

MODELO DO MOTOR ASSÍNCRONO TRIFÁSICO

NA MÁQUINA ASSÍNCRONA, O CAMPO MAGNÉTICO DO ROTOR É ESTACIONÁRIO EM RELAÇÃO AO CAMPO DO ESTATOR

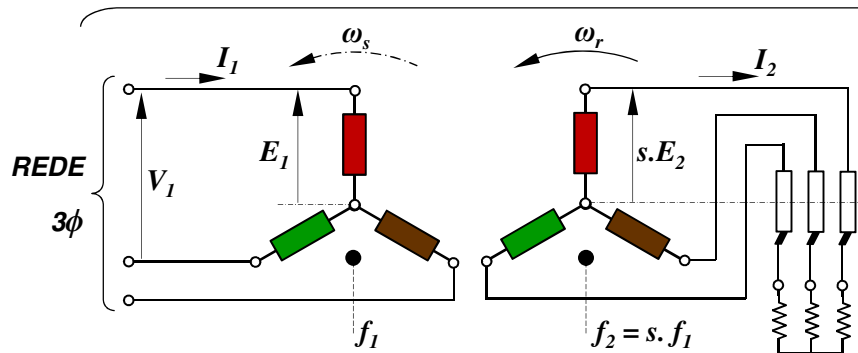
→ **TODAS AS GRANDEZAS ELÉTRICAS DO ROTOR SÃO PERCEBIDAS PELO ESTATOR NA FREQUÊNCIA DA REDE f_1**

→ ONDA DE F_{mm} DO ROTOR É EQUILIBRADA PELA ONDA DE F_{mm} DO ESTATOR : $F_{mm_1} = F_{mm_2}$

→ **COMPORTAMENTO ELÉTRICO SIMILAR AO DE UM TRANSFORMADOR TRIFÁSICO LIGADO À REDE DE ALIMENTAÇÃO**

→ TENSÕES, CORRENTES E IMPEDÂNCIAS SE REFLETEM ENTRE ROTOR E ESTATOR TAL QUAL NO TRANSFORMADOR

→ **MODELO DE REPRESENTAÇÃO PODE SER O MESMO DO TRANSFORMADOR, DADA A SIMILARIDADE ENTRE AMBOS**



MOTOR DE ANÉIS COM $m_1 = m_2 = 3$ FASES NO ESTATOR E ROTOR:

→ **FATOR DE REFLEXÃO PARA TENSÕES : a_E**

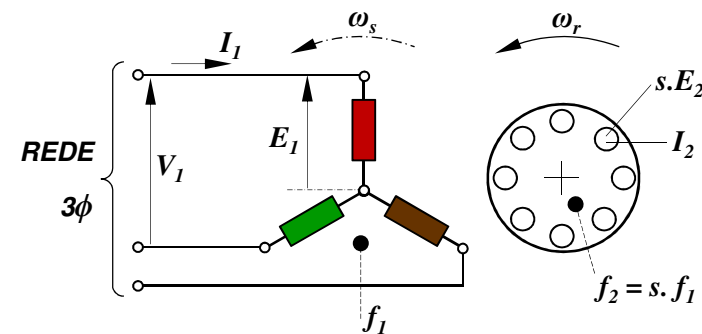
$$a_E = E_1 / E_2 = N_{1f} \cdot k_{e1} / N_{2f} \cdot k_{e2} = a$$

→ **FATOR DE REFLEXÃO PARA CORRENTES : a_I**

$$F_{mm_1} = F_{mm_2} \rightarrow m_1 \cdot N_{1f} \cdot k_{e1} \cdot I_1 = m_2 \cdot N_{2f} \cdot k_{e2} \cdot I_2$$

$$\rightarrow a_I = I_1 / I_2 = 1 / a$$

→ **FATOR DE REFLEXÃO DAS IMPEDÂNCIAS: $a_E / a_I = a / (1/a) = a^2$**



MOTOR DE GAIOLA COM $2p$ POLOS E Q_b BARRAS NO ROTOR:

$$N_{2f} = 1/2 \quad - \quad k_{e2} = 1 \quad - \quad m_2 = Q_b / p$$

$$E_1 / E_2 = N_{1f} k_{e1} / (1/2) \cdot 1 = 2 \cdot N_{1f} k_{e1} = a_E$$

$$F_{mm_1} = F_{mm_2} \rightarrow m_1 \cdot N_{1f} \cdot k_{e1} \cdot I_1 = m_2 \cdot N_{2f} \cdot k_{e2} \cdot I_2$$

$$\rightarrow I_1 / I_2 = m_2 \cdot (1/2) \cdot 1 / m_1 \cdot N_{1f} \cdot k_{e1} = (Q_b / 2p) / m_1 \cdot N_{1f} \cdot k_{e1} = a_I$$

→ **FATOR DE REFLEXÃO DAS IMPEDÂNCIAS:**

$$a_E / a_I = [2 \cdot N_{1f} k_{e1}] / [(Q_b / 2p) / m_1 \cdot N_{1f} \cdot k_{e1}] = 4 \cdot m_1 \cdot N_{1f}^2 \cdot k_{e1}^2 \cdot p / Q_b$$

