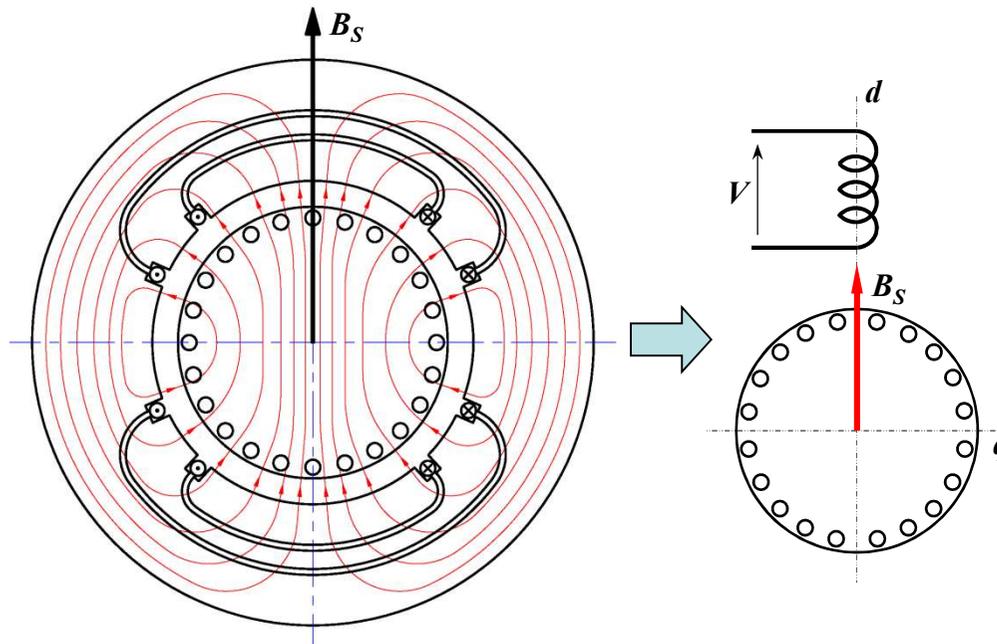


MÁQUINAS ASSÍNCRONAS MONOFÁSICAS

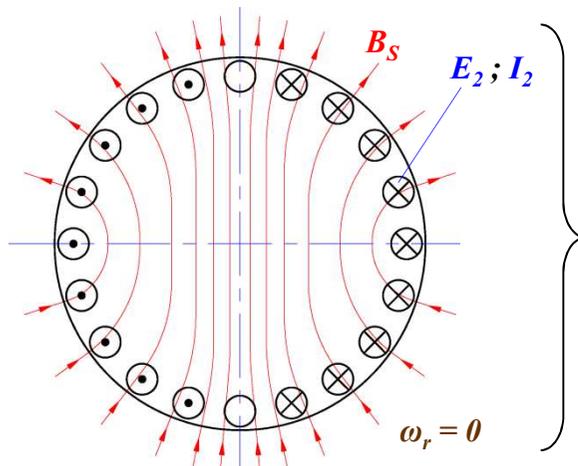
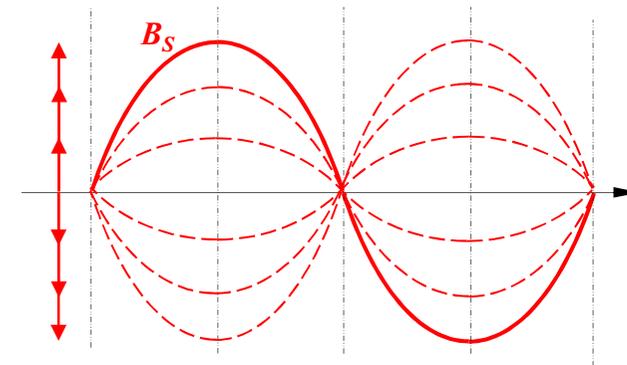
FUNCIONAMENTO DOS MOTORES DE INDUÇÃO MONOFÁSICOS



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

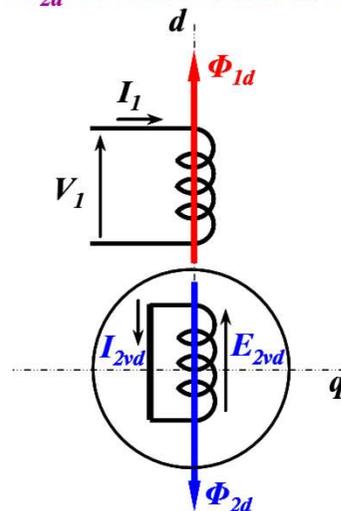
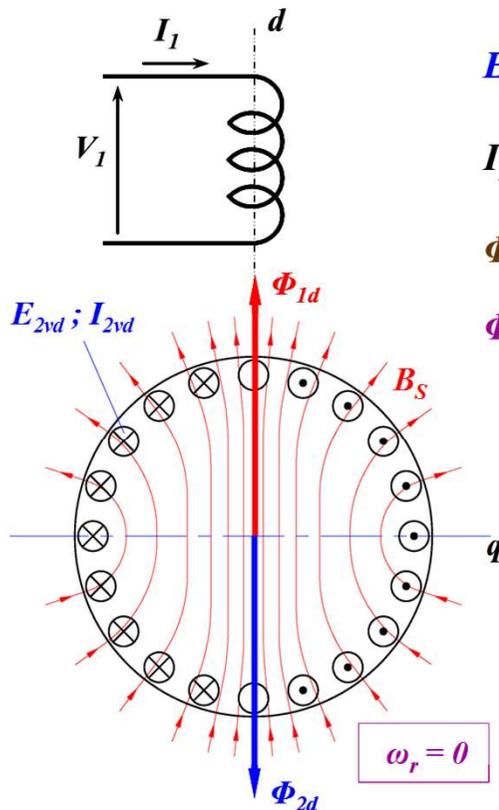
Φ_{1d} : FLUXO CRIADO PELO ESTATOR → (CAMPO PULSANTE COM $f = \omega / 2\pi$)

