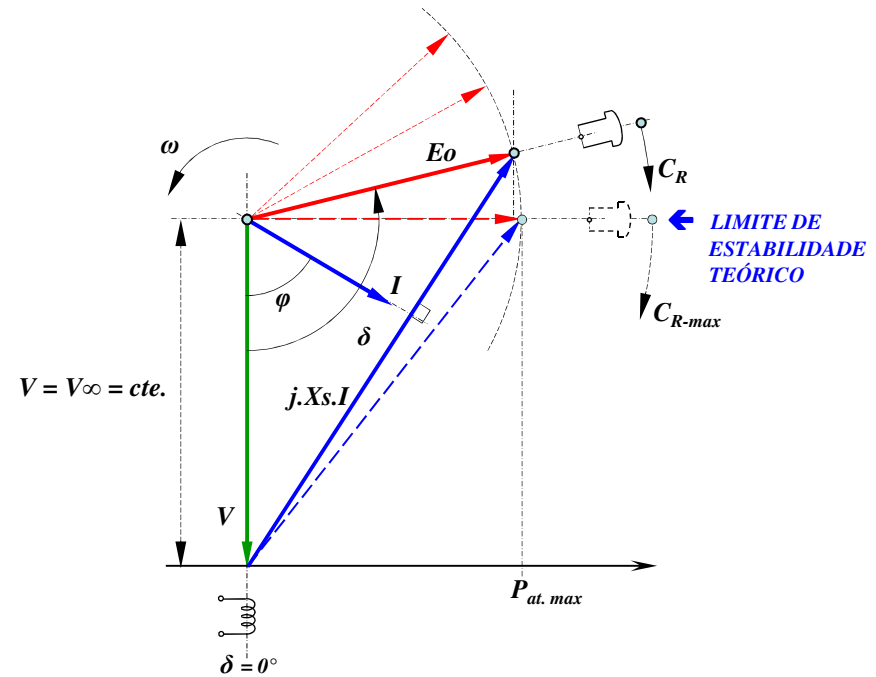
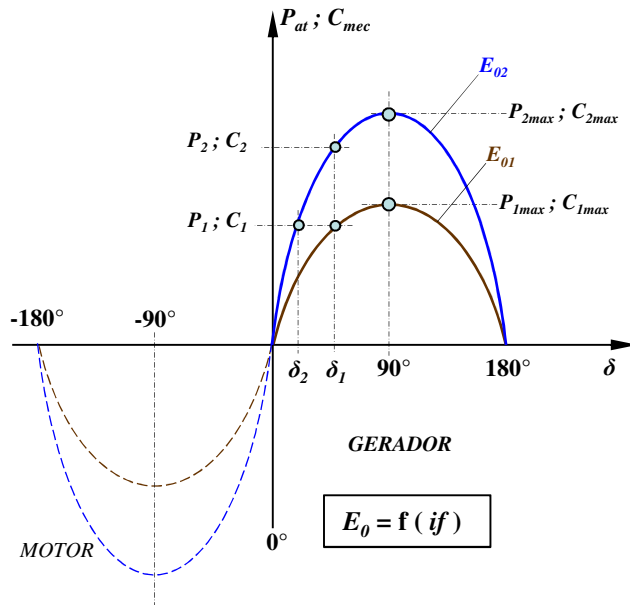


MÁQUINA SÍNCRONA NO BARRAMENTO - LIMITE DE ESTABILIDADE EM REGIME PERMANENTE



$$P_{el\,fase} = \frac{V \cdot E_0}{X_s} \cdot \text{sen}\delta \cong P_{mec\,fase} \quad C_R = \frac{3 \cdot V \cdot E_0}{\omega_s \cdot X_s} \cdot \text{sen}\delta$$

A MÁXIMA POTÊNCIA ATIVA E CONJUGADO DESENVOLVIDO PELA MÁQUINA SÍNCRONA (POLOS LISOS): **OCORRE PARA  $\delta = 90^\circ$  el.**

M.S. OPERANDO COM  $P_1$  e  $C_1 \rightarrow \delta = \delta_1$  PARA EXCITAÇÃO  $E_{01}$

$\rightarrow$  AUMENTANDO EXCITAÇÃO PARA  $E_{02} \rightarrow \delta = \delta_2 < \delta_1$

$\rightarrow$  COM MESMA MARGEM DE ESTABILIDADE INICIAL ( $90^\circ - \delta_1$ ):

$\rightarrow$  PERMITE AUMENTO NA POTÊNCIA E CONJUGADO DESENVOLVIDOS

M.S. OPERANDO NO LIMITE DE ESTABILIDADE :  $\delta = 90^\circ$

POTÊNCIA ATIVA FORNECIDA PELA M.S. :  $P_{at,max}$

CONJUGADO RESISTENTE OFERECIDO PELA M.S. :  $C_{R,max}$

TURBINA FORNECE:  $C_{TURB.} = C_{R,max}$

TURBINA FORNECE:  $P_{mec. Turb.} = P_{at,max}$  (SEM PERDAS)

SE:  $\delta > 90^\circ \rightarrow C_R < C_{TURB.} \rightarrow$  ROTOR ACELERA

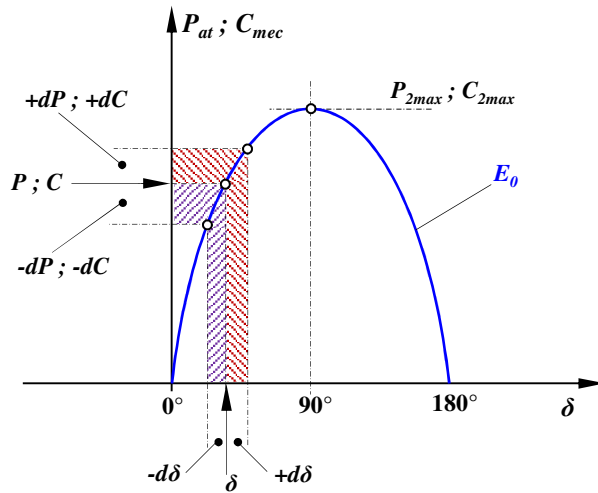
$\rightarrow \delta$  EVOLUI CONTINUAMENTE NO TEMPO