MODELO POR FASE DE CIRCUITO EQUIVALENTE DO MOTOR ASSÍNCRONO TRIFÁSICO

CARACTERIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MODELO:

r_1 : RESISTÊNCIA ÔHMICA POR FASE DO ENROLAMENTO DE ESTATOR

x_1 : REATÂNCIA DE DISPERSÃO POR FASE DO ENROLAMENTO DE ESTATOR

R_p : RESISTÊNCIA EQUIVALENTE DE PERDAS ROTACIONAIS EM VAZIO
(COMPREENDE AS PERDAS NO FERRO DO ESTATOR E AS PERDAS POR ATRITO EM MANCAIS E DE VENTILAÇÃO – “PERDAS MECÂNICAS”)

X_M : REATÂNCIA DE MAGNETIZAÇÃO POR FASE DO ESTATOR

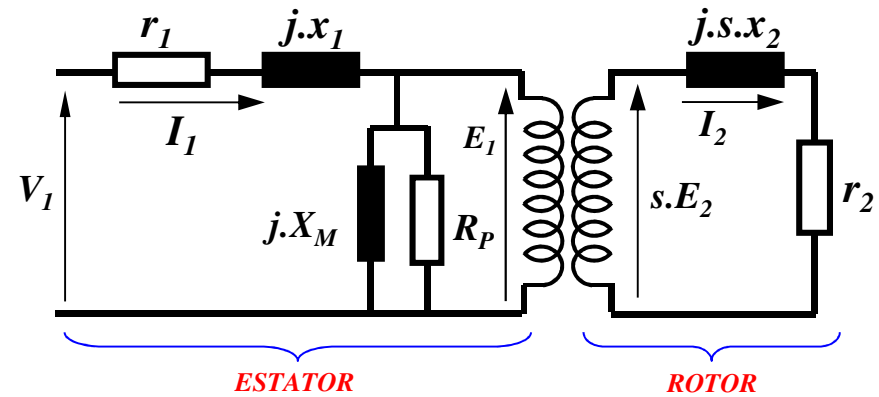
r_2 : RESISTÊNCIA ÔHMICA POR FASE DO ENROLAMENTO DE ROTOR

x_2 : REATÂNCIA DE DISPERSÃO POR FASE DO ENROLAMENTO DE ROTOR

TENSÃO INDUZIDA NO ROTOR DEPENDE DO ESCORREGAMENTO : $E_{2s} = s.E_2$

REATÂNCIA DE DISPERSÃO DO ROTOR → MANIFESTAÇÃO DA INDUTÂNCIA DE

DISPERSÃO L_2 NA FREQUÊNCIA DO ROTOR : $2.\pi.f_2.L_2 = 2.\pi.s.f_1.L_2 = s.(2.\pi.f_1.L_2) = s.x_2$



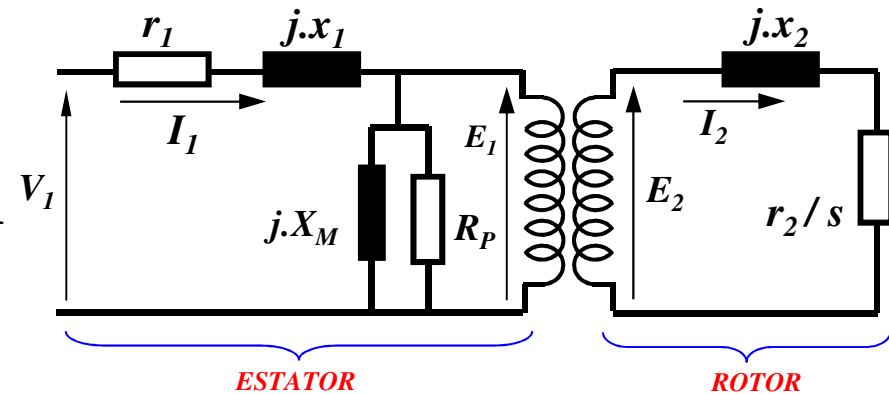
CORRENTE NO CIRCUITO DO ROTOR:

