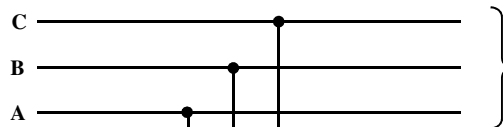
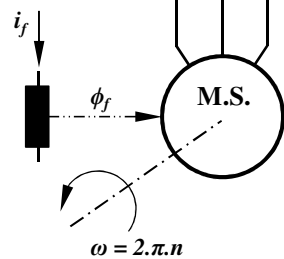
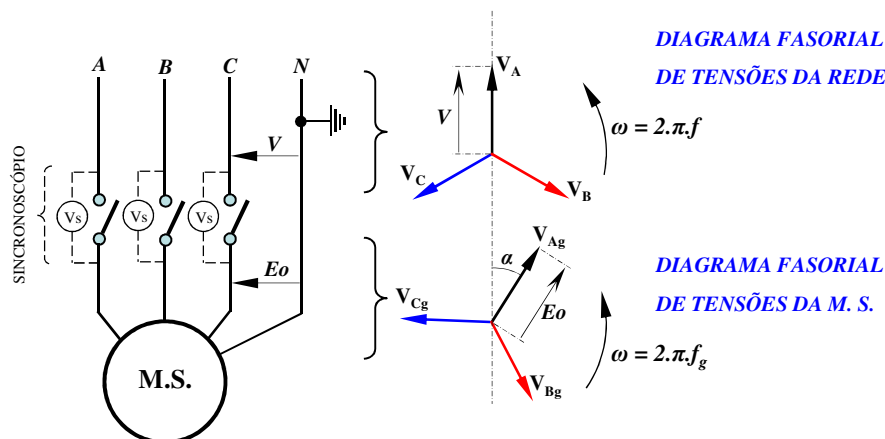


MÁQUINA SÍNCRONA OPERANDO NO SISTEMA ELÉTRICO

SINCRONIZAÇÃO E PARALELISMO DA MÁQUINA SÍNCRONA COM A REDE

BARRAMENTO INFINITO :TENSÕES TRIFÁSICAS EXISTENTES : $V_A ; V_B ; V_C$ FREQUÊNCIA EXISTENTE : f (60 Hz)

→ TENSÃO E FREQUÊNCIA SÃO CONSTANTES QUALQUER QUE SEJA A POTÊNCIA, ATIVA OU REATIVA, INJETADA OU DRENADA DA REDE NO PONTO DE CONEXÃO → BARRAMENTO ∞

MÁQUINA SÍNCRONA :TENSÕES TRIFÁSICAS GERADAS : $V_{Ag} ; V_{Bg} ; V_{Cg}$ FREQUÊNCIA GERADA : $f_g = p.n$ → EM VAZIO : TENSÃO GERADA $E_o = f (i_f)$ CONDIÇÕES PARA O SINCRONISMO:EXCITAÇÃO DA M.S. AJUSTADA ATÉ QUE: $E_o = V \rightarrow i_f = i_{f_0}$ ROTAÇÃO DA M.S. AJUSTADA ATÉ QUE: $f_g = f$

SEQUÊNCIA DE FASES DA M.S. = SEQUÊNCIA DE FASES DA REDE

DIFERENÇA DE FASES ENTRE TENSÕES DA M.S. E REDE: $\alpha \approx 0$ → $\alpha = 0 \rightarrow V_s = 0 \rightarrow$ SISTEMAS TRIFÁSICOS SUPERPOSTOS

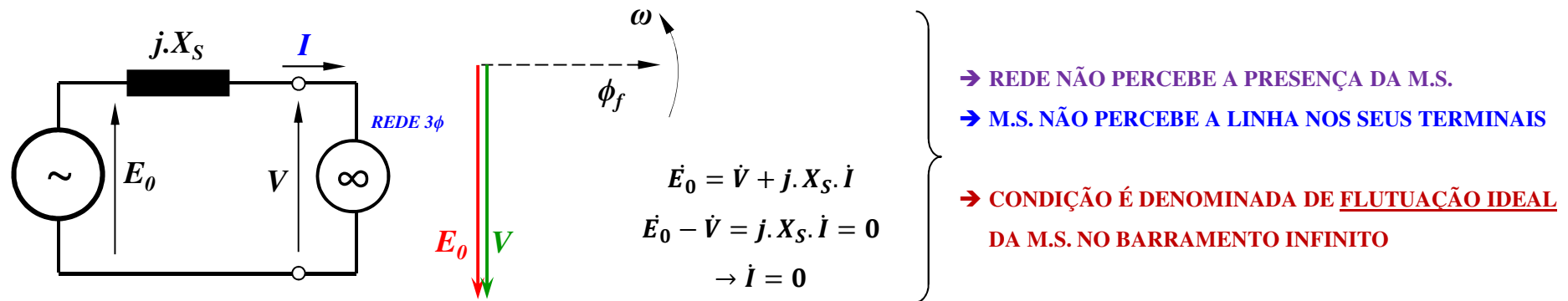
→ SITUAÇÃO QUE PERMITE A CONEXÃO DA M.S. AO BARRAMENTO

→ CONDIÇÃO MEDIDA PELO “SINCRONOSCÓPIO”

FLUTUAÇÃO DA MÁQUINA SÍNCRONA NO BARRAMENTO

GARANTIDA A SUPERPOSIÇÃO DOS DIAGRAMAS FASORIAIS DA M.S. E DA REDE :

→ M.S. CONECTA-SE AO BARRAMENTO SEM NENHUMA PERTURBAÇÃO → CORRENTE RESULTA NULA ENTRE A MÁQUINA E A REDE



MÁQUINA SÍNCRONA RECÉM CONECTADA AO BARRAMENTO:

→ REGULADOR DE VELOCIDADE DA TURBINA AJUSTADO PARA POTÊNCIA NULA

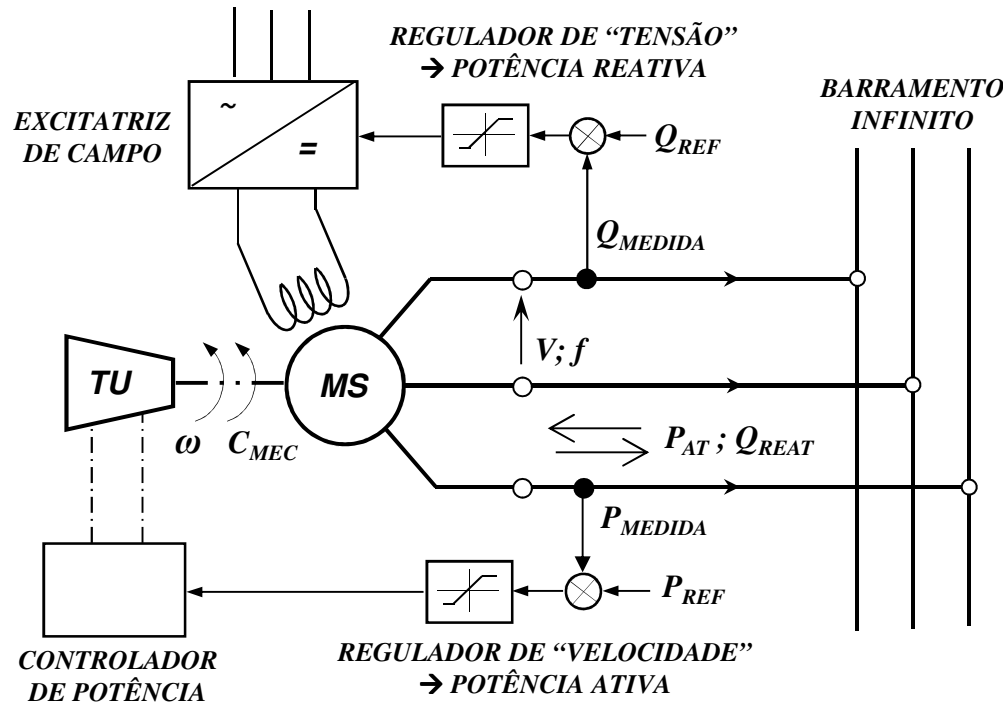
(TURBINA SUPRE APENAS AS PERDAS DA M.S. EM VAZIO – $W_{\text{ferro} + \text{atritos}}$)

→ SUPERPOSIÇÃO ABSOLUTA DAS TENSÕES DA M.S. E REDE NÃO OCORRE NA PRÁTICA

→ SINCRONISMO PERFEITO OBTIDO A PARTIR DA TURBINA NÃO É POSSÍVEL

→ A PRÓPRIA MÁQUINA SÍNCRONA VAI EXERCER AÇÃO SINCRONIZADORA

CARACTERIZAÇÃO DA OPERAÇÃO DA MÁQUINA SÍNCRONA CONECTADA AO SISTEMA



TENSÃO : Definida pelo barramento

FREQÜÊNCIA : Definida pelo barramento

POTÊNCIA ATIVA : Fornecida (GERADOR) ou absorvida (MOTOR) pela máquina, controlada pelo interação no eixo

POTÊNCIA REATIVA : Fornecida (CAPACITOR) ou absorvida (INDUTOR) pela máquina, controlada pela excitação

CORRENTE, POTÊNCIAS ATIVA E REATIVA : Monitoradas pelo sistema de proteção da máquina síncrona

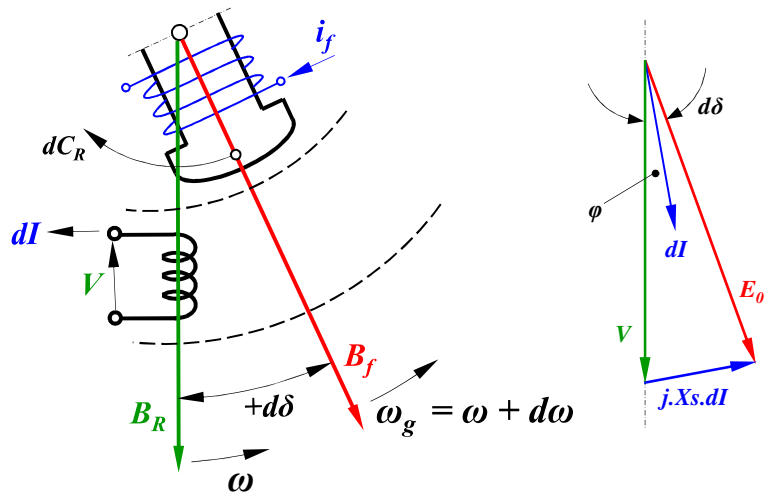
→ **AUMENTO DA POTÊNCIA ATIVA:** Até o limite eletromagnético da máquina – acima disso, a máquina perde o sincronismo com a rede → dispara no modo gerador, impulsionada pela turbina, ou estaciona no modo motor, restrita pela carga mecânica no eixo

→ **AUMENTO DA CARGA REATIVA:** Até o limite de excitação da máquina ou da excitatriz

→ **PERDA DE SINCRONISMO CARACTERIZA O LIMITE DE ESTABILIDADE DA OPERAÇÃO NA REDE**

→ **MODO DE OPERAÇÃO DA MÁQUINA NOS MODOS GERADOR, MOTOR E COMPENSADOR SÍNCRONO**

AÇÃO SINCRONIZADORA PRÓPRIA DA M.S. NO BARRAMENTO – MOVIMENTO PENDULAR



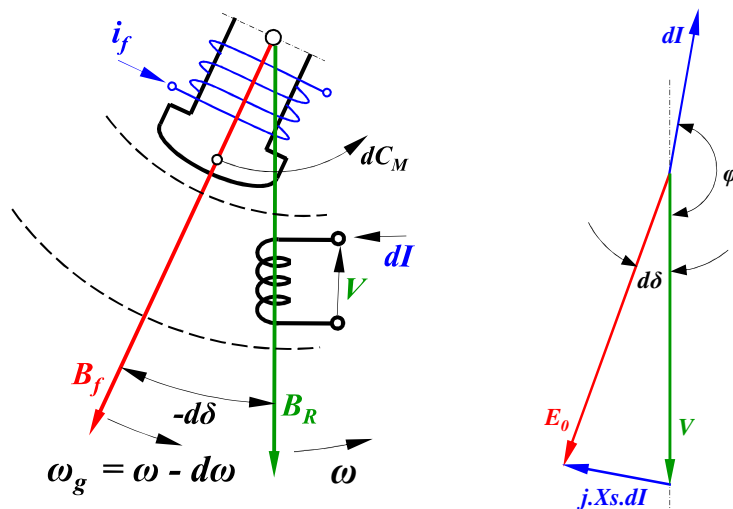
→ ROTOR **ACELERADO** TRANSITORIAMENTE: $\omega_g = \omega + d\omega$

