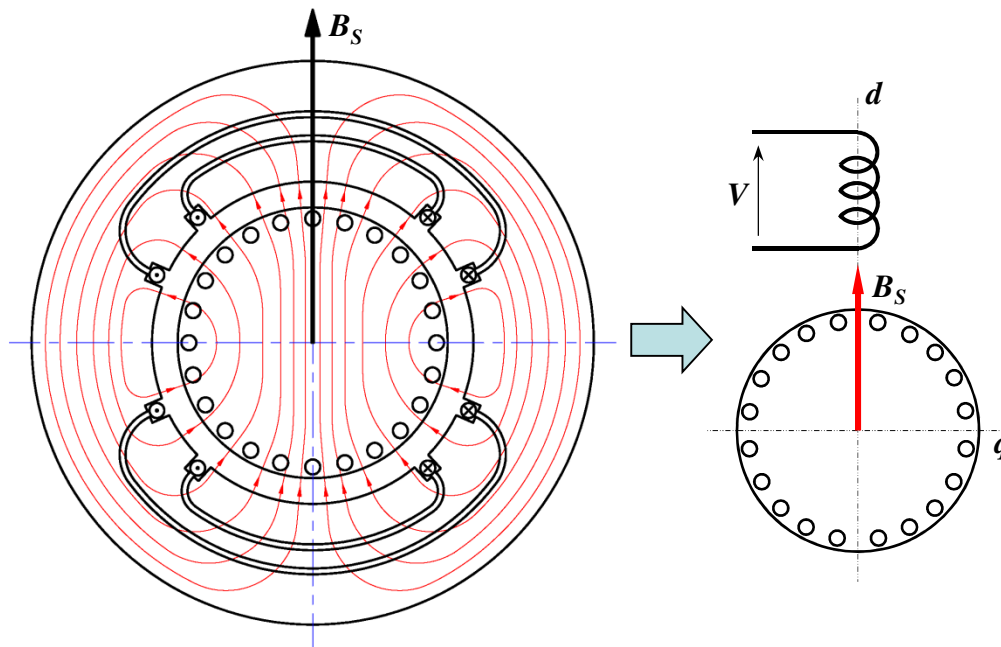


MÁQUINAS ASSÍNCRONAS MONOFÁSICAS

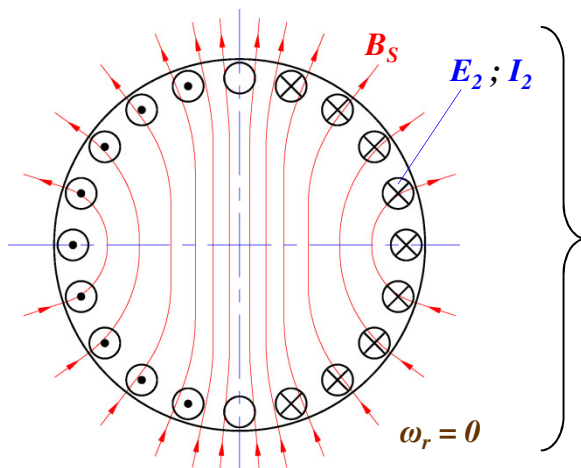
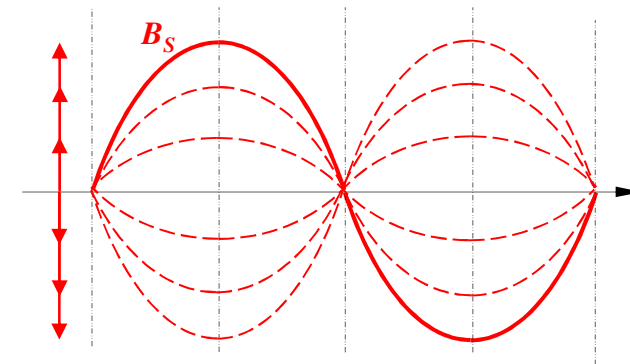
FUNCIONAMENTO DOS MOTORES DE INDUÇÃO MONOFÁSICOS



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

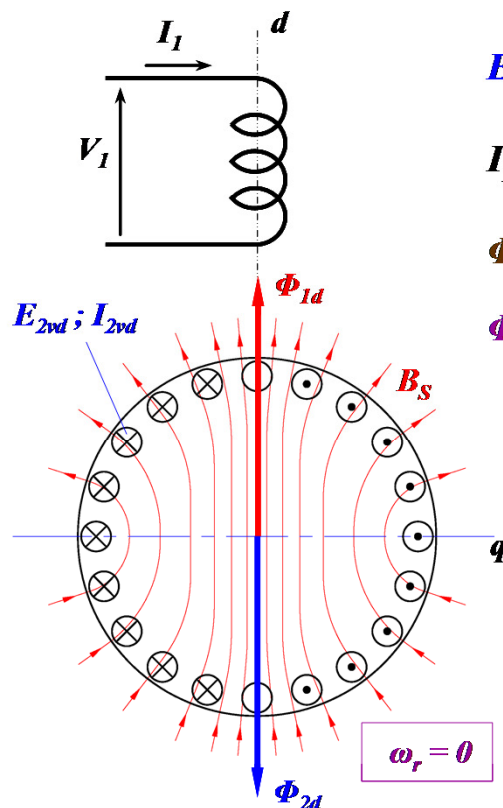
→ NÃO PRODUZ TORQUE DE PARTIDA

→ **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**



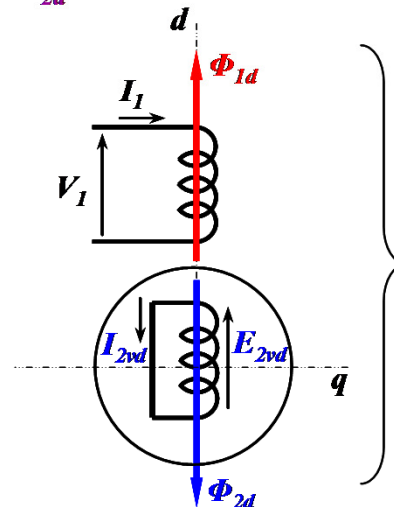
Φ_{1d} : **FLUXO CRIADO PELO ESTATOR** → (**CAMPO PULSANTE COM $f = \omega / 2\pi$**)

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**)