$$I_2 = \frac{s.E_2}{r_2 + j.s.x_2}$$

CIRCUITO DO ROTOR COM TENSÃO VARIÁVEL

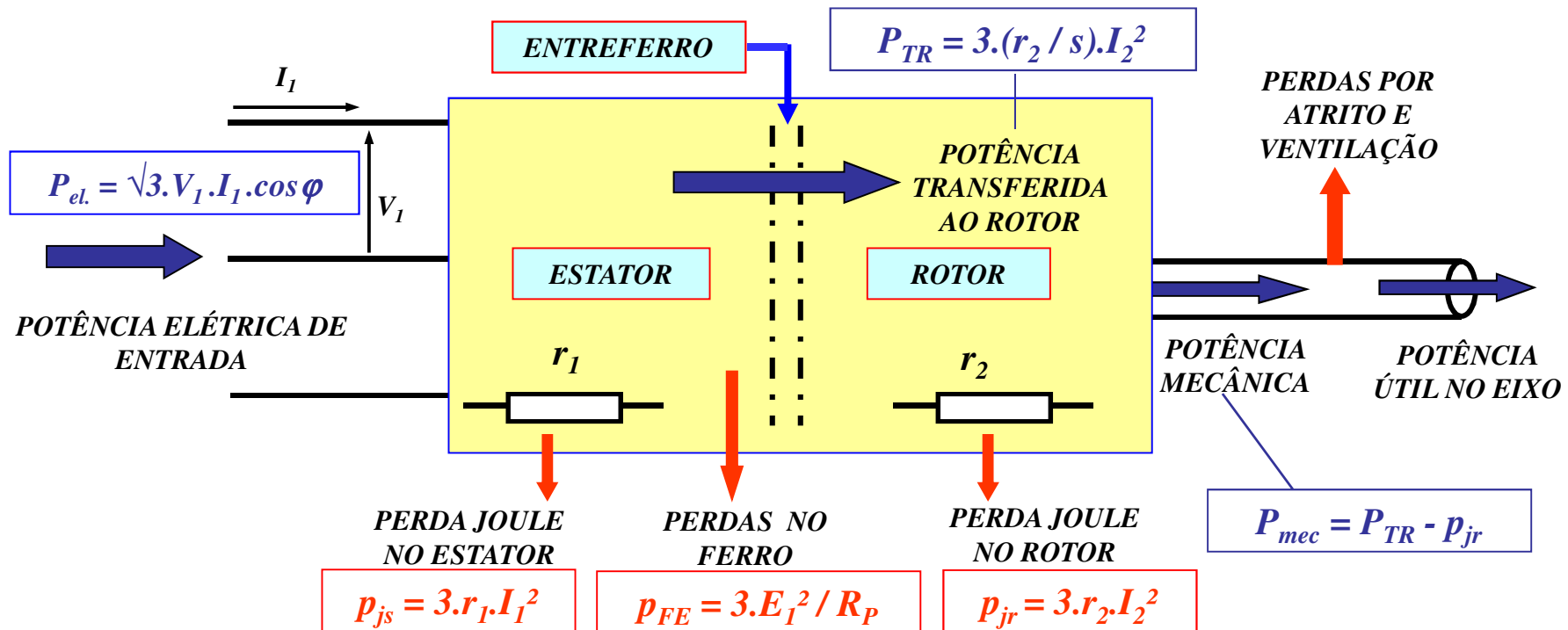
→ MANIPULAÇÃO ALGÉBRICA PARA OBTER UM MODELO “MAIS PARECIDO” COM O DO TRANSFORMADOR CONVECCIONAL:

$$I_2 = \frac{s.E_2}{r_2 + j.s.x_2} \cdot \frac{(1/s)}{(1/s)} = \frac{E_2}{\frac{r_2}{s} + j.x_2}$$

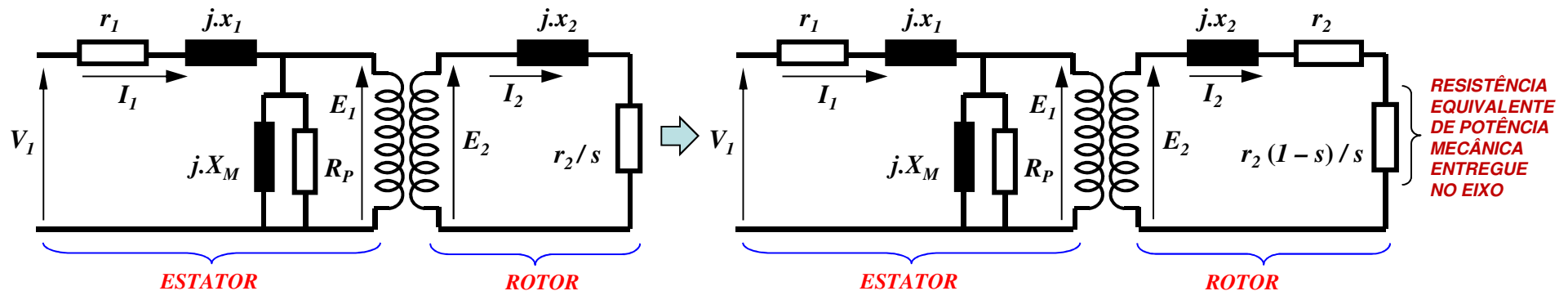


MODELO EQUIVALENTE DO MOTOR DE INDUÇÃO (POR FASE)

