

CARACTERÍSTICAS EXTERNAS DA MÁQUINA ASSÍNCRONA - CURVAS $C_x s$ E $I_x s$

COMPORTAMENTO DA CORRENTE NO ROTOR E DO CONJUGADO DESENVOLVIDO COM O ESCORREGAMENTO :

→ **CORRENTE NA BARRA DO ROTOR** : $I_{bs} = e_s / r_b = s.e_0 / r_b = s \cdot B_g \cdot L \cdot V_0 / r_b = k \cdot B_g \cdot \omega_s \cdot l / r_b \cdot s \rightarrow I_{bs} = k_i \cdot s$

→ **FORÇA MECÂNICA E TORQUE** : $F_{MECs} = B_g \cdot L \cdot I_{bs} \rightarrow C_s = k \cdot B_g \cdot L \cdot s \cdot e_0 / r_b = k \cdot (B_g)^2 \cdot \omega_s \cdot l / r_b \cdot s \rightarrow C_s = k_c \cdot s$

SE $r_b = cte.$ → CORRENTE E CONJUGADO PROPORCIONAIS AO ESCORREGAMENTO

NAS MÁQUINAS REAIS → BARRAS ROTÓRICAS NÃO TEM APENAS RESISTÊNCIA, MAS TAMBÉM INDUTÂNCIA :

INDUTÂNCIA DO ROTOR MANIFESTA-SE COMO UMA REATÂNCIA INDUTIVA, NA FREQUÊNCIA DO ROTOR

CIRCUITO ELÉTRICO DO ROTOR → **RESISTIVO + INDUTIVO** → IMPEDÂNCIA COMPLEXA NO ROTOR

FREQUÊNCIA DO ROTOR VARIA COM O ESCORREGAMENTO → IMPEDÂNCIA : FUNÇÃO DO ESCORREGAMENTO

INDUTÂNCIA DA BARRA = L_b → **REATÂNCIA DA BARRA = $x_s = 2 \cdot \pi \cdot f_2 \cdot L_b = 2 \cdot \pi \cdot s \cdot f_1 \cdot L_b = s \cdot x$**

IMPEDÂNCIA DA BARRA

$$\dot{z}_b = r_b + j \cdot s \cdot x \left\{ \begin{array}{l} |\dot{z}_b| = \sqrt{r_b^2 + s^2 \cdot x^2} \rightarrow \text{MÓDULO DA IMPEDÂNCIA} \\ \varphi = \ar \cos\left(\frac{r_b}{z_b}\right) = \ar \cos\left(\frac{r_b}{\sqrt{r_b^2 + s^2 \cdot x^2}}\right) \rightarrow \text{FASE DA IMPEDÂNCIA} \end{array} \right.$$

CARACTERÍSTICAS EXTERNAS DA MÁQUINA ASSÍNCRONA - CURVAS $C_x s$ E $I_x s$

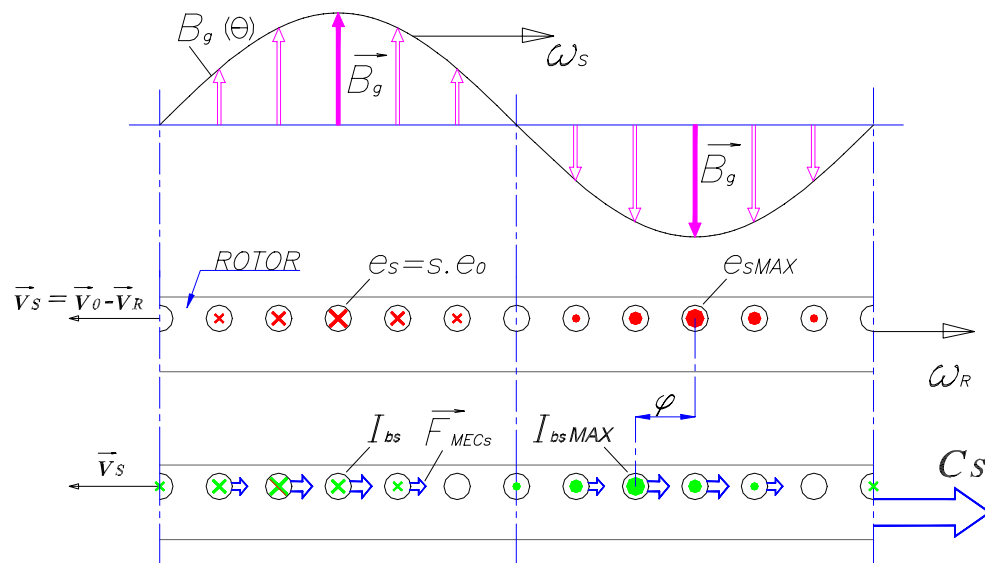
$$\left| \dot{z}_b \right| = \sqrt{r_b^2 + s^2 \cdot x^2}$$

$$\varphi = \arccos\left(\frac{r_b}{\sqrt{r_b^2 + s^2 \cdot x^2}}\right)$$

NATUREZA DO CIRCUITO ELÉTRICO DO ROTOR VARIA C/ O ESCORREGAMENTO :
 $s \rightarrow 0$: CIRCUITO PREDOMINANTEMENTE RESISTIVO (REGIÃO DE OPERAÇÃO NORMAL)
 $s \rightarrow 1$: CIRCUITO PREDOMINANTEMENTE REATIVO (REGIÃO DA PARTIDA)

$$I_{bs} = \frac{s \cdot e_0}{\sqrt{r_b^2 + s^2 \cdot x^2}} \Rightarrow I_{bs}(\theta) = \frac{s \cdot e_0(\theta)}{r_b + j \cdot s \cdot x}$$

MANIFESTAÇÃO DA REATÂNCIA \rightarrow ATRASO NA CORRENTE DA BARRA, EM RELAÇÃO À TENSÃO INDUZIDA PELO CAMPO ROTATIVO \rightarrow CORRENTE EM CADA BARRA NÃO ESTÁ MAIS EM FASE COM O CAMPO QUE AGE SOBRE A MESMA



