

**PARTE 4**

**EIXO ELÉTRICO - (“POWER SELSYN”)**

**EIXOS ELÉTRICOS:**

**CARACTERIZAM-SE COMO ACIONAMENTOS SINCRONIZADOS DE POTÊNCIA**

**UTILIZAM MÁQUINAS ASSÍNCRONAS TRIFÁSICAS DE ROTOR BOBINADO (ROTOR DE ANÉIS)**

**CUMPREM A FUNÇÃO DE SINCRONIZAR EIXOS EM ROTAÇÃO DISTANTES ENTRE SI (COMO SE EXISTISSE UM ELO MECÂNICO OU “EIXO” ENTRE OS MESMOS)**

**APLICAÇÕES PRINCIPAIS:**

**MÁQUINAS TEXTEIS; MÁQUINAS GRÁFICAS E IMPRESSORAS ROTATIVAS**

**ESTEIRAS TRANSPORTADORAS**

**PONTES ROLANTES COM GRANDE VÃO ; PÓRTICOS DE CARGA**

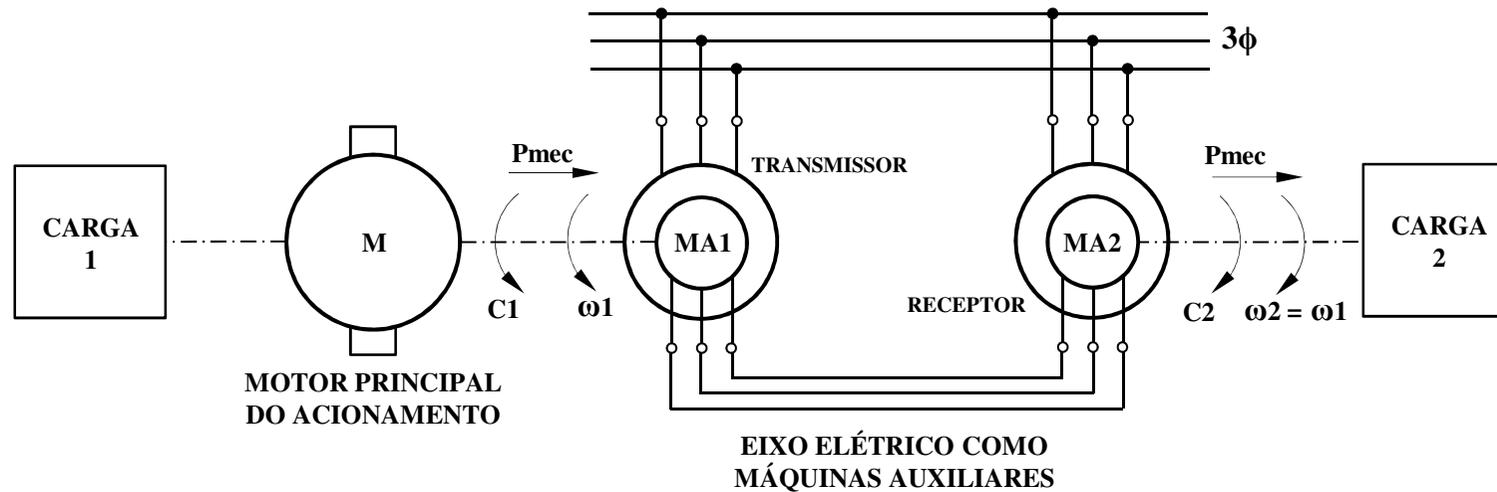
**COMPORTAS DE ECLUSAS**



## PEA – 5728 - Parte 4: EIXO ELÉTRICO

### CONFIGURAÇÕES MAIS COMUNS DOS EIXOS ELÉTRICOS

#### 1B) SINCRONISMO COM MÁQUINAS AUXILIARES:



**M : MOTOR PRINCIPAL - CARGA 2 DISTANTE E SINCRONIZADA COM A CARGA 1**

**MA1 – MA2 : MÁQUINAS DE INDUÇÃO TRIFÁSICAS DE ROTOR BOBINADO OPERANDO COMO EIXO ELÉTRICO TRANSMITEM O ACIONAMENTO DA CARGA 2 À DISTÂNCIA**