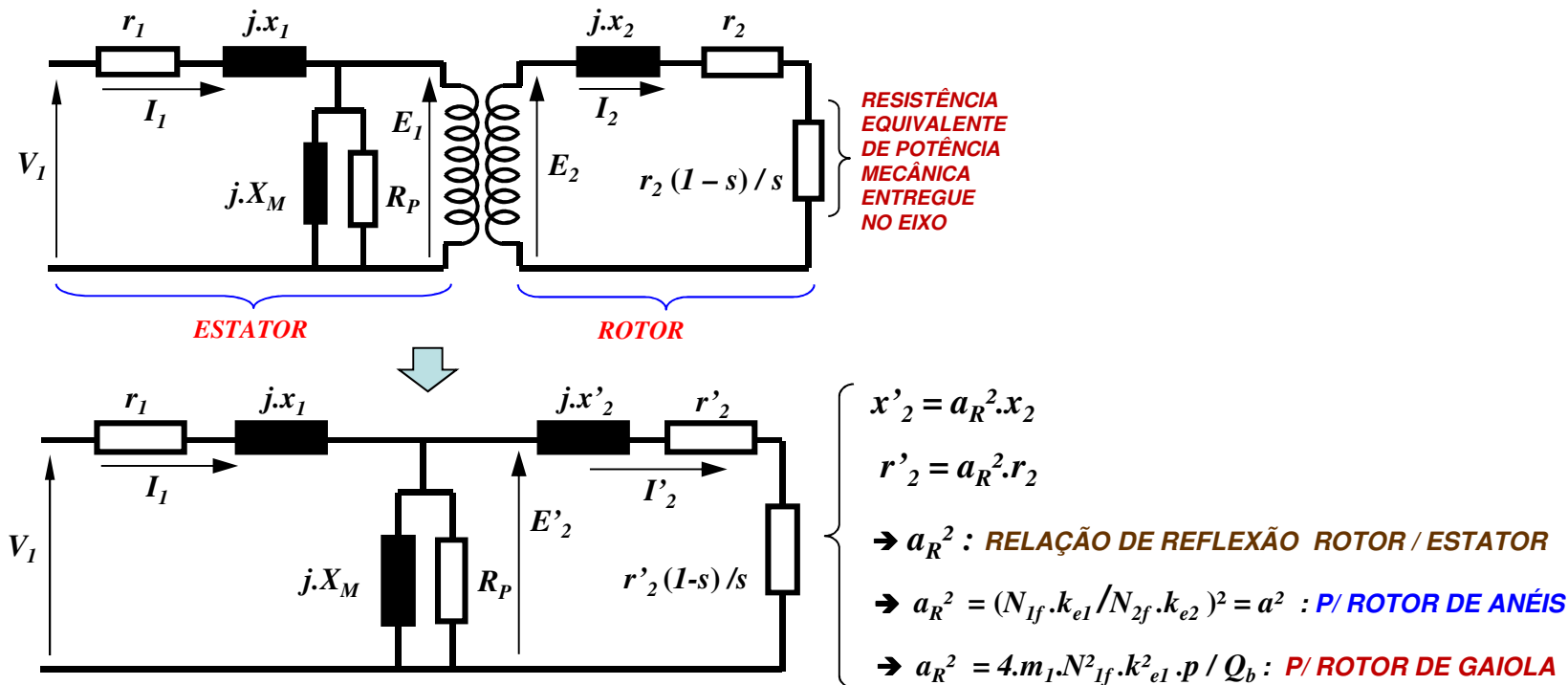
FLUXO DE POTÊNCIAS ATIVAS NA MÁQUINA ASSÍNCRONA TRIFÁSICA



POTÊNCIA MECÂNICA ENTREGUE NO EIXO: $P_{mec} = P_{TR} - p_{jr} = 3 \cdot r_2 / s \cdot I_2^2 - 3 \cdot r_2 \cdot I_2^2 = 3 \cdot (r_2 / s - r_2) \cdot I_2^2 = 3 \cdot [r_2 \cdot (1 - s) / s] \cdot I_2^2$



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



CONDIÇÕES EQUIVALENTE DE OPERAÇÃO ENTRE MÁQUINA ASSÍNCRONA E O TRANSFORMADOR:

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

\rightarrow TRANSFORMADOR COM SECUNDÁRIO EM ABERTO

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

\rightarrow TRANSFORMADOR COM SECUNDÁRIO EM CURTO

MOTOR EM CARGA COM ESCORREGAMENTO “s”

\rightarrow TRANSFORMADOR COM CARGA RESISTIVA : $r_2 \cdot (1 - s) / s$ NO SECUNDÁRIO

RELAÇÕES IMPORTANTES NA MÁQUINA ASSÍNCRONA

POTÊNCIA TRANSFERIDA AO ROTOR: $P_{TR} = m_1 \cdot (r'_2 / s) \cdot I'_2{}^2$

PERDA JOULE NO ROTOR: $p_{J2} = m_1 \cdot r'_2 \cdot I'_2{}^2$

POTÊNCIA MECÂNICA NO EIXO: $P_{mec} = P_{TR} - p_{J2} = m_1 \cdot r'_2 \cdot [(1 - s) / s] \cdot I'_2{}^2$

$$\rightarrow p_{j2} = s \cdot P_{TR}$$

$$\rightarrow P_{mec} = (1 - s) \cdot P_{TR}$$

POTÊNCIA MECÂNICA TRANSFERIDA AO ROTOR SE CONVERTE PARTE EM POTÊNCIA MECÂNICA DISPONÍVEL NO EIXO E PARTE EM PERDA JOULE NO ROTOR :

→ QUANTO MAIOR O ESCORREGAMENTO, MENOR A PARCELA CONVERTIDA EM POTÊNCIA MECÂNICA E MAIOR A PERDA JOULE

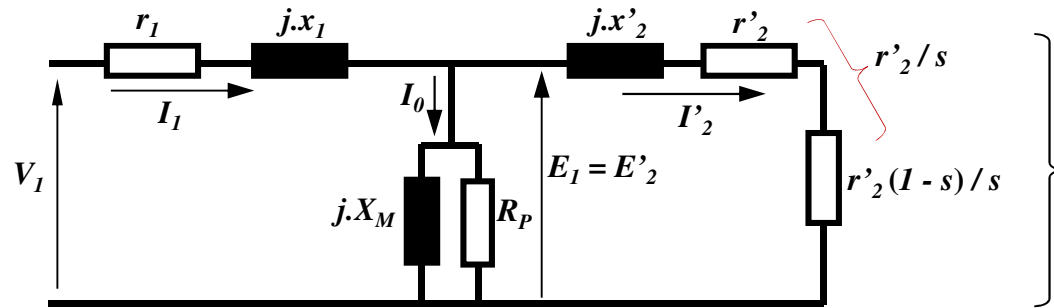
→ MOTOR ASSÍNCRONO DE BOM RENDIMENTO DEVE OPERAR COM PEQUENO ESCORREGAMENTO

→ ESCORREGAMENTOS NOMINAIS TÍPICOS : 0,005 A 0,05 p.u. (0,5 % A 5 %)

CONJUGADO NO EIXO DO MOTOR DE INDUÇÃO →

$$C = \frac{P_{MEC}}{\omega_r} = \frac{(1 - s) \cdot P_{TR}}{(1 - s) \cdot \omega_s} = \frac{P_{TR}}{\omega_s}$$