$\rightarrow \omega_g > \omega_s$

$\rightarrow$  PERDA DE SINCRONISMO COM O BARRAMENTO

$\rightarrow$  DISPARO DA MÁQUINA SÍNCRONA

POTÊNCIA E CONJUGADO DE SINCRONIZAÇÃO - MARGEM DE ESTABILIDADE DA M.S. NO BARRAMENTO



M.S. OPERANDO EM CARGA →  $C_{TURB} = C_{M.S.}$  → ESTABELECE ÂNGULO  $\delta$

PERTURBAÇÕES DO ÂNGULO  $\delta$  →  $\pm d\delta$  (MOVIMENTO PENDULAR EM CARGA) :

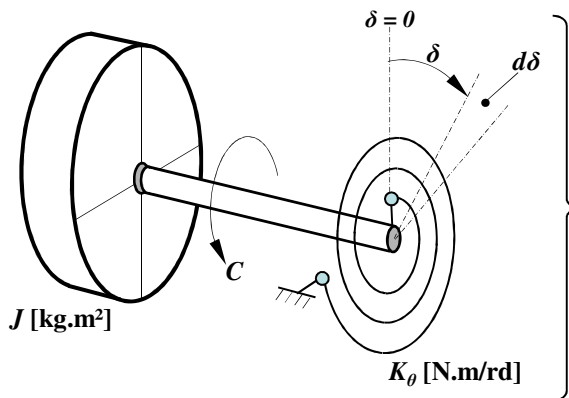
$$\left. \begin{aligned} P &= \frac{V \cdot E_0}{X_s} \cdot \text{sen} \delta \\ P' &= \frac{V \cdot E_0}{X_s} \cdot \text{sen}(\delta \pm d\delta) \end{aligned} \right\} dP = P' - P = \frac{V \cdot E_0}{X_s} \cdot [\text{sen}(\delta \pm d\delta) - \text{sen} \delta]$$

$$\left. \begin{aligned} dP &= \frac{V \cdot E_0}{X_s} \cdot \left[ \pm \cos \delta \cdot \text{sen} d\delta - 2 \cdot \text{sen} \delta \cdot \text{sen}^2 \left( \frac{d\delta}{2} \right) \right] \\ dP &\cong \pm \frac{V \cdot E_0}{X_s} \cdot \cos \delta \cdot \text{sen} d\delta \cong \pm \frac{V \cdot E_0}{X_s} \cdot \cos \delta \cdot d\delta \\ dC &\cong \pm \frac{3 \cdot V \cdot E_0}{\omega_s \cdot X_s} \cdot \cos \delta \cdot d\delta \end{aligned} \right\} \begin{aligned} d\delta \rightarrow 0 : \text{sen}^2(d\delta/2) &\rightarrow 0 \\ d\delta \rightarrow 0 : \text{sen} d\delta &\approx d\delta \text{ [rd]} \end{aligned}$$

$dP$  : POTÊNCIA DE SINCRONIZAÇÃO

$dC$  : CONJUGADO DE SINCRONIZAÇÃO

→ ACÃO RESTAURADORA DA M.S. QUE RECUPERA O ÂNGULO  $\delta$  EXISTENTE ANTES DA PERTURBAÇÃO  $d\delta$



M.S. NO BARRAMENTO → SIMILAR A UM “ACOPLAMENTO ELÁSTICO” TORCIONAL

$C = K_\theta \cdot \delta$  →  $K_\theta$  : CONSTANTE ELÁSTICA DA MOLA DE TORÇÃO – “RIGIDEZ DO ACOPLAMENTO”

“RIGIDEZ” DA M.S. NO BARRAMENTO :  $K_{\theta-eq} = \frac{dC}{d\delta} = \frac{3 \cdot V \cdot E_0}{\omega_s \cdot X_s} \cdot \cos \delta$  (“CONSTANTE DA MOLA” EQUIV.)

COEFICIENTE DE CONJUGADO DE SINCRONIZAÇÃO OU “RIGIDEZ” DO ACOPLAMENTO DA M.S. NO BARRAMENTO DEPENDE : DO ESTADO DE CARGA (ÂNGULO  $\delta$ ) E DA EXCITAÇÃO DA M.S. ( $E_0$ )

EM VAZIO:  $\delta = 0$  →  $dC/d\delta$  É MÁXIMO ; NO LIMITE DE ESTABILIDADE:  $\delta = 90^\circ$  →  $dC/d\delta = 0$

## OSCILAÇÕES DA MÁQUINA SÍNCRONA - MARGEM DE ESTABILIDADE DA M.S. NO BARRAMENTO

$$K_{\theta-eq} = \frac{dC}{d\delta} = \frac{3 \cdot V \cdot E_0}{\omega_s \cdot X_s} \cdot \cos\delta \left\{ \begin{array}{l} \text{MARGEM DE ESTABILIDADE É TANTO MENOR QUANTO MAIOR O ÂNGULO } \delta \rightarrow \delta \rightarrow 90^\circ : dC/d\delta \rightarrow 0 \\ \text{“RIGIDEZ” DA M.S. NO BARRAMENTO SE REDUZ } \rightarrow \text{RISCO DE PERDA DE SINCRONISMO} \\ \text{AUMENTO DA “RIGIDEZ” DO ACOPLAMENTO À REDE MELHORA COM AUMENTO DA EXCITAÇÃO} \end{array} \right.$$

M.S. OPERANDO NO BARRAMENTO  $\rightarrow$  ÂNGULO  $\delta$  OSCILA EM TORNO DE VALOR MÉDIO NÃO NULO  $\rightarrow$  MOVIMENTO PENDULAR EM CARGA

