

Escola Superior de Tecnologia de Viseu

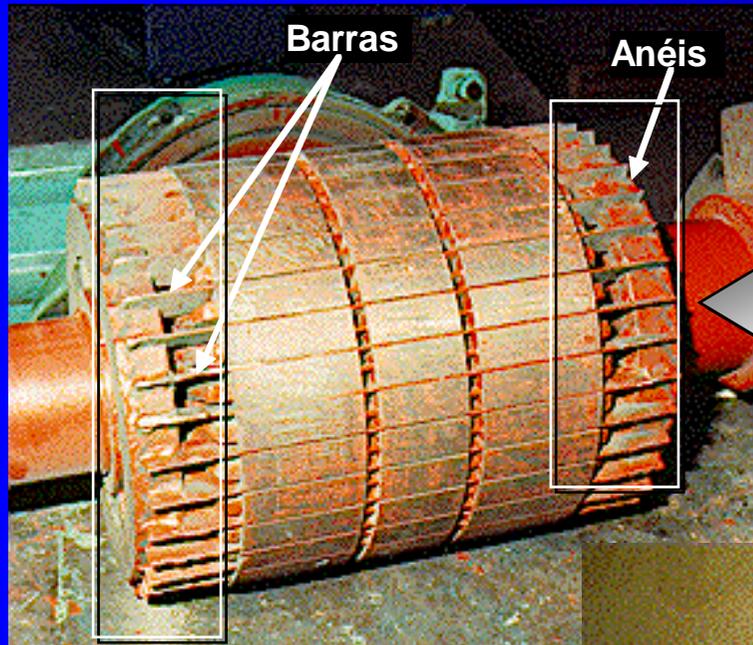
A máquina assíncrona

Departamento de Engenharia Electrotécnica

Aspectos construtivos: generalidades



Aspectos construtivos: rótor

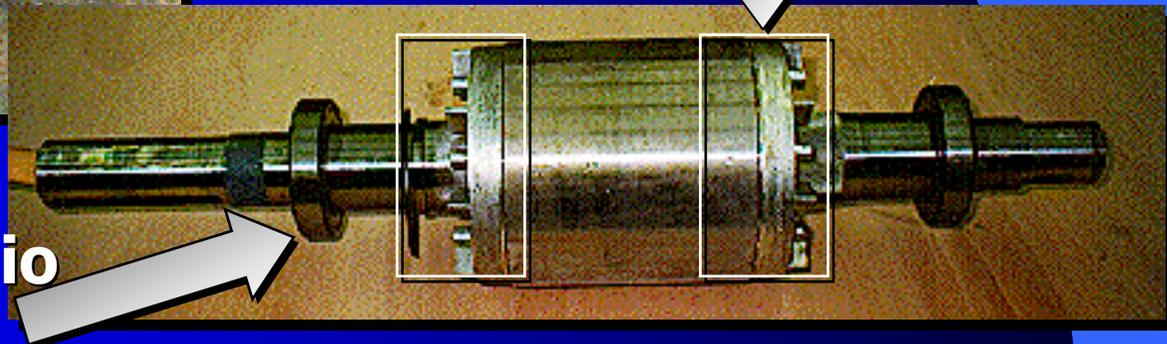


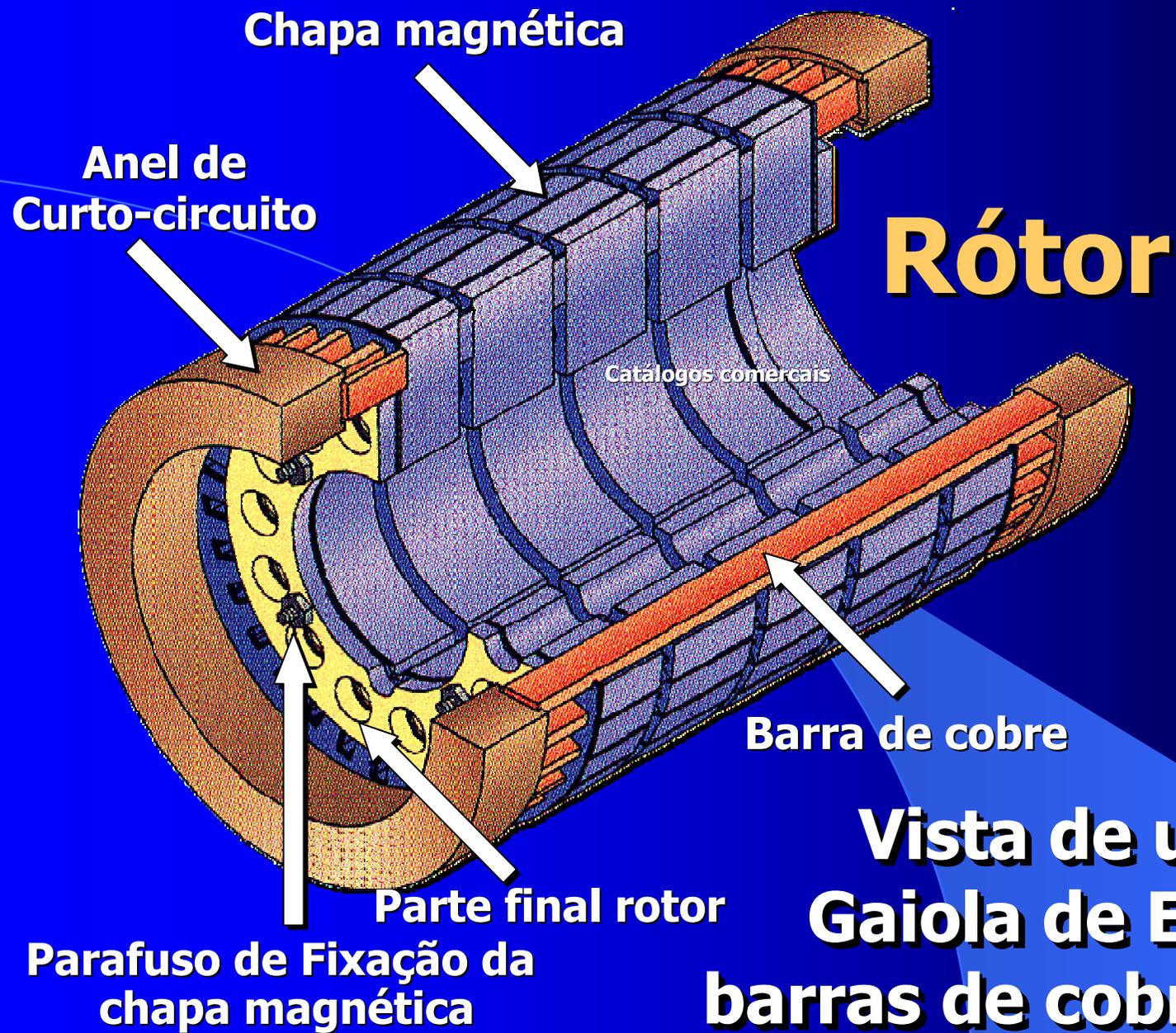
Fotografías das oficinas de reparación da ABB - Gijón

Rótor de anéis
Soldados

Anéis

Rótor de alumínio
Fundido

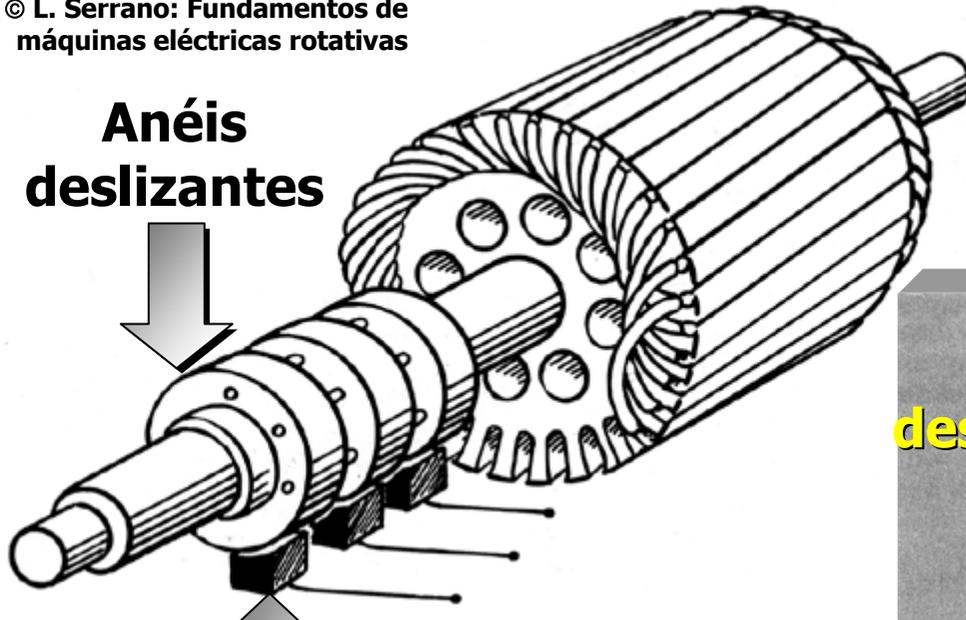




Rótor bobinado: Colector de anéis

© L. Serrano: Fundamentos de máquinas eléctricas rotativas

Anéis
deslizantes



Escovas

O rotor é curto-circuitado pelo exterior através das escovas e dos anéis deslizantes

Anéis
deslizantes

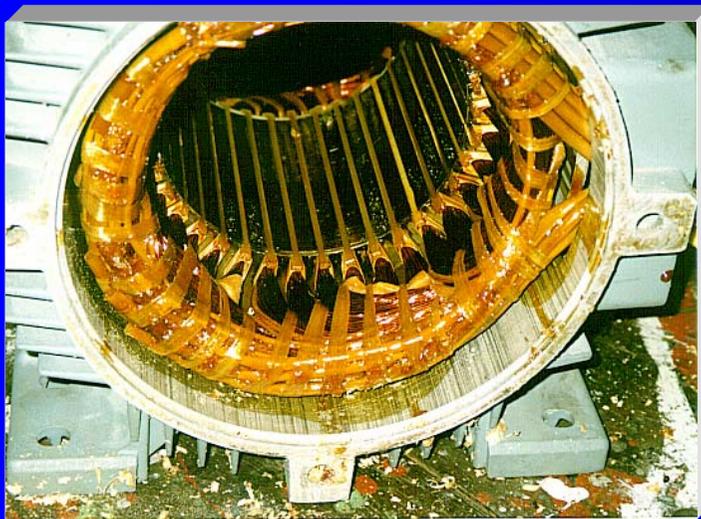


© L. Serrano: Fundamentos de máquinas eléctricas rotativas

Aspectos construtivos: estátor

Evitar contacto entre
condutores a diferente
tensão

Fotografias das oficinas de reparação
da ABB - Gijón



ENROLAMENTO DE FIO
Tensão < 600V

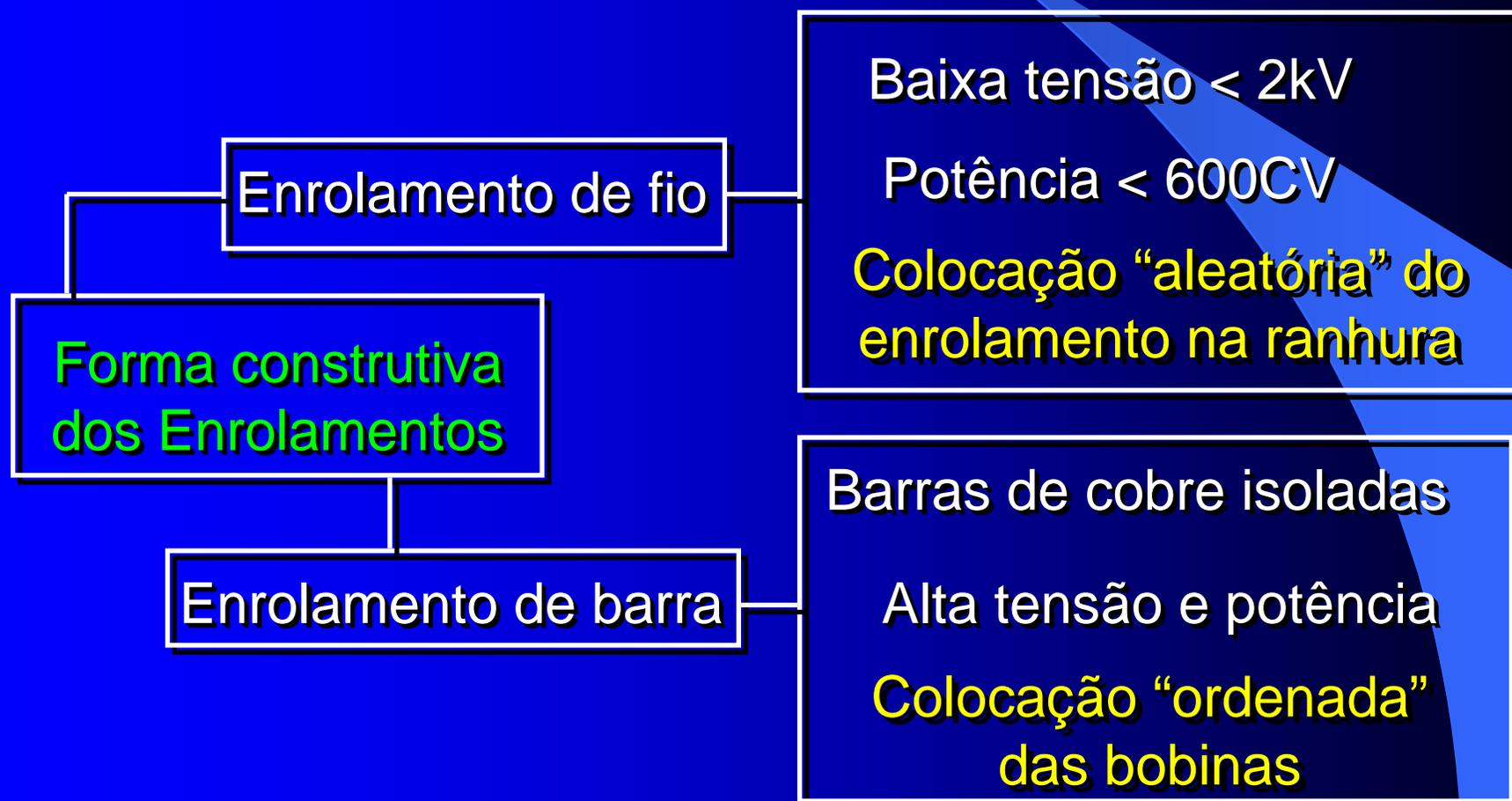


Fotografias das oficinas de reparação
da ABB - Gijón

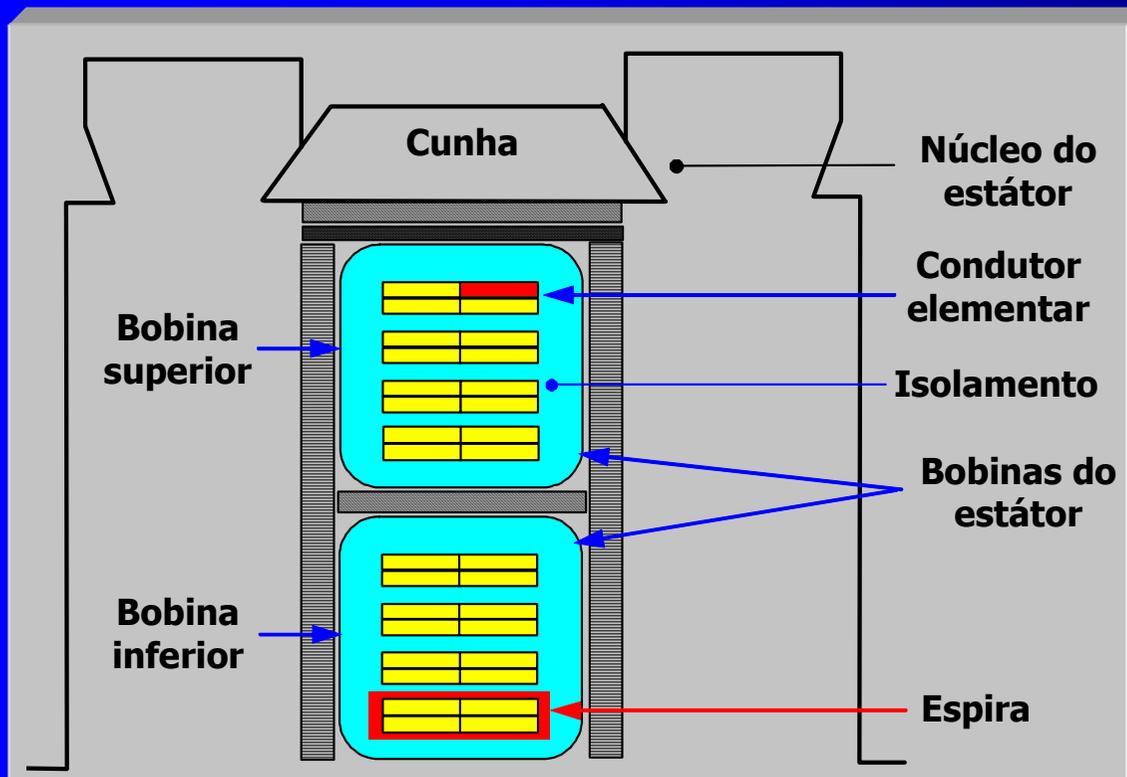
ENROLAMENTO PRE-FORMADO
Tensão > 2300V

Os materiais empregues nos
isolamentos são em geral de tipo
orgânico

Diferenças entre enrolamentos de fio e pré-formados



isolamento estatórico em motores com enrolamentos pré-formados



Habitualmente colocam-se duas bobinas por ranhura.

Cada espira pode estar constituída por vários condutores elementares

O isolamento entre condutores elementares é diferente do isolamento para a massa.

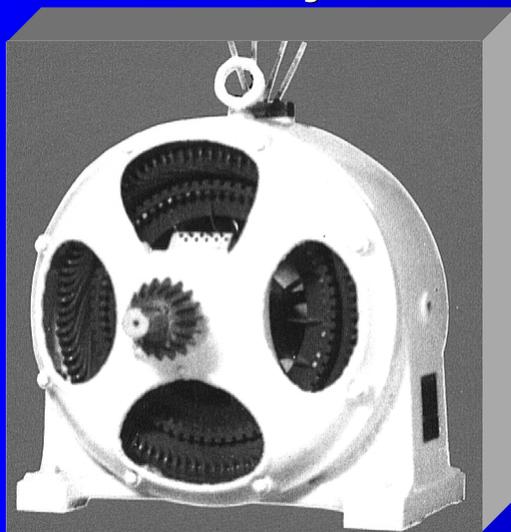
isolamento estatórico em motores com enrolamentos pré-formados

- MURO ISOLANTE: elemento de maior espessura que separa o conjunto da bobina do exterior. Deve estar dimensionado para suportar a tensão correspondente ao nível de isolamento da máquina.
- ISOLAMENTO ENTRE ESPIRAS E CONDUTORES ELEMENTARES: As espiras podem estar formadas por condutores individuais para reduzir as perdas. É necessário que exista isolamento entre elas e entre os condutores que as formam.
- CINTAS E COBERTURAS DE PROTECCÃO: utilizam-se cintas e coberturas protectoras para proteger as bobinas nas zonas da ranhura.

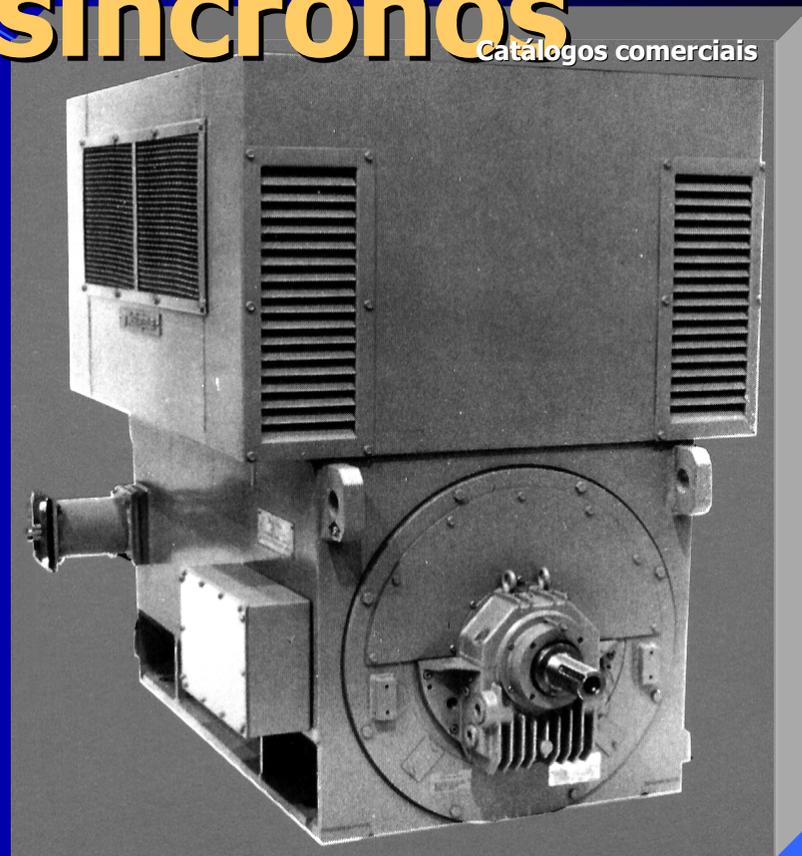
Aspecto físico dos motores assíncronos

Catálogos comerciais

Catálogos comerciais

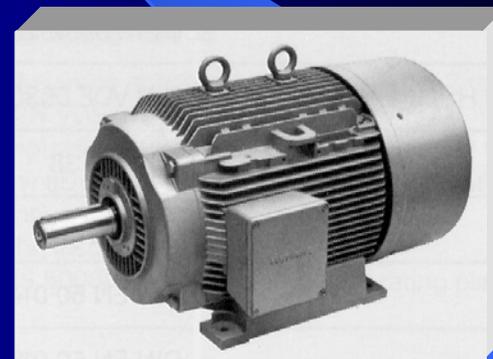
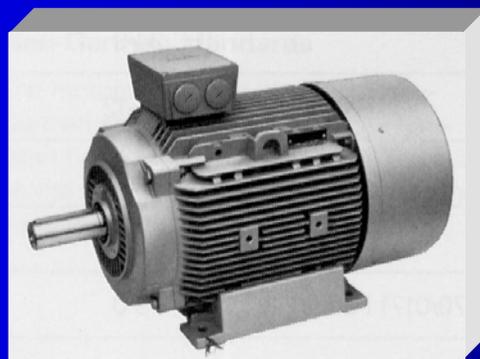
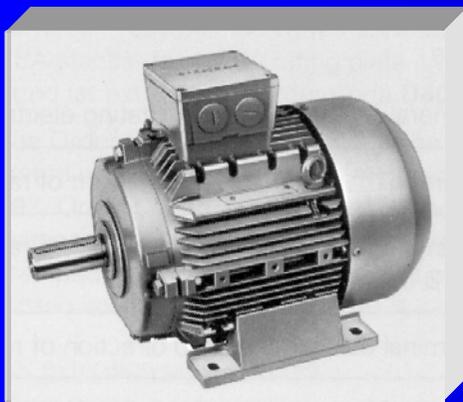
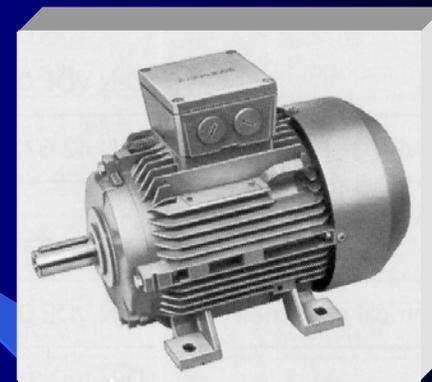


Motor de 25kW, 200V para o accionamento de uma bomba. Fabricado em Pittsburg pela Westinghouse em 1900 e em funcionamento até 1978

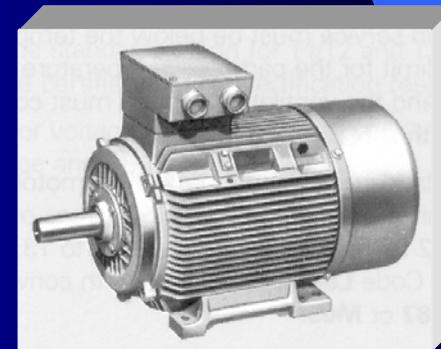
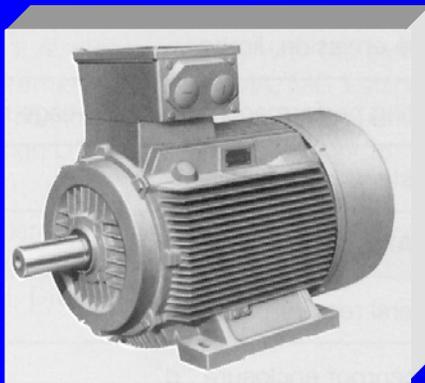


Motor de inducção de 1000 kW, 4 kV e 3600 RPM para o accionamento de um compressor. Fabricado pela Westinghouse actualmente

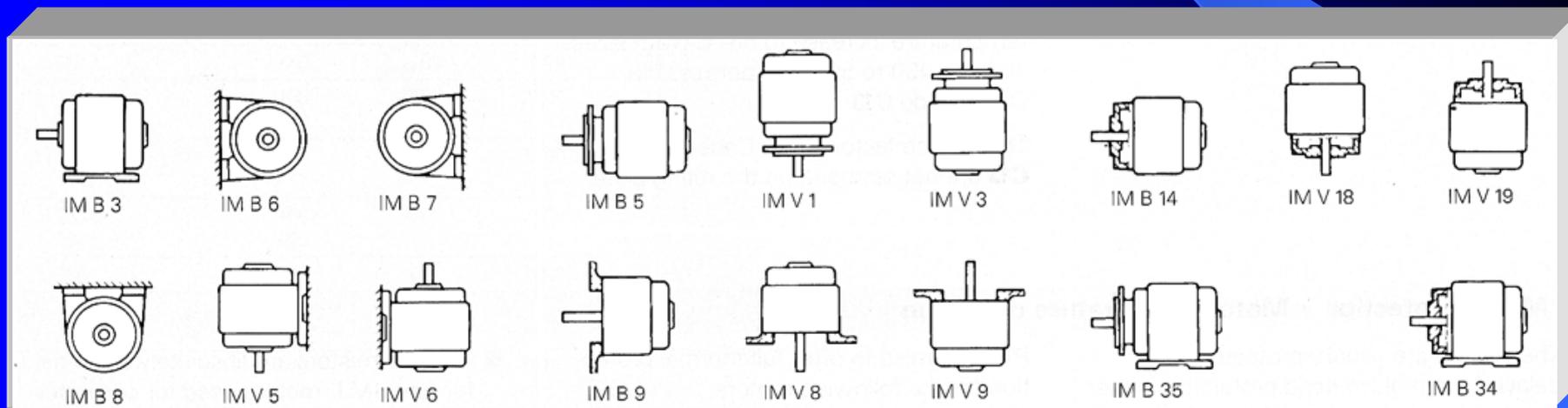
Aspecto físico: motores de BT



Catálogos comerciais

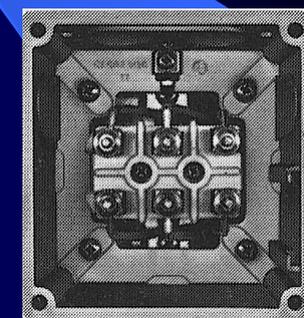
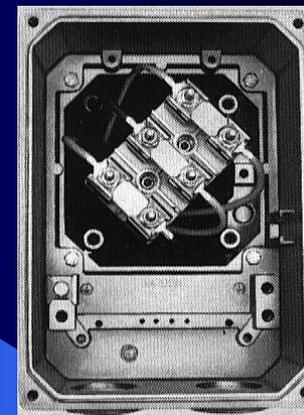
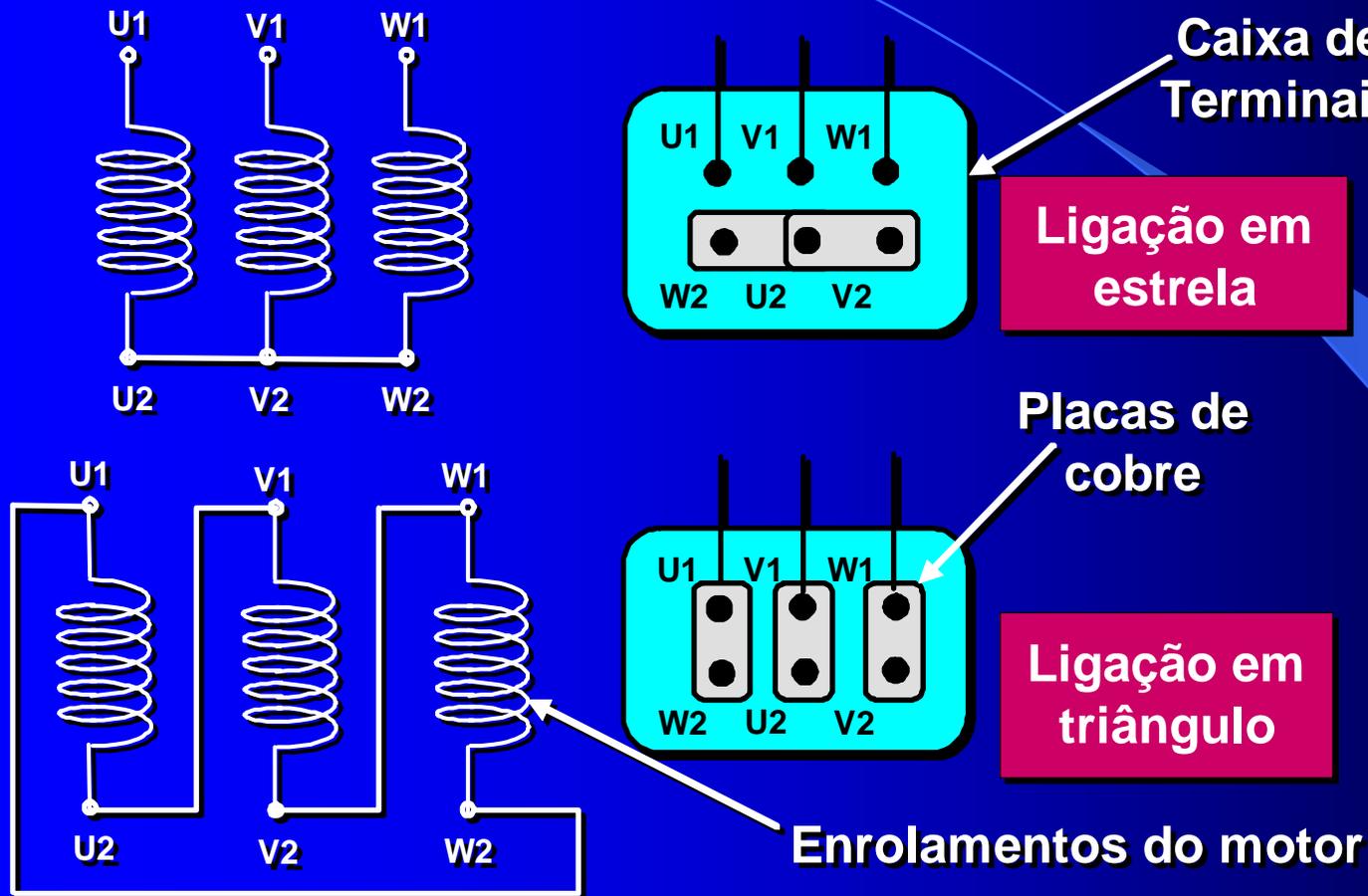