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

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

Φ_{2d} : FLUXO CRIADO PELA CIRCULAÇÃO DE CORRENTES NO ROTOR

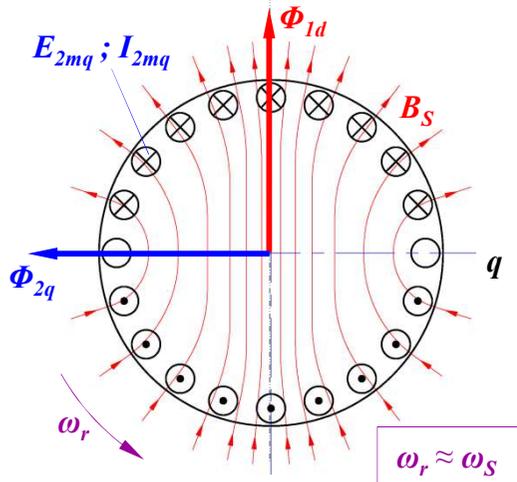
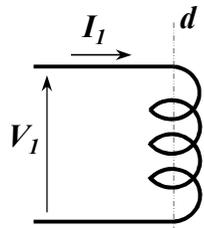
Φ_{1d} e Φ_{2d} : AGEM SOBRE O MESMO EIXO → $C = 0$ (TORQUE NULO)



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**



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

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

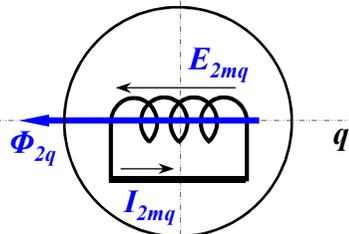
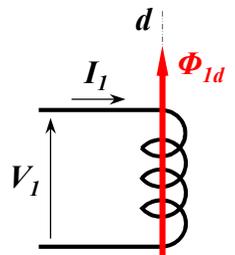
→ INTERAÇÃO DE TENSÃO INDUZIDA NO ROTOR : $dE_{2mq} = d\vec{L} \cdot (\vec{V}_{rel} \times \vec{B}_s)$

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

Φ_{2q} : FLUXO CRIADO PELA CIRCULAÇÃO DE CORRENTES NO ROTOR

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

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



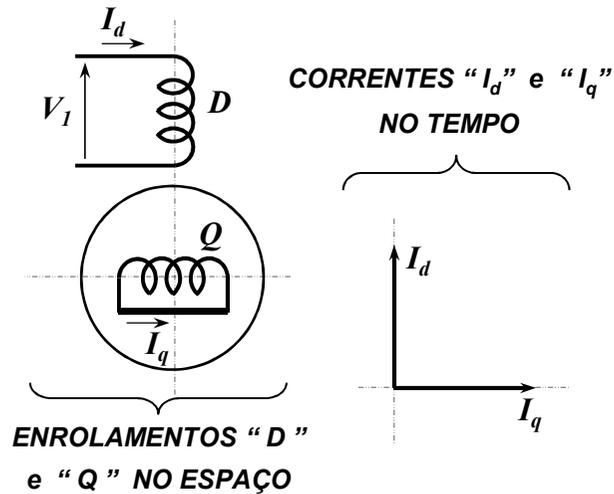
COM ROTOR EM MOVIMENTO :

BARRAS DO ROTOR AFETADAS DE VELOCIDADE EM RELAÇÃO AO CAMPO CRIADO PELO ESTATOR → E_{2mq} EM FASE NO TEMPO COM Φ_{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

