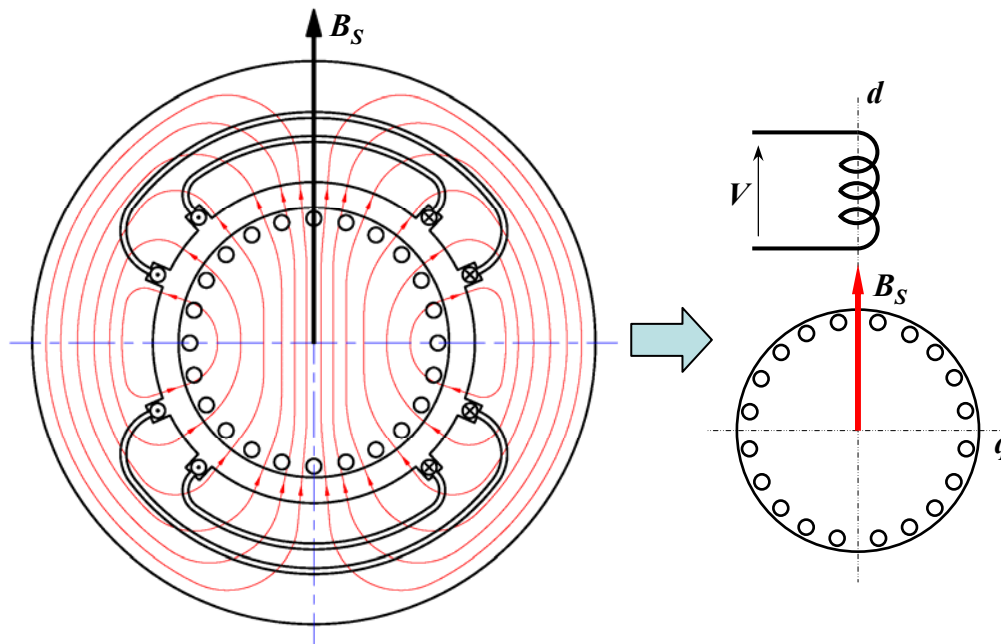


## MÁQUINAS ASSÍNCRONAS MONOFÁSICAS

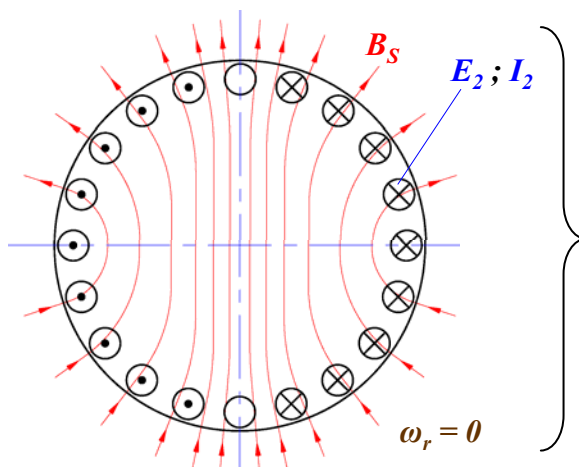
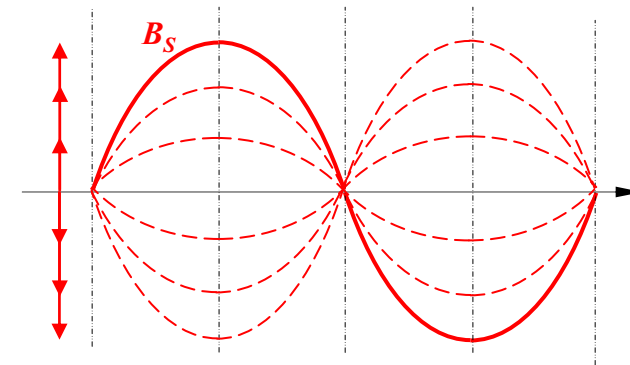
## FUNCIONAMENTO DOS MOTORES DE INDUÇÃO MONOFÁSICOS