Aspecto físico: formas constructivas normalizadas



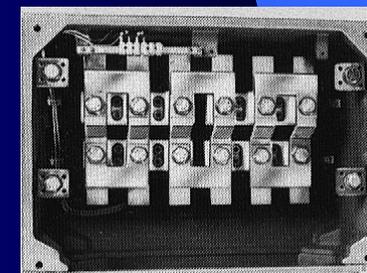
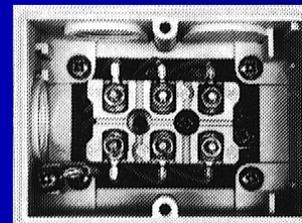
Catálogos comerciais

Ligação dos enrolamentos



Caixas de terminais

Catálogos comerciais



Vista em corte de um motor de MT

Reforços da carcassa

Catálogos comerciais

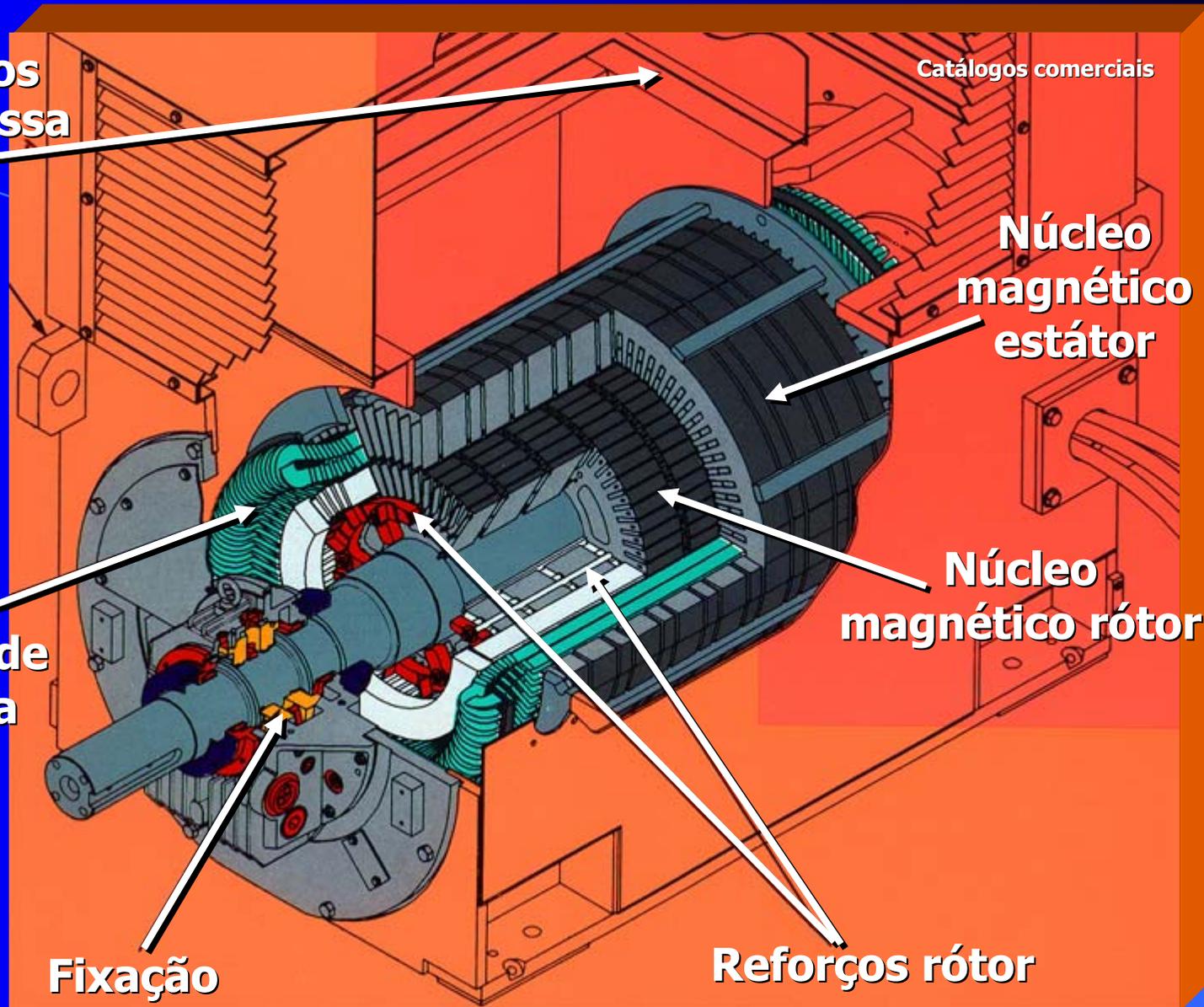
Núcleo magnético estátor

Núcleo magnético rotor

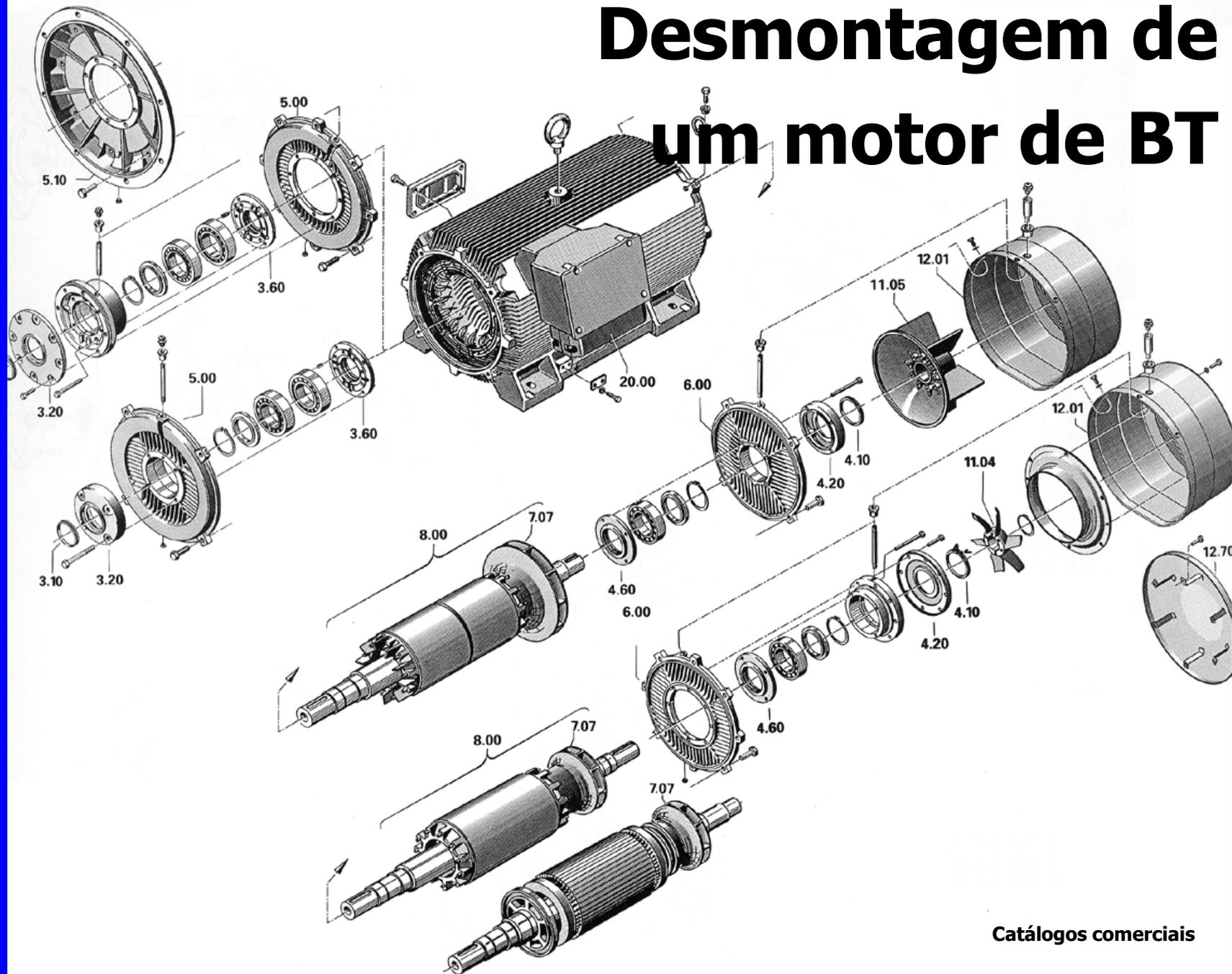
Testas de bobina

Fixação rolamentos

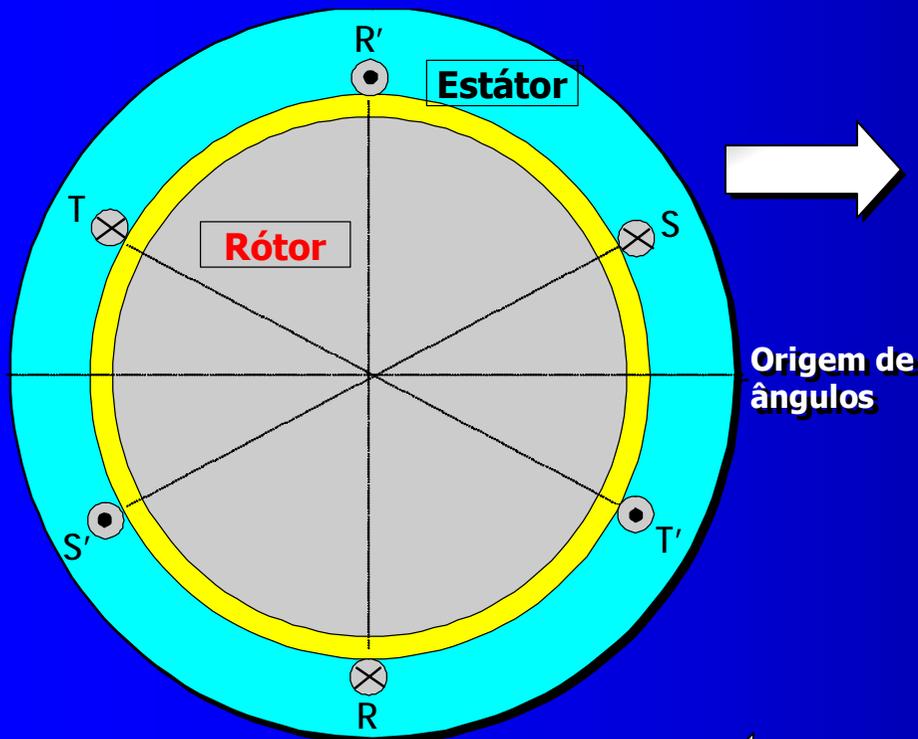
Reforços rotor



Desmontagem de um motor de BT



Princípio de funcionamento



O ESTÁTOR DUM MOTOR ASSÍNCRONO ESTÁ FORMADO POR 3 ENROLAMENTOS SEPARADOS NO ESPAÇO DE 120° . Na figura apenas se representa uma espira de cada um dos enrolamentos (RR' , SS' , TT')

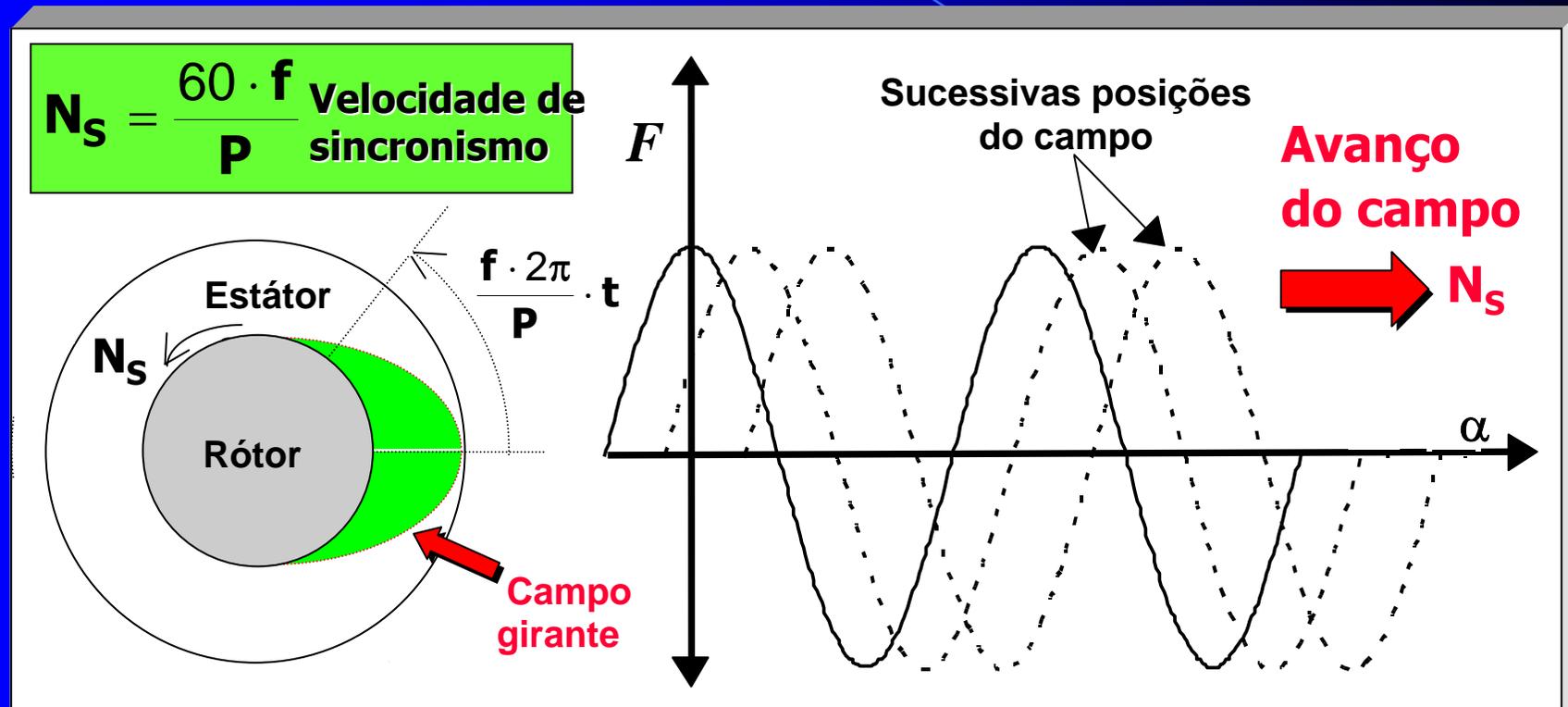
OS 3 ENROLAMENTOS SÃO ALIMENTADOS POR UM SISTEMA TRIFÁSICO DE TENSÕES. LOGO, AS CORRENTES QUE CIRCULAM NAS ESPIRAS SÃO SINUSOIDAIS E ESTÃO DESFASADAS DE 120°

$$I_R = I_{\max} \cdot \cos(\omega_1 \cdot t)$$

$$I_S = I_{\max} \cdot \cos(\omega_1 \cdot t - 120^\circ)$$

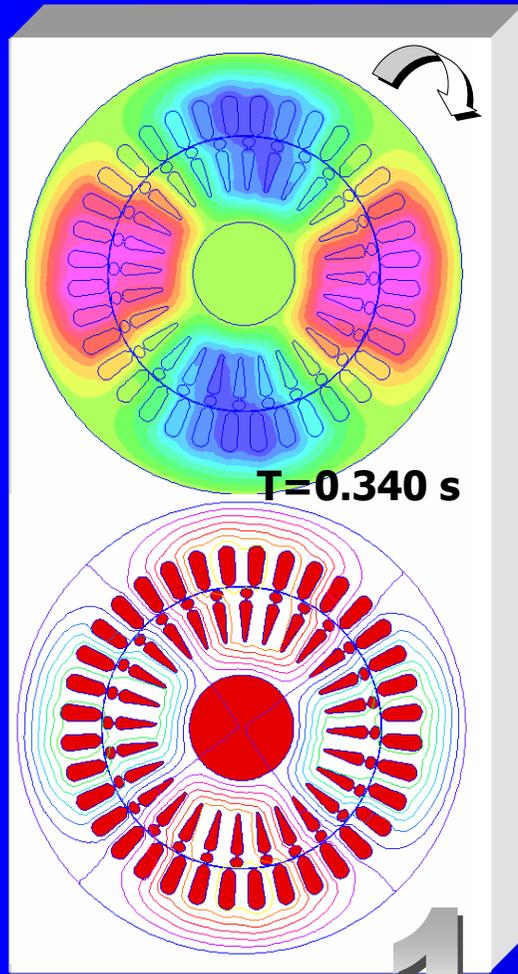
$$I_T = I_{\max} \cdot \cos(\omega_1 \cdot t + 120^\circ)$$

Princípio de funcionamento

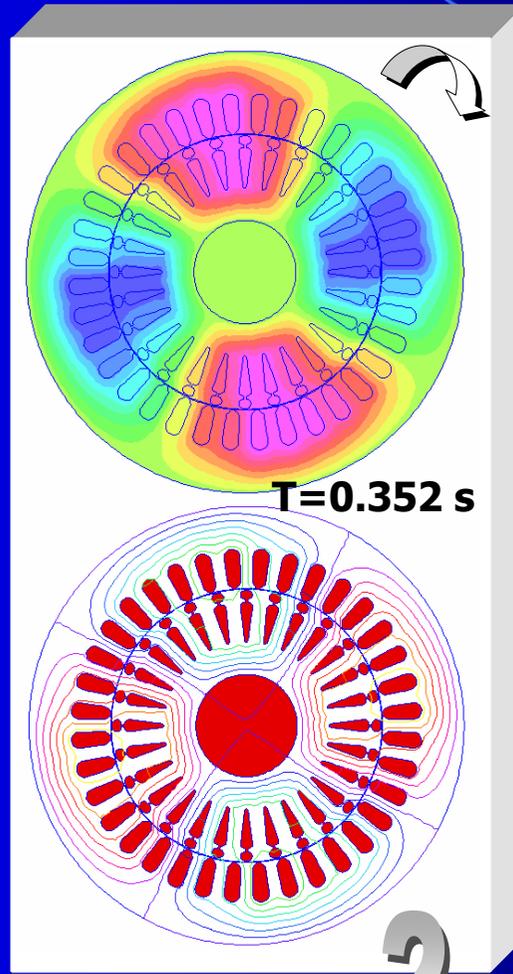


O campo magnético resultante das três correntes de fase é um campo que roda no espaço a $60 \cdot f / P$ RPM. Onde P é o número de pares de pólos do estátor (depende da forma de ligação das bobinas que o formam) e f a frequência da rede.

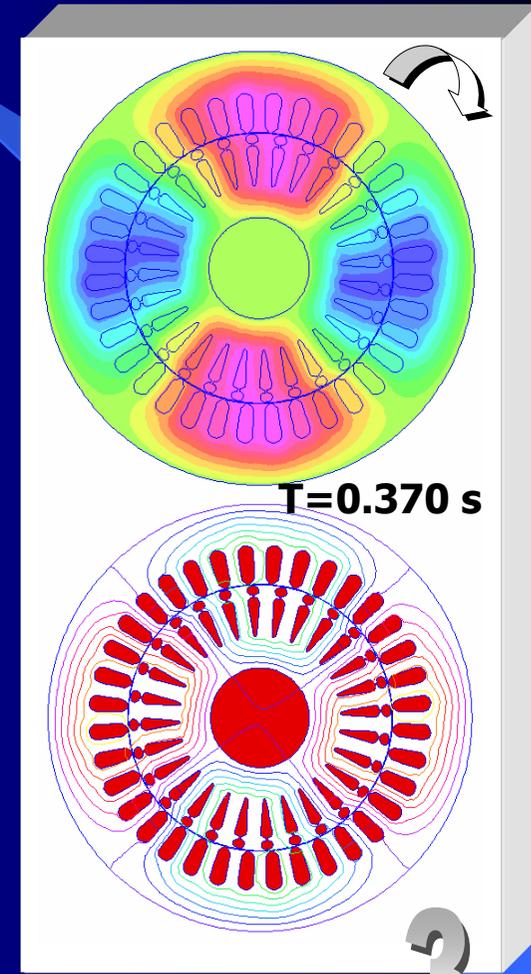
Princípio de funcionamento: simulação



1



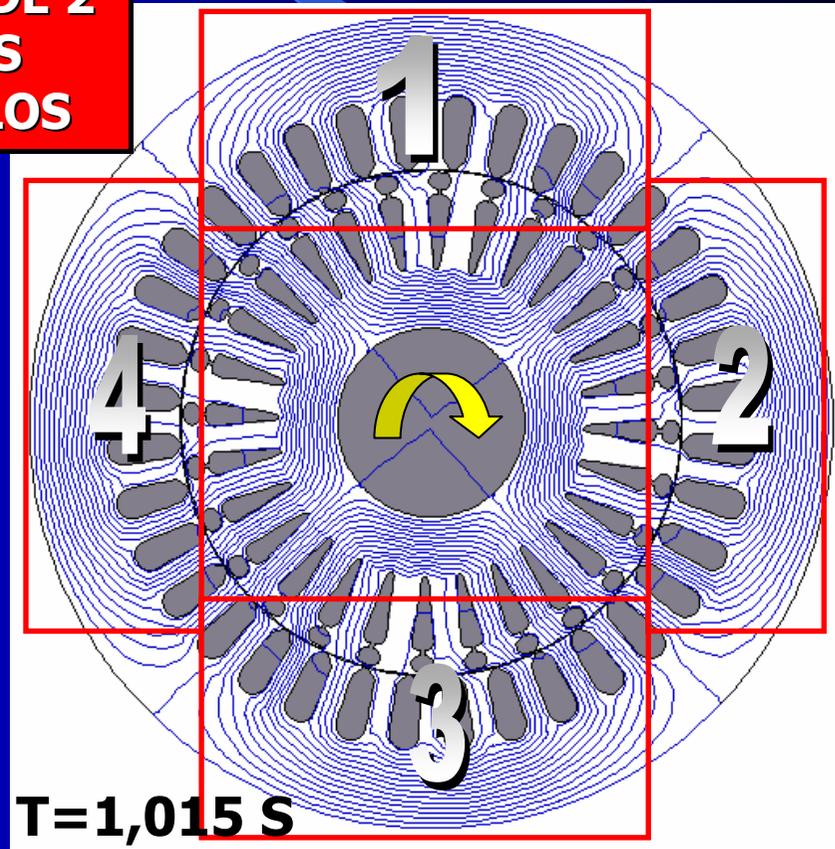
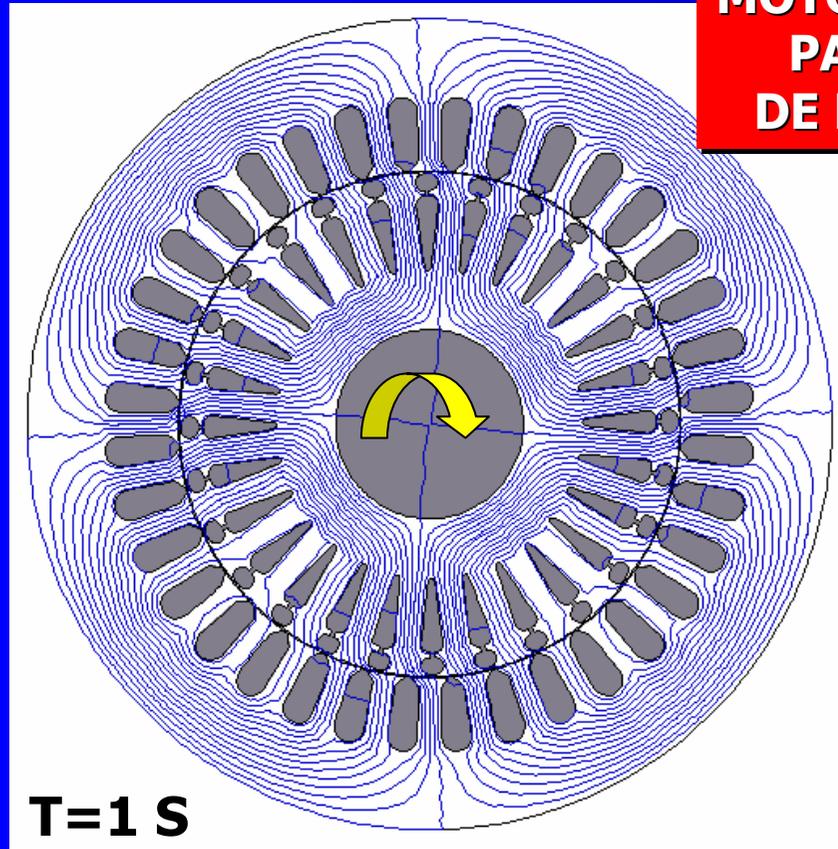
2



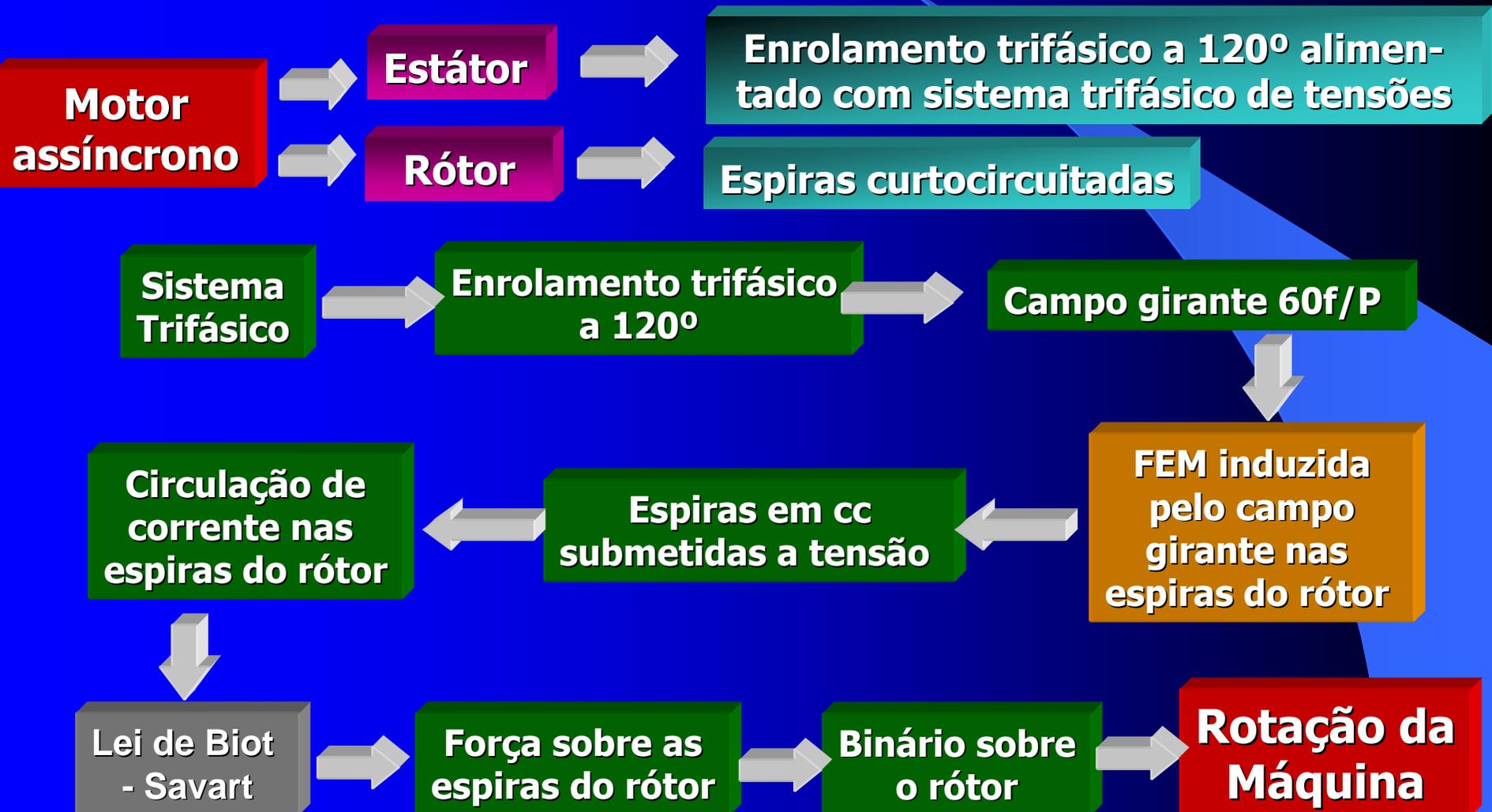
3

Princípio de funcionamento: simulação

MOTOR DE 2
PARES
DE PÓLOS



Princípio de funcionamento



Princípio de funcionamento

O MOTOR ASSÍNCRONO RODA SEMPRE COM VELOCIDADE INFERIOR À VELOCIDADE DE SINCRONISMO: CASO CONTRÁRIO NÃO SE INDUZ FORÇA ELECTROMOTRIZ NO RÓTOR DA MÁQUINA E NÃO HÁ BINÁRIO MOTOR

QUANDO TRABALHA EM VAZÍO, RODA MUITO PRÓXIMO DA VELOCIDADE DE SINCRONISMO. NESSE CASO, O ÚNICO BINÁRIO MOTOR DESENVOLVIDO PELA MÁQUINA É APENAS O NECESSÁRIO PARA COMPENSAR AS PERDAS

Vantagens dos motores de indução

VANTAGENS DOS MOTORES ASSÍNCRONOS

- A única alimentação eléctrica que recebem faz-se através da linha trifásica que alimenta o enrolamento estatórico. NÃO HÁ ESCOVAS OU ANÉIS DESLIZANTES.
- O rotor de gaiola é extremamente robusto.
- Tem binário de arranque.
- Não tem problemas de estabilidade mediante variações bruscas de carga.



