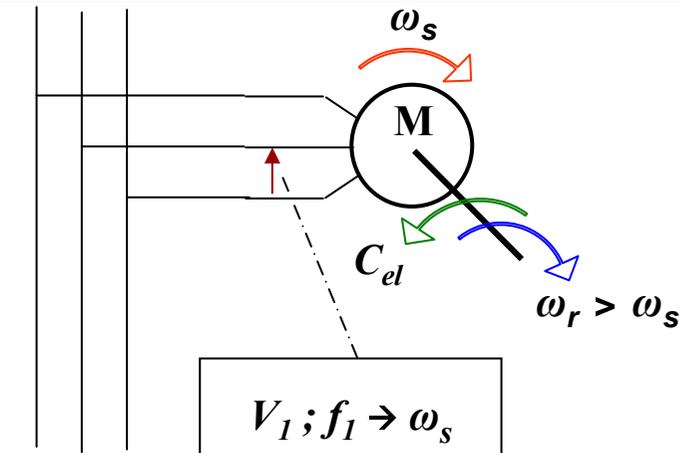


## **MÁQUINA ASSÍNCRONA OPERANDO NO MODO GERADOR**

## CARACTERIZAÇÃO DA OPERAÇÃO COMO GERADOR



REDE TRIFÁSICA  
PREVIAMENTE ENERGIZADA

NECESSIDADE DE CAMPO GIRANTE PARA OPERAÇÃO DA  
MÁQUINA ASSÍNCRONA → REDE ENERGIZADA

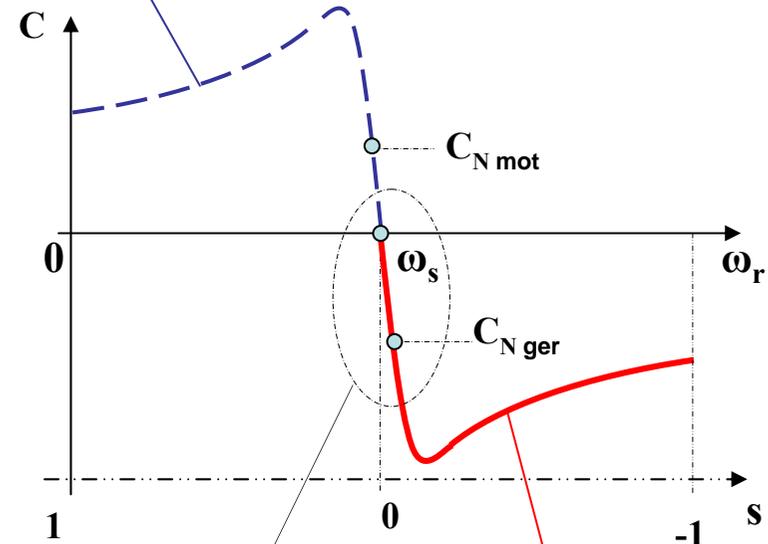
POTÊNCIA REATIVA DE MAGNETIZAÇÃO PARA FORMAÇÃO DO  
CAMPO GIRANTE SEMPRE ABSORVIDA DA REDE

MÁQUINA ASSÍNCRONA SÓ INJETA POTÊNCIA ATIVA NA REDE  
ENERGIZADA

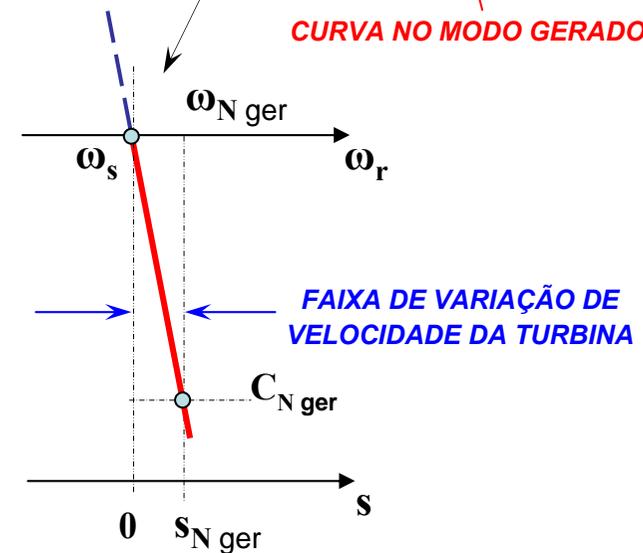
FAIXA DE ESCORREGAMENTO INERENTE É PEQUENA

“DISPENSA” O USO DE REGULADOR DE VELOCIDADE E TENSÃO

CURVA NO MODO MOTOR



CURVA NO MODO GERADOR



### ASPECTOS PARTICULARES DO USO DA MÁQUINA ASSÍNCRONA NO MODO GERADOR

**OPERAÇÃO NO MODO GERADOR PODE SER OBTIDA INDISTINTAMENTE COM A MÁQUINA DE ROTOR EM GAIOLA OU COM A MÁQUINA COM ROTOR DE ANÉIS**

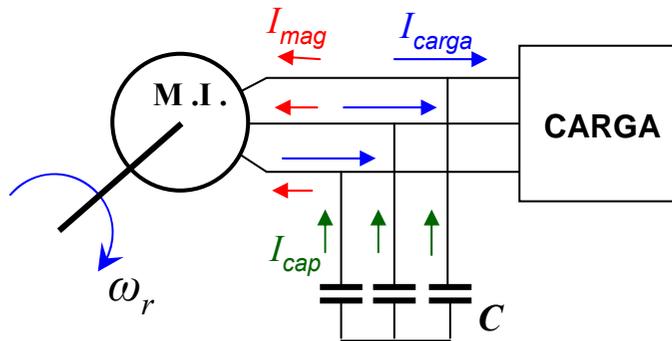
**ESCORREGAMENTO NOMINAL É EM GERAL PEQUENO ( 1 A 5 % ), TORNANDO LIMITADA A EXCURSÃO DE VELOCIDADE DA TURBINA**

**EM POTÊNCIAS MÉDIAS E GRANDES, PARA MELHOR APROVEITAMENTO DA POTÊNCIA MECÂNICA DA TURBINA ( ESPECIALMENTE A EÓLICA ), É NECESSÁRIO AMPLIAR A FAIXA DE VARIAÇÃO DE VELOCIDADES**

**AMPLIAÇÃO DA FAIXA DE ROTAÇÃO É POSSÍVEL COM O GERADOR DE INDUÇÃO COM ROTOR DE ANÉIS, ASSOCIADO A CONVERSOR ESTÁTICO DE FREQUÊNCIA NO CIRCUITO DO ROTOR PARA RECUPERAÇÃO DA POTÊNCIA DE ESCORREGAMENTO → POSSIBILIDADE DE OPERAÇÃO SUB-SÍNCRONA E SUPER-SÍNCRONA  
→ POSSIBILIDADE AINDA DE FORNECIMENTO DE REATIVOS PELO GERADOR ATRAVÉS DE CONTROLE ADEQUADO DO CONVERSOR ROTÓRICO**

**EM PEQUENAS POTÊNCIAS É POSSÍVEL O USO INDEPENDENTE DA REDE ENERGIZADA, MEDIANTE EXCITAÇÃO POR MEIO DE CAPACITORES, PARA O FORNECIMENTO DA POTÊNCIA REATIVA DE MAGNETIZAÇÃO REQUERIDA PARA FORMAR O CAMPO GIRANTE NO ENTREFERRO → EM GERAL USO DA MÁQUINA COM ROTOR DE GAIOLA**

**GERADOR DE INDUÇÃO INDEPENDENTE DA REDE ENERGIZADA → EM GERAL DE PEQUENA POTÊNCIA**



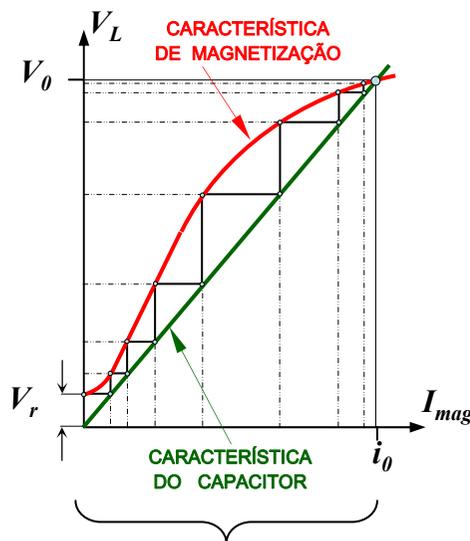
BANCO DE CAPACITORES PARA A MAGNETIZAÇÃO DA MÁQUINA DE INDUÇÃO

→  $Q_{REATIVA\ CAP} = Q_{REATIVA\ DE\ EXCITAÇÃO}$  → GARANTE TENSÃO NOMINAL EM VAZIO

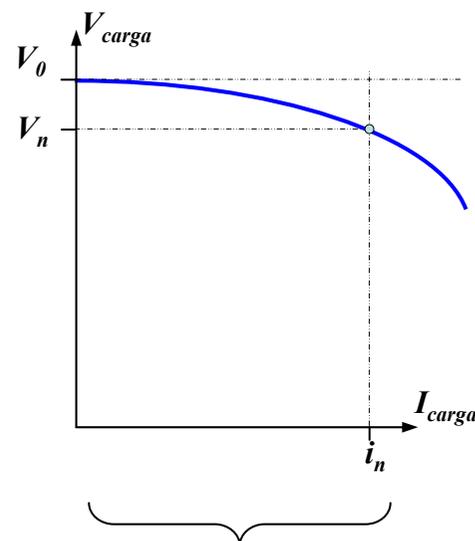
REMANENTE DE TENSÃO NA MÁQUINA PARA INICIAR O ESCORVAMENTO → REQUER ALIMENTAÇÃO PRÉVIA COMO MOTOR → PRODUZ MAGNETISMO RESIDUAL NO ROTOR

TENSÃO VARIA COM A CARGA, SEM POSSIBILIDADE DE AJUSTE → INCLUSÃO DE MAIS CAPACITORES CORRIGE PARCIALMENTE O NÍVEL DE TENSÃO EM CARGA