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**

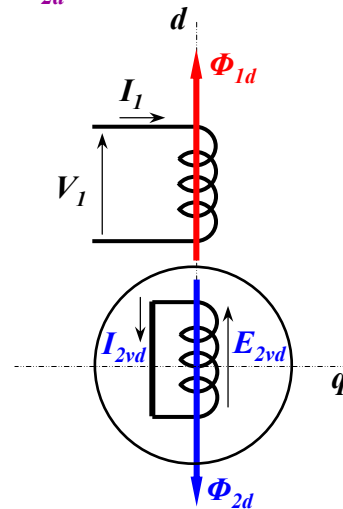
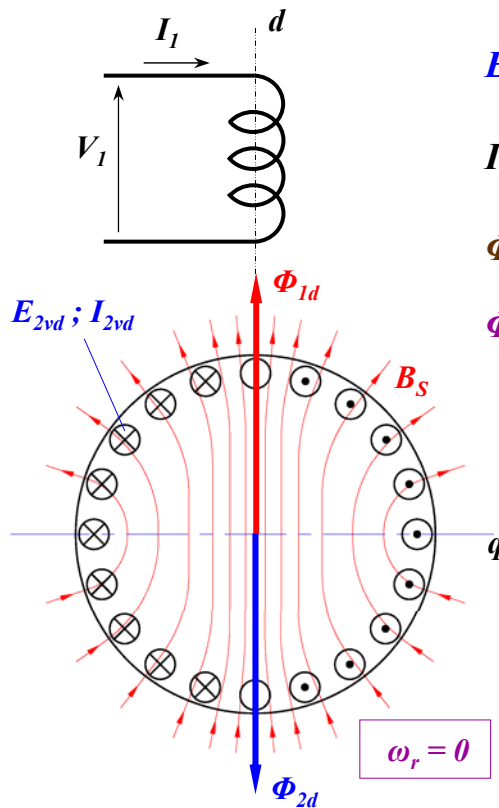
$\Phi_{1d}$  : FLUXO CRIADO PELO ESTATOR → ( CAMPO PULSANTE COM  $f = \omega / 2\pi$  )

$E_{2vd}$  : 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

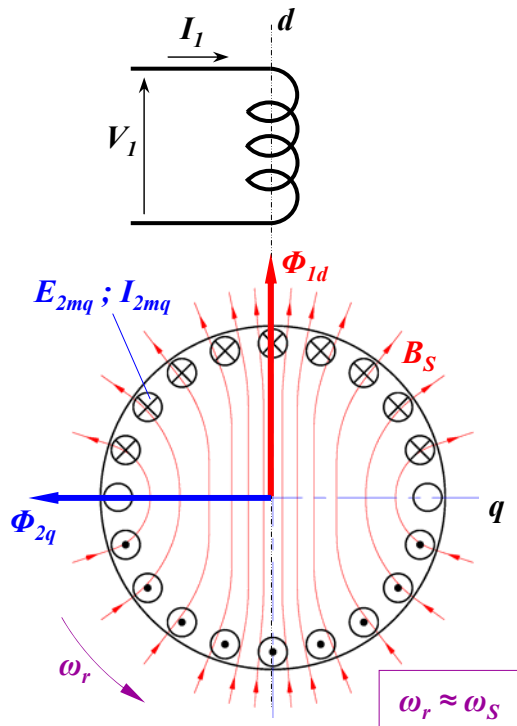
$\Phi_{1d}$  e  $\Phi_{2d}$  : AGEM SOBRE O MESMO EIXO →  $C = 0$  ( TORQUE NULO )



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

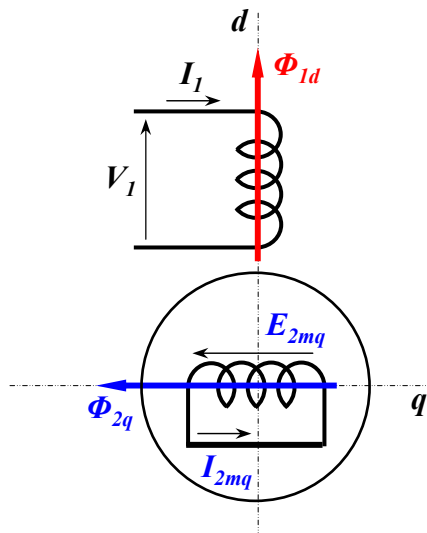
→ INTERAÇÃO DE TENSÃO INDUZIDA NO ROTOR :  $dE_{2mq} = d\vec{L} \cdot (\vec{V}_{rel} \times \vec{B}_s)$

$I_{2mq} = E_{2mq} / Z_{2q}$  : 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 )



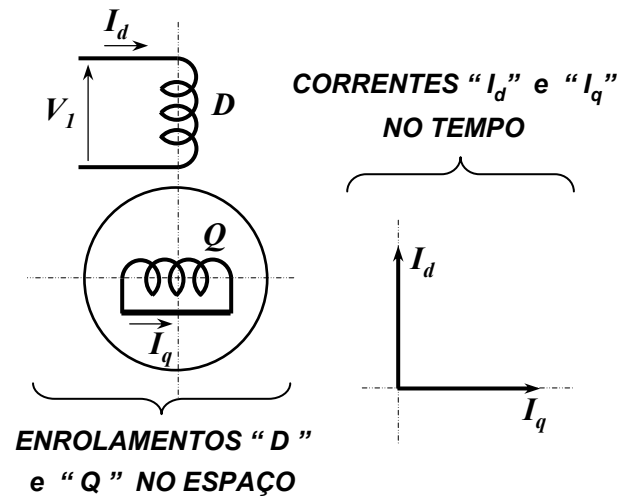
COM ROTOR EM MOVIMENTO :