→ INDUTOR **AVANÇA** EM RELAÇÃO AO CAMPO GIRANTE RESULTANTE

→ M.S. OPERA NO MODO GERADOR → $dP_{el} = V.dI.\cos\varphi > 0$

→ MANIFESTA **CONJUGADO RESISTENTE** NO EIXO EM OPOSIÇÃO À ACELERAÇÃO DO ROTOR → $dP_{mec} = (V.E_o/X_s).\text{sen}(+d\delta) \rightarrow dC_R$

→ M.S. REAGE NO SENTIDO DE RESTAURAR A CONDIÇÃO DE ALINHAMENTO DOS CAMPOS B_f e B_R e portanto $dP_{at} = 0$



→ ROTOR **DESACELERADO** TRANSITORIAMENTE: $\omega_g = \omega - d\omega$

→ INDUTOR **ATRASADO** EM RELAÇÃO AO CAMPO GIRANTE RESULTANTE

→ M.S. OPERA NO MODO MOTOR → $dP_{el} = V.dI.\cos\varphi < 0$

→ MANIFESTA **CONJUGADO MOTRIZ** NO EIXO EM OPOSIÇÃO À DESACELERAÇÃO DO ROTOR → $dP_{mec} = (V.E_o/X_s).\text{sen}(-d\delta) \rightarrow dC_R$

→ M.S. REAGE NO SENTIDO DE RESTAURAR A CONDIÇÃO DE ALINHAMENTO DOS CAMPOS B_f e B_R e portanto $dP_{at} = 0$

AÇÃO SINCRONIZADORA SE MANIFESTA NA PRÓPRIA M.S. O QUE GARANTE O PARALELISMO COM O BARRAMENTO
 ROTOR OSCILA EM TORNO DE UMA POSIÇÃO DE EQUILÍBRIO ESTÁVEL EM ROTAÇÃO SÍNCRONA

ÂNGULO DE CARGA (δ) OSCILA EM TORNO DE VALOR MÉDIO NULO

MOVIMENTO OSCILATÓRIO → MOVIMENTO PENDULAR DA M.S. → FLUTUAÇÃO REAL EM VAZIO

INTERAÇÕES DA MÁQUINA SÍNCRONA COM O BARRAMENTO INFINITO

A PARTIR DA CONDIÇÃO DE FLUTUAÇÃO NA REDE, 2 AÇÕES SÃO POSSÍVEIS :

INTERVENÇÃO NA CORRENTE DE EXCITAÇÃO (VIA SISTEMA DE EXCITAÇÃO OU REGULADOR DE TENSÃO)

INTERVENÇÃO NO CONJUGADO APLICADO AO EIXO (VIA TURBINA OU CARGA MECÂNICA)

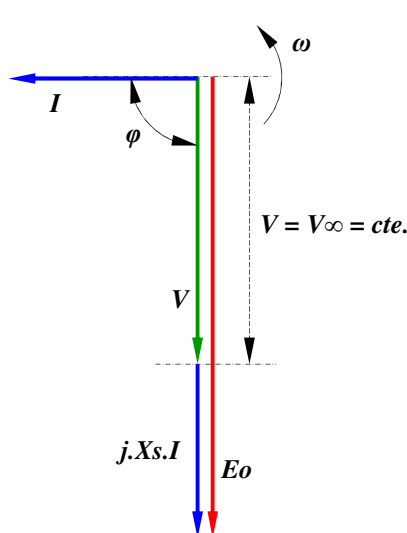
→ MODIFICAÇÃO DE E_o EM RELAÇÃO A V , EM MÓDULO OU FASE OU AMBOS

→ RESULTA CORRENTE CIRCULANTE ENTRE A M.S. E O BARRAMENTO ($I \neq 0$)

→ M.S. E REDE PASSAM A PERCEBER A PRESENÇA UM DO OUTRO → OCORRE TROCA DE POTÊNCIAS

1- INFLUÊNCIA DA CORRENTE DE EXCITAÇÃO - TROCA DE POTÊNCIAS REATIVAS COM O BARRAMENTO

$E_o = V + j.X_s.I \rightarrow$ CONVENÇÃO “FONTE” ADOTADA NO MODELO DE CIRCUITO EQUIVALENTE



AUMENTO NA CORRENTE DE EXCITAÇÃO : $i_f > i_{f0} \rightarrow$ M.S. SUPEREXCITADA $\rightarrow E_o > V$

CORRENTE EMITIDA RESULTA ATRASADA DE 90° DA TENSÃO ($\varphi = -90^\circ$)

$\cos\varphi = 0$; $\delta = 0$ ($C_{mec} = 0 \rightarrow$ NÃO EXISTE ENVOLVIMENTO DE POTÊNCIA ATIVA E P_{mec})

M.S. FORNECE CORRENTE INDUTIVA PARA O BARRAMENTO

M.S. FORNECE POTÊNCIA REATIVA PARA A REDE

$E_o > V \rightarrow$ CORRENTE DEVE SER DESMAGNETIZANTE (M.S. COM CORRENTE INDUTIVA)