Φ_{1d} e Φ_{2q} → FLUXOS EM QUADRATURA NO ESPAÇO E DEFASADOS 90° NO TEMPO

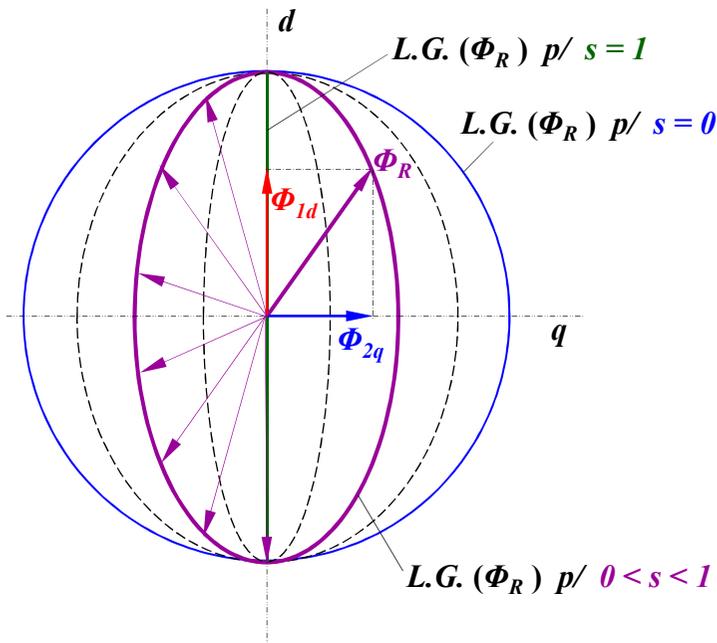


MOTOR MONOFÁSICO OPERANDO COM O ROTOR EM MOVIMENTO :

→ 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 ω_r

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

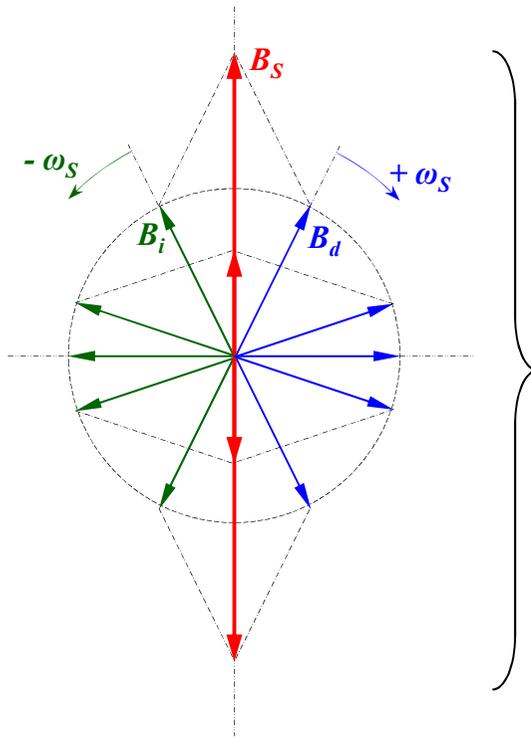
$s = 0 \rightarrow (\omega_r = \omega_S) \rightarrow E_{2mq} = E_{2vd} \rightarrow \Phi_{2q} = \Phi_{1d}$

→ L.G. (Φ_R) É UM CÍRCULO

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

→ L.G. (Φ_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, ω_s , PORÉM EM SENTIDOS OPOSTOS

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

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

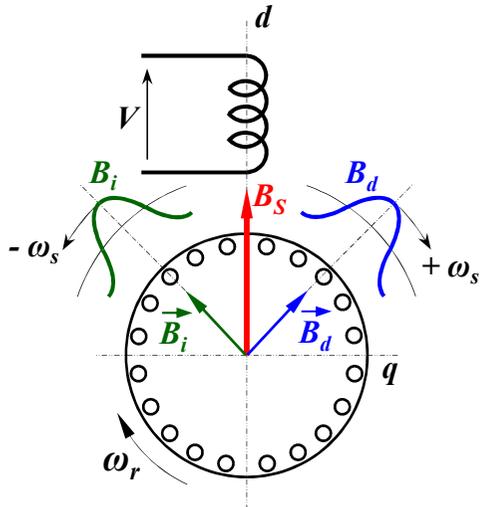
$$B_S = \underbrace{\frac{B_m}{2} \cdot e^{+j \cdot \omega_s t}}_{B_d} + \underbrace{\frac{B_m}{2} \cdot e^{-j \cdot \omega_s t}}_{B_i}$$

B_d : COMPONENTE DE CAMPO DE SEQÜÊNCIA DIRETA

→ VELOCIDADE + ω_s

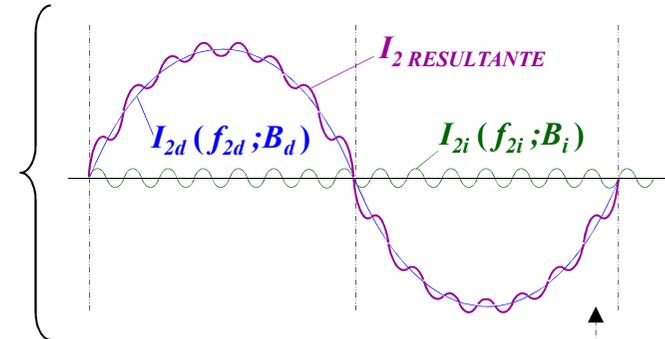
B_i : COMPONENTE DE CAMPO DE SEQÜÊNCIA INVERSA

→ VELOCIDADE - ω_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/ ω_s NO MESMO SENTIDO DE ω_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 → $f_{2d} = s \cdot f_1$