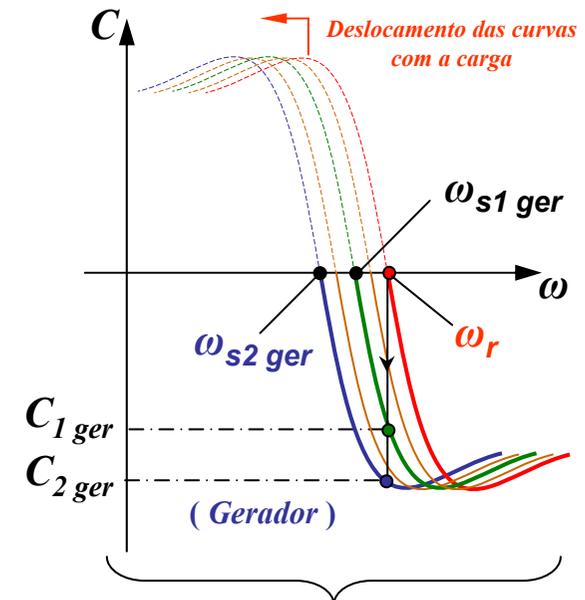
FREQÜÊNCIA VARIA COM A CARGA, PARA ROTAÇÃO DO EIXO CONSTANTE, SEM POSSIBILIDADE DE AJUSTE → DESLOCAMENTO DAS CURVAS IMPLICAM EM DIFERENTES  $\omega_s$



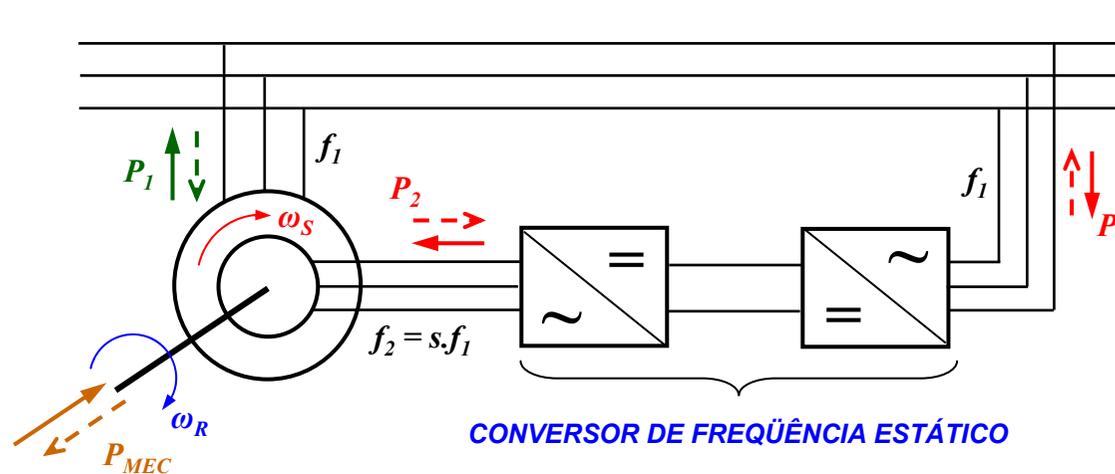
ESCORVAMENTO OU AUTO-EXCITAÇÃO DO GERADOR DE INDUÇÃO



VARIAÇÃO DA TENSÃO COM A CARGA DO GERADOR DE INDUÇÃO



VARIAÇÃO DA FREQÜÊNCIA COM A CARGA DO GERADOR DE INDUÇÃO

**GERADOR DE INDUÇÃO CONECTADO À REDE ENERGIZADA → RECUPERAÇÃO DA POTÊNCIA DE ESCORREGAMENTO**

**CONFIGURAÇÃO OBTIDA COM MÁQUINA ASSÍNCRONA DE ANÉIS ( ROTOR BOBINADO )**

**GERADOR COMPOSTO DE MÁQUINA DE INDUÇÃO DUPLAMENTE ALIMENTADA ( Usualmente referido como DFIG – “Doubly-Fed Induction Generator” )**

**CONVERSOR ESTÁTICO ALIMENTA CIRCUITO DO ROTOR COM FREQUÊNCIA AJUSTÁVEL, DIFERENTE DA FREQUÊNCIA DA REDE**

**POSSIBILITA OPERAÇÃO COM ELEVADOS NÍVEIS DE ESCORREGAMENTO, TÍPICAMENTE DE +30% A -30% ( +0,3 > s > -0,3 )**

**RELAÇÕES CARACTERÍSTICAS DA MÁQUINA ASSÍNCRONA:**

**ESTATOR ALIMENTADO A PARTIR DA REDE, COM FREQUÊNCIA  $f_1$  → CAMPO ROTATIVO NO ENTREFERRO COM VELOCIDADE  $\omega_S$  ( Em relação ao estator )**

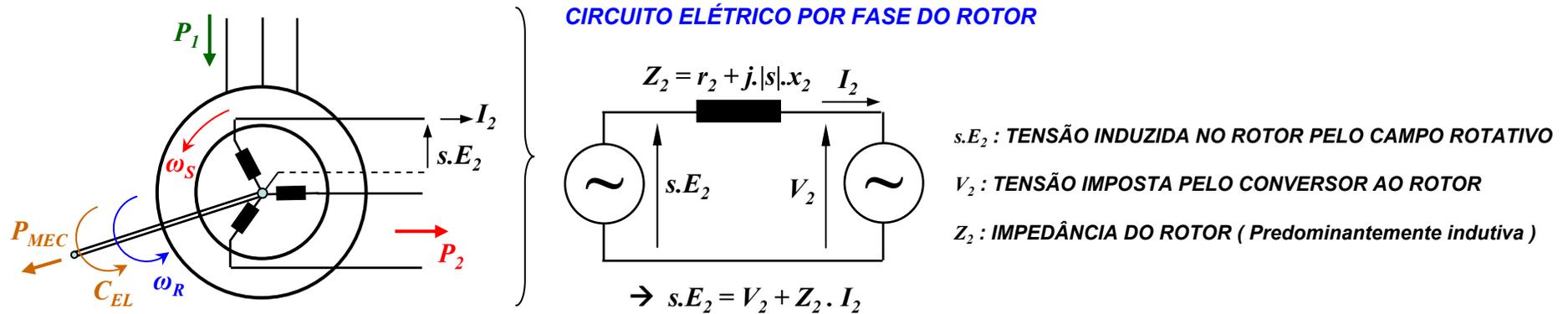
**ROTOR ALIMENTADO A PARTIR DO CONVERSOR, COM FREQUÊNCIA IMPOSTA  $f_2 = s \cdot f_1$  → CAMPO ROTATIVO DO ROTOR COM VELOCIDADE  $s \cdot \omega_S$  ( Em relação ao rotor )**

**INTERAÇÃO DOS CAMPOS É SÍNCRONA → ROTOR OPERA COM VELOCIDADE RIGOROSA, FIXADA EM  $\omega_R = \omega_S - s \cdot \omega_S = (1 - s) \cdot \omega_S$**

$$\rightarrow s = (\omega_S - \omega_R) / \omega_S \rightarrow P_2 = s \cdot P_1 \rightarrow P_{MEC} = (1 - s) \cdot P_1 \rightarrow P_1 = P_{MEC} + P_2$$

**NESSA CONFIGURAÇÃO, A MÁQUINA A RIGOR OPERA DE FORMA SÍNCRONA, COM VELOCIDADE NO EIXO  $\omega_R \neq \omega_S$**

MÁQUINA DE INDUÇÃO DUPLAMENTE ALIMENTADA → CARACTERIZAÇÃO DOS MODOS DE OPERAÇÃO

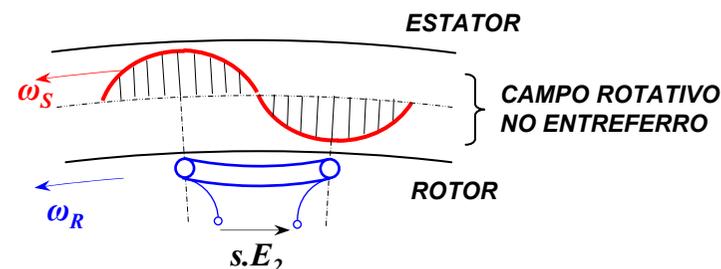


CONVENÇÕES PARA EFEITO DE ANÁLISE:

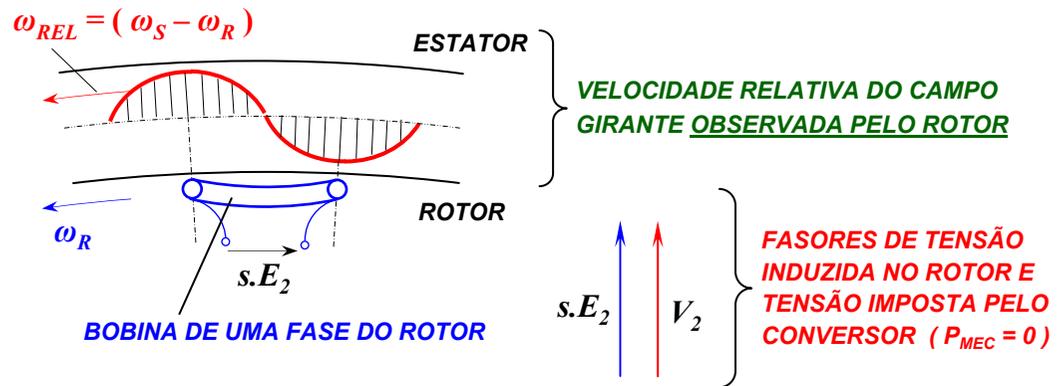
**ROTOR: "FONTE" →  $P_2 > 0$ : POTÊNCIA ATIVA FORNECIDA PELO ROTOR - ( $P_2 < 0$ : potência absorvida pelo rotor)**

**ESTATOR: "RECEPTOR" →  $P_1 > 0$ : POTÊNCIA ATIVA ABSORVIDA PELO ESTATOR - ( $P_1 < 0$ : potência fornecida pelo estator)**

**EIXO: "MOTOR" →  $P_{MEC} > 0$ : POTÊNCIA MECÂNICA EXTRAÍDA DO EIXO – "CARGA" - ( $P_{MEC} < 0$ : potência injetada no eixo – "turbina")**