$I_{EMITIDA}$ EM ATRASO $\leftrightarrow I_{ABSORVIDA}$ EM AVANÇO

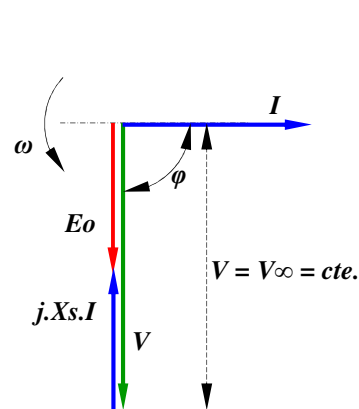
BARRAMENTO PERCEBE A MÁQUINA COMO CAPACITIVA $\rightarrow$ M.S. PERCEBE A REDE COMO INDUTIVA

$\rightarrow$ MODO DE OPERAÇÃO : CAPACITOR SÍNCRONO

INTERAÇÕES DA MÁQUINA SÍNCRONA COM O BARRAMENTO INFINITO

2 - INFLUÊNCIA DA CORRENTE DE EXCITAÇÃO - TROCA DE POTÊNCIAS REATIVAS COM O BARRAMENTO

$$E_o = V + j.X_s.I \rightarrow \text{CONVENÇÃO "FONTE" ADOPTADA NO MODELO DE CIRCUITO EQUIVALENTE}$$



REDUÇÃO NA CORRENTE DE EXCITAÇÃO : $i_f < i_{f0} \rightarrow$ M.S. SUBEXCITADA $\rightarrow E_o < V$

CORRENTE EMITIDA RESULTA AVANÇADA DE 90° DA TENSÃO ($\varphi = +90^\circ$)

$\cos\varphi = 0$; $\delta = 0$ ($C_{mec} = 0 \rightarrow$ NÃO EXISTE ENVOLVIMENTO DE POTÊNCIA ATIVA E P_{mec})

M.S. FORNECE CORRENTE CAPACITIVA PARA O BARRAMENTO

M.S. ABSORVE POTÊNCIA REATIVA DA REDE

$E_o < V \rightarrow$ CORRENTE DEVE SER MAGNETIZANTE (M.S. COM CORRENTE CAPACITIVA)

$I_{EMITIDA}$ EM AVANÇO $\leftrightarrow I_{ABSORVIDA}$ EM ATRASO

BARRAMENTO PERCEBE A MÁQUINA COMO INDUTIVA $\rightarrow$ M.S. PERCEBE A REDE CAPACITIVA

$\rightarrow$ MODO DE OPERAÇÃO : INDUTOR SÍNCRONO

VARIAÇÃO DA CORRENTE DE EXCITAÇÃO $\rightarrow$ PRODUZ EXCLUSIVAMENTE TROCA DE REATIVOS COM A REDE

SUPEREXCITAÇÃO : M.S. FORNECE REATIVOS $\rightarrow$ M.S. OPERA COMO CAPACITOR

SUBEXCITAÇÃO : M.S. ABSORVE REATIVOS $\rightarrow$ M.S. OPERA COMO INDUTOR

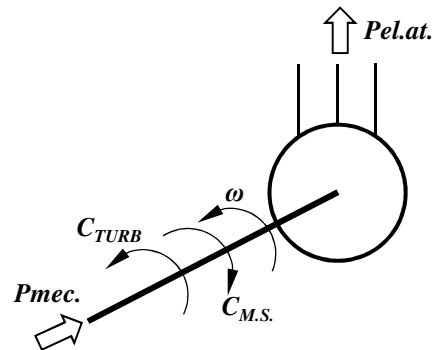
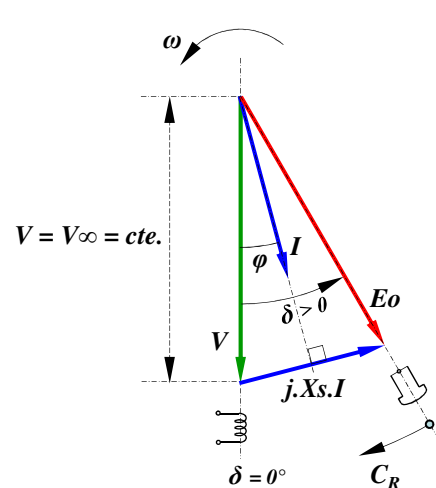
TROCA EXCLUSIVA DE POTÊNCIA REATIVA COM A REDE $\rightarrow$ M.S. OPERA COMO COMPENSADOR SÍNCRONO

NO MODO COMPENSADOR, NÃO EXISTE MANIFESTAÇÃO DE POTÊNCIA ATIVA NEM DE CONJUGADO NO EIXO

INTERAÇÕES DA MÁQUINA SÍNCRONA COM O BARRAMENTO INFINITO

3 - INFLUÊNCIA DO CONJUGADO NO EIXO - TROCA DE POTÊNCIAS ATIVAS COM O BARRAMENTO

$$E_o = V + j.X_s.I \rightarrow \text{CONVENÇÃO "FONTE" ADOPTADA NO MODELO DE CIRCUITO EQUIVALENTE}$$



CONJUGADO POSITIVO APLICADO AO EIXO: (TURBINA INJETA POTÊNCIA MECÂNICA NO EIXO)

ROTOR IMPULSIONADO À FRENTE DO CAMPO RESULTANTE $\rightarrow E_o$ ADIANTADO DE V

CORRENTE EMITIDA RESULTA COM COMPONENTE ATIVA POSITIVA ($0 < \varphi < 90^\circ$) $\rightarrow \cos \varphi > 0$

POTÊNCIA ELÉTRICA ATIVA : $P_{at} = V.I.\cos \varphi > 0 \rightarrow$ EMITIDA PARA A REDE (CONVENÇÃO FONTE)

M.S. FORNECE POTÊNCIA ELÉTRICA ATIVA PARA O BARRAMENTO

POTÊNCIA MECÂNICA NO EIXO (DESPREZADAS AS PERDAS) : $P_{mec} = (V.E_o/X_s).\sin \delta > 0$

M.S. : CONVERSOR ELETROMECHANICO $\rightarrow$ CONVENÇÃO FONTE DO LADO ELÉTRICO $\rightarrow$ RECEPTOR

DO LADO MECÂNICO $\rightarrow$ POTÊNCIA MECÂNICA POSITIVA : ENTRA PELO EIXO DA M.S.