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

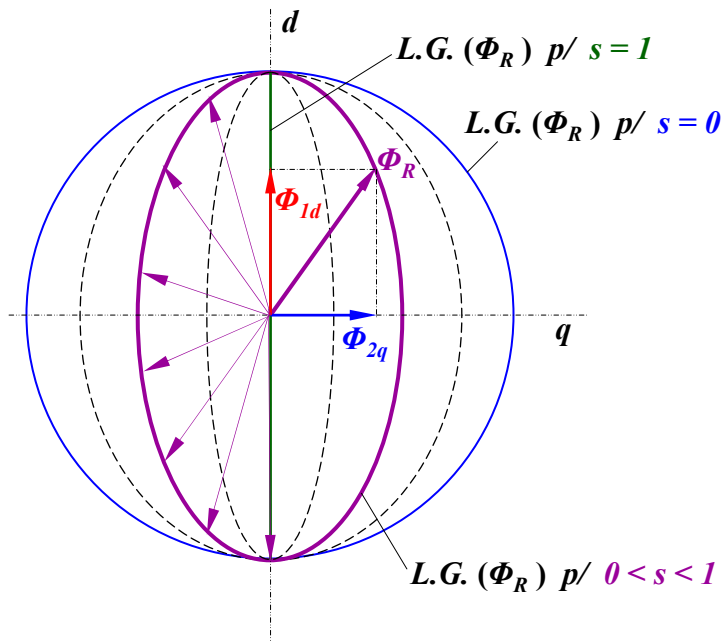


**MOTOR MONOFÁSICO OPERANDO COM O ROTOR EM MOVIMENTO :**

→ 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.

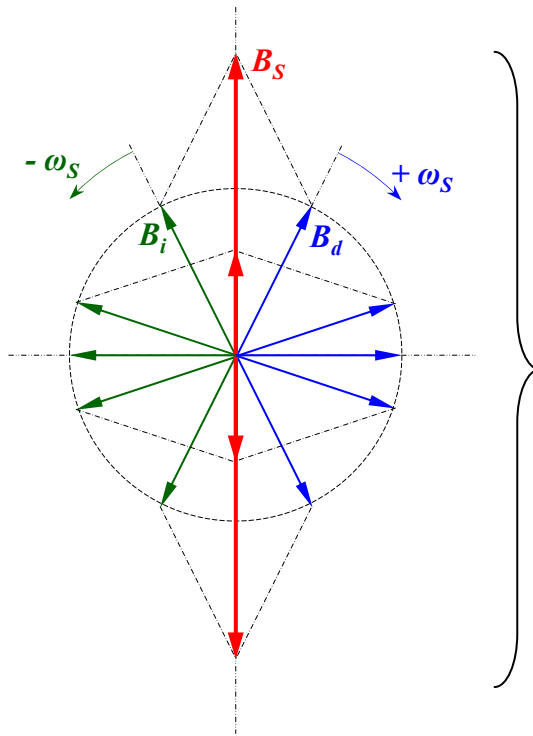
$s = 0 \rightarrow (\omega_r = \omega_S) \rightarrow E_{2mq} = E_{2vd} \rightarrow \Phi_{2q} = \Phi_{1d}$

→ 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 →  $B_s = B_m \cdot \cos \omega t$

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

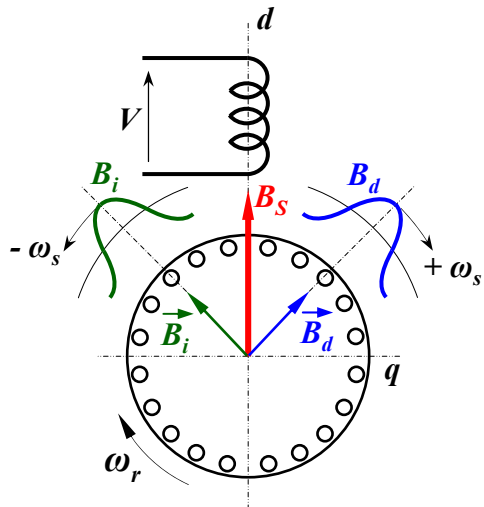
$$B_s = \underbrace{\frac{B_m}{2} \cdot e^{+j \cdot \omega_s t}}_{B_d} + \underbrace{\frac{B_m}{2} \cdot e^{-j \cdot \omega_s t}}_{B_i}$$

$B_d$  : COMPONENTE DE CAMPO DE SEQÜÊNCIA DIRETA

→ VELOCIDADE +  $\omega_s$

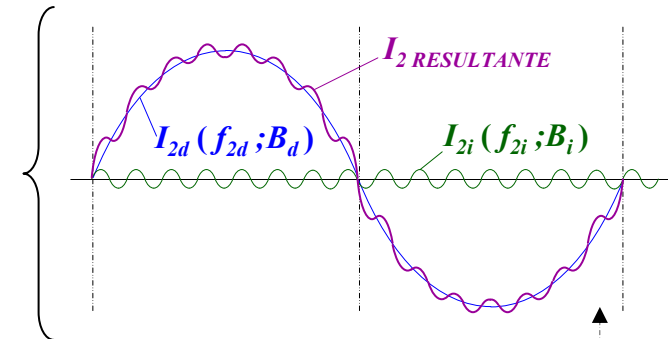
$B_i$  : COMPONENTE DE CAMPO DE SEQÜÊNCIA INVERSA

→ 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  $B_d$  →  $f_{2d} = s \cdot f_1$