**FUNÇÃO EQUIVALENTE À EXISTÊNCIA DE UM “EIXO MECÂNICO” ENTRE CARGA 1 E CARGA 2**

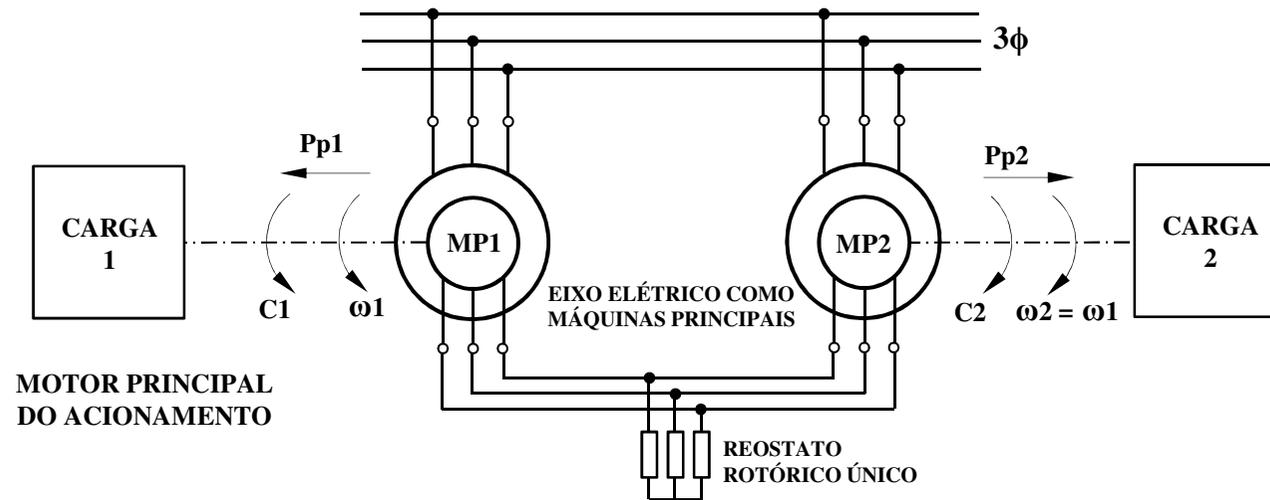
**→ CAPACIDADE DE CONJUGADO DAS MÁQUINAS AUXILIARES:  $C_{AUX} = C_{NOMINAL}$  DA CARGA 2**

**→ APLICAÇÕES: MÁQUINAS TEXTEIS ; IMPRESSORAS ; ESTEIRAS TRANSPORTADORAS**

## PEA – 5728 - Parte 4: EIXO ELÉTRICO

### CONFIGURAÇÕES MAIS COMUNS DOS EIXOS ELÉTRICOS

#### 2) SINCRONISMO COM MÁQUINAS PRINCIPAIS:



**MP1 – MP2 : MÁQUINAS DE INDUÇÃO TRIFÁSICAS DE ROTOR BOBINADO ACIONANDO CARGAS DISTINTAS**

**EIXO ELÉTRICO ACIONA AS CARGAS E AO MESMO TEMPO GARANTE O SINCRONISMO DAS MESMAS**

**MANTÊM O SINCRONISMO DA CARGA 1 E CARGA 2 AINDA QUE AS POTÊNCIAS DEMANDAS SEJAM DIFERENTES**

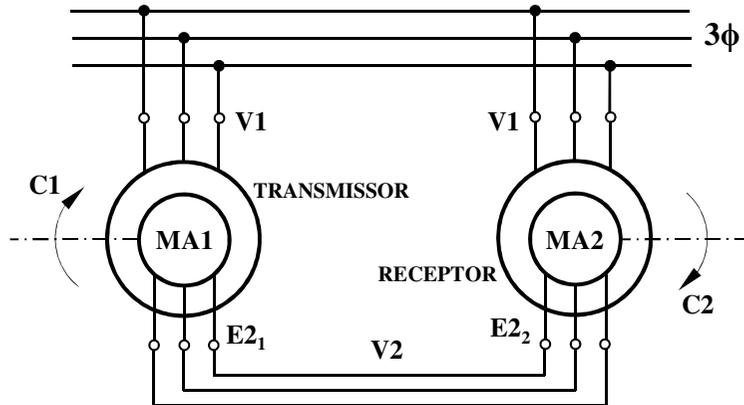
**FUNÇÃO EQUIVALENTE À EXISTÊNCIA DE UM “EIXO MECÂNICO” ENTRE CARGA 1 E CARGA 2**

**→ CAPACIDADE DE CONJUGADO DAS MÁQUINAS PRINCIPAIS:  $C_{P1} = C_{P2} = C_{NOMINAL}$  DAS CARGAS 1 e 2**

**→ APLICAÇÕES: PONTES ROLANTES; PÓRTICOS DE CARGA**

# PEA – 5728 - Parte 4: EIXO ELÉTRICO

## ANÁLISE DO FUNCIONAMENTO DO EIXO ELÉTRICO COMO MÁQUINAS AUXILIARES



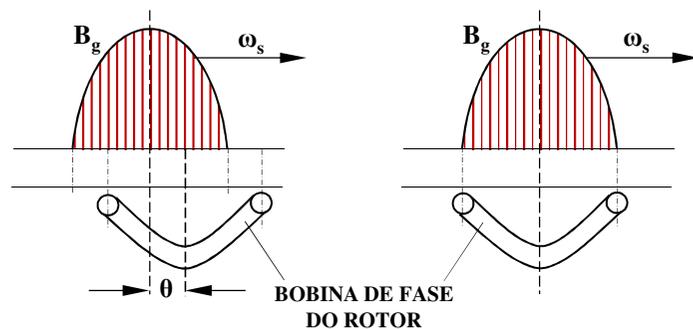
TENSÕES ROTÓRICAS INDUZIDAS PELO CAMPO ROTATIVO DO ENTREFERRO  $E_{21}$  e  $E_{22}$  TÊM MESMO MÓDULO