$\rightarrow$ CONJUGADO NO EIXO É RESISTENTE

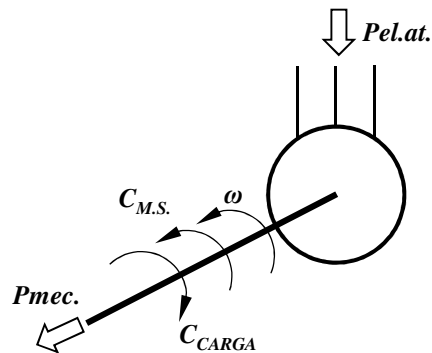
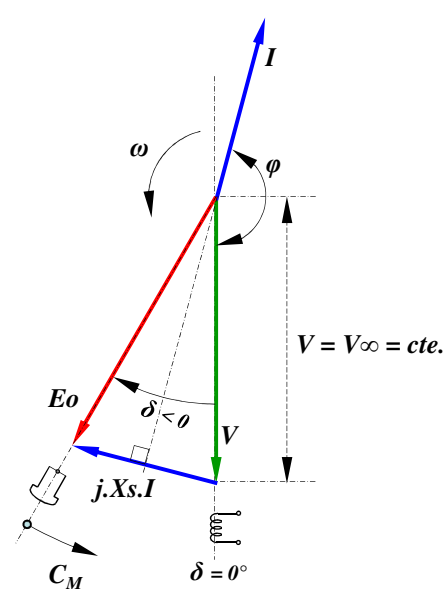
C_R EQUILIBRA O TORQUE APLICADO PELA TURBINA ($C_{M.S.}$ RESISTE AO C_{TURB})

$\rightarrow$ MODO DE OPERAÇÃO : GERADOR SÍNCRONO

INTERAÇÕES DA MÁQUINA SÍNCRONA COM O BARRAMENTO INFINITO

4 - INFLUÊNCIA DO CONJUGADO NO EIXO - TROCA DE POTÊNCIAS ATIVAS COM O BARRAMENTO

$$E_o = V + j.X_s.I \rightarrow \text{CONVENÇÃO "FONTE" ADOPTADA NO MODELO DE CIRCUITO EQUIVALENTE}$$



CONJUGADO NEGATIVO APLICADO AO EIXO: (CARGA EXTRAI POTÊNCIA MECÂNICA DO EIXO)

ROTOR RETARDADO ATRÁS DO CAMPO RESULTANTE $\rightarrow E_o$ ATRASADO DE V

CORRENTE EMITIDA RESULTA COM COMPONENTE ATIVA NEGATIVA ($90^\circ < \varphi < 180^\circ$) $\rightarrow \cos\varphi < 0$

POTÊNCIA ELÉTRICA ATIVA : $P_{at} = V.I.\cos\varphi < 0 \rightarrow$ ABSORVIDA DA REDE (CONVENÇÃO FONTE)

M.S. FORNECE ABSORVE ELÉTRICA ATIVA DO BARRAMENTO

POTÊNCIA MECÂNICA NO EIXO (DESPREZADAS AS PERDAS) : $P_{mec} = (V.E_o/X_s).\sin\delta < 0$

M.S. : CONVERSOR ELETROMECHANICO $\rightarrow$ CONVENÇÃO FONTE DO LADO ELÉTRICO $\rightarrow$ RECEPTOR DO

LADO MECÂNICO $\rightarrow$ POTÊNCIA MECÂNICA NEGATIVA : SAI PELO EIXO DA M.S.

$\rightarrow$ CONJUGADO NO EIXO É MOTRIZ

C_M EQUILIBRA O TORQUE EXIGIDO PELA CARGA ($C_{M.S.}$ SUPRE O C_{CARGA})

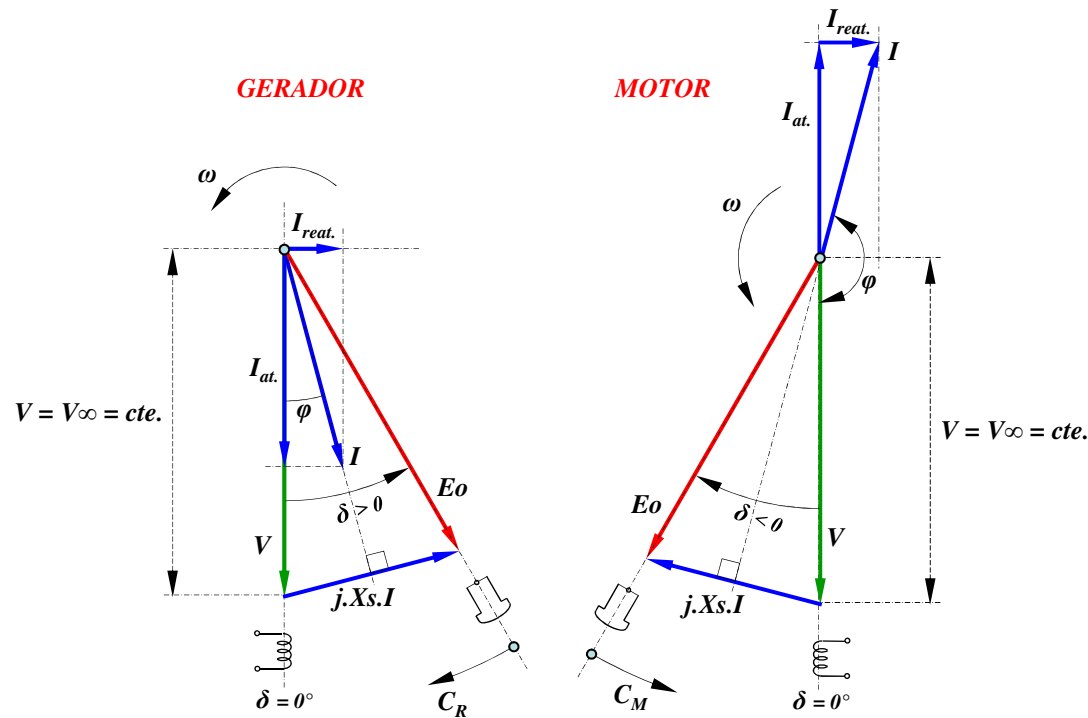
$\rightarrow$ MODO DE OPERAÇÃO : MOTOR SÍNCRONO