$\rightarrow$  OSCILAÇÕES DO ROTOR TÊM PERÍODO DADO POR:  $T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{J}{K_{\theta-eq}}}$   $\left\{ \begin{array}{l} J \text{ [kg.m}^2\text{]} : \text{MOMENTO DE INÉRCIA DO SISTEMA ROTATIVO} \\ K_{\theta-eq} : \text{[N.m/rd]} \text{ COEFICIENTE DE CONJ. DE SINCRONIZAÇÃO} \\ K_{\theta-eq} \rightarrow \text{CONJUGADO RESTAURADOR POR RADIANO} \end{array} \right.$

$$T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{J \cdot \omega_s \cdot X_s}{3 \cdot V \cdot E_0 \cdot \cos\delta}} \rightarrow (\delta \text{ pequeno: } \cos\delta \cong 1) \rightarrow T \cong 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{k \cdot \frac{J}{E_0}}$$

AUMENTO DA EXCITAÇÃO DA M.S. :

**AUMENTA RIGIDEZ NO BARRAMENTO - MELHORA A ESTABILIDADE**

**DIMINUI PERÍODO DAS OSCILAÇÕES NATURAIS ( VALORES TÍPICOS: 0,5 a 1,5 s )**

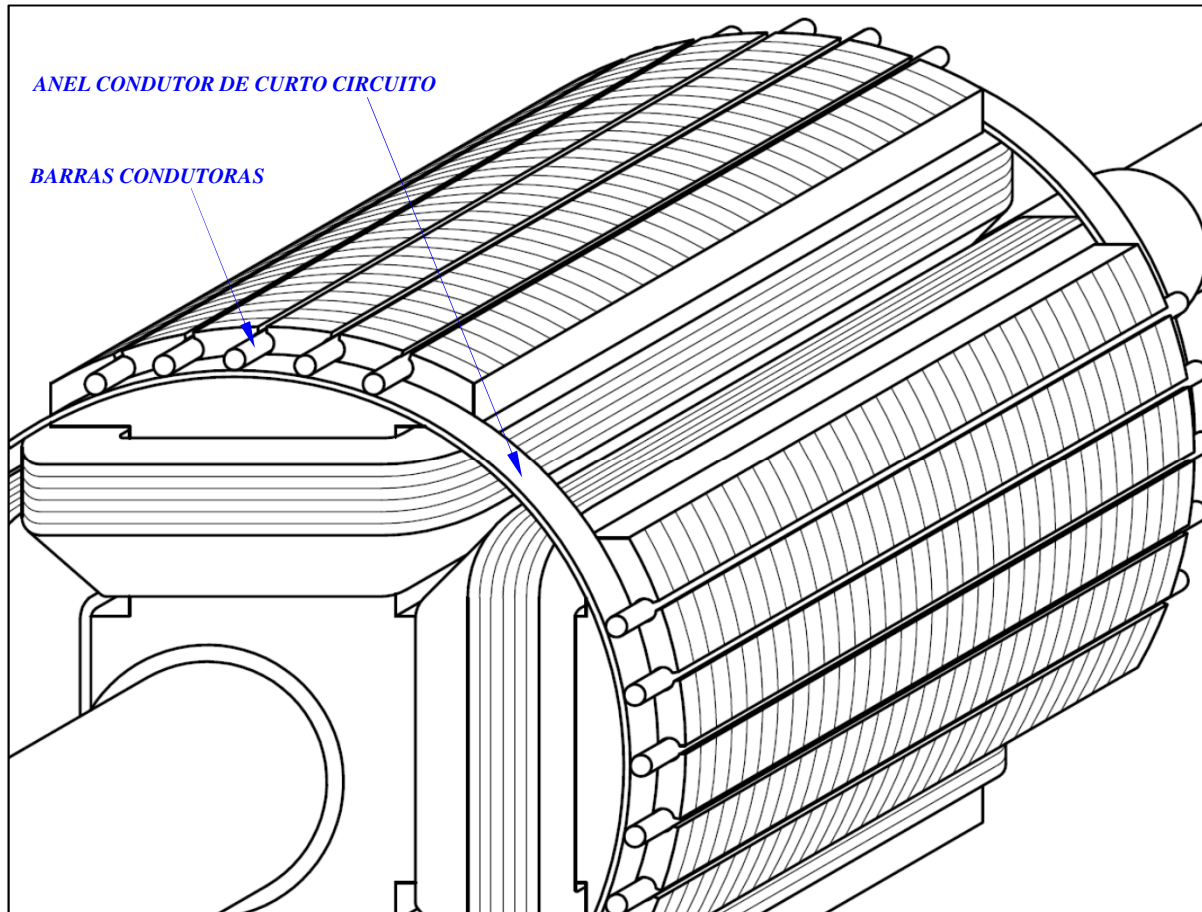
**OSCILAÇÕES: PROVOCADAS POR PULSAÇÃO DE CONJUGADO NO EIXO OU POR PULSAÇÃO DA POTÊNCIA ATIVA EMITIDA**