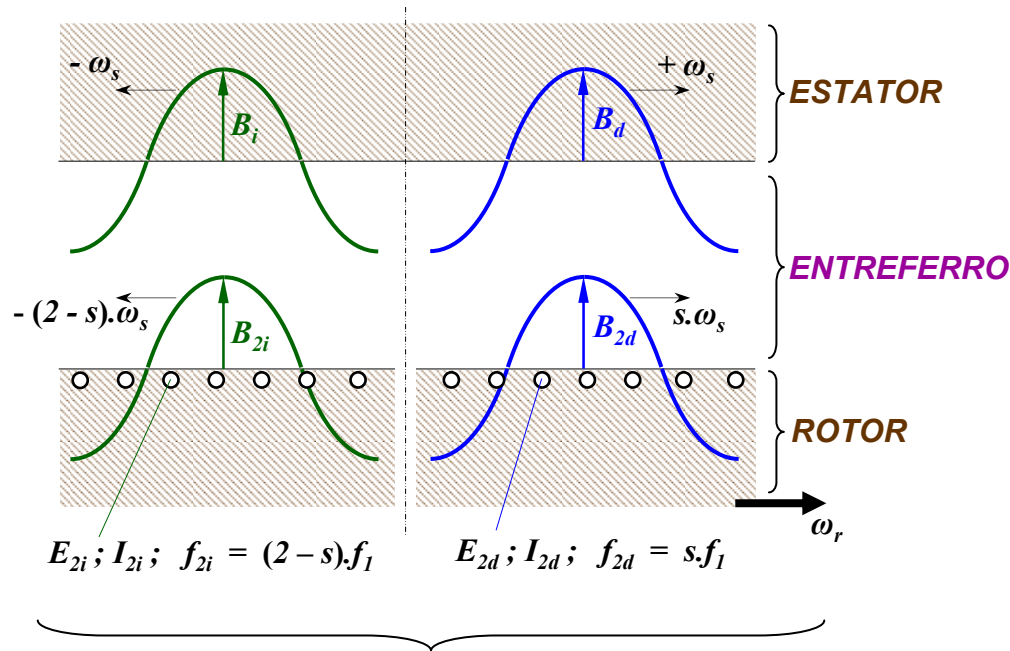
→ CAMPO DE SEQÜÊNCIA INVERSA :  $B_i$  GIRA C/  $\omega_s$  NO SENTIDO OPOSTO DE  $\omega_r$

→ 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 :  $B_{2d}$

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

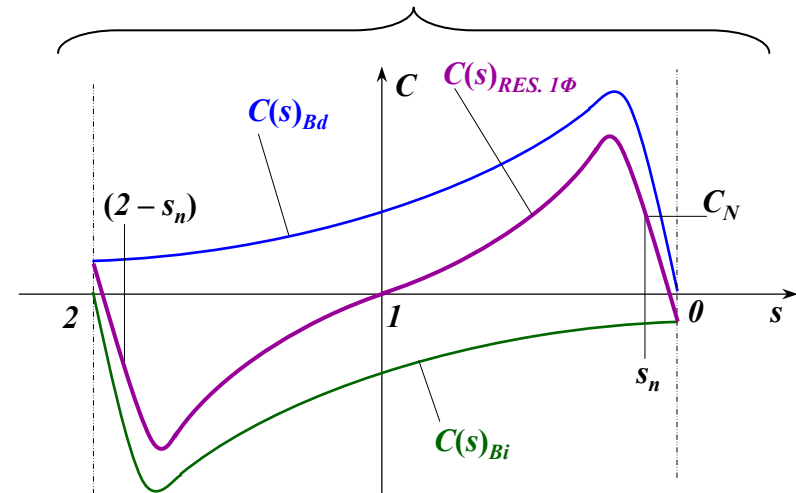
CAMPO DE SEQUÊNCIA INVERSA :  $B_{2i}$

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

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



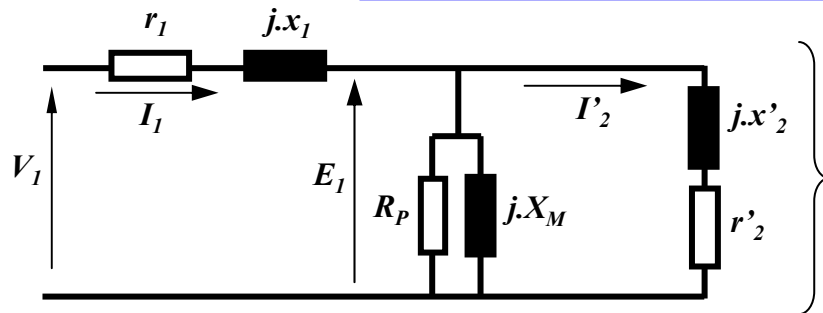
$C_{1\Phi} = C_{Bd} + C_{Bi}$  p/ QUALQUER ESCORREGAMENTO