INFLUÊNCIA DO TORQUE NO EIXO $\rightarrow$ PRODUZ TROCA DE POT. ATIVA COM A REDE

TORQUE IMPULSIONANTE : M.S. FORNECE POT. ATIVA $\rightarrow$ M.S. OPERA COMO GERADOR

TORQUE FRENANTE : M.S. ABSORVE POT. ATIVA $\rightarrow$ M.S. OPERA COMO MOTOR

TROCA SIMULTÂNEA DE POTÊNCIAS ATIVAS E REATIVAS COM O BARRAMENTO INFINITO



NOS MODOS MOTOR OU GERADOR:

POTÊNCIA REATIVA RESULTA DO ESTADO DE EXCITAÇÃO MANTIDO PELO CAMPO

COMPONENTE ATIVA DA CORRENTE: $I_{at} = I \cos \varphi$

→ COMPONENTE NA DIREÇÃO DE V

MESMO SENTIDO DE V → GERADOR

SENTIDO OPOSTO A V → MOTOR

COMPONENTE REATIVA DA CORRENTE: $I_{reat} = I \sin \varphi$

→ COMPONENTE PERPENDICULAR A V

ADIANTEADA DE V → INDUTOR

ATRASADA DE V → CAPACITOR

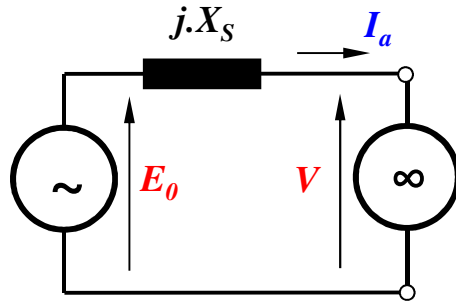
PARA O CASO DE: $|E_0| = |V| \rightarrow i_f = i_{f0}$

POTÊNCIA ATIVA: $Pat = V.I \cos \varphi$ [W/fase] $> 0 \rightarrow$ GERADOR SÍNCRONO $\rightarrow$ FORNECE POTÊNCIA ATIVA PARA A REDE

POTÊNCIA REATIVA: $Pat = V.I \sin \varphi$ [VAR/fase] ADIANTEADA $\Rightarrow$ INDUTOR SÍNCRONO $\rightarrow$ ABSORVE POTÊNCIA REATIVA DA REDE

→ TROCA SIMULTÂNEA DE POTÊNCIA ATIVA E REATIVA COM O BARRAMENTO INFINITO

INTERAÇÃO DA MÁQUINA SÍNCRONA COM A REDE : CARACTERIZAÇÃO DAS POTÊNCIAS ATIVA E REATIVA TROCADAS COM O BARRAMENTO



Modelo por fase da máquina

$$\dot{E}_0 = \dot{V} + jX_s \cdot \dot{I}_a$$

 φ : Ângulo de fase da corrente

 δ : Ângulo de potência da máquina

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{at} = 3.V.I_a.\cos\varphi \\ Q_{reat} = 3.V.I_a.\sin\varphi \\ P_{at} = 3.\frac{V.E_0}{X_s}.\sin\delta \end{array} \right.$$

Potências emitidas pela máquina síncrona

DEFINIÇÃO DE 4 QUADRANTES OPERACIONAIS DA MÁQUINA SÍNCRONA

POTÊNCIA ATIVA: $P_{at} = \frac{V.E_0}{X_s}.\sin\delta$

SEGMENTO: $\overline{QL} = E_0.\sin\delta \rightarrow \overline{QL} = \left(\frac{X_s}{V}\right).P_{at} = k.P_{at}$

POTÊNCIA REATIVA: $Q_{reat} = V.I_a.\sin\varphi$

SEGMENTO: $\overline{PL} = X_s.I_a.\sin\varphi \rightarrow \overline{PL} = \left(\frac{X_s}{V}\right).Q_{reat} = k.Q_{reat}$

$\delta = 0 \rightarrow P_{at} = 0 \rightarrow$ **EIXO $x-x$** $\rightarrow$ **EIXO DE POTÊNCIA REATIVA**

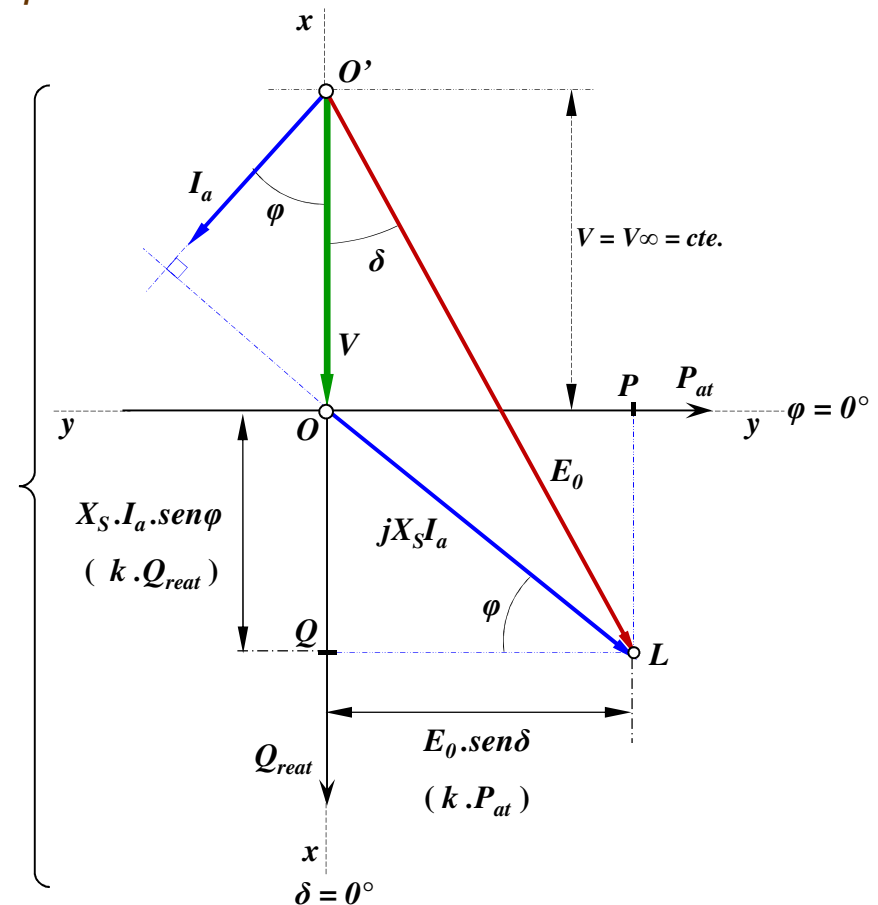
$\delta > 0 \rightarrow P_{at} > 0 \rightarrow$ **GERADOR** $\rightarrow$ **À DIREITA DO EIXO $x-x$**