Inconvenientes dos motores de indução

INCONVENIENTES DOS MOTORES ASSÍNCRONOS

- A corrente de arranque é muito superior à corrente de funcionamento nominal. Entre 3 e 6 vezes superior. Em muitos casos é necessário dispôr de procedimentos especiais de limitação da corrente de arranque.
- A variação da velocidade implica a variação da frequência de alimentação: é necessário dispôr dum conversor electrónico que converta a tensão da rede numa tensão de frequência variável.



Escorregamento nas máquinas assíncronas

Velocidade de deslizamento



$$N_{des} = N_s - N_m$$



Velocidade mecânica do rotor



$$N_s = \frac{60 \cdot f}{P}$$

Deslizamento ou Escorregamento



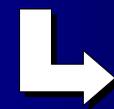
$$S(\%) = \frac{N_{des}}{N_s} \cdot 100 = \frac{N_s - N_m}{N_s} \cdot 100$$



$S=0$ Velocidade de sincronismo
 $S=1$ Rotor parado

$$S(\%) = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s} \cdot 100$$

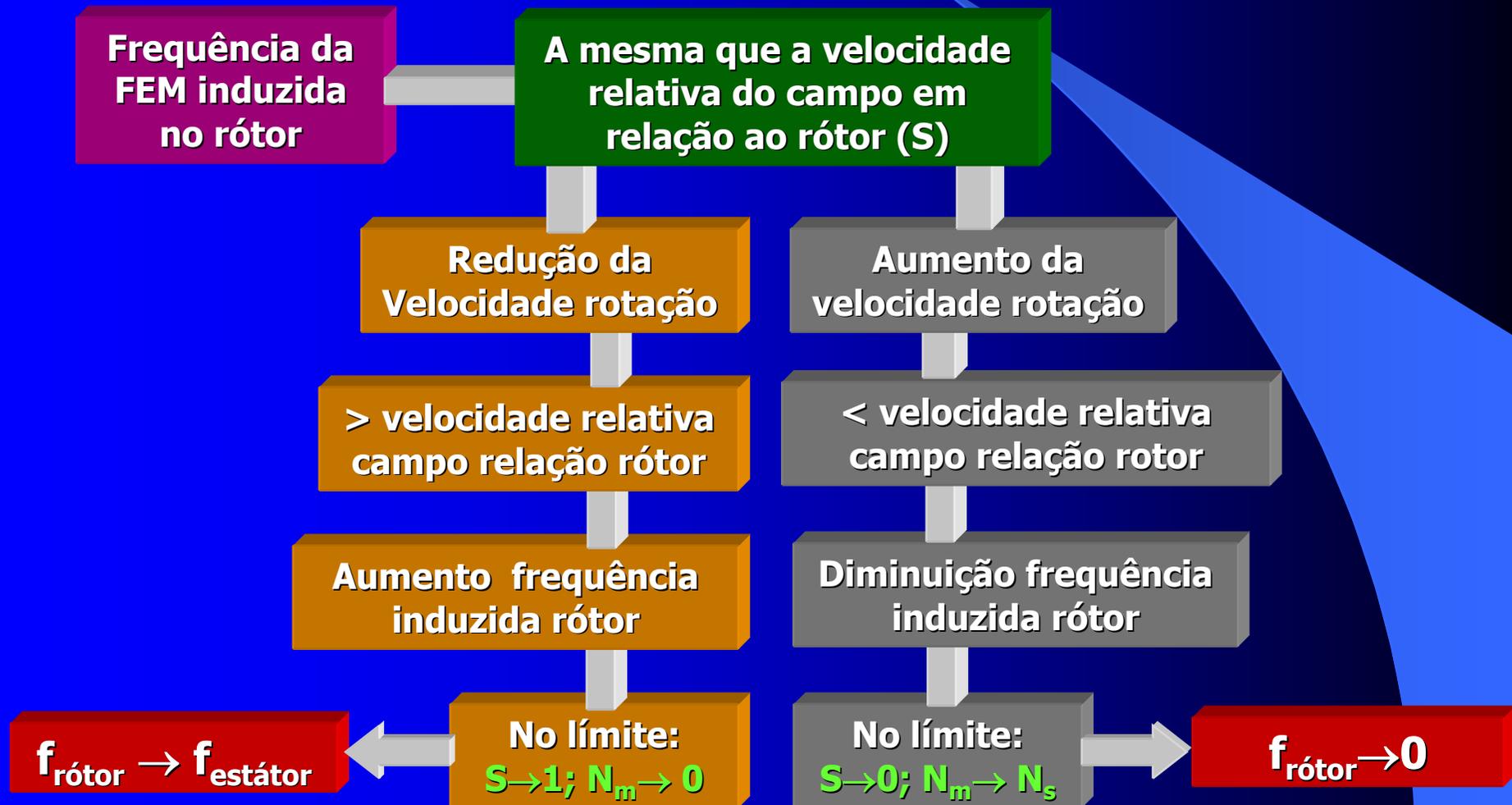
$$N_m = 1 - \left(\frac{N_s - N_m}{N_s} \right) \cdot N_s = (1 - S) \cdot N_s$$



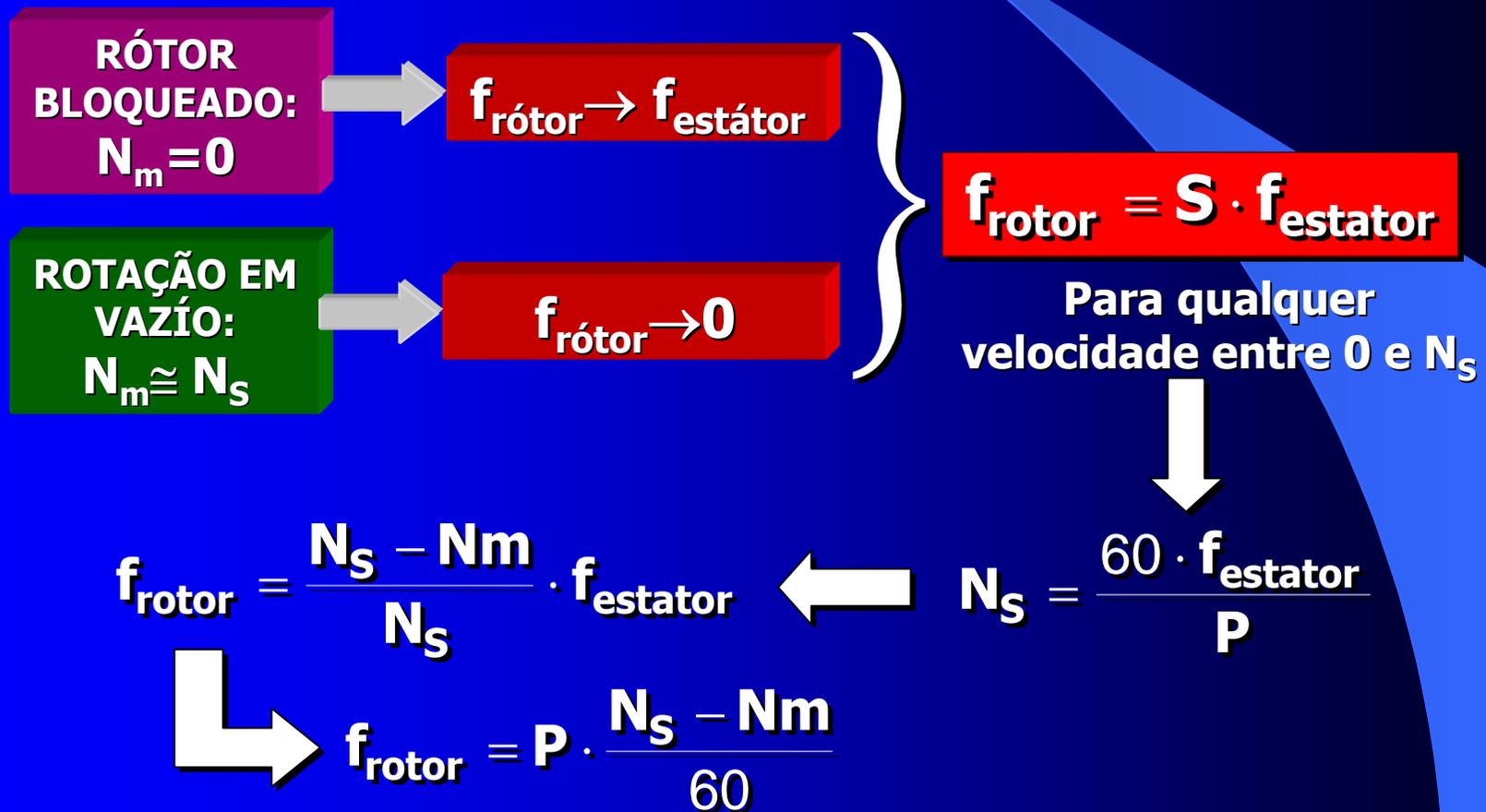
$$\omega_m = (1 - S) \cdot \omega_s$$

OS MOTORES DE INDUÇÃO TRABALHAM SEMPRE COM VALORES MUITO BAIXOS DE S: $S < 5\%$

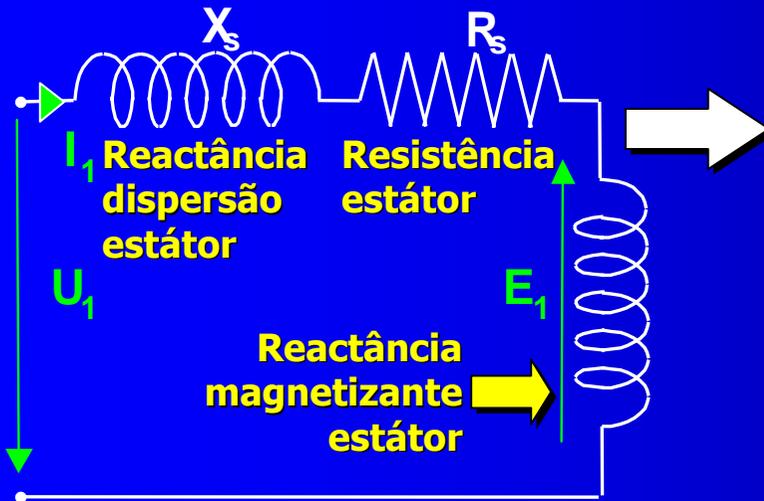
Frequência no rotor das máquinas assíncronas



Frequência no rotor das máquinas assíncronas



Circuito equivalente da máquina assíncrona

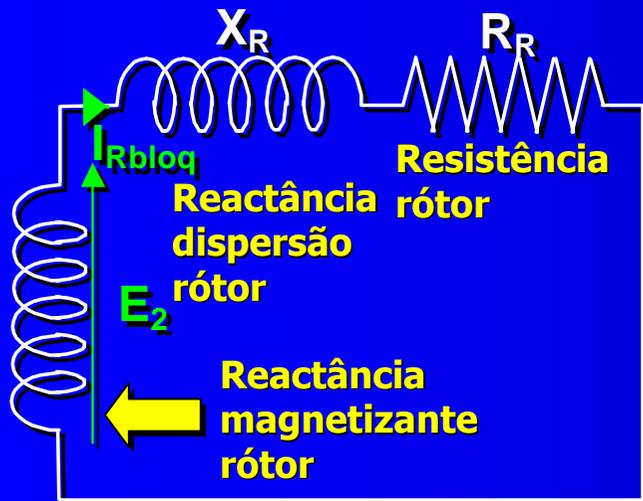


CIRCUITO EQUIVALENTE DO ESTÁTOR PARA QUALQUER VELOCIDADE DE ROTAÇÃO

$$\underline{U}_1 = [R_s + jX_s] \cdot \underline{I}_1 + \underline{E}_1$$

ALIMENTADO A f_1 frequência da rede

EQUIVALENTE POR FASE



CIRCUITO EQUIVALENTE DO RÓTOR COM A MÁQUINA BLOQUEADA

$$\underline{E}_2 = [R_R + jX_R] \cdot \underline{I}_{Rbloq}$$

ALIMENTADO A f_1 frequência da rede

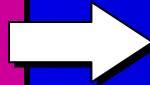
EQUIVALENTE POR FASE

COM RÓTOR BLOQUEADO:

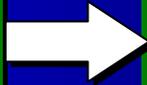
$$f_{\text{rotor}} = f_{\text{estátor}}$$

Circuito equivalente da máquina assíncrona

A FEM INDUZIDA NO RÓTOR É PROPORCIONAL À VELOCIDADE DO CAMPO GIRANTE EM RELAÇÃO AO RÓTOR (S)



Com o rotor bloqueado induz-se E_2



Em vazio induz-se 0



A qualquer velocidade entre 0 e N_s , ou seja a um deslizamento S



INDUZ-SE: $S \cdot E_2$

FEM induzida no rotor para uma velocidade qualquer N (correspondente a um deslizamento S)



$S \cdot E_2$

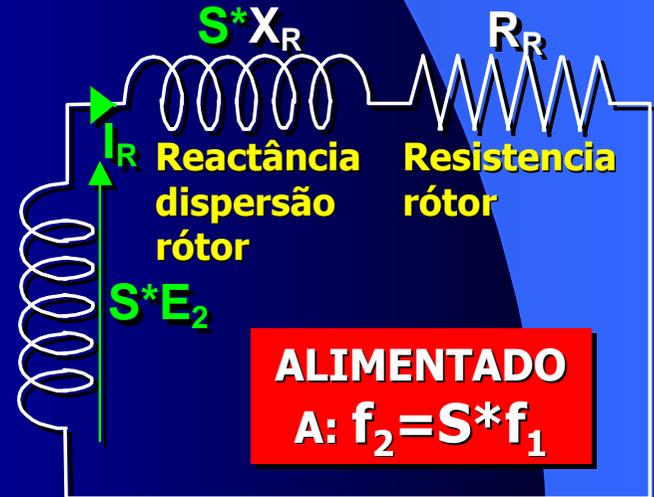
A RESISTÊNCIA ROTÓRICA R_R NÃO DEPENDE DA FREQUÊNCIA E , POR TANTO, TAMBÉM NÃO DE S



A REACTÂNCIA X_R VARIA COM S : QUANDO O DESLIZAMENTO É S , X_R PASSA A SER $S \cdot X_R$



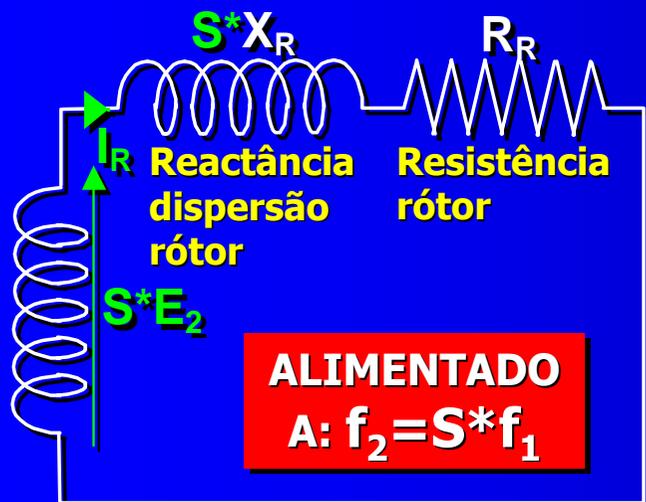
Circuito equivalente para o rotor com deslizamento S



ALIMENTADO
A: $f_2 = S \cdot f_1$

Circuito equivalente da máquina assíncrona

CIRCUITO EQ. ROTOR A DESLIZAMENTO S

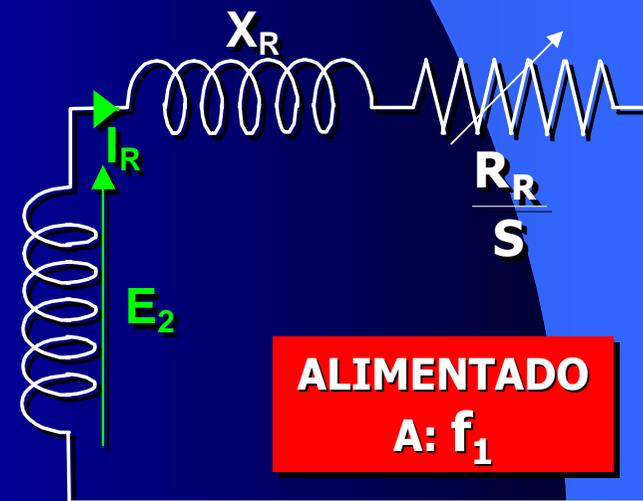


$$S \cdot \underline{E}_2 = [R_R + jX_R \cdot S] \cdot \underline{I}_{Rs}$$

$$\underline{I}_{Rs} = \frac{S \cdot \underline{E}_2}{R_R + jX_R \cdot S} = \frac{\underline{E}_2}{\frac{R_R}{S} + jX_R}$$

Pode-se obter a mesma corrente no circuito alimentado a f_1 trocando apenas R_R por R_R/S

É POSSÍVEL OBTER O CIRCUITO EQUIVALENTE DA MÁQUINA ASSÍNCRONA TRABALHANDO APENAS COM A FREQUÊNCIA DO ESTÁTOR. BASTA SIMULAR O EFEITO DE ROTAÇÃO COM A RESISTÊNCIA R_R/S



Circuito equivalente da máquina assíncrona

1

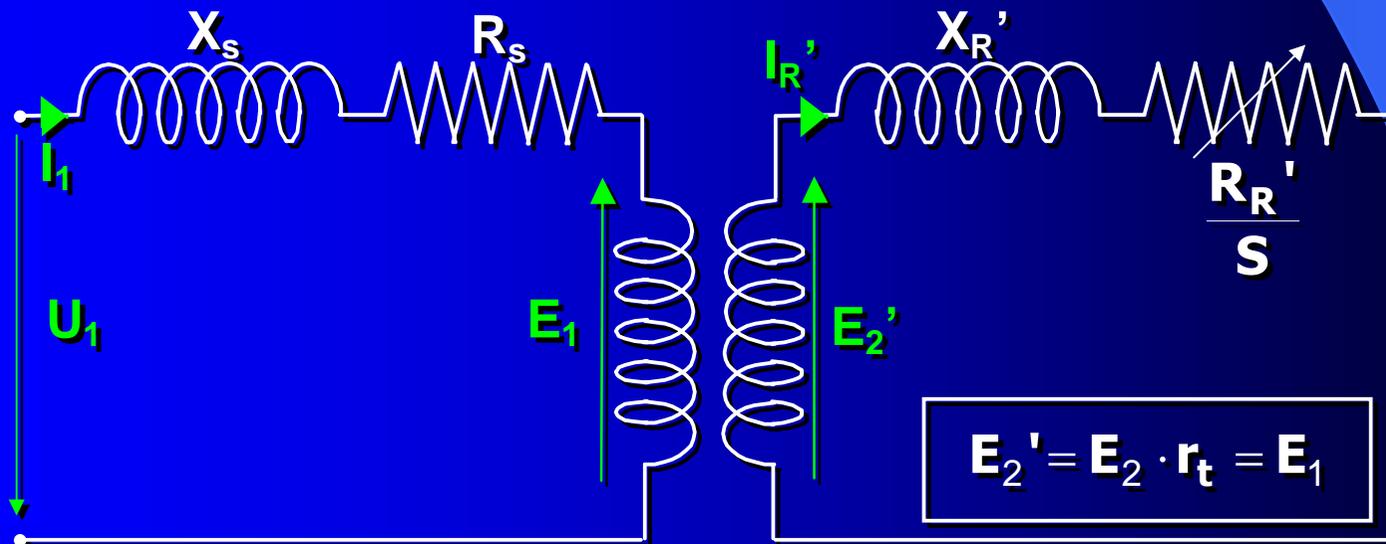
PARA OBTER O CIRCUITO EQUIVALENTE COMPLETO UNEM-SE OS CIRCUITOS EQUIVALENTES DO RÓTOR E DO ESTÁTOR

2

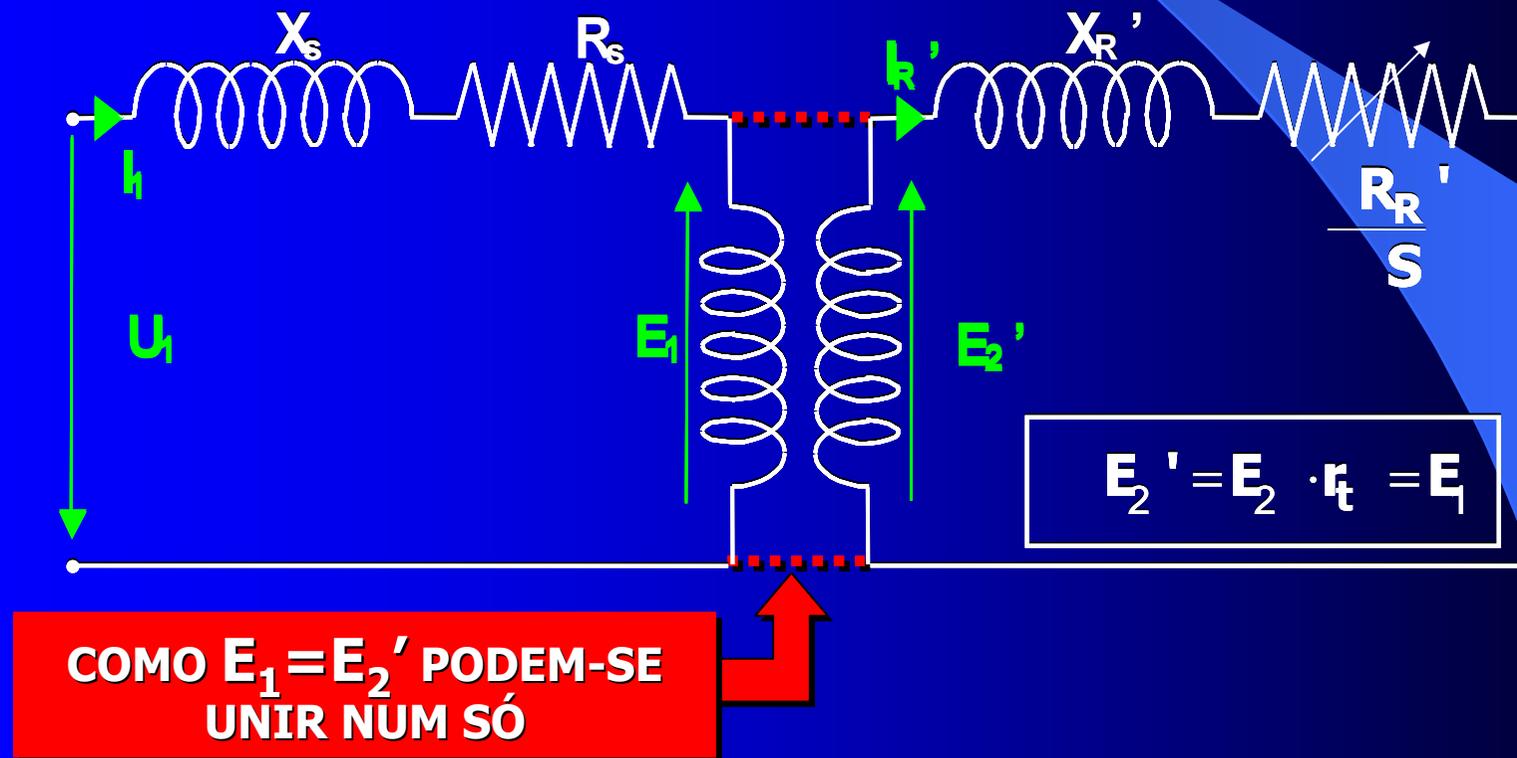
ASSUME-SE QUE A MÁQUINA ASSÍNCRONA É "EQUIVALENTE" A UM TRANSFORMADOR (Estátor=Primário, Rótor=Secundário, com Relação Transformação= r_t)

3

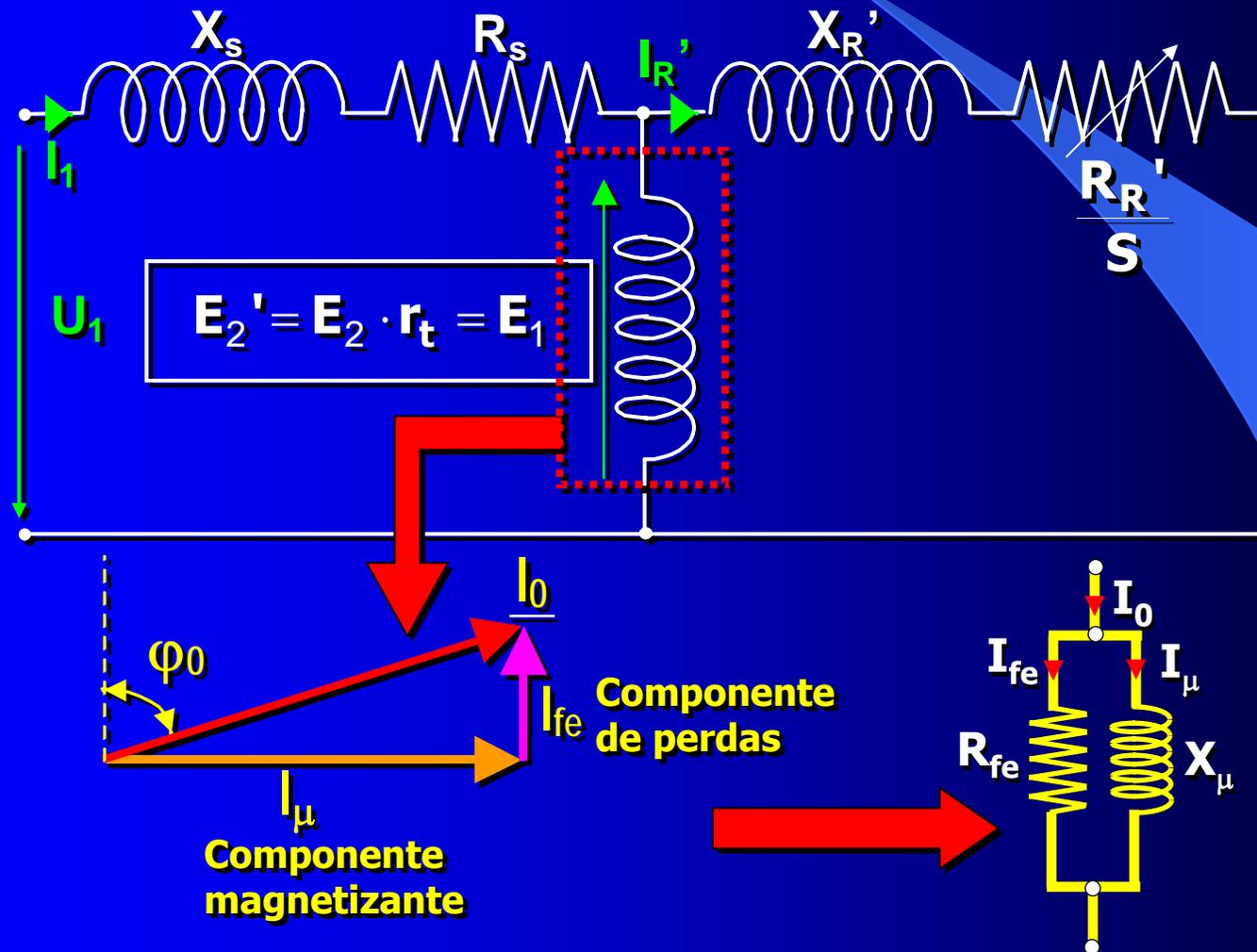
REDUZIR-SE-Á O SECUNDÁRIO (Rótor) AO PRIMÁRIO (Estátor)



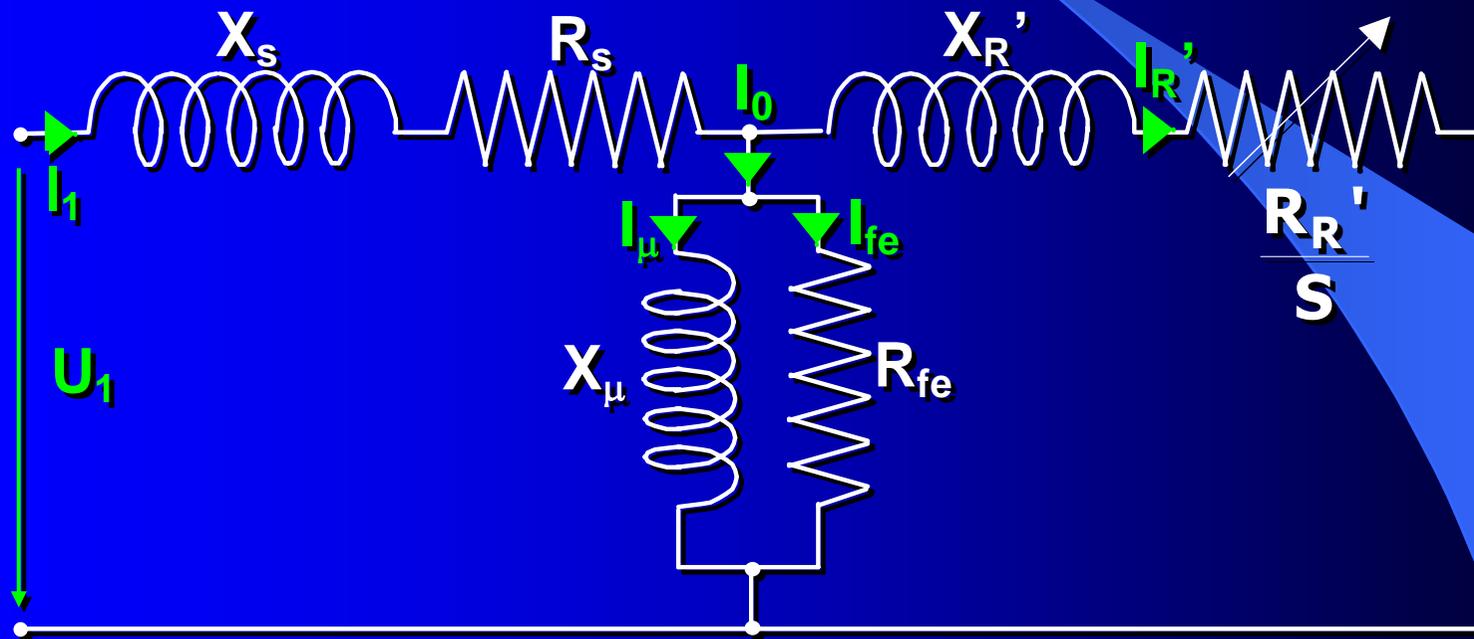
Circuito equivalente da máquina assíncrona