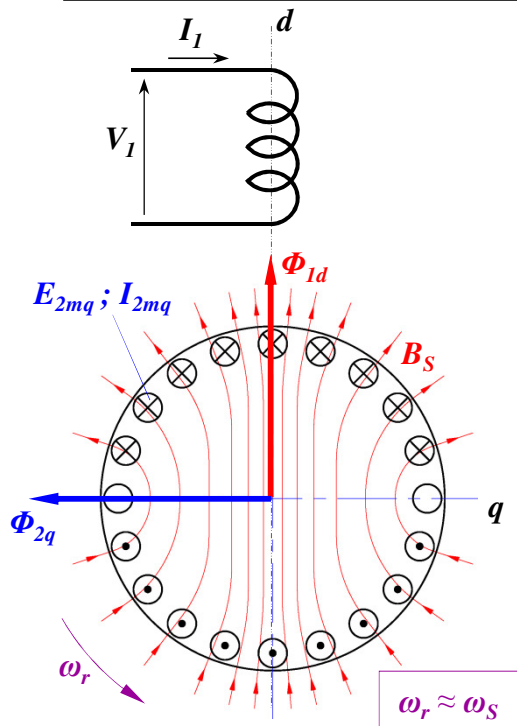


COM ROTOR ESTACIONÁRIO :

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

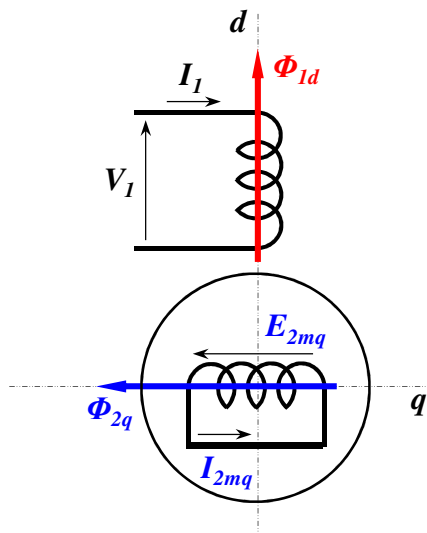
→ INTERAÇÃO DE TENSÃO INDUZIDA NO ROTOR : $dE_{2mq} = d\vec{L} \cdot (\vec{V}_{rel} \times \vec{B}_s)$

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



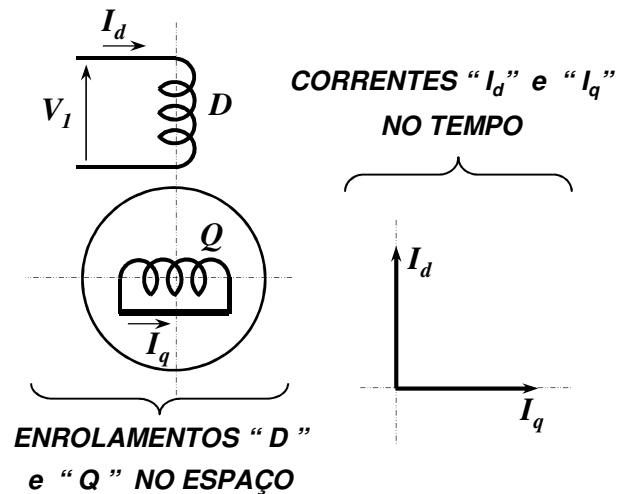
COM ROTOR EM MOVIMENTO :

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

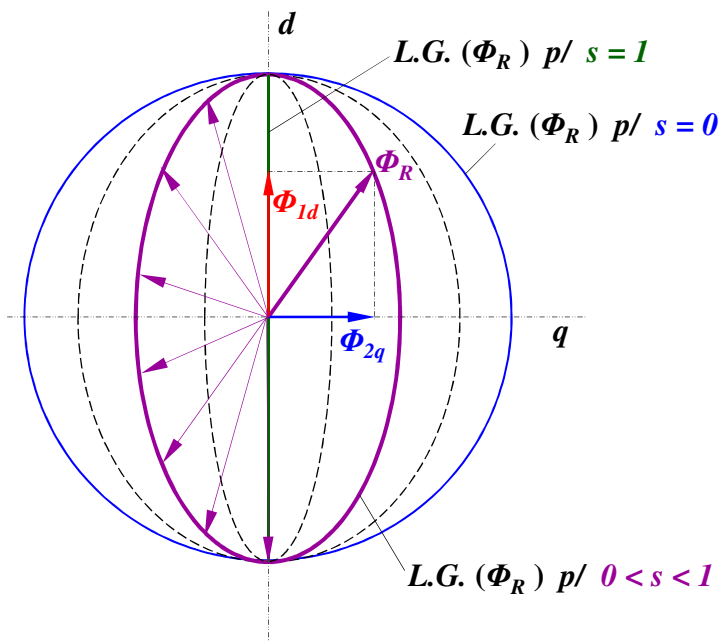


MOTOR MONOFÁSICO OPERANDO COM O ROTOR EM MOVIMENTO :

→ 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.

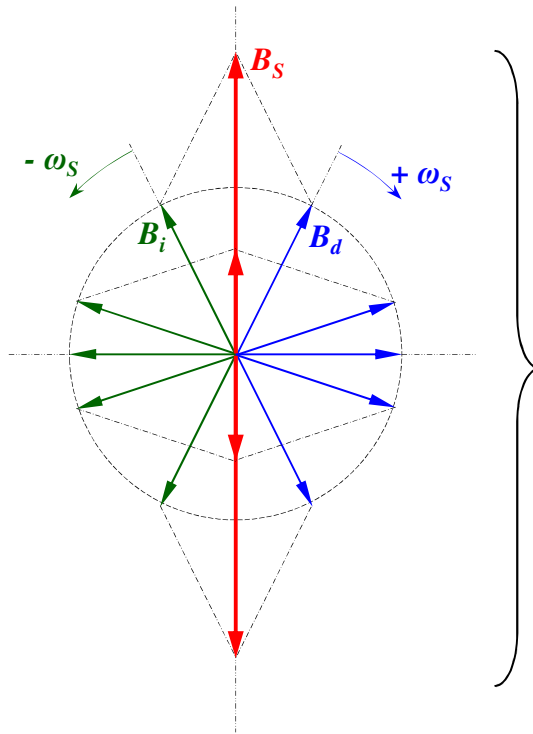
$s = 0 \rightarrow (\omega_r = \omega_S) \rightarrow E_{2mq} = E_{2vd} \rightarrow \Phi_{2q} = \Phi_{1d}$

→ 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

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 → $B_s = B_m \cdot \cos \omega.t$

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

ROTAÇÃO SÍNCRONA DO CAMPO :