**CAMPO NO ENTREFERRO → COMPOSIÇÃO VETORIAL DOS CAMPOS DE ESTATOR E ROTOR SINCRONIZADOS ENTRE SI**

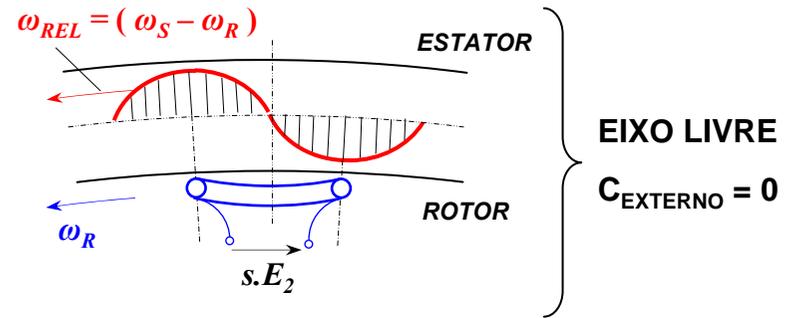


**MODOS DE OPERAÇÃO DA MÁQUINA ASSÍNCRONA DUPLAMENTE ALIMENTADA**

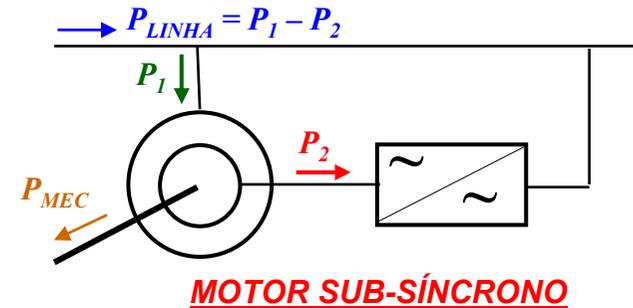
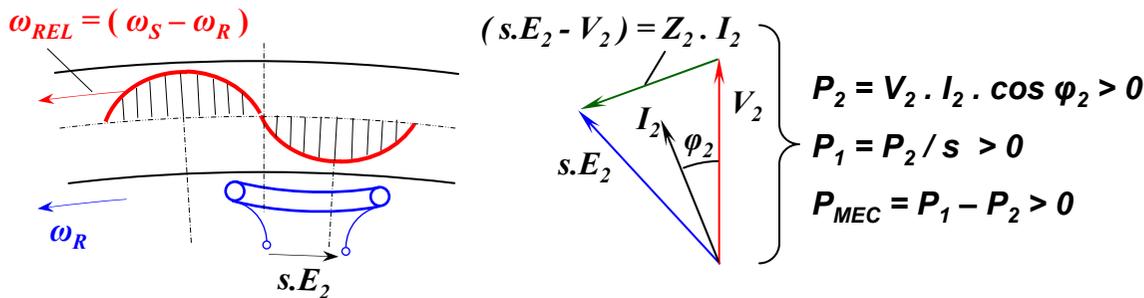
**OPERAÇÃO SUB-SÍNCRONA :**  $\omega_R < \omega_S - s > 0$

→  $\omega_{REL}$  NA MESMA DIREÇÃO DE  $\omega_R$

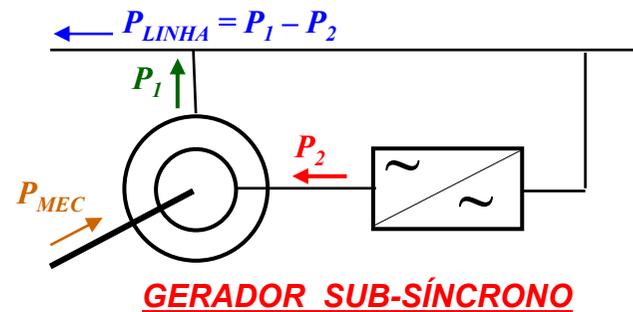
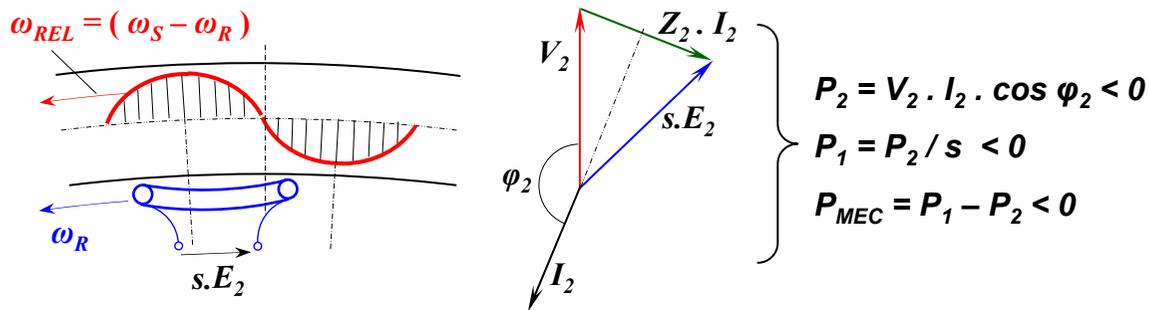
→  $P_2 = s.P_1 \rightarrow P_{MEC} = (1-s).P_1 \rightarrow P_{MEC} < P_1 \rightarrow P_{MEC} = (P_1 - P_2)$



**ROTOR RETARDADO → CARGA APLICADA AO EIXO →  $s.E_2$  AVANÇA EM RELAÇÃO A  $V_2$**



**ROTOR AVANÇADO → TURBINA APLICADA AO EIXO →  $s.E_2$  ATRASA EM RELAÇÃO A  $V_2$**

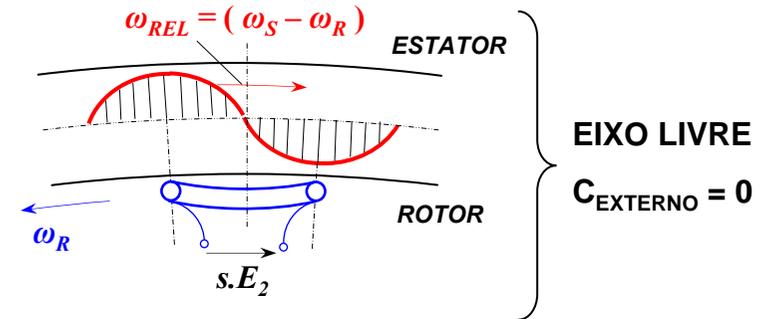


**MODOS DE OPERAÇÃO DA MÁQUINA ASSÍNCRONA DUPLAMENTE ALIMENTADA**

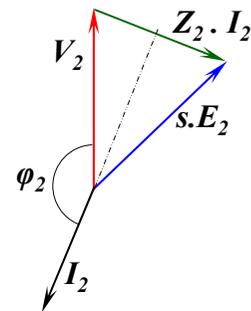
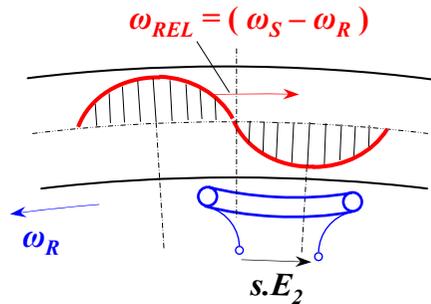
**OPERAÇÃO SUPER-SÍNCRONA:**  $\omega_R > \omega_S - s < 0$

→  $\omega_{REL}$  NA DIREÇÃO OPOSTA DE  $\omega_R$

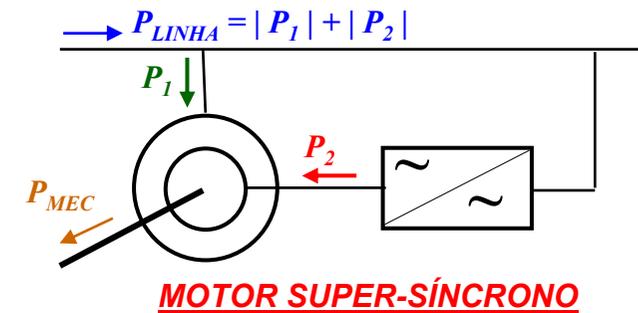
→  $P_2 = s \cdot P_1 \rightarrow P_{MEC} = (1 - s) \cdot P_1 \rightarrow P_{MEC} > P_1 \rightarrow P_{MEC} = (P_1 - P_2)$



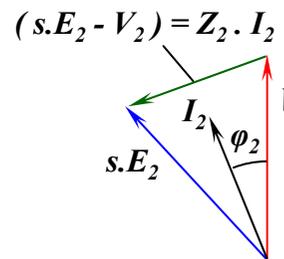
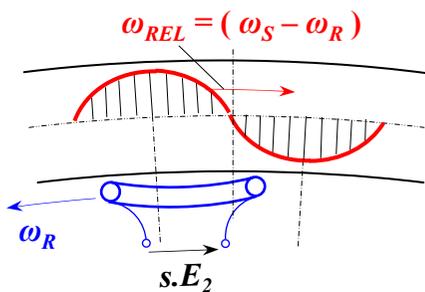
**ROTOR RETARDADO** → CARGA APLICADA AO EIXO →  $s \cdot E_2$  ATRASADA EM RELAÇÃO A  $V_2$



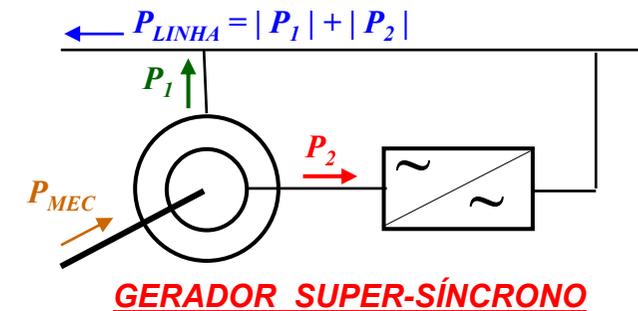
$$\left. \begin{aligned} P_2 &= V_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 < 0 \\ P_1 &= P_2 / s > 0 \\ P_{MEC} &= P_1 - P_2 > 0 \end{aligned} \right\}$$



**ROTOR AVANÇADO** → TURBINA APLICADA AO EIXO →  $s \cdot E_2$  AVANÇA EM RELAÇÃO A  $V_2$

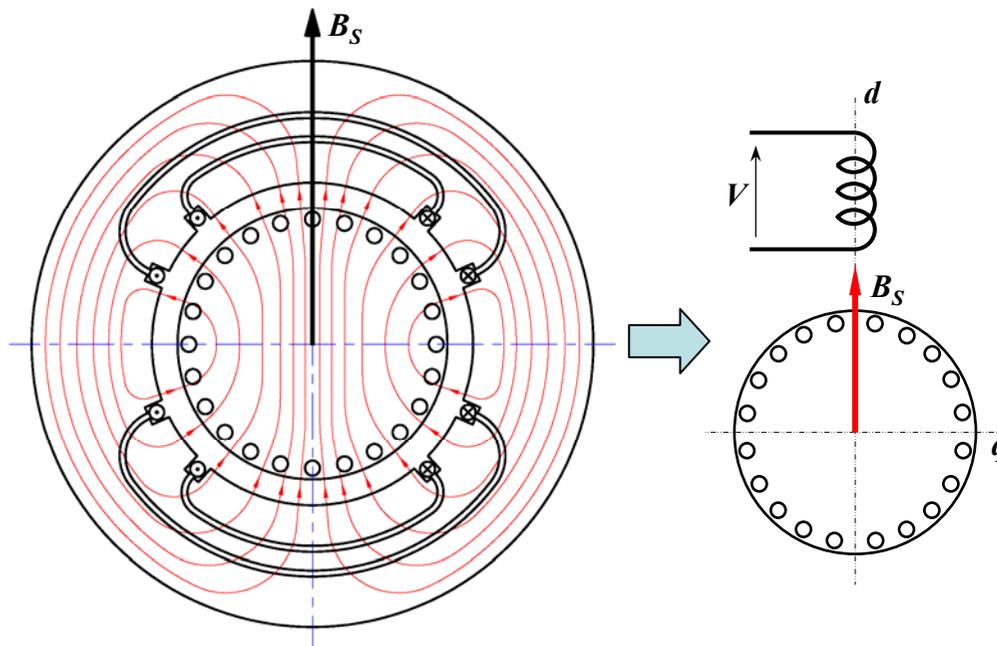


$$\left. \begin{aligned} P_2 &= V_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 > 0 \\ P_1 &= P_2 / s < 0 \\ P_{MEC} &= P_1 - P_2 < 0 \end{aligned} \right\}$$