$\delta < 0 \rightarrow P_{at} < 0 \rightarrow$ **MOTOR** $\rightarrow$ **À ESQUERDA DO EIXO $x-x$**

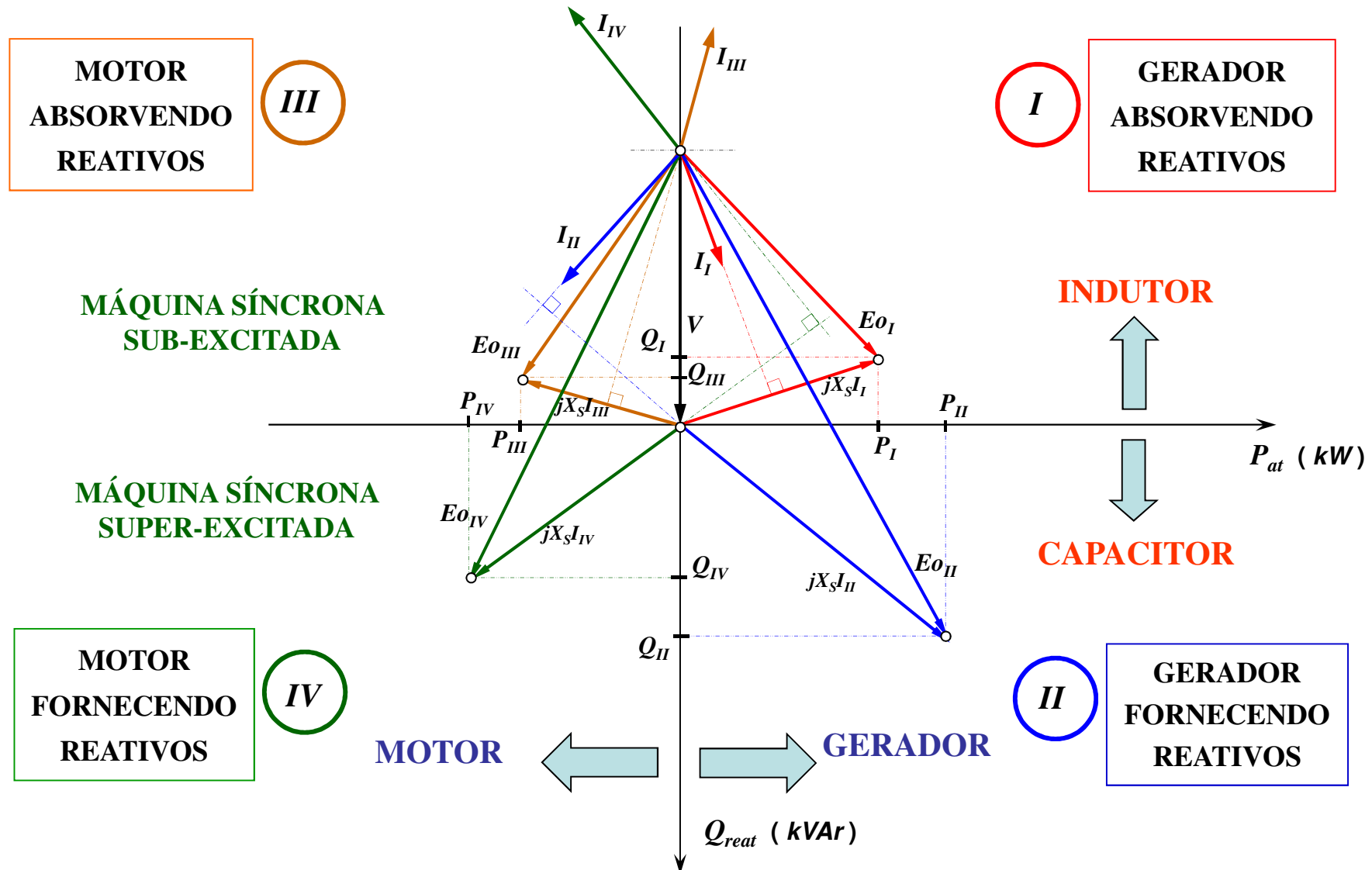
$\varphi = 0 \rightarrow Q_{reat} = 0 \rightarrow$ **EIXO $y-y$** $\rightarrow$ **EIXO DE POTÊNCIA ATIVA**

$\varphi > 0 \rightarrow Q_{reat}$ ABSORVIDA $\rightarrow$ **INDUTOR** $\rightarrow$ **ACIMA DO EIXO $y-y$**