FASE DE  $E_{21}$  e  $E_{22}$  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

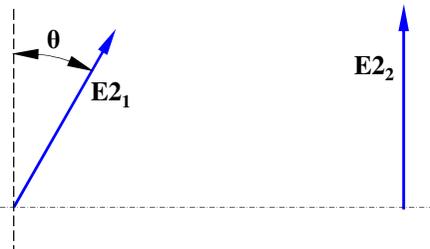
→ (USUALMENTE  $s > 1$ : OPERAÇÃO DAS MÁQUINAS NA REGIÃO DE FREIO)



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

# PEA – 5728 - Parte 4: EIXO ELÉTRICO

## ANÁLISE DO FUNCIONAMENTO DO EIXO ELÉTRICO COMO MÁQUINAS AUXILIARES

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

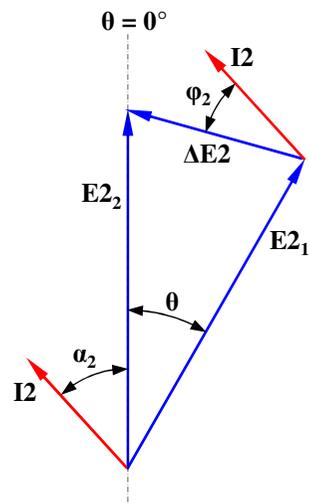
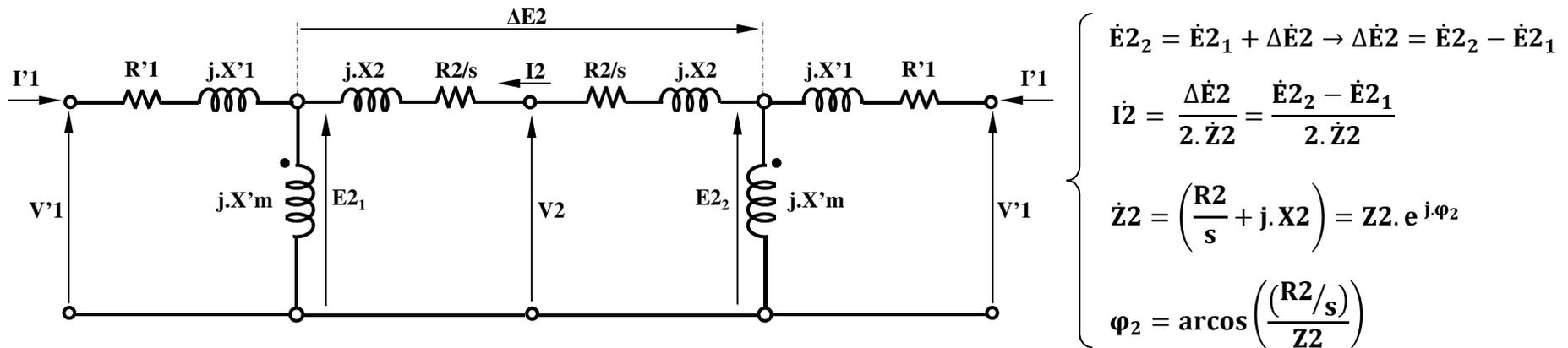
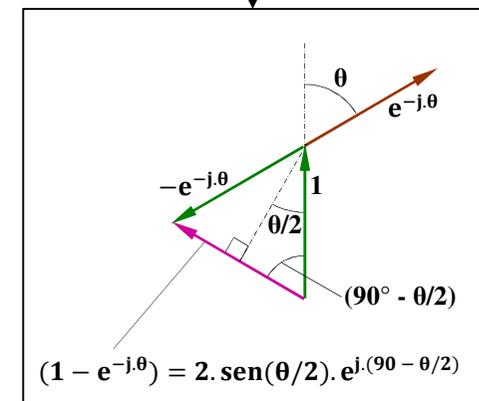