EXPRESSÃO DO CONJUGADO - CARACTERÍSTICAS EXTERNAS (A PARTIR DO MODELO)



CONJUGADO NO EIXO DA MÁQUINA ASSÍNCRONA :

$$C = \frac{P_{mec}}{\omega_r} = \frac{P_{TR}}{\omega_s}$$

$$P_{TR} = 3 \cdot \frac{r'2}{s} \cdot I'2^2$$

$$C = \frac{3}{\omega_s} \cdot \frac{r'2}{s} \cdot I'2^2$$

$$I'2 = \frac{\dot{E}1}{\frac{r'2}{s} + j \cdot x'2} = \frac{E1}{\sqrt{\left(\frac{r'2}{s}\right)^2 + x'2^2}}$$

$$\dot{E}1 = V1 - (r1 + j \cdot x1) \cdot \dot{I}1$$

$$\dot{I}1 = \dot{I}0 + \dot{I}'2$$

$$\dot{I}0 = \frac{\dot{E}1}{\dot{Z}M} \cong \frac{\dot{E}1}{j \cdot XM}$$



$$I'2 = \frac{V1}{\sqrt{\left(\alpha \cdot r1 + \frac{r'2}{s}\right)^2 + \underbrace{(x1 + x'2)}_{x_{cc}}^2}}$$



$$C = \frac{3 \cdot V1^2}{\omega_s} \cdot \frac{\frac{r'2}{s}}{\left[\left(\alpha \cdot r1 + \frac{r'2}{s}\right)^2 + \underbrace{(x1 + x'2)}_{x_{cc}}^2\right]}$$

$$\alpha = \frac{XM}{x1 + XM} \cong 1$$

CARACTERÍSTICAS EXTERNAS - $C_x s$; $I_x s$ (A PARTIR DO MODELO)

VISUALIZAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS NÃO É IMEDIATA PELA OBSERVAÇÃO DAS EXPRESSÕES DE $I'_2(s)$ E $C(s)$
 → ANÁLISE REALIZADA POR TRECHOS DE ESCORREGAMENTOS CARACTERÍSTICOS E VALORES USUAIS DE PARÂMETROS

VALORES USUAIS DE PARÂMETROS DO CIRCUITO EQUIVALENTE PARA MOTORES DE INDUÇÃO TÍPICOS:

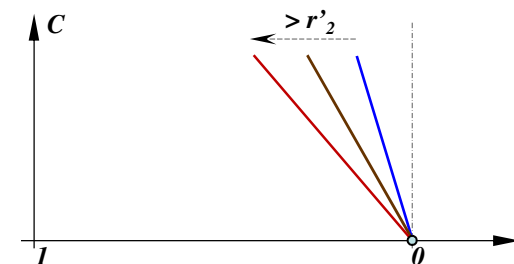
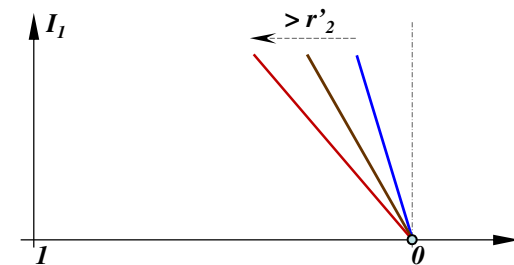
$x_1 \approx x'_2 \approx 0,1 \text{ a } 0,15 \text{ p.u.} \rightarrow x_{cc} = x_1 + x'_2 \approx 0,2 \text{ a } 0,3 \text{ p.u.}$ $r_1 \approx r'_2 \approx 0,02 \text{ a } 0,05 \text{ p.u.}$	}	<p>PARÂMETROS DETERMINADOS POR ENSAIOS EM VAZIO E EM CURTO-CIRCUITO, À SEMELHANÇA DO PROCEDIMENTO USUAL EM TRANSFORMADORES</p> <p>NA MÁQUINA DE INDUÇÃO :</p> <p><u>ENSAIO EM VAZIO</u> → EIXO LIVRE ($s \rightarrow 0$) ALIMENTADO SOB TENSÃO 1 p.u.</p> <p><u>CURTO CIRCUITO</u> → ROTOR BLOQUEADO ($s = 1$) COM TENSÃO REDUZIDA E $I_1 \approx 1 \text{ p.u.}$</p>
---	---	--

1º TRECHO → REGIÃO DE BAIXO ESCORREGAMENTO ($s \rightarrow 0$) : REGIÃO DE OPERAÇÃO NORMAL EM REGIME

$$s \rightarrow 0 ; r'_2/s \gg \alpha \cdot r_1 ; (r'_2/s) > (x_1 + x'_2) ; (r'_2/s)^2 \gg (x_1 + x'_2)^2$$

$$I_1 \cong I'_2 = \frac{V_1}{\sqrt{(\alpha \cdot r_1 + \frac{r'_2}{s})^2 + (x_1 + x'_2)^2}} \cong \frac{V_1}{\sqrt{(\frac{r'_2}{s})^2}} = V_1 \left(\frac{1}{r'_2} \right) \cdot s = k \cdot s$$

$$C = \frac{3 \cdot V_1^2}{\omega_s} \cdot \frac{\frac{r'_2}{s}}{\left[(\alpha \cdot r_1 + \frac{r'_2}{s})^2 + (x_1 + x'_2)^2 \right]} \cong \frac{3 \cdot V_1^2}{\omega_s} \cdot \frac{\frac{r'_2}{s}}{\left[(\frac{r'_2}{s})^2 \right]} = \frac{3 \cdot V_1^2}{\omega_s} \cdot \left(\frac{1}{r'_2} \right) \cdot s = k' \cdot s$$