→ TORQUE DE PARTIDA NULO

→ NÃO TEM SENTIDO PREFERENCIAL DE ROTAÇÃO



**CIRCUITO EQUIVALENTE DO MOTOR MONOFÁSICO DE INDUÇÃO**

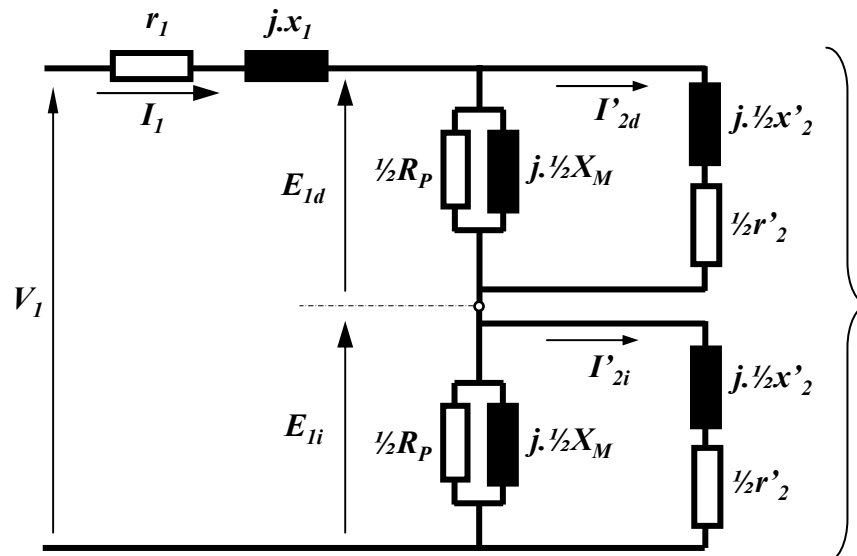


CIRCUITO PARA ROTOR ESTACIONÁRIO :  $\omega_r = 0$

→ 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 :

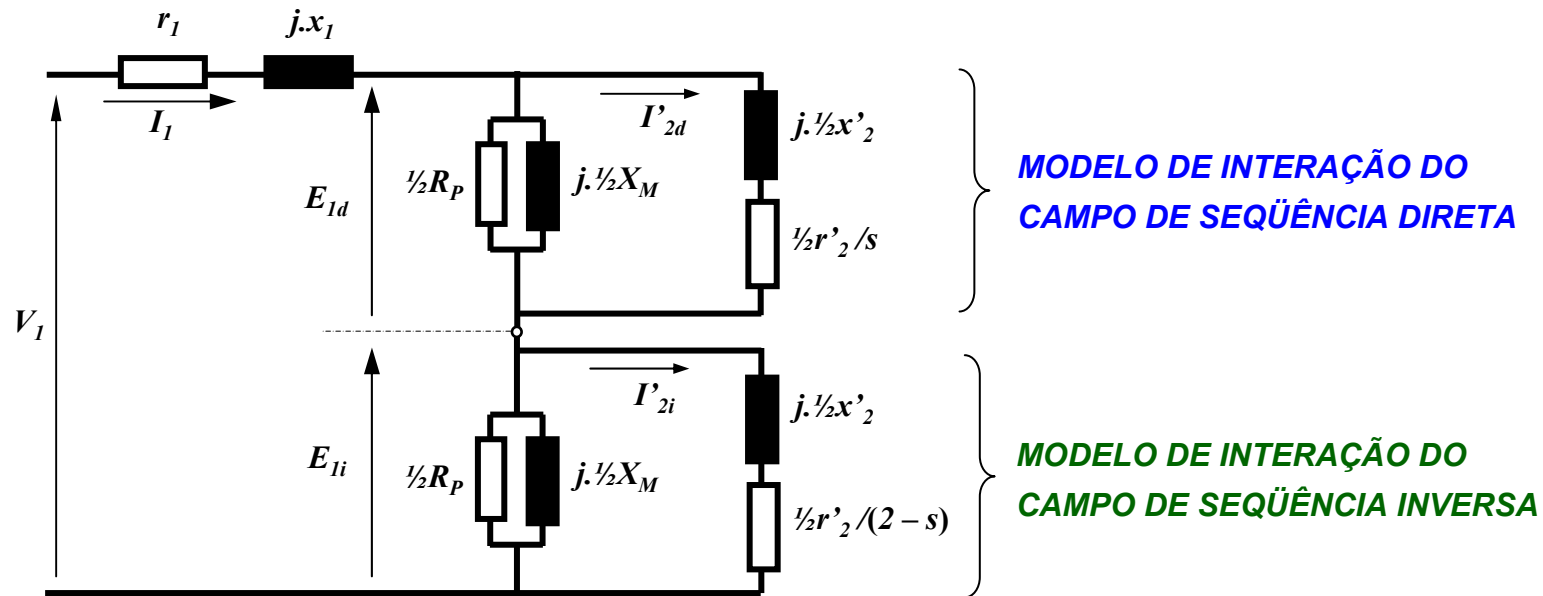
$$\rightarrow C = P_{tr} / \omega_s ; P_{tr} = (r'_2 / s) \cdot I'_{2d}{}^2$$