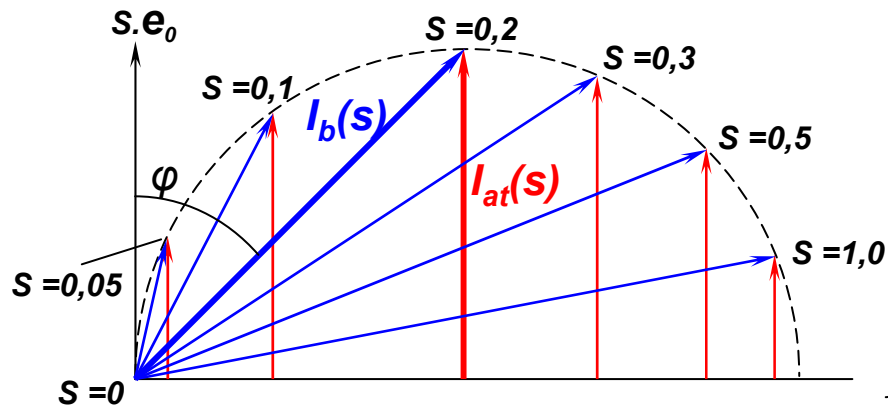
INTERAÇÃO ELETROMAGNÉTICA :

$$C_s = \int_0^{2\pi} B_M \cdot \cos(\theta) \cdot L \cdot I_M \cdot \cos(\theta - \varphi) \cdot \frac{Q_b}{2\pi} \cdot R \cdot d\theta$$

$$C_s = \frac{1}{2} \cdot B_M \cdot \underbrace{I_M \cdot \cos \varphi}_{\text{COMPONENTE ATIVA DA CORRENTE NA BARRA}} \cdot L \cdot R \cdot Q_b$$

COMPONENTE ATIVA DA CORRENTE NA BARRA

CARACTERÍSTICAS EXTERNAS DA MÁQUINA ASSÍNCRONA - CURVAS $C_x s$ E $I_x s$

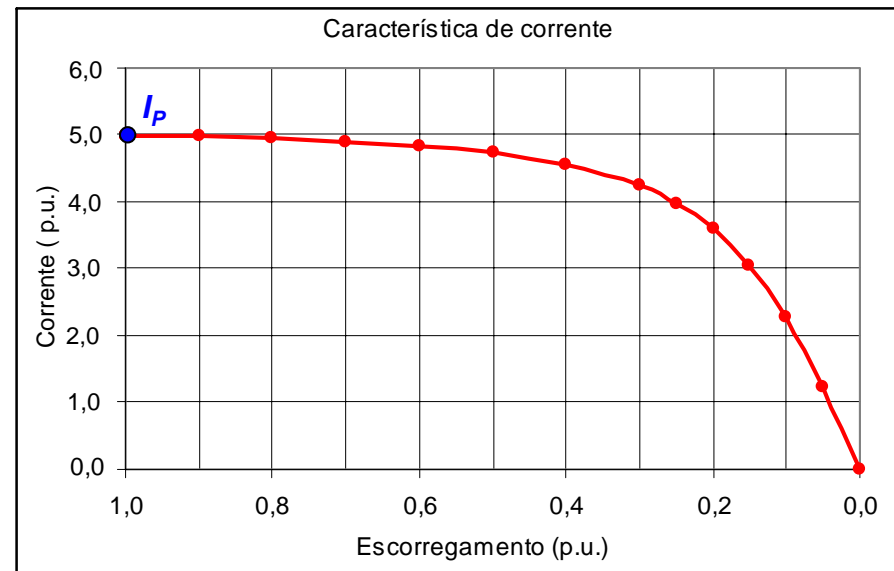
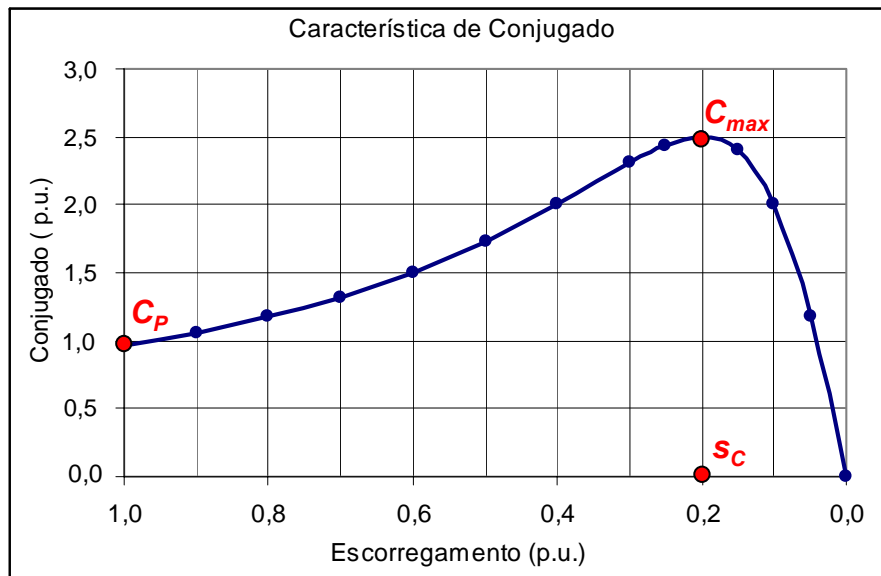


COMPORTAMENTO DA COMPONENTE ATIVA DA CORRENTE COM O ESCORREGAMENTO NO ROTOR DO MOTOR DE INDUÇÃO : $I_{at}(s) = I_b(s) \cdot \cos \varphi$

→ CORRENTE TOTAL SEMPRE CRESCENTE COM “s”