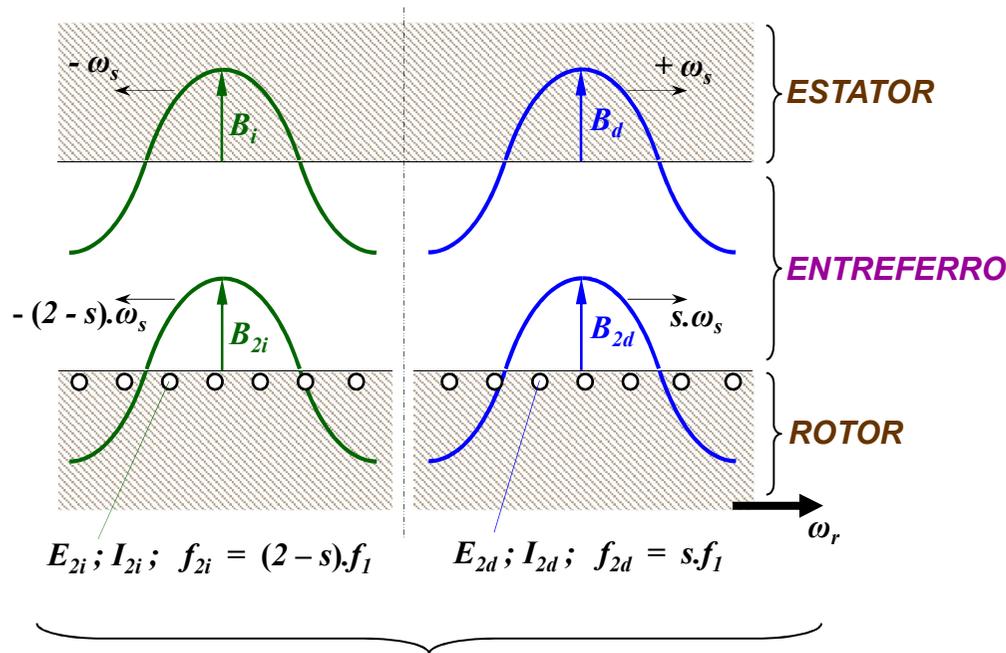
→ CAMPO DE SEQÜÊNCIA INVERSA : B_i GIRA C/ ω_s NO SENTIDO OPOSTO DE ω_r

→ 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}

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

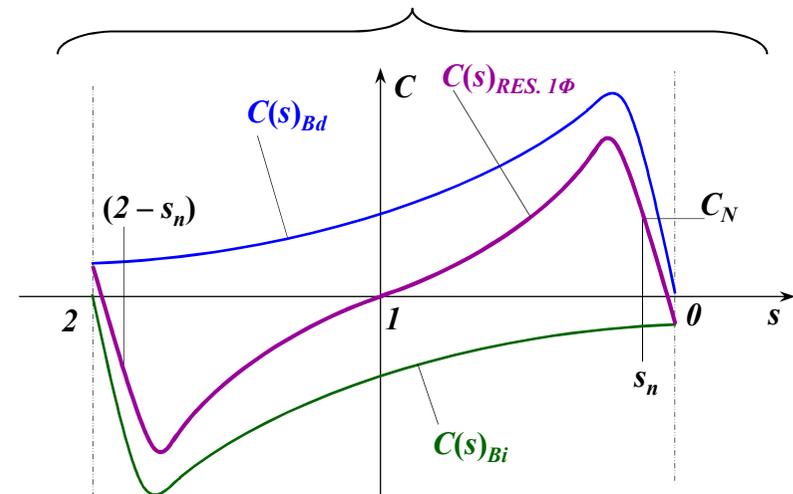
CAMPO DE SEQUÊNCIA INVERSA : B_{2i}

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

**CADA COMPONENTE DE CORRENTE ROTÓRICA
PRODUZ F.m.m.₂ QUE REAGE COM A F.m.m.₁ 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**