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

p : N°. de pares de polos

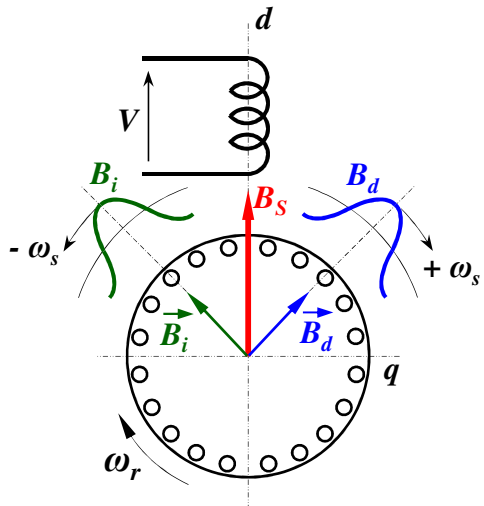
$$B_s = \underbrace{\frac{B_m}{2} \cdot e^{+j.\omega_s t}}_{B_d} + \underbrace{\frac{B_m}{2} \cdot e^{-j.\omega_s t}}_{B_i}$$

B_d : COMPONENTE DE CAMPO DE SEQÜÊNCIA DIRETA

→ VELOCIDADE + ω_s

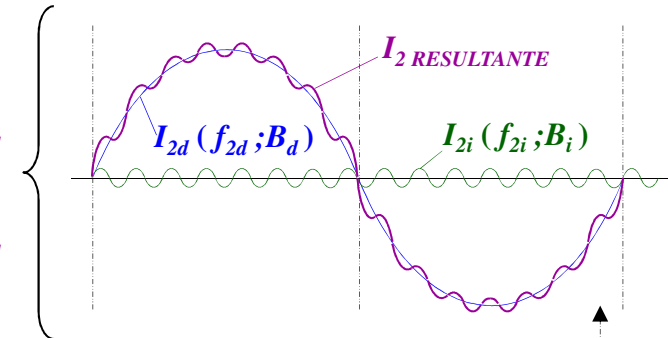
B_i : COMPONENTE DE CAMPO DE SEQÜÊNCIA INVERSA

→ 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 → $f_{2d} = s \cdot f_1$

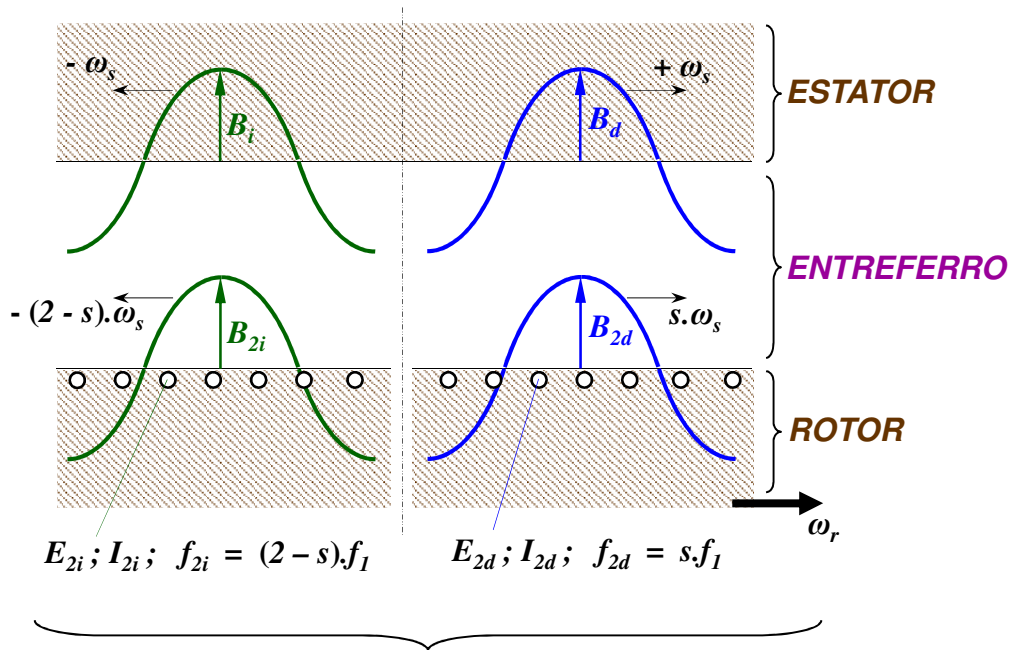
→ CAMPO DE SEQÜÊNCIA INVERSA : B_i GIRA C/ ω_s NO SENTIDO OPOSTO DE ω_r

→ 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}

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

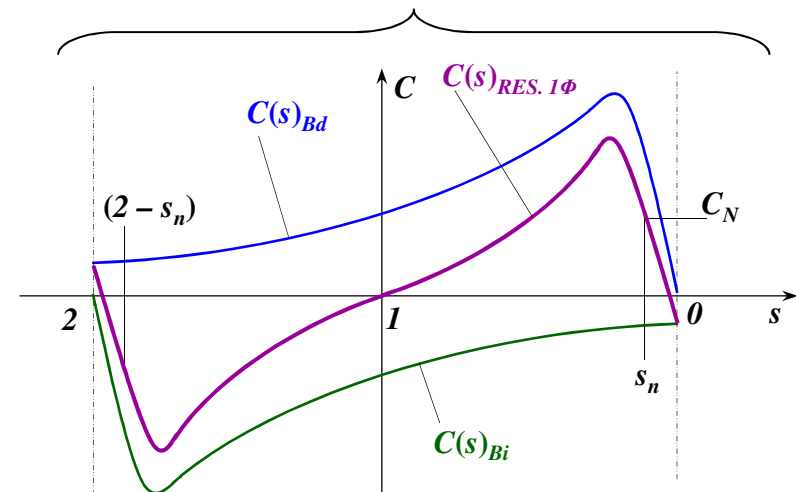
CAMPO DE SEQUÊNCIA INVERSA : B_{2i}

