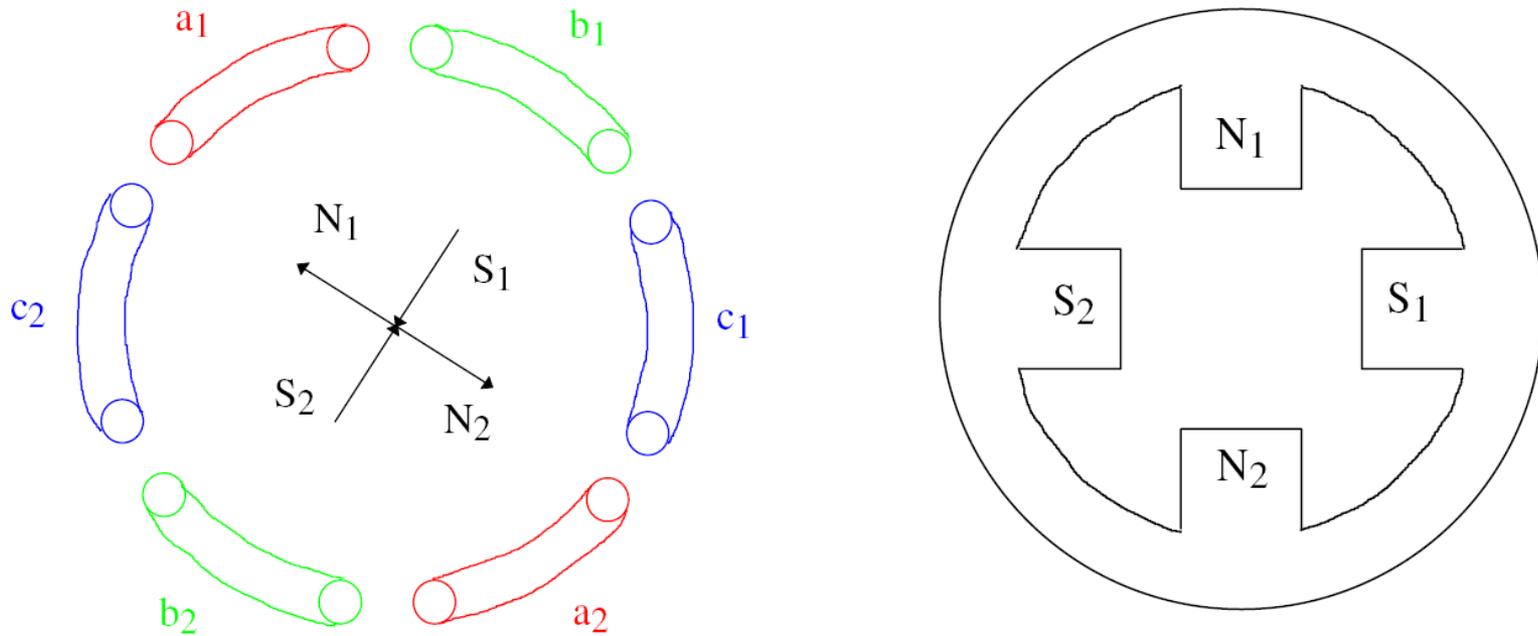
$\omega t = 0^\circ$

$\omega t = 60^\circ$

Campo Magnético Resultante no Interior das Bobinas em Função do Tempo (ângulo elétrico)



Motores de 4 Pólos



Em 1 ciclo de tensão (16,67 ms em 60 Hz),
o campo girante se desloca 1/2 rotação.

Rotação síncrona (do campo girante)

$$N_s = \frac{60f}{p}$$

$$\omega_s = \frac{2\pi f}{p}$$

N_s : rotação do campo girante (rpm)

ω_s : rotação do campo girante (rad/s)

f : frequência da rede (Hz)

p : número de **pares** de polos

Escorregamento (s)

Def.: Diferença entre as velocidades do campo girante (ω_S) e do rotor (ω_R), em fração (ou em %) da primeira.

$$s = \frac{\omega_S - \omega_r}{\omega_S} = \frac{N_S - N_r}{N_S} \quad [x 100]$$

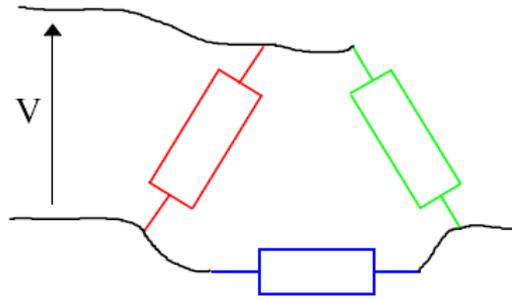
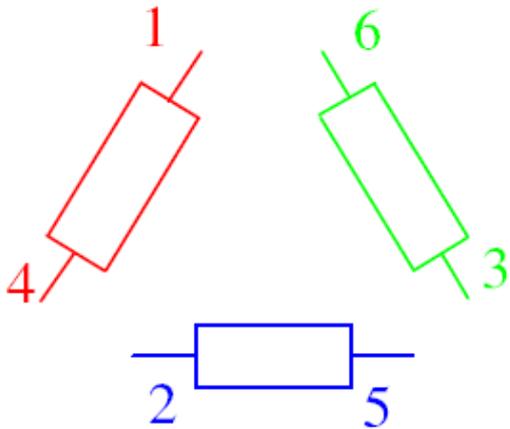
Exemplo: motor de 4 polos, 220 V, 60 Hz, 1720 rpm. Determinar s .

$$N_S = \frac{60 f}{p} = \frac{60 \cdot 60}{2} = 1800 \text{ rpm}$$

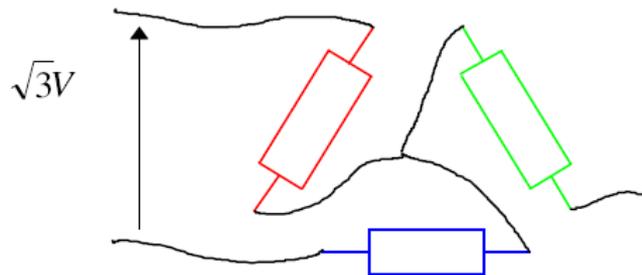
$$s = \frac{1800 - 1720}{1800} = 0.044 \text{ ou } 4.4 \%$$

Ligações do estator

Motor de 6 terminais (3 bobinas)



Ligação Δ

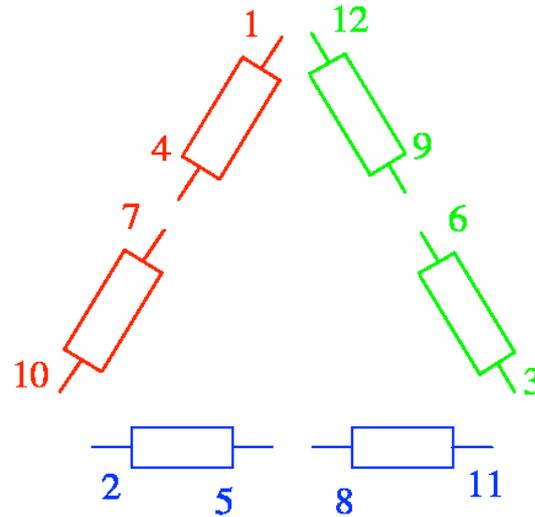


Ligação Y

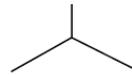
V : tensão nominal de cada bobina

Motor de 12 terminais (6 bobinas)

O número de terminais é **independente** do número de polos!