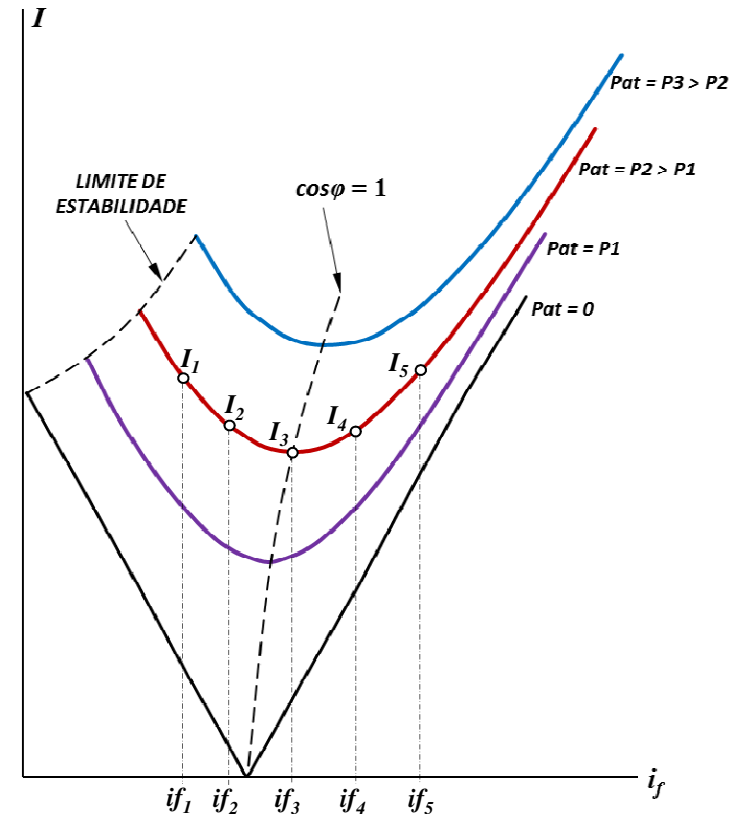
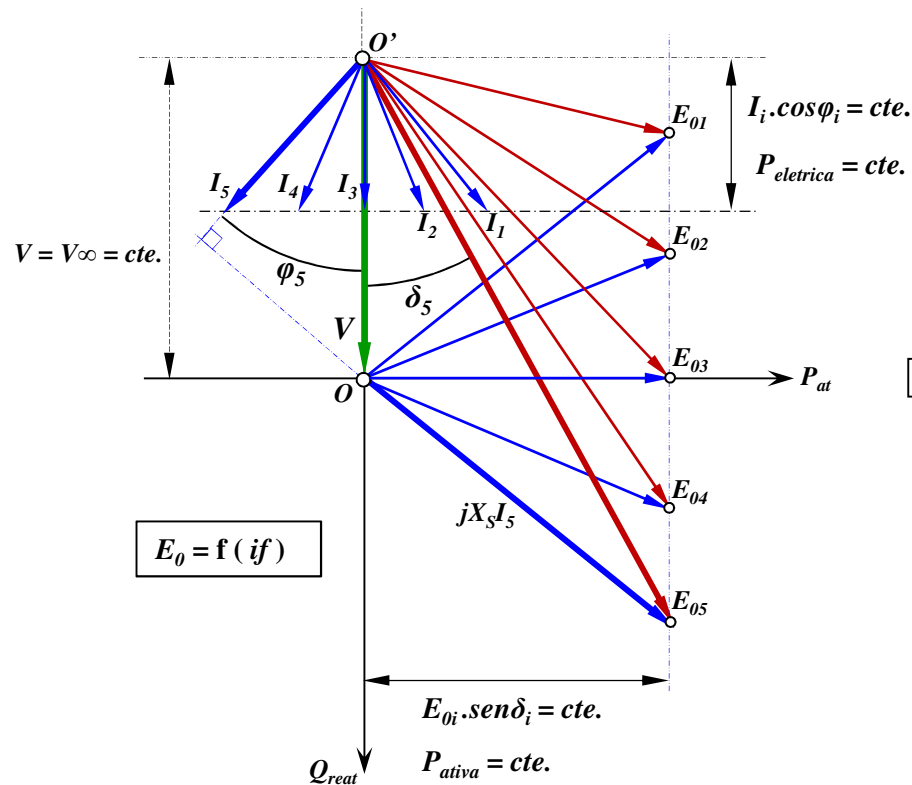
$\varphi < 0 \rightarrow Q_{reat}$ EMITIDA $\rightarrow$ **CAPACITOR** $\rightarrow$ **ABAIXO DO EIXO $y-y$**



INTERAÇÃO DA MÁQUINA SÍNCRONA COM A REDE - QUADRANTES OPERACIONAIS



MÁQUINA SÍNCRONA NO BARRAMENTO - FATOR DE POTÊNCIA EM CARGA – CURVA “V”



M.S. OPERANDO COM POTÊNCIA ATIVA CONSTANTE

AJUSTE DE EXCITAÇÃO CONTROLA A TROCA DE REATIVOS COM A REDE

$Pat = cte.$: AUMENTO DE $i_f \Rightarrow$ AUMENTO DE $E_0 \Rightarrow$ DIMINUIÇÃO DE δ
 $\Rightarrow$ VARIAÇÃO NO FATOR DE POTÊNCIA (VISTO PELA REDE) :

$\Rightarrow \cos \phi < 1 \text{ ind.} \Rightarrow \cos \phi = 1 \Rightarrow \cos \phi < 1 \text{ cap.}$

$\Rightarrow I_{EMITIDA} \text{ CAP.} \Rightarrow I_{MÍNIMA} \Rightarrow I_{EMITIDA} \text{ IND.}$

$\Rightarrow Q_{reat.} < 0 \Rightarrow Q_{reat.} = 0 \Rightarrow Q_{reat.} > 0$

CARACTERÍSTICA $I \times i_f \Rightarrow$ CURVA “V”

PONTOS DE MÍNIMA CORRENTE “I” $\Rightarrow \cos \phi = 1$

L.G. DE $\cos \phi = 1$: M.S. NÃO TROCA REATIVOS COM A REDE

À ESQUERDA : M.S. ABSORVE REATIVOS

À DIREITA : M.S. FORNECE REATIVOS