Circuito equivalente da máquina assíncrona



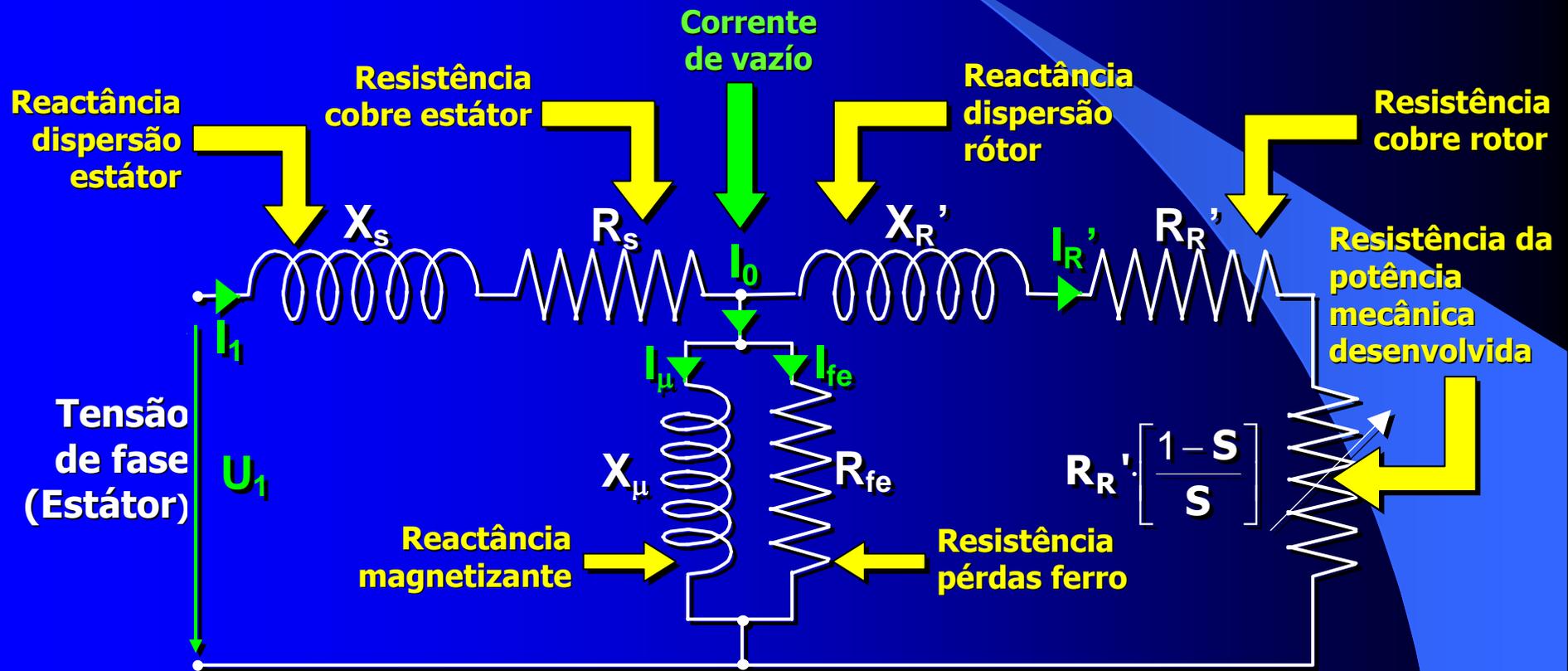
Circuito equivalente da máquina assíncrona



$$\frac{R_{R'}}{S} = R_{R'} + R_{R'} \cdot \left[\frac{1-S}{S} \right]$$

A RESISTÊNCIA VARIÁVEL PODE-SE DIVIDIR EM DUAS COMPONENTES

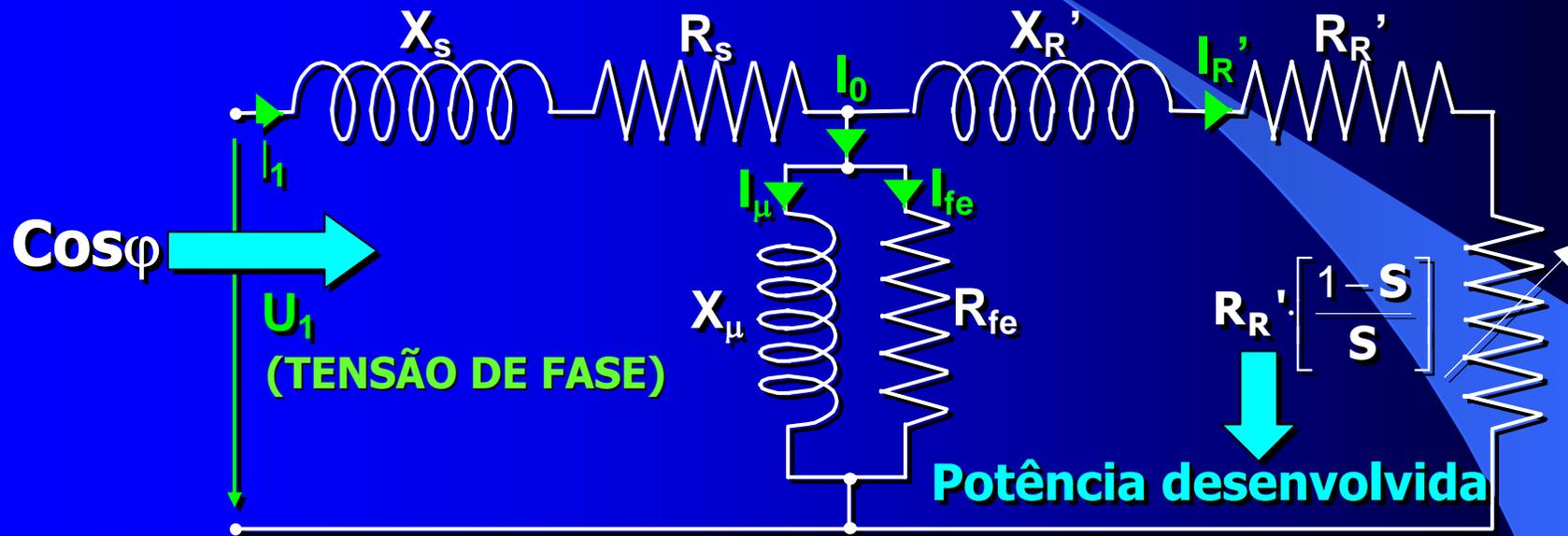
Circuito equivalente da máquina assíncrona



Todos os elementos do circuito com ' estão referidos ao estator

O circuito equivalente faz-se por fase e com ligação em estrela

Circuito equivalente da máquina assíncrona



À carga nominal (S baixo), o factor de potência na entrada é alto
($\cos \varphi = 0,8$ aproximadamente)

Em vazio ($S=0$) o "ramo" do rotor fica em circuito aberto: ficando
o restante circuito primordialmente indutivo fdp $0,1 - 0,2$ aprox

Num motor assíncrono a corrente de vazio não é desprezável

Cálculo das perdas na máquina assíncrona

$P_1 = 3V_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi$ → POTÊNCIA ABSORVIDA DA REDE ELÉCTRICA

$P_{Cu\text{est}} = 3 \cdot R_S \cdot I_1^2$ → PERDAS NOS CONDUTORES DO ESTÁTOR (Cu)

$P_{Cu\text{Rot}} = 3 \cdot R_R' \cdot I_R'^2$ → PERDAS NOS CONDUTORES DO RÓTOR (Cu)

$P_{fe} = 3 \cdot \frac{E_1^2}{R_{fe}}$ → PERDAS NO FERRO. CONSIDERAM-SE TODAS CONCENTRADAS NO ESTÁTOR. DADO QUE NO RÓTOR A FREQUÊNCIA f É MUITO BAIXA

$P_g = P_1 - P_{Cu\text{est}} - P_{fe}$ → POTENCIA QUE ATRAVESSA O ENTREFERRO DA MÁQUINA



A potência que atravessa o entreferro é a que se dissipa na resistência total do ramo do rotor (R_R'/S)

$P_g = 3 \cdot \frac{R_R'}{S} \cdot I_R'^2$ ←

Dissipa-se na resistência variável

$P_{mi} = P_g - P_{Cu\text{rot}} = 3 \cdot R_R' \cdot \left[\frac{1-S}{S} \right] \cdot I_R'^2$ → POTÊNCIA MECÂNICA INTERNA: ATRAVESSA O ENTREFERRO E PRODUZ TRABALHO

Cálculo das perdas na máquina assíncrona

$$P_{mi} = P_g - P_{currot} = P_g - S \cdot P_g = [1 - S] \cdot P_g \longrightarrow \text{OUTRA FORMA DE CALCULO A PARTIR DO DESLIZAMENTO}$$

$$T_i = \frac{P_{mi}}{\Omega} = \frac{[1 - S] \cdot P_g}{\Omega} = \frac{P_g}{\Omega_s}$$

BINÁRIO INTERNO: É O BINÁRIO TOTAL DESENVOLVIDO INTERNAMENTE PELA MÁQUINA

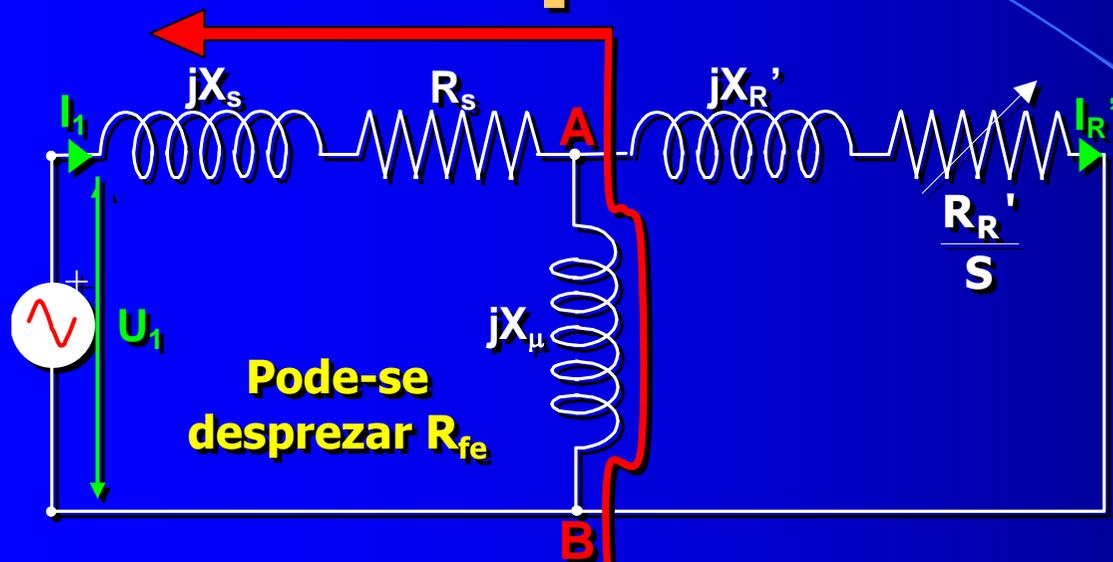
↑ Velocidade angular de rotação do rotor

↑ Velocidade angular de sincronismo

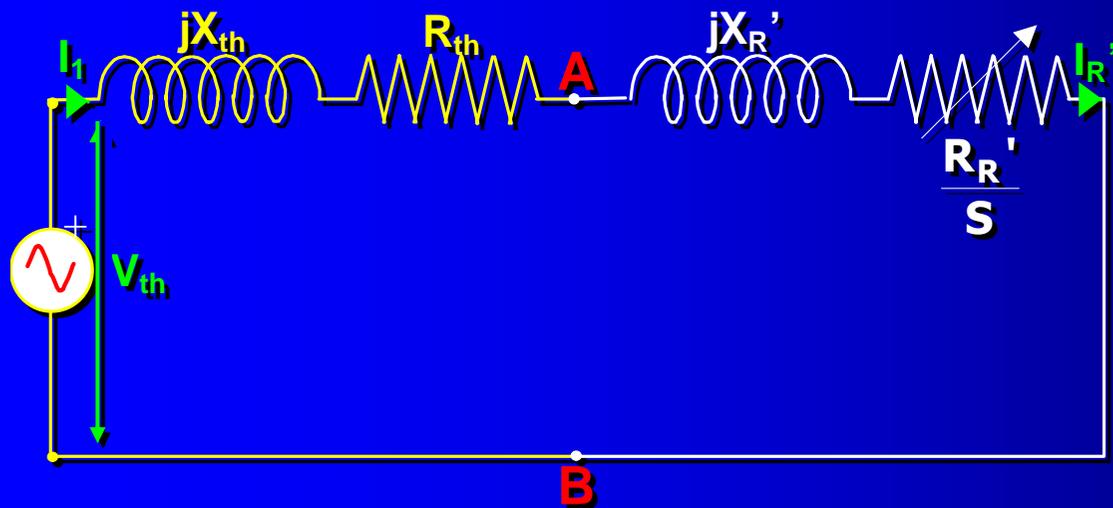
$$P_U - P_{mi} = \text{Perdas mecânicas e rotacionais}$$

$$T_U = \frac{P_U}{\Omega} \longrightarrow \text{BINÁRIO ÚTIL: É O BINÁRIO QUE O MOTOR É CAPAZ DE DESENVOLVER NO EIXO}$$

Cálculo do binário de uma máquina assíncrona



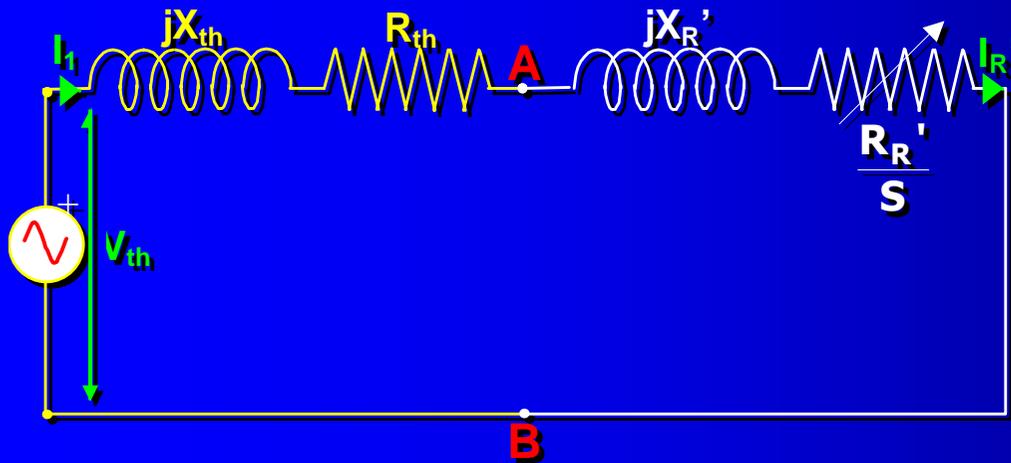
CALCULANDO O EQUIVALENTE de THEVENIN ENTRE A e B



$$\underline{V}_{th} = \frac{\underline{U}_1 \cdot jX_\mu}{R_s + j[X_s + X_\mu]}$$

$$\underline{Z}_{th} = \frac{[R_s + jX_s] \cdot jX_\mu}{R_s + j[X_s + X_\mu]}$$

Cálculo do binário da máquina assíncrona



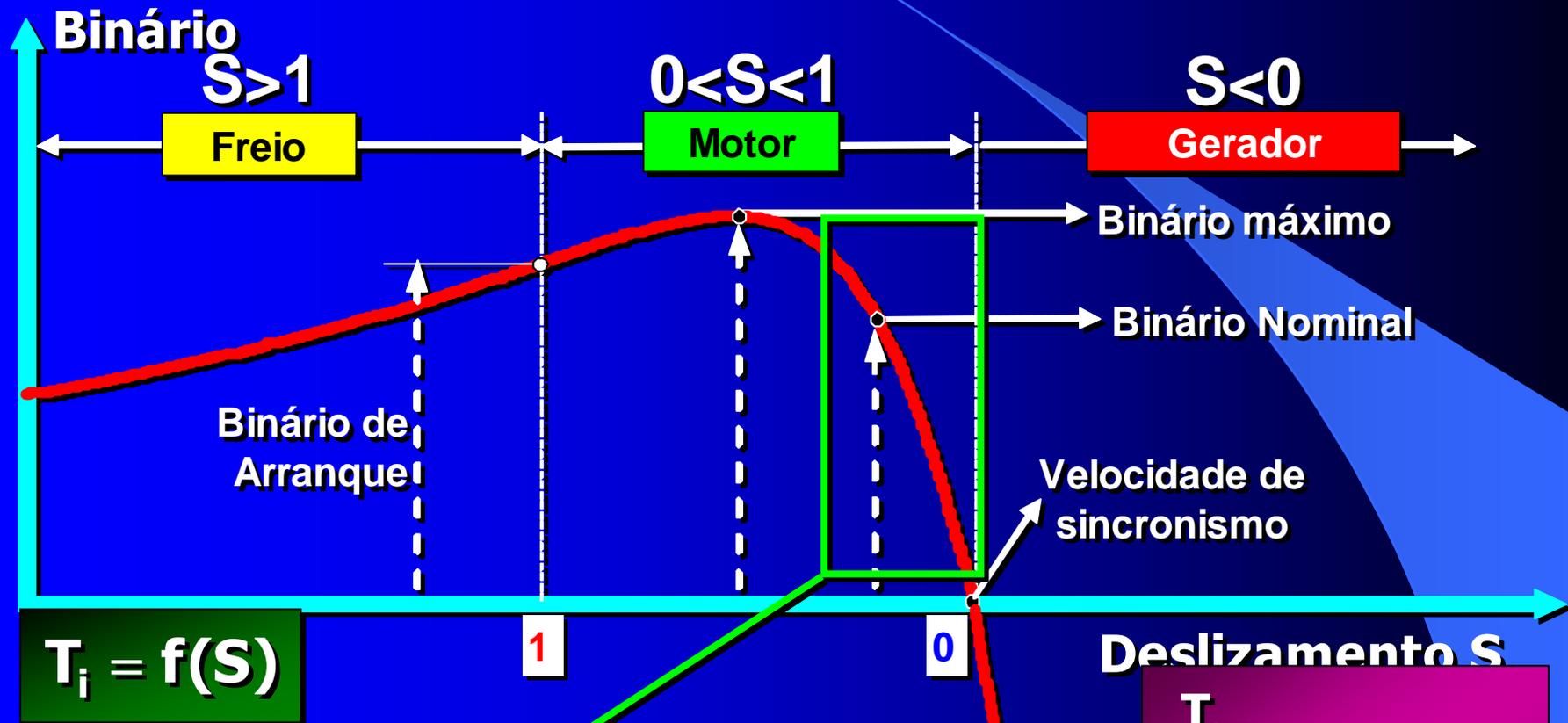
$$\underline{I}_{R'} = \frac{\underline{V}_{th}}{R_{th} + \frac{R_{R'}}{S} + j[X_{th} + X_{R'}]}$$

$$I_{R'} = \frac{V_{th}}{\sqrt{\left[R_{th} + \frac{R_{R'}}{S}\right]^2 + [X_{th} + X_{R'}]^2}}$$

$$P_g = 3 \cdot \frac{R_{R'}}{S} I_{R'}^2 = \frac{3 \cdot V_{th}^2 \cdot \frac{R_{R'}}{S}}{\left[R_{th} + \frac{R_{R'}}{S}\right]^2 + [X_{th} + X_{R'}]^2}$$

$$T_i = f(S) \quad \leftarrow \quad T_i = \frac{P_g}{\Omega_s} = \frac{3}{\Omega_s} \cdot \frac{V_{th}^2 \cdot \frac{R_{R'}}{S}}{\left[R_{th} + \frac{R_{R'}}{S}\right]^2 + [X_{th} + X_{R'}]^2}$$

Curvas de resposta mecânica Binário - velocidade



$T_i = f(S)$

Zona de funcionamento estável como motor

$\frac{T_{arr}}{T_{nom}} = 1,2 - -2$
 $\frac{T_{max}}{T_{nom}} = 1,8 - -2,7$

Curvas de resposta mecânica

Binário - velocidade

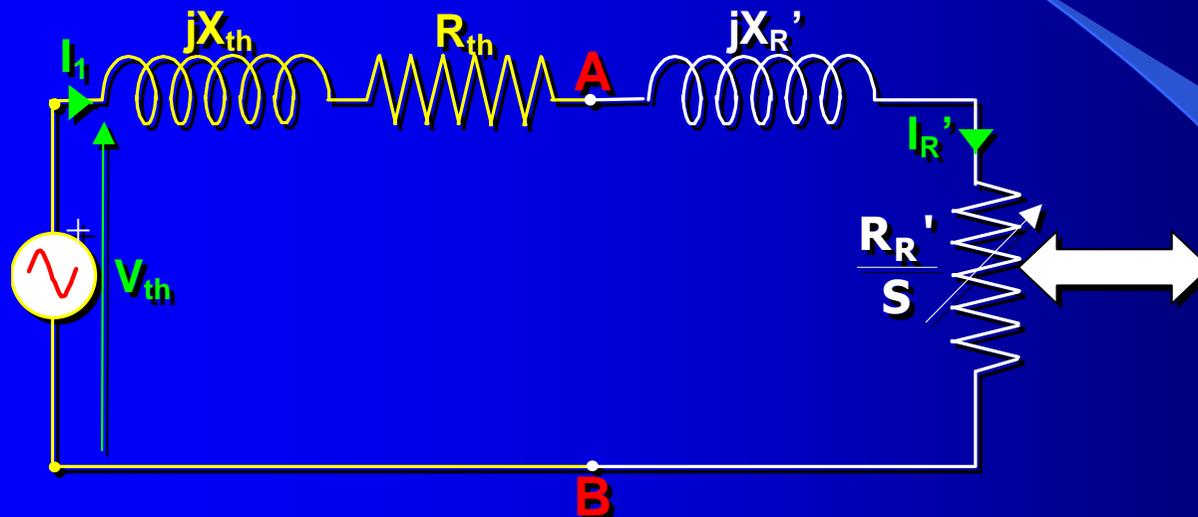
A característica mecânica dos motores de indução é praticamente linear entre o vazio e a plena carga

O Binário máximo poderá ser de 2 a 3 vezes o nominal

O binário de arranque tem que ser superior ao nominal para permitir que o motor se ponha em marcha

Para um determinado deslizamento o binário varia com o quadrado da tensão

Binário máximo dum motor de indução



O binário será máximo quando a P_g seja máxima, ou seja quando se transfere a R_R'/S a máxima potência

TEOREMA TRANSFERENCIA MÁX. POTÊNCIA

$$\frac{R_R'}{S} = \sqrt{R_{th}^2 + [X_{th} + X_{R'}]^2}$$

$$S_{TMAX} = \frac{R_R'}{\sqrt{R_{th}^2 + [X_{th} + X_{R'}]^2}} \rightarrow T_{max} = \frac{3 \cdot V_{th}^2}{2 \cdot \Omega_S \cdot [R_{th} + \sqrt{R_{th}^2 + [X_{th} + X_{R'}]^2}]}$$

O binário máximo dum motor de indução

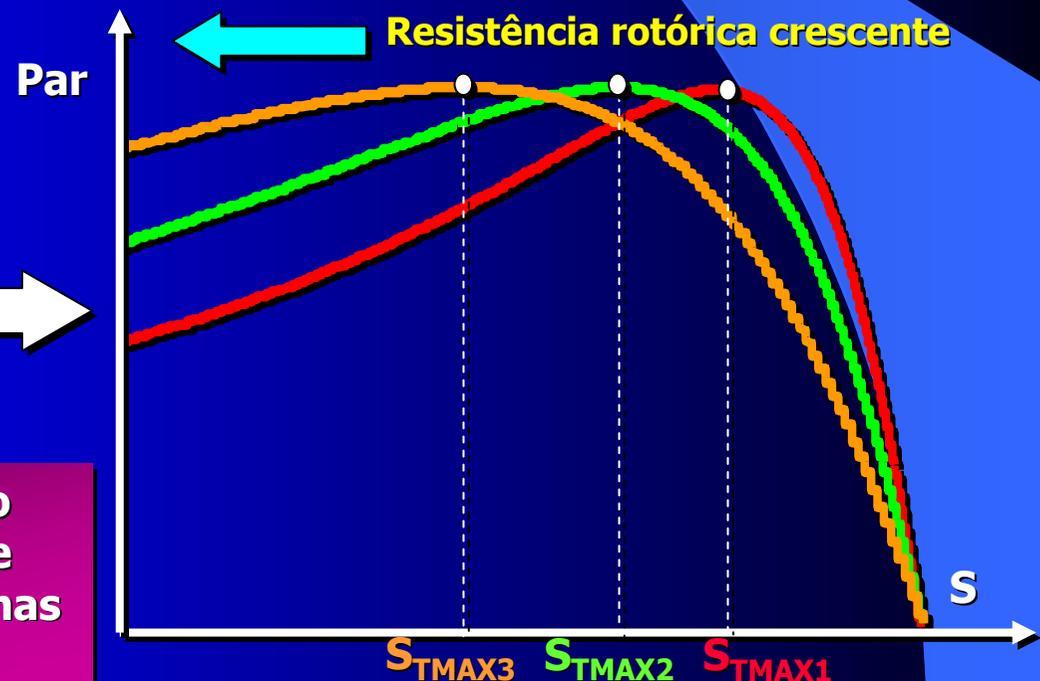
$$T_{\max} = \frac{3 \cdot V_{th}^2}{2 \cdot \Omega_S \cdot \left[R_{th} + \sqrt{R_{th}^2 + [X_{th} + X_{R'}]^2} \right]}$$

O binário máximo NÃO depende da resistência rotórica R_R'

$$S_{TMAX} = \frac{R_{R'}}{\sqrt{R_{th}^2 + [X_{th} + X_{R'}]^2}}$$

O deslizamento a que se produz o binário máximo **SIM DEPENDE DE R_R'**

Esta propriedade usa-se para o arranque mediante inserção de resistências rotóricas nas máquinas de rotor bobinado

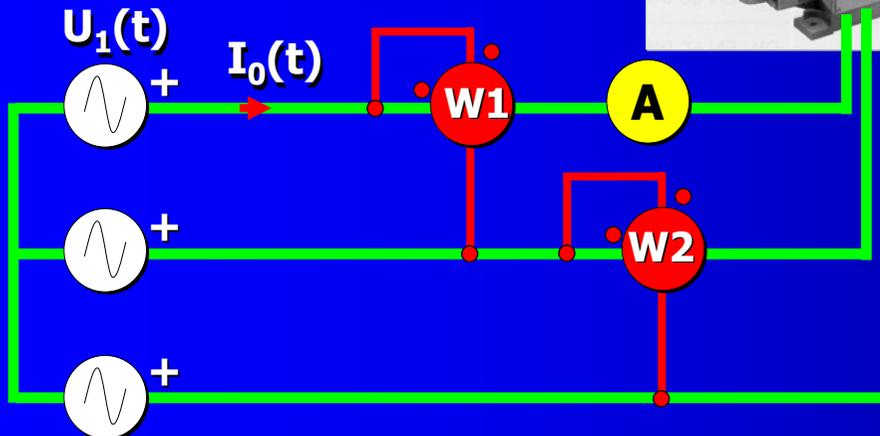
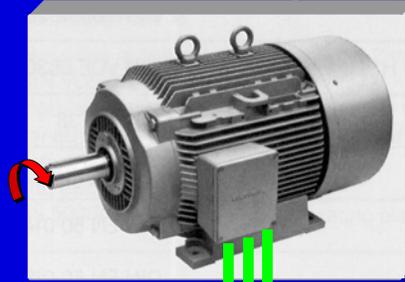


Ensaio em vazio

Condições ensaio:

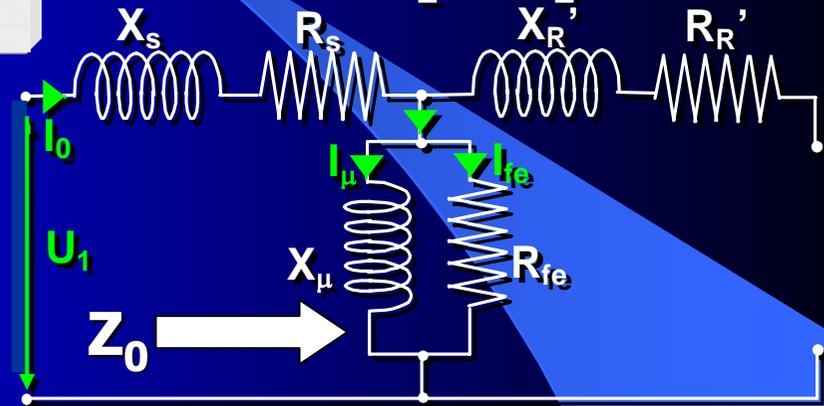
Motor a rodar sem carga

V e f nominais



Em vazio $S \approx 0$:

$$SES \rightarrow 0 : R_R' \left[\frac{1-S}{S} \right] \rightarrow \infty$$



Como não circula corrente por R_R' pode considerar-se que neste ensaio as perdas no Cu são só as do estátor

$$P_0 = W1 + W2 = P_{\text{cuest}} + P_{\text{mec}} + P_{\text{fe}}$$

$$\underline{Z}_0 = R_0 + jX_0$$

Impedância por fase do motor

$$Z_0 = \frac{V_{\text{Linha}}}{\sqrt{3} I_0}$$

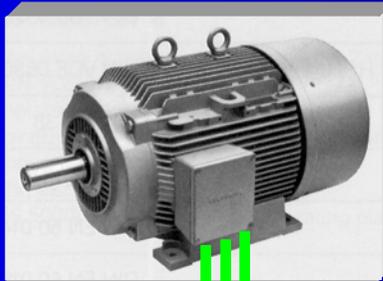
$$\begin{cases} R_0 = \frac{P_0}{3 \cdot I_0^2} \\ X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} \approx X_s + X_\mu \end{cases}$$