**OSCILAÇÕES FORÇADAS PODEM CONDUZIR A RESSONÂNCIAS ( SE COINCIDIREM COM ALGUMA FREQUENCIA NATURAL )**

**AMORTECIMENTO DAS OSCILAÇÕES  $\rightarrow$  IMPORTANTE FATOR DE ESTABILIDADE DA M.S. NO BARRAMENTO**

**ENROLAMENTO AMORTECEDOR DA MÁQUINA SÍNCRONA : GARANTE AMORTECIMENTO DAS OSCILAÇÕES**

## ENROLAMENTO AMORTECEDOR DA MÁQUINA SÍNCRONA - FUNCIONAMENTO



**MÁQUINAS DE POLOS SALIENTES:**

**AMORTECEDOR NA SUPERFÍCIE DAS SAPATAS POLARES, SEMPRE QUE A SAPATA FOR DE CONSTRUÇÃO LAMINADA.**

**COM SAPATAS MACIÇAS A MASSA METÁLICA CONDUTORA FUNCIONA COMO UMA “GAIOLA DISTRIBUÍDA”**

**MÁQUINAS DE POLOS LISOS:**

**ESTRUTURA METÁLICA MACIÇA DO ROTOR SE COMPORTA COMO UMA “GAIOLA CONTÍNUA”**

**EM MÁQUINAS COM NÚCLEO LAMINADO, BARRAS SÃO ALOJADAS NA SUPERFÍCIE DOS DENTES DO ROTOR**

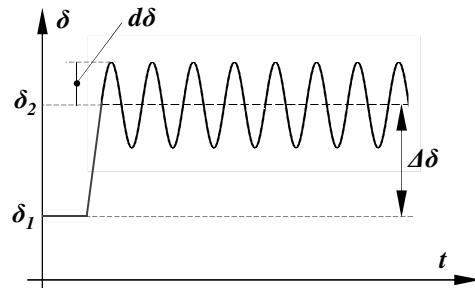
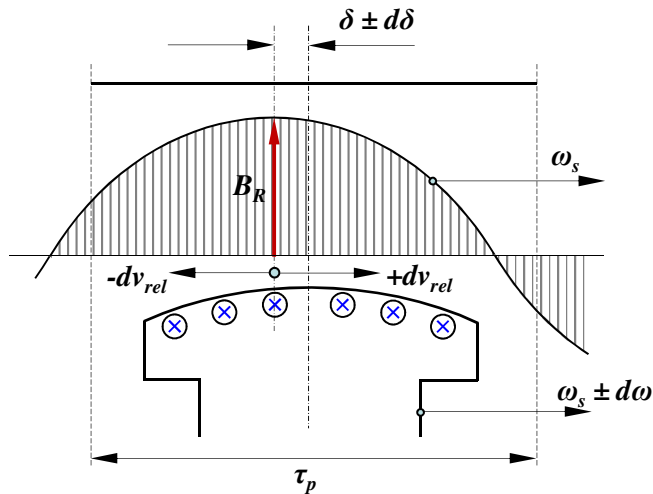
**ENROLAMENTO AMORTECEDOR :**

**FORMADO POR CONJUNTOS DE BARRAS CONDUTORAS ALOJADAS EM RANHURAS NA SUPERFÍCIE DAS SAPATAS POLARES**

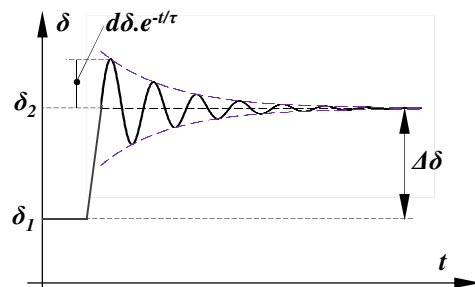
**TODAS AS BARRAS CONECTADAS A ANÉIS CONDUTORES FORMANDO UM CONJUNTO EM CURTO CIRCUITO**

**→ FORMAÇÃO DE UMA “GAIOLA”, SIMILAR À DAS MÁQUINAS ASSÍNCRONAS**

**ENROLAMENTO AMORTECEDOR DA MÁQUINA SÍNCRONA - FUNCIONAMENTO**



**TRANSITÓRIO DE CARGA SEM AMORTECEDOR**



**TRANSITÓRIO DE CARGA COM AMORTECEDOR**

**EM SINCRONISMO ABSOLUTO :**

VELOCIDADE RELATIVA ENTRE BARRAS E CAMPO É NULA  $\rightarrow dv_{rel} = 0$

$\rightarrow$  **AMORTECEDOR INOPERANTE**

**NA PRESENÇA DE OSCILAÇÕES DO ROTOR :**

EXISTE MOVIMENTO RELATIVO ENTRE BARRAS E CAMPO  $\rightarrow dv_{rel} \neq 0$

$\rightarrow$  SURGEM TENSÕES INDUZIDAS NAS BARRAS (EFEITO MOCIONAL) :

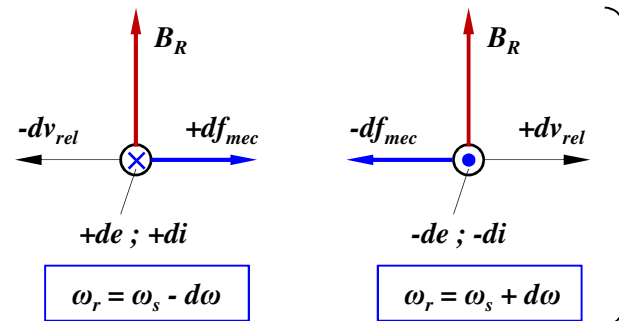
$$de = L \cdot (dv_{rel} \times B_R)$$

$\rightarrow$  RESULTA CIRCULAÇÃO DE CORRENTES NAS BARRAS :

$$di = de / Z_{barra} \rightarrow (\text{CIRCUITO ELÉTRICO DAS BARRAS É FECHADO})$$

$\rightarrow$  MANIFESTAÇÃO DE **CONJUGADO ASSÍNCRONO EM OPOSIÇÃO ÀS OSCILAÇÕES:**

$$df_{mec} = di \cdot (L \times B_R) \rightarrow dC = \sum (df_{mec} \cdot R) - L ; R : \text{COMPRIENTO E RAIOS DO ROTOR}$$



INTERAÇÕES ELETROMAGNÉTICAS ENTRE AS BARRAS DO AMORTECEDOR E O CAMPO NO ENTREFERRO

CONJUGADO DESENVOLVIDO SEMPRE OPOSTO AO DESLOCAMENTO DO ROTOR  $\rightarrow$  EFEITO DE AMORTECIMENTO

**LIMITES OPERACIONAIS DA MÁQUINA SÍNCRONA - DIAGRAMA DE CAPABILIDADE****LIMITES DE OPERAÇÃO DA M.S. NO BARRAMENTO:**

**LIMITE DE CORRENTE DE CARGA NO ENROLAMENTO DO ESTATOR → LIMITE DA POTÊNCIA APARENTE NO VALOR NOMINAL [ VA ; kVA ; MVA ] → LIMITE TÉRMICO DO ESTATOR**