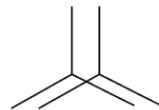


Ligação Δ



Ligação Y

Bobinas em série



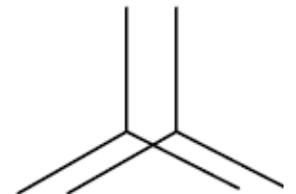
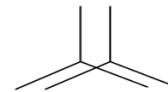
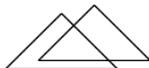
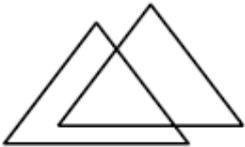
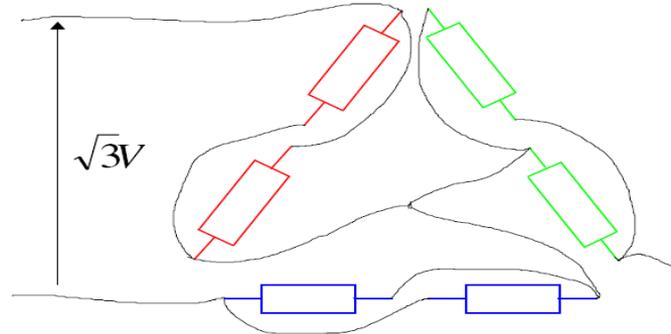
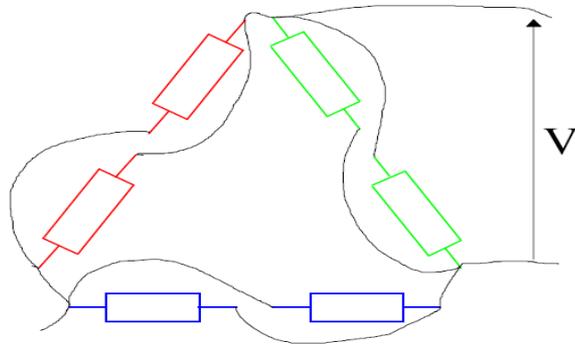
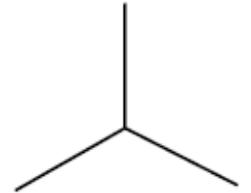
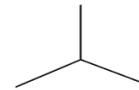
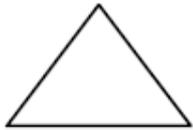
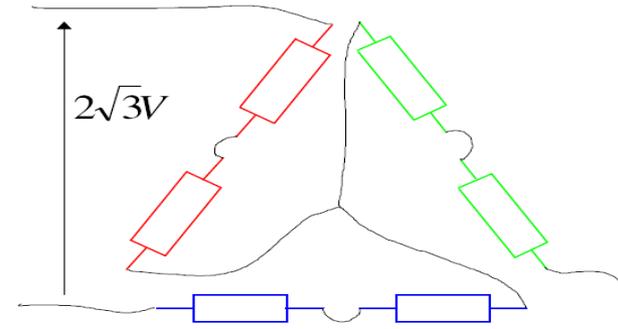
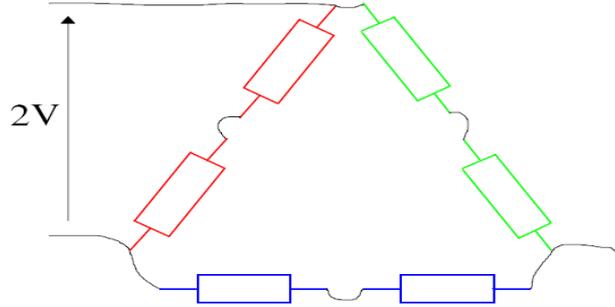
Ligação YY
(dupla estrela)



Ligação $\Delta\Delta$
(duplo triângulo)

Bobinas em paralelo

Ligações do estator



Exemplo 1

Um motor de indução trifásico, alimentado com tensão de 220 V em 50 Hz, gira em vazio a 995 rpm. Pede-se:

- o número de pólos do motor.
- o escorregamento em vazio

Solução:

A determinação do número de pólos é feita por tentativas. em vazio $\omega_R \approx \omega_S$, \therefore calcula-se a velocidade síncrona para os vários valores do número de pólos.

Para $f = 50$ Hz \Rightarrow

Número de pares de pólos	01	02	03	04	05
N_s (rpm.)	3000	1500	1000	750	600

O escorregamento em vazio é dado por:

$$s = \frac{N_s - N_{\text{Rotor}}}{N_s} 100 = \frac{1000 - 995}{1000} 100 = 0,50\%$$



