

TESE

118

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

TESE DE MESTRADO



"REGULADORES DE TENSÃO E VELOCIDADE"
sua representação em estudos de estabilidade

1.^a PARTE

ORIENTADOR

Prof. JOSÉ ABEL ROYO DOS SANTOS

AUTOR

EDMUNDO ALFREDO POCHMANN DA SILVA

AOS MEUS PAIS

A G R A D E C I M E N T O

Torno público meus agradecimento à FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A., pela indicação do meu nome para o Curso de Engenharia de Sistemas Elétricos - EFEI - ELETROBRÁS (CESE IV), aos colegas José Wagner M. Kaehler e Paulo Gomes pela colaboração prestada, sem a qual este trabalho não teria sido possível, ao Prof. JOSÉ ABEL ROYO DOS SANTOS pela orientação dada no decurso de toda a elaboração do trabalho, ao desenhista Argemiro dos Santos e a datilógrafa Therezinha Rita Corrêa de Salles Dias pela presteza e eficiência na execução de suas tarefas, ao colega Marcos de Almeida Prado Lefèvre pela co-orientação da Tese e ao Professor Hêlio Mokarzel.

Itajubá, 30 de Novembro de 1976

EDMUNDO ALFREDO POCHMANN DA SILVA

ÍNDICE GERAL

| | PÁG. |
|------------|------|
| OBJETIVO | 1 |
| SIMBOLOGIA | 2 |

1ª PARTE

REGULADORES DE TENSÃO 16

| | |
|--|----|
| 1 - INTRODUÇÃO | 20 |
| 1.1 - Conceito de Estabilidade | 21 |
| 1.2 - O Sistema de Excitação e seu Diagrama de Bloco | 26 |
| 1.3 - Tipos de Sistemas de Excitação. | 29 |
| 1.4 - Custo dos Sistemas de Excitação. | 37 |
| 2 - INFLUÊNCIA DOS SISTEMAS DE EXCITAÇÃO (REGULADORES DE TENSÃO) NA ESTABILIDADE DO SISTEMA ELÉTRICO | 38 |
| 2.1 - Sua influência na Estabilidade | 39 |
| 2.2 - Fenômenos nos quais o Regulador (ou Sistema de Excitação) intervem. | 45 |
| 2.3 - Verificação da Influência dos Sistemas de Excitação (Reguladores de Tensão), em Estudos de Estabilidade. | 47 |
| 3 - MODELOS MATEMÁTICOS DOS SISTEMAS DE EXCITAÇÃO DO IEEE | 59 |
| 3.1 - Sistema por Unidade | 61 |
| 3.2 - Tipo 1 - Regulador e excitatriz de ação contínua | 64 |
| 3.3 - Função de Saturação | 66 |

| | |
|--|-----|
| 3.4 - Tipo 1S - Sistema de retificação controlada com fonte de potencial | 72 |
| 3.5 - Tipo 2 - Sistema de excitação com retificação rotativa. | 73 |
| 3.6 - Tipo 3 - Sistema de excitação estática com fonte terminal de tensão e corrente. | 75 |
| 3.7 - Tipo 4 - Sistema de excitação de atuação não contínua. | 77 |
| 3.8 - Outros sistemas | 78 |
| 3.9 - Outros sinais de entrada para o regulador | 79 |
| 3.10- Nomenclatura usada para o sistema de excitação. | 81 |
| | |
| 4 - FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA DE UM SISTEMA DE EXCITAÇÃO | 83 |
| | |
| 4.1 - Componentes de um Regulador de Tensão e suas Funções de Transferência | 84 |
| 4.2 - Determinação Experimental das Funções de Transferência | 100 |
| 4.2.1 - Método da Resposta Transitória | 100 |
| 4.2.2 - Método do Diagrama de Bode | 115 |
| 4.2.3 - Método da Correlação | 118 |
| | |
| 5 - ADAPTAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MODELO DE UM SISTEMA DE EXCITAÇÃO EM UM DOS MODELOS DO IEEE. | 122 |

