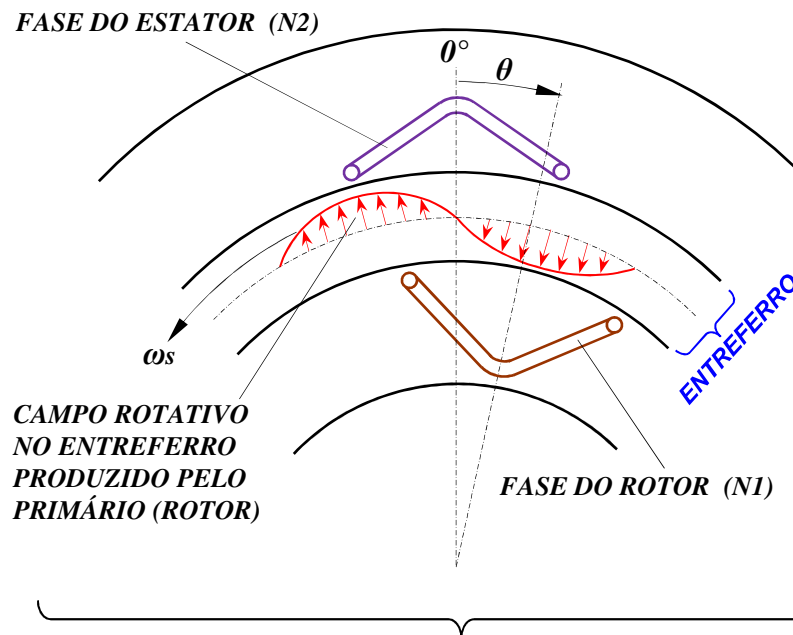


## **MODOS DE OPERAÇÃO NÃO CONVENCIONAIS DA MÁQUINA ASSÍNCRONA**

### MODOS DE OPERAÇÃO NÃO CONVENCIONAIS DA MÁQUINA ASSÍNCRONA

**REGULADOR DE TENSÃO DE INDUÇÃO TRIFÁSICO** → MÁQUINA ASSÍNCRONA DE ANÉIS -  $s = 1$



**TENSÃO DE ENTRADA – PRIMÁRIO (NO ROTOR) :  $V_1$**

→ TOMADA COMO REFERÊNCIA DE ÂNGULO :

$$V_1 / \underline{0^\circ} \text{ ou } (V_1 \cdot e^{j0^\circ})$$

**TENSÃO INDUZIDA NO SECUNDÁRIO (ESTATOR) :  $V_2$**

→ INDUZIDA POR EFEITO DO CAMPO ROTATIVO :

$$V_2 / \underline{\theta} \text{ ou } (V_2 \cdot e^{-j\theta})$$

→  $V_2$  DEFASADA (EM ATRASO) DE  $V_1$  DO ÂNGULO DE DESLOCAMENTO  $\theta$

**RELAÇÃO DE TRANSFORMAÇÃO :  $a = N_2/N_1$**

$$V_2 = a \cdot V_1 = a \cdot V_1 \cdot e^{-j\theta}$$

**MÁQUINA DE ROTOR BOBINADO MANTIDA COM ROTOR ESTACIONÁRIO**

POSIÇÃO ANGULAR RELATIVA ENTRE ROTOR E ESTATOR AJUSTÁVEL POR MEIO DE MECANISMO, USUALMENTE MOTORIZADO

MOVIMENTO MÁXIMO RELATIVO ENTRE ROTOR E ESTATOR:  $180^\circ$  el.

→ CONSTRUÇÃO TÍPICA DE 4 POLOS →  $\theta_{max} = 90^\circ$  mec.