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

**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**

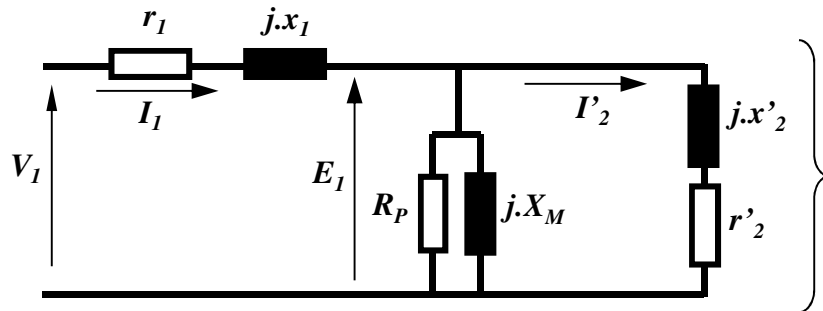


$$C_{1\Phi} = C_{Bd} + C_{Bi} \text{ p/ QUALQUER ESCORREGAMENTO}$$

→ TORQUE DE PARTIDA NULO

→ NÃO TEM SENTIDO PREFERENCIAL DE ROTAÇÃO

CIRCUITO EQUIVALENTE DO MOTOR MONOFÁSICO DE INDUÇÃO

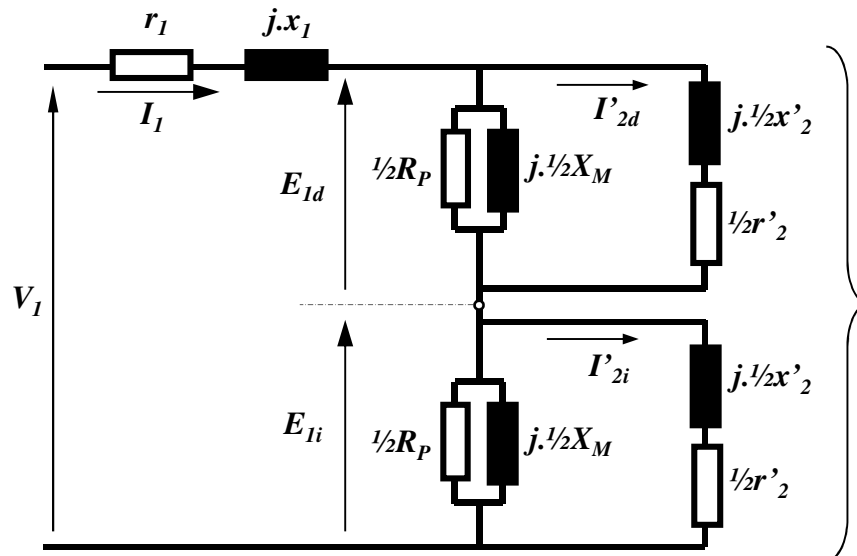


CIRCUITO PARA ROTOR ESTACIONÁRIO : $\omega_r = 0$

→ 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 : $\omega_r = 0 \rightarrow s = 1$

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

INTERAÇÃO DO CAMPO ROTATIVO COM O ROTOR :

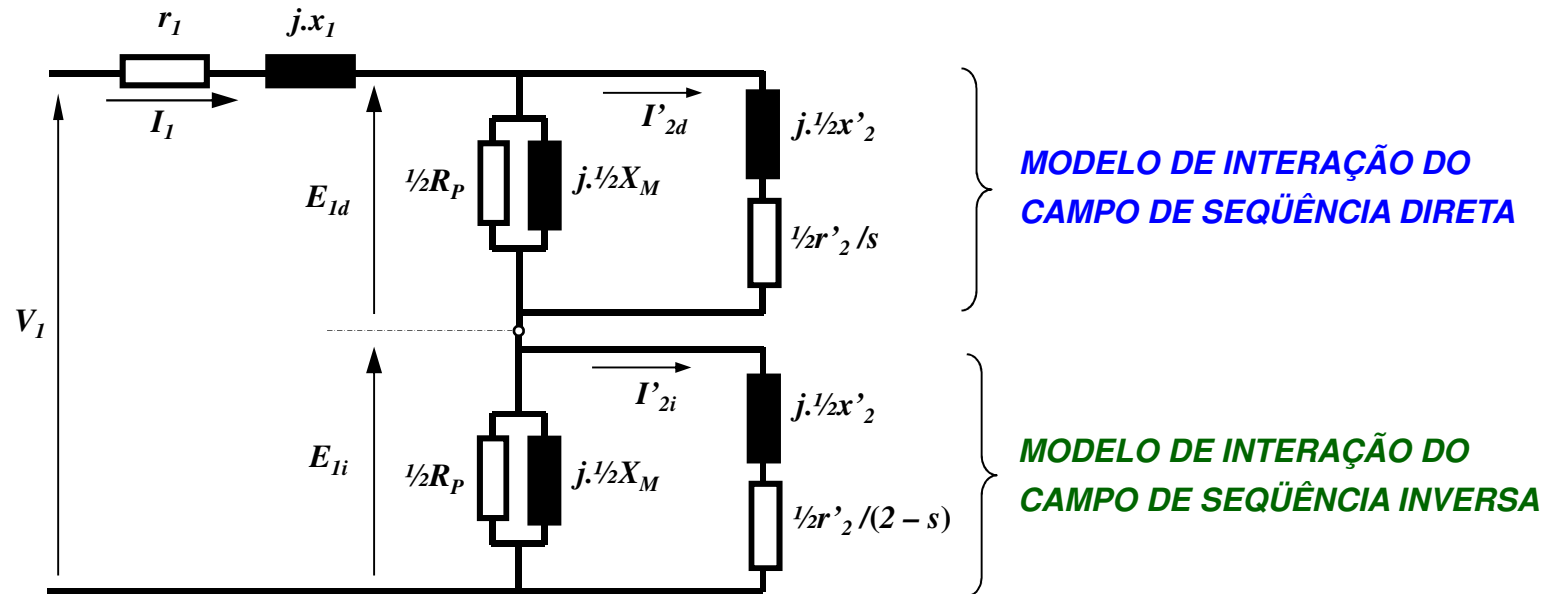
→ $C = P_{tr} / \omega_s$; $P_{tr} = (r'_2 / s) \cdot I'_{2d}{}^2$

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”