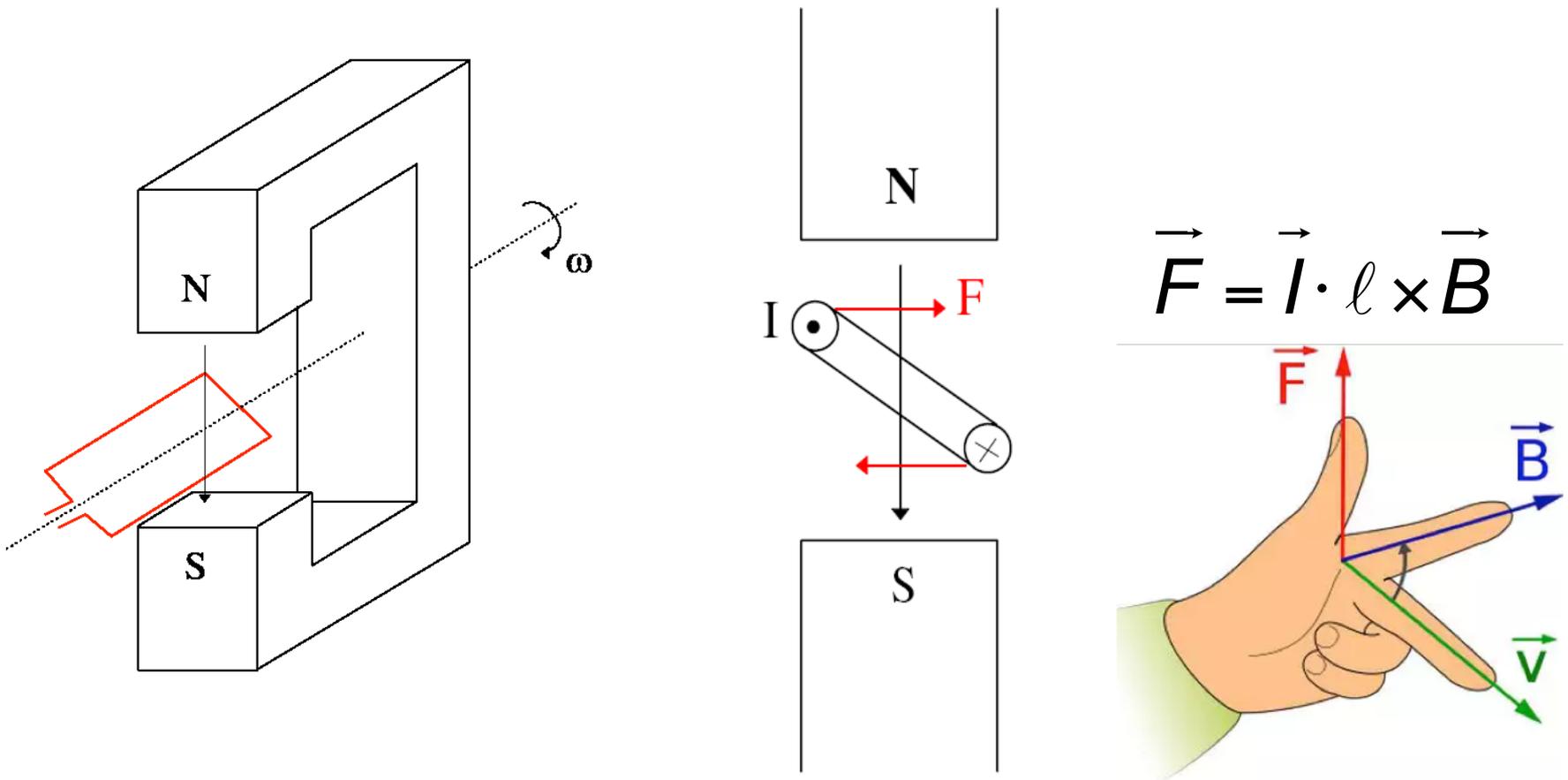
Exercício 3.7

Um motor trifásico de indução, alimentado com tensão nominal na frequência de 60 Hz, fornece conjugado máximo quando $N_{crit} = 720$ rpm. Sabendo-se que, ao acionar uma certa carga mecânica, este motor gira a uma velocidade de 855 rpm, determinar:

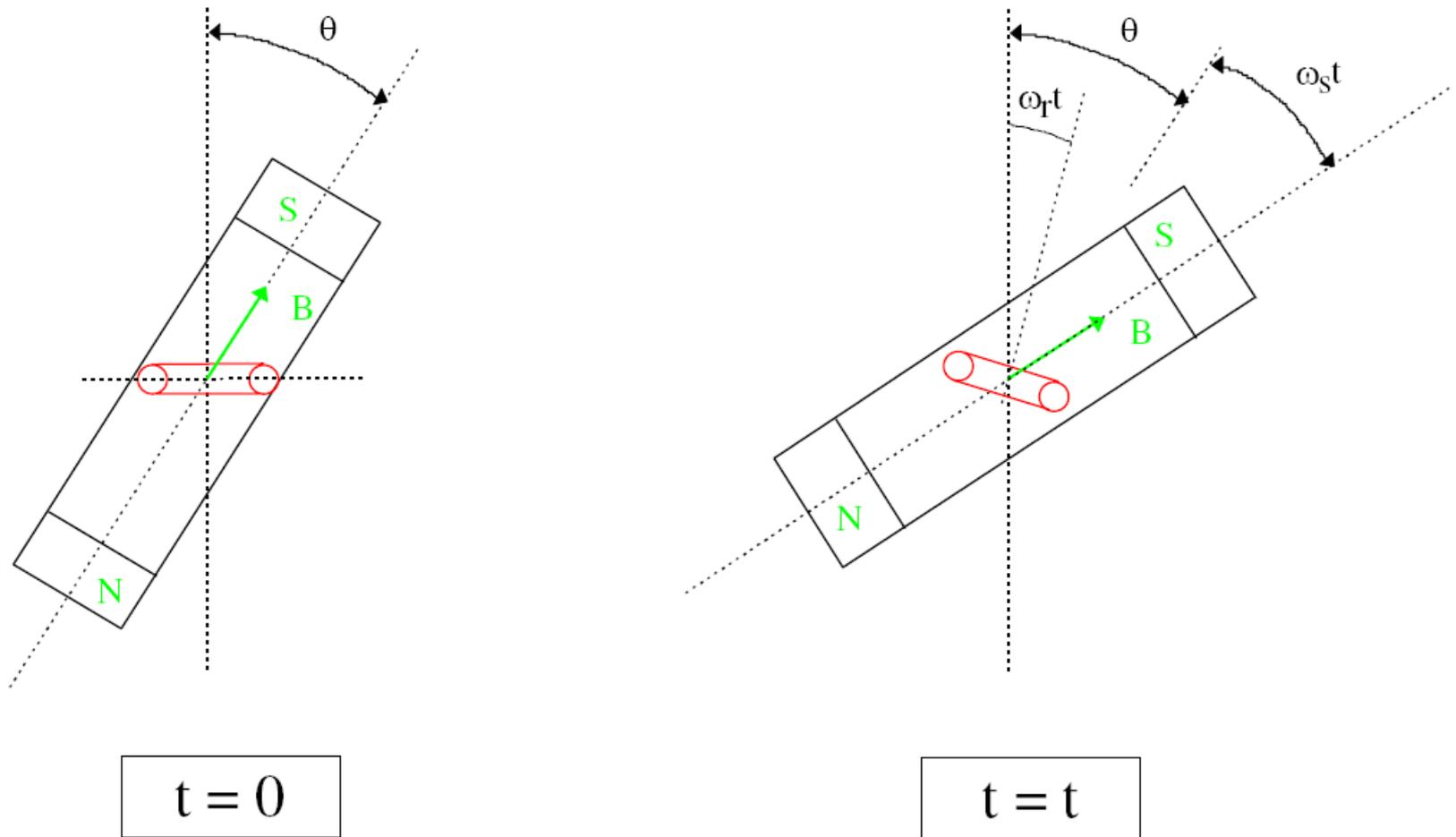
- A velocidade síncrona do motor em rad/s (ω_s);
- O número de pares de pólos (p) do motor;
- O escorregamento (s) nessas condições;
- O que aconteceria ao motor, numa outra condição de equilíbrio (conjugado motor = conjugado de carga) em que $s < 720$ rpm?

PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Espira em curto-circuito imersa em campo girante



Conjugado desenvolvido pelo motor



- O fluxo concatenado com o rotor varia no tempo:
$$\phi = SB_{max} \cos\left[(\omega_s - \omega_r)t + \theta\right] = \phi_{max} \cos\left[(\omega_s - \omega_r)t + \theta\right]$$

Tensão induzida e corrente circulante na espira,
devidos a ϕ variável no tempo:

$$e_2(t) = - \frac{d\phi(t)}{dt} = \phi_{\text{Máx}} (\omega_s - \omega_{\text{Rotor}}) \text{sen} [(\omega_s - \omega_{\text{Rotor}}) t + \theta]$$

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} = E_{\text{max}} \cos [(\omega_s - \omega_r) t + \theta - 90^\circ]$$

$$i = I_{\text{max}} \cos [(\omega_s - \omega_r) t + \theta - 90^\circ - \varphi]$$

Impedância do Rotor:

$$Z_2 = \sqrt{R_2^2 + [(\omega_s - \omega_{\text{Rotor}}) L_2]^2} \quad \text{e} \quad \varphi = \arccos \frac{R_2}{Z_2}$$

$$\omega_s - \omega_{\text{Rotor}} = s \omega_s$$

$$X_2 = \omega_s L_2$$

$$\dot{Z}_2 = Z_2 \angle \varphi_2$$

$$i(t) = \frac{e_2(t)}{\dot{Z}_2}$$

$$i(t) = \frac{s \omega_s \phi_{Máx}}{Z_2} \text{sen}(s \omega_s t + \theta - \varphi_2) = \frac{s \omega_s \phi_{Máx}}{Z_2} \text{sen}(s \omega_s t + \theta')$$

$$i = I_{max} \cos\left[(\omega_s - \omega_r)t + \theta - 90^\circ - \varphi\right]$$

Força atuante na espira, resultado da interação entre a indução B e a corrente i :

$$F = |\vec{F}| = |\vec{B}| \cdot i \cdot \ell \text{ (ângulo entre } \vec{B} \text{ e } i = 90^\circ)$$

$$F = B \cdot \ell \cdot I_{max} \cos\left[(\omega_s - \omega_r)t + \theta - 90^\circ - \varphi\right]$$

$$|\vec{F}| = |\vec{B}| \ell i(t) = B_{Máx} \ell \frac{s \omega_s \phi_{Máx}}{Z_2} \text{sen}(s \omega_s t + \theta')$$

Demonstra-se que o conjugado médio é dado por:

$$C_{medio} = \frac{s \omega_s \phi_{max}^2}{Z} \cos \varphi$$

$$com \quad Z = \sqrt{R^2 + s^2 X^2} \quad ; \quad X = \omega_s L$$

Expressão final do conjugado:

$$C(V, s, R) = KV^2 \frac{sR}{R^2 + s^2 X^2}$$

Análise da curva de conjugado

a) rotação síncrona: $s = 0$ e $C = 0$

b) partida: $s = 1$ e $C_p(V, R) = KV^2 \frac{R}{R^2 + X^2}$

c) conjugado máximo:

$$\frac{dC}{ds} = 0 \Rightarrow C_{max} = \frac{KV^2}{2X} \quad (\text{independe de } R)$$

