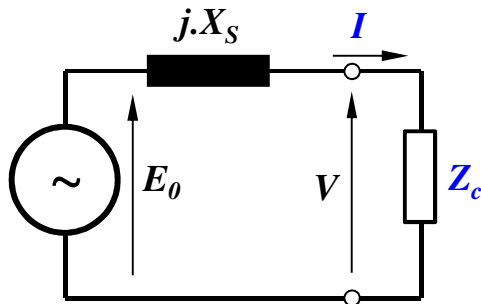
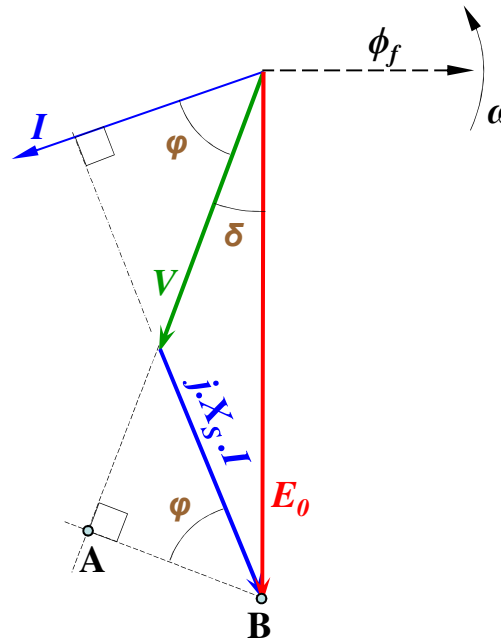


POTÊNCIA DESENVOLVIDA E CONJUGADO NO EIXO DA M.S.



Modelo por fase da máquina  
(CONVENÇÃO FONTE)



POTÊNCIA ELÉTRICA ATIVA ENTREGUE À CARGA:

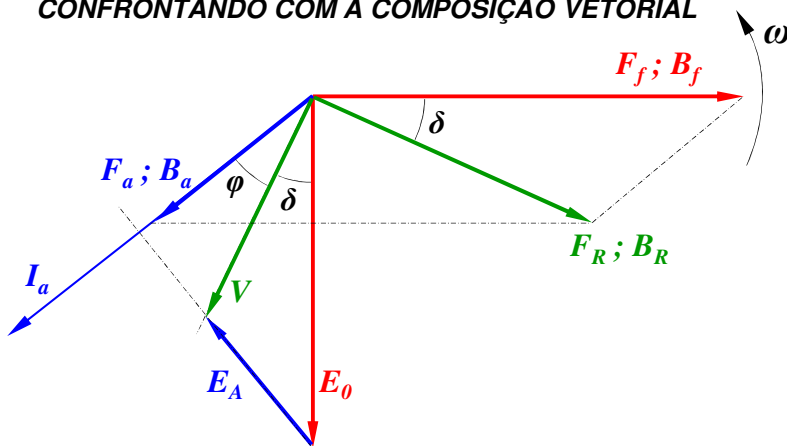
$$P_{el} = V \cdot I \cdot \cos\varphi \text{ [W/fase]} > 0 \text{ p/GERADOR}$$

$$\overline{AB} = X_s \cdot I \cdot \cos\varphi = E_0 \cdot \text{sen}\delta$$

$$I \cdot \cos\varphi = \frac{E_0}{X_s} \cdot \text{sen}\delta$$

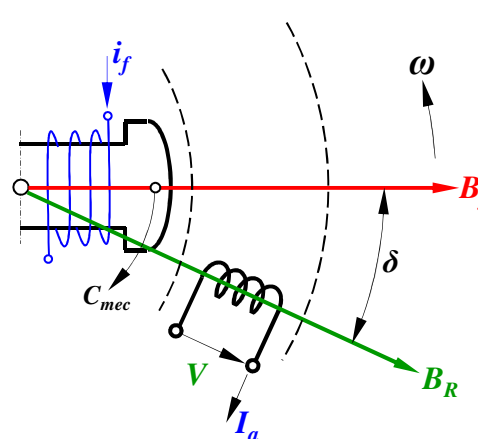
$$P_{el} = \frac{V \cdot E_0}{X_s} \cdot \text{sen}\delta$$

CONFRONTANDO COM A COMPOSIÇÃO VETORIAL



NO MODO GERADOR:  $B_f$  SE DESLOCA À FRENTE DE  $B_R$   
 $\rightarrow E_0$  ADIANTADO EM RELAÇÃO A  $V$

ÂNGULO DE POTÊNCIA  $\delta$  É O ÂNGULO ENTRE O EIXO DO CAMPO ROTATIVO RESULTANTE  $B_R$  E O EIXO DO CAMPO DO INDUTOR  $B_f$



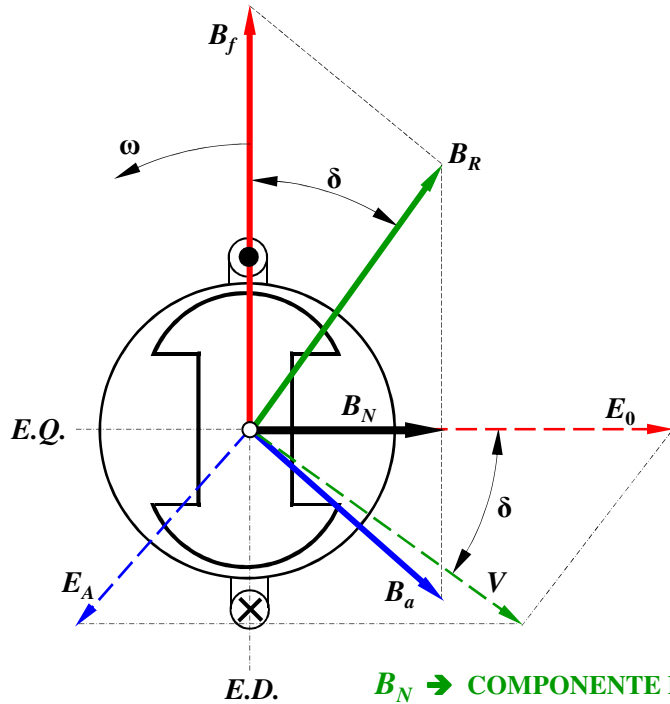
$\delta \neq 0 \rightarrow$  MANIFESTAÇÃO DE CONJUGADO NO EIXO DA M.S.