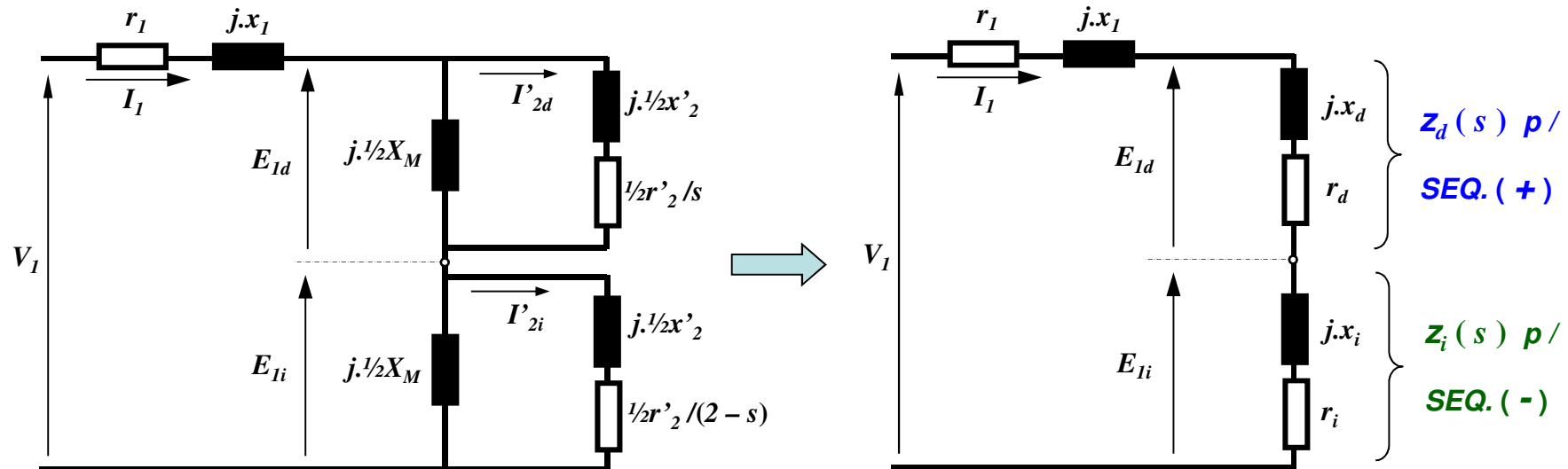


POTÊNCIA TRANSFERIDA AO ROTOR E TORQUE DESENVOLVIDO NO MOTOR MONOFÁSICO :

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

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

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

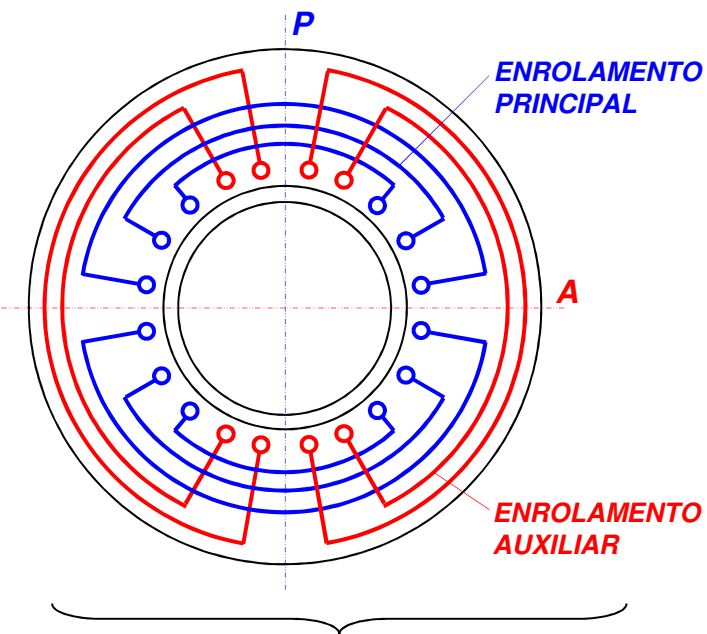
POTÊNCIA MECÂNICA BRUTA :
$$P_{mec} = (1 - s) \cdot P_{tr_{tot}}$$

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

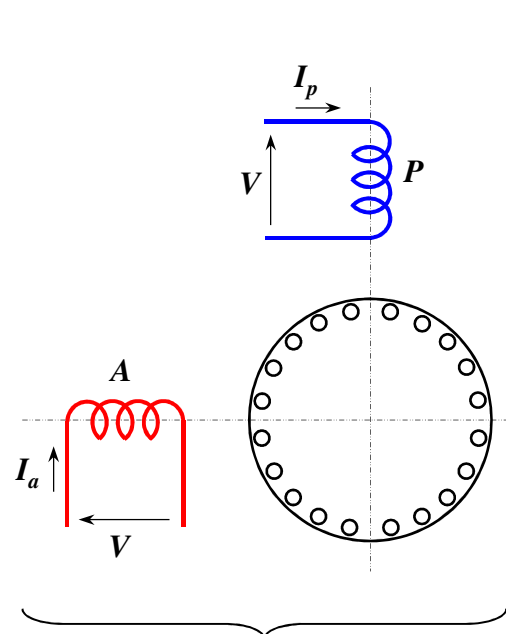
MOTOR MONOFÁSICO NÃO TEM PARTIDA AUTÔNOMA → NECESSITA DE MEIOS AUXILIARES DE ARRANQUE

→ **SOLUÇÃO CLÁSSICA : CONVERTER O MOTOR 1 ϕ 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**

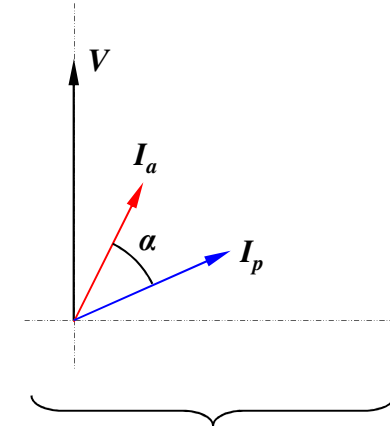


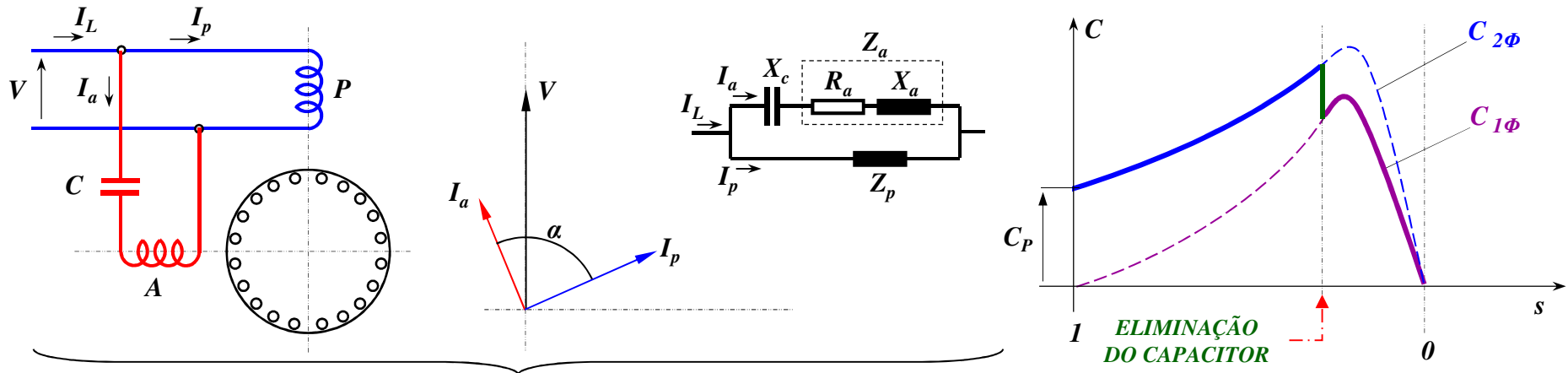
DIAGRAMA FASORIAL DAS CORRENTES NAS FASES :