→ CORRENTE ATIVA TEM UM MÁXIMO PARA $0 < s < 1$

→ CONJUGADO DESENVOLVIDO PASSA POR UM MÁXIMO PARA $0 < s < 1$

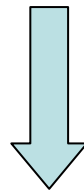


CARACTERÍSTICAS EXTERNAS DA MÁQUINA ASSÍNCRONA - MODELO DE CIRCUITO EQUIVALENTE

MOTOR ASSÍNCRONO REAL → APRESENTA AINDA RESISTÊNCIA E REATÂNCIA DE DISPERSÃO NOS ENROLAMENTOS DAS FASES DO ESTATOR

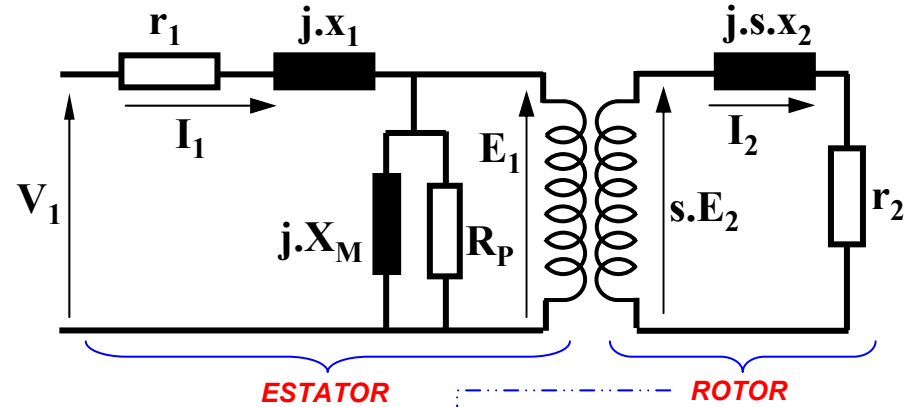
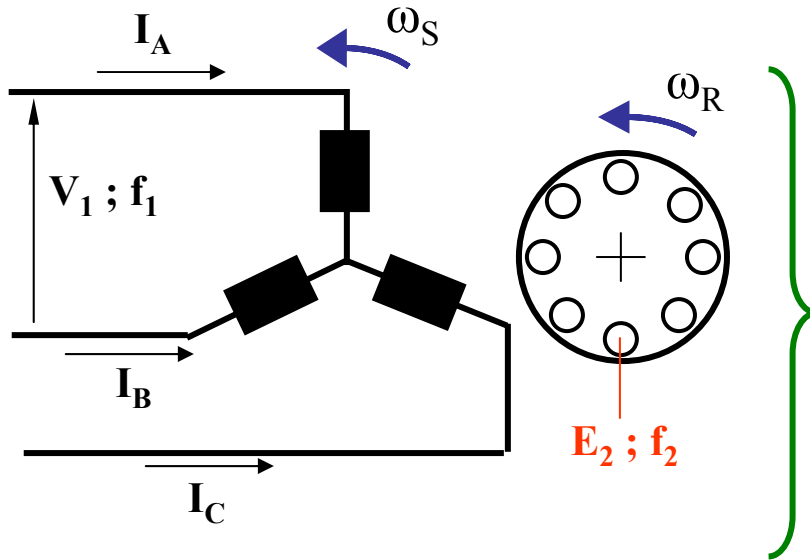
CONSEQÜÊNCIAS:

MAGNITUDE DO CAMPO MAGNÉTICO ROTATIVO NÃO É RIGOROSAMENTE CONSTANTE → ATENUA-SE SENSIVELMENTE COM A CARGA (CIRCULAÇÃO DE CORRENTE NAS FASES DO ESTATOR) DEVIDO À QUEDA DE TENSÃO NA IMPEDÂNCIA PRIMÁRIA → INFLUÊNCIA SOBRE A TENSÃO E CORRENTE INDUZIDAS NO ROTOR E CONSEQÜENTEMENTE NO TORQUE DESENVOLVIDO.

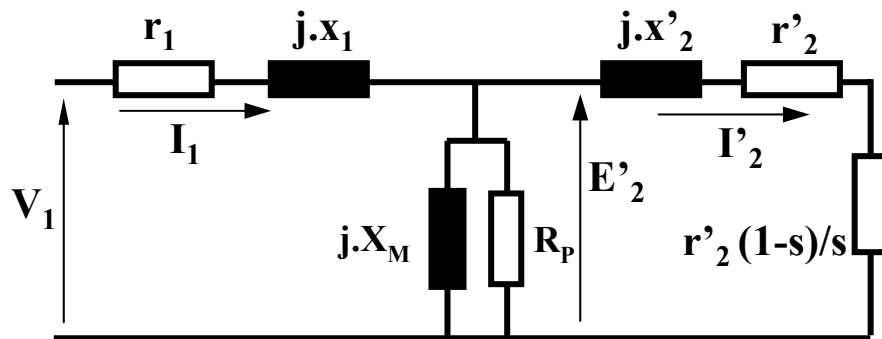


COMPORTAMENTO DO MOTOR DE INDUÇÃO DO PONTO DE VISTA ELÉTRICO → SIMILAR AO COMPORTAMENTO DO TRANSFORMADOR → MODELO QUANTITATIVO QUE REPRESENTA O MOTOR PODE SER O MESMO MODELO QUE REPRESENTA O TRANSFORMADOR → CIRCUITO EQUIVALENTE POR FASE

MODELO DO MOTOR ASSÍNCRONO TRIFÁSICO



$$I_2 = \frac{s.E_2}{r_2 + j.S.X_2} = \frac{E_2}{\frac{r_2}{s} + j.X_2} = \frac{E_2}{\left(r_2 + \frac{(1-s)}{s} \cdot r_2\right) + j.X_2}$$



**MODELO EQUIVALENTE DO MOTOR DE INDUÇÃO
(POR FASE, REFERIDO AO ESTATOR)**

CONDIÇÕES EQUIVALENTES DE OPERAÇÃO:

MOTOR COM EIXO LIVRE (EM VAZIO) - $s = 0$

→ **TRANSFORMADOR COM SECUNDÁRIO EM ABERTO**

MOTOR COM EIXO BLOQUEADO (PARTIDA) - $s = 1$

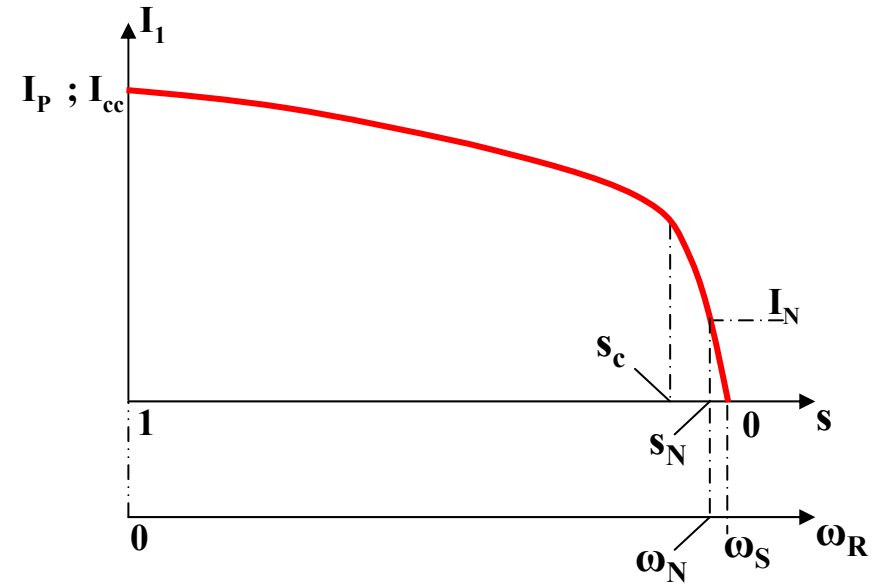
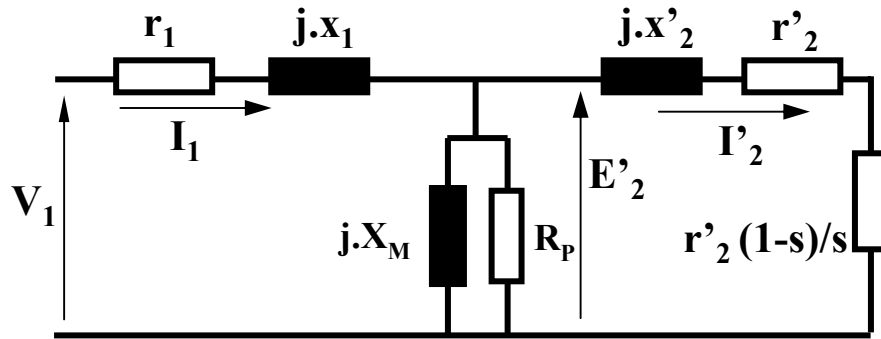
→ **TRANSFORMADOR COM SECUNDÁRIO EM CURTO**

MOTOR EM CARGA COM ESCORREGAMENTO "s"

→ **TRANSFORMADOR COM CARGA RESISTIVA $r'_2(1-s)/s$ NO SECUNDÁRIO**

PEA – 2404 - MÁQUINAS ELÉTRICAS E ACIONAMENTOS

CARACTERÍSTICAS EXTERNAS DA MÁQUINA ASSÍNCRONA - MODELO DE CIRCUITO EQUIVALENTE

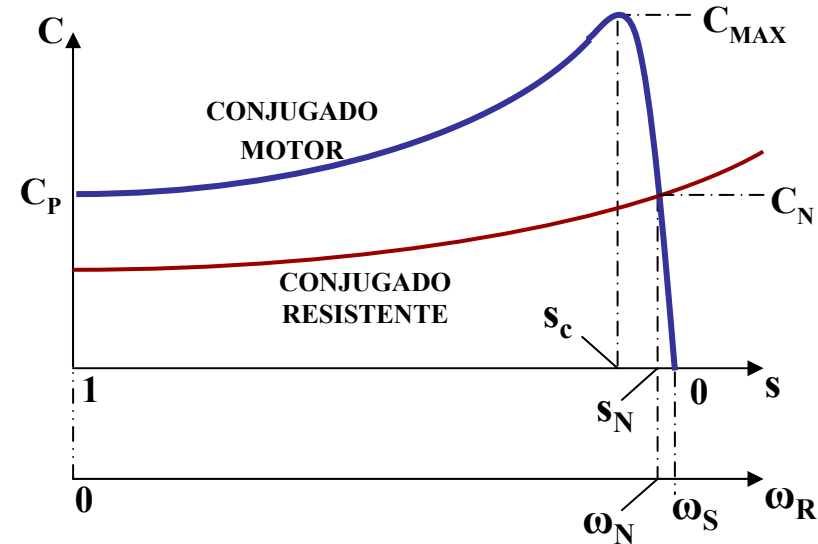


$$I_1 = \frac{V_1}{\sqrt{\left(\alpha r_1 + \frac{r'_2}{s}\right)^2 + (x_1 + x'_2)^2}}$$

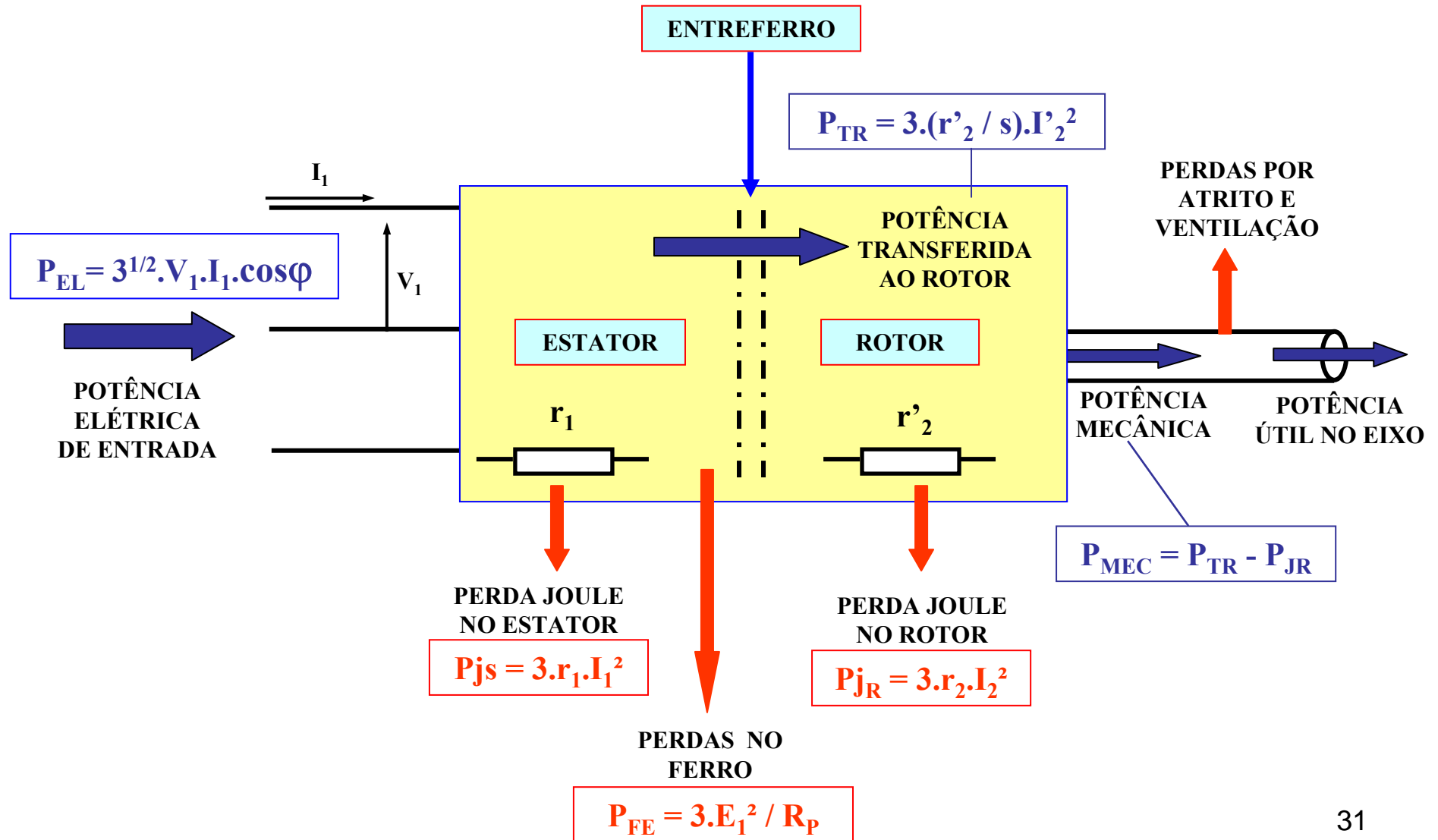
$$C = \frac{3 \cdot V_1^2 \cdot \left(\frac{r'_2}{s}\right)}{\omega_s \cdot \left[\left(\alpha r_1 + \frac{r'_2}{s}\right)^2 + (x_1 + x'_2)^2 \right]}$$