CONJUGADO DE MÚTUA:

$$C_{mec} = k \cdot B_f \cdot B_R \cdot \text{sen}\delta$$

$$B_f = k_1 \cdot E_0 ; B_R = k_2 \cdot V$$

POTÊNCIA DESENVOLVIDA E CONJUGADO NO EIXO DA M.S.



DESPREZADAS AS PERDAS:

→ POTÊNCIA ATIVA FORNECIDA PELA M.S. SE IDENTIFICA COM A POTÊNCIA MECÂNICA INJETADA NO EIXO (por fase)

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

TORQUE NO EIXO DA M.S. →

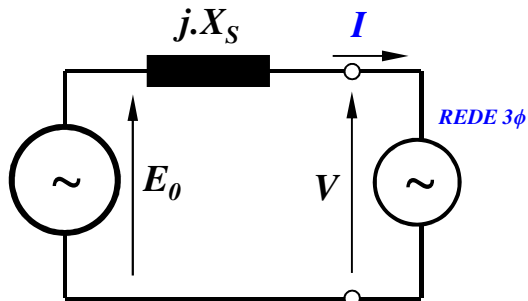
$$C_{mec} = \frac{3 \cdot V \cdot E_0}{\omega_s \cdot X_s} \cdot \text{sen}\delta$$

TORQUE ENTENDIDO COMO INTERAÇÃO DE CAMPOS NO ENTREFERRO:

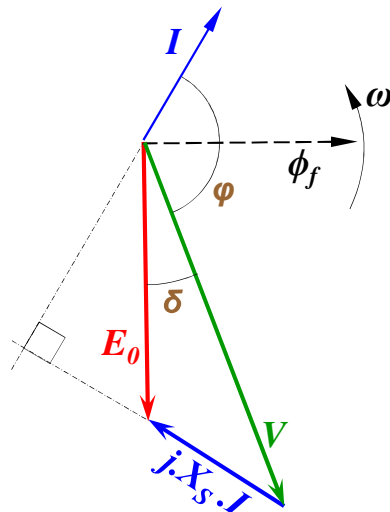
$$\rightarrow C_{mec} = k \cdot B_f \cdot B_R \cdot \text{sen}\delta$$

$$C_{mec} = k \cdot B_f \cdot B_N \rightarrow B_N = B_R \cdot \text{sen}\delta = B_a \cdot \text{cos}(\delta + \varphi)$$

$B_N$  → COMPONENTE DE  $B_R$  OU  $B_a$ , ASSOCIADO AO ESTATOR, NORMAL AO CAMPO  $B_f$ , ASSOCIADO AO ROTOR



Modelo por fase da máquina  
(CONVENÇÃO FONTE)



MÁQUINA SÍNCRONA NO MODO MOTOR:

$$P_{el} = V \cdot I \cdot \text{cos}\varphi \quad [W/fase] < 0 \quad (\varphi > 90^\circ)$$

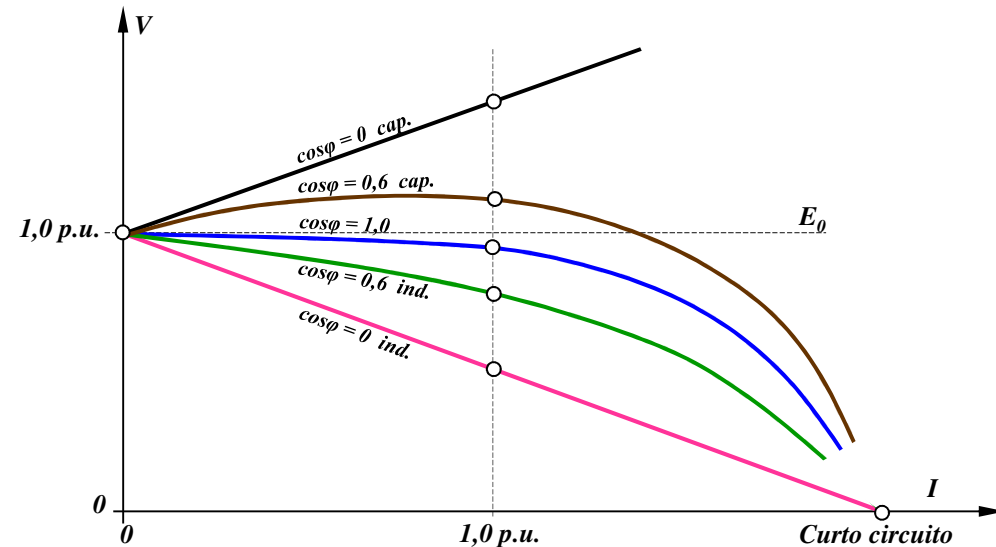
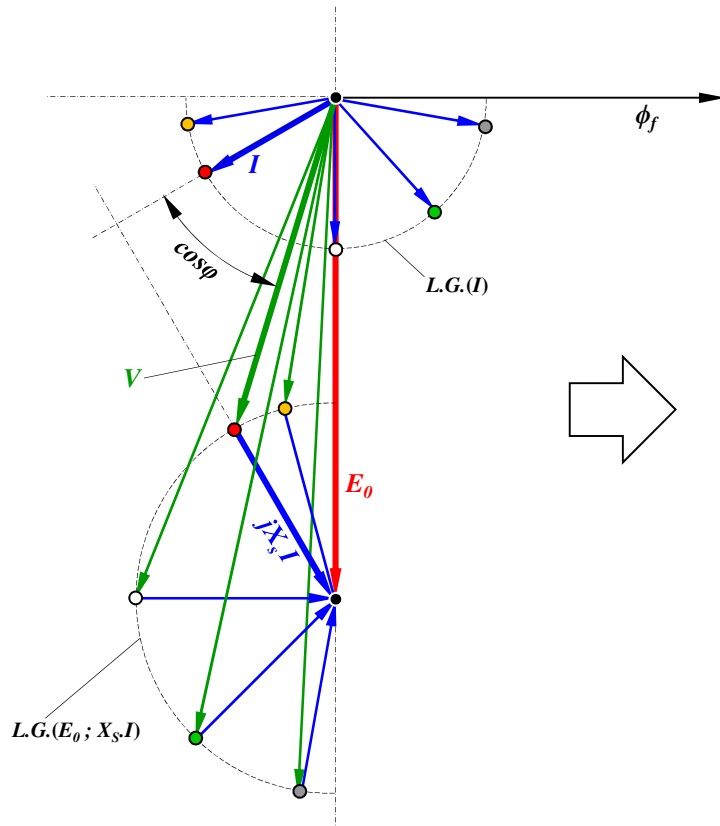
$P_{el} < 0$  → POTÊNCIA ELÉTRICA É ABSORVIDA PELA M.S.