## MÁQUINAS ASSÍNCRONAS MONOFÁSICAS

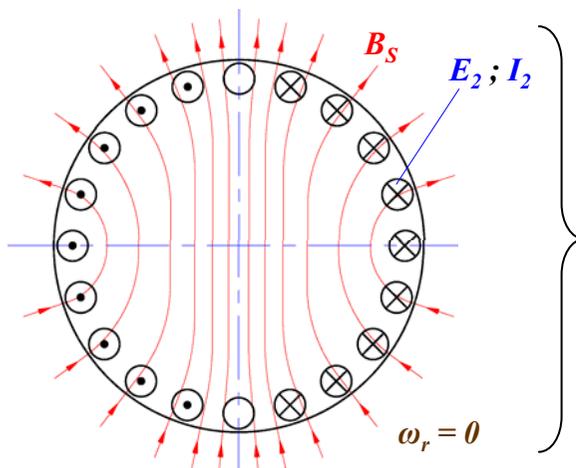
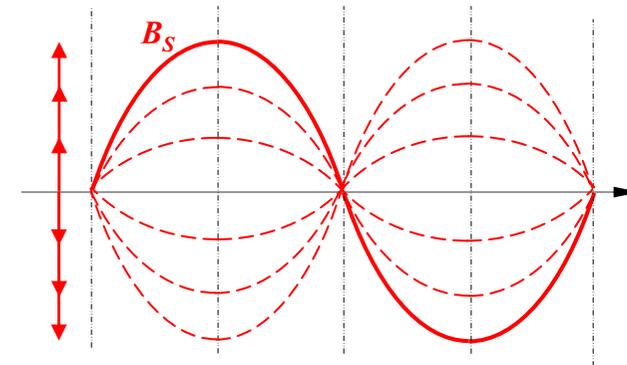
## FUNCIONAMENTO DOS MOTORES DE INDUÇÃO MONOFÁSICOS



ENROLAMENTO MONOFÁSICO PRODUZ CAMPO MAGNÉTICO DISTRIBUÍDO SENOIDALMENTE, PORÉM COM DIREÇÃO FIXA NO ESPAÇO

→ NÃO PRODUZ CAMPO ROTATIVO

→ PRODUZ CAMPO PULSANTE NO TEMPO



CONSEQUÊNCIAS DA INTERAÇÃO COM O ROTOR :

NÃO EXISTE MOVIMENTO RELATIVO ENTRE O CAMPO MAGNÉTICO PULSANTE E OS CONDUTORES, COM O ROTOR PARADO

→ FUNCIONA COMO TRANSFORMADOR EM CURTO ( ROTOR = SECUNDÁRIO )

→ TENSÃO  $E_2$  E CORRENTE  $I_2$  INDUZIDAS POR EFEITO VARIACIONAL

→ NÃO PRODUZ TORQUE DE PARTIDA

→ MOTOR MONOFÁSICO SÓ VAI DESENVOLVER TORQUE QUANDO EM ROTAÇÃO :  $\omega_r \neq 0$

→ NECESSÁRIA A IMPOSIÇÃO DE ROTAÇÃO INICIAL PARA MANIFESTAÇÃO DO TORQUE

EXPLICAÇÃO DO FUNCIONAMENTO COM  $\omega_r \neq 0$  → { 1 - TEORIA DOS CAMPOS CRUZADOS  
2 - TEORIA DO DUPLO CAMPO ROTATIVO

**1 - TEORIA DOS CAMPOS CRUZADOS DO MOTOR MONOFÁSICO DE INDUÇÃO - ABORDAGEM QUALITATIVA**

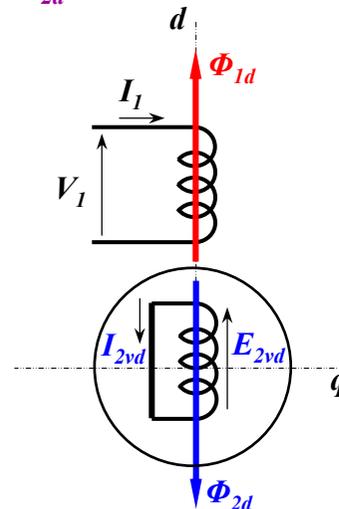
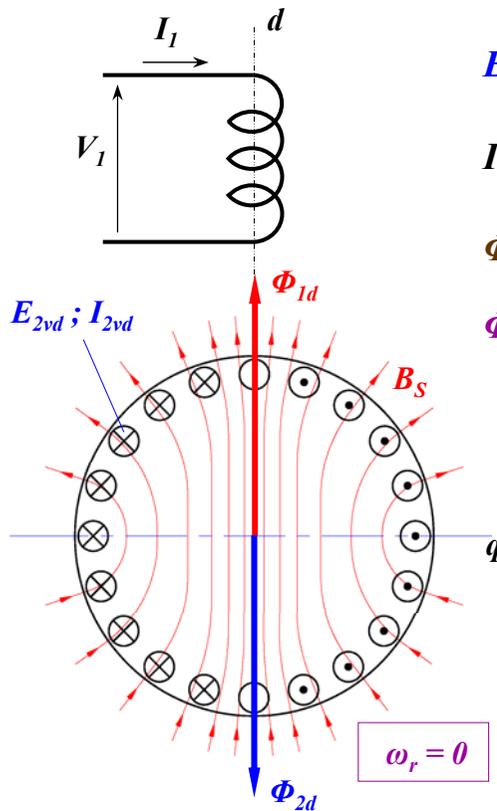
$\Phi_{1d}$  : FLUXO CRIADO PELO ESTATOR → ( CAMPO PULSANTE COM  $f = \omega / 2\pi$  )

$E_{2vd}$  : TENSÃO INDUZIDA POR EFEITO VARIACIONAL NAS BARRAS DO ROTOR

$I_{2vd} = E_{2vd} / Z_{2d}$  : CORRENTE CIRCULANTE NA GAIOLA DO ROTOR

$\Phi_{2d}$  : FLUXO CRIADO PELA CIRCULAÇÃO DE CORRENTES NO ROTOR

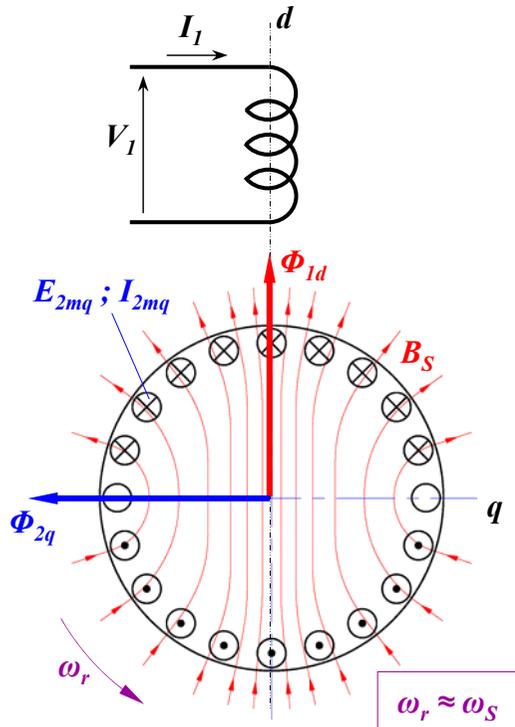
$\Phi_{1d}$  e  $\Phi_{2d}$  : AGEM SOBRE O MESMO EIXO →  $C = 0$  ( TORQUE NULO )



COM ROTOR ESTACIONÁRIO :

INTERAÇÃO ENTRE ROTOR E ESTATOR  
EQUIVALE A UM TRANSFORMADOR EM CURTO

→ GAIOLA RESPONDE À VARIAÇÃO TEMPORAL  
DO FLUXO CRIADO PELO ESTATOR AO LONGO  
DO MESMO EIXO NO ESPAÇO E EM OPOSIÇÃO  
DE FASE NO TEMPO



$\Phi_{1d}$  : FLUXO CRIADO PELO ESTATOR NA DIREÇÃO DO EIXO DIRETO “ d ”

$E_{2mq}$  : TENSÃO INDUZIDA POR EFEITO MOCIONAL NAS BARRAS DO ROTOR

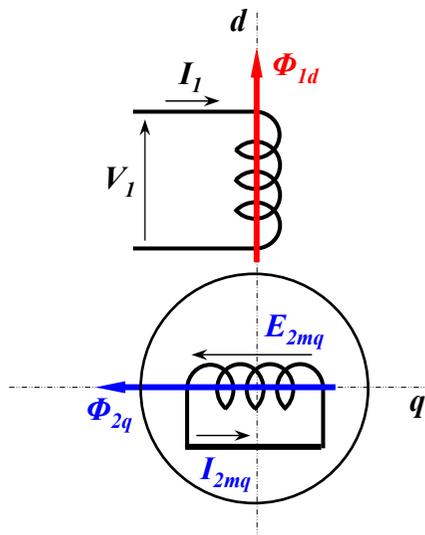
→ INTERAÇÃO DE TENSÃO INDUZIDA NO ROTOR :  $dE_{2mq} = d\vec{L} \cdot (\vec{V}_{rel} \times \vec{B}_s)$

$I_{2mq} = E_{2mq} / Z_{2q}$  : CORRENTE CIRCULANTE NA GAIOLA DO ROTOR

$\Phi_{2q}$  : FLUXO CRIADO PELA CIRCULAÇÃO DE CORRENTES NO ROTOR

→ SE MANIFESTA NA DIREÇÃO DO EIXO EM QUADRATURA “ q ”

$\Phi_{1d}$  e  $\Phi_{2q}$  : AGEM SOBRE EIXOS ORTOGONAIS →  $C \neq 0$  ( TORQUE NÃO NULO )