$$s = \frac{\omega_S - \omega_R}{\omega_S}$$

$$s_c = \frac{r'_2}{(x_1 + x'_2)}$$



FLUXO DE POTÊNCIAS ATIVAS NA MÁQUINA ASSÍNCRONA



CONFORMAÇÃO DE CURVAS CARACTERÍSTICAS DOS MOTORES ASSÍNCRONOS

MOTOR DE INDUÇÃO:

CARACTERÍSTICAS SATISFATÓRIAS NA REGIÃO DE OPERAÇÃO NOMINAL (BAIXO ESCORREGAMENTO)

→ **ELEVADO RENDIMENTO E FATOR DE POTÊNCIA**

→ **PEQUENA REGULAÇÃO DE VELOCIDADE**

→ **TORQUE E CORRENTE PRATICAMENTE PROPORCIONAIS AO ESCORREGAMENTO**

CARACTERÍSTICAS INADEQUADAS NA REGIÃO DE PARTIDA (ELEVADO ESCORREGAMENTO)

→ **BAIXO CONJUGADO DE PARTIDA E DE ACELERAÇÃO**

→ **ELEVADA CORRENTE DE PARTIDA**

→ **ELEVADA POTÊNCIA APARENTE REQUERIDA DA LINHA DE ALIMENTAÇÃO**



ADEQUAÇÃO À CARGA E COMPATIBILIDADE COM A FONTE DE ALIMENTAÇÃO:

NECESSIDADE DE CONFORMAÇÃO DAS CURVAS DE CONJUGADO, ESPECIALMENTE NA REGIÃO DA PARTIDA

→ **ASSOCIAÇÃO DE REOSTATO EXTERNO AO ROTOR NO MOTOR DE ANÉIS**

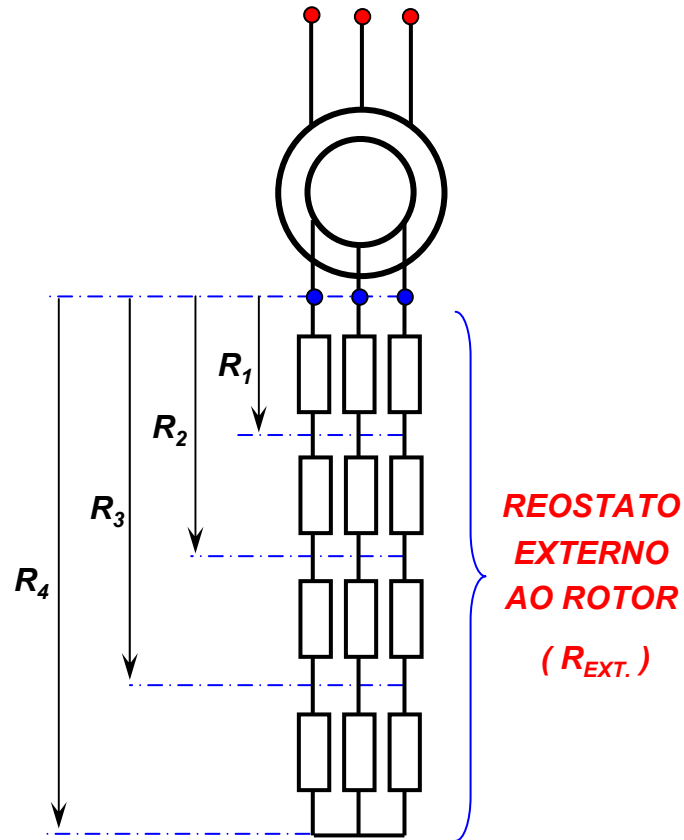
→ **PROJETO ADEQUADO DA GAIOLA NO MOTOR COM ROTOR EM CURTO CIRCUITO (CATEGORIAS DE CONJUGADO)**