NO MODO MOTOR:  $B_f$  SE DESLOCA ATRÁS DE  $B_R$

→  $E_0$  ATRASADO EM RELAÇÃO A  $V$

**CARACTERÍSTICA NATURAL EM CARGA DA MÁQUINA SÍNCRONA – GERADOR ISOLADO**

**INFLUÊNCIA DO FATOR DE POTÊNCIA DA CARGA ALIMENTADA:**



**REGULAÇÃO NATURAL DE TENSÃO:**

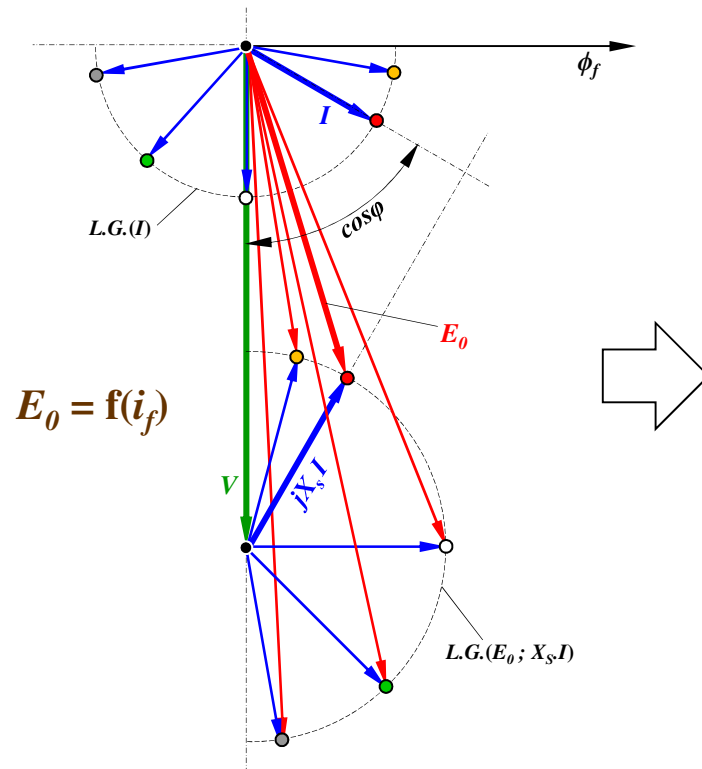
$$\mathbb{R} = \left( \frac{E_0 - V}{V} \right) \cdot 100 \text{ [%]}$$

MEDIDA PARA CORRENTE NOMINAL

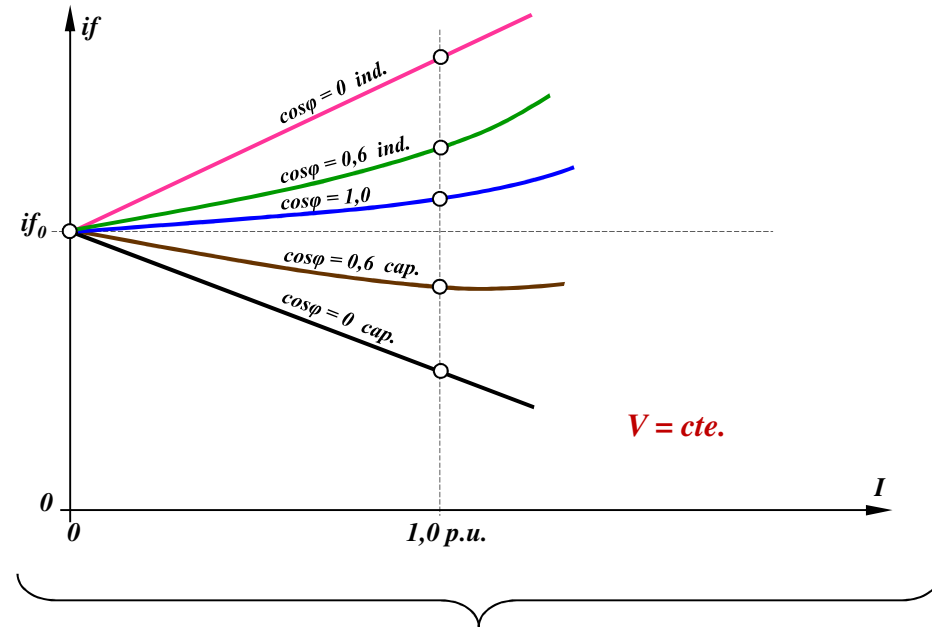
**VARIAÇÃO DA TENSÃO NOS TERMINAIS DO GERADOR COM A CARGA, PARA DIVERSOS FATORES DE POTÊNCIA**