DIAGRAMA FASORIAL

$$|\dot{E}_2| = |\dot{E}_1| = E_2 \rightarrow \dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_2 - \dot{E}_1}{2 \cdot \dot{Z}_2} = \frac{E_2 \cdot e^{j0} - E_2 \cdot e^{-j\theta}}{2 \cdot Z_2 \cdot e^{j\varphi_2}} \rightarrow \dot{I}_2 = \frac{E_2}{2 \cdot Z_2} \cdot e^{-j\varphi_2} \cdot \underbrace{(1 - e^{-j\theta})}$$

$$\dot{I}_2 = \frac{E_2}{2 \cdot Z_2} \cdot e^{-j\varphi_2} \cdot 2 \cdot \text{sen}(\theta/2) \cdot e^{j(90^\circ - \theta/2)}$$

$$\dot{I}_2 = \left( \frac{E_2}{Z_2} \cdot \text{sen}(\theta/2) \right) \cdot e^{j \overbrace{(90^\circ - \theta/2 - \varphi_2)}^{\alpha_2}}$$



# PEA – 5728 - Parte 4: EIXO ELÉTRICO

## ANÁLISE DO FUNCIONAMENTO DO EIXO ELÉTRICO COMO MÁQUINAS AUXILIARES

### COMPONENTES ATIVAS DA CORRENTE ROTÓRICA: (ASSOCIADAS À POTÊNCIA TRANSFERIDA AO ROTOR E PORTANTO AO TORQUE DESENVOLVIDO)

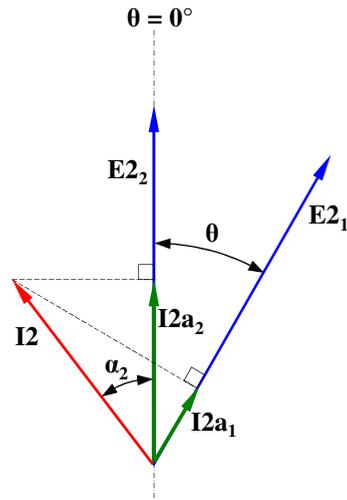


DIAGRAMA FASORIAL

$$i_2 = \left( \frac{E_2}{Z_2} \cdot \text{sen}(\theta/2) \right) \cdot e^{j(90 - \theta/2 - \varphi_2)}$$

**MA1** :  $I_{2a1} = I_2 \cdot \cos(\theta + \alpha_2) \rightarrow I_{2a1} = \left( \frac{E_2}{Z_2} \cdot \text{sen}(\theta/2) \right) \cdot \cos(90 + \theta/2 - \varphi_2)$

**MA2** :  $I_{2a2} = I_2 \cdot \cos \alpha_2 \rightarrow I_{2a2} = \left( \frac{E_2}{Z_2} \cdot \text{sen}(\theta/2) \right) \cdot \cos(90 - \theta/2 - \varphi_2)$

$$\begin{aligned} \cos(90 - \theta/2 - \varphi_2) &= \cos[90 - (\theta/2 + \varphi_2)] = \cos 90 \cdot \cos(\theta/2 + \varphi_2) + \text{sen} 90 \cdot \text{sen}(\theta/2 + \varphi_2) = \text{sen}(\theta/2 + \varphi_2) = \text{sen}(\theta/2) \cdot \cos \varphi_2 + \cos(\theta/2) \cdot \text{sen} \varphi_2 \\ \rightarrow \text{sen}(\theta/2) \cdot [\text{sen}(\theta/2) \cdot \cos \varphi_2 + \cos(\theta/2) \cdot \text{sen} \varphi_2] &= \text{sen}^2(\theta/2) \cdot \cos \varphi_2 + \text{sen}(\theta/2) \cdot \cos(\theta/2) \cdot \text{sen} \varphi_2 = (1/2 - 1/2 \cos \theta) \cdot \cos \varphi_2 + 1/2 \text{sen} \theta \cdot \text{sen} \varphi_2 = \\ &= 1/2 [(1 - \cos \theta) \cdot \cos \varphi_2 + \text{sen} \theta \cdot \text{sen} \varphi_2] \end{aligned}$$

$$Z_2 = \sqrt{\left( \frac{R_2}{s} \right)^2 + (X_2)^2}$$

$$\left. \begin{aligned} \cos \varphi_2 &= \frac{R_2/s}{Z_2} \\ \text{sen} \varphi_2 &= \frac{X_2}{Z_2} \end{aligned} \right\} \left. \begin{aligned} I_{2a1} &= \frac{E_2}{Z_2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \left[ (1 - \cos \theta) \cdot \frac{R_2/s}{Z_2} - \text{sen} \theta \cdot \frac{X_2}{Z_2} \right] \\ I_{2a2} &= \frac{E_2}{Z_2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \left[ (1 - \cos \theta) \cdot \frac{R_2/s}{Z_2} + \text{sen} \theta \cdot \frac{X_2}{Z_2} \right] \end{aligned} \right\} \begin{matrix} \times \frac{s}{R_2} \\ \times \frac{R_2}{s} \end{matrix} \Rightarrow \left\{ \begin{aligned} I_{2a1} &= \frac{s \cdot E_2 \cdot R_2}{R_2^2 + s^2 \cdot X_2^2} \cdot \left( \frac{1 - \cos \theta - \frac{s \cdot X_2}{R_2} \cdot \text{sen} \theta}{2} \right) \\ I_{2a2} &= \frac{s \cdot E_2 \cdot R_2}{R_2^2 + s^2 \cdot X_2^2} \cdot \left( \frac{1 - \cos \theta + \frac{s \cdot X_2}{R_2} \cdot \text{sen} \theta}{2} \right) \end{aligned} \right.$$