NECESSIDADE DE MÉTODOS PARA LIMITAÇÃO DA CORRENTE DE PARTIDA

→ **INSERÇÃO DE REOSTATO ROTÓRICO NO MOTOR DE ANÉIS**

→ **MÉTODOS AUXILIARES PARA REDUÇÃO DA TENSÃO NA PARTIDA, EM MOTORES DE GAIOLA**

CONFORMAÇÃO DE CURVAS CARACTERÍSTICAS DOS MOTORES DE ANÉIS

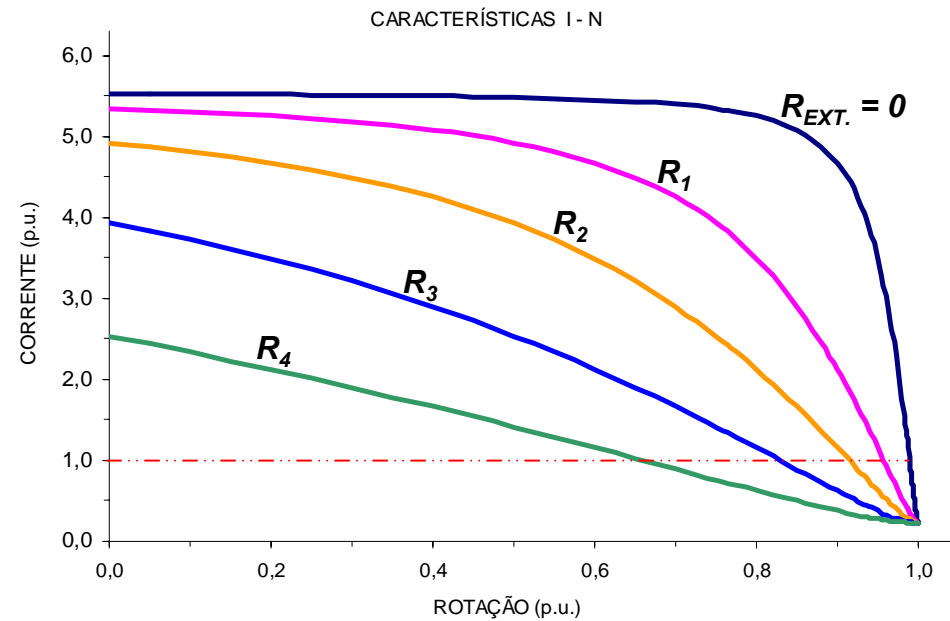
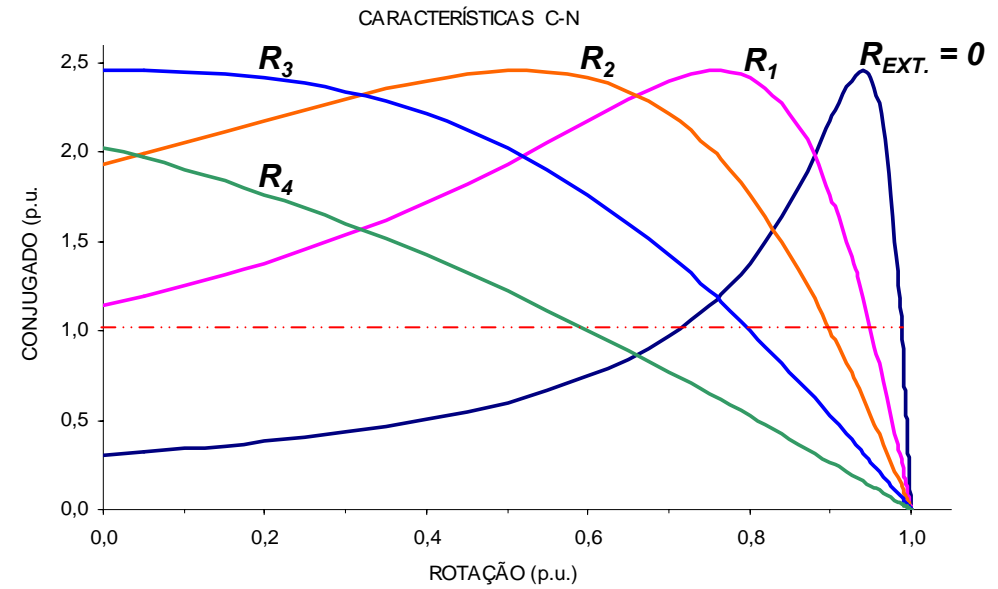