**EXCITAÇÃO CONSTANTE :  $i_f = i_{f0} \rightarrow V = E_0 \text{ p/ } I = 0$**

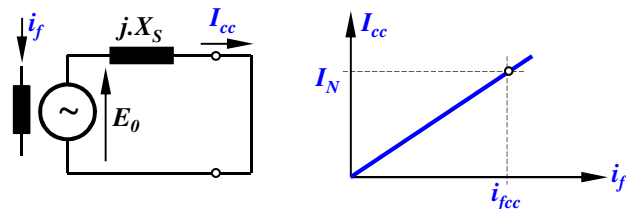
**CARACTERÍSTICA NATURAL EM CARGA DA MÁQUINA SÍNCRONA – GERADOR ISOLADO**



**INFLUÊNCIA DA CORRENTE DE EXCITAÇÃO:**



**CARACTERÍSTICA DE CURTO-CIRCUITO:**



EM CURTO → ICC É PURAMENTE INDUTIVA

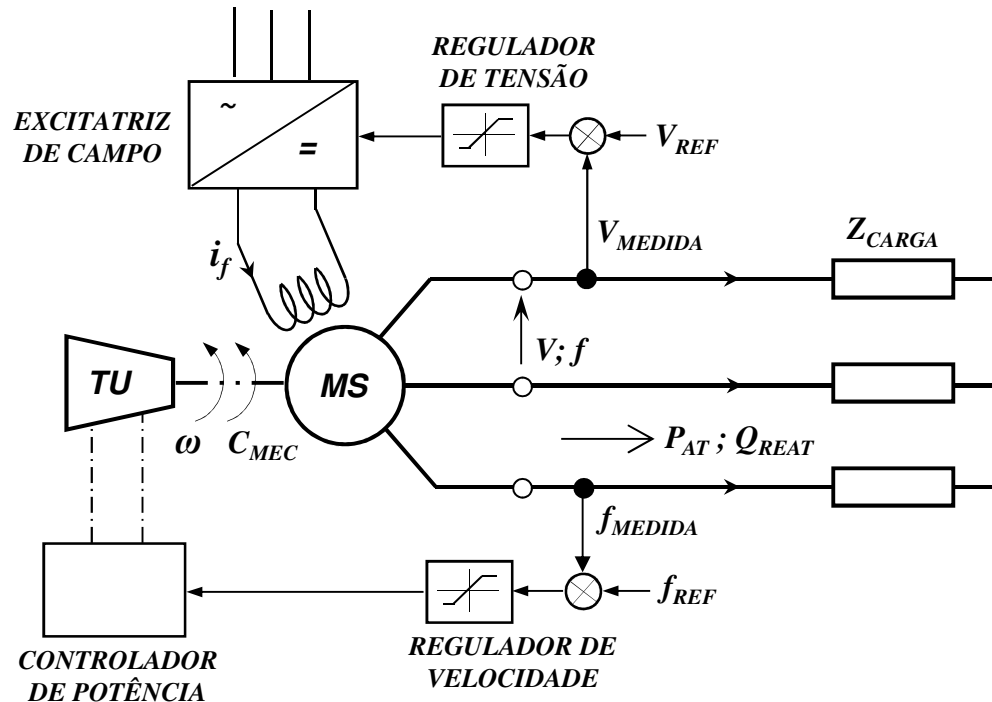
EFEITO DESMAGNETIZANTE TOTAL →  $B_R = 0$

→ CIRCUITO MAGNÉTICO ISENTO DE SATURAÇÃO

**VARIAÇÃO REQUERIDA NA CORRENTE DE EXCITAÇÃO  $i_f$  PARA MANTER CONSTANTE A TENSÃO EM CARGA PARA DIVERSOS FATORES DE POTÊNCIA**