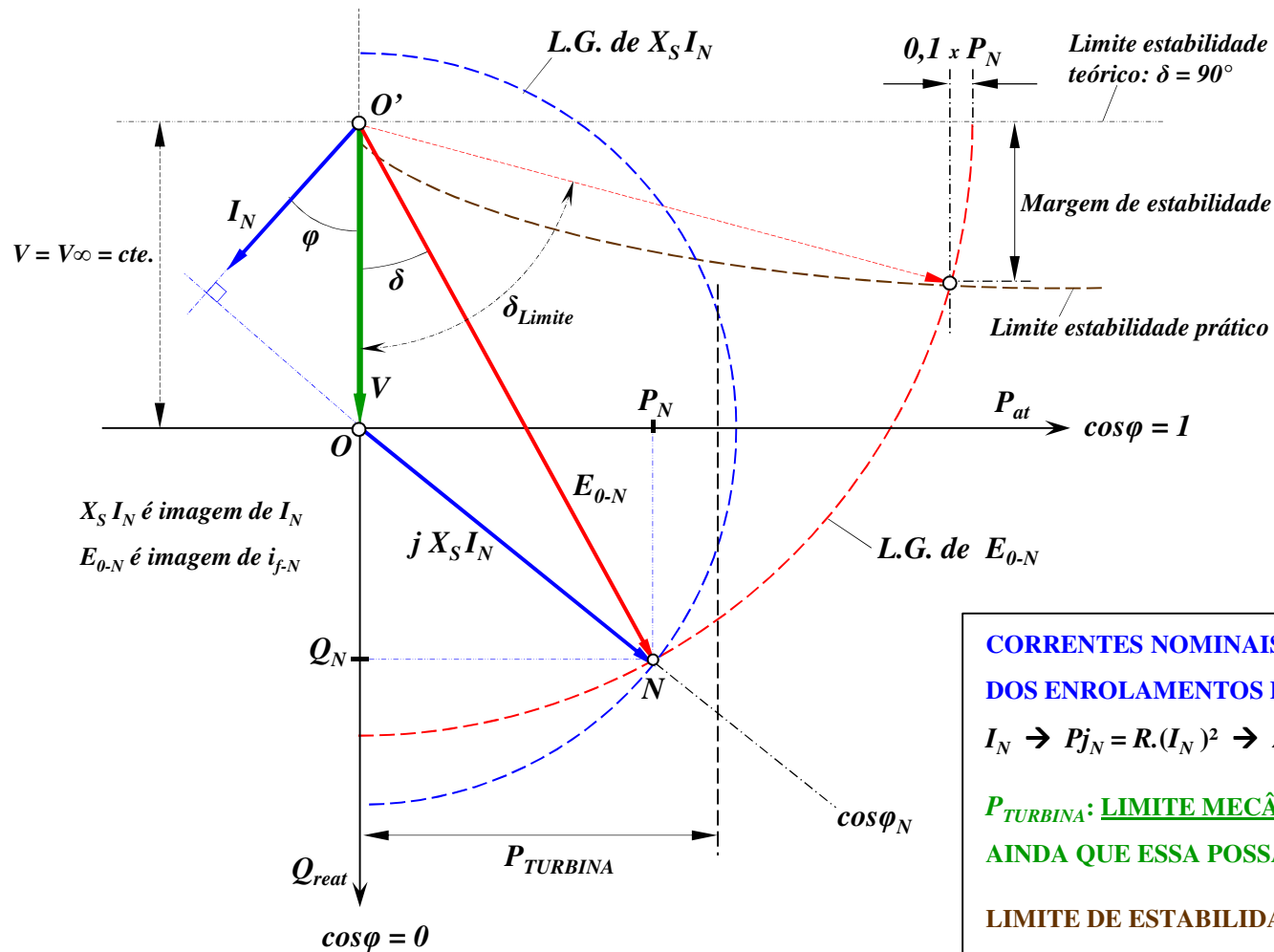
**LIMITE DE CORRENTE DE EXCITAÇÃO DO ENROLAMENTO DE CAMPO → LIMITE DA POTÊNCIA REATIVA MÁXIMA ADMISSÍVEL → LIMITE TÉRMICO DO ROTOR**

**LIMITE DE POTÊNCIA MECÂNICA DISPONÍVEL NA TURBINA → LIMITE DA MÁXIMA POTÊNCIA ATIVA FORNECIDA PELA M.S. [ W ; kW ; MW ] → LIMITE MECÂNICO**

**LIMITE DE ESTABILIDADE EM REGIME PERMANENTE → MARGEM DE ESTABILIDADE**

**LIMITES SÃO ESTABELECIDOS A PARTIR DO DIAGRAMA FASORIAL, UTILIZANDO FASORES DE TENSÃO ASSOCIADOS AOS LIMITES CORRESPONDENTES**