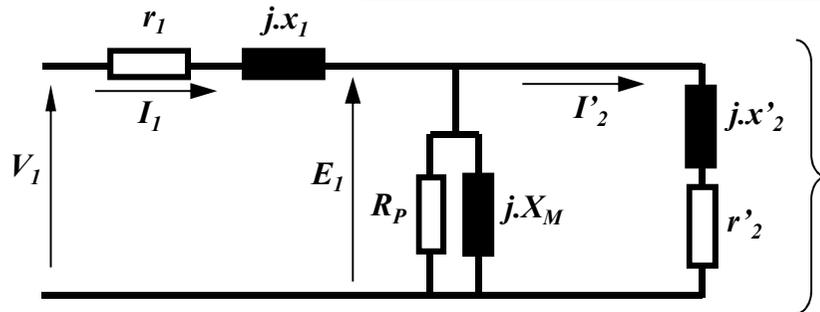


$$C_{1\phi} = C_{Bd} + C_{Bi} \text{ p/ QUALQUER ESCORREGAMENTO}$$

→ TORQUE DE PARTIDA NULO

→ NÃO TEM SENTIDO PREFERENCIAL DE ROTAÇÃO

CIRCUITO EQUIVALENTE DO MOTOR MONOFÁSICO DE INDUÇÃO

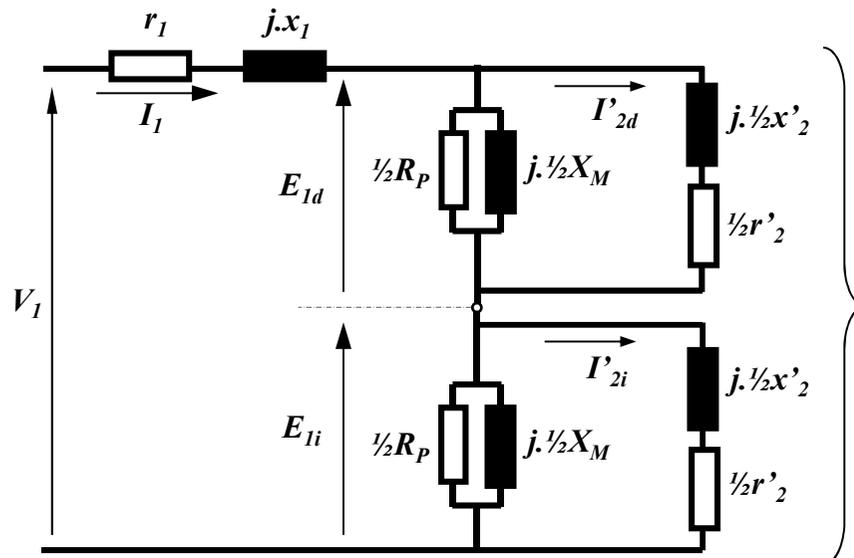


CIRCUITO PARA ROTOR ESTACIONÁRIO : $\omega_r = 0$

→ 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 : $\omega_r = 0 \rightarrow s = 1$

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

INTERAÇÃO DO CAMPO ROTATIVO COM O ROTOR :

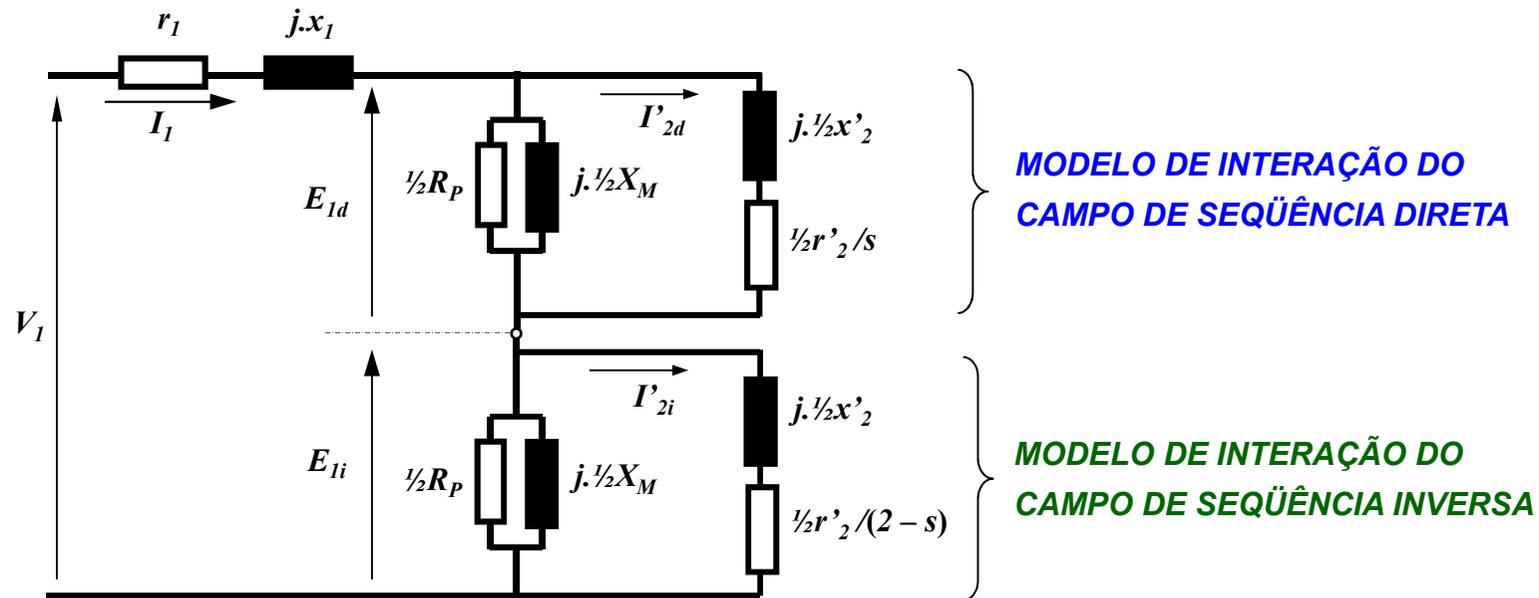
→ $C = P_{tr} / \omega_s$; $P_{tr} = (r'_2 / s) \cdot I'_{2d}{}^2$