→ EM OPERAÇÃO NORMAL, AS VARIAÇÕES DE EXCITAÇÃO SÃO PROMOVIDAS PELO REGULADOR DE TENSÃO DO GERADOR

## CARACTERIZAÇÃO DA OPERAÇÃO DA MÁQUINA SÍNCRONA ALIMENTANDO CARGA ISOLADA



**TENSÃO** : Definida pela excitação do gerador

**FREQÜÊNCIA** : Definida pela rotação da turbina

**POTÊNCIA ATIVA** : Fornecida pelo gerador, controlada pelo torque no eixo e pela excitação

**POTÊNCIA REATIVA** : Fornecida pelo gerador, controlada pela excitação e definida exclusivamente pela carga

**TENSÃO, FREQÜÊNCIA E CORRENTE DO SISTEMA** : Monitoradas pelo sistema de proteção do gerador

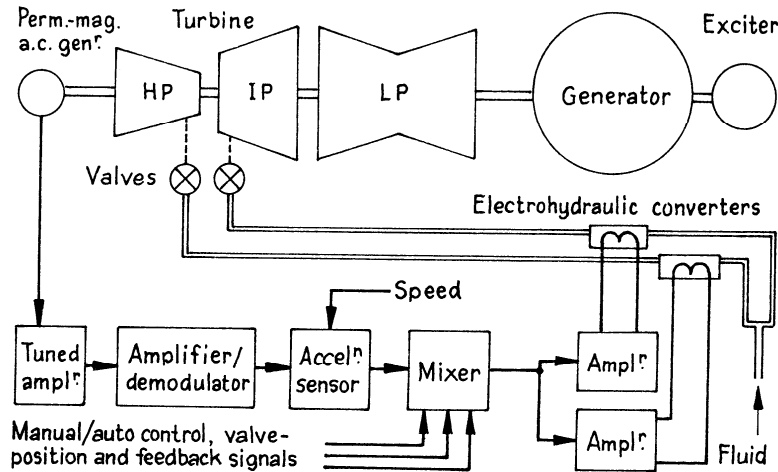
→ **AUMENTO DA CARGA ATIVA**: Até o limite de potência da turbina – acima disso, a turbina não consegue sustentar a rotação no eixo → queda na freqüência gerada

→ **AUMENTO DA CARGA REATIVA**: Até o limite de excitação do gerador ou da excitatriz – acima disso, o gerador não consegue sustentar a tensão → queda na tensão gerada

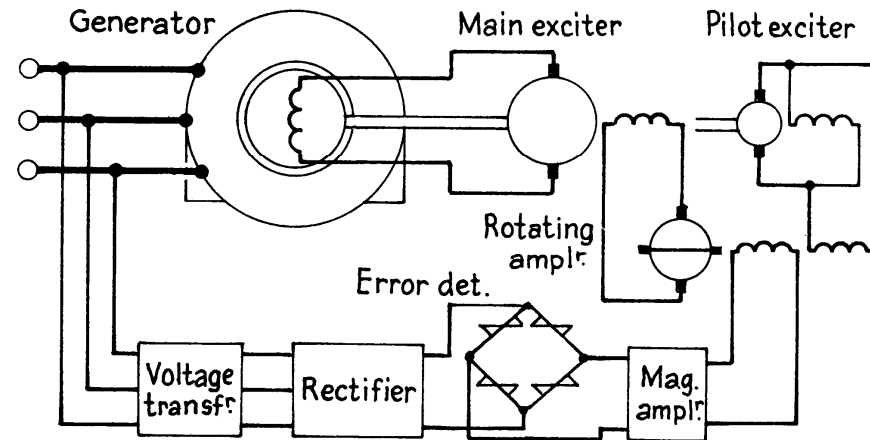
→ **NÃO SE CARACTERIZA PERDA DE SINCRONISMO**

→ **MODO DE OPERAÇÃO DA MÁQUINA EXCLUSIVAMENTE NO MODO GERADOR**

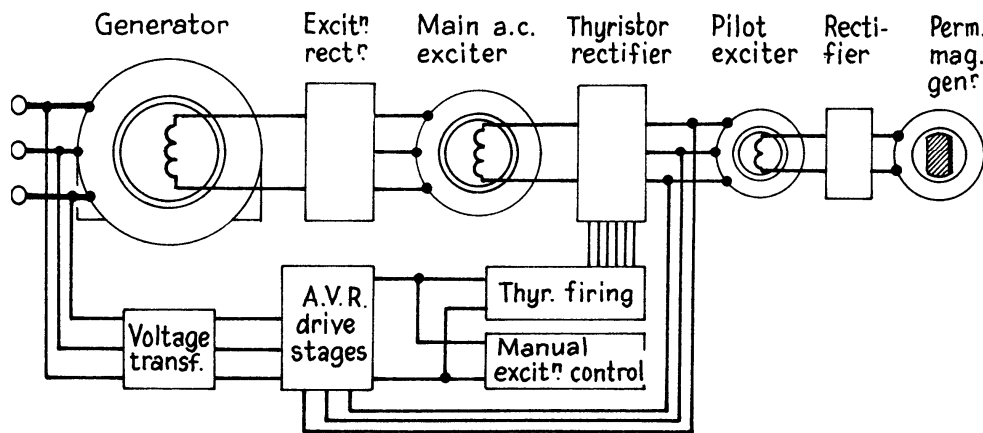
**SISTEMAS DE EXCITAÇÃO E REGULAÇÃO DE TENSÃO E VELOCIDADE DE MÁQUINAS SÍNCRONAS**



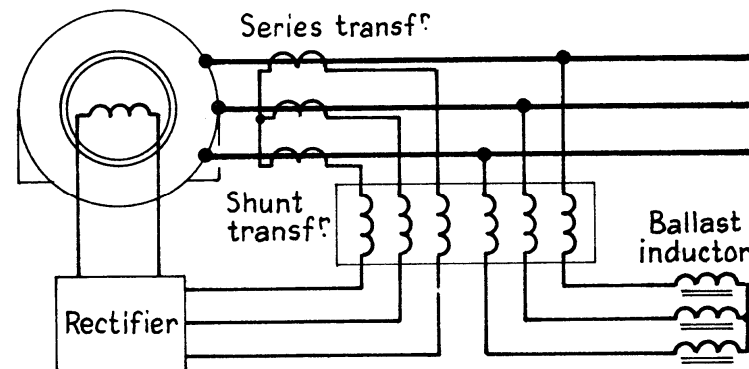
**Esquema básico de regulador de velocidade para turbina a vapor**