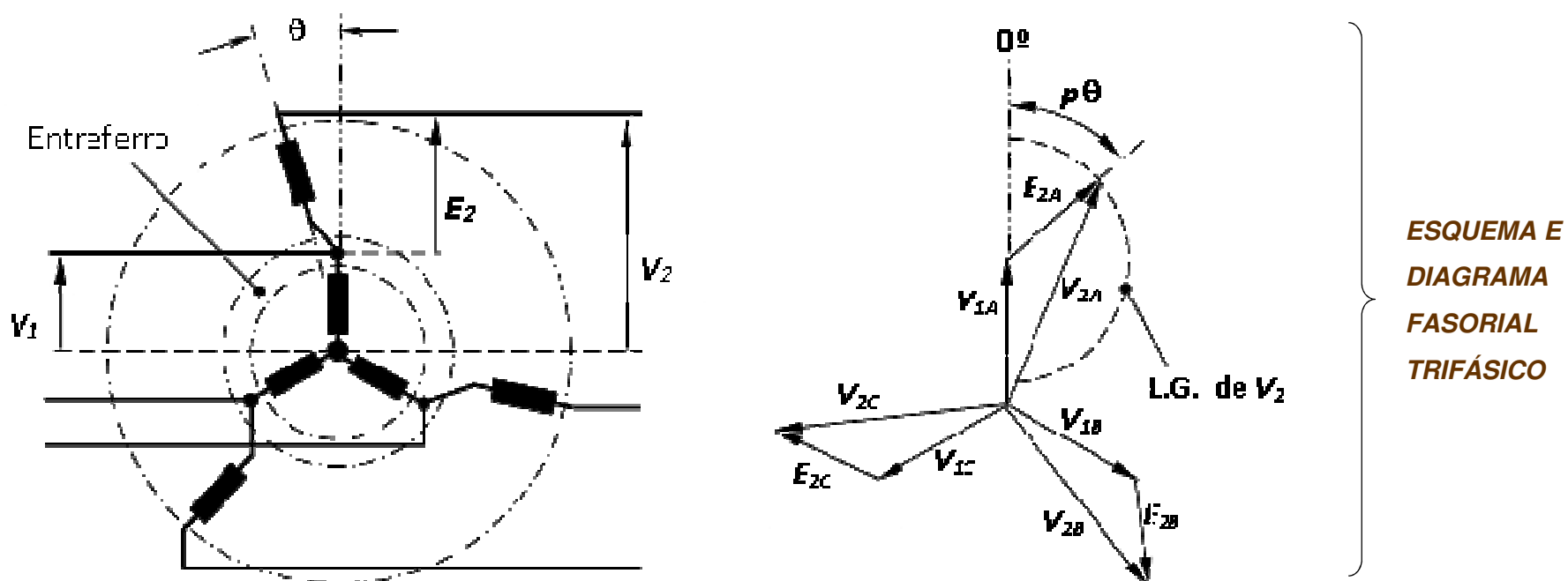
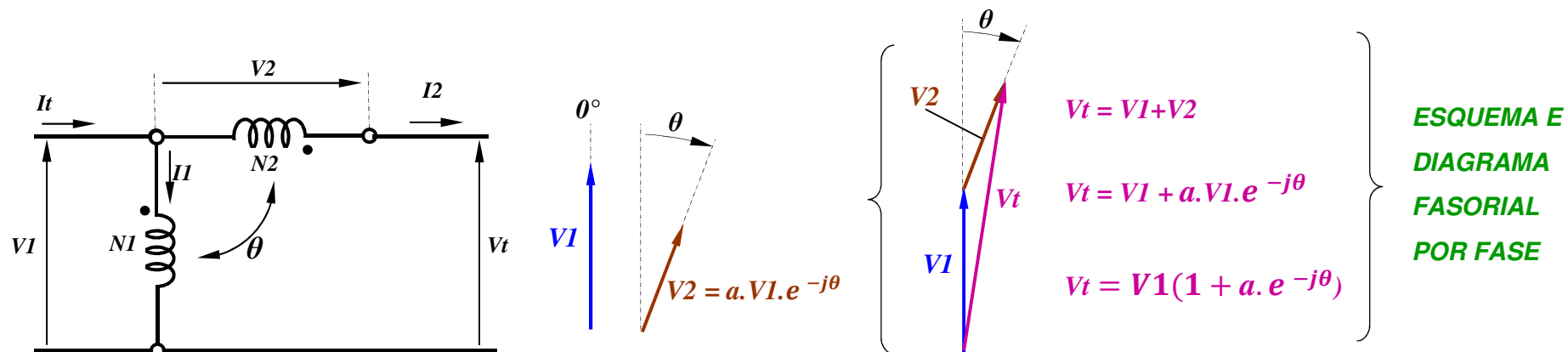
ACESSO AO ROTOR POR MEIO DE CABOS FLEXÍVEIS