Ensaio de rotor bloqueado

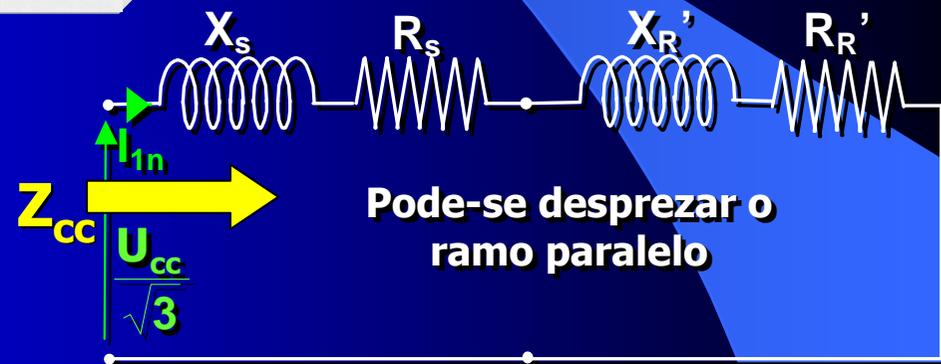
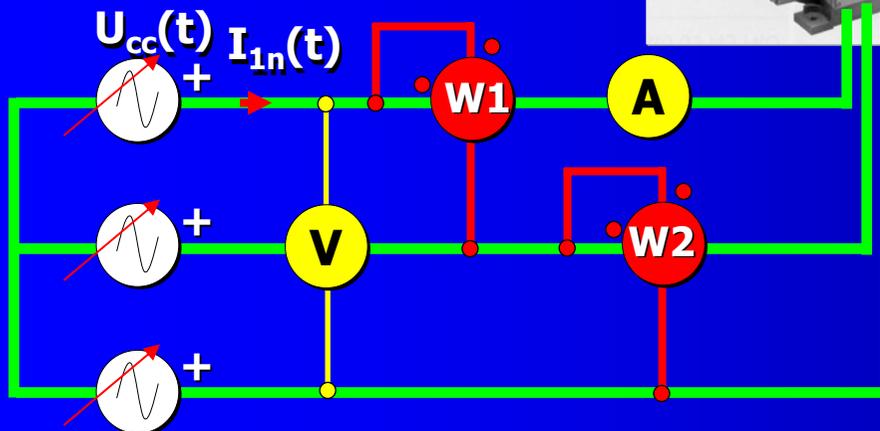
Condições ensaio:

Rotor bloqueado

V reduzida e I nominal



O ensaio realiza-se subindo gradualmente a tensão de alimentação até que circule a corrente nominal

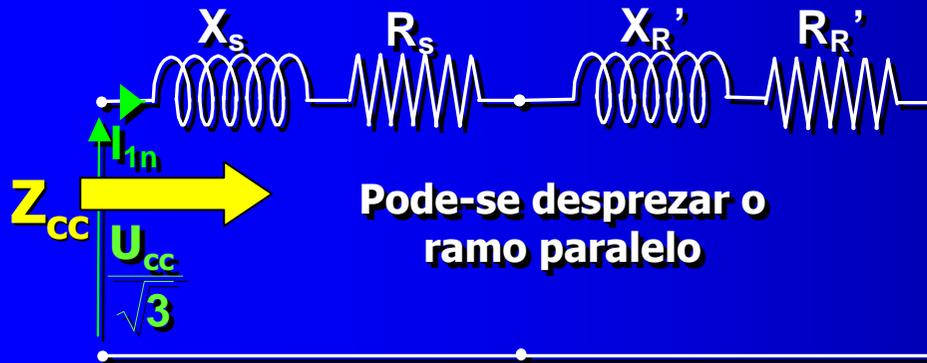


$$Z_{cc} = R_{cc} + jX_{cc}$$

$$R_{cc} = R_s + R_R'$$

$$X_{cc} = X_s + X_R'$$

Ensaio de rotor bloqueado



$$P_{cc} = W1 + W2 = P_{cuest} + P_{curot}$$

$$Z_{cc} = \frac{U_{cc}}{\sqrt{3} \cdot I_{1n}}$$

$$R_{cc} = \frac{P_{cc}}{3 \cdot I_{1n}^2}$$

**CÁLCULO PARÂMETROS
CIRCUITO EQUIVALENTE**

**R_s obtém-se por medição directa
dos enrolamentos do estator**

X_s e $X_{R'}$ Regra empírica segundo o tipo de motor

MOTOR CLASE A: $X_s = X_{R'}$

MOTOR CLASE B: $X_s = 0,4 \cdot [X_s + X_{R'}]$ $X_{R'} = 0,6 \cdot [X_s + X_{R'}]$

MOTOR CLASE C: $X_s = 0,3 \cdot [X_s + X_{R'}]$ $X_{R'} = 0,7 \cdot [X_s + X_{R'}]$

MOTOR CLASE D: $X_s = X_{R'}$

Ensaio de rotor bloqueado

CÁLCULO PARÂMETROS CIRCUITO EQUIVALENTE

X_{μ}



Depois de aplicar a Regra empírica anterior para obter as reactâncias do rotor e estator aplica-se o resultado do ensaio em vazio



$$X_{\mu} = X_0 - X_S$$

R_R'

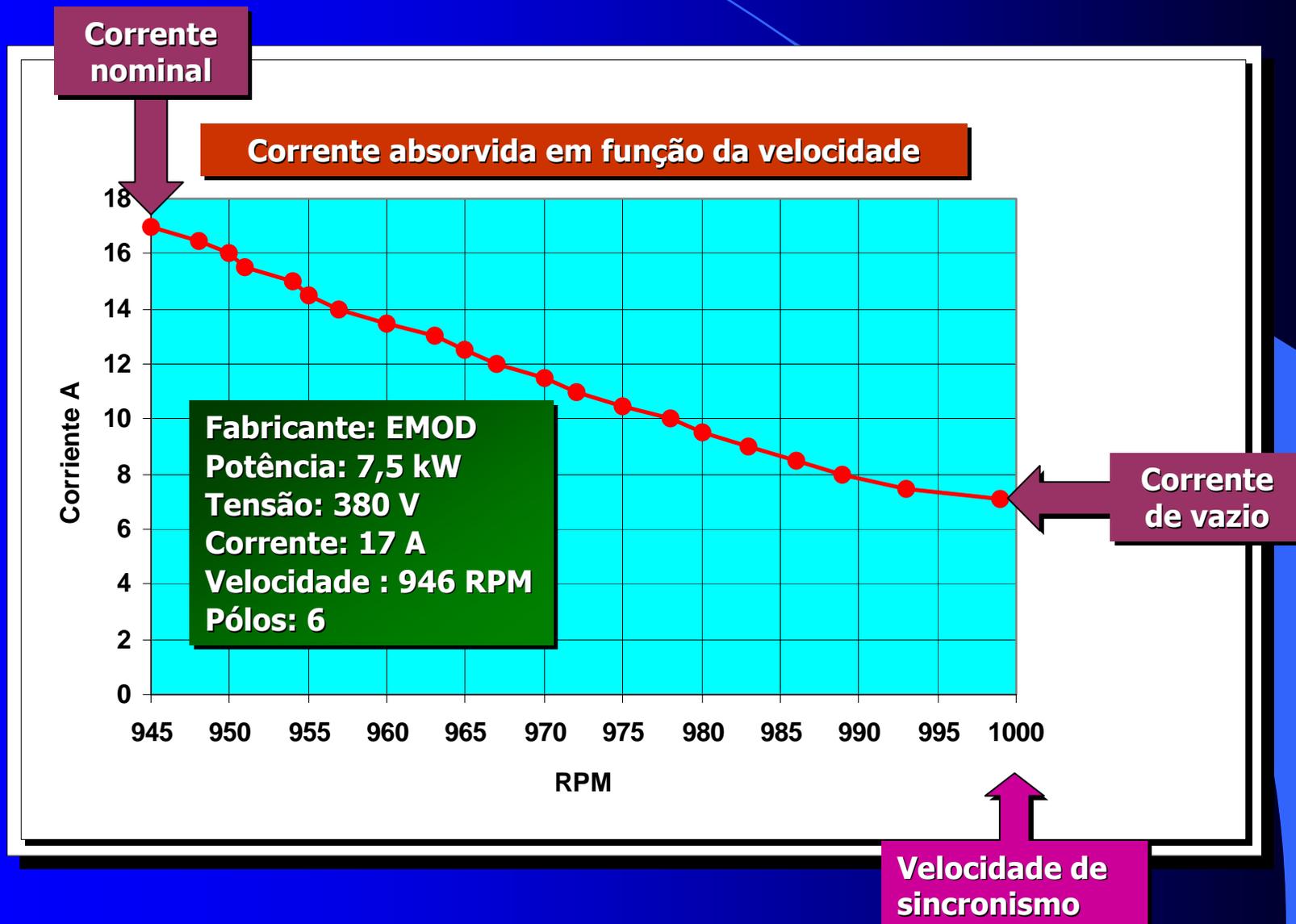


Obtém-se retirando a R_{CC} (Ensaio de rotor bloqueado) o valor de R_S (medição directa)

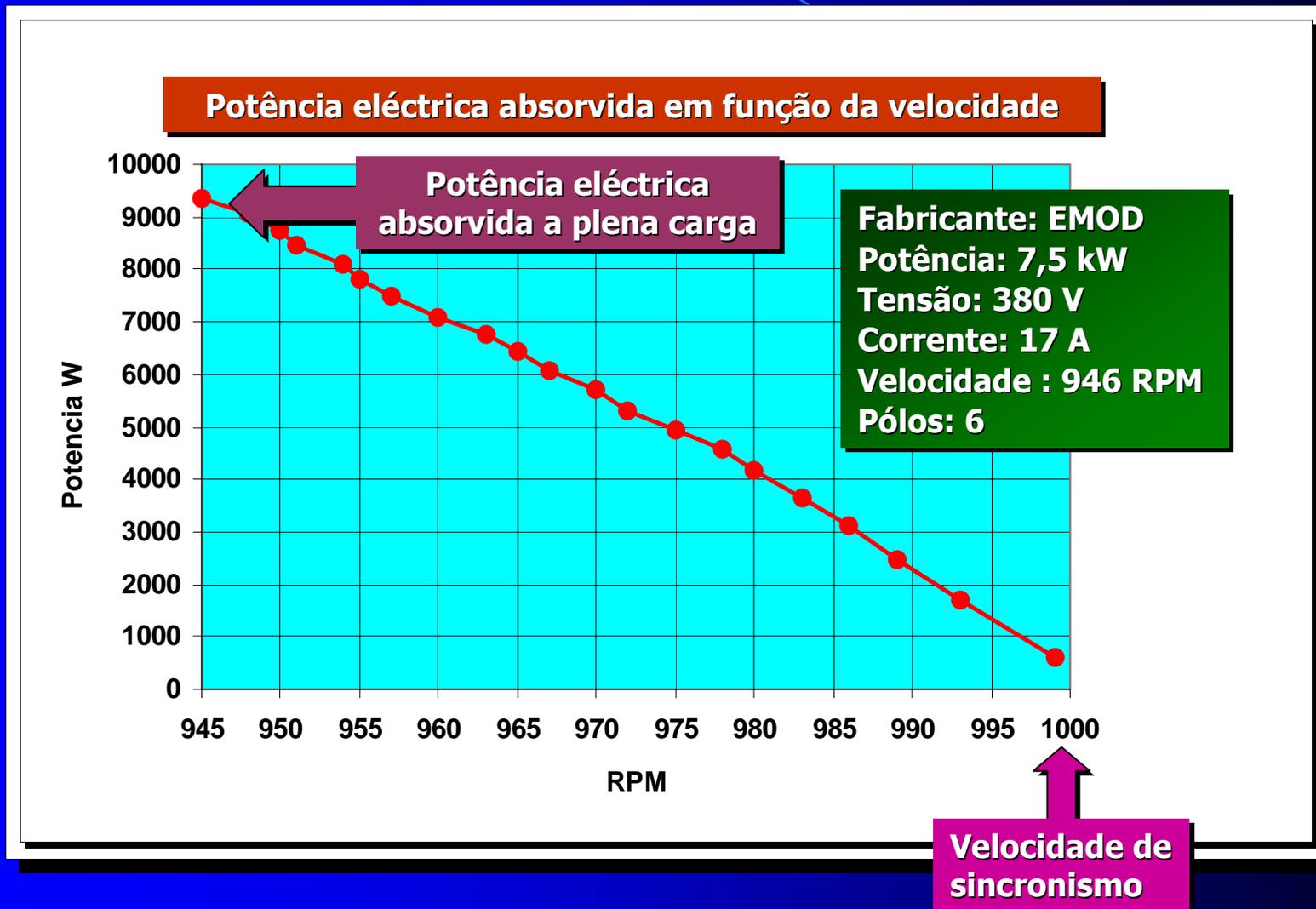


$$R_R' = R_{CC} - R_S$$

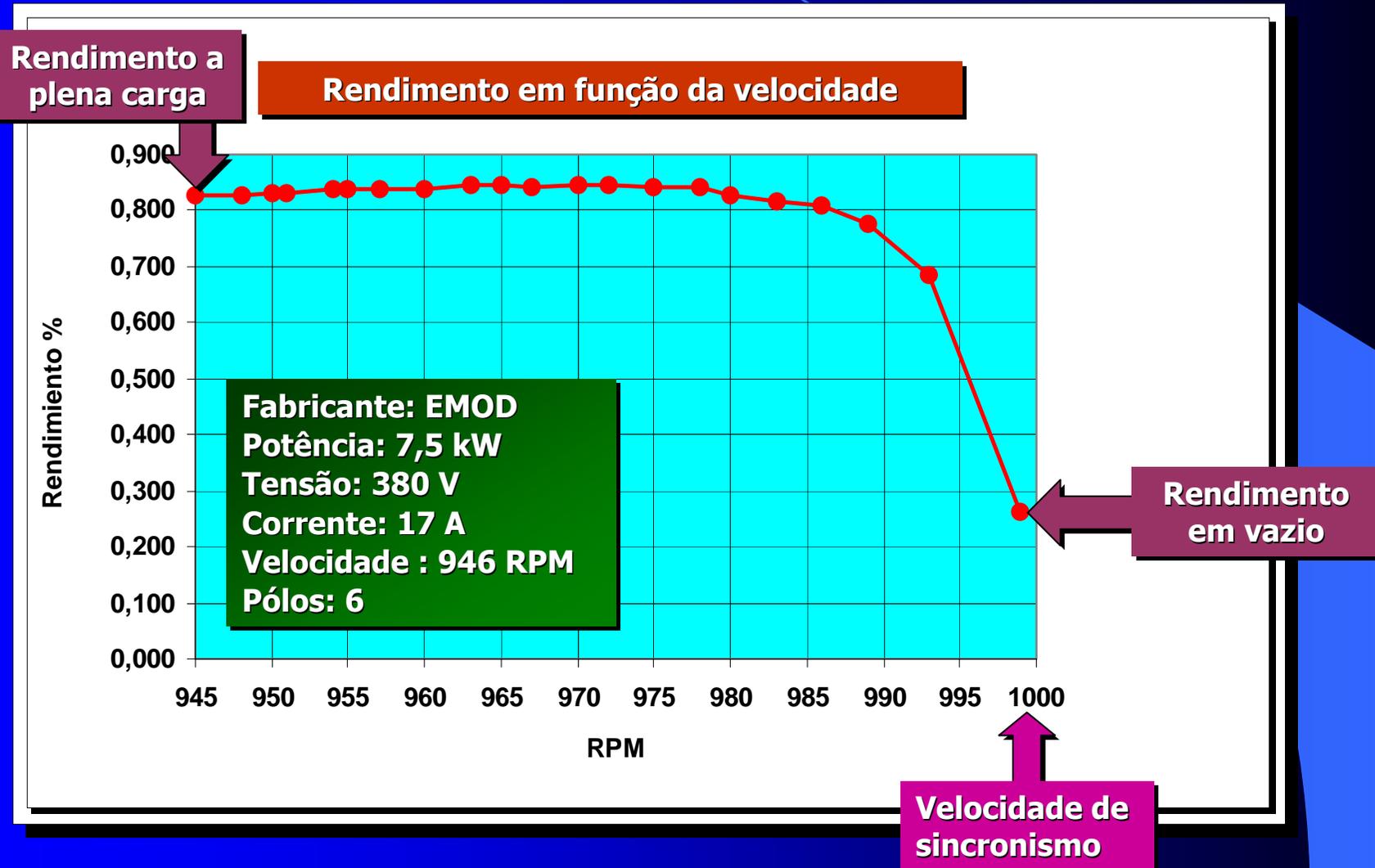
Características funcionais dos motores assíncronos



Características funcionais dos motores assíncronos



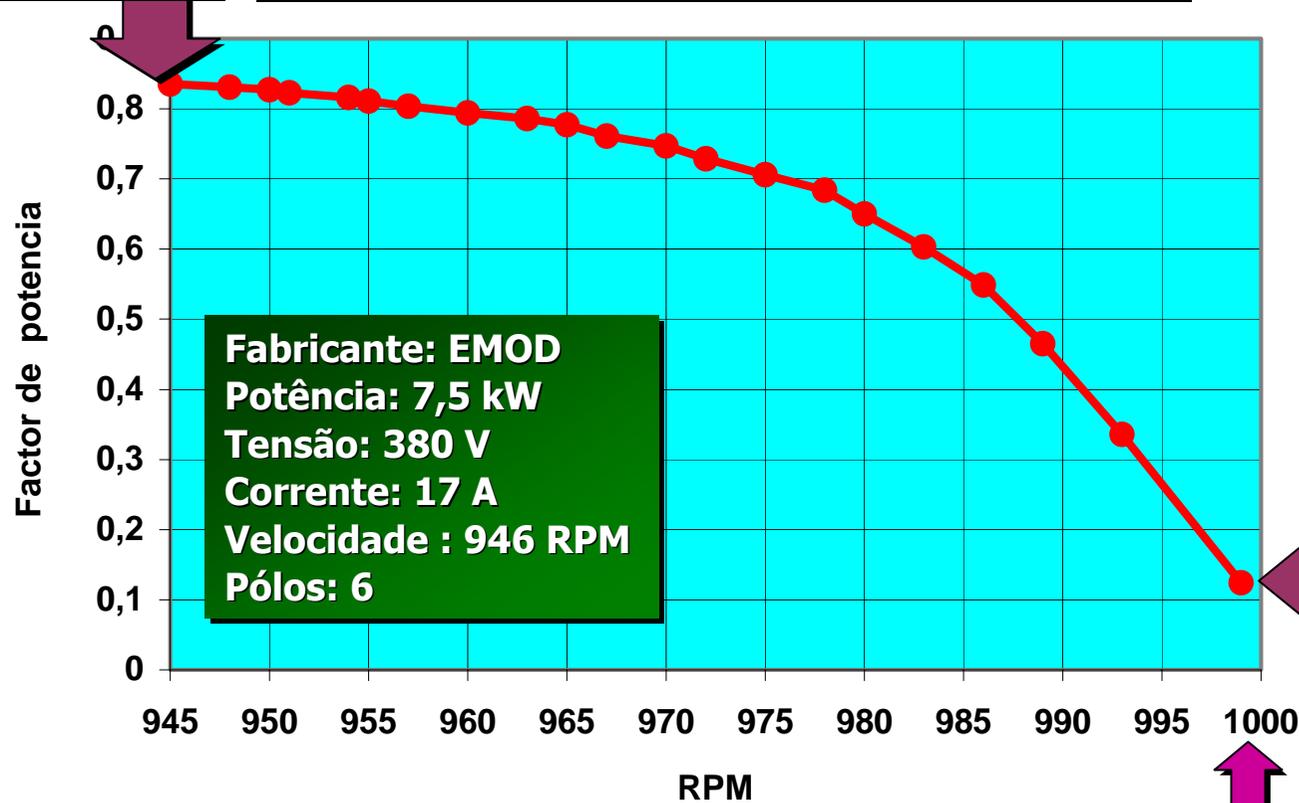
Características funcionais dos motores assíncronos



Características funcionais dos motores assíncronos

Factor de potência a plena carga

Factor de potência em função da velocidade

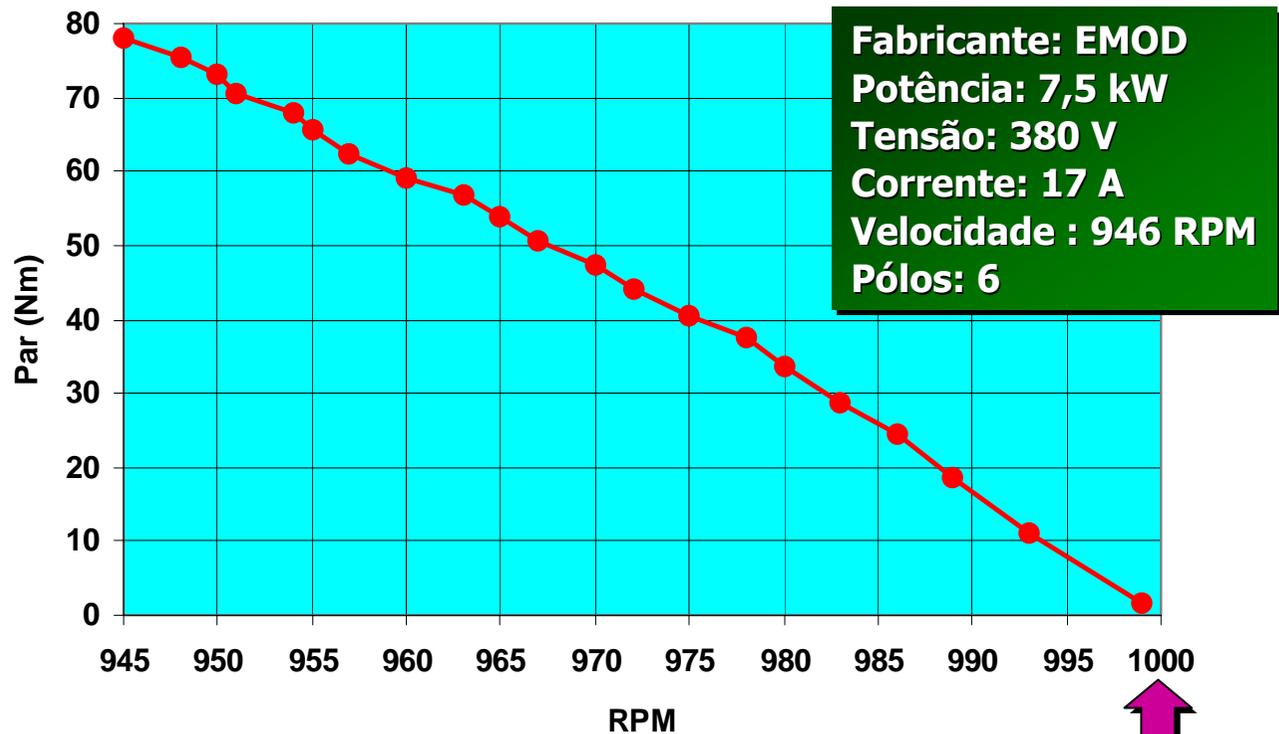


Factor de potência em vazio

Velocidade de sincronismo

Características funcionais dos motores assíncronos

Característica mecânica em zona estável



↑
Velocidade de sincronismo

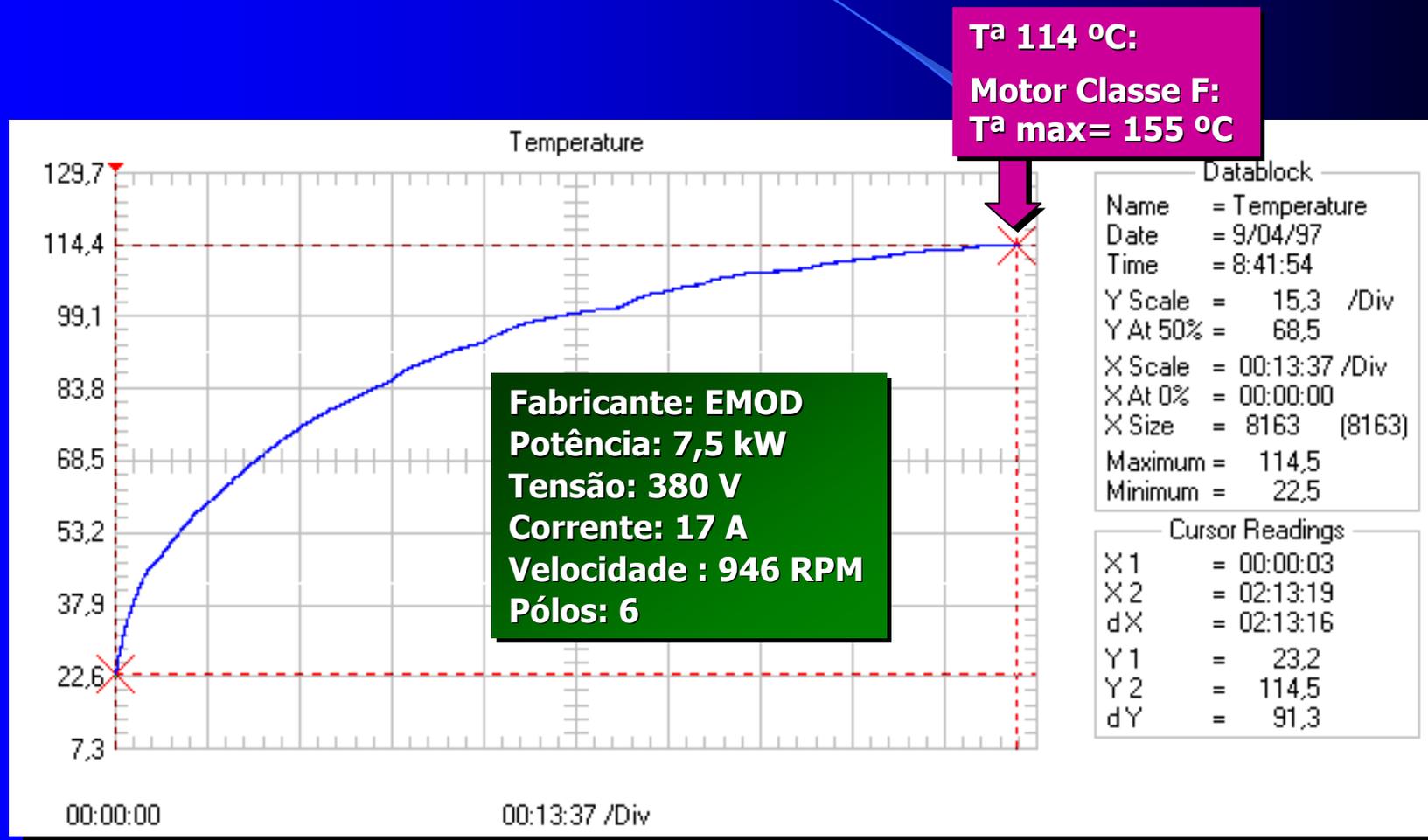
Características funcionais dos motores assíncronos

NÚMERO DE PÓLOS	VELOCIDADE SINCRONISMO (RPM)	VELOCIDADE TÍPICA PLENA CARGA
2	3000	2900
4	1500	1440
6	1000	960
8	750	720
10	600	580
12	500	480
16	375	360

VELOCIDADES DE ROTAÇÃO TÍPICAS

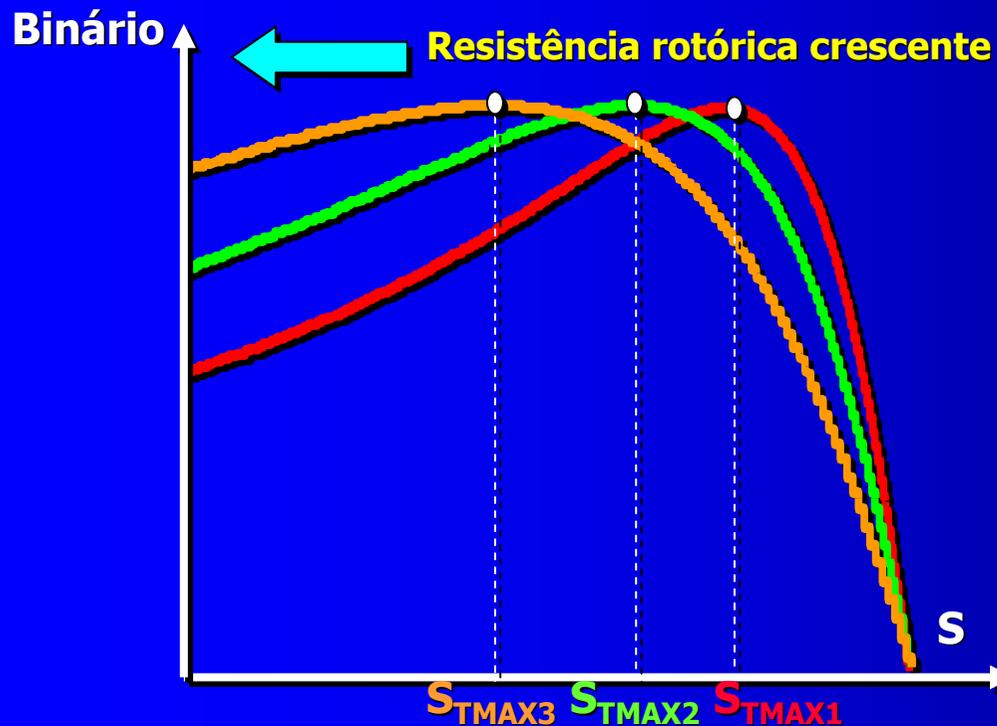
Fonte: ABB – *"Guide for selecting a motor"*

Características funcionais dos motores assíncronos



Evolução da temperatura dos enrolamentos desde o arranque até ao regime permanente (equilíbrio térmico)

Controlo das características mecânicas dos motores de indução ao nível do projecto do rotor