MÉTODO DISSIPATIVO

DISSIPACÃO DE POTÊNCIA EXTERNA AO ROTOR

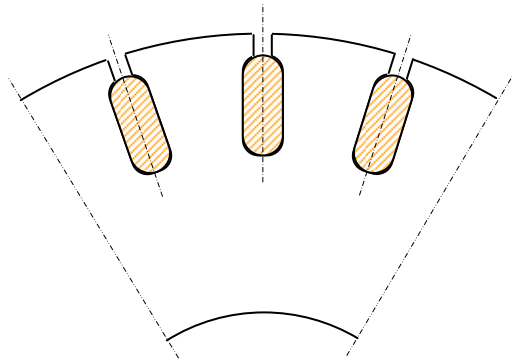
OTIMIZAÇÃO DA CONDIÇÃO DE PARTIDA

DEGRADAÇÃO DA REGIÃO DE REGIME NORMAL

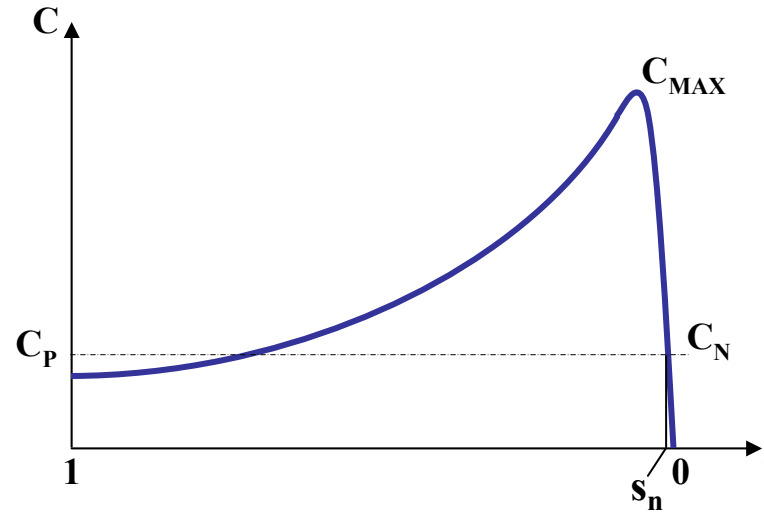


CONFORMAÇÃO DE CURVAS CARACTERÍSTICAS DOS MOTORES DE GAIOLA

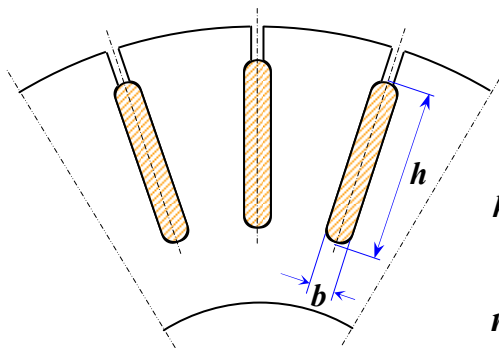
CARACTERÍSTICA DO MOTOR É FIXA → DEFINIDA PELA CONFIGURAÇÃO DA GAIOLA



GAIOLA SIMPLES → BARRAS DE BAIXA RESISTÊNCIA → COBRE OU ALUMÍNIO COM GRANDE SECÇÃO



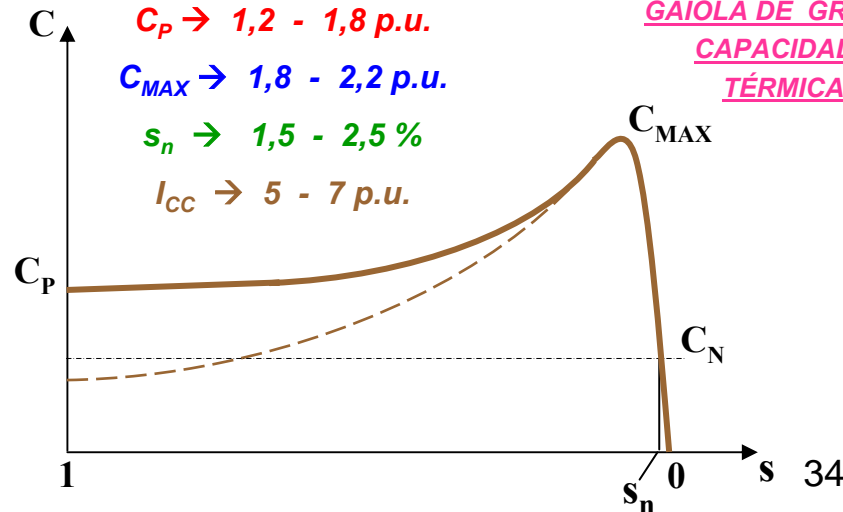
$C_p \rightarrow 0,5 - 1,2 \text{ p.u.}$
 $C_{MAX} \rightarrow 1,8 - 2,5 \text{ p.u.}$
 $s_n \rightarrow 1 - 2\%$
 $I_{CC} \rightarrow 6 - 8 \text{ p.u.}$



ADENSAMENTO DE CORRENTE:

$h/b > 10 - h > 4 \text{ cm}$
 → $r_b = f(s)$
 $r_{b:s=1} \approx h(\text{cm}) \cdot r_{b:s=0}$

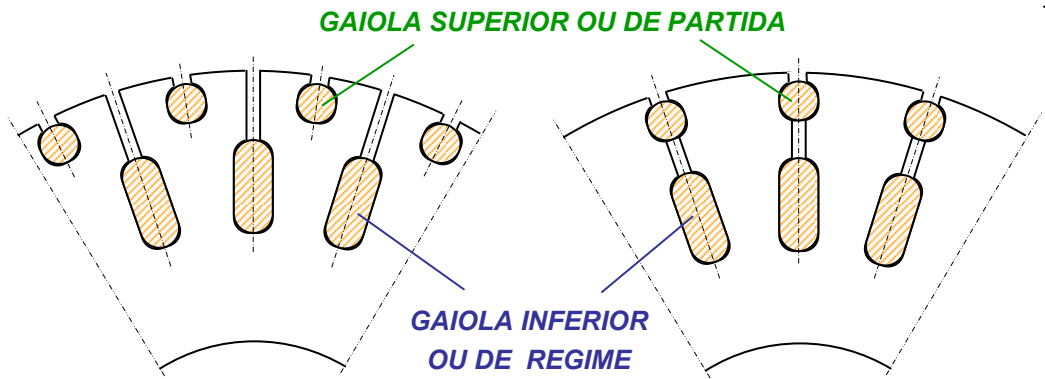
GAIOLA DE BARRAS PROFUNDAS → BARRAS DE BAIXA RESISTÊNCIA → COBRE OU ALUMÍNIO COM EFEITO DE ADENSAMENTO DE CORRENTE



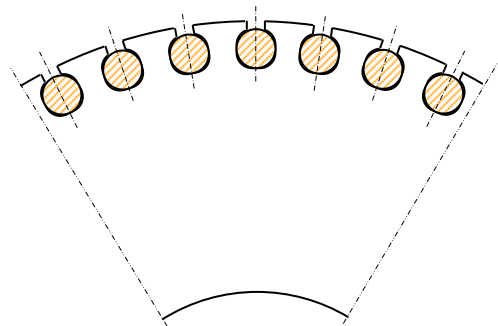
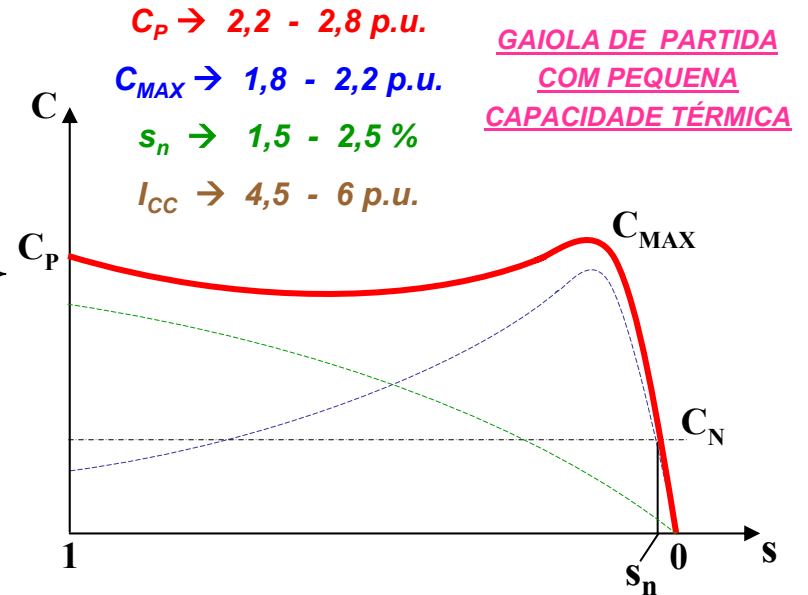
$C_p \rightarrow 1,2 - 1,8 \text{ p.u.}$
 $C_{MAX} \rightarrow 1,8 - 2,2 \text{ p.u.}$
 $s_n \rightarrow 1,5 - 2,5\%$
 $I_{CC} \rightarrow 5 - 7 \text{ p.u.}$