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”

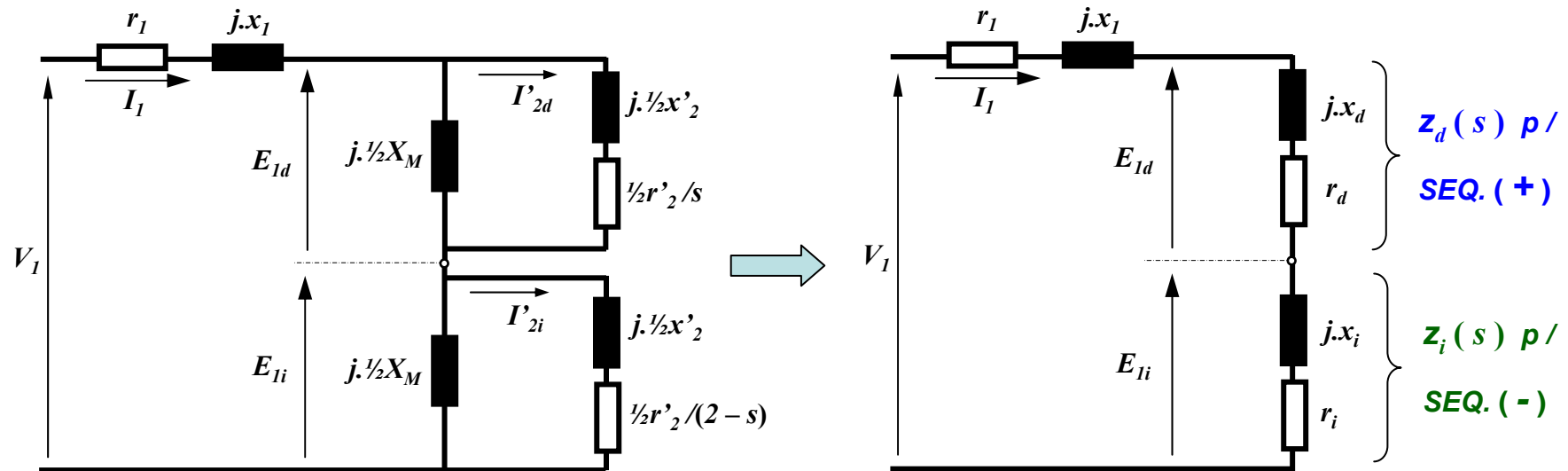


POTÊNCIA TRANSFERIDA AO ROTOR E TORQUE DESENVOLVIDO NO MOTOR MONOFÁSICO :

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

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

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 :** 
$$C = \frac{P_{tr_{tot}}}{\omega_s}$$

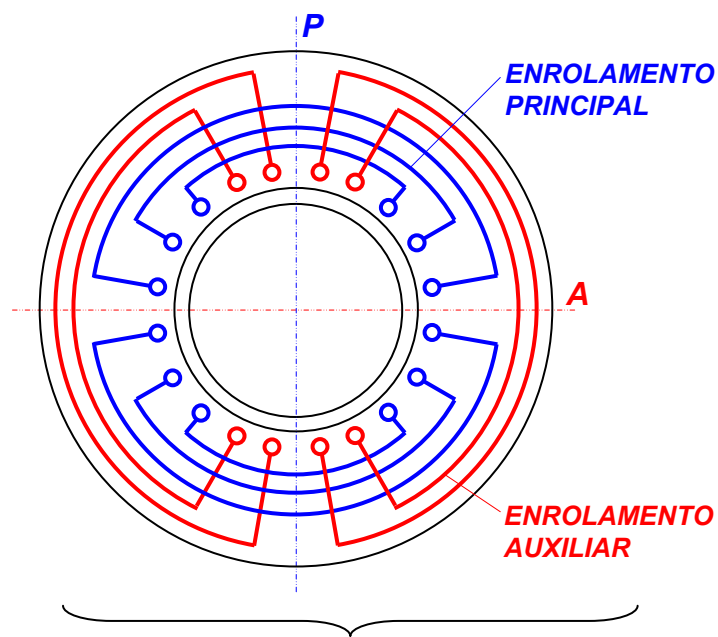
**POTÊNCIA MECÂNICA BRUTA :** 
$$P_{mec} = (1 - s) \cdot P_{tr_{tot}}$$