**Sistema de excitação para gerador – Excitatriz rotativa**



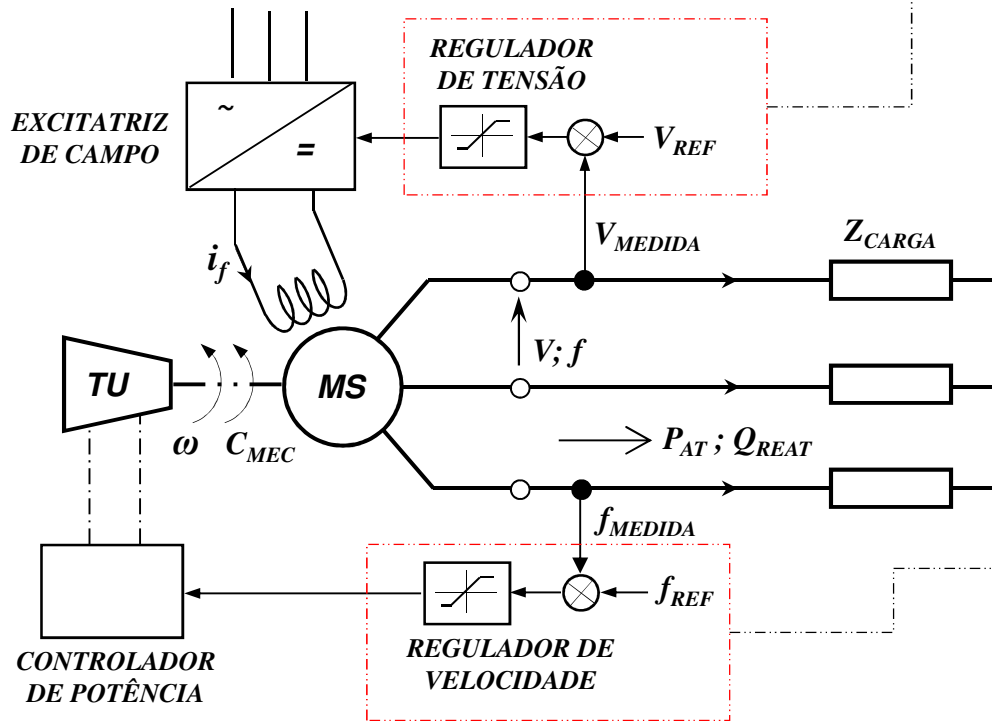
**Sistema de excitação com regulador de tensão - Sistema "Brushless"**



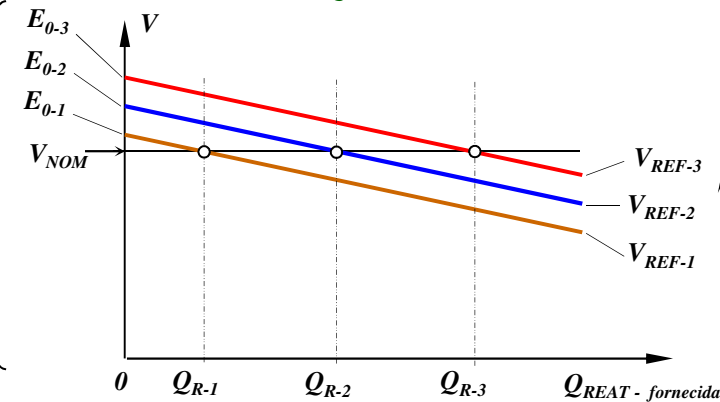
**Sistema de excitação - "Compound"**

**CARACTERÍSTICAS DE REGULAÇÃO DE TENSÃO E FREQUÊNCIA NAS MÁQUINAS SÍNCRONAS**

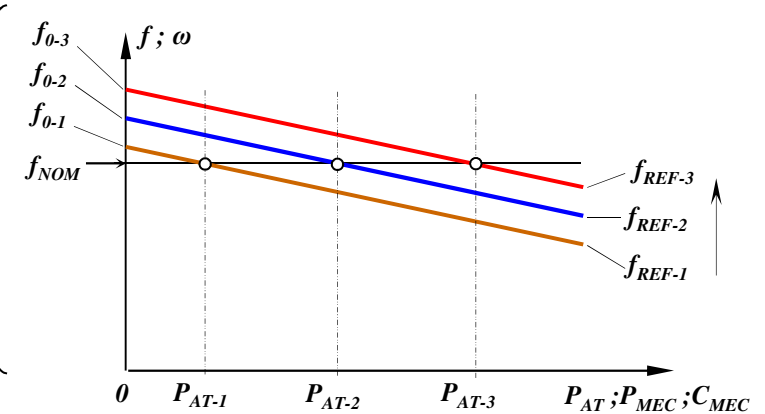
**CONTROLADORES ESTABELECEM CARACTERÍSTICAS DE REGULAÇÃO POSITIVA DA VARIÁVEL CONTROLADA EM FUNÇÃO DA CARGA → AJUSTE TÍPICO DE REGULAÇÃO : 2 % DO VALOR NOMINAL (V ou f) PARA POTÊNCIA 1 p.u.**