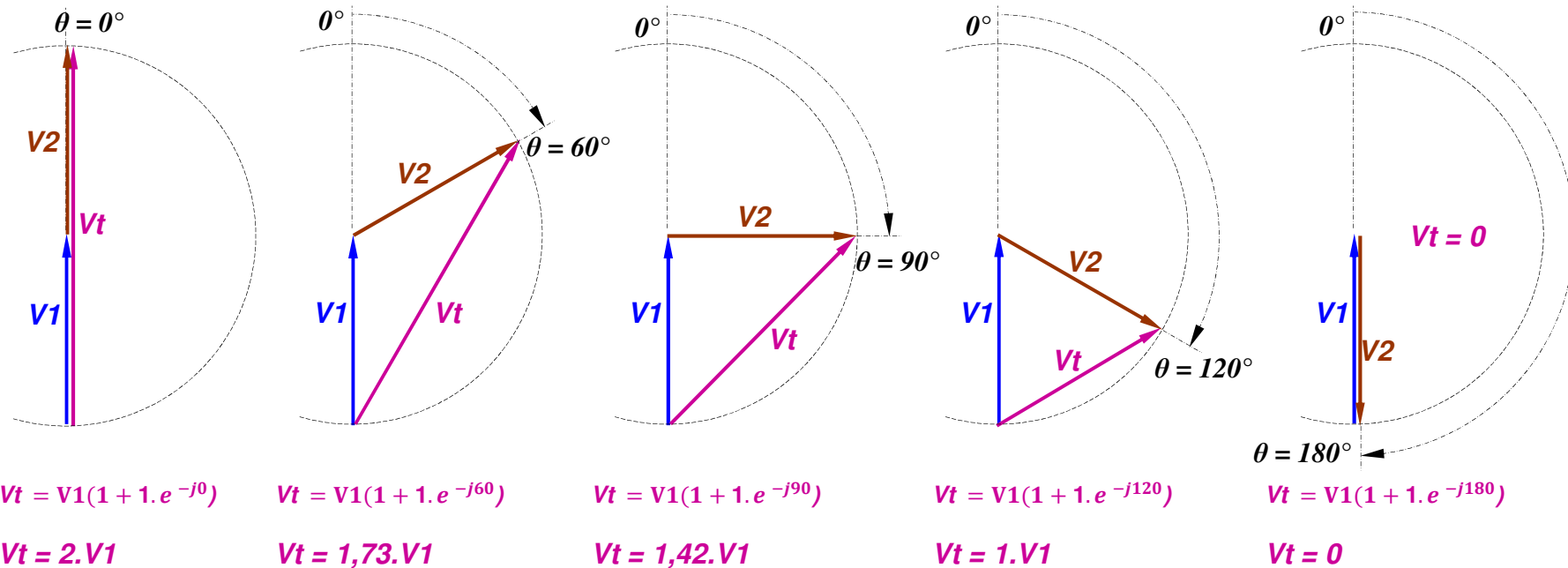
→ DISPENSA O USO DOS ANÉIS E DAS ESCOVAS

UTILIZAÇÃO COMO FONTE DE TENSÃO CONTÍNUAMENTE VARIÁVEL, DE ELEVADA CONFIABILIDADE – USUALMENTE EM GRANDES POTÊNCIAS (ATÉ 10 MW)

→ SISTEMAS ELETROTÉRMICOS (FORNOS)

→ LABORATÓRIOS DE ENSAIOS ELÉTRICOS

**REGULADOR DE TENSÃO DE INDUÇÃO TRIFÁSICO****PRIMÁRIO E SECUNDÁRIO SÃO INTERCONECTADOS FORMANDO UM AUTOTRANSFORMADOR**

EXCURSÃO DE TENSÃO NO REGULADOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO :  $a = 1$ 

$$V_t = V_1(1 + a \cdot e^{-j\theta}) = V_1 \cdot \sqrt{(1 + a \cdot \cos\theta)^2 + (a \cdot \sin\theta)^2}$$