Se a resistência rotórica é elevada o binário de arranque do motor também o é

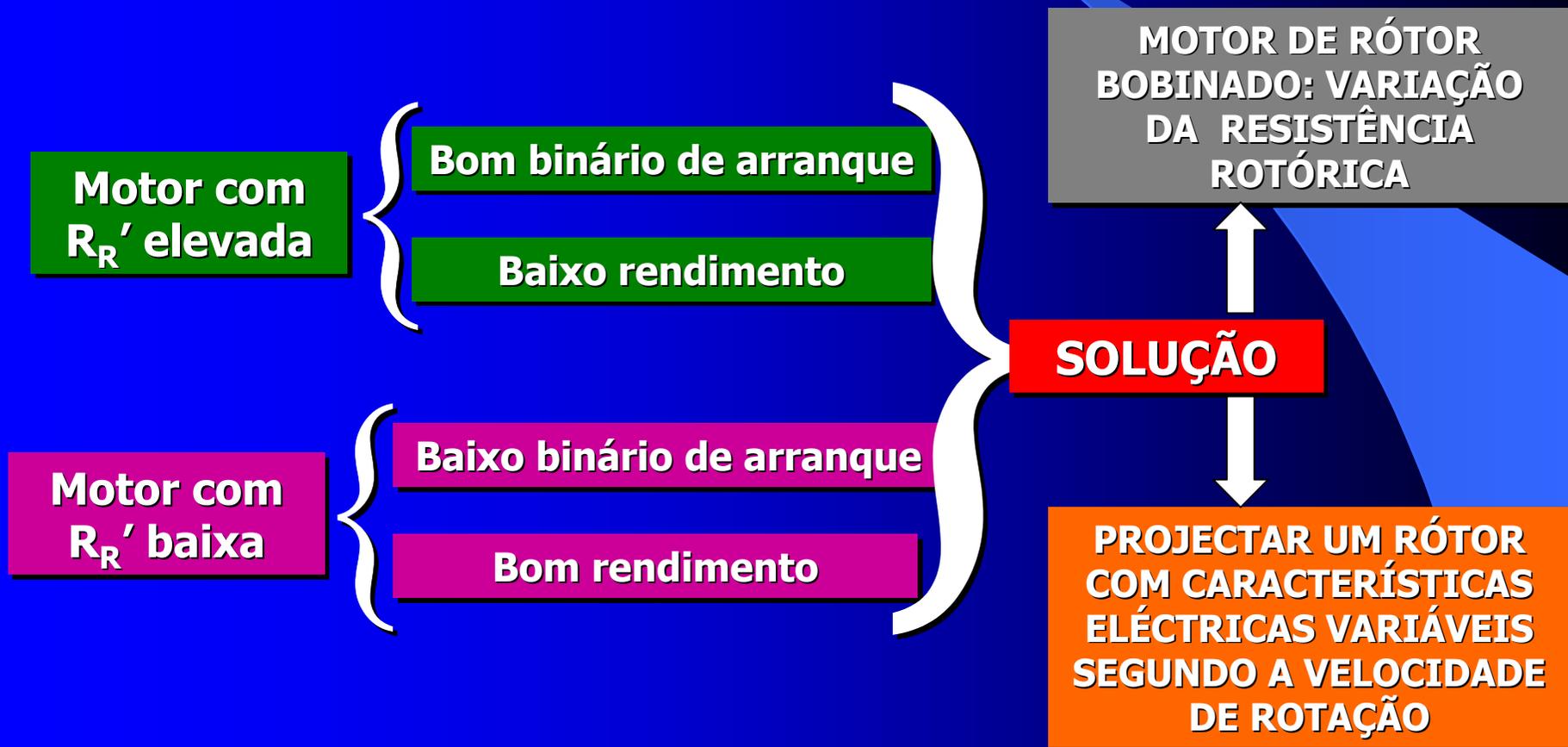
Se a resistência rotórica é elevada o binário máximo do motor aparece com deslizamento elevado

Se o deslizamento é elevado a potência mecânica interna é baixa

O RENDIMENTO DO MOTOR É BAIXO

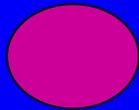
$$P_{mi} = [1 - S] \cdot P_g$$

Controlo das características mecânicas dos motores de indução ao nível de projecto do rotor



Controlo das características mecânicas dos motores de indução ao nível do projecto do rotor

Barras de pequena secção



Alta resistencia, baixa reactância de dispersão

A menor secção maior R_R'

Barras de ranhura profunda



Resistência baixa, reactância de dispersão elevada

Dupla gaiola

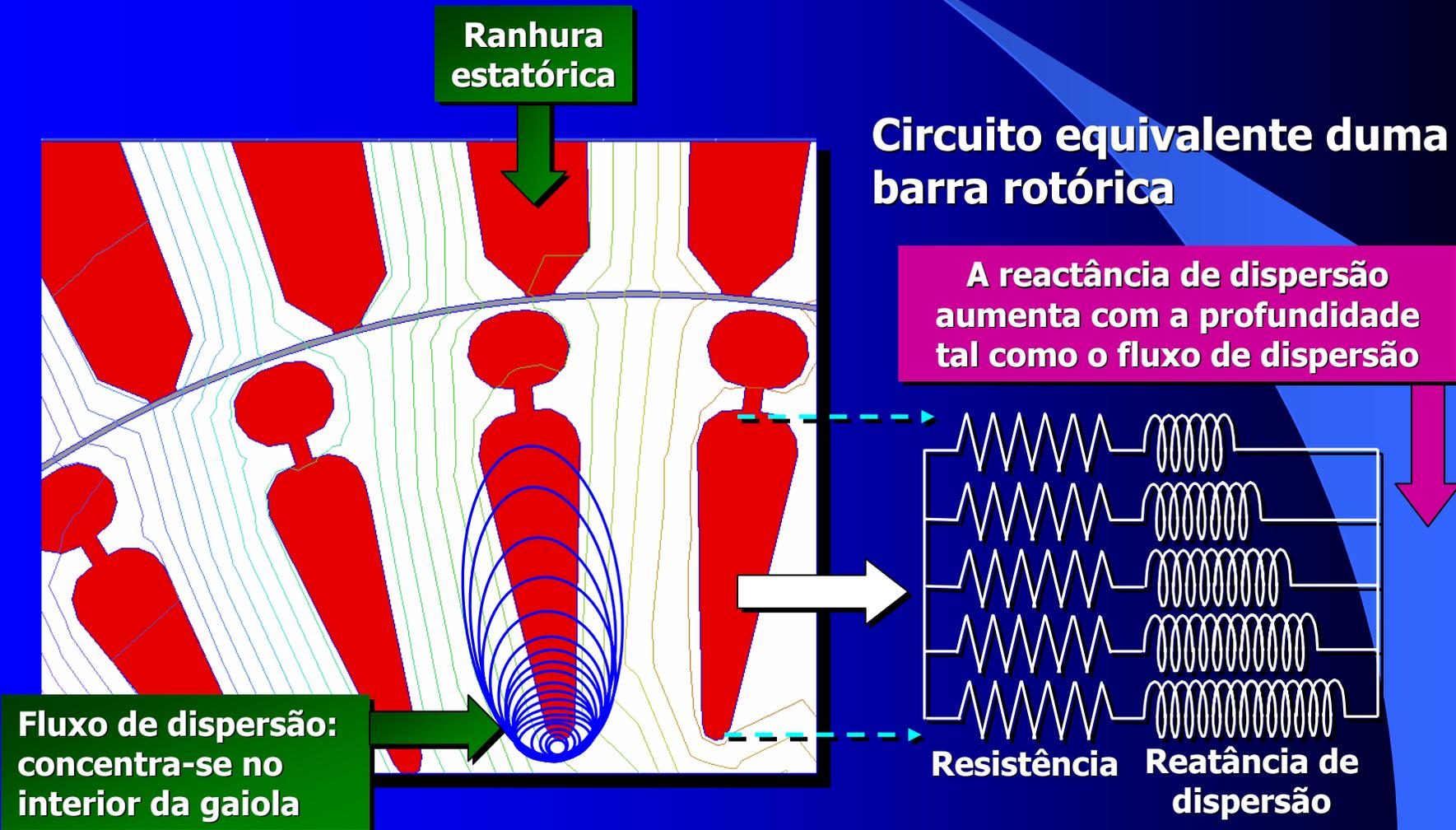


Combina as propriedades das duas anteriores

Podem usar-se dois tipos de material com diferente resistividade

A secção e geometria das barras rotóricas determina as propriedades eléctricas e a forma como variam em função da velocidade de rotação da máquina

Controlo das características mecânicas dos motores de indução ao nível do projecto do rotor



ARRANQUE

**S VALORES
ELEVADOS**

**$f_{\text{r\acute{o}tor}}$
ELEVADA**

**Efeito da react\ancia de
dispers\ao
($2\pi f_{\text{r\acute{o}tor} * L_{\text{dispers\ao}}$)
MUITO PRONUNCIADO**

**Aumento do
bin\ario de
arranque**

**Redu\cao da
sec\cao \u00fatil:
aumenta R_R'**

**A corrente circula s\o
pela parte mais
externa da barra**

**CONDI\cOES
NOMINAIS**

**S VALORES
BAIXOS**

**$f_{\text{r\acute{o}tor}}$
BAIXA**

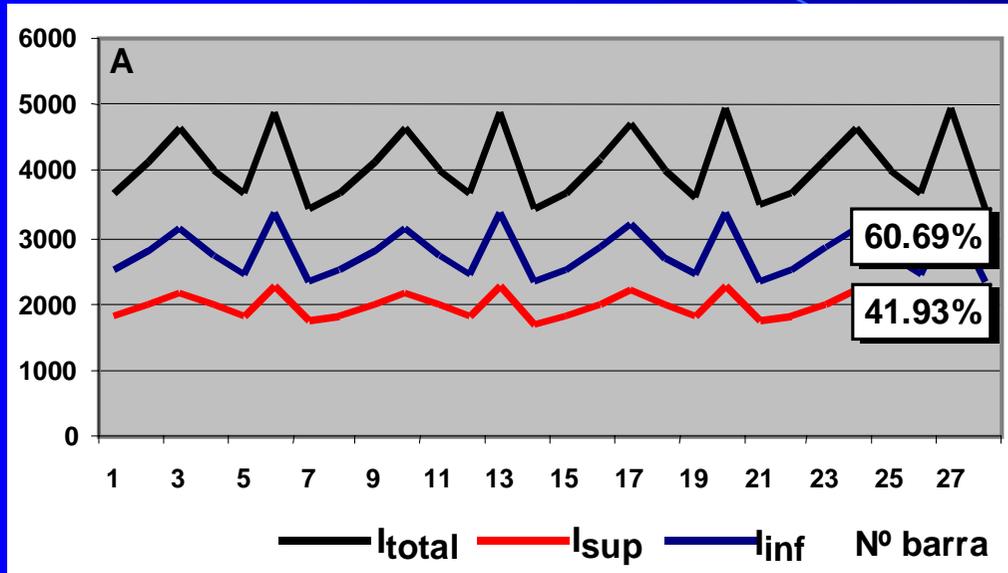
**Efeito da react\ancia de
dispers\ao
($2\pi f_{\text{r\acute{o}tor} * L_{\text{dispers\ao}}$)
MUITO REDUZIDO**

**Melhoria do
rendimento**

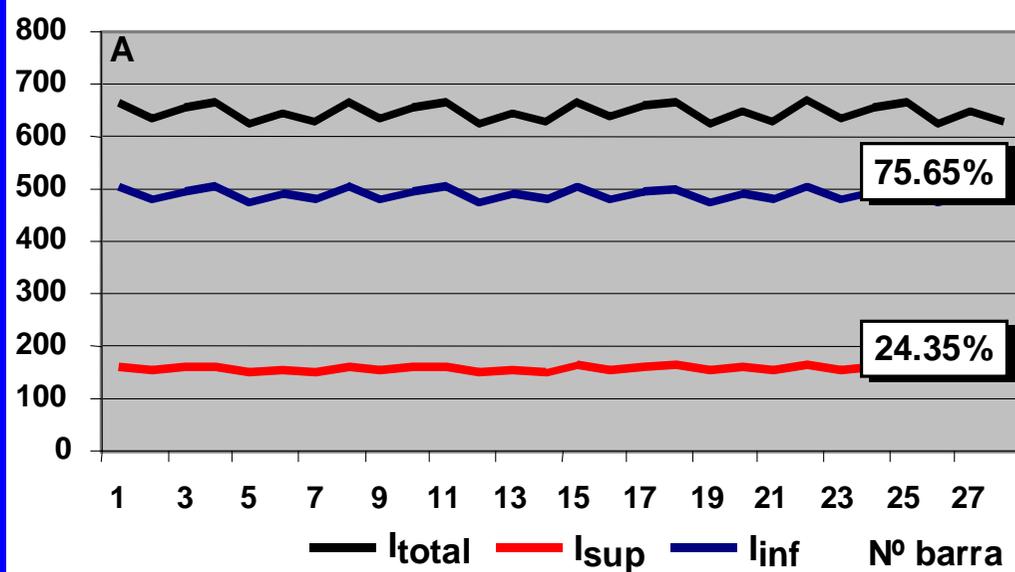
**Aumento
sec\cao \u00fatil:
Redu\cao de
 R_R' e Bin\ario**

**a corrente circula por
toda a sec\cao da
barra**

Simulação do efeito real



**DURANTE O ARRANQUE
CIRCULA 41,93% DA
CORRENTE PELA ZONA
VERMELHA DA BARRA**



**DURANTE O FUNCIONA-
MENTO EM CONDIÇÕES
NOMINAIS CIRCULA
24,35% DA CORRENTE
PELA ZONA VERMELHA DA
BARRA**



MOTOR SIMULADO

Fabricante: SIEMENS

Potencia: 11 kW

Tensão: 380 V

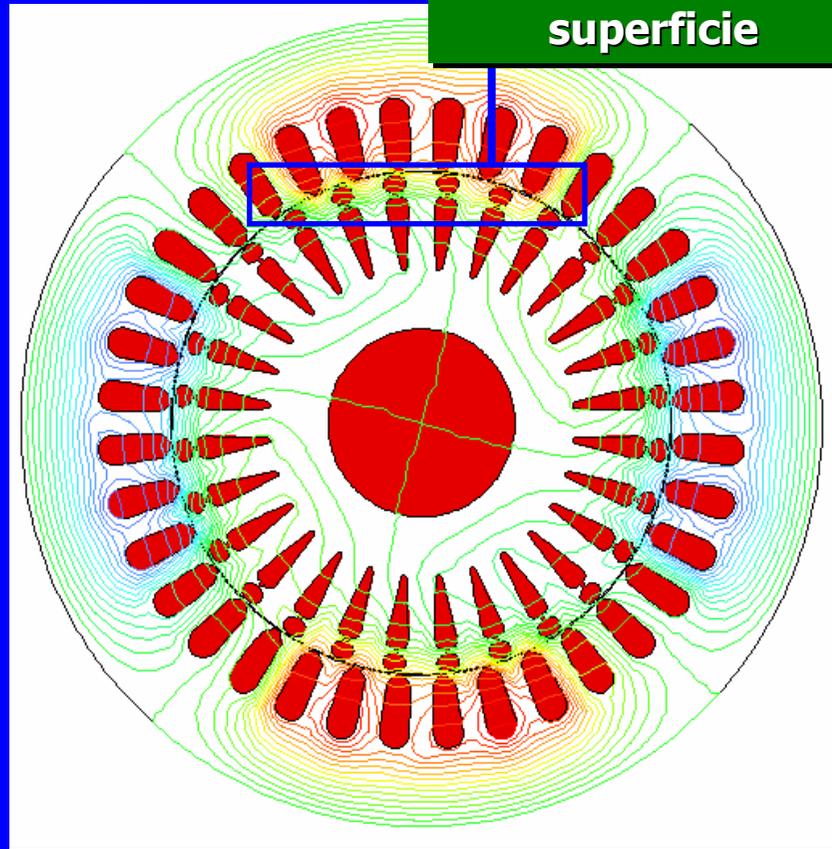
Corrente: 22 A

Velocidade : 1450 RPM

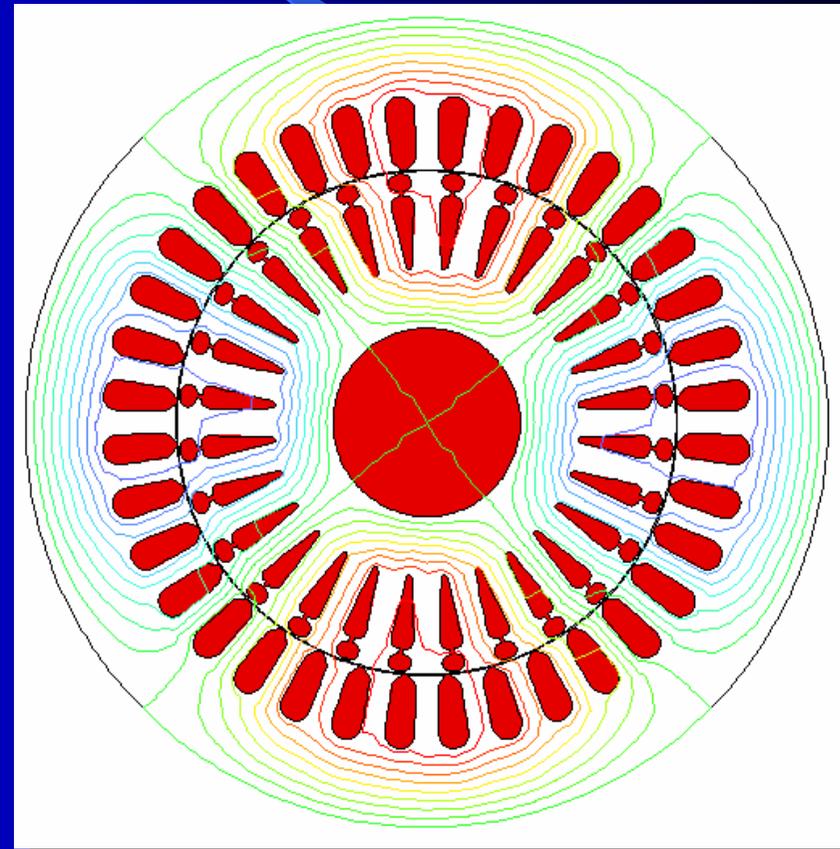
Pólos: 4

Simulação do campo real durante um arranque

As linhas de campo concentram-se na superfície



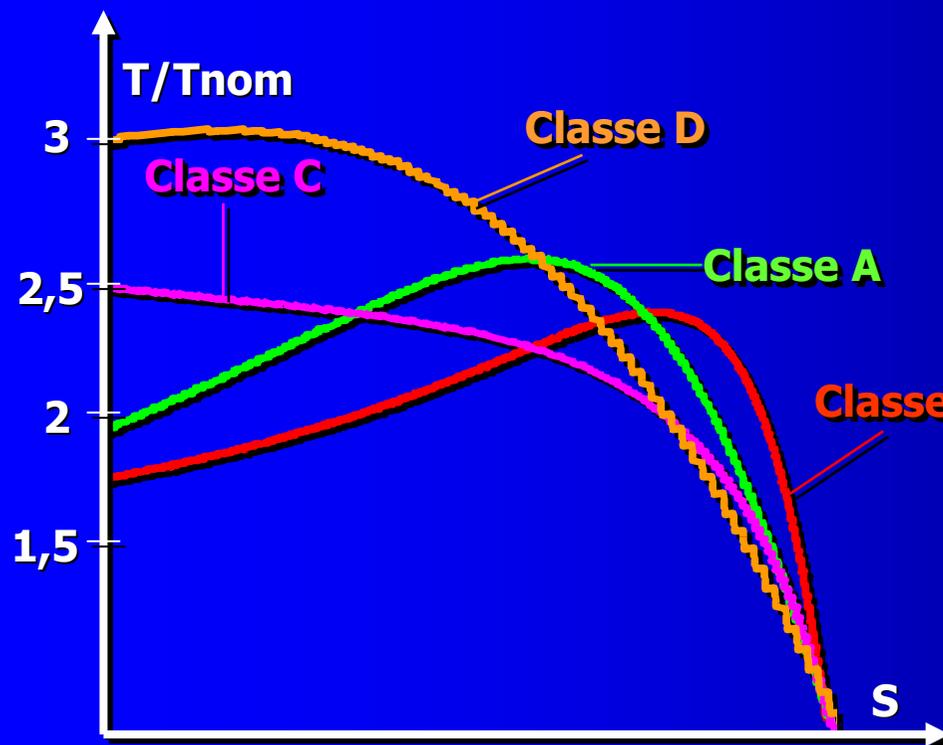
LÍNHAS DE CAMPO DURANTE O ARRANQUE



LÍNHAS DE CAMPO EM FUNCIONAMENTO NOMINAL

Classificação NEMA dos motores segundo o tipo de rotor

MOTOR CLASSE A



- Baixo binário de arranque
- Binário nominal com $S < 5\%$
- Corrente arranque elevada entre 5 – 8 In
- Rendimento elevado
- Uso em bombas, ventiladores, máquinas ferramenta, etc, até 5,5 kW
- Para potências $> 5,5$ kW usam-se sistemas de arranque para limitar a corrente

Classificação NEMA dos motores segundo o tipo de rotor

MOTOR CLASSE B

- Binário arranque similar classe A
- Corrente arranque 25% < classe A
- Binário nominal com $S < 5\%$
- Rendimento Elevado
- Aplicações similares à classe A mas com $< I$ arranque
- São OS MAIS UTILIZADOS

MOTOR CLASSE D

- Binário de arranque muito elevado ($> 3 T_{nom}$)
- Baixa corrente de arranque
- Binário nominal com S elevado (7 –17%)
- Baixo Rendimento
- Aplicação em accionamentos intermitentes que requerem uma rápida aceleração

MOTOR CLASSE C (Dupla gaiola)

- Binário arranque elevado (o dobro do T_{nom} aprox.)
- Corrente de arranque baixa
- Binário nominal com $S < 5\%$
- Rendimento Elevado
- Aplicações que requerem elevado binário de arranque
- $T_{max} < \text{classe A}$

Características mecânicas das cargas mais habituais dos motores de indução

$$T_R = K * N^2$$

- Bombas centrífugas
- Compressores centrífugos
- Ventiladores e sopradores
- Centrifugadoras

$$T_R = K * N$$

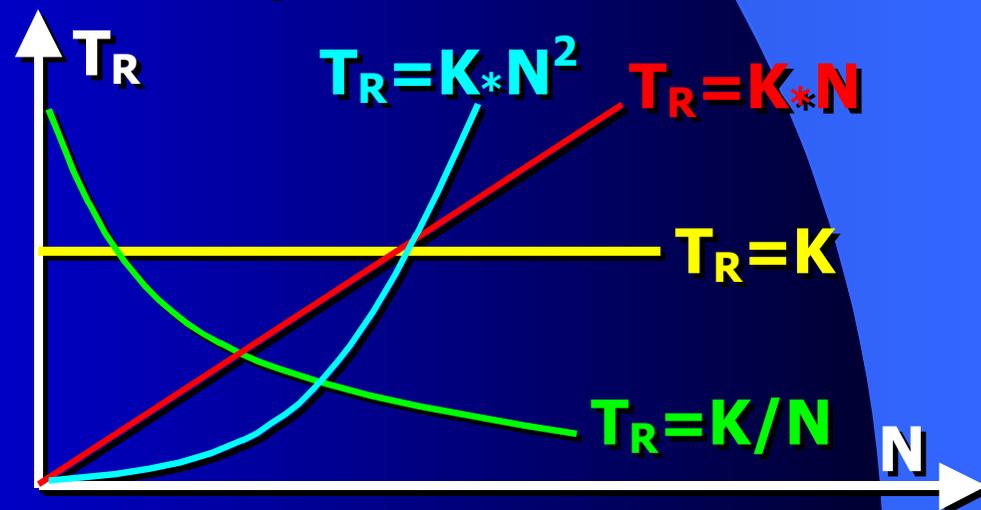
- Prensas
- Máquinas ferramenta

$$T_R = K / N$$

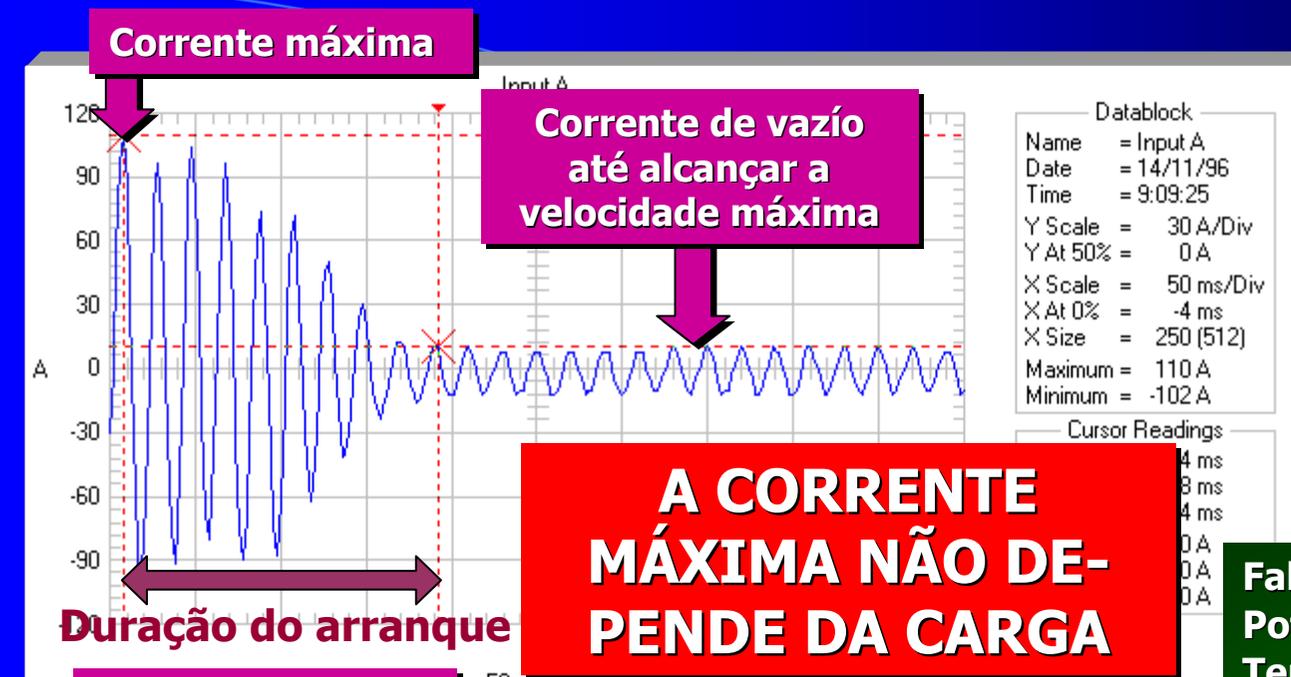
- Bobinadoras
- Máquinas fabrico chapa

$$T_R = K$$

- Máquinas elevação
- Correias transportadoras
- Trituradores e Rachadores
- Compressores e bombas de pistão

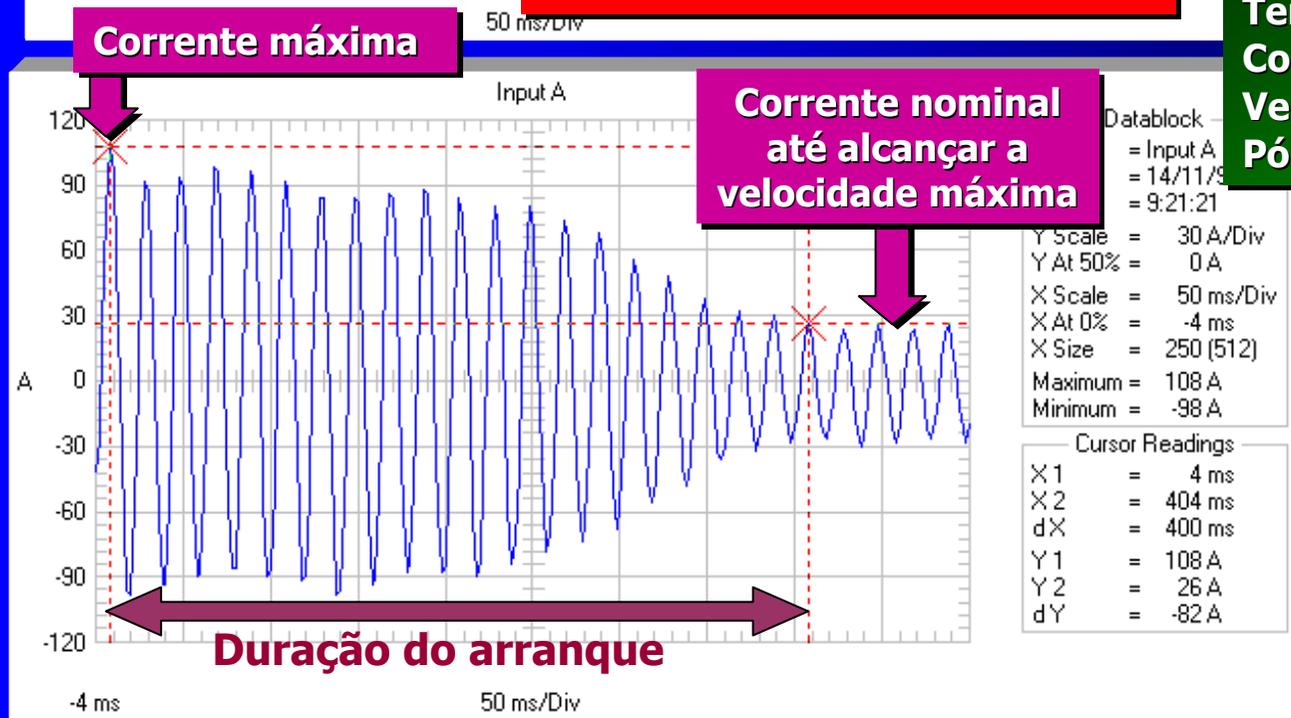


O arranque de motores assíncronos



Arranque em vazio

Fabricante: EMOD
Potência: 7,5 kW
Tensão: 380 V
Corrente: 17 A
Velocidade : 946 RPM
Pólos: 6



Arranque à plena carga

O arranque de motores assíncronos

O regulamento de BT estabelece limites para a corrente de arranque de motores. Tornando necessária a utilização de mecanismos especiais durante esta fase que limitem a corrente

Métodos de arranque

Arranque directo da rede

Só para pequenos motores ou nas centrais eléctricas

Arranque através da inserção de resistências no rotor

Só para motores de rotor bobinado e de anéis deslizantes

Arranque estrela – triângulo

Método mais utilizado (e barato)

Arranque com auto-transformador

Redução da tensão durante o arranque por auto-transformador

Arranque com arrancadores estáticos

Controlo do motor durante o arranque por equipamento electrónico

O arranque de motores assíncronos

$$T_i = \frac{P_g}{\Omega_s} = \frac{3}{\Omega_s} \cdot \frac{V_{th}^2 \cdot \frac{R_{R'}}{S}}{\left[R_{th} + \frac{R_{R'}}{S} \right]^2 + [X_{th} + X_{R'}]^2}$$