DEFINIÇÃO DOS LIMITES DE OPERAÇÃO DA M.S. A PARTIR DO DIAGRAMA FASORIAL



$X_S I_N$  é imagem de  $I_N$   
 $E_{0-N}$  é imagem de  $i_{f-N}$

**CORRENTES NOMINAIS CARACTERIZAM LIMITES TÉRMICOS DOS ENROLAMENTOS POR ELAS PERCORRIDOS:**

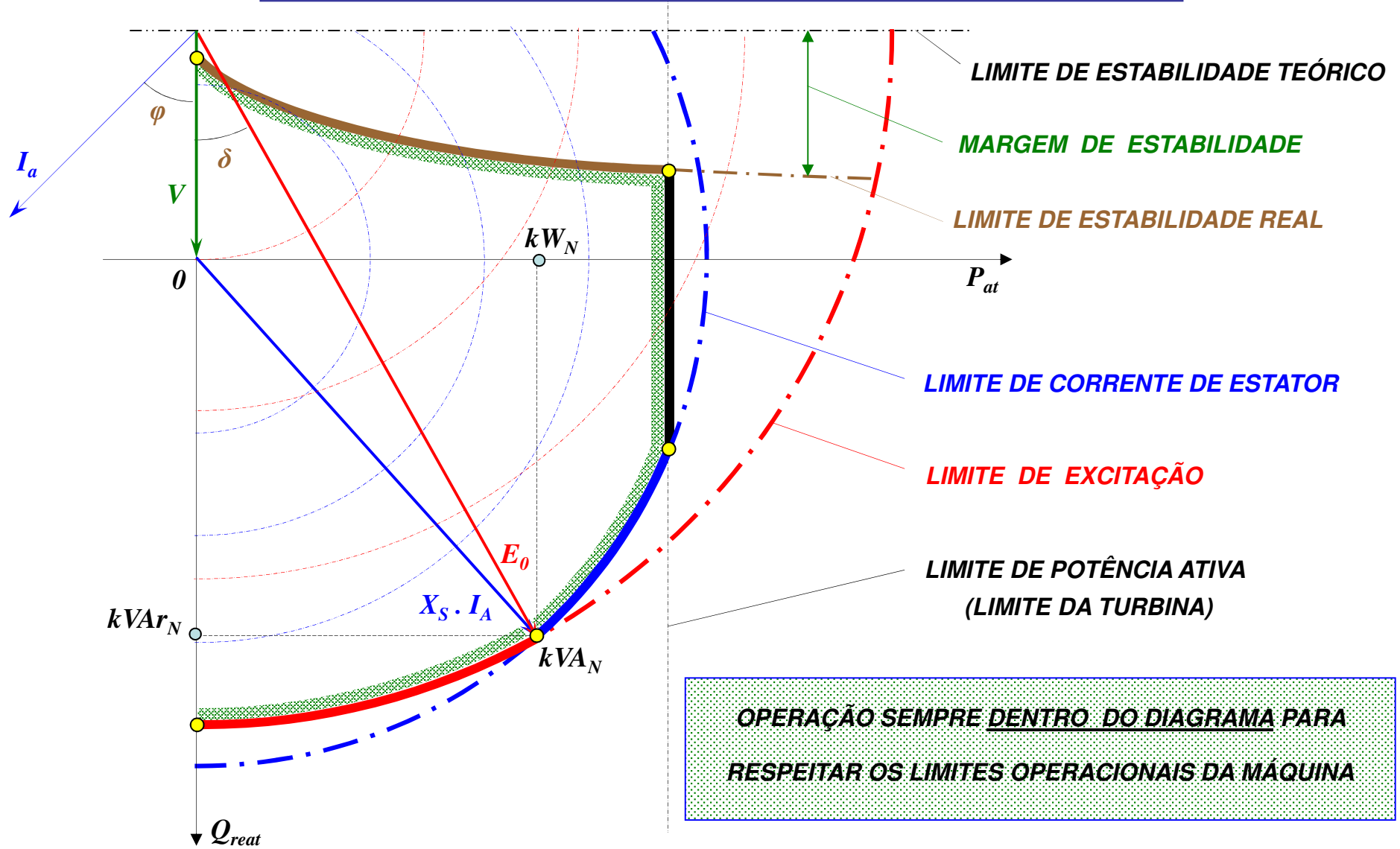
$I_N \rightarrow Pj_N = R.(I_N)^2 \rightarrow \Delta T_N$  (Temperatura)  $\rightarrow$  vida útil preservada