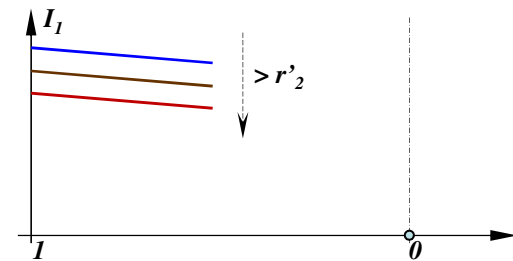


CARACTERÍSTICAS EXTERNAS - Cx_s ; Ix_s (A PARTIR DO MODELO)

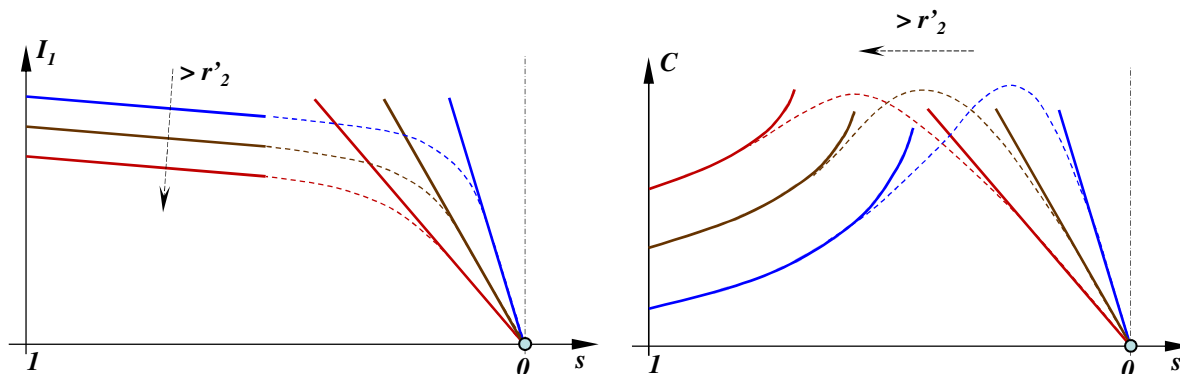
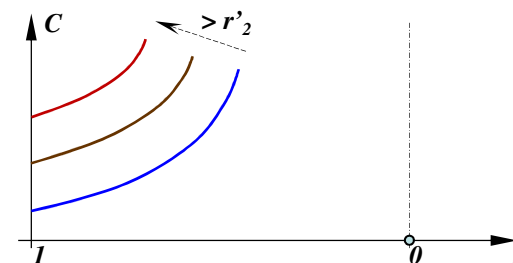
2º TRECHO → REGIÃO DE ELEVADO ESCORREGAMENTO ($s \rightarrow 1$) : REGIÃO DE PARTIDA DA MÁQUINA ASSÍNCRONA

$$s \rightarrow 1 \quad ; \quad (\alpha \cdot r_1 + r'_2/s) < (x_1 + x'_2) \quad ; \quad (\alpha \cdot r_1 + r'_2/s)^2 \ll (x_1 + x'_2)^2$$

$$I_1 \cong I'_2 = \frac{V_1}{\sqrt{(\alpha \cdot r_1 + \frac{r'_2}{s})^2 + (x_1 + x'_2)^2}} \cong \frac{V_1}{\sqrt{(r'_2)^2 + (x_{cc})^2}} = \left(\frac{V_1}{z_{cc}(r'_2)} \right) = k \cdot \frac{1}{f(r'_2)}$$



$$C = \frac{3 \cdot V_1^2}{\omega_s} \cdot \frac{\frac{r'_2}{s}}{\left[(\alpha \cdot r_1 + \frac{r'_2}{s})^2 + (x_1 + x'_2)^2 \right]} \cong \frac{3 \cdot V_1^2}{\omega_s} \cdot \frac{\frac{r'_2}{s}}{[(x_{cc})^2]} = \frac{3 \cdot V_1^2}{\omega_s} \cdot \frac{1}{x_{cc}^2} (r'_2) \cdot \frac{1}{s} = k' \cdot \frac{1}{s}$$



AS FUNÇÕES $C(s)$ E $I(s)$ SÃO CONTÍNUAS NA VARIÁVEL s :