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

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

→ TORQUE DE PARTIDA NULO

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

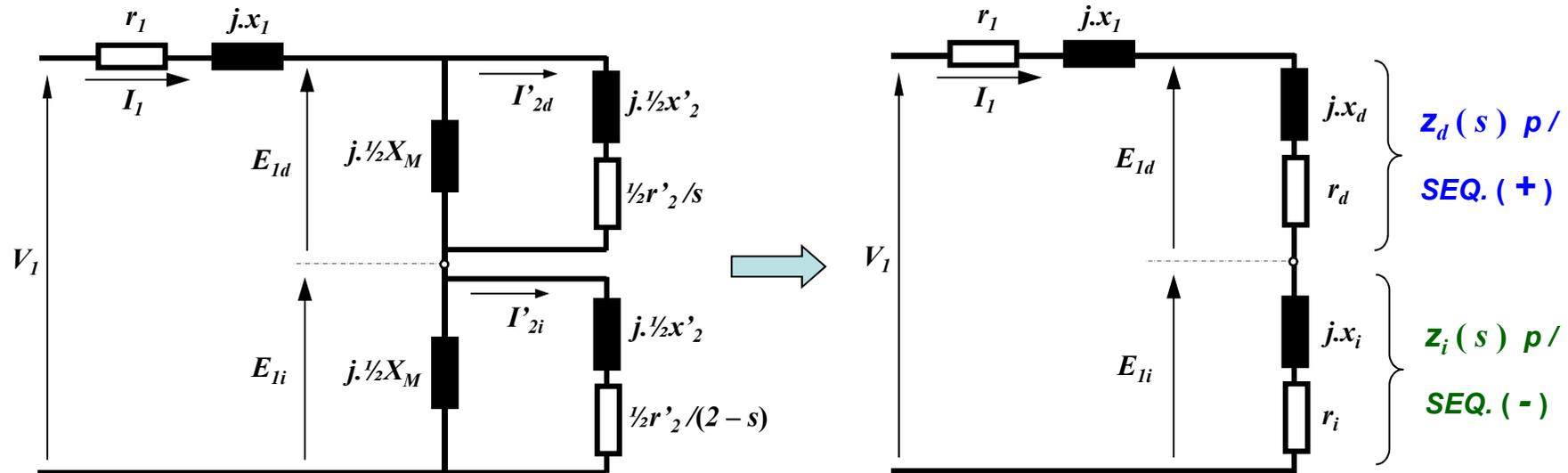


POTÊNCIA TRANSFERIDA AO ROTOR E TORQUE DESENVOLVIDO NO MOTOR MONOFÁSICO :

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

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

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 :

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

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

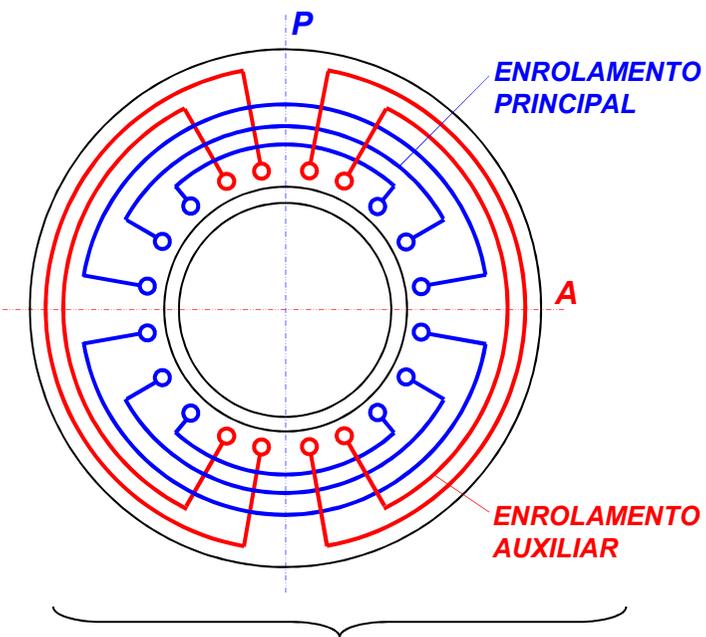
POTÊNCIA MECÂNICA BRUTA :
$$P_{mec} = (1 - s) \cdot P_{tr_{tot}}$$