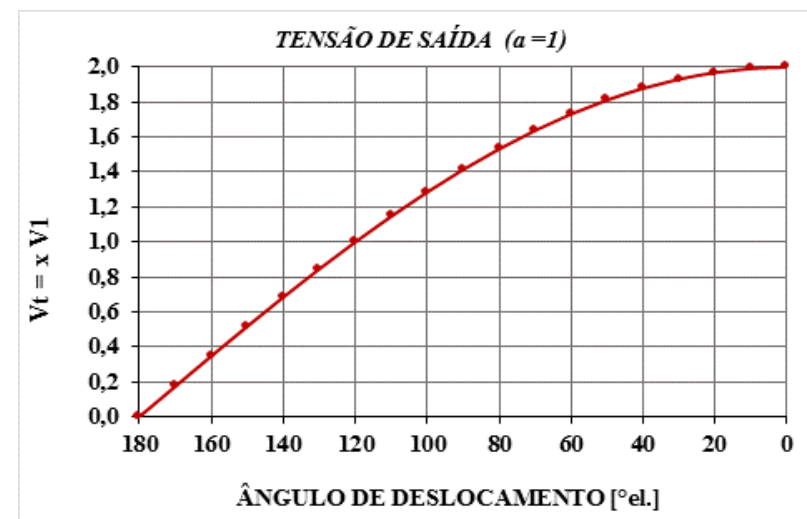
$$a = 1 \rightarrow V_2 = V_1 ; I_2 = I_1$$

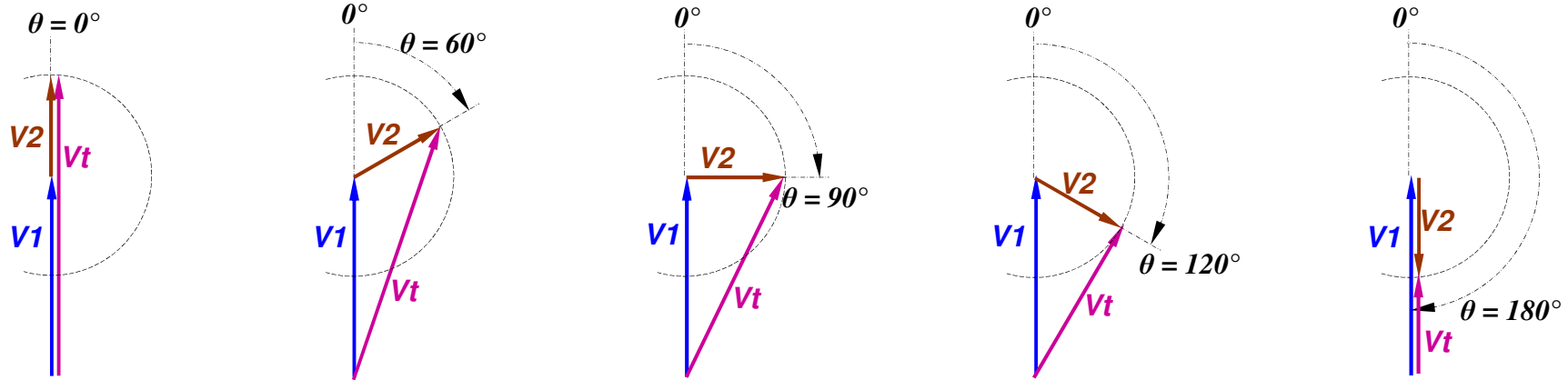
$$\rightarrow \text{FAIXA DA TENSÃO DE SAÍDA : } 0 \leq V_t \leq 2 \cdot V_1$$

$$\text{POTÊNCIA PASSANTE: } S_p = V_1 \cdot I_1 = V_2 \cdot I_2$$

$$\text{POTÊNCIA TOTAL MÁXIMA DE SAÍDA } (\theta = 0^\circ) :$$

$$S_t = V_t \cdot I_2 = (2 \cdot V_1) \cdot I_2 = (2 \cdot V_1) \cdot I_1 = 2 \cdot S_p$$



EXCURSÃO DE TENSÃO NO REGULADOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO :  $a = 0,5$ 


$$V_t = V_1(1 + 0,5 \cdot e^{-j0})$$

$$V_t = 1,5 \cdot V_1$$

$$V_t = V_1(1 + 0,5 \cdot e^{-j60})$$

$$V_t = 1,32 \cdot V_1$$

$$V_t = V_1(1 + 0,5 \cdot e^{-j90})$$

$$V_t = 1,12 \cdot V_1$$

$$V_t = V_1(1 + 0,5 \cdot e^{-j120})$$

$$V_t = 0,87 \cdot V_1$$

$$V_t = V_1(1 + 0,5 \cdot e^{-j180})$$

$$V_t = 0,5 \cdot V_1$$

$$V_t = V_1(1 + a \cdot e^{-j\theta}) = V_1 \cdot \sqrt{(1 + a \cdot \cos\theta)^2 + (a \cdot \sin\theta)^2}$$