$$s_{Cmax} = \frac{R}{X}$$

Análise da curva de conjugado

$$C(V, s, R) = KV^2 \frac{sR}{R^2 + s^2 X^2}$$

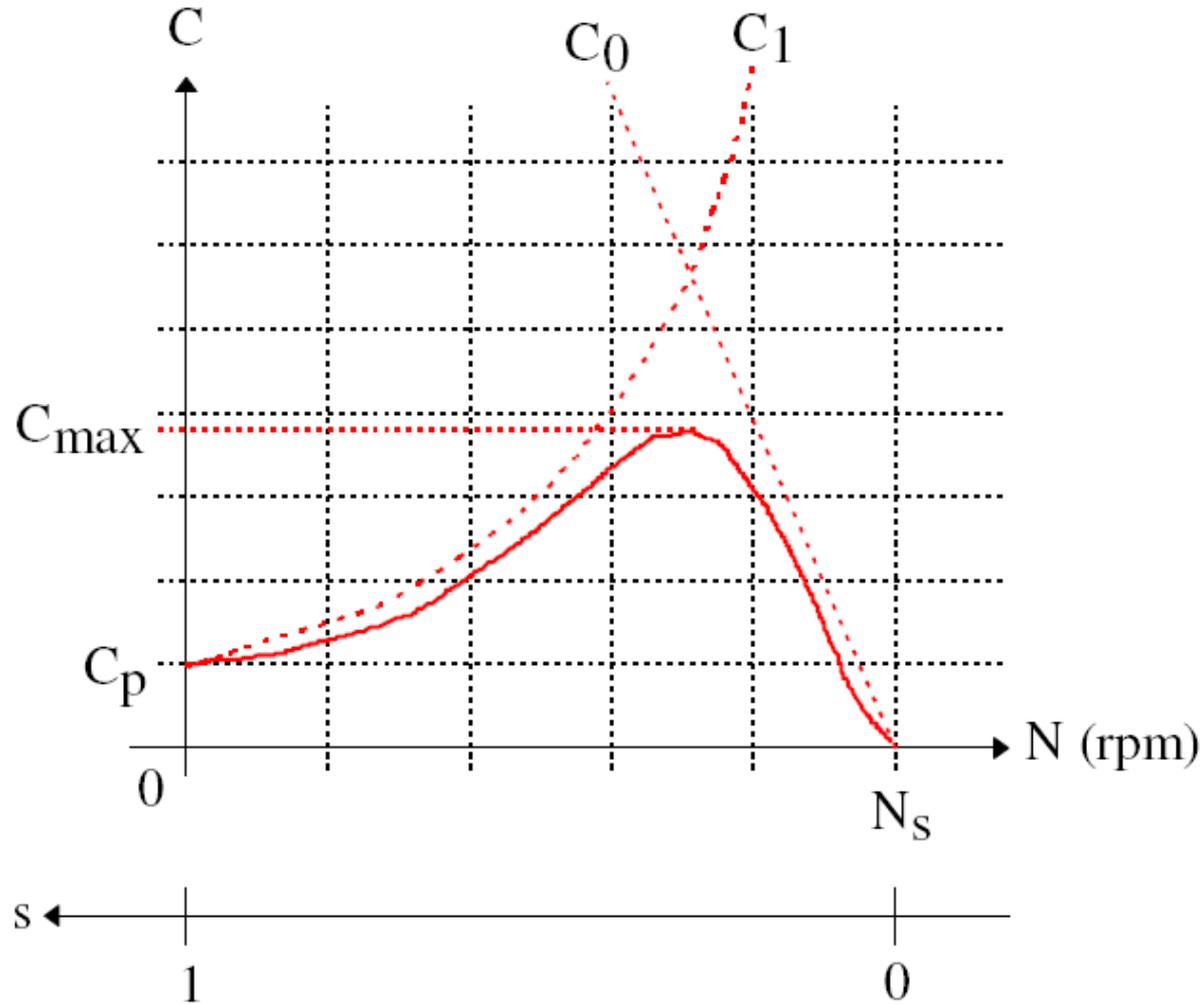
d) s próximo de 1: $R^2 \ll s^2 X^2$

$$\therefore C_1 \cong KV^2 \frac{R}{sX^2}$$

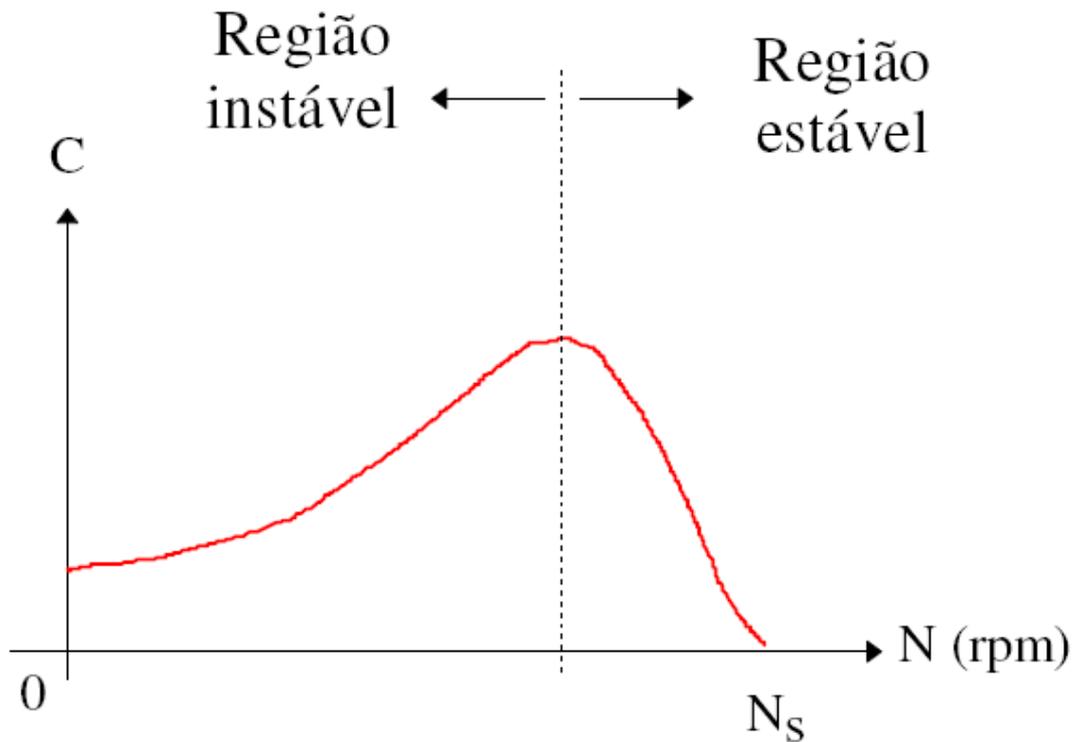
e) s próximo de 0: $R^2 \gg s^2 X^2$

$$\therefore C_0 \cong KV^2 \frac{s}{R}$$

Curva do Conjugado em função do escorregamento



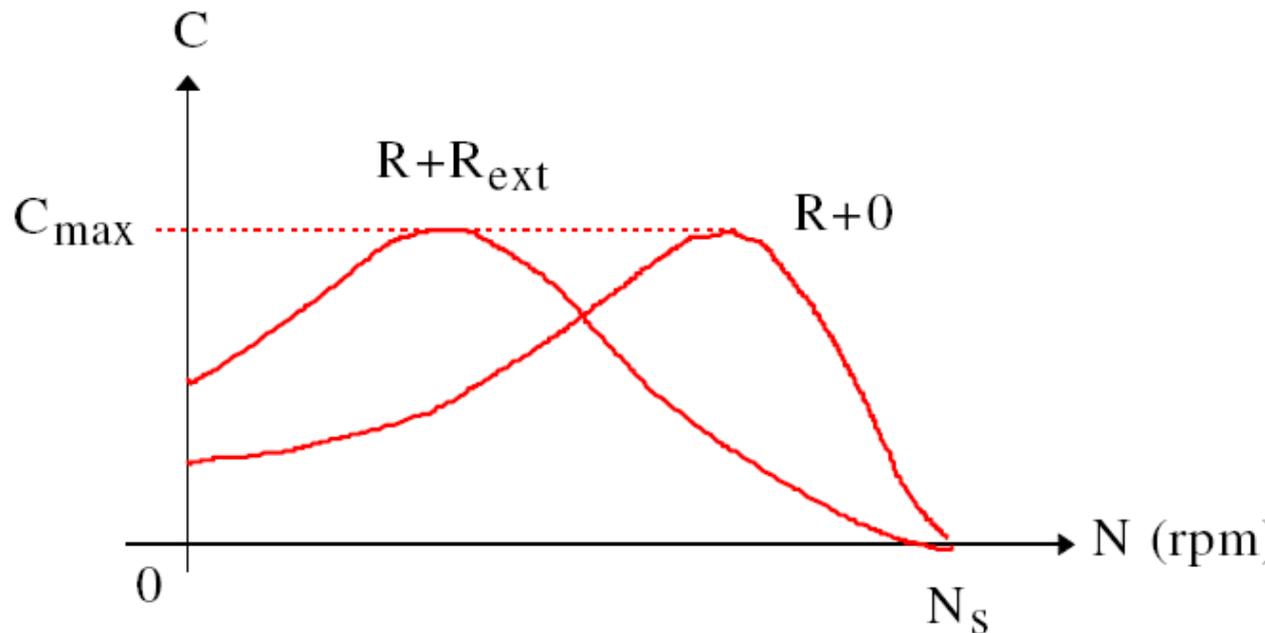
Estabilidade de operação



Variação de C com R

$$C_{max} = \frac{KV^2}{2X} \quad (\text{independe de } R)$$

$$C_p(V, R) = KV^2 \frac{R}{R^2 + X^2}$$



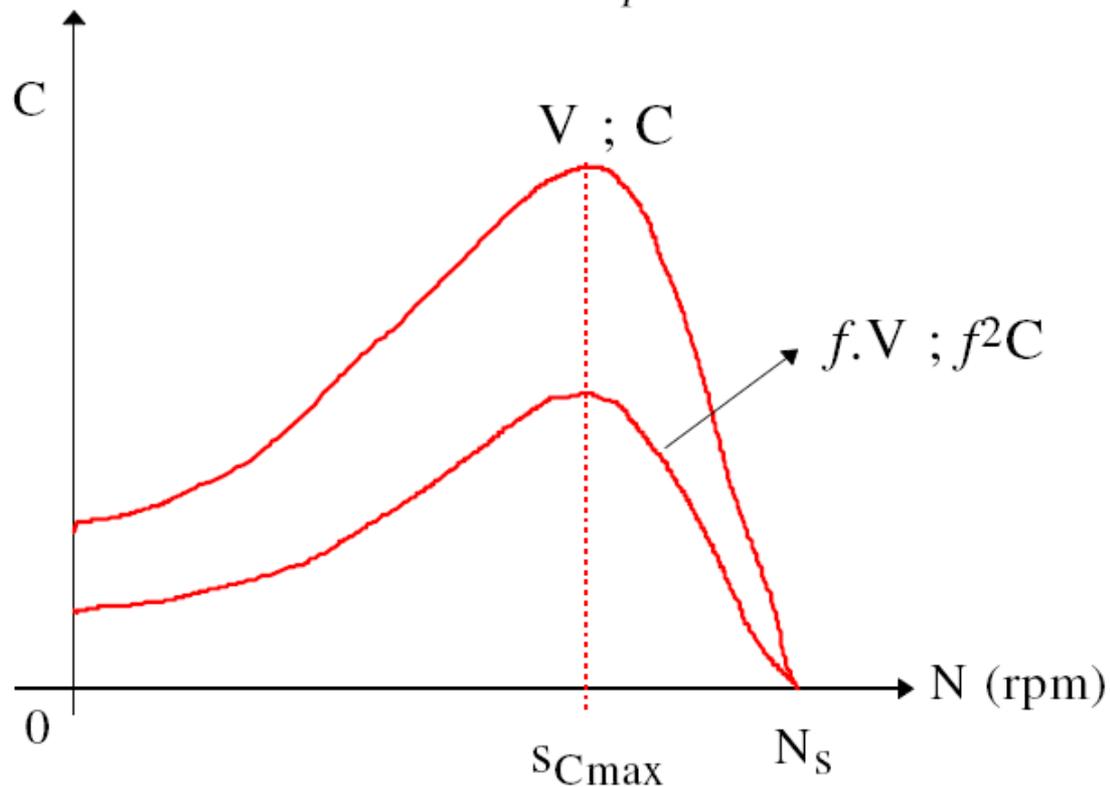