Binário dum motor assíncrono.
No arranque $S=1$

BINÁRIO DE ARRANQUE

$$T_{Arranque} = \frac{P_g}{\Omega_s} = \frac{3}{\Omega_s} \cdot \frac{V_{th}^2 \cdot R_{R'}}{\left[R_{th} + R_{R'} \right]^2 + [X_{th} + X_{R'}]^2}$$

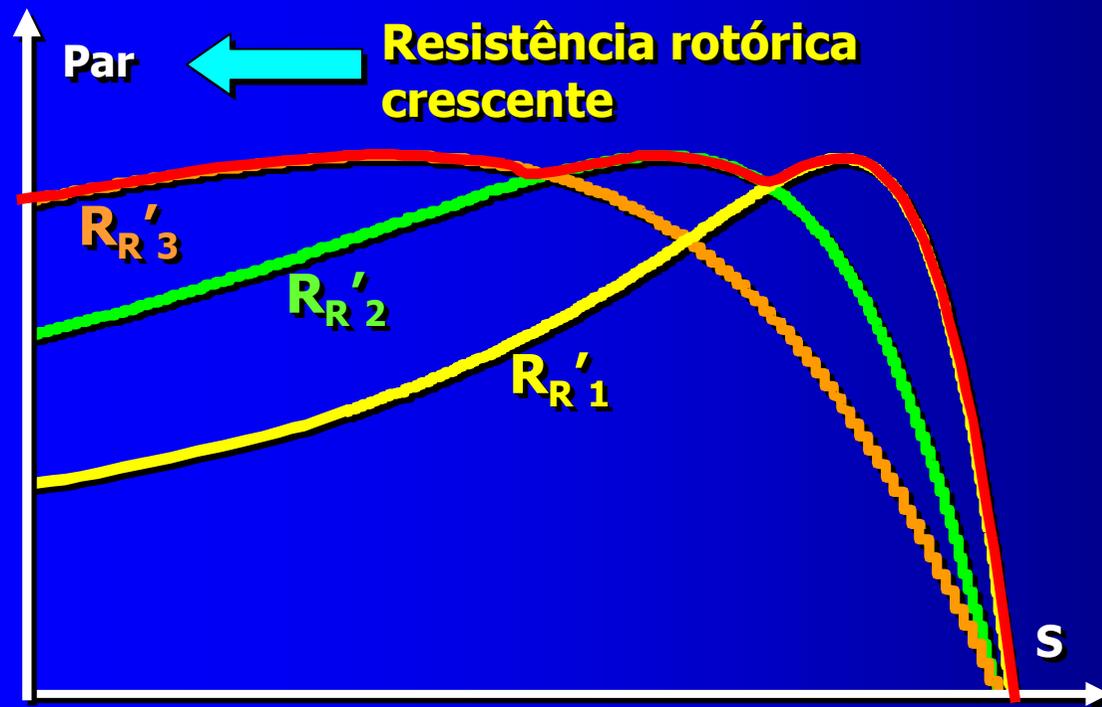
$$I_{R'} = \frac{V_{th}}{\sqrt{\left[R_{th} + \frac{R_{R'}}{S} \right]^2 + [X_{th} + X_{R'}]^2}}$$

Corrente rotórica.
No arranque $S=1$

$$T_{Arranque} = \frac{3}{\Omega_s} \cdot R_{R'} \cdot I_{R' \text{ Arranque}}^2$$

$$I_{R' \text{ arranque}} = \frac{V_{th}}{\sqrt{\left[R_{th} + R_{R'} \right]^2 + [X_{th} + X_{R'}]^2}}$$

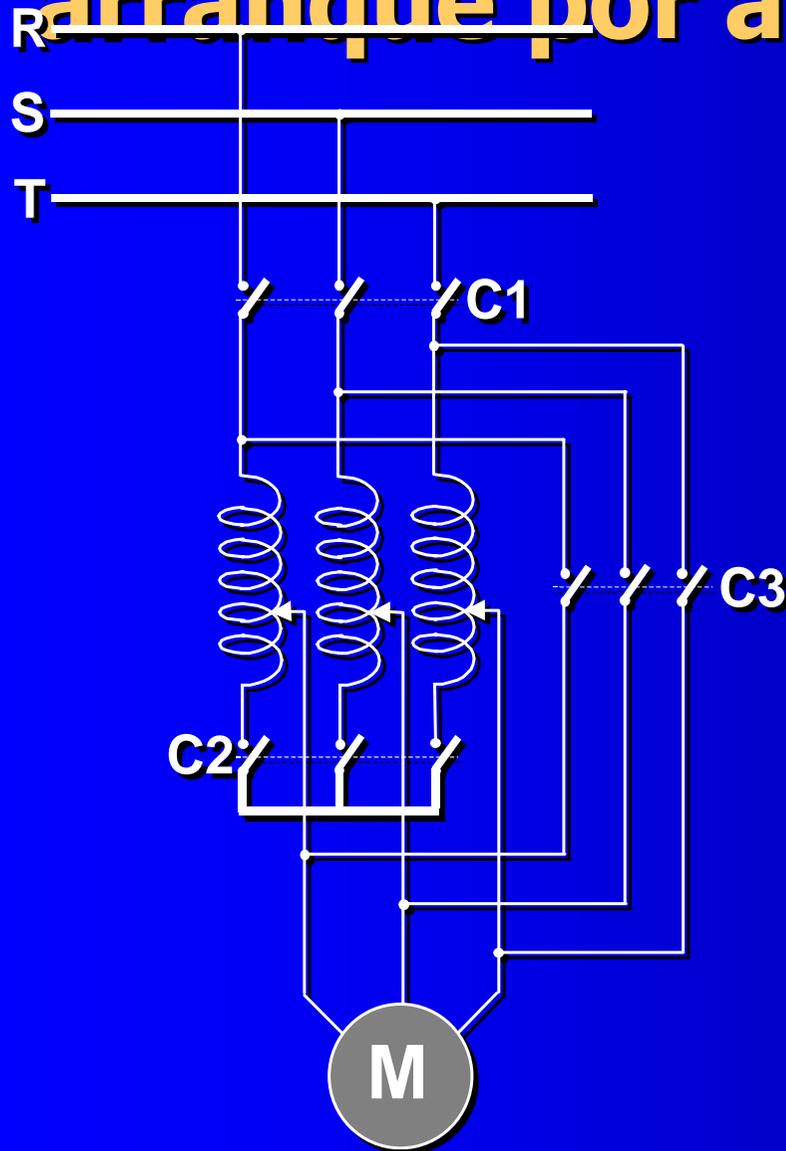
O arranque de motores assíncronos: Arranque por inserção de resistências rotóricas



Para o arranque da máquina introduzem-se resistências entre os anéis deslizantes e que se vão retirando à medida que aumenta a velocidade de rotação

Só é possível para motores de rotor bobinado e anéis deslizantes

O arranque de motores assíncronos: arranque por auto-transformador



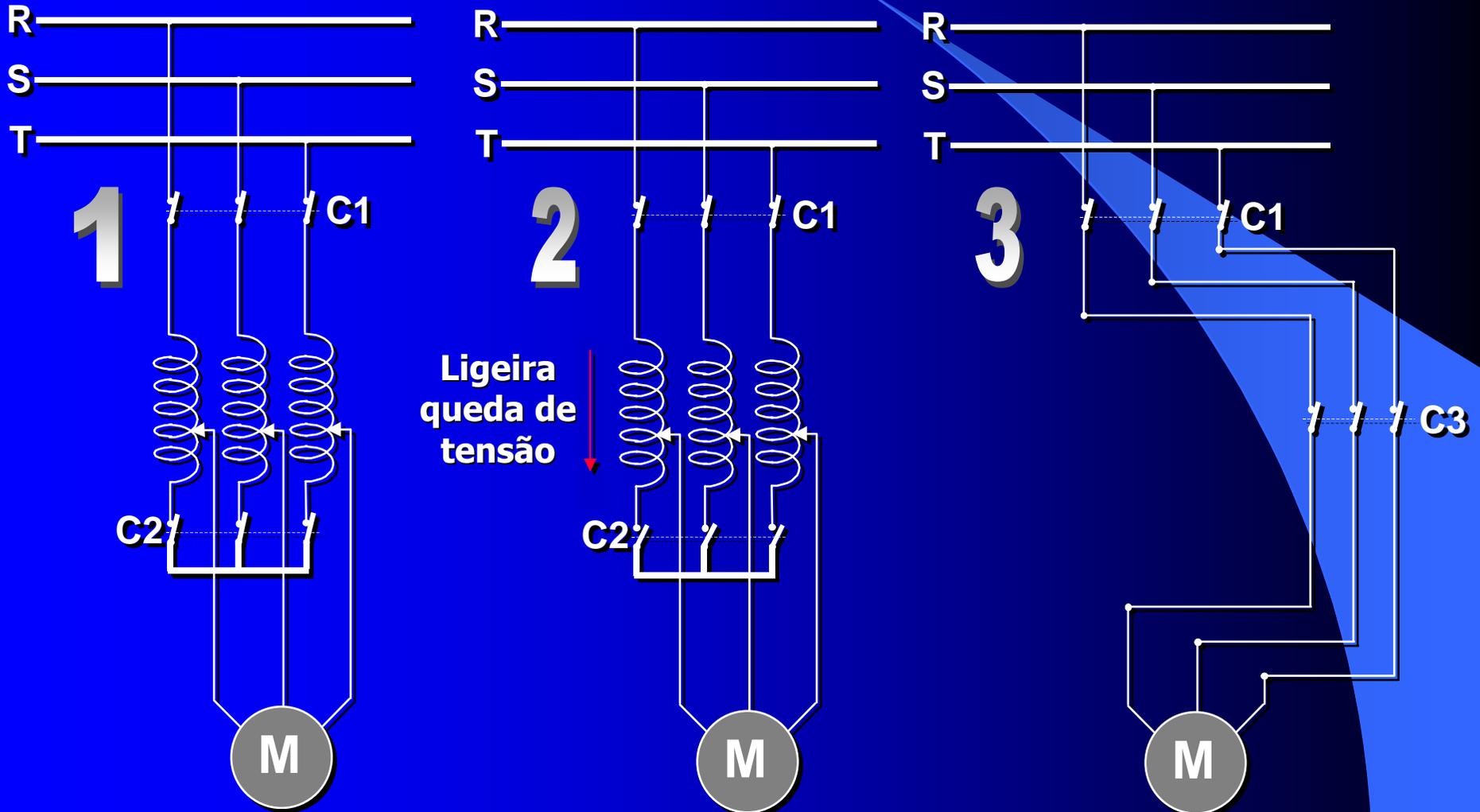
Para o arranque da máquina
introduz-se um auto-transformador
reductor ($r_t > 1$)

Inicialmente C1 e C2 estão fechados: O
motor arranca com tensão reduzida

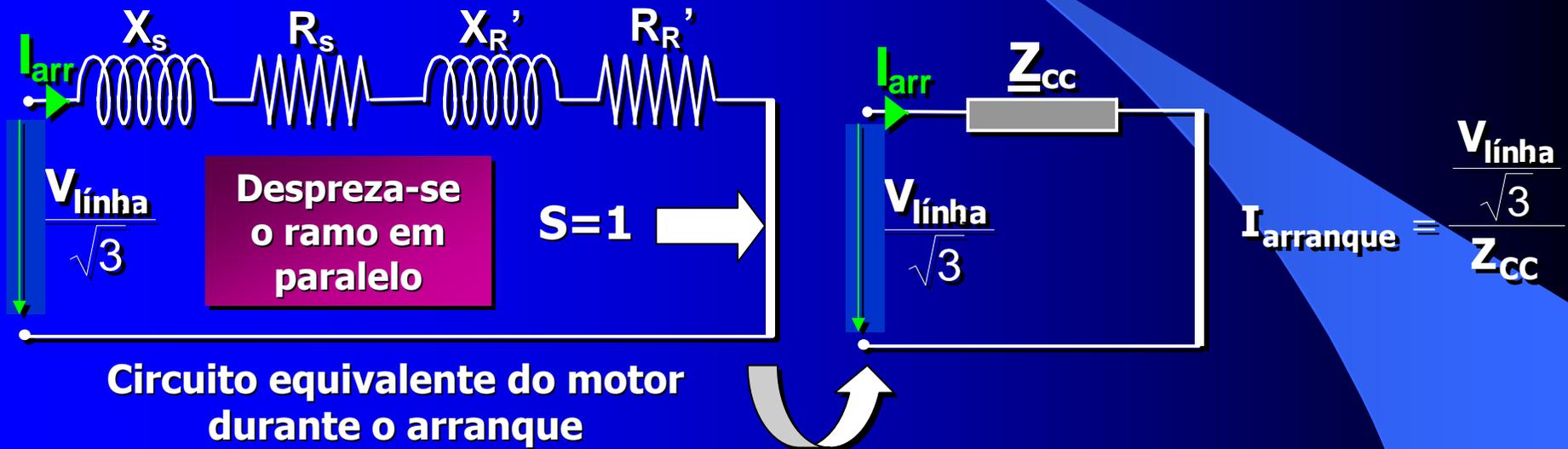
Nas proximidades da plena carga abre-se
C2, o motor suporta uma tensão
ligeiramente inferior à da rede devido às
quedas de tensão no autotransformador

Fecha-se C3: o motor suporta toda a
tensão da rede

Fases do arranque por auto-transformador



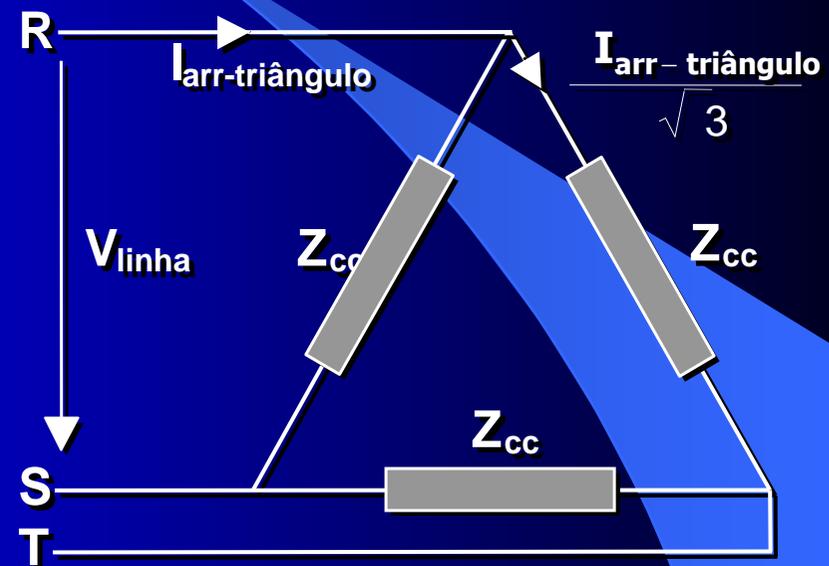
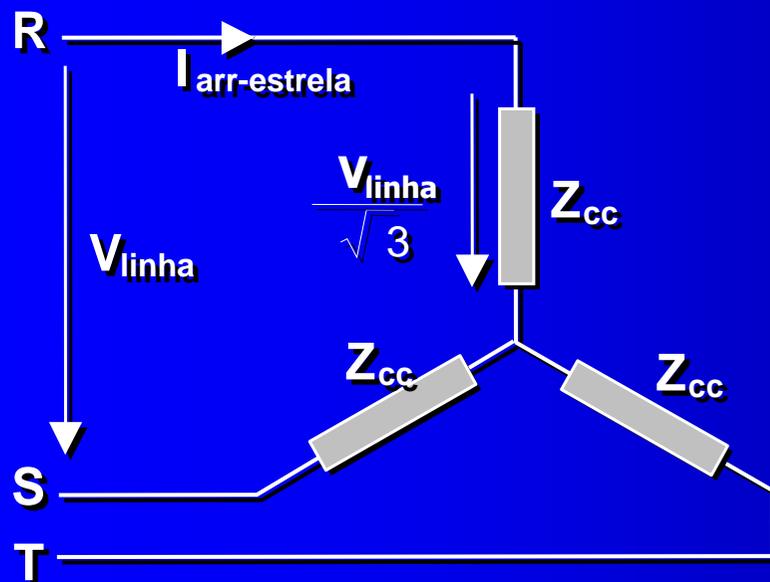
O arranque de motores assíncronos arranque estrela - triângulo



O arranque estrela - triângulo consiste em ligar os enrolamentos do motor em estrela durante o arranque da máquina, comutando a ligação para triângulo uma vez que a máquina tenha atingido a sua velocidade

O motor ligado em estrela absorve menos corrente e entrega menos binário. De este modo, limita-se a corrente de arranque.

O arranque de motores assíncronos: arranque estrela - triângulo

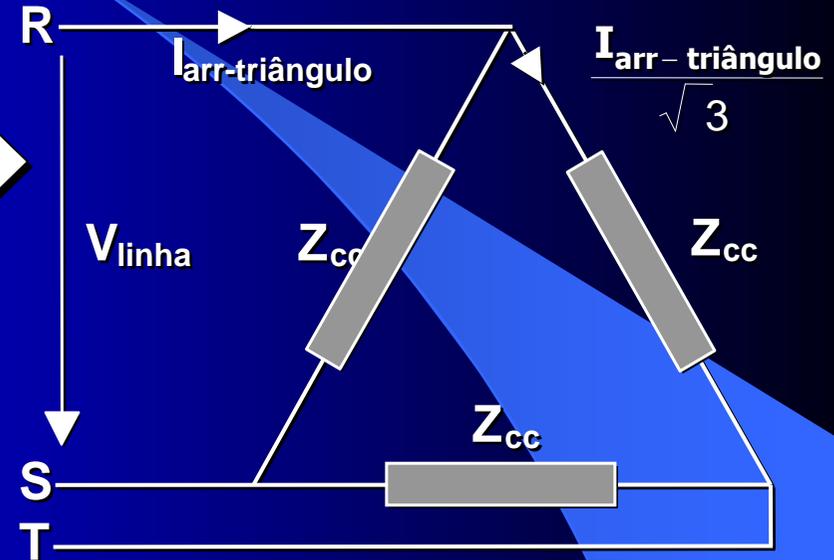
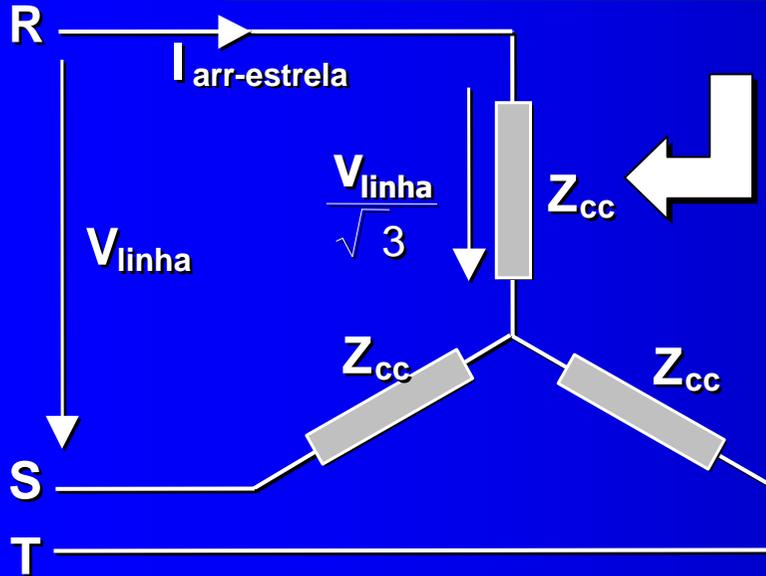


$$I_{\text{arr-estrela}} = \frac{\frac{V_{\text{linha}}}{\sqrt{3}}}{Z_{\text{cc}}} \quad \rightarrow \quad I_{\text{arr-triângulo}} = \sqrt{3} \frac{V_{\text{linha}}}{Z_{\text{cc}}}$$

$$I_{\text{arr-estrela}} = \frac{I_{\text{arr-triângulo}}}{3}$$

$$T_{\text{Arranque}} = \frac{3}{\Omega_S} \cdot R_R' \cdot I_{R' \text{ Arranque}}^2$$

Esta relação é válida para as duas ligações. Sendo a corrente que nela aparece a que circula por Z_{cc}



$$T_{\text{Arr-estrela}} = \frac{3}{\Omega_S} \cdot R_R' \cdot I_{R' \text{ Arr-estrela}}^2$$

$$T_{\text{Arr-triângulo}} = \frac{3}{\Omega_S} \cdot R_R' \cdot \left[\frac{I_{R' \text{ Arr-triângulo}}}{\sqrt{3}} \right]^2$$

$$I_{\text{arr-estrela}} = \frac{I_{\text{arr-triângulo}}}{3}$$

$$T_{\text{arr-triângulo}} = 3 T_{\text{arr-estrela}}$$



Arrancadores estáticos com microprocessador de potências até 2500 kW 7200V



Arrancador 90 kW 690V

Catálogos comerciais

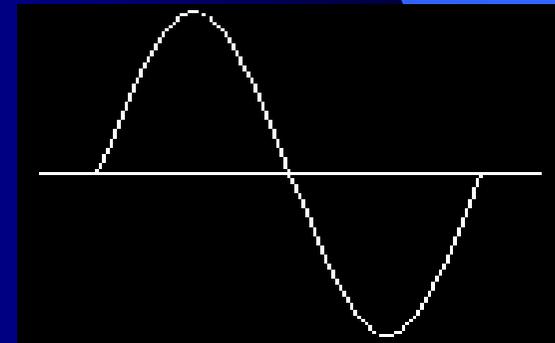


Arrancador 4 kW



Arrancador para aplicações navais e militares

Arrancadores estáticos



Catálogos comerciais

A frenagem eléctrica de motores assíncronos

Existem aplicações em que é necessário poder aplicar um binário de frenagem ao motor que permita detê-lo rapidamente: ascensores, gruas, cintas transportadoras, tracção eléctrica, etc. Neste caso, utilizam-se as propriedades eléctricas da máquina para efectuar a frenagem.

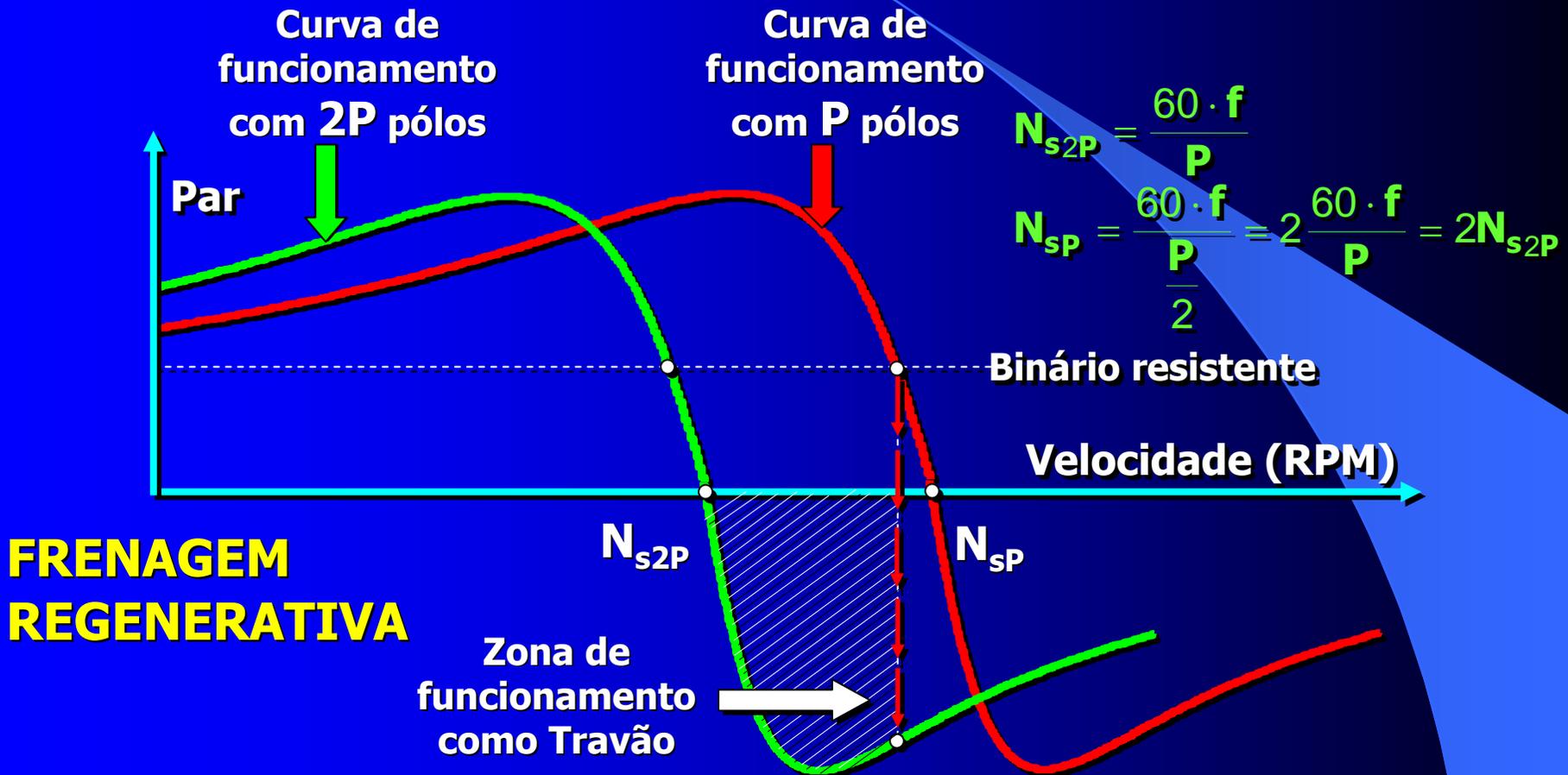
TIPOS DE FRENAGEM ELÉCTRICA

FRENAGEM REGENERATIVA POR RECUPERAÇÃO DE ENERGÍA

FRENAGEM POR CONTRACORRENTE OU CONTRA-MARCHA

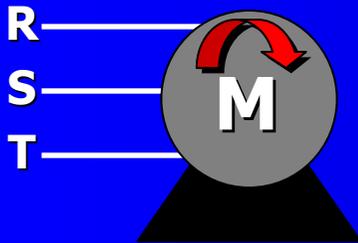
FRENAGEM DINÁMICA (Por injeccção de CC)

A frenagem eléctrica de motores assíncronos

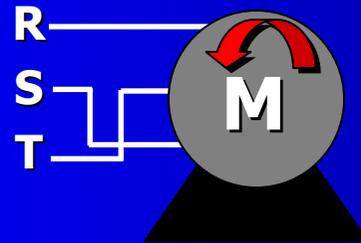


Para travar o motor, alteram-se as ligações do estátor passando de P pólos a 2P pólos. A travagem consegue-se ao convertendo o motor em gerador. A energia gerada dissipa-se em resistências ou é devolvida à rede

A frenagem eléctrica de motores assíncronos



Funcionamento normal:
roda num sentido



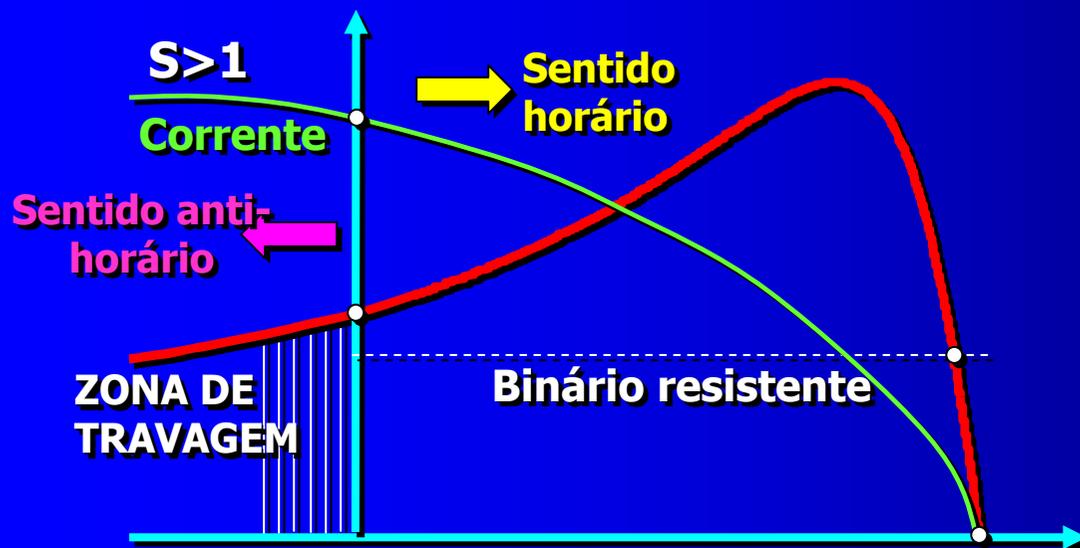
Frenagem a contracorrente: inversão do sentido de rotação

$$S = \frac{-N_s - N}{-N_s} = \frac{N_s + N}{N_s} = 1 + \frac{N}{N_s}$$

$$S > 1 \quad S \cong 2$$

LIMITAÇÕES

- Baixo Binário de frenagem
- Frenagem na zona instável da curva Binário-S
- Durante a frenagem a corrente é muito alta
- Solicitação do rotor extremamente elevada
- Necessário construção especial



A frenagem eléctrica de motores assíncronos

A **FRENAGEM DINÁMICA** consiste em duas acções no funcionamento do motor: Corte da alimentação em Corrente Alternada e injeção de Corrente Contínua no estátor.