## PEA – 5728 - Parte 4: EIXO ELÉTRICO

### ANÁLISE DO FUNCIONAMENTO DO EIXO ELÉTRICO COMO MÁQUINAS AUXILIARES

#### TORQUES DESENVOLVIDOS PELO PAR DE MÁQUINAS DO EIXO ELÉTRICO :

$$C = \frac{P_{tr}}{\omega_s} = \frac{3 \cdot E_2 \cdot I_{2a}}{\omega_s} \left\{ \begin{array}{l} P_{tr} : \text{ POTÊNCIA ATIVA POR FASE TRANSFERIDA AO ROTOR DA MÁQUINA} \\ \text{ASSÍNCRONA PELO CAMPO ROTATIVO DO ENTREFERRO} \\ \\ P_{tr} = E_2 \cdot I_{2a} \text{ [W/fase]} \rightarrow \text{ DIFERENTE PARA CADA MÁQUINA EM FUNÇÃO} \\ \text{DA SUA COMPONENTE DE CORRENTE ATIVA NO ROTOR} \end{array} \right.$$

$$\begin{array}{l} \text{MA1 : } \rightarrow C_1 = \frac{3 \cdot s \cdot E_2^2 \cdot R_2}{\omega_s \cdot (R_2^2 + s^2 \cdot X_2^2)} \cdot \left( \frac{1 - \cos\theta - \frac{s \cdot X_2}{R_2} \cdot \text{sen}\theta}{2} \right) \Rightarrow C_1 = C(s) \cdot \left( \frac{1 - \cos\theta - \frac{s \cdot X_2}{R_2} \cdot \text{sen}\theta}{2} \right) \\ \\ \text{MA2 : } \rightarrow C_2 = \frac{3 \cdot s \cdot E_2^2 \cdot R_2}{\omega_s \cdot (R_2^2 + s^2 \cdot X_2^2)} \cdot \left( \frac{1 - \cos\theta + \frac{s \cdot X_2}{R_2} \cdot \text{sen}\theta}{2} \right) \Rightarrow C_2 = C(s) \cdot \left( \frac{1 - \cos\theta + \frac{s \cdot X_2}{R_2} \cdot \text{sen}\theta}{2} \right) \end{array}$$

**C(s) : TORQUE USUAL DESENVOLVIDO PELO MOTOR DE INDUÇÃO PARA CADA ESCORREGAMENTO, QUANDO OPERANDO DE FORMA ISOLADA**

AÇÃO SINCRONIZADORA DO EIXO ELÉTRICO  $\rightarrow$  TORQUE DE SINCRONIZAÇÃO :  $C_s = C_2 - C_1$

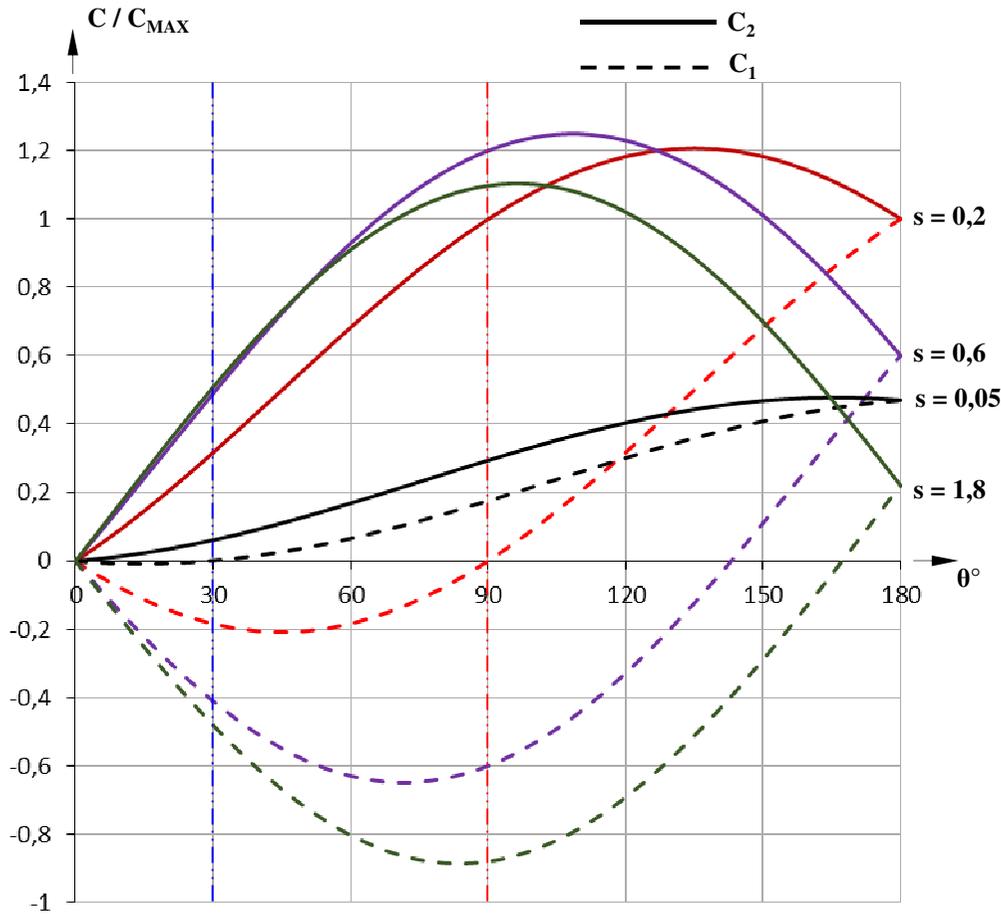
$$C_s = C(s) \cdot \frac{s \cdot X_2}{R_2} \cdot \text{sen}\theta$$