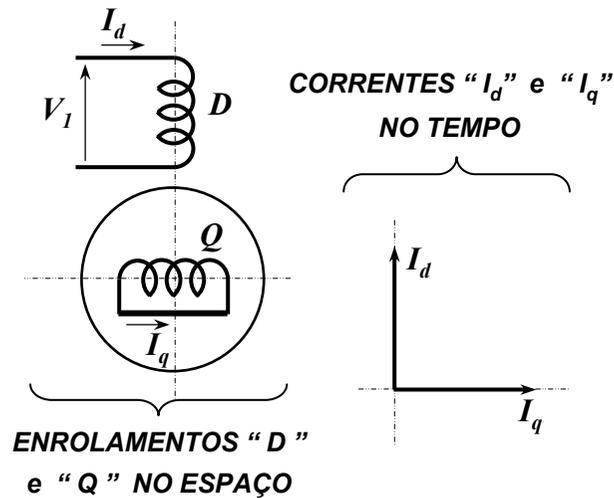
COM ROTOR EM MOVIMENTO :

BARRAS DO ROTOR AFETADAS DE VELOCIDADE EM RELAÇÃO AO CAMPO CRIADO PELO ESTATOR →  $E_{2mq}$  EM FASE NO TEMPO COM  $\Phi_{1d}$

FASE DA CORRENTE  $I_{2mq}$  :  $\approx 90^\circ$  EM ATRASO EM RELAÇÃO A  $E_{2mq}$  (CIRCUITO INDUTIVO)

GAIOLA PRODUZ FLUXO EM QUADRATURA NO ESPAÇO RELATIVAMENTE AO ESTATOR

$\Phi_{1d}$  e  $\Phi_{2q}$  → FLUXOS EM QUADRATURA NO ESPAÇO E DEFASADOS  $90^\circ$  NO TEMPO

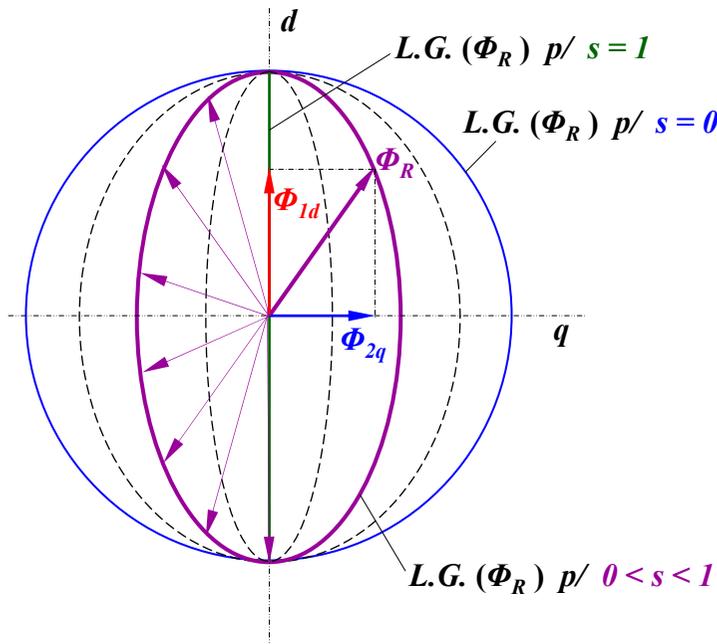


**MOTOR MONOFÁSICO OPERANDO COM O ROTOR EM MOVIMENTO :**

→ ROTOR SE COMPORTA COMO UM SEGUNDO ENROLAMENTO EM QUADRATURA COM O ENROLAMENTO DO ESTATOR

→ CORRENTES NOS RESPECTIVOS ENROLAMENTOS DEFASADAS NO TEMPO DE 90°

→ EQUIVALE AO COMPORTAMENTO DE ENROLAMENTO BIFÁSICO ( “ 2ª FASE ” É A GAIOLA DO ROTOR )



**TENSÃO MOCIONAL INDUZIDA NO ROTOR DEPENDE DE  $\omega_r$**

$s = 1 \rightarrow (\omega_r = 0) \rightarrow E_{2mq} = 0 \rightarrow$  L.G.  $(\Phi_R)$  É UMA RETA NO E.D.

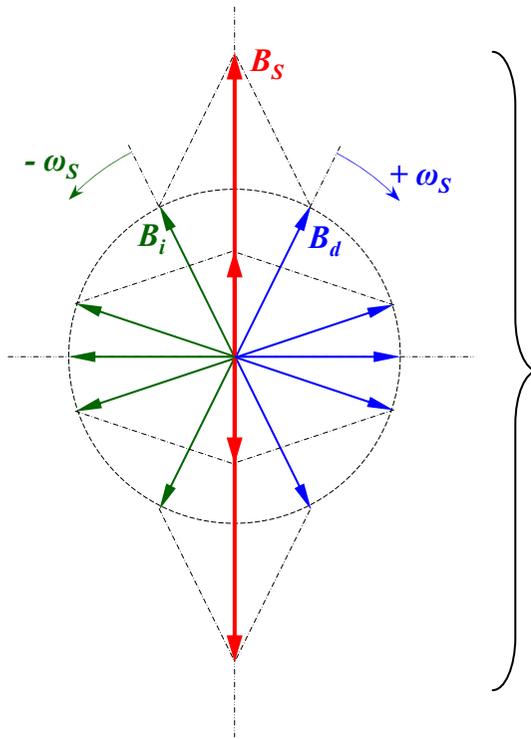
$s = 0 \rightarrow (\omega_r = \omega_S) \rightarrow E_{2mq} = E_{2vd} \rightarrow \Phi_{2q} = \Phi_{1d}$

→ L.G.  $(\Phi_R)$  É UM CÍRCULO

$0 < s < 1 \rightarrow (\omega_r < \omega_S) \rightarrow E_{2mq} = (1-s).E_{2vd} \rightarrow \Phi_{2q} = (1-s).\Phi_{1d}$

→ L.G.  $(\Phi_R)$  É UMA ELIPSE

**MOTOR MONOFÁSICO PRODUZ “ CAMPO ROTATIVO ELÍPTICO ”**

2 - TEORIA DO DUPLO CAMPO ROTATIVO DO MOTOR MONOFÁSICO DE INDUÇÃO - ABORDAGEM QUANTITATIVA

ROTAÇÃO SÍNCRONA DO CAMPO :

$$\omega_s = \omega / p = 2\pi \cdot f / p$$

$p$  : N.º. de pares de polos

**CAMPO MAGNÉTICO PULSANTE CRIADO PELO ENROLAMENTO MONOFÁSICO :**

→ INTERPRETADO COMO DUAS COMPONENTES DE CAMPO ROTATIVAS DE AMPLITUDE CONSTANTE E IGUAL À METADE DO CAMPO PULSANTE MÁXIMO

→ CADA COMPONENTE GIRANDO NO ENTREFERRO COM A MESMA VELOCIDADE SÍNCRONA,  $\omega_s$ , PORÉM EM SENTIDOS OPOSTOS

EXPRESSÃO FORMAL DO CAMPO PULSANTE →  $B_s = B_m \cdot \cos \omega t$

$$\Rightarrow \cos \omega t = \frac{e^{j \cdot \omega t} + e^{-j \cdot \omega t}}{2} ; \quad \omega = 2\pi \cdot f$$

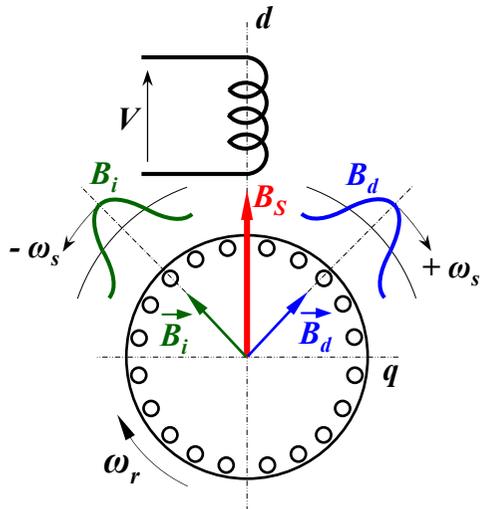
$$B_s = \underbrace{\frac{B_m}{2} \cdot e^{+j \cdot \omega_s t}}_{B_d} + \underbrace{\frac{B_m}{2} \cdot e^{-j \cdot \omega_s t}}_{B_i}$$

$B_d$  : COMPONENTE DE CAMPO DE SEQÜÊNCIA DIRETA

→ VELOCIDADE +  $\omega_s$

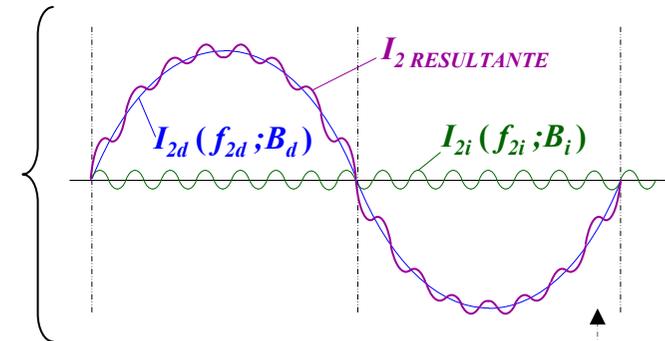
$B_i$  : COMPONENTE DE CAMPO DE SEQÜÊNCIA INVERSA

→ VELOCIDADE -  $\omega_s$



CADA COMPONENTE DE CAMPO ROTATIVO INTERAGE COM O ROTOR DA FORMA USUAL, SIMILAR À INTERAÇÃO DOS ENROLAMENTOS POLIFÁSICOS

CORRENTES INDUZIDAS NO ROTOR POR CADA COMPONENTE DE CAMPO TÊM FREQUÊNCIAS DIFERENTES QUE SE SUPERPÕEM



→ CAMPO DE SEQÜÊNCIA DIRETA :  $B_d$  GIRA C/  $\omega_s$  NO MESMO SENTIDO DE  $\omega_r$

→ ESCORREGAMENTO DO ROTOR EM RELAÇÃO À COMPONENTE DIRETA →  $s_d = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} = s$