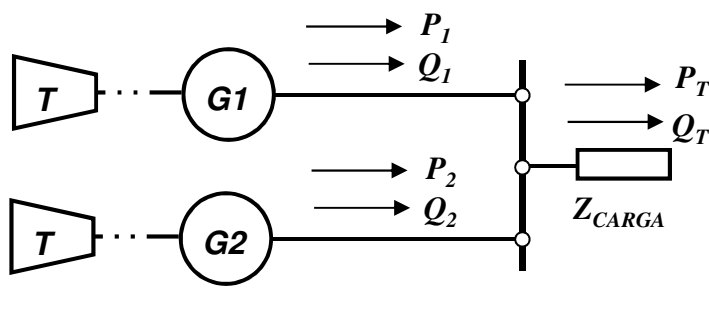
**REGULAÇÃO DE TENSÃO – V / kVar**



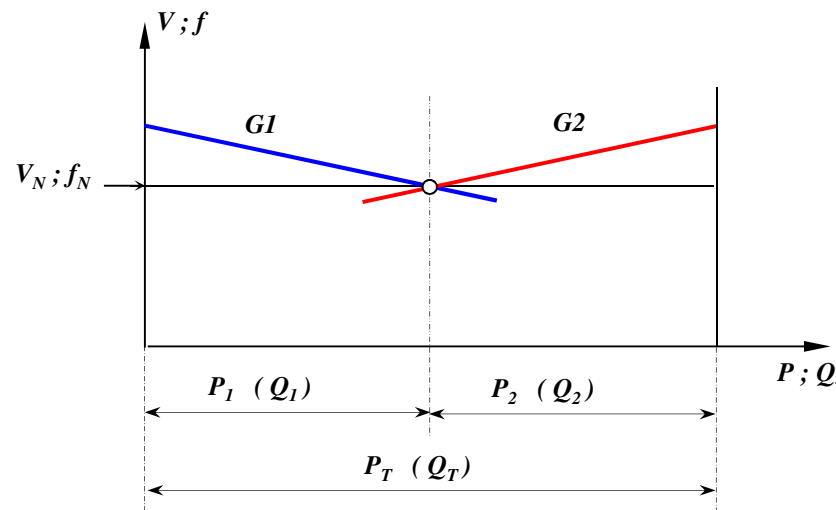
**REGULAÇÃO DE FREQUÊNCIA – Hz / kW**



**GERADORES OPERANDO EM PARALELO – ALIMENTAÇÃO DE CARGA ISOLADA**



- CADA GERADOR DOTADO DE :**
- **REGULADOR DE VELOCIDADE**
  - **REGULADOR DE TENSÃO**
  - **MEDIÇÃO DE POTÊNCIA ATIVA**
  - **MEDIÇÃO DE POTÊNCIA REATIVA**
  - **CONTROLE CENTRAL → DIVISÃO DE CARGA ATIVA E REATIVA**



**DOIS GERADORES COM MESMAS REFERÊNCIAS DE VELOCIDADE E TENSÃO:**

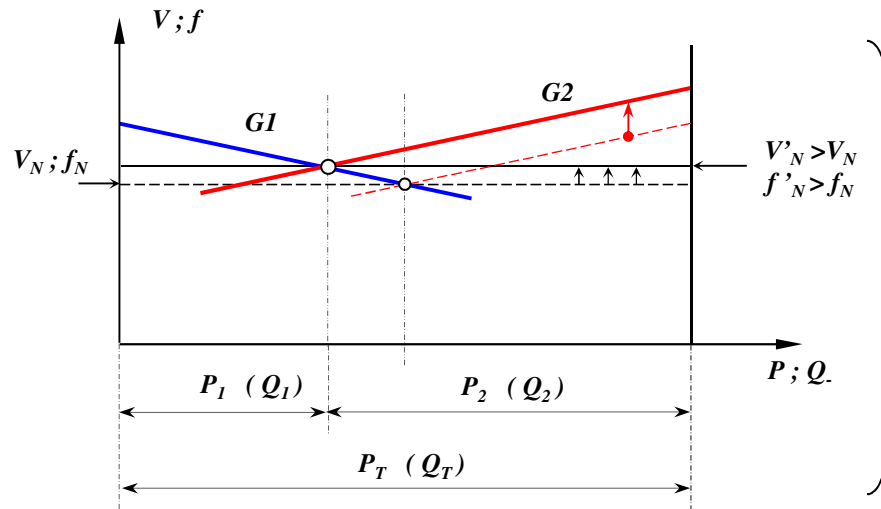
$$(f_{REF-1} = f_{REF-2} ; V_{REF-1} = V_{REF-2})$$

→ **DIVISÃO DE CARGA É EQUILIBRADA PARA GERADORES IDÊNTICOS**

$$\rightarrow P_1 = P_2 = P_T / 2 ; Q_1 = Q_2 = Q_T / 2$$



## GERADORES OPERANDO EM PARALELO – ALIMENTAÇÃO DE CARGA ISOLADA



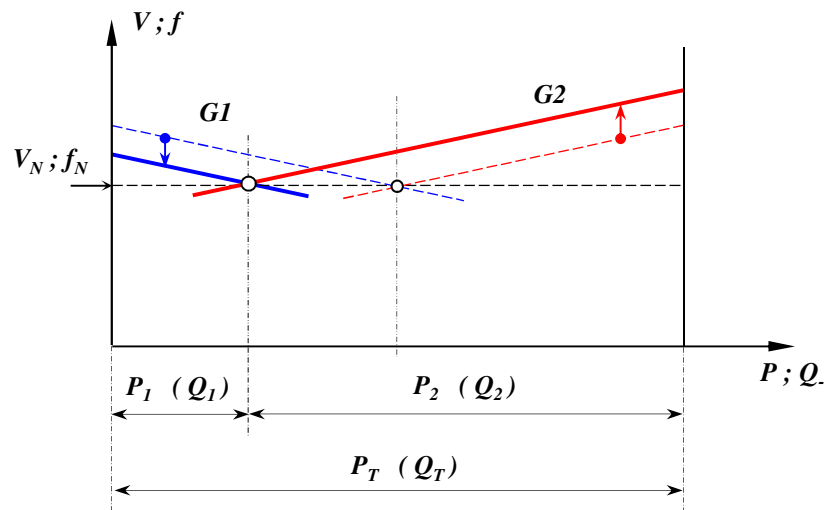
**AUMENTANDO APENAS A REFERÊNCIA DE G2:**

→ **DIVISÃO DE CARGA É ALTERADA**

→  $P_2 > P_1 \rightarrow P_1 + P_2 = P_T$  ;  $Q_2 > Q_1 \rightarrow Q_1 + Q_2 = Q_T$