I_p e I_a DEFASADAS NO TEMPO DE ÂNGULO “ α ”

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

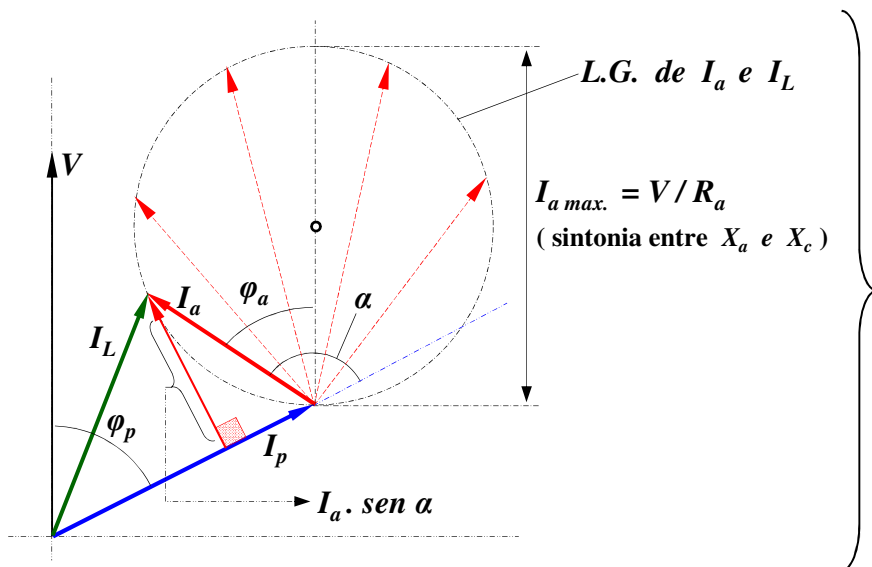
→ **DEFASAGEM “ α ” : OBTIDA POR IMPEDÂNCIA ADEQUADA NO AUXILIAR**

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

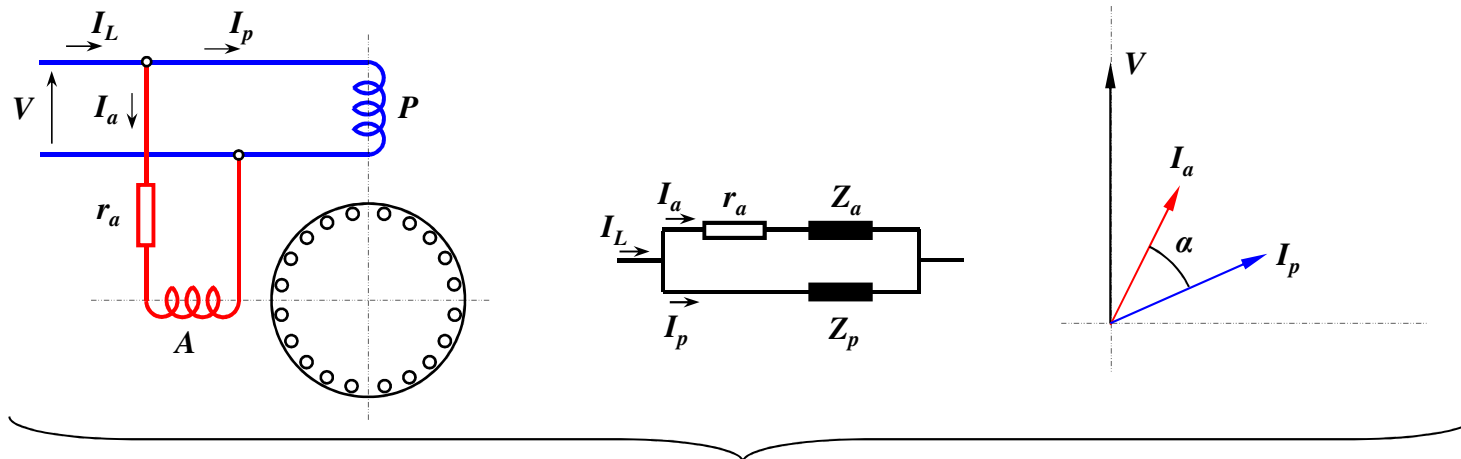
$X_c \rightarrow I_a$ PERCORRE O CÍRCULO DE DIÂMETRO V/R_a

→ SINTONIA TOTAL : $Z_a = R_a$

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

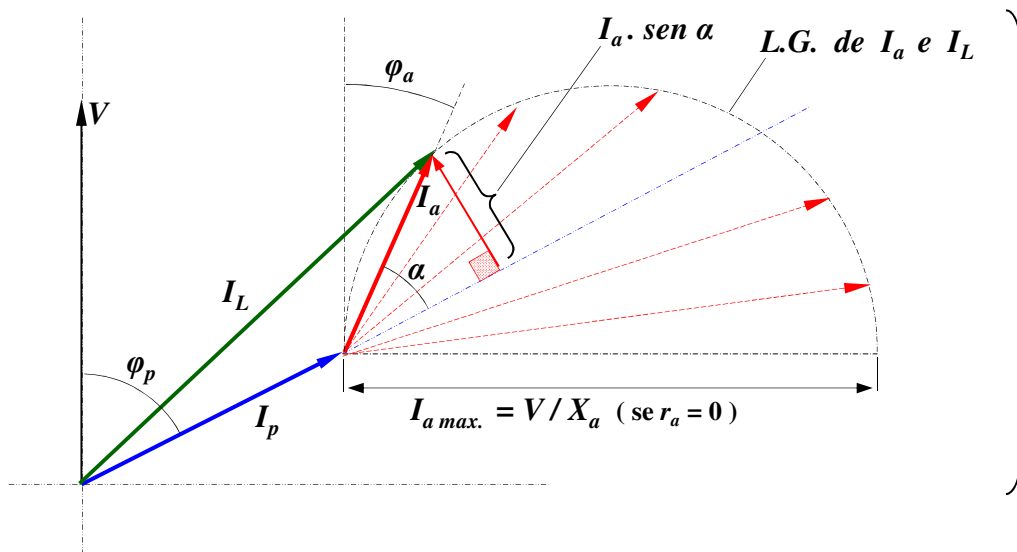
$$p / X_a = X_c \rightarrow I_{a_{max}} = \frac{V}{R_a} \angle 0^\circ$$