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

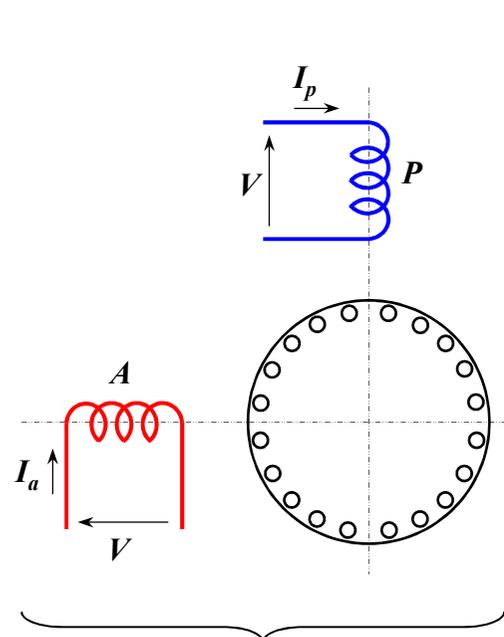
MOTOR MONOFÁSICO NÃO TEM PARTIDA AUTÔNOMA → NECESSITA DE MEIOS AUXILIARES DE ARRANQUE

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

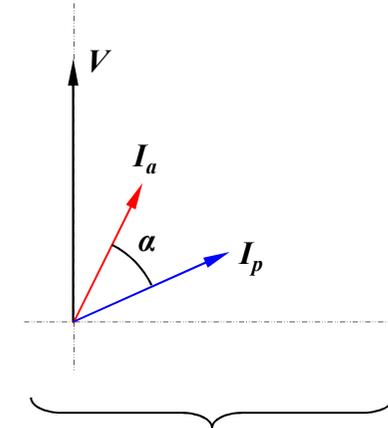
→ **NECESSÁRIA A INCORPORAÇÃO DE UM SEGUNDO ENROLAMENTO (AUXILIAR), MONTADO EM QUADRATURA COM O PRINCIPAL PARA OBTENÇÃO DO SISTEMA BIFÁSICO**



**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**



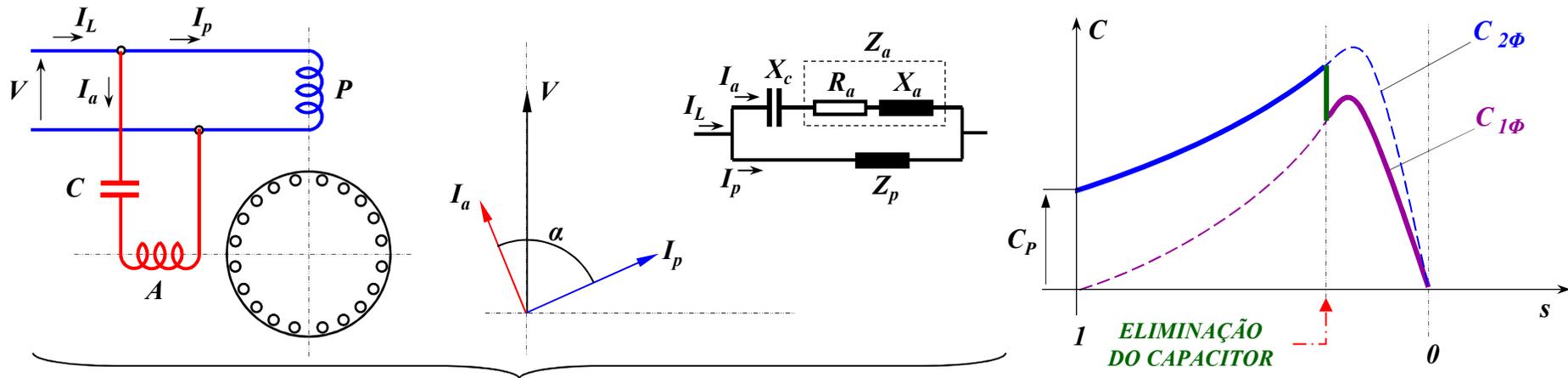
**DIAGRAMA FASORIAL DAS
CORRENTES NAS FASES :**

**I_p e I_a DEFASADAS NO
TEMPO DE ÂNGULO “ α ”**

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

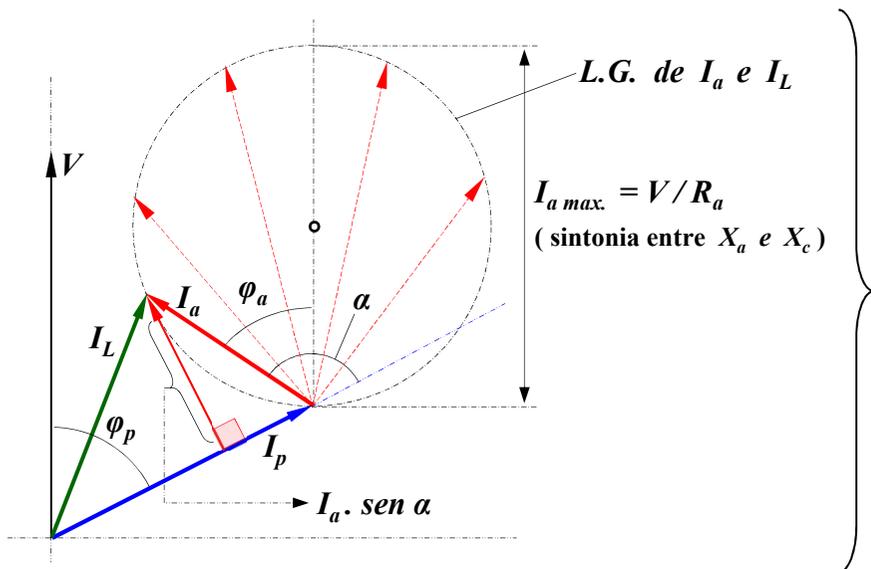
→ DEFASAGEM “ α ” :
OBTIDA POR IMPEDÂNCIA
ADEQUADA NO AUXILIAR

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 $X_c \rightarrow$ VARIA-SE A SINTONIA ENTRE X_a e