→ FREQUÊNCIA DAS TENSÕES E CORRENTES INDUZIDAS NO ROTOR POR  $B_d$  →  $f_{2d} = s \cdot f_1$

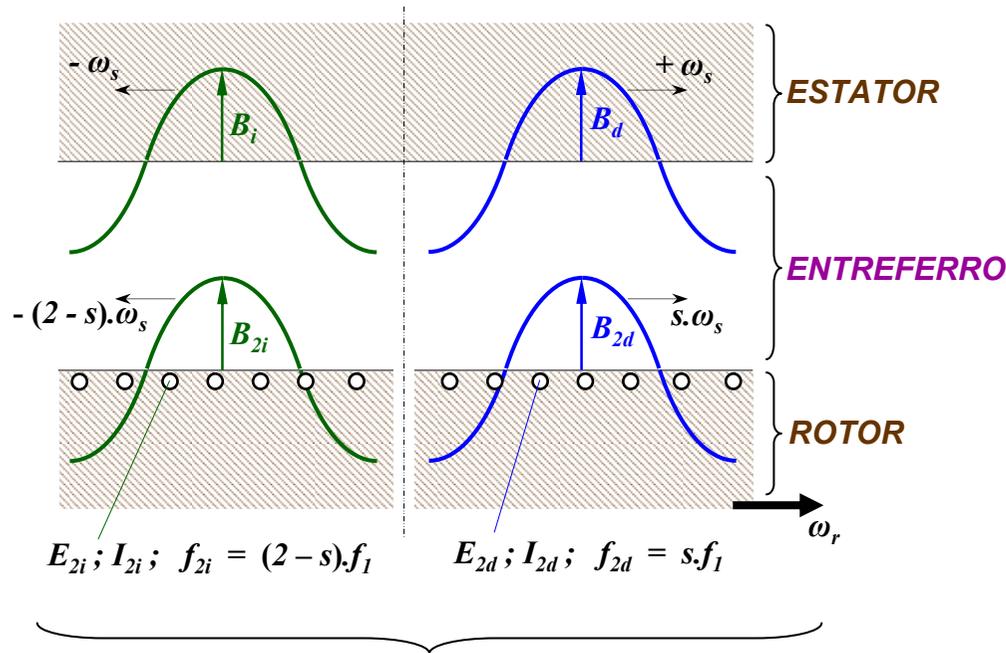
→ CAMPO DE SEQÜÊNCIA INVERSA :  $B_i$  GIRA C/  $\omega_s$  NO SENTIDO OPOSTO DE  $\omega_r$

→ ESCORREGAMENTO DO ROTOR EM RELAÇÃO À COMPONENTE DE CAMPO INVERSA :

$$\rightarrow s_i = \frac{\omega_s - (-\omega_r)}{\omega_s} = \frac{\omega_s + (1 - s) \cdot \omega_s}{\omega_s} = (2 - s)$$

→ FREQUÊNCIA DAS TENSÕES E CORRENTES INDUZIDAS NO ROTOR POR  $B_i$  →  $f_{2i} = (2 - s) \cdot f_1$

INTERAÇÃO DAS ONDAS DE F.m.m. DE ESTATOR E ROTOR



VELOCIDADE DAS ONDAS DE CAMPO ROTÓRICO EM  
RELAÇÃO AO ESTATOR :

CAMPO DE SEQUÊNCIA DIRETA :  $B_{2d}$

$$s.\omega_s + \omega_r = s.\omega_s + (1-s).\omega_s = \omega_s$$

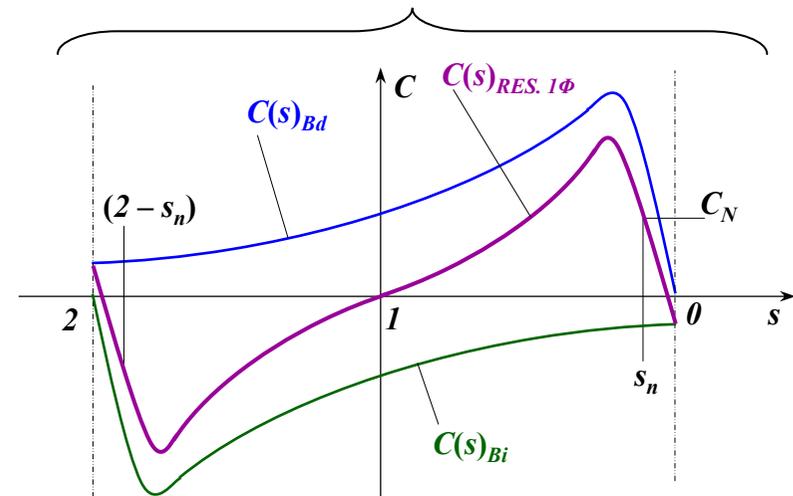
CAMPO DE SEQUÊNCIA INVERSA :  $B_{2i}$

$$-(2-s).\omega_s + \omega_r = -(2-s).\omega_s + (1-s).\omega_s = -\omega_s$$

CADA COMPONENTE DE CORRENTE ROTÓRICA  
PRODUZ F.m.m.<sub>2</sub> QUE REAGE COM A F.m.m.<sub>1</sub> DO  
ESTATOR NA SUA ROTAÇÃO SÍNCRONA

→ COMPORTAMENTO DE CADA COMPONENTE DE  
CAMPO ROTATIVO É SIMILAR AO DO MOTOR 3Φ

→ CADA COMPONENTE DE CAMPO PRODUZ  
CURVA CARACTERÍSTICA DE TORQUE SIMILAR  
AO DO MOTOR 3Φ

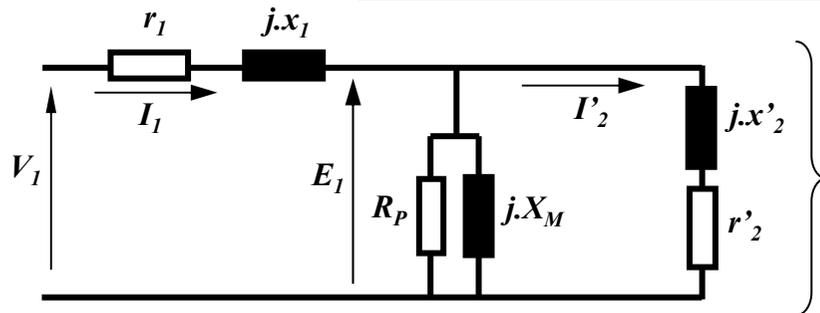


$$C_{1\Phi} = C_{Bd} + C_{Bi} \text{ p/ QUALQUER ESCORREGAMENTO}$$

→ TORQUE DE PARTIDA NULO

→ NÃO TEM SENTIDO PREFERENCIAL DE ROTAÇÃO

**CIRCUITO EQUIVALENTE DO MOTOR MONOFÁSICO DE INDUÇÃO**

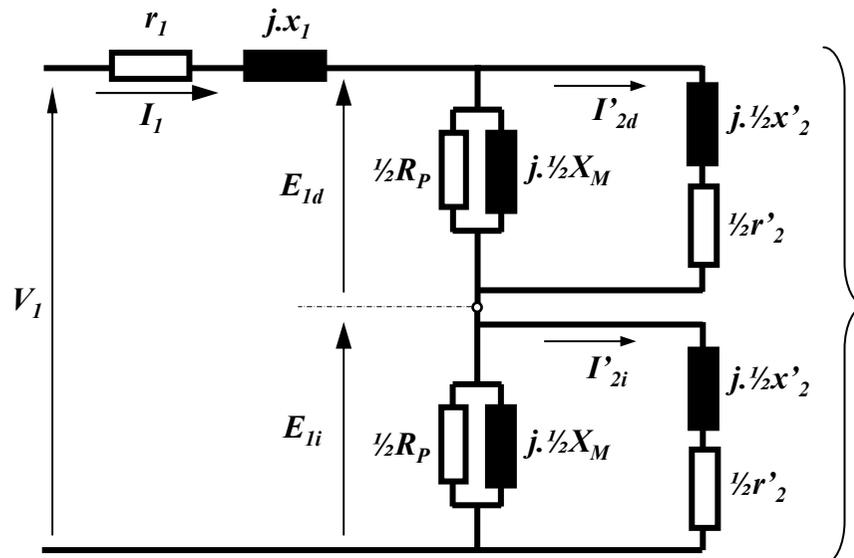


CIRCUITO PARA ROTOR ESTACIONÁRIO :  $\omega_r = 0$

→ MOTOR MONOFÁSICO EQUIVALE A UM TRANSFORMADOR EM CURTO CIRCUITO

→ CAMPO NO ENTREFERRO É PULSANTE NO TEMPO

CAMPO MAGNÉTICO PULSANTE INTERPRETADO COMO RESULTANTE DE 2 CAMPOS ROTATIVOS EM SENTIDOS OPOSTOS, COMO METADE DA AMPLITUDE → CIRCUITO EQUIVALENTE ADAPTADO PARA ESSA DESCRIÇÃO COM PARÂMETROS ASSOCIADOS AOS CAMPOS NO ENTREFERRO SUBDIVIDIDOS EM 2 PARTES IGUAIS ( $\omega_r = 0$ )



COM ROTOR ESTACIONÁRIO :  $\omega_r = 0 \rightarrow s = 1$

$$\rightarrow E_{1d} = E_{1i} = \frac{1}{2} E_1 ; I'_{2d} = I'_{2i}$$

INTERAÇÃO DO CAMPO ROTATIVO COM O ROTOR :

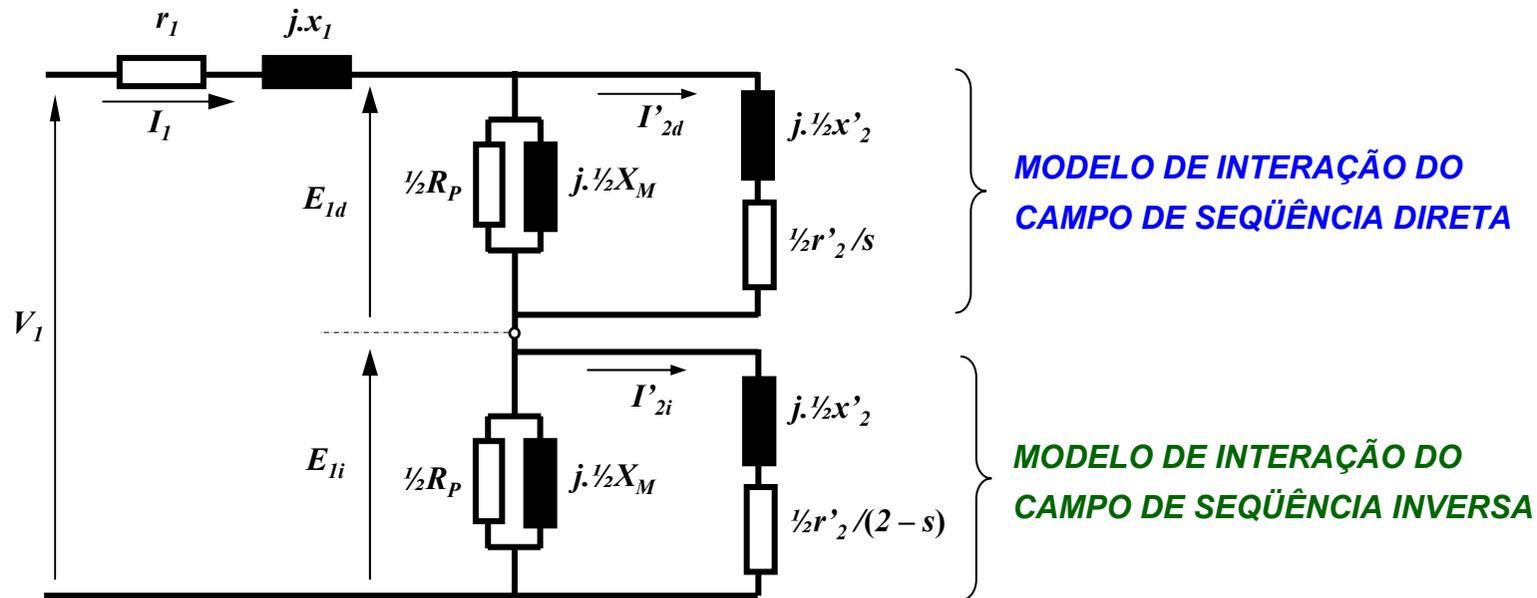
$$\rightarrow C = P_{tr} / \omega_s ; P_{tr} = (r'_2 / s) \cdot I'_{2d}{}^2$$