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



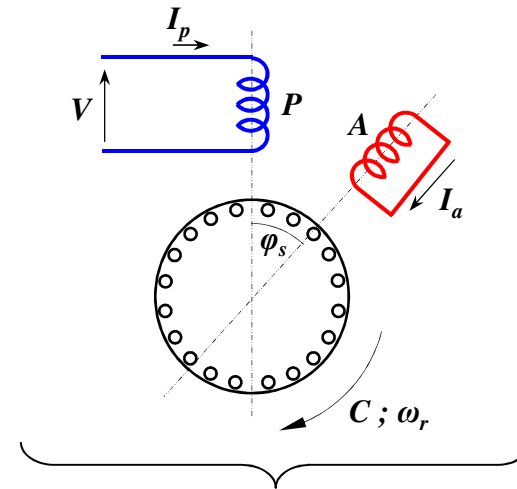
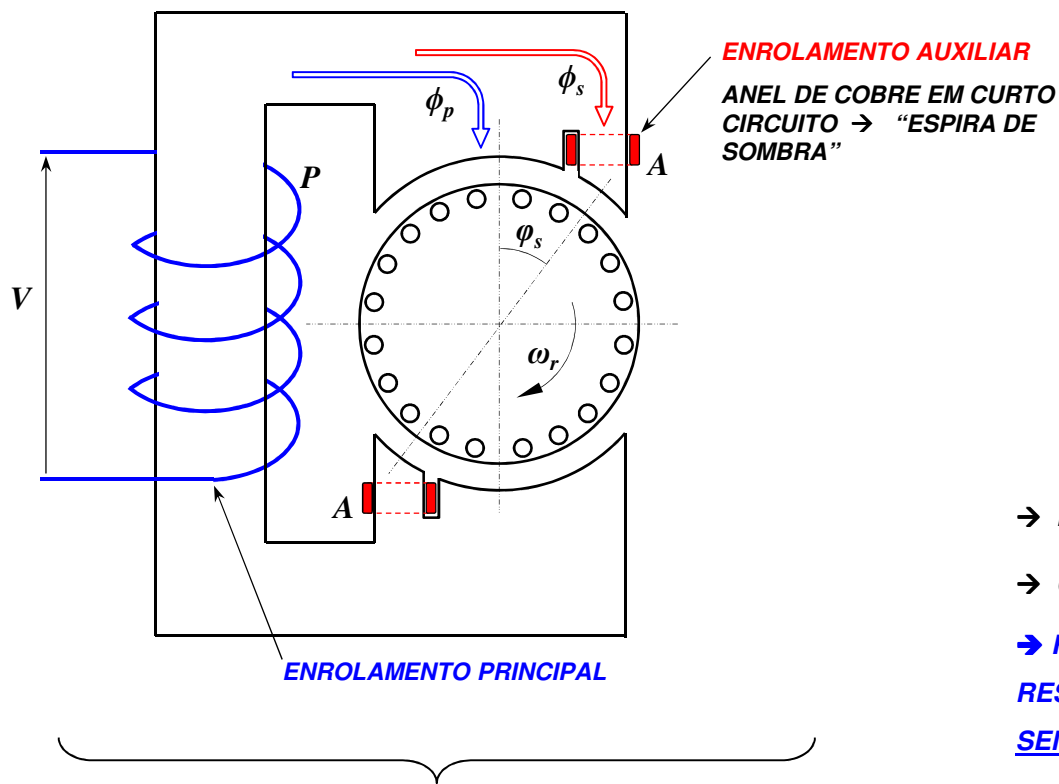
VARIANDO-SE $r_a \rightarrow I_a$ PERCORRE O SEMICÍRCULO DE DIÂMETRO V/X_a

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

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

MÉTODOS DE PARTIDA : MOTOR MONOFÁSICO DE POLOS SOMBREADOS → “ SHADED – POLE MOTOR ”

VARIANTE DE MOTOR MONOFÁSICO DE BAIXO CUSTO PARA POTÊNCIAS REDUZIDAS (MILÉSIMOS DE KW ATÉ APROX. 100 W)

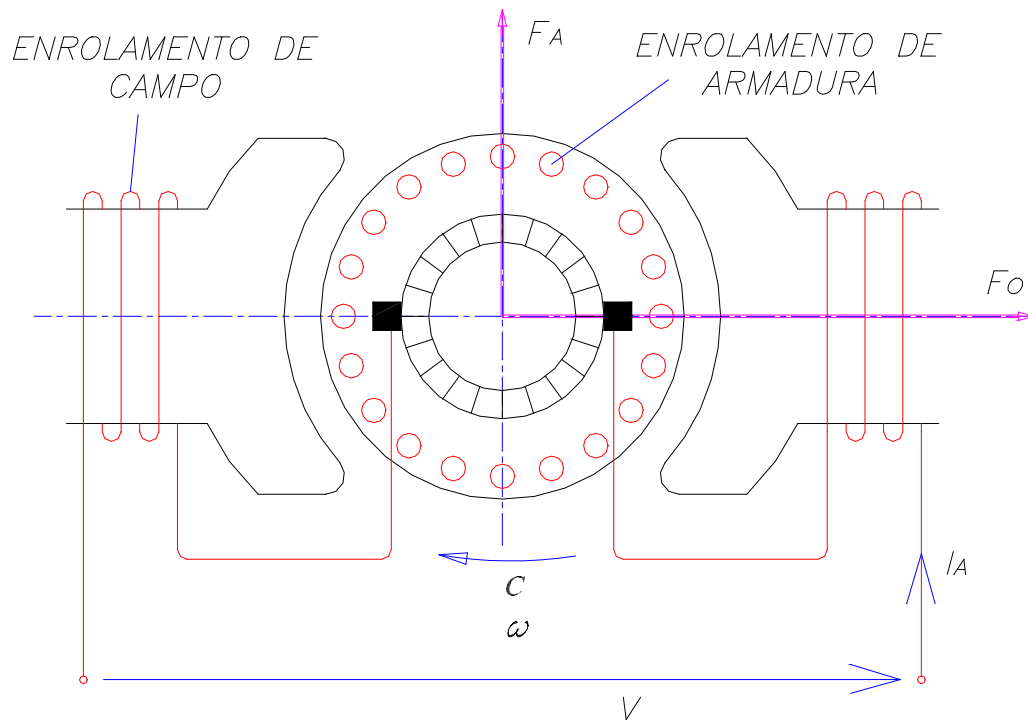


- DOIS ENROLAMENTOS DESLOCADOS NO ESPAÇO DE ϕ_s
- CORRENTES DEFASADAS NO TEMPO DE θ_s
- **FORMAÇÃO DE BIFÁSICO ASSIMÉTRICO E DESEQUILIBRADO RESULTANDO EM COMPONENTE DE CAMPO ROTATIVO NO SENTIDO DA ESPIRA DE SOMBRA**