AÇÃO SINCRONIZADORA TANTO MAIS INTENSA QUANTO MAIOR O ESCORREGAMENTO  $\rightarrow$  USUALMENTE :  $1 < s < 2$  (REGIÃO DE FREIO)

# PEA – 5728 - Parte 4: EIXO ELÉTRICO

## CARACTERÍSTICAS EXTERNAS DO EIXO ELÉTRICO :

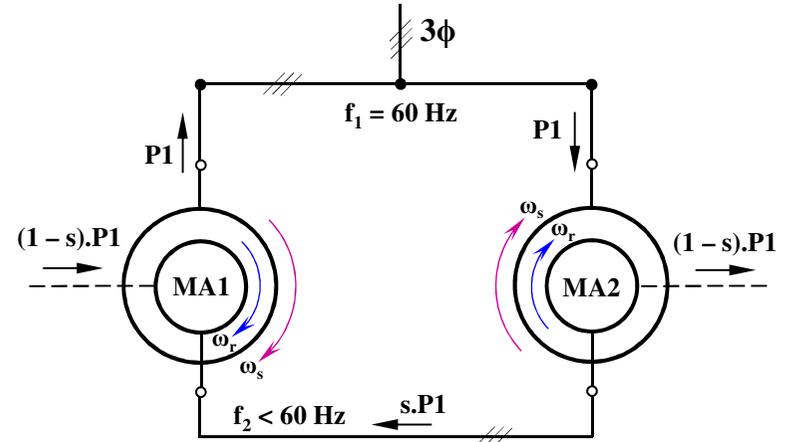
### OPERANDO COMO MÁQUINAS AUXILIARES



$s = s_{CRÍTICO} \rightarrow C(s) = C_{MAX} (C_{MAX} \approx 2,0 \text{ p.u.})$

## FLUXO DE POTÊNCIAS PARA MÁQUINAS

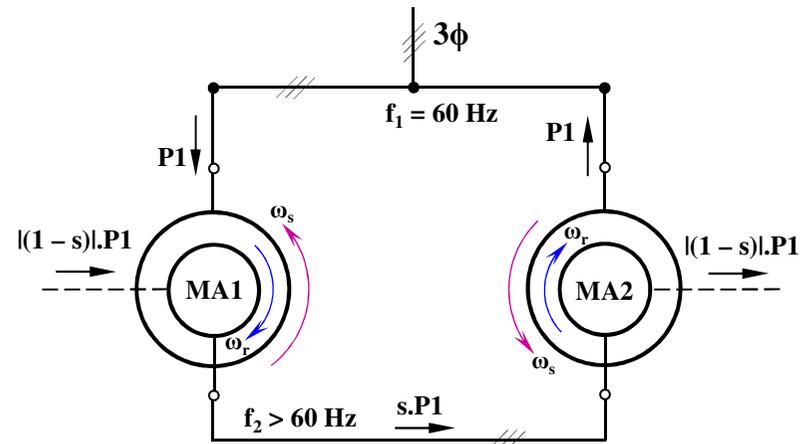
### IDEAIS SEM PERDAS



OPERAÇÃO COM :  $0 < s < 1$

MA1: GERADOR SUB SÍNCRONO

MA2: MOTOR SUB SÍNCRONO



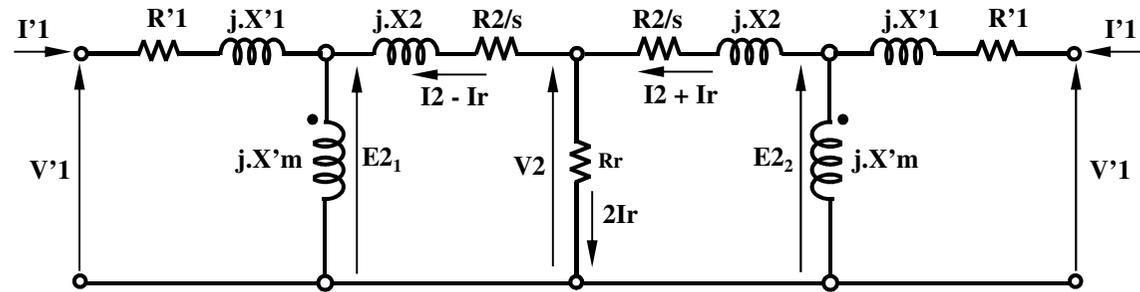
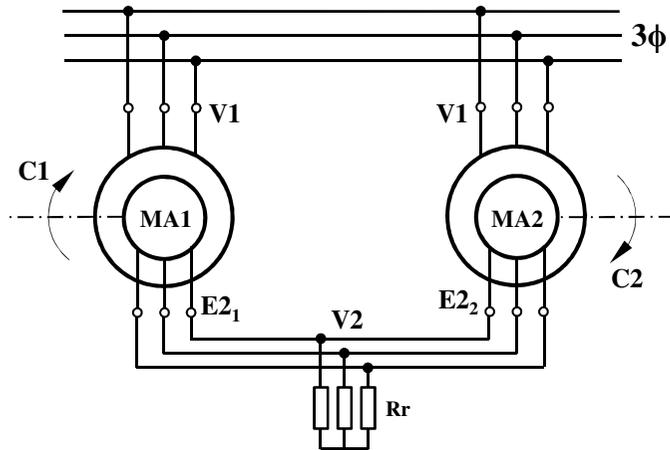
OPERAÇÃO COM :  $s > 1$

MA1: CONVERSOR DE FREQUÊNCIA

MA2: MOTOR SUB OU SUPER SÍNCRONO

# PEA – 5728 - Parte 4: EIXO ELÉTRICO

## ANÁLISE DO FUNCIONAMENTO DO EIXO ELÉTRICO COMO MÁQUINAS PRINCIPAIS



$I_2$  : CORRENTE DE SINCRONIZAÇÃO