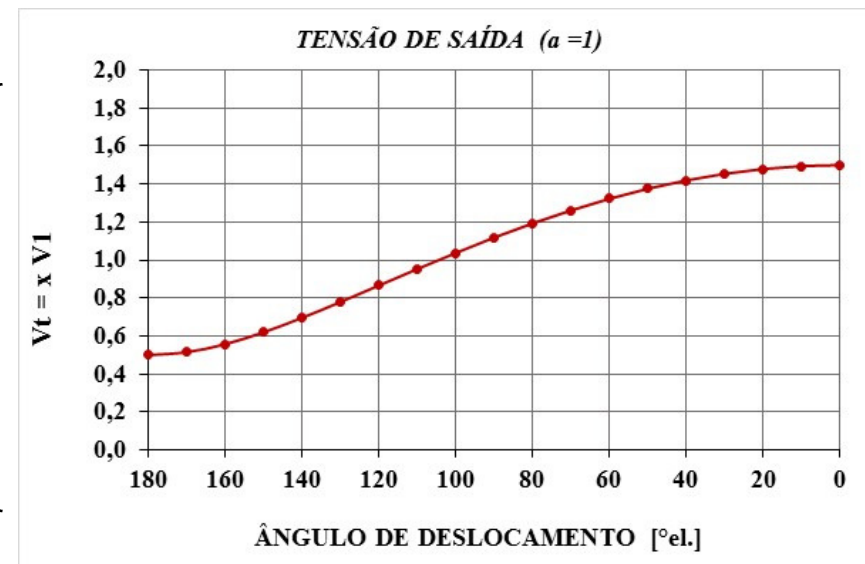
$$a = 0,5 \rightarrow V_2 = 0,5 \cdot V_1 ; I_2 = 2 \cdot I_1$$

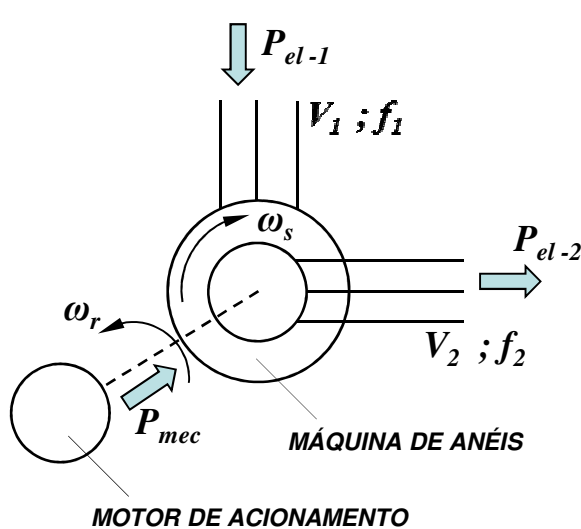
$$\rightarrow \text{FAIXA DA TENSÃO DE SAÍDA : } 0,5 \cdot V_1 \leq V_t \leq 1,5 \cdot V_1$$

$$\text{POTÊNCIA PASSANTE: } S_p = V_1 \cdot I_1 = V_2 \cdot I_2$$

$$\text{POTÊNCIA TOTAL MÁXIMA DE SAÍDA ( } \theta = 0^\circ \text{ ) :}$$

$$S_t = V_t \cdot I_2 = (1,5 \cdot V_1) \cdot I_2 = (1,5 \cdot V_1) \cdot (2 \cdot I_1) = 3 \cdot S_p$$



**CONVERSOR DE FREQUÊNCIA DE INDUÇÃO TRIFÁSICO → MÁQUINA ASSÍNCRONA DE ANÉIS -  $s > 1$** 

**MÁQUINA DE ANÉIS COM  
O EIXO ACIONADO EM  
SENTIDO CONTRÁRIO AO  
DO CAMPO ROTATIVO  
ESTABELECIDO NO SEU  
ENTREFERRO**

**EXEMPLO****MÁQUINA DE ANÉIS COM:**

5 kW – 4 polos

 $V_1 = 220 \text{ V} - V_{2o} = 80 \text{ V}$ **CONVERSOR 60 / 180 Hz** $f_2 = 3.f_1 \rightarrow s = 3$  $\omega_r = -2.\omega_s$  $V_2 = 3 \cdot V_{2o} = 240 \text{ V}$  $P_{el-1} = 5 \text{ kW}$  $P_{el-2} = 15 \text{ kW}$  $P_{mec} = 10 \text{ kW}$ **MOTOR DE ACIONAMENTO:**