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

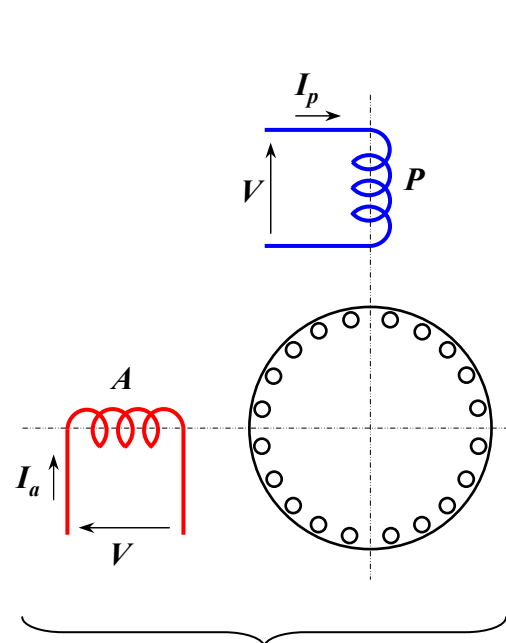
MOTOR MONOFÁSICO NÃO TEM PARTIDA AUTÔNOMA → NECESSITA DE MEIOS AUXILIARES DE ARRANQUE

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

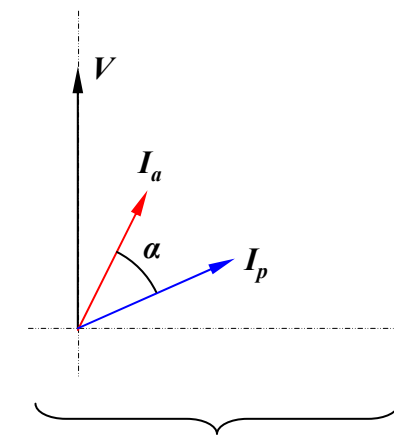
→ NECESSÁRIA A INCORPORAÇÃO DE UM SEGUNDO ENROLAMENTO ( AUXILIAR), MONTADO EM QUADRATURA COM O PRINCIPAL PARA OBTENÇÃO DO SISTEMA BIFÁSICO



**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**



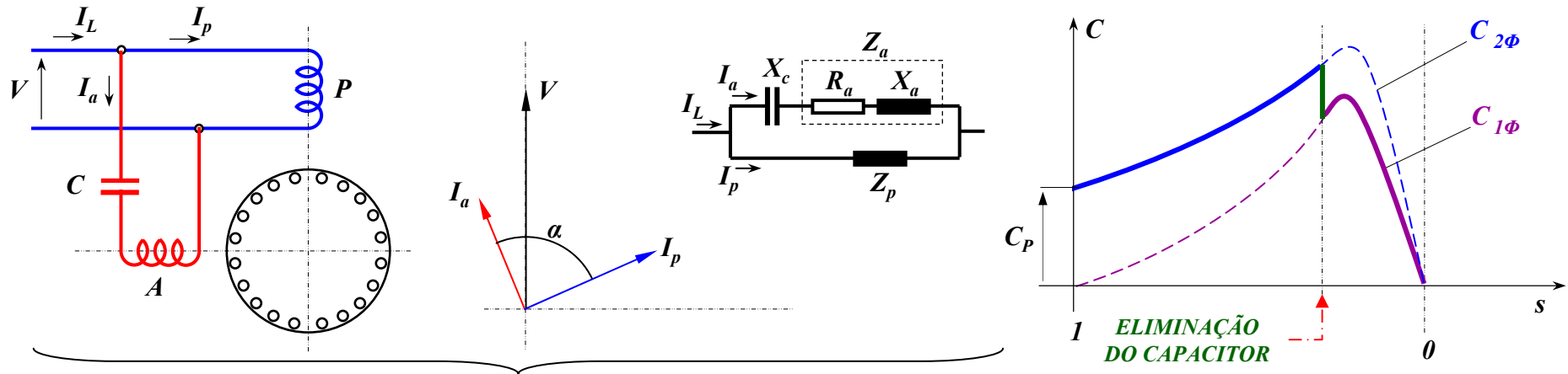
**DIAGRAMA FASORIAL DAS**  
**CORRENTES NAS FASES :**

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

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

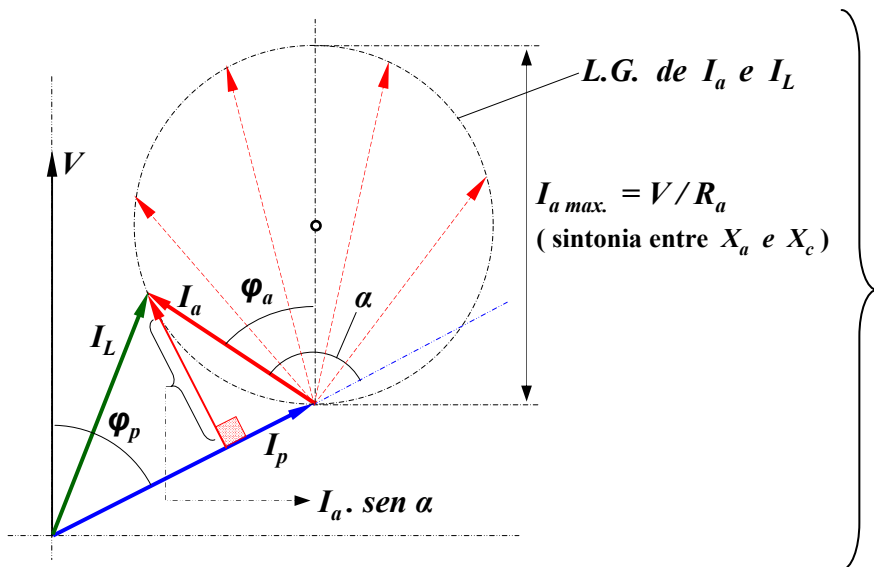
→ **DEFASAGEM “ $\alpha$ ” :**  
**OBTIDA POR IMPEDÂNCIA**  
**ADEQUADA NO AUXILIAR**