$P_{TURBINA}$ : LIMITE MECÂNICO DE POTÊNCIA NO EIXO DA M.S.  
 AINDA QUE ESSA POSSA FORNECER MAIOR POT. ELÉT. ATIVA

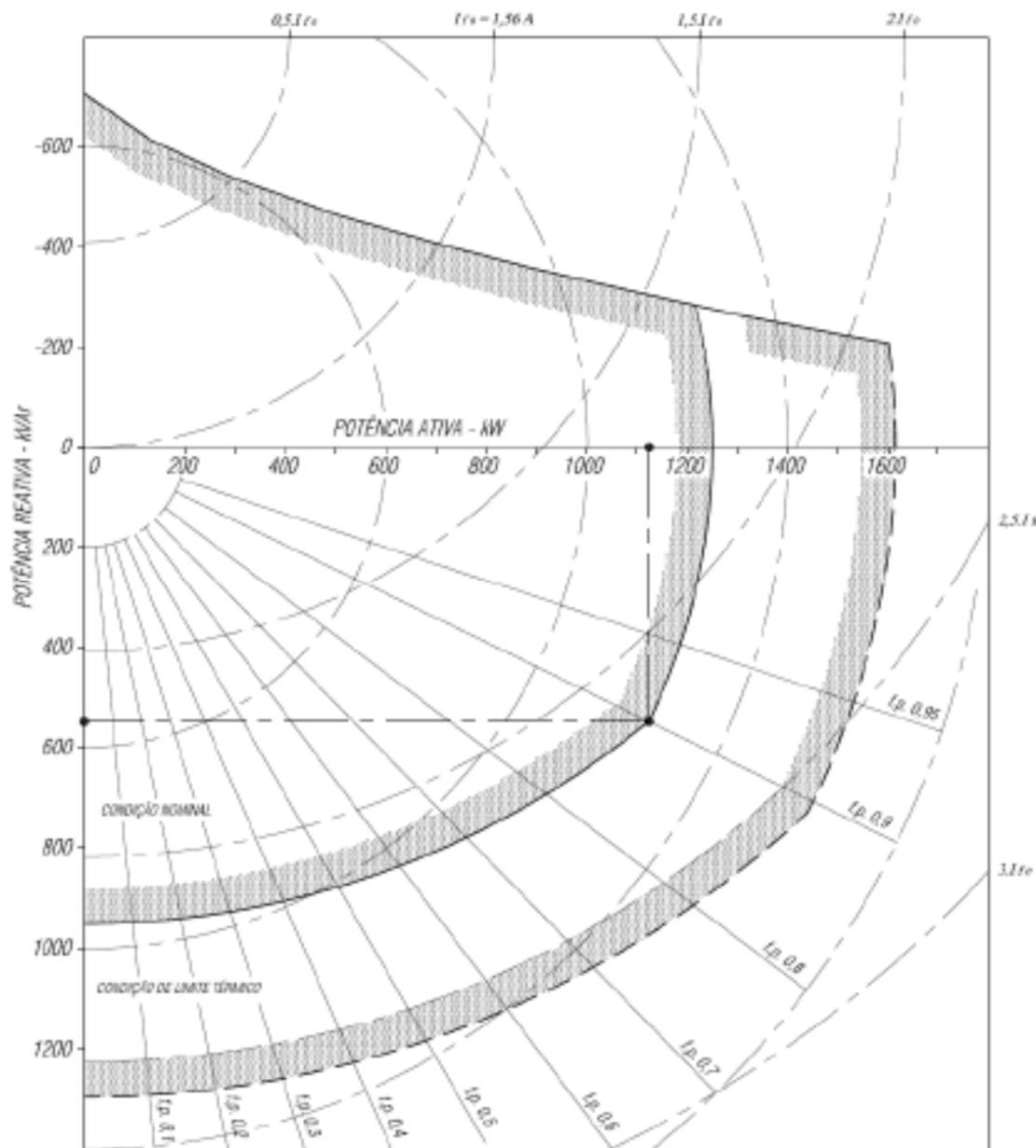
LIMITE DE ESTABILIDADE: GARANTIA DE SINCRONISMO DA M.S. NO BARRAMENTO

$\rightarrow$  MARGEM DE ESTABILIDADE DEFINIDA EM GERAL COMO UMA RESERVA DE POTÊNCIA EM RELAÇÃO À MÁXIMA PARA CADA EXCITAÇÃO  $\rightarrow$  EM GERAL : 10% DE  $P_N$