10 kW - 2 POLOS

$$V_2 = s \cdot V_{2o} = s \cdot V_1 \text{ p/ } a = 1$$

$$f_2 = s \cdot f_1$$

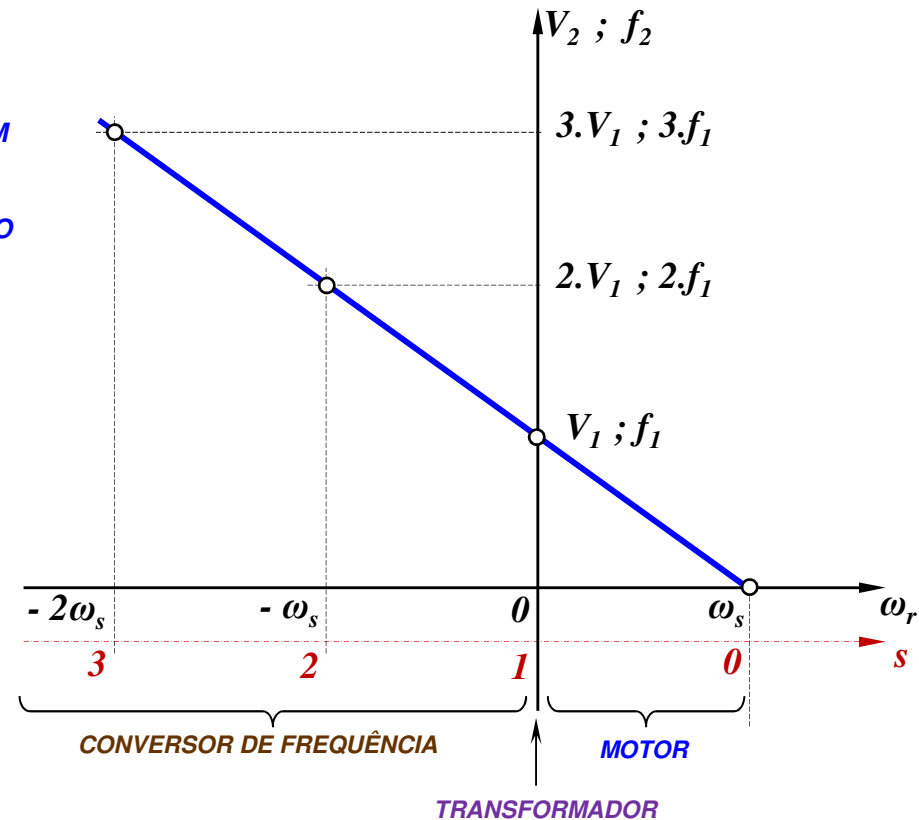
**POTÊNCIAS ENVOLVIDAS:**

$$P_{el-1} \approx P_{tr}$$

$$P_{el-2} = s \cdot P_{el-1}$$

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

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



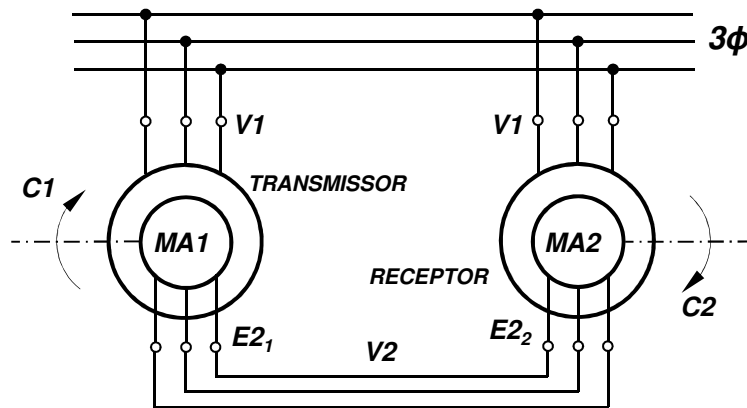
**APLICAÇÃO PRINCIPAL:** FONTES DE FREQUÊNCIA E TENSÃO  
FIXAS PARA ALIMENTAÇÃO DE CARGAS POUCO EXIGENTES