- ESPIRA EM CURTO CIRCUITO REAGE À PASSAGEM DO FLUXO ϕ_s
- NA ESPIRA É INDUZIDA UMA CORRENTE QUE SE OPÕE À PASSAGEM DO FLUXO ϕ_s QUE RESULTA ATRASADO NO TEMPO EM RELAÇÃO A ϕ_p
- CORRENTE NA ESPIRA ATRASADA NO TEMPO DE ÂNGULO θ_s EM RELAÇÃO À CORRENTE NO ENROLAMENTO PRINCIPAL
- **APLICAÇÕES MAIS COMUNS: VENTILADORES, PEQUENAS BOMBAS, MECANISMOS DE BAIXO CUSTO → SENTIDO DE ROTAÇÃO É ÚNICO, NÃO REVERSÍVEL**

MOTOR MONOFÁSICO UNIVERSAL

MOTORES QUE FUNCIONAM INDISTINTAMENTE QUANDO ALIMENTADOS A PARTIR DE FONTES C.A. OU C.C.



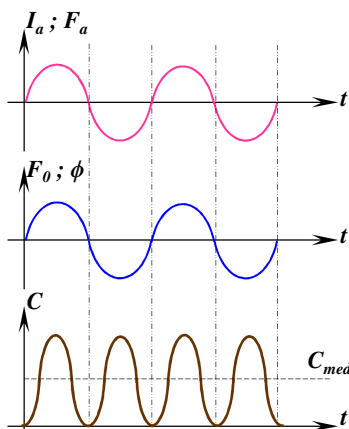
SIMILAR AO MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA COM EXCITAÇÃO DE CAMPO SÉRIE

ESTRUTURA DO ESTATOR EM AÇO LAMINADO PARA MINIMIZAR PERDAS NO FERRO

ALIMENTAÇÃO EM C.A.: INVERSÃO DE CORRENTE NO CAMPO E NA ARMADURA OCORRE CONCOMITANTEMENTE

CORRENTE DE ARMADURA E DE CAMPO TÊM A MESMA FASE

→ CONJUGADO UNIDIRECIONAL

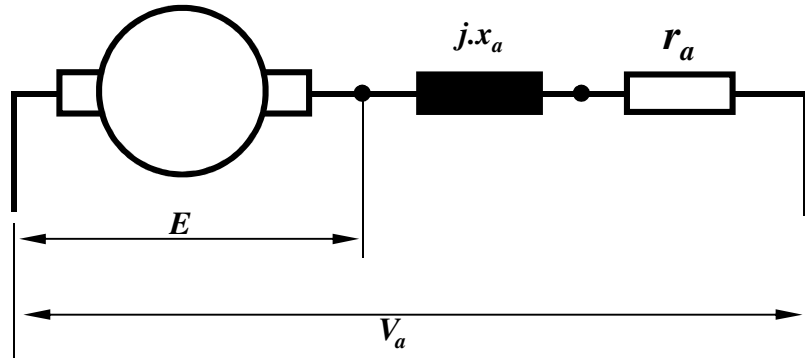


$$C = K \cdot \phi \cdot I_a$$

$$C = K \cdot \phi_M \cdot \text{sen}\omega t \cdot I_M \cdot \text{sen}\omega t$$

$$C = K \cdot \phi_M \cdot I_M \cdot \text{sen}^2\omega t = K \cdot \phi_M \cdot I_M \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cdot \cos 2\omega t \right)$$

MOTOR MONOFÁSICO UNIVERSAL

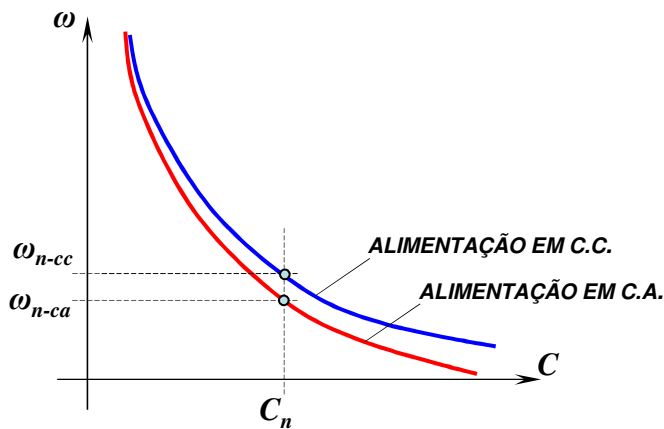
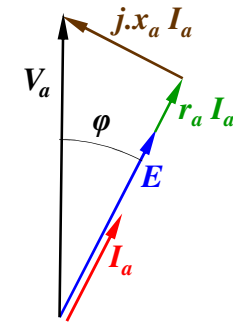


$$E = K \cdot \phi \cdot \omega = K \cdot \phi_M \cdot \omega \cdot \text{sen}\omega t$$

$$V_a = E + r_a \cdot I_a + j \cdot x_a \cdot I_a$$

r_a : RESISTÊNCIA DO CIRCUITO DE ARMADURA

x_a : REATÂNCIA DO CIRCUITO DE ARMADURA



CURVAS CARACTERÍSTICAS TÍPICAS DO MOTOR SÉRIE

PROBLEMAS INERENTES À OPERAÇÃO EM C.A. :

FLUXO ALTERNATIVO → OBRIGA AO USO DE ESTATOR LAMINADO PARA LIMITAÇÃO DE PERDAS NO FERRO

COMUTAÇÃO DIFICULTADA DEVIDO AO EFEITO VARIACIONAL DO FLUXO

VIDA REDUZIDA DAS ESCOVAS E DO COMUTADOR

APLICAÇÕES PRINCIPAIS: EQUIPAMENTOS QUE REQUEREM ELEVADA POTÊNCIA ESPECÍFICA À CUSTA DE ALTA ROTAÇÃO
 → USO DOMÉSTICO ; FERRAMENTAS ELÉTRICAS