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

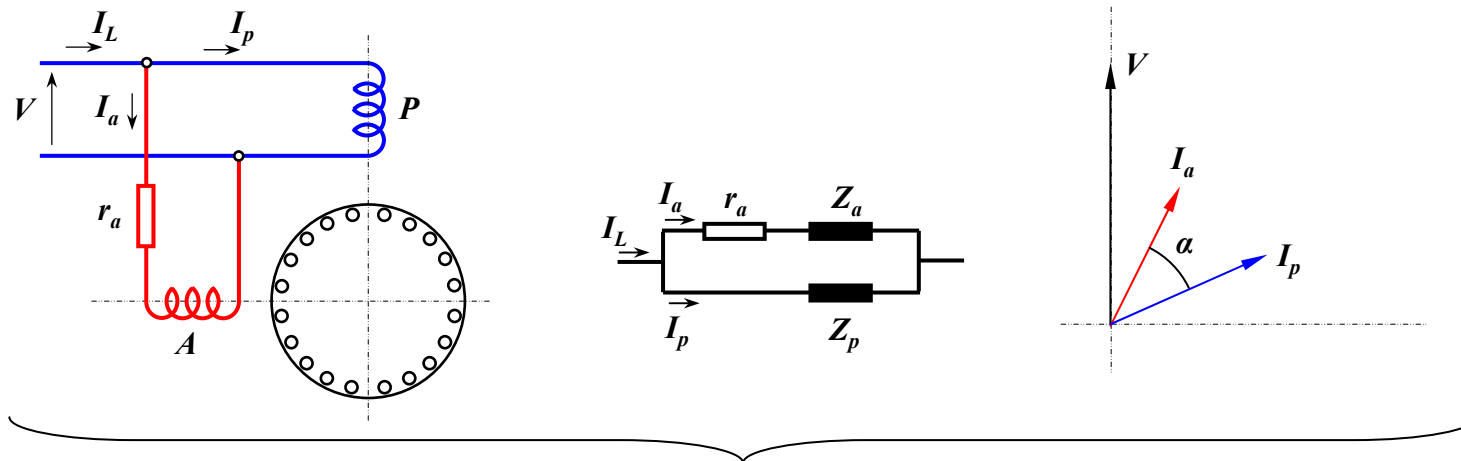
**VARIANDO-SE  $X_c$  → VARIA-SE A SINTONIA ENTRE  $X_a$  e  $X_c$  →  $I_a$  PERCORRE O CÍRCULO DE DIÂMETRO  $V/R_a$**

**→ SINTONIA TOTAL :  $Z_a = R_a$**

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

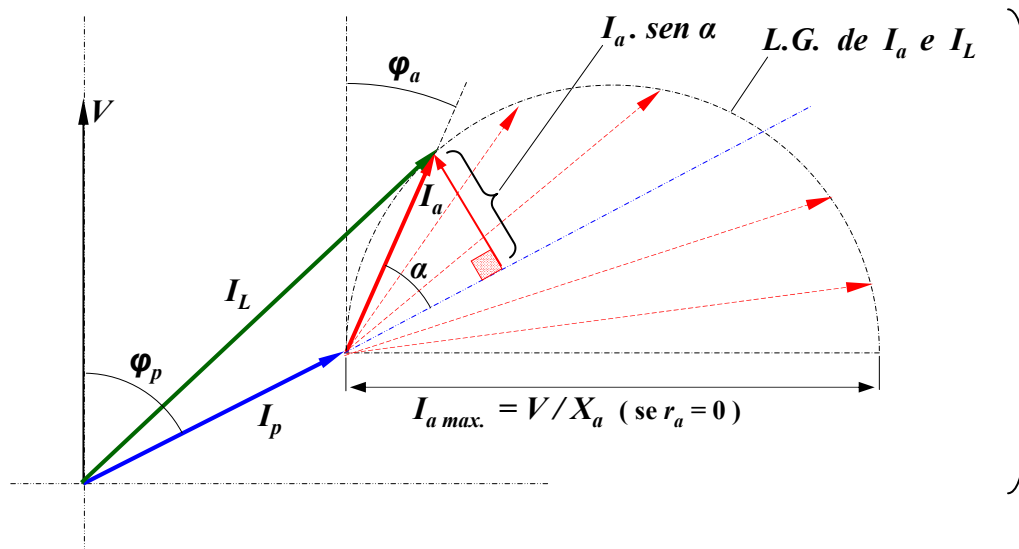
$$p / X_a = X_c \rightarrow I_{a_{max}} = \frac{V}{R_a} \angle 0^\circ$$

**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  $V/X_a$

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

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