GAIOLA DE GRANDE CAPACIDADE TÉRMICA

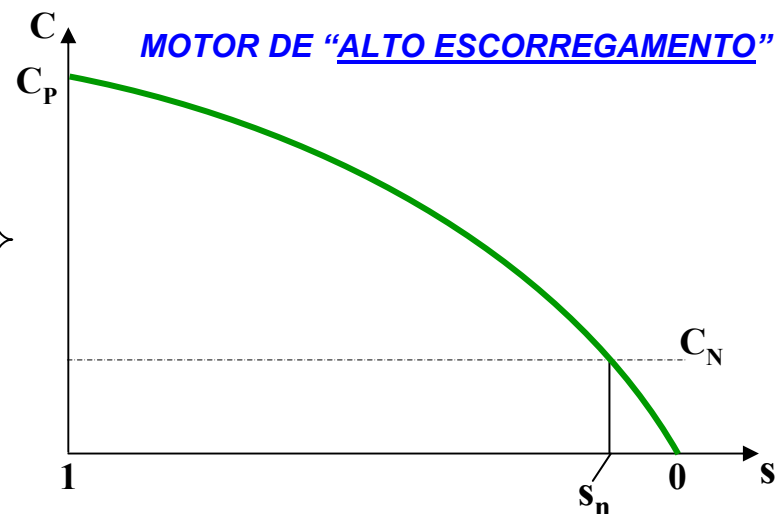
CONFORMAÇÃO DE CURVAS CARACTERÍSTICAS DOS MOTORES DE GAIOLA



ROTOR DE DUPLA GAIOLA → **BARRAS SUPERIORES DE ELEVADA RESISTÊNCIA + BAIXA REATÂNCIA** → **BARRAS INFERIORES DE BAIXA RESISTÊNCIA + ELEVADA REATÂNCIA**

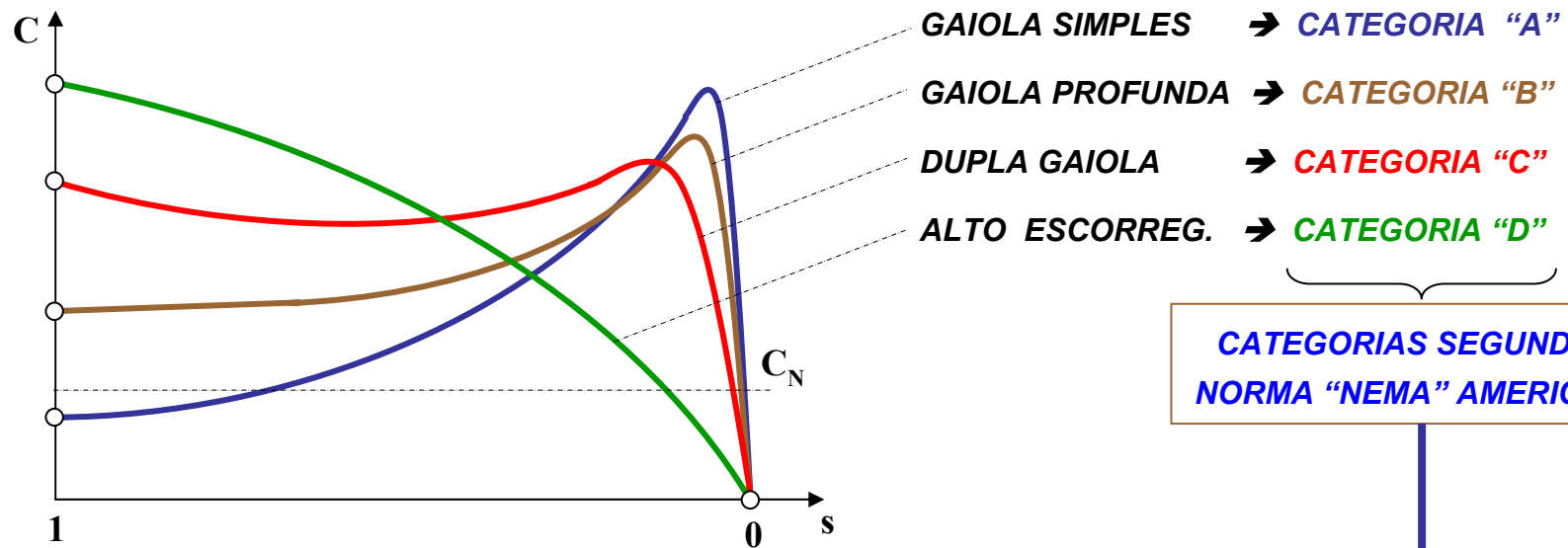


GAIOLA SIMPLES → **BARRAS DE ELEVADA RESISTÊNCIA** → **LATÃO OU BRONZE COM PEQUENA SECÇÃO**



CURVAS CARACTERÍSTICAS TÍPICAS DOS MOTORES DE GAIOLA - CATEGORIAS DE CONJUGADO

DIFERENTES TIPOS DE GAIOLA DEFINEM AS CATEGORIAS DE CONJUGADO → ESPECIFICAÇÃO DA CATEGORIA É FUNÇÃO DA APLICAÇÃO DO MOTOR



DIFERENTES TIPOS DE GAIOLA :

→ CONFORMAM AS CURVAS DE TORQUE

→ PRATICAMENTE NÃO ALTERAM AS CURVAS DE CORRENTE

(EXCEÇÃO FEITA AO CATEGORIA "D")

CATEGORIAS DE CONJUGADO SEGUNDO A NORMA "ABNT" BRASILEIRA E "IEC" :

CATEGORIA "N" → "A" E "B" NEMA

CATEGORIA "H" → "C" NEMA

CATEGORIA "D" → "D" NEMA

CATEGORIAS SEGUNDO A NORMA "NEMA" AMERICANA