→ FERRAMENTAS ELÉTRICAS INDUSTRIAIS

→ MÁQUINAS PARA PROCESSAMENTO DE MADEIRA

**PAR DE MÁQUINAS ASSÍNCRONAS FUNCIONANDO COMO “EIXO ELÉTRICO” → MÁQUINA ASSÍNCRONA DE ANÉIS -  $s > 1$**

ACIONAMENTO SINCRONIZADO COM MÁQUINAS ASSÍNCRONAS → EIXOS DAS MÁQUINAS MA1 E MA2 PERMANECEM SÍNCRONOS ENTRE SI EM QUALQUER ROTAÇÃO DE ACIONAMENTO



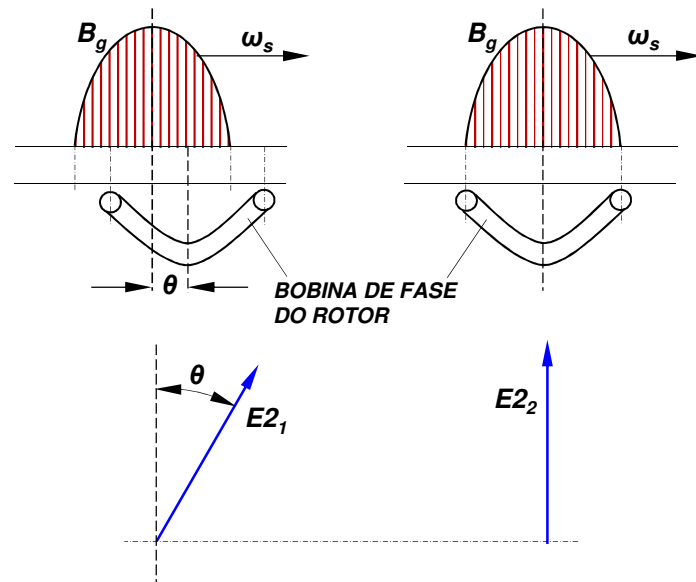
TENSÕES ROTÓRICAS INDUZIDAS PELO CAMPO ROTATIVO DO ENTREFERRO  $E_{2_1}$  e  $E_{2_2}$  TÊM MESMO MÓDULO

FASE DE  $E_{2_1}$  e  $E_{2_2}$  DEPENDE DA POSIÇÃO DO ROTOR EM RELAÇÃO AO CAMPO GIRANTE

V2: ELO DE SINCRONISMO DO EIXO ELÉTRICO

→  $V2 \neq 0 \Rightarrow s \neq 0$  OBRIGATORIAMENTE

→ (USUALMENTE  $s > 1$  : OPERAÇÃO NA REGIÃO DE FREIO)



ALIMENTAÇÃO COMUM DOS DOIS ESTADORES → CAMPO ROTATIVO TEM A MESMA FASE NAS DUAS MÁQUINAS

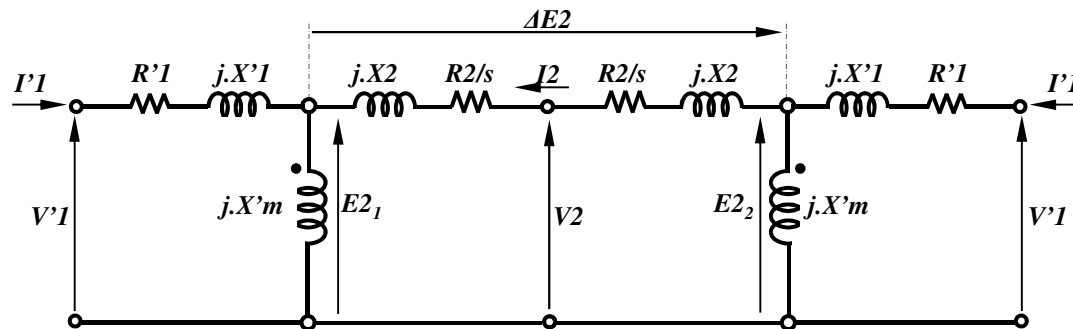
REFRÊNCIA DE FASE : TENSÃO INDUZIDA NA MÁQUINA MA2

MÁQUINA MA1 COM ROTOR IMPULSIONADO (TORQUE EXTERNO POSITIVO APLICADO AO SEU EIXO) → ROTOR AVANÇA EM RELAÇÃO AO CAMPO ROTATIVO DE UM ÂNGULO  $\theta$