A injeção de Corrente Contínua provoca a aparição de um campo de eixo fixo que gera um binário de frenagem

Catálogos comerciais



Resistências para frenagem reostática de motores

Equipamento para a frenagem de motores assíncronos por injeção de CC (Potência 315 kW)



Catálogos comerciais

Cálculo de tempos de arranque e de frenagem

$$J = \int r^2 \cdot dm \longrightarrow$$

Momento de inércia de um corpo de massa M em relação a um eixo. r é a distância ao eixo

$Kg \cdot m^2$

$$T - T_R = [J_{mot} + J_{carg}] \frac{d\omega}{dt} \longrightarrow$$

Equação da dinâmica de rotação: T é o binário motor, T_R o binário resistente J_{mot} o momento de inércia do motor, J_{carg} o da carga e ω a velocidade de rotação

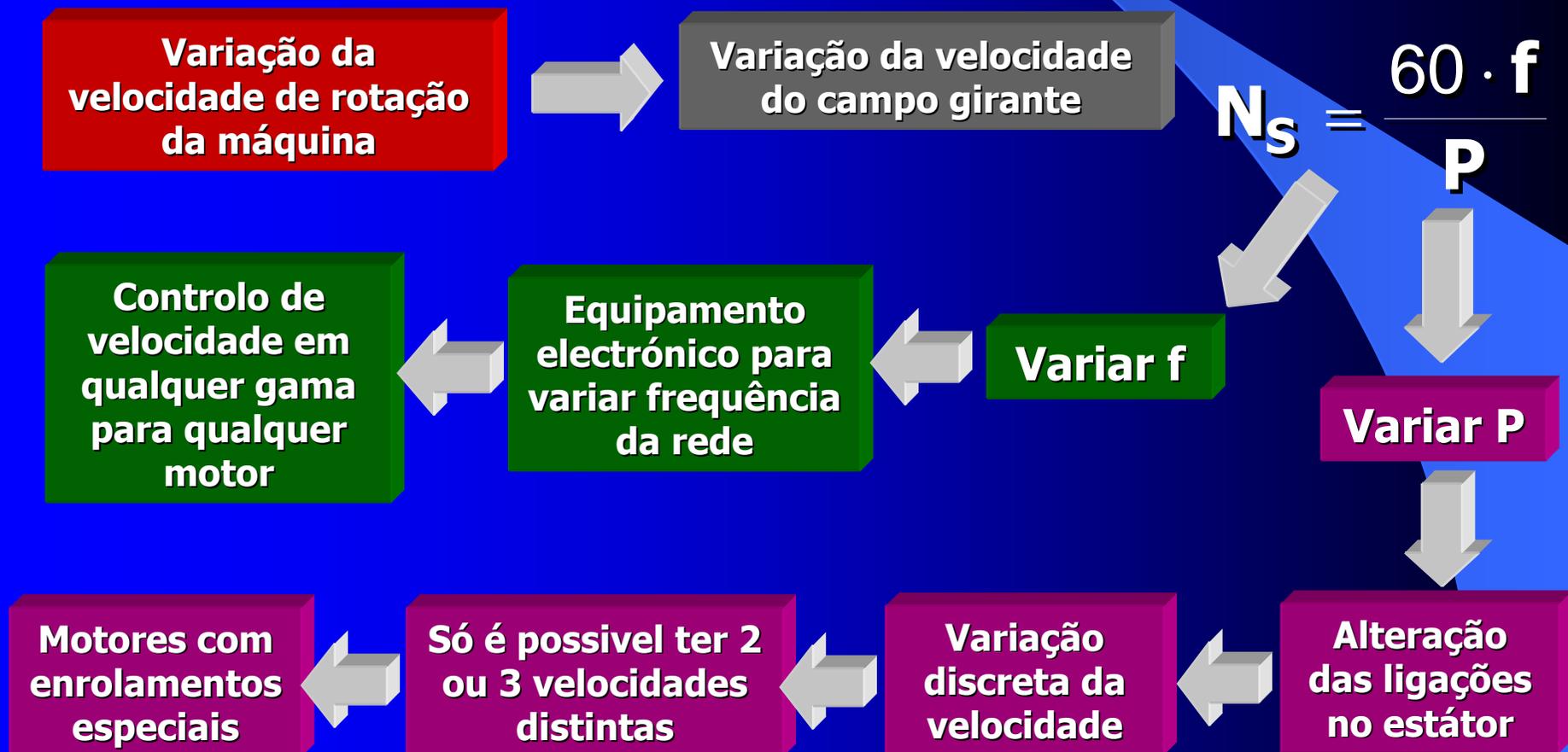
$$t_{arranque} = \int_0^{\omega_{nominal}} \left[\frac{J_{mot} + J_{carg}}{T - T_R} \right] \cdot d\omega \longrightarrow$$

Integrando a equação obtém-se o tempo de arranque

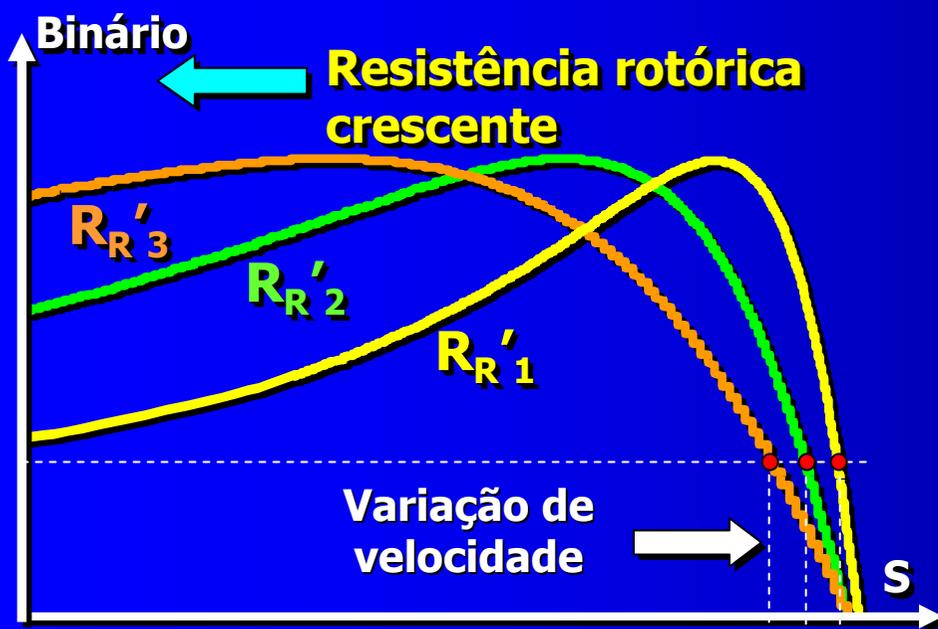
$$t_{frenagem} = \int_{\omega_{nominal}}^0 \left[\frac{J_{mot} + J_{carg}}{T - [T_R + T_{frenagem}]} \right] \cdot d\omega \longrightarrow$$

$T_R + T_{frenagem}$ é o binário resistente total se se efectuar a frenagem

A variação de velocidade de motores assíncronos

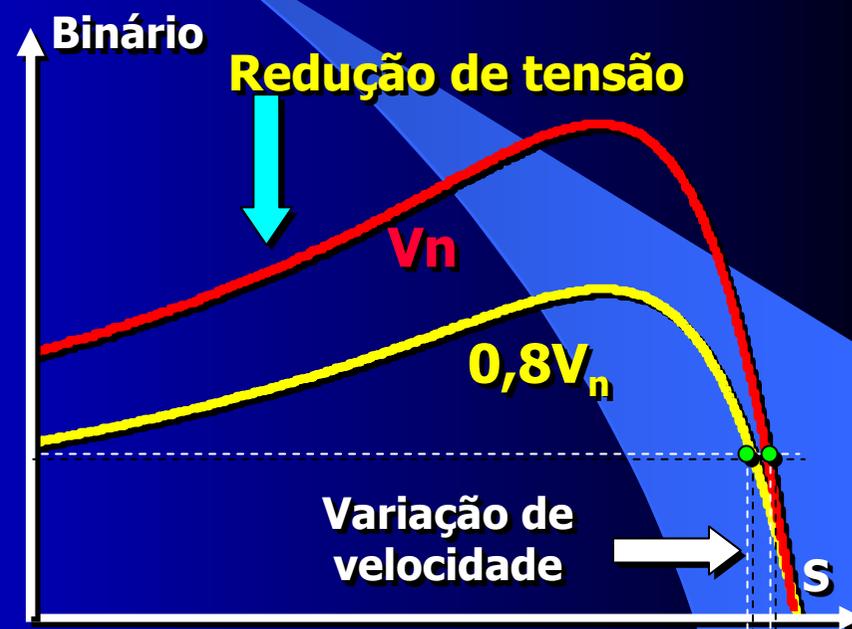


A variação de velocidade de motores assíncronos: métodos particulares



VARIAÇÃO DE VELOCIDADE POR
INSERÇÃO DE RESISTÊNCIAS
ROTÓRICAS EM MOTORES DE RÓTOR
BOBINADO

BAIXA GAMA DE VARIAÇÃO

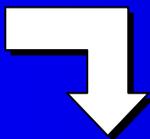


VARIAÇÃO DA VELOCIDADE POR
REDUÇÃO DE TENSÃO

BAIXA GAMA DE VARIAÇÃO

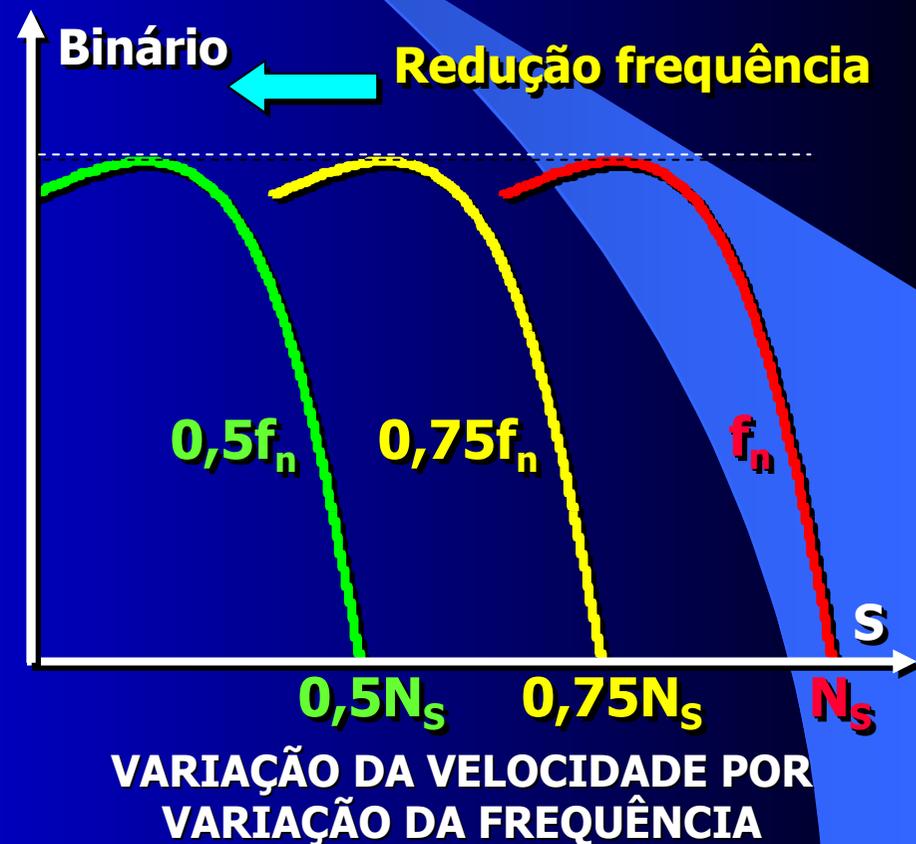
REDUÇÃO DO BINÁRIO MOTOR

A variação de velocidade de motores assíncronos: Variação de frequência

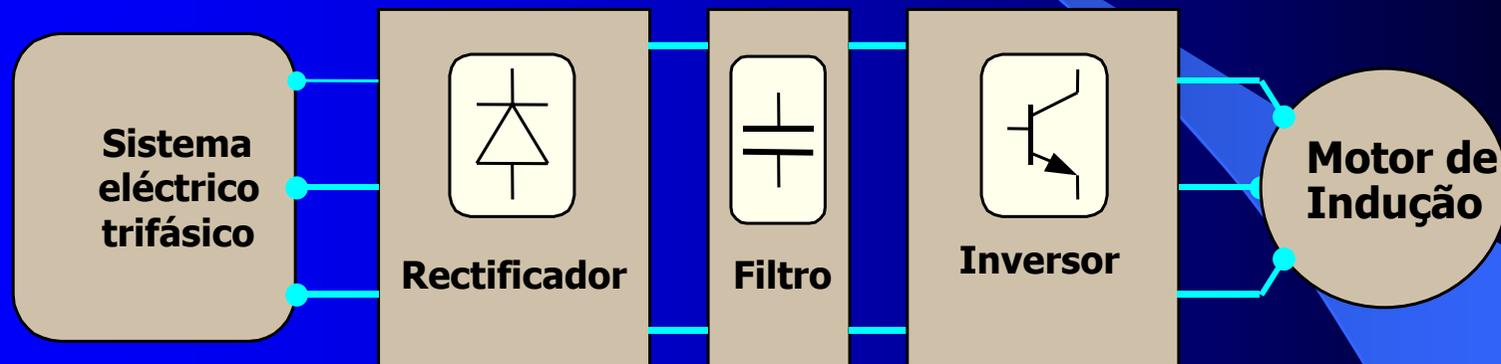
$$N_s = \frac{60 \cdot f}{p}$$


VARIANDO DE FORMA CONTÍNUA A FREQUÊNCIA PODE-SE VARIAR DE FORMA CONTÍNUA A VELOCIDADE

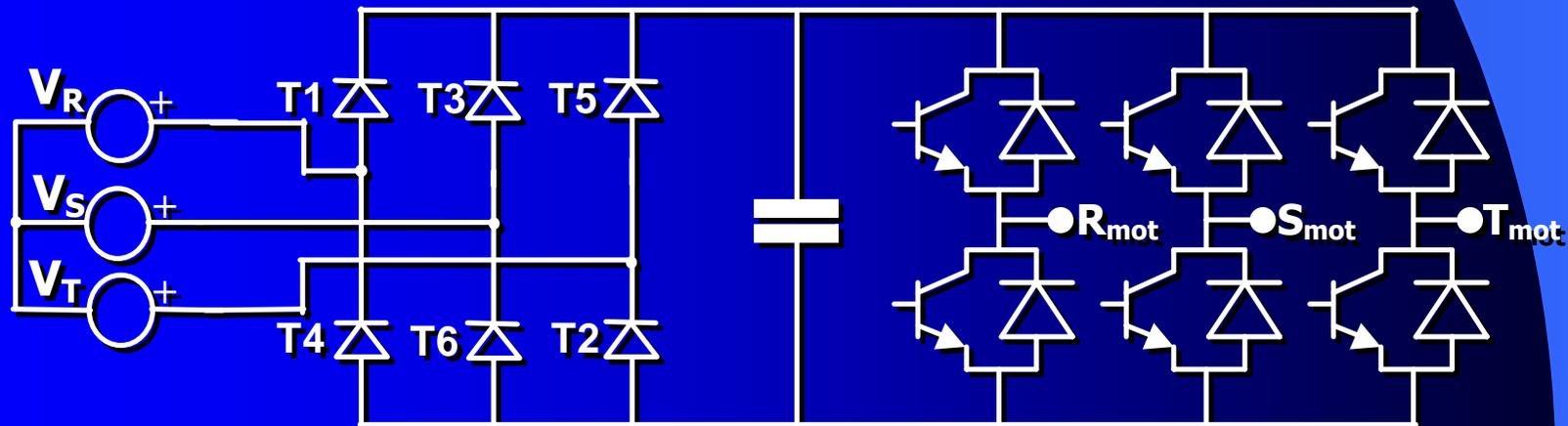
Ao reduzir a frequência aumenta o fluxo. Para evitar que a máquina se sature é necessário manter a relação **V/f constante**: ao diminuir f aumenta-se V e vice-versa



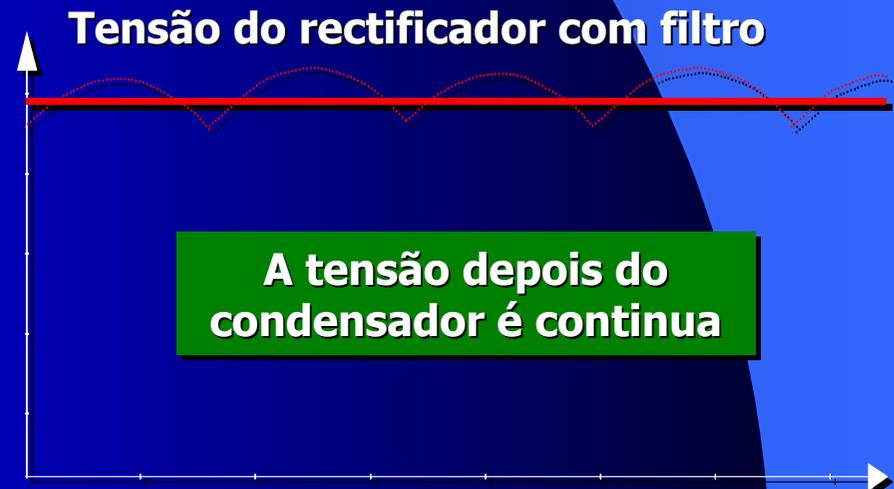
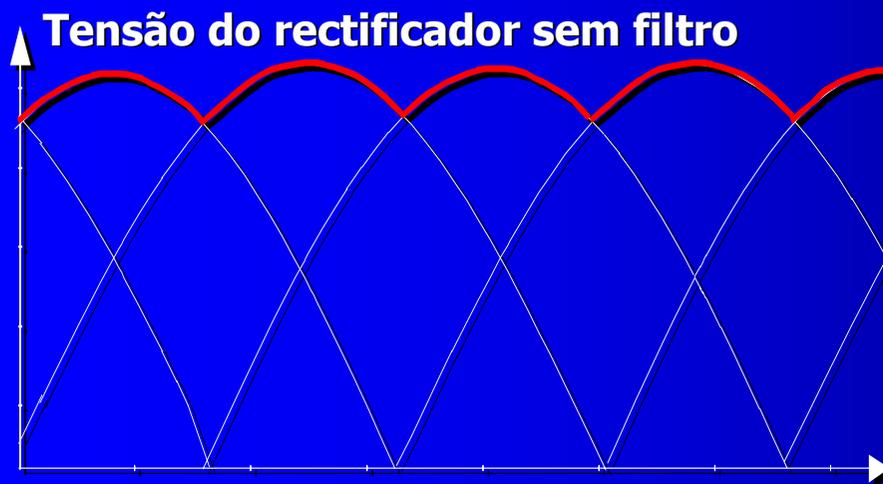
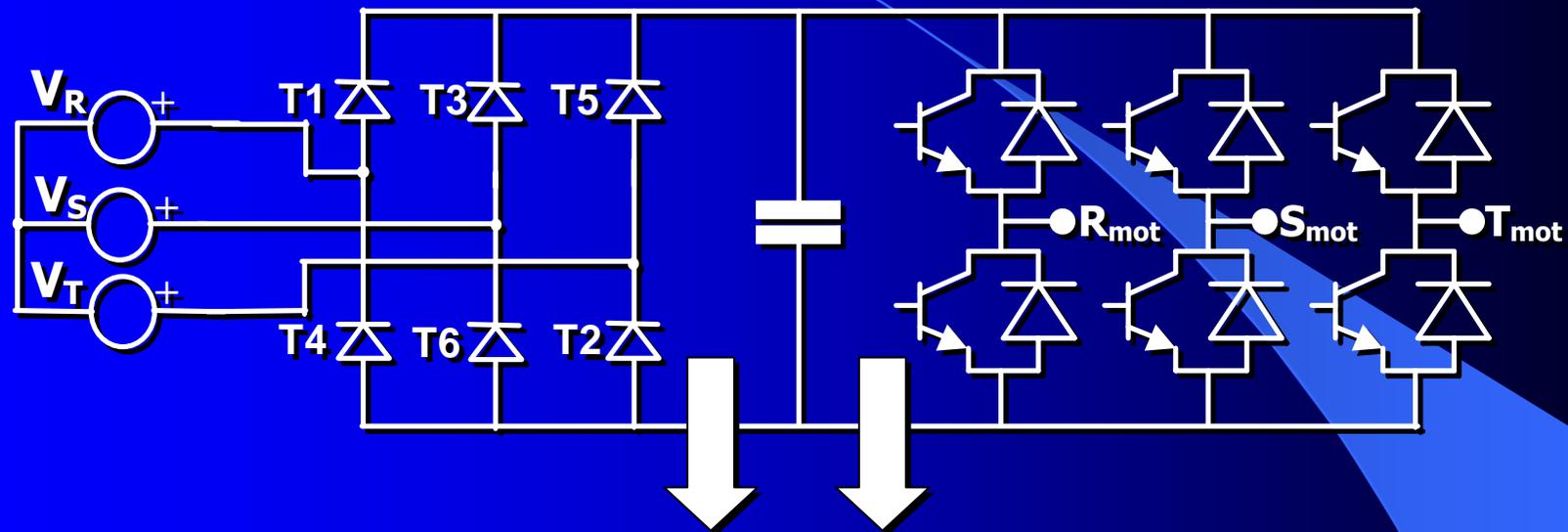
A variação de velocidade de motores assíncronos: variação de frequência



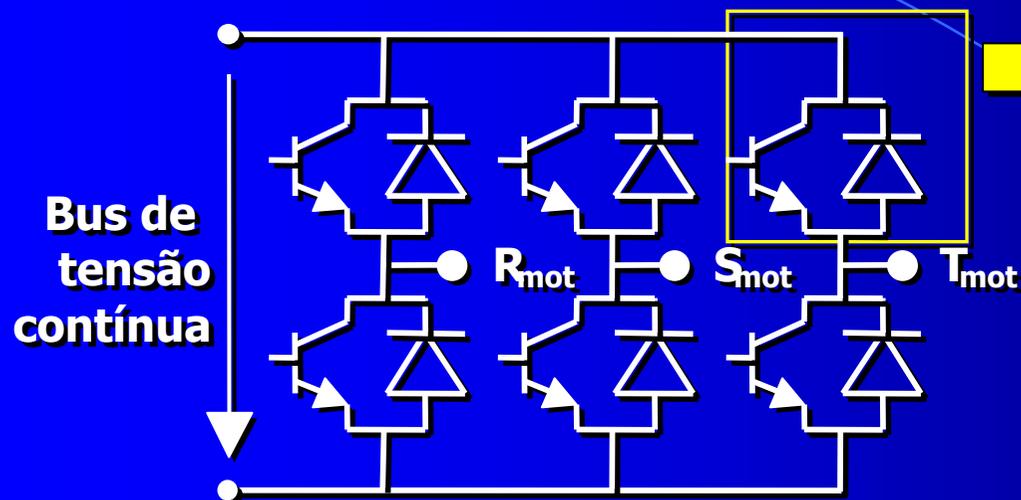
INVERSOR PWM



Funcionamento do inversor



Funcionamento do inversor



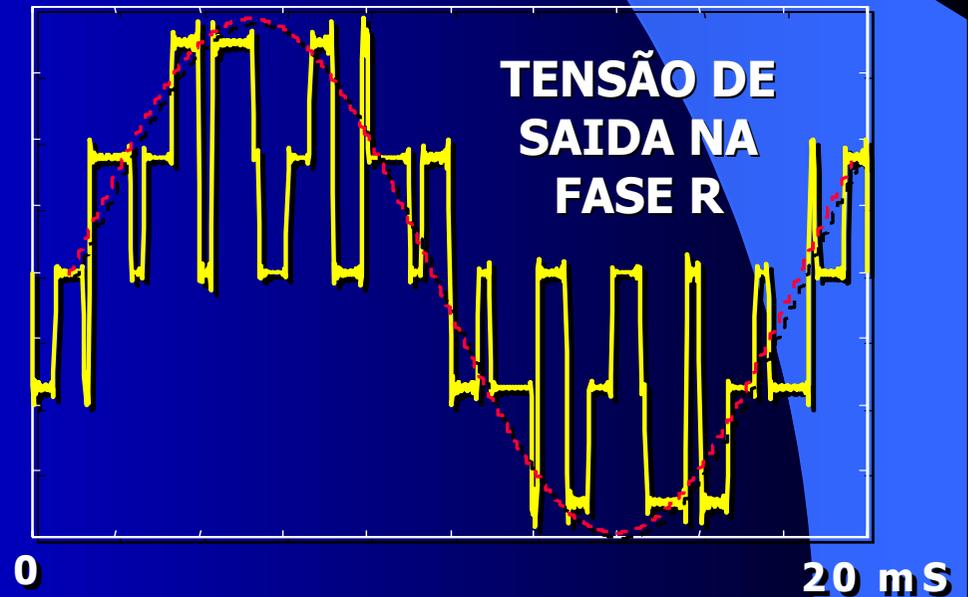
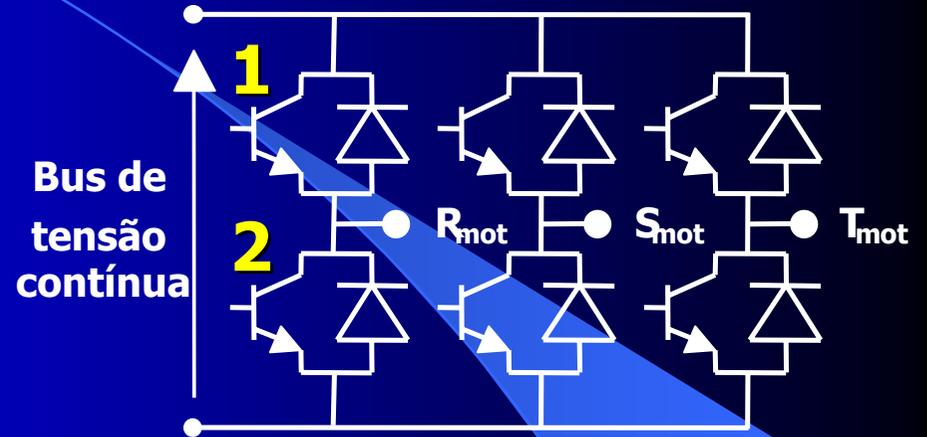
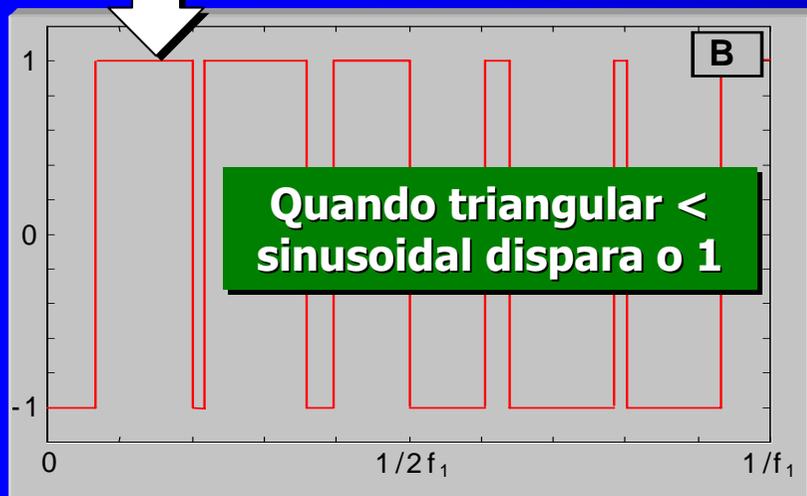
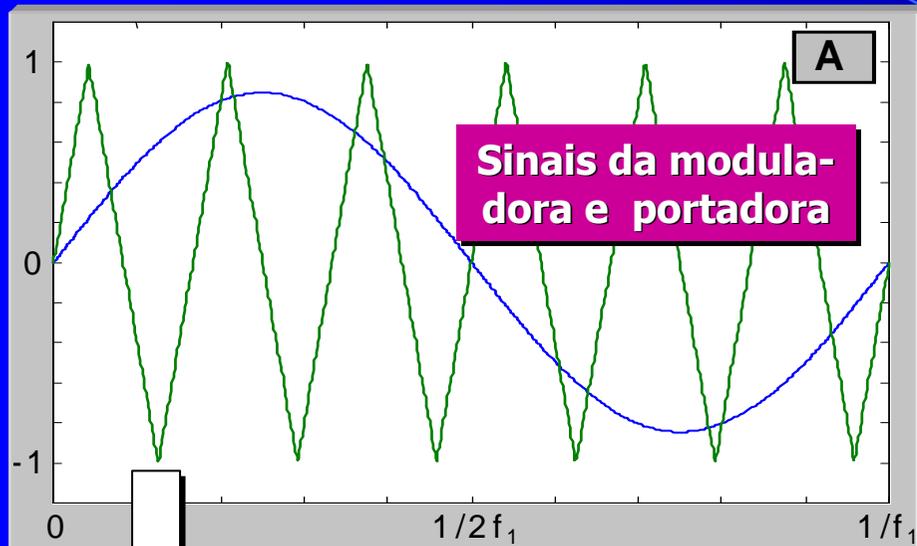
O inversor ao comutar os IGBT's "*fragmenta*" a tensão contínua com a qual é alimentado

O disparo dos IGBT's efectua-se utilizando uma técnica conhecida como PWM (*Pulse width modulation*) que consiste em comparar um sinal (portadora) triângular com um sinal (moduladora) sinusoidal

Desta comparação obtém-se um sinal similar ao sinusoidal mas escalonada para cada uma das fases do inversor

Variando a amplitude e frequência da moduladora e da portadora é possível obter sinais de diferentes frequências e tensão à saída do inversor

Funcionamento do inversor





Conversor para motor de CC



**Inversor 2,2kW
0 – 400Hz de aplicação geral**

Catálogos comerciais



**Inversor 0,75 kW
0 – 120 Hz para controlo de máquina ferramenta**



**Inversor 55 kW
0 – 400 Hz para motor assíncrono com controlo vectorial**

Variadores de velocidade

Seleccção de um motor para uma aplicação específica

1 SELECCIONAR TIPO DE CARCASSA E NIVEL DE PROTECCÃO (IP)

2 SELECCIONAR POTÊNCIA DO MOTOR EM FUNÇÃO DA POTÊNCIA NECESSÁRIA PARA "PUXAR" A CARGA

3 SELECCIONAR VELOCIDADE (P) EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE DA CARGA

4 SELECCIONAR UMA FORMA NORMALIZADA DE MONTAGEM EM FUNÇÃO DA APLICAÇÃO

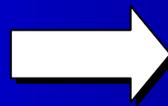
5 SELECCIONAR CLASSE DE ISOLAMENTO EM FUNÇÃO TEMPERATURA ESPERADA E AMBIENTE DE TRABALHO

6 SELECCIONAR CARACTERÍSTICA MECÂNICA EM FUNÇÃO DO BINÁRIO DE ARRANQUE E RESISTENTE DA CARGA

ABB – *"Guide for selecting a motor"*

A máquina assíncrona como gerador

A máquina assíncrona pode-se utilizar como gerador



Acima da velocidade de sincronismo o binário torna-se resistente e fornece energia eléctrica

Os geradores assíncronos utilizam-se em sistemas de geração onde a fonte primária é muito variável: energia eólica e hidráulica



A máquina assíncrona converte energia mecânica em eléctrica sempre que trabalha acima da velocidade de sincronismo. **NÃO É NECESSÁRIO QUE GIRE A VELOCIDADE CONSTANTE**

Actualmente existem máquinas com dupla alimentação rotor – estátor para melhorar o rendimento na geração eólica e hidráulica