Inserindo-se resistência externa R_{ext} no rotor :

- $C_{max} = \text{constante}$
- $s_{C_{max}}$ aumenta
- C_p aumenta

Variação de C com V

$$C_{max} = \frac{KV^2}{2X} ; s_{Cmax} = \frac{R}{X}$$

$$C_p(V, R) = KV^2 \frac{R}{R^2 + X^2}$$



Multiplicando-se a tensão de alimentação por um fator f :

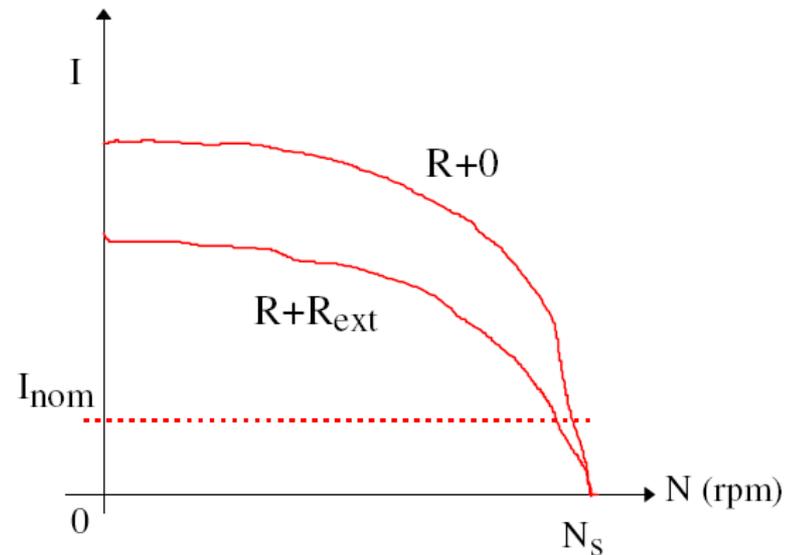
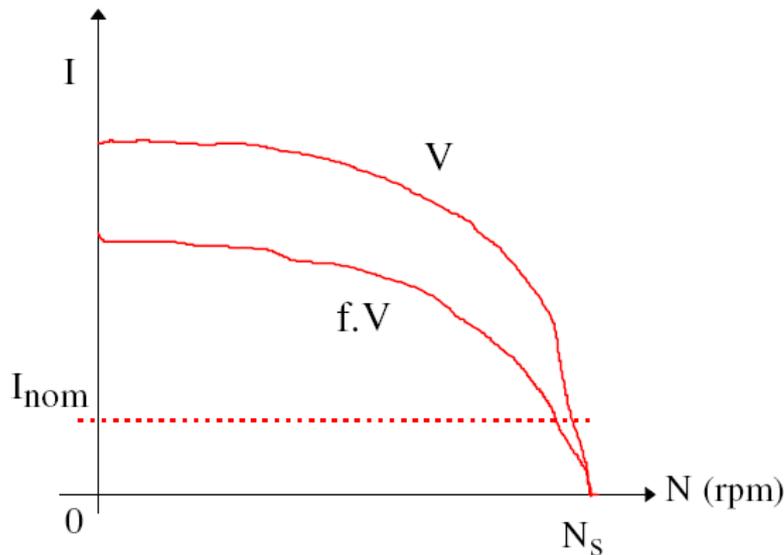
- o conjugado é multiplicado pelo fator f^2 em toda a faixa (inclusive C_{max} e C_p)

- $s_{Cmax} = \text{constante}$

Corrente absorvida pelo motor

Demonstra-se que a corrente absorvida pelo **estator** é dada por:

$$I_{abs} = K' \frac{sV}{\sqrt{R^2 + s^2 X^2}}$$

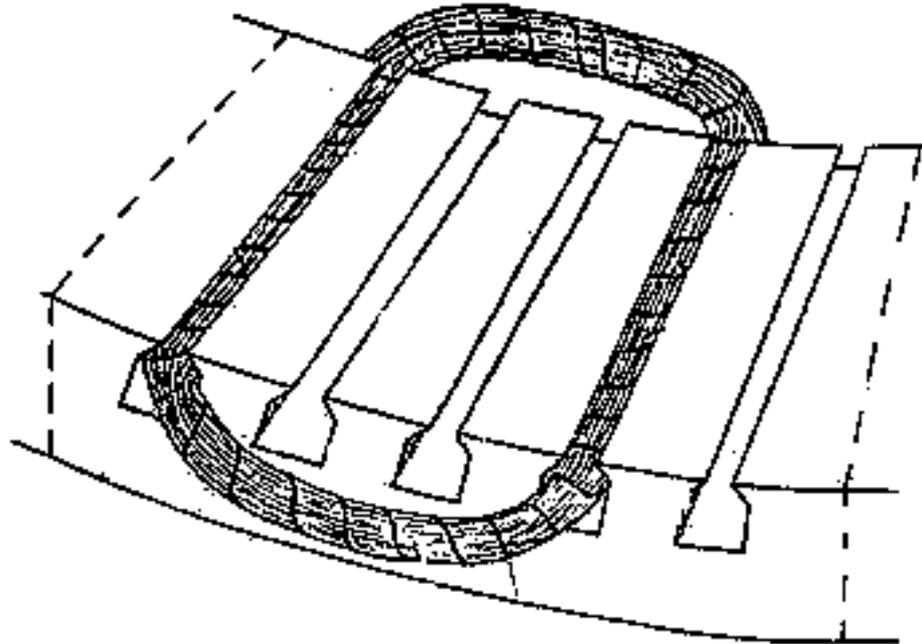


- a corrente varia proporcionalmente com a tensão de alimentação
- aumentando-se R_{ext} , a corrente absorvida **diminui**

Detalhes Construtivos

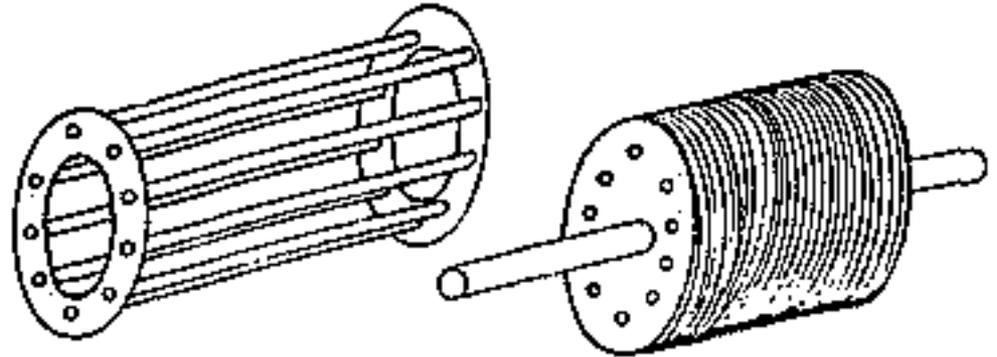
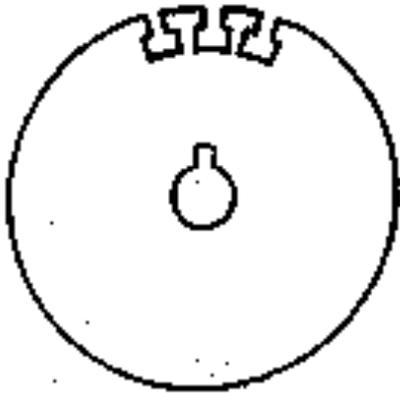
Estator – Núcleo de material ferromagnético constituído por um conjunto de Lâminas com o formato de uma coroa circular, justapostas. No diâmetro interno são executados entalhes, equidistantes (“canais”) onde se alojam os condutores

Estator – Enrolamentos (bobinas) do rotor geralmente em cobre e raramente alumínio, são enroladas e posteriormente colocadas nos canais. Após colocação são feitas as ligações (internas e externas). Podem ser interconectadas em série ou paralelo ou, ainda, em combinação de elementos em série com elementos em paralelo.

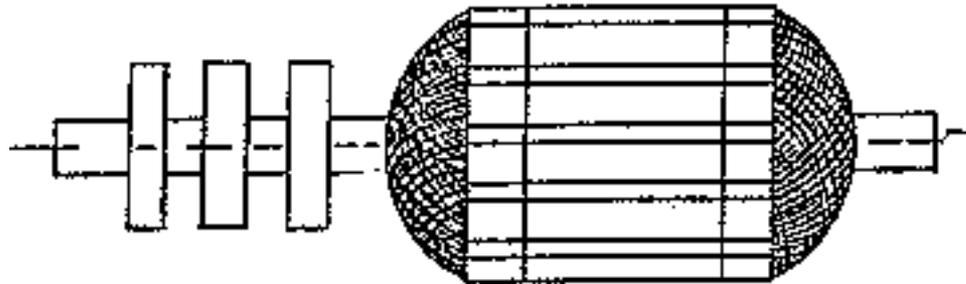


Detalhes Construtivos

Rotor - Tal como o estator, é constituído por um conjunto de lâminas de ferro com baixo teor de silício. As lâminas são coroas circulares com uma série de canais equidistantes situados na circunferência externa. O conjunto de lâminas é mantido comprimido por meio de anéis e é fixado ao eixo por meio de uma chaveta.