NO MOTOR MONOFÁSICO :  $C_{RES} = C_d - C_i$

$$\rightarrow p/s = 1 \rightarrow C_{RES} = (r'_2 \cdot I'_{2d}{}^2 / \omega_s - r'_2 \cdot I'_{2i}{}^2 / \omega_s) = 0$$

→ TORQUE DE PARTIDA NULO

CIRCUITO PARA MOTOR 1Φ EM MOVIMENTO :  $\omega_r \neq 0 \rightarrow$  ROTOR COM ESCORREGAMENTO “s”

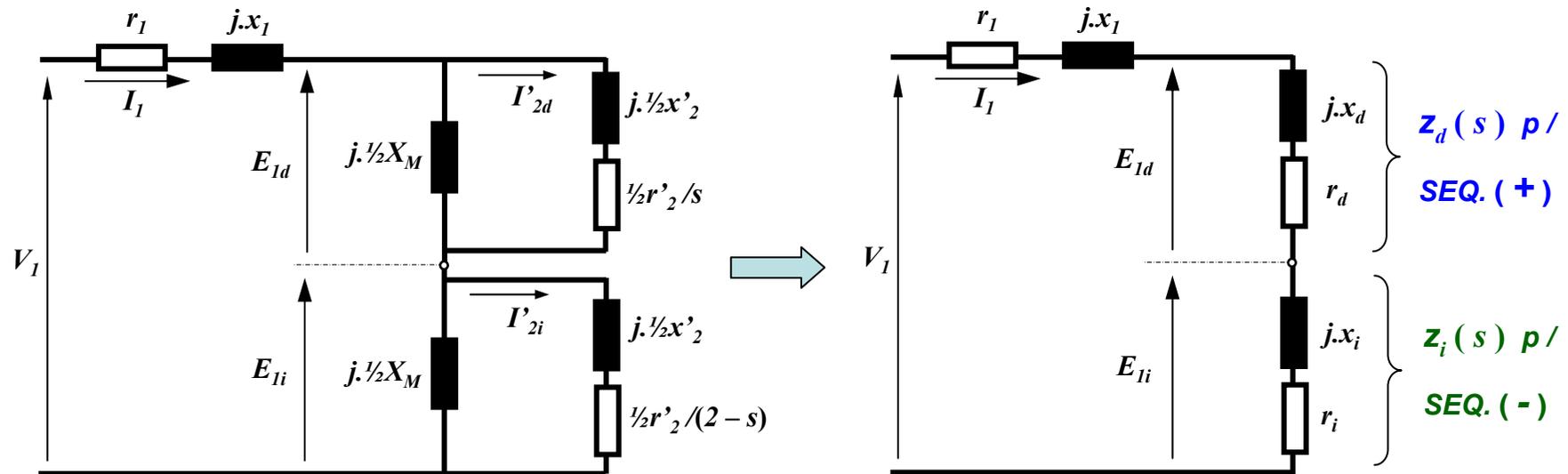


POTÊNCIA TRANSFERIDA AO ROTOR E TORQUE DESENVOLVIDO NO MOTOR MONOFÁSICO :

$$P_{tr_{tot}} = P_{tr_d} - P_{tr_i} = \frac{r'_2}{2 \cdot s} \cdot (I'_{2d})^2 - \frac{r'_2}{2 \cdot (2 - s)} \cdot (I'_{2i})^2$$

$$C = \frac{P_{tr_{tot}}}{\omega_s} \quad ; \quad P_{mec} = (1 - s) \cdot P_{tr_{tot}}$$

PARA EFEITO DE SIMPLIFICAÇÃO DO CÁLCULO, É USUAL ELIMINAR  $R_p$  E CONSIDERAR A POTÊNCIA ÚTIL  
DESCONTANDO AS PERDAS NO FERRO E DE ATRITOS DA POTÊNCIA MECÂNICA  $\rightarrow P_{UT} = P_{MEC} - P_{ROT}$



IMPEDÂNCIAS COMPLETAS DO CIRCUITO EQUIVALENTE SINTETIZADO, RELATIVAS AOS CAMPOS DE  
SEQÜÊNCIA DIRETA E INVERSA, EM FUNÇÃO DO ESCORREGAMENTO :

$$r_d + jx_d = \frac{\left( \frac{r'_2}{2 \cdot s} + j \frac{x'_2}{2} \right) \cdot j \frac{X_m}{2}}{\frac{r'_2}{2 \cdot s} + j \frac{x'_2}{2} + j \frac{X_m}{2}} = z_d(s)$$

$$r_i + jx_i = \frac{\left( \frac{r'_2}{2 \cdot (2 - s)} + j \frac{x'_2}{2} \right) \cdot j \frac{X_m}{2}}{\frac{r'_2}{2 \cdot (2 - s)} + j \frac{x'_2}{2} + j \frac{X_m}{2}} = z_i(s)$$

DO CIRCUITO EQUIVALENTE SINTETIZADO PARA O MOTOR DE INDUÇÃO MONOFÁSICO :

**CORRENTE ABSORVIDA DA LINHA :** 
$$I_1(s) = \frac{V_1}{(r_1 + jx_1) + z_d(s) + z_i(s)}$$

**POTÊNCIA TRANSFERIDA AO ROTOR :** 
$$\left\{ \begin{array}{l} P_{tr_d} = r_d \cdot I_1^2 \\ P_{tr_i} = r_i \cdot I_1^2 \end{array} \right\} \Rightarrow P_{tr_{tot}} = P_{tr_d} - P_{tr_i}$$

**PERDA JOULE NO ROTOR :** 
$$\left\{ \begin{array}{l} p_{j_{2d}} = s \cdot P_{tr_d} \\ p_{j_{2i}} = (2 - s) \cdot P_{tr_i} \end{array} \right\} \Rightarrow p_{j_{tot}} = p_{j_{2d}} + p_{j_{2i}}$$

**TORQUE NO EIXO :** 
$$C = \frac{P_{tr_{tot}}}{\omega_s}$$

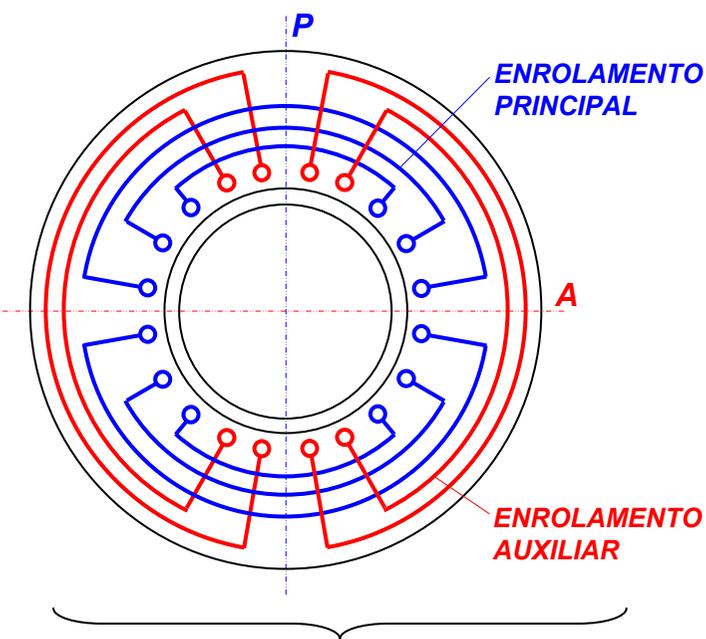
**POTÊNCIA MECÂNICA BRUTA :** 
$$P_{mec} = (1 - s) \cdot P_{tr_{tot}}$$

**POTÊNCIA ÚTIL NO EIXO :** 
$$P_{uteixo} = P_{mec} - P_{rotacionais}$$

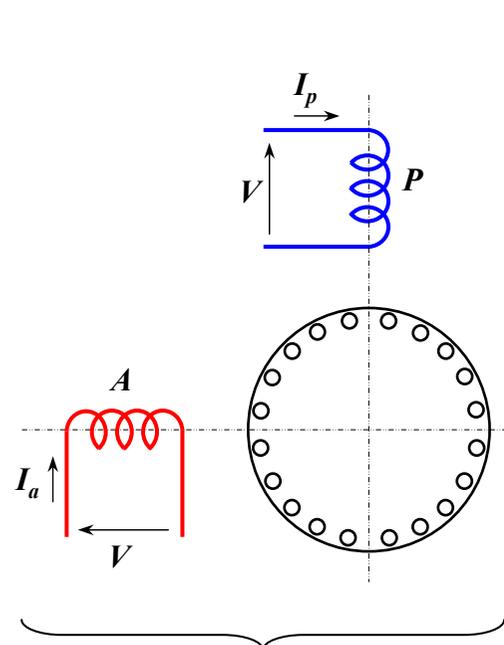
MOTOR MONOFÁSICO NÃO TEM PARTIDA AUTÔNOMA → NECESSITA DE MEIOS AUXILIARES DE ARRANQUE

→ SOLUÇÃO CLÁSSICA : CONVERTER O MOTOR 1Φ NUM “BIFÁSICO APROXIMADO” DURANTE A PARTIDA

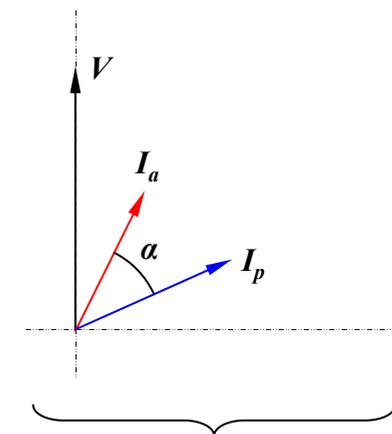
→ NECESSÁRIA A INCORPORAÇÃO DE UM SEGUNDO ENROLAMENTO ( AUXILIAR), MONTADO EM QUADRATURA COM O PRINCIPAL PARA OBTENÇÃO DO SISTEMA BIFÁSICO