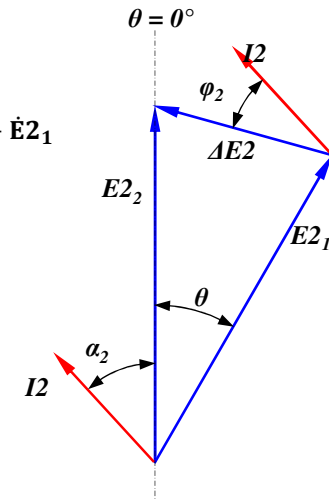
FASOR DA TENSÃO INDUZIDA NA FASE DO ROTOR DA MÁQUINA MA1 ATRASA EM RELAÇÃO À TENSÃO DA MESMA FASE DA MÁQUINA MA2

## FUNCIONAMENTO DO EIXO ELÉTRICO

CIRCUITO EQUIVALENTE POR FASE DO PAR DE MÁQUINAS (REFERIDO AO ROTOR) :



$$\begin{aligned} \dot{E}2_2 &= \dot{E}2_1 + \Delta \dot{E}2 \rightarrow \Delta \dot{E}2 = \dot{E}2_2 - \dot{E}2_1 \\ \dot{I}2 &= \frac{\Delta \dot{E}2}{2 \cdot \dot{Z}2} = \frac{\dot{E}2_2 - \dot{E}2_1}{2 \cdot \dot{Z}2} \\ \dot{Z}2 &= \left( \frac{R2}{s} + j \cdot X2 \right) = Z2 \cdot e^{j\varphi_2} \\ \varphi_2 &= \arccos \left( \frac{(R2/s)}{Z2} \right) \end{aligned}$$



$$|\dot{E}2_2| = |\dot{E}2_1| = E2 \rightarrow \dot{I}2 = \frac{\dot{E}2_2 - \dot{E}2_1}{2 \cdot \dot{Z}2} = \frac{E2 \cdot e^{j0} - E2 \cdot e^{-j\theta}}{2 \cdot Z2 \cdot e^{j\varphi_2}} \rightarrow \dot{I}2 = \left( \frac{E2}{Z2} \cdot \sin(\theta/2) \right) \cdot e^{j(90 - \theta/2 - \varphi_2)}$$

$$C = \frac{P_{tr}}{\omega_s} = \frac{3 \cdot E2 \cdot I2a}{\omega_s} \rightarrow \text{CONJUGADO DESENVOLVIDO POR CADA MÁQUINA PROPORCIONAL À SUA CORRENTE ATIVA}$$

AÇÃO SINCRONIZADORA DO EIXO ELÉTRICO

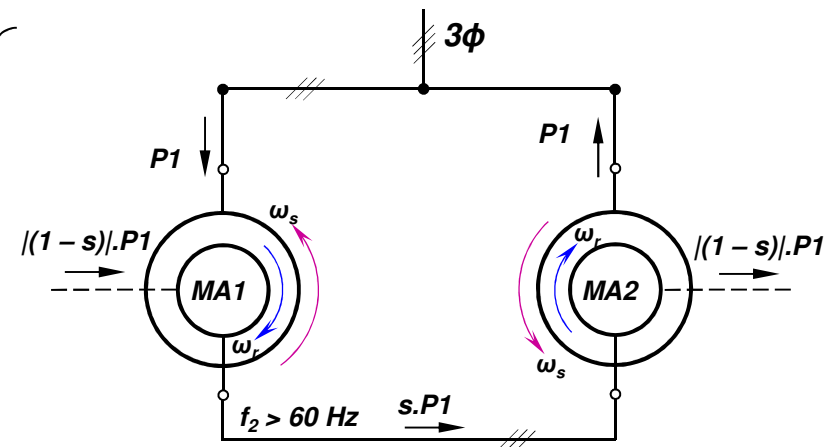
 → TORQUE DE SINCRONIZAÇÃO :  $C_s = C_2 - C_1$ 

$$C_s = C(s) \cdot \frac{s \cdot X2}{R2} \cdot \sin\theta$$

AÇÃO SINCRONIZADORA TANTO MAIS INTENSA QUANTO MAIOR O ESCORREGAMENTO

 → USUALMENTE :  $1 < s < 2$  (REGIÃO DE FREIO)

FLUXO DE POTÊNCIAS ATIVAS NO EIXO ELÉTRICO (MÁQUINAS IDEAIS SEM PERDAS)


 OPERAÇÃO COM :  $s > 1$ 

MA1: CONVERSOR DE FREQUÊNCIA

MA2: MOTOR SUB OU SUPER SÍNCRONO