→ **FREQÜÊNCIA AUMENTA PARA MESMA  $P_T$**

→ **TENSÃO AUMENTA PARA MESMA  $Q_T$**



**AUMENTANDO A REFERÊNCIA DE G2:**

**DIMINUÍDO A REFERÊNCIA DE G1:**

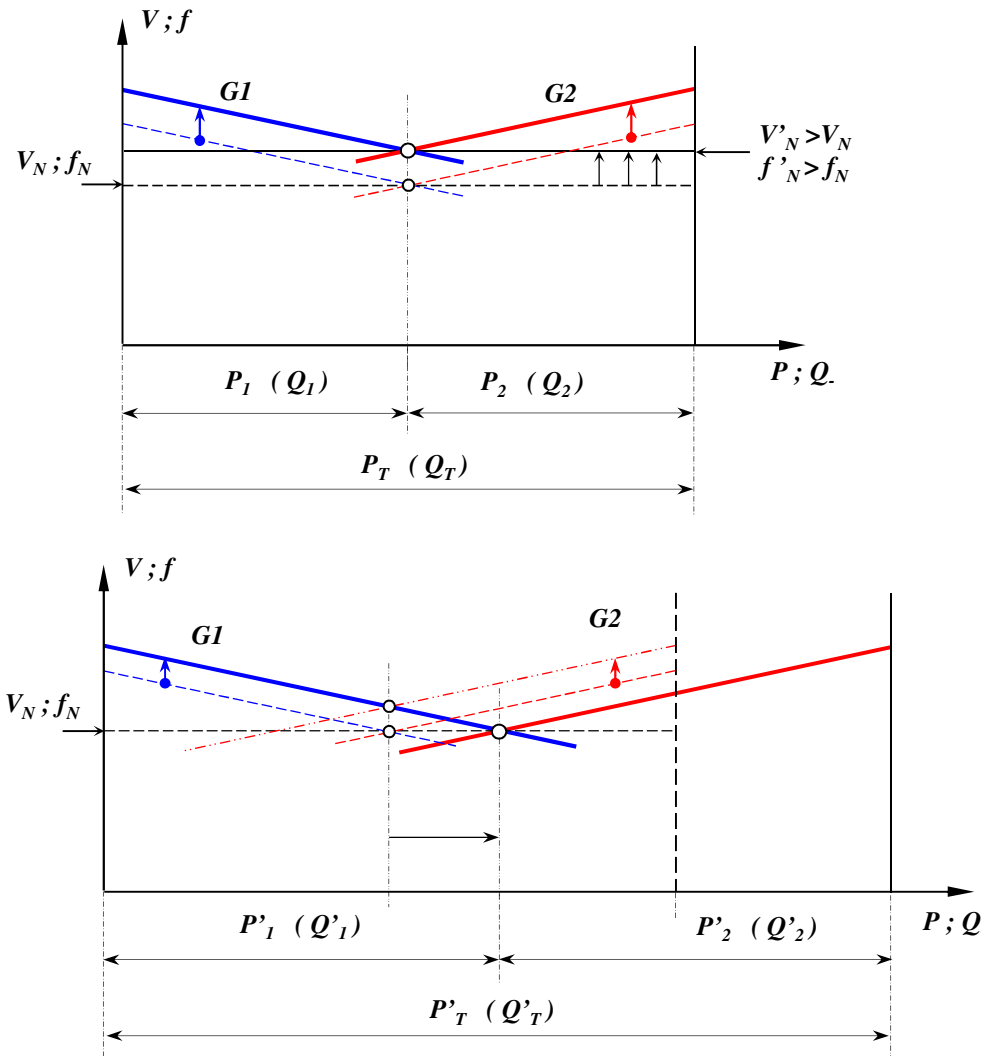
→ **DIVISÃO DE CARGA É ALTERADA**

→  $P_2 > P_1 \rightarrow P_1 + P_2 = P_T$  ;  $Q_2 > Q_1 \rightarrow Q_1 + Q_2 = Q_T$

→ **FREQÜÊNCIA CONSTANTE**

→ **TENSÃO CONSTANTE**

**GERADORES OPERANDO EM PARALELO – ALIMENTAÇÃO DE CARGA ISOLADA**



**AUMENTANDO AMBAS REFERÊNCIAS CONCOMITANTEMENTE:**

**→ DIVISÃO DE CARGA É EQUILIBRADA**

**→ FREQÜÊNCIA AUMENTA P/ MESMA  $P_T$**

**→ TENSÃO AUMENTA P/ MESMA  $Q_T$**

**→ PARA FREQÜÊNCIA E TENSÃO CONSTANTES E IGUAIS ÀS NOMINAIS:**

**→ AUMENTAM AS POTÊNCIAS**

$$\rightarrow P'_1 > P_1 ; P'_2 > P_2 \rightarrow P'_1 + P'_2 = P'_T$$

$$\rightarrow P'_1 = P'_2 = P'_T/2$$

$$\rightarrow Q'_1 > Q_1 ; Q'_2 > Q_2 \rightarrow Q'_1 + Q'_2 = Q'_T$$

$$\rightarrow Q'_1 = Q'_2 = Q'_T/2$$