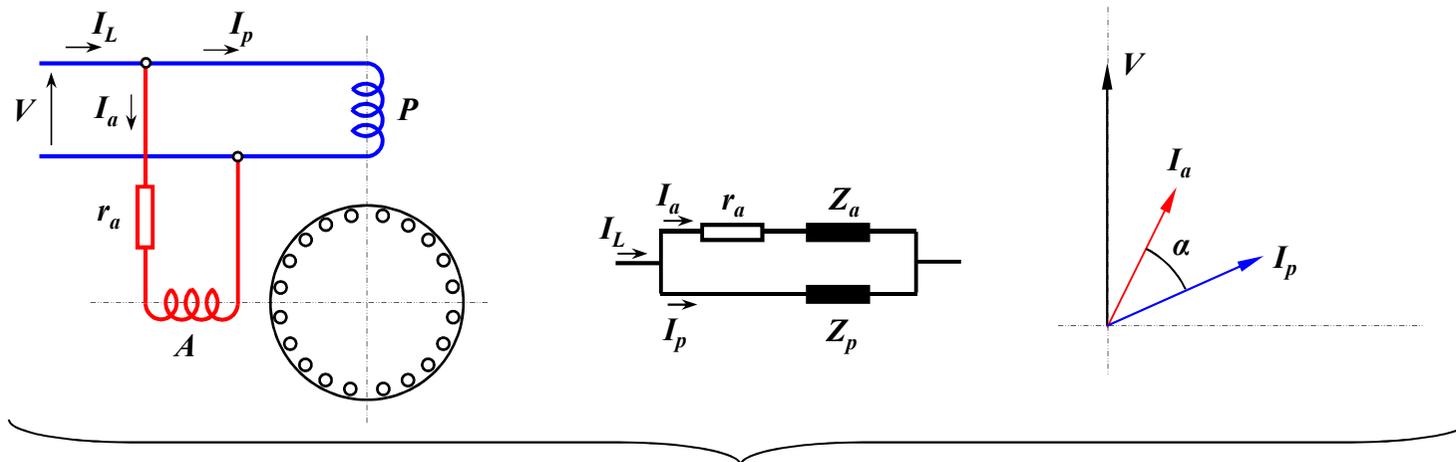
$X_c \rightarrow I_a$ PERCORRE O CÍRCULO DE DIÂMETRO V/R_a

→ SINTONIA TOTAL : $Z_a = R_a$

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

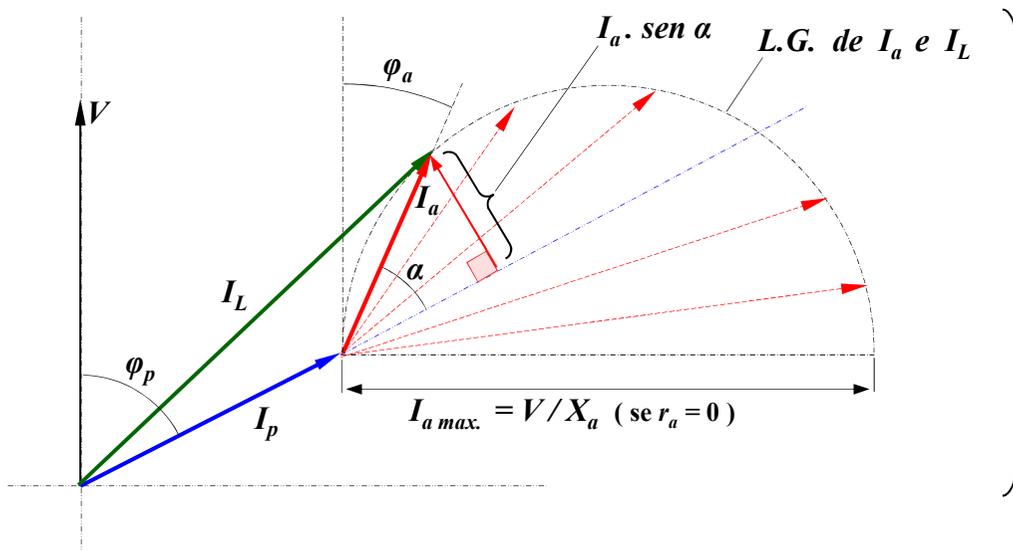
$$p / X_a = X_c \rightarrow I_{a\max} = \frac{V}{R_a} \angle 0^\circ$$

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

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

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