**ENROLAMENTOS PRINCIPAL E AUXILIAR :**  
**FORMAM SISTEMA BIFÁSICO → PRODUZ**  
**CAMPO ROTATIVO → MANIFESTA**  
**TORQUE DE PARTIDA E SENTIDO DE**  
**ROTAÇÃO DEFINIDO.**



**ENROLAMENTOS PRINCIPAL E**  
**AUXILIAR: DESLOCADOS NO**  
**ESPAÇO DE 90° elet.**  
**→ CONDIÇÃO PARA FORMAÇÃO**  
**DO SISTEMA BIFÁSICO**



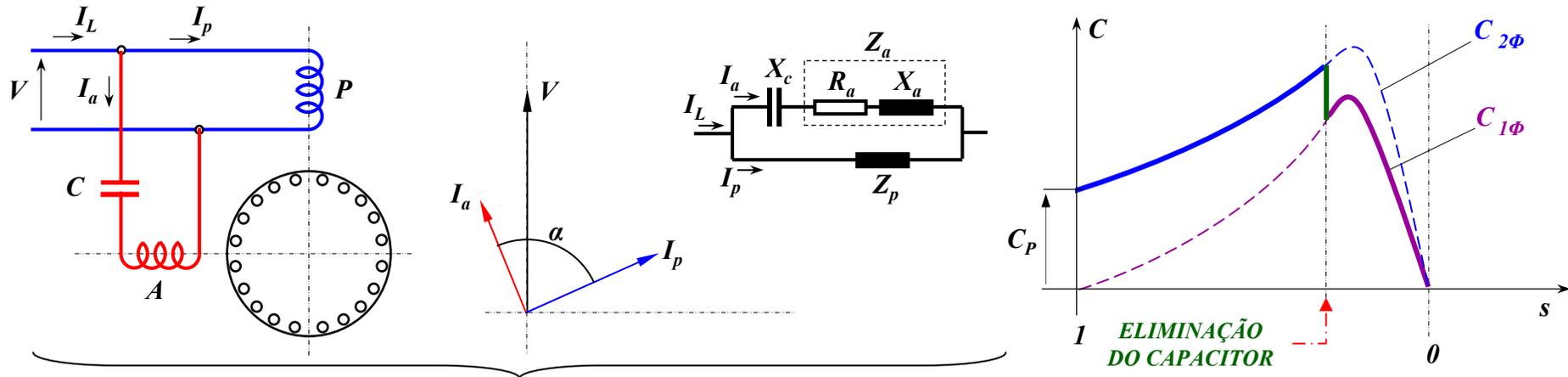
**DIAGRAMA FASORIAL DAS**  
**CORRENTES NAS FASES :**

**$I_p$  e  $I_a$  DEFASADAS NO**  
**TEMPO DE ÂNGULO “ $\alpha$ ”**

→ CASO IDEAL :  $\alpha \approx 90^\circ$

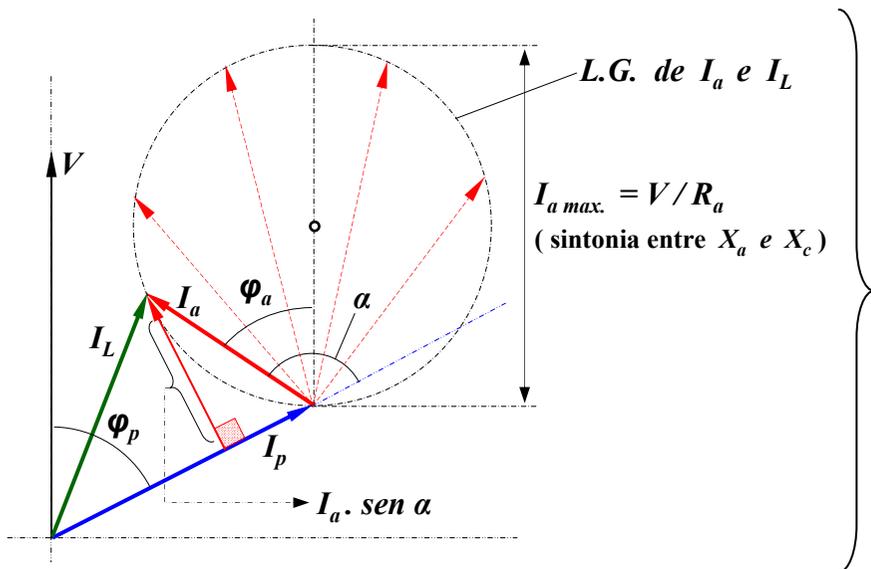
→ DEFASAGEM “ $\alpha$ ” :  
 OBTIDA POR IMPEDÂNCIA  
 ADEQUADA NO AUXILIAR

**MÉTODOS DE PARTIDA : MOTOR MONOFÁSICO COM PARTIDA POR CAPACITOR → “CAPACITOR SPLIT PHASE”**



**CAPACITOR SÓ PARA PARTIDA → RETIRADO DO CIRCUITO APÓS O ARRANQUE POR CHAVE ADEQUADA**

**CAPACITOR PERMANENTE → OPERAÇÃO COMO 2Φ ( PARA UM VALOR DE CARGA DEFINIDO )**



**IMPEDÂNCIA DO AUXILIAR :  $Z_a = (R_a + j.X_a - j.X_c)$**

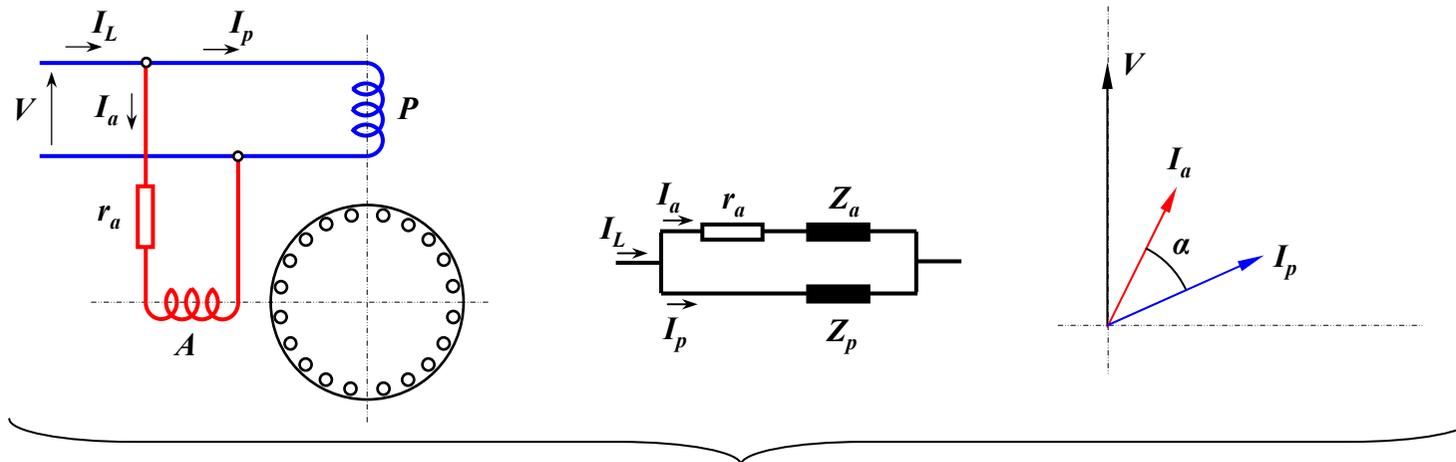
**VARIANDO-SE  $X_c$  → VARIA-SE A SINTONIA ENTRE  $X_a$  e  $X_c$  →  $I_a$  PERCORRE O CÍRCULO DE DIÂMETRO  $V/R_a$**

**→ SINTONIA TOTAL :  $Z_a = R_a$**

$$I_a = \frac{V}{\sqrt{R_a^2 + (X_a - X_c)^2}} ; \angle I_a = \arctg \frac{(X_a - X_c)}{R_a}$$

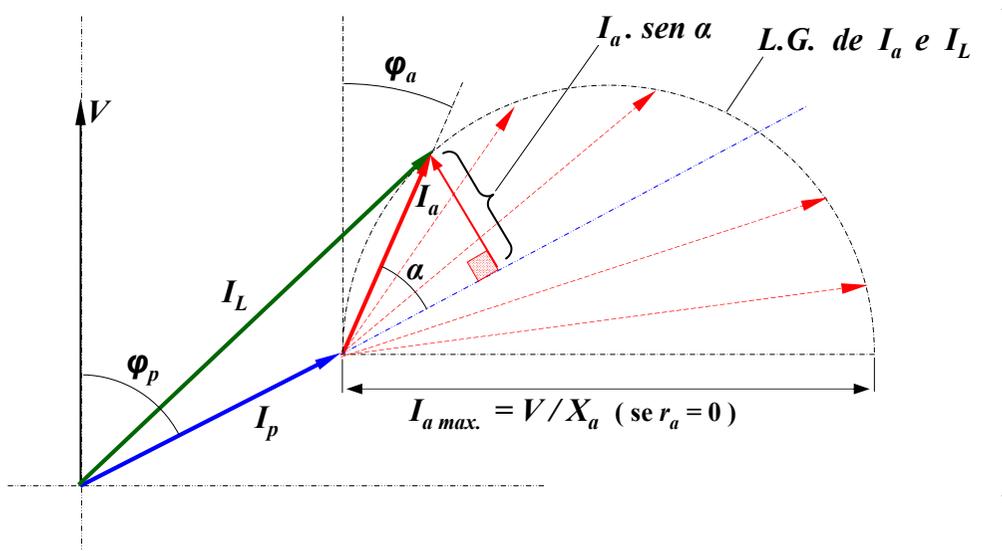
$$p / X_a = X_c \rightarrow I_{a_{max}} = \frac{V}{R_a} \angle 0^\circ$$

**MÉTODOS DE PARTIDA : MOTOR MONOFÁSICO COM PARTIDA POR RESISTÊNCIA → “RESISTOR SPLIT PHASE”**



$r_a$  : RESISTOR EXTERNO OU RESISTÊNCIA DO PRÓPRIO ENROLAMENTO AUXILIAR

→ CIRCUITO AUXILIAR PODE SER ABERTO APÓS A PARTIDA



VARIANDO-SE  $r_a \rightarrow I_a$  PERCORRE O SEMICÍRCULO DE DIÂMETRO  $V/X_a$

$$I_a = \frac{V}{r_a + j.X_a} = \frac{V}{\sqrt{(r_a^2 + X_a^2)}}$$

$$p / r_a = 0 \rightarrow I_{a\max} = \frac{V}{X_a} \angle -90^\circ$$