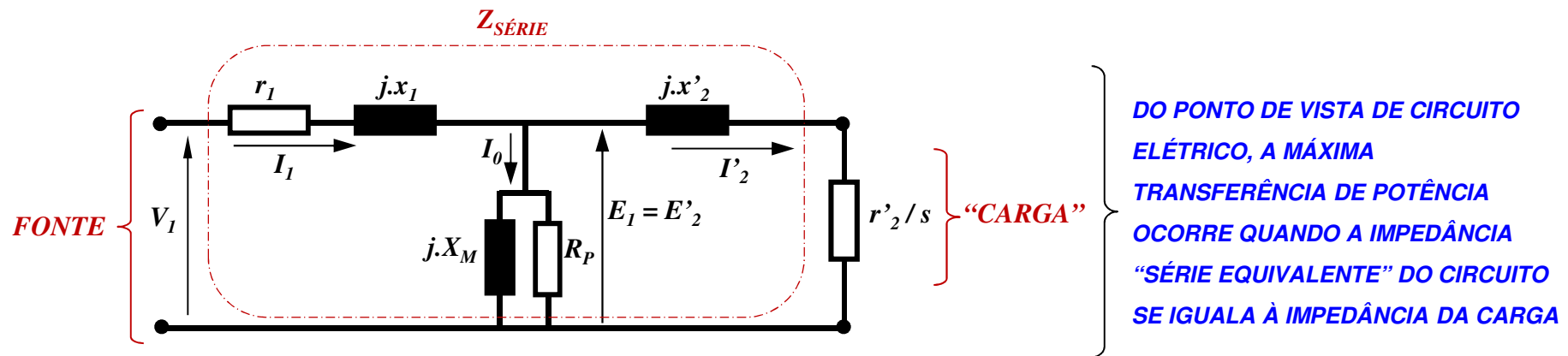
→ OS DOIS TRECHOS ANALISADOS SE ENCONTRAM OBRIGATORIAMENTE PARA $0 < s < 1$

CARACTERÍSTICAS EXTERNAS - CONJUGADO MÁXIMO

PONTO DE INFLEXÃO NA CURVA DE CONJUGADO → “CONJUGADO MÁXIMO” :

OCORRE PARA UM VALOR ESPECÍFICO DE ESCORREGAMENTO → ESCORREGAMENTO CRÍTICO

$$C = \frac{P_{mec}}{\omega_r} = \frac{P_{TR}}{\omega_s} \rightarrow C_{MAX} \rightarrow P_{TR-MAX} \left\{ \begin{array}{l} \text{CONJUGADO MÁXIMO OCORRE NA MÁXIMA TRANSFERÊNCIA DE} \\ \text{POTÊNCIA ENTRE A FONTE DE ALIMENTAÇÃO E O ROTOR} \end{array} \right.$$



$$P_{TR-MAX} \rightarrow |Z_{SÉRIE}| = r'_{2}/s \rightarrow \frac{r'_{2}}{s_c} = \sqrt{(\alpha \cdot r_1)^2 + (x_{cc})^2} \rightarrow s_c = \frac{r'_{2}}{\sqrt{(\alpha \cdot r_1)^2 + (x_{cc})^2}} \cong \frac{r'_{2}}{x_{cc}}$$

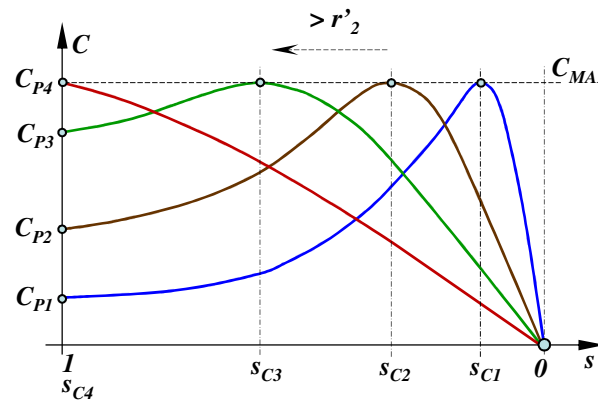
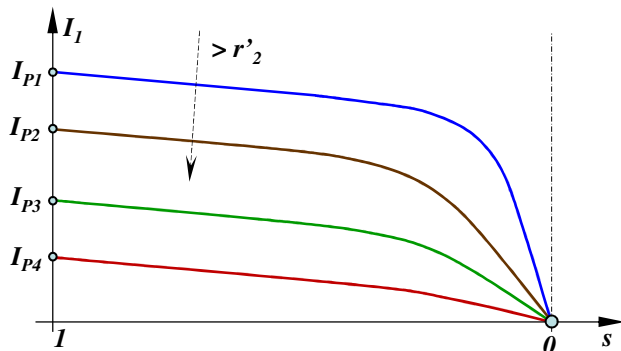
$$C = \frac{3 \cdot V_1^2}{\omega_s} \cdot \frac{\frac{r'_{2}}{s}}{\left[\left(\alpha \cdot r_1 + \frac{r'_{2}}{s} \right)^2 + (x_{cc})^2 \right]} \rightarrow C_{MAX} = \frac{3 \cdot V_1^2}{2 \cdot \omega_s} \cdot \frac{1}{\left[\alpha \cdot r_1 + \sqrt{(\alpha \cdot r_1)^2 + (x_{cc})^2} \right]} \cong \frac{3 \cdot V_1^2}{2 \cdot \omega_s \cdot x_{cc}}$$

CARACTERÍSTICAS EXTERNAS - INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS E DA ALIMENTAÇÃO

$$I_1 \cong I'_2 = \frac{V_1}{\sqrt{\left(\alpha \cdot r_1 + \frac{r'_2}{s}\right)^2 + (x_{cc})^2}}$$