Rotor em gaiola



Rotor bobinado

Circuito equivalente do motor

$$\dot{V}_1 = (R_1 + jX_1) \dot{I}_{01} + \dot{E}_1$$

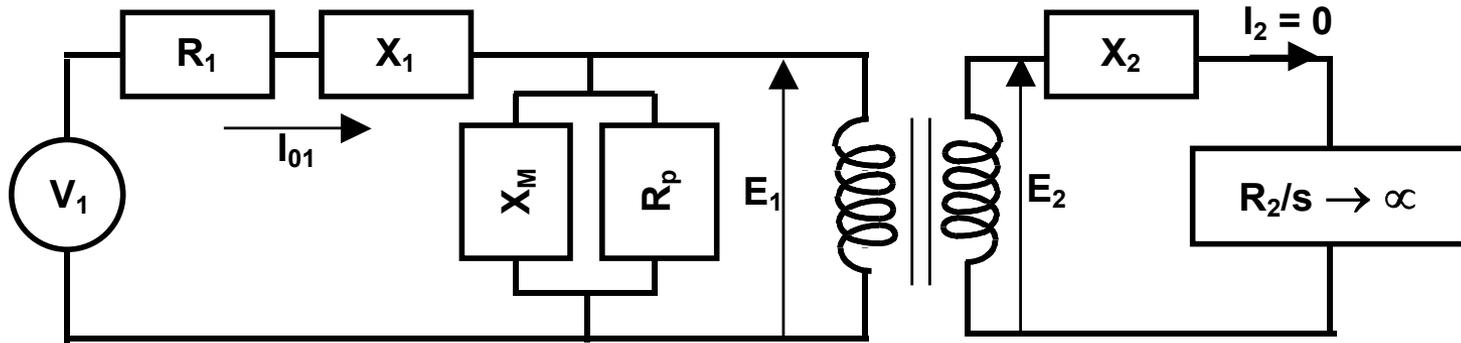


Figura 7.22 – Circuito equivalente do motor em vazio

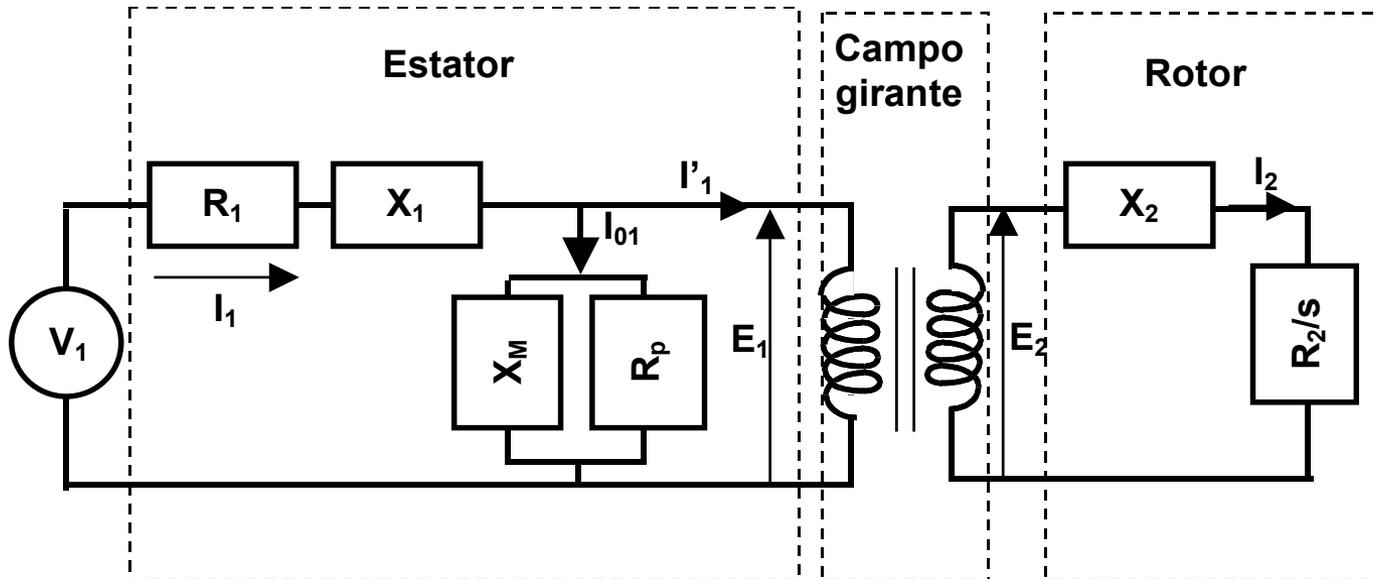


Figura. 7.23 – Circuito equivalente do motor em carga

Problemas associados à partida de motores

- correntes elevadas durante a partida (5 a 10 vezes a corrente nominal)
- rotor parado \Leftrightarrow motor em curto-circuito (não há conversão de energia)
- interferência com o sistema de proteção
- o conjugado de partida pode não ser suficiente para acelerar a carga mecânica \Rightarrow o motor não parte
- é necessário utilizar métodos de partida para reduzir a corrente mantendo o conjugado de partida do motor \geq o necessário para atender a necessidade de partida da carga.

Exemplo 7.3

Pede-se determinar a curva da corrente absorvida por um motor trifásico, com rotor bobinado, de dois pólos, em função de seu escorregamento. São dados:

- Ligação dos enrolamentos: estator em triângulo e rotor em estrela;
- Tensão de alimentação do motor: 220 V, 60 Hz;
- Relação de espiras do transformador ideal: $N_1 = 220$ e $N_2 = 160$;
- Impedância do rotor: $0,25 + j 0,46 \Omega$;
- Ramo de perdas em vazio: $R_p = 131,5 \Omega$ e $X_m = 18,5 \Omega$;
- Impedância do rotor: $R_2 = 0,115 \Omega$ e $X_2 = 0,212 \Omega$

Solução Simplificada

Desprezando-se a dispersão de fluxo nas cabeças das bobinas, $X_1 = 0$, a resistência ôhmica do enrolamento do estator, $R_1 = 0$, e o ramo de magnetização, $I_{01} = 0$, a tensão no rotor é dada por:

$$E_1 = V_1 = 220 \text{ V} \quad \text{e} \quad E_2 = E_1 \frac{N_2}{N_1} = 220 \frac{160}{220} = 160 \text{ V}$$

A corrente do rotor, em função do escorregamento, é dada por:

$$I_2 = \frac{N_2}{N_1} \frac{E_1}{\sqrt{\frac{R_2^2}{s^2} + X_2^2}} = \frac{220}{\sqrt{\frac{0,115^2}{s^2} + 0,212^2}} \text{ A}$$

A corrente no estator é dada por:

$$I_1 = I_2 \frac{N_2}{N_1} \quad \text{ou} \quad I_1 = \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^2 \frac{E_1}{\sqrt{\frac{R_2^2}{s^2} + X_2^2}} = \frac{0,528926 \times 220}{\sqrt{\frac{0,115^2}{s^2} + 0,212^2}} = \frac{116.3636}{\sqrt{\frac{0,115^2}{s^2} + 0,212^2}} \text{ A}$$

Calculando-se o valor da corrente para s variável de 1 a 0, que corresponde a velocidade do rotor de 0 até 3600 rpm obtém-se a curva da Figura.7.25.

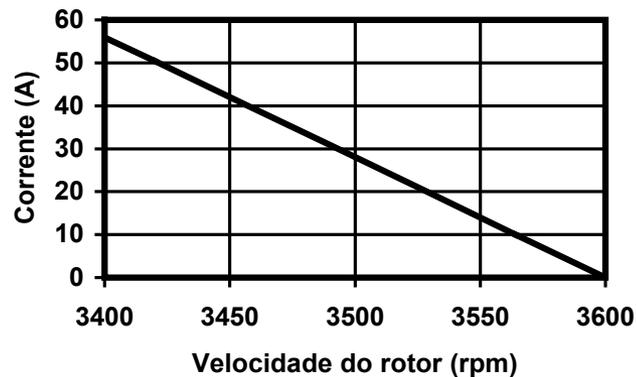
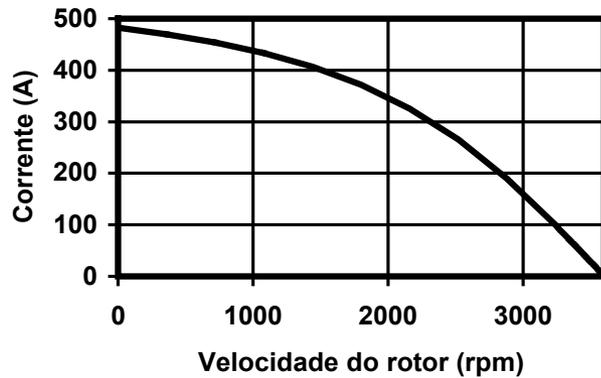


Figura. 7.25 – Corrente absorvida pelo motor

Parei aqui