$I_r$  : CORRENTE DE CARGA NO REOSTATO

TORQUES PRODUZIDOS POR CADA MÁQUINA:

TORQUE DE CARGA + TORQUE DE SINCRONIZAÇÃO

PROCEDIMENTO ANALÍTICO  
SIMILAR AO ANTERIOR RESULTA EM:

$$\alpha(s) = \left( \frac{\frac{s \cdot X_2}{R_2} + \frac{R_2}{s \cdot X_2}}{\frac{s \cdot X_2}{(R_2 + 2 \cdot R_r)} + \frac{(R_2 + 2 \cdot R_r)}{s \cdot X_2}} \right)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} C_1 = C(s) \cdot \left[ \left( \frac{1 - \cos\theta - \frac{s \cdot X_2}{R_2} \cdot \text{sen}\theta}{2} \right) + \alpha(s) \cdot \left( \frac{1 + \cos\theta + \frac{s \cdot X_2}{(R_2 + 2 \cdot R_r)} \cdot \text{sen}\theta}{2} \right) \right] \\ C_2 = C(s) \cdot \left[ \left( \frac{1 - \cos\theta + \frac{s \cdot X_2}{R_2} \cdot \text{sen}\theta}{2} \right) + \alpha(s) \cdot \left( \frac{1 + \cos\theta - \frac{s \cdot X_2}{(R_2 + 2 \cdot R_r)} \cdot \text{sen}\theta}{2} \right) \right] \end{array} \right.$$