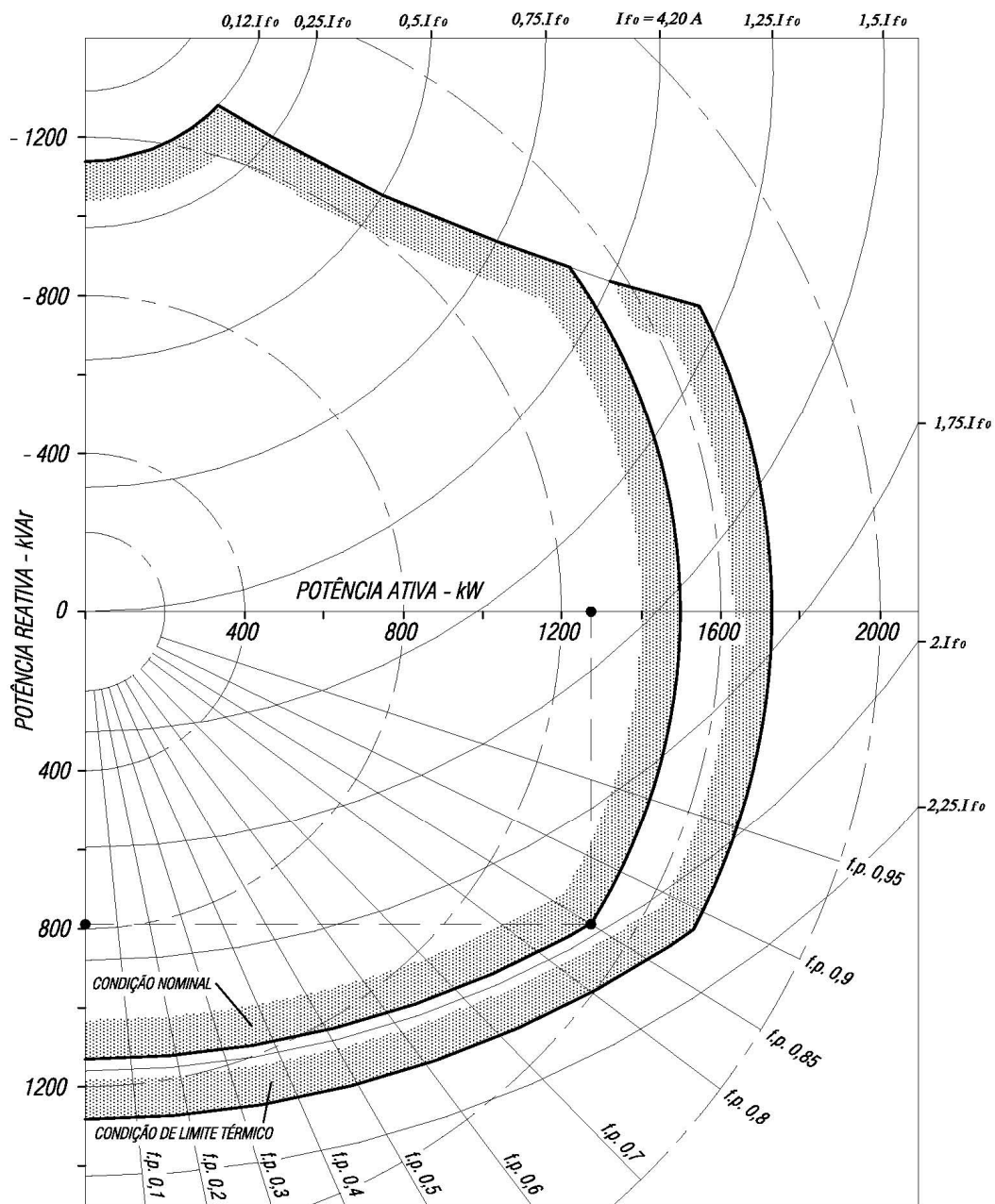
**CURVA DE CAPABILIDADE DA MÁQUINA SÍNCRONA - OPERAÇÃO NA REDE**





**CURVA DE CAPABILIDADE DA MÁQUINA SÍNCRONA - OPERAÇÃO NA REDE**

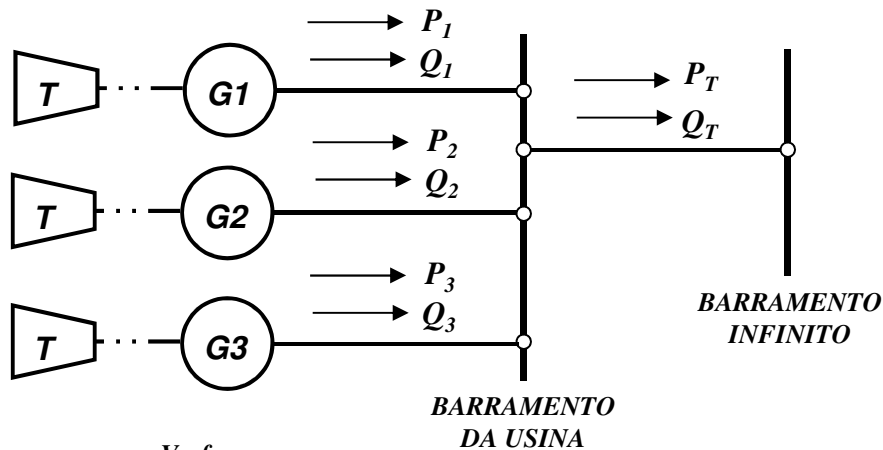
**CURVA DE CAPABILIDADE TÍPICA DE GERADOR DE PÓLOS LISOS DE MÉDIA POTÊNCIA**



**CURVA DE CAPABILIDADE DA  
MÁQUINA SÍNCRONA  
→ OPERAÇÃO NA REDE**

**CURVA DE CAPABILIDADE TÍPICA DE  
GERADOR DE PÓLOS SALIENTES DE  
MÉDIA POTÊNCIA**

**GERADORES OPERANDO EM PARALELO – CONECTADOS À REDE ELÉTRICA**



CADA GERADOR DOTADO DE :

→ **REGULADOR DE POTÊNCIA ATIVA (VELOCIDADE)**

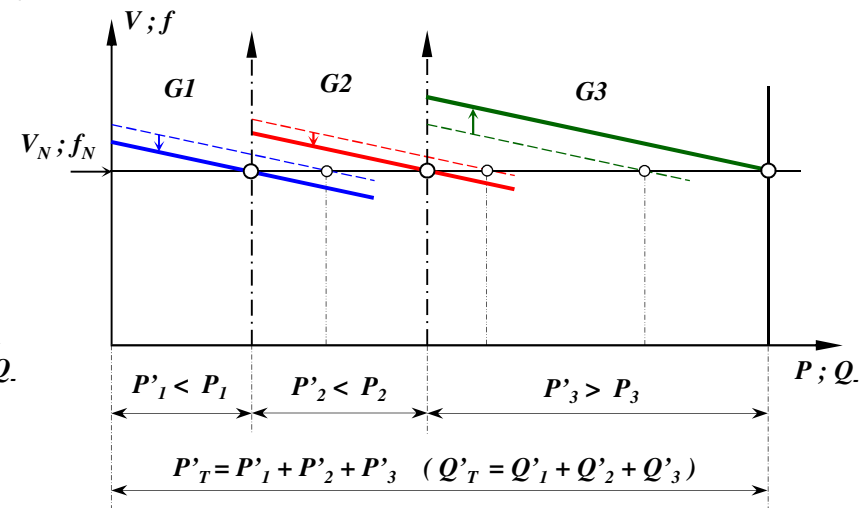
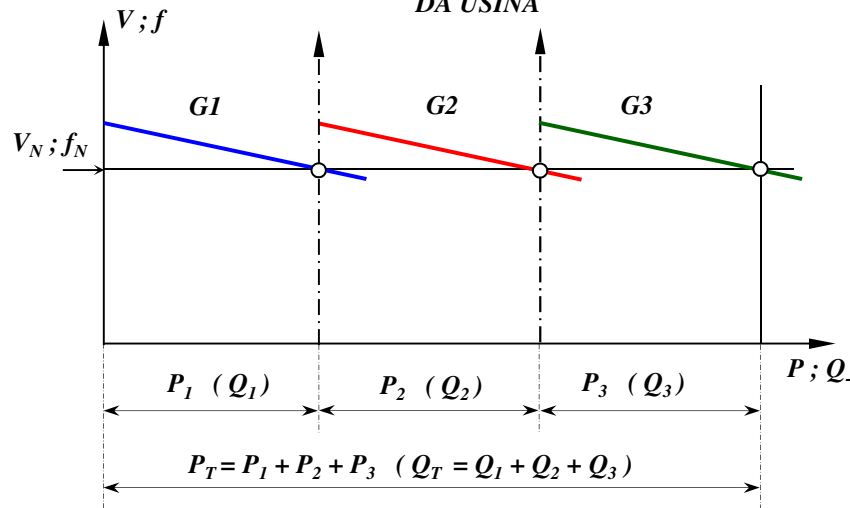
→ **REGULADOR DE POTÊNCIA REATIVA (TENSÃO)**

→ **MEDIÇÃO DE POTÊNCIA ATIVA**

→ **MEDIÇÃO DE POTÊNCIA REATIVA**

→ **CONTROLE CENTRAL DA USINA → DIVISÃO DE CARGA ATIVA E REATIVA**

→ **CONTROLE DO SISTEMA ELÉTRICO → PROMOVE O CARREGAMENTO ENTRE USINAS**



Aumento de referência de um gerador ( G3 ) → **Aumenta**  $P_T$  e  $Q_T$  com  $V$  e  $f$  constantes

Se  $P_T$  e  $Q_T$  permanecerem constantes → obriga à **redução** de referências de G1 e G2 para se adequar à condição de  $V$  e  $f$  constantes

Se não houver adequação de referências de G1 e G2 com  $P_T$  constante → **circulação de potência entre máquinas**