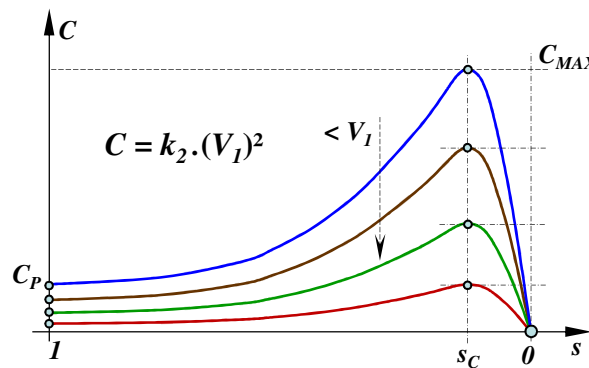
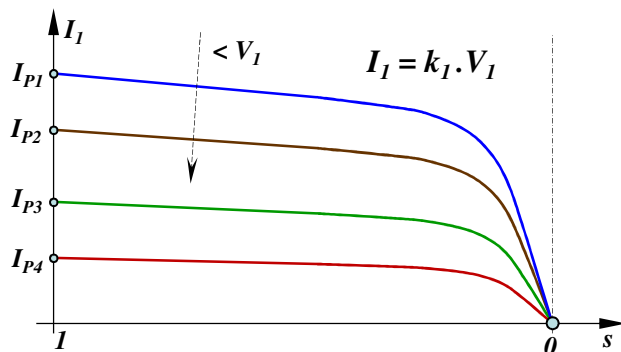
$$C = \frac{3 \cdot V_1^2}{\omega_s} \cdot \frac{\frac{r'_2}{s}}{\left[\left(\alpha \cdot r_1 + \frac{r'_2}{s}\right)^2 + (x_{cc})^2\right]}$$

$$C_{MAX} \cong \frac{3 \cdot V_1^2}{2 \cdot \omega_s \cdot x_{cc}} \quad s_C \cong \frac{r'_2}{x_{cc}}$$



INFLUÊNCIA DA RESISTÊNCIA ROTÓRICA

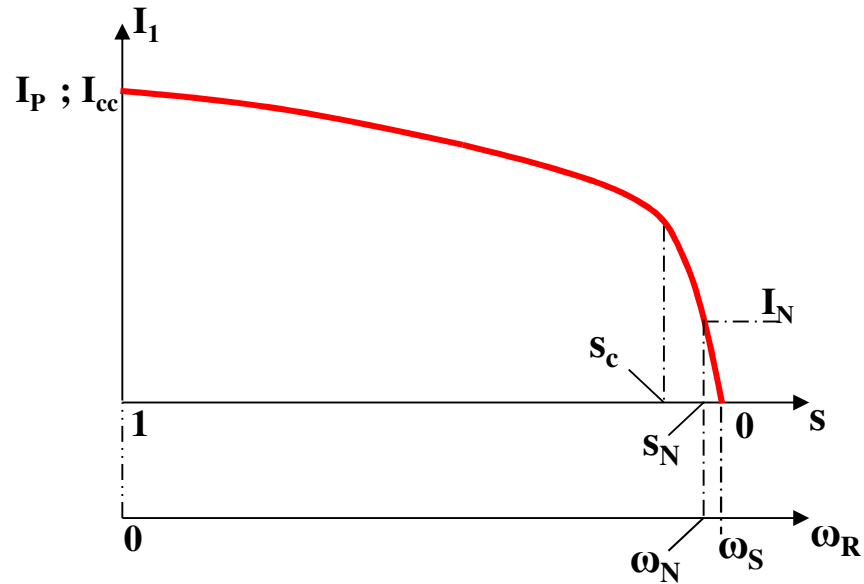
TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO CONSTANTE



INFLUÊNCIA DA TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO

RESISTÊNCIA ROTÓRICA CONSTANTE

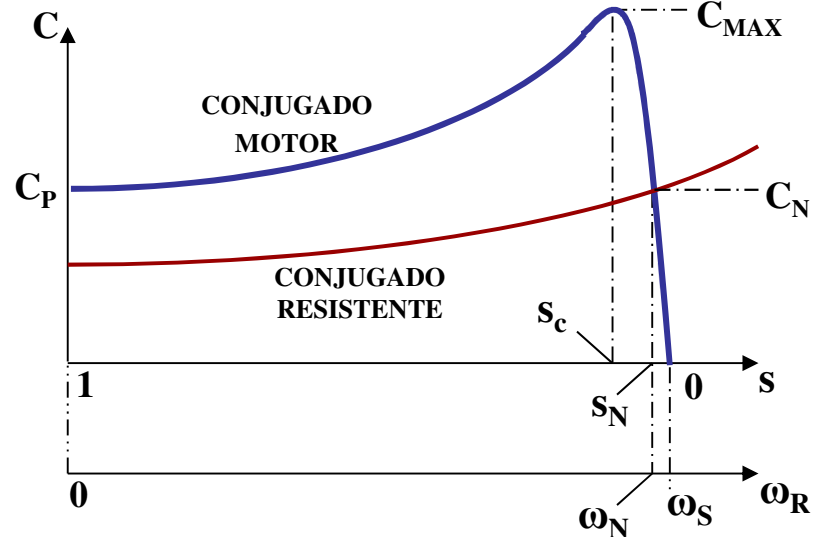
CARACTERÍSTICAS EXTERNAS DA MÁQUINA ASSÍNCRONA - VALORES USUAIS



CORRENTE DE PARTIDA OU DE CURTO-CIRCUITO :

4,5 A 8,5 p.u. → MOTORES DE GAIOLA

**4,0 A 6,5 p.u. → MOTORES DE ANÉIS
COM ROTOR CURTO CIRCUITADO**



CONJUGADO DE PARTIDA :

0,5 A 1,5 p.u. → MOTORES DE GAIOLA

**0,3 A 0,8 p.u. → MOTORES DE ANÉIS
COM ROTOR CURTO CIRCUITADO**

CONJUGADO MÁXIMO:

2,5 A 3,5 p.u. → MOTORES DE GAIOLA

2,2 A 4,2 p.u. → MOTORES DE ANÉIS