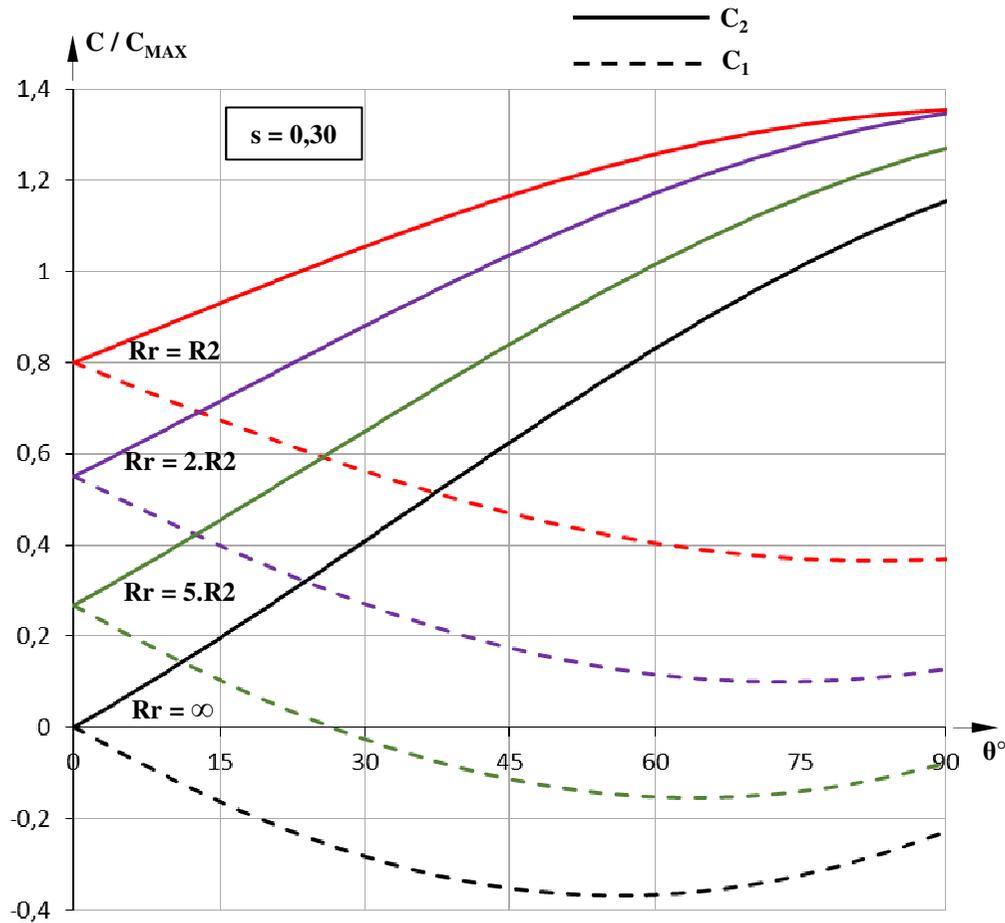
**TORQUE DE SINCRONIZAÇÃO:  $C_s = C_2 - C_1 \rightarrow C_s = C(s) \cdot \left( \frac{s \cdot X_2}{R_2} - \frac{s \cdot X_2}{(R_2 + 2 \cdot R_r)} \right) \cdot \text{sen}\theta$**

PARA GARANTIR TORQUE DE SINCRONIZAÇÃO ADEQUADO  $\rightarrow$  ESCORREGAMENTO MÍNIMO: 0,25 a 0,30

# PEA – 5728 - Parte 4: EIXO ELÉTRICO

## CARACTERÍSTICAS EXTERNAS DO EIXO ELÉTRICO :

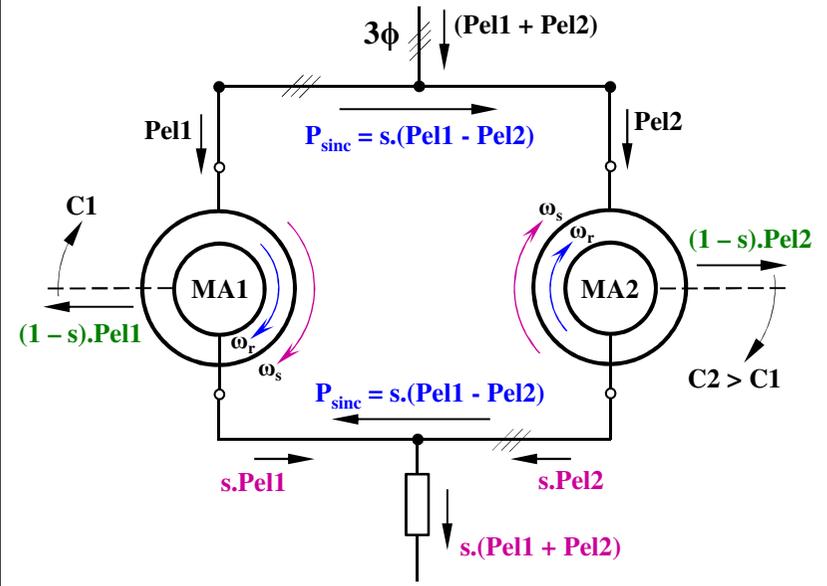
### OPERANDO COMO MÁQUINAS PRINCIPAIS



$s = s_{CRÍTICO} \rightarrow C(s) = C_{MAX} (C_{MAX} \approx 2,0 \text{ p.u.})$

## FLUXO DE POTÊNCIAS PARA MÁQUINAS

### IDEAIS SEM PERDAS



OPERAÇÃO COM :  $0 < s < 1$

MA1: MOTOR SUB SÍNCRONO - MA2: MOTOR SUB SÍNCRONO

→ ESCORREGAMENTO PERMANENTE PARA GARANTIR  $P_{sinc}$

$0,25 < s < 0,30$

→ SISTEMA INERENTEMENTE DISSIPATIVO (BAIXO  $\eta$ )