2ª PARTE

REGULADORES DE VELOCIDADES

| | PÁG. |
|---|------|
| 1 - INTRODUÇÃO | 149 |
| 1.1 - Controle de Tensão e Frequência | 150 |
| 1.2 - Tarefas de Controle em Sistemas Elétricos | 150 |
| 1.2.1 - Sistema com uma só unidade geradora. | 151 |
| 1.2.2 - Estação com várias unidades geradoras | 152 |
| 1.2.3 - Sistema com interligações | 152 |
| 1.3 - Base do controle de Frequência | 153 |
| 1.4 - Tipos de Reguladores de Velocidade | 154 |
| 1.5 - Custo dos Reguladores de Velocidade | 157 |
| 2 - INFLUÊNCIA DOS REGULADORES DE VELOCIDADE EM ESTUDOS DE ESTABILIDADE | 163 |
| 3 - MODELOS MATEMÁTICOS DOS REGULADORES DE VELOCIDADE DO IEEE | 168 |
| 3.1 - Princípio dos Reguladores de Velocidade. | 169 |
| 3.2 - Modelo Geral para um Regulador de Velocidade. | 170 |
| 3.3 - Sistemas de Reguladores de Velocidade para Turbinas Hidráulicas | 174 |
| 3.4 - Sistemas de Reguladores de Velocidade para Turbinas a Vapor. | 180 |
| APÊNDICE I - Cálculo da constante de tempo da água | 182 |

| | |
|---|-----|
| APÊNDICE II - Notas sobre o cálculo da constante de inércia em estudos de estabilidade | 184 |
| 4 - FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA DE UM REGULADOR DE VELOCIDADE | 189 |
| 4.1 - Componentes de um Regulador de Velocidade e suas Funções de Transferência. | 190 |
| 5 - ADAPTAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MODELO DE UM REGULADOR DE VELOCIDADE EM UM DOS MODELOS DO IEEE. | 209 |

3^a PARTE

TIPOS DE MODELOS DISPONÍVEIS EM ALCUNS PROGRA-
MAS DE ESTABILIDADE

| | PÁG. |
|--|------|
| 1 - TIPOS DE MODELOS DE SISTEMAS DE EXCITAÇÃO DISPO- NÍVEIS EM ALCUNS PROGRAMAS DE ESTABILIDADE. | 215 |
| 2 - TIPOS DE MODELOS DE REGULADORES DE VELOCIDADE DIS- PONÍVEIS EM ALCUNS PROGRAMAS DE ESTABILIDADE | 259 |
| BIBLIOGRAFIA | 283 |

O B J E T I V O

x

Esta Tese tem por objetivo apresentar, de maneira didática, um estudo sobre reguladores de tensão e reguladores de velocidade, descrevendo seus modelos básicos, citando os tipos de modelos existentes em programas de estabilidade, a obtenção de suas funções de transferência e a adaptação dos parâmetros do modelo do regulador a um dos modelos básicos.

Em sua elaboração foram compiladas informações colhidas na bibliografia indicada.

Além dos objetivos apontados, a tese tem por finalidade familiarizar seu autor com um ramo de fundamental importância para estudos de estabilidade no setor de Sistemas de Potência da Engenharia Elétrica. Por se tratar basicamente de um trabalho inicial de coleta e análise de informações, este poderá servir como ponto de partida para um maior aprofundamento e desenvolvimento no estudo da matéria.

S I M B O L O G I A

| | | |
|-----------------|---|---|
| V_T | - | Tensão terminal do gerador |
| V_F | - | Tensão de campo do gerador |
| V_I | - | Tensão de saída do retificador e filtro. |
| V_E | - | Tensão de saída do comparador |
| V_C | - | Tensão produzida pela malha de compensação. |
| E_1, δ_1 | - | Tensão e ângulo da barra 1 |
| E_2, δ_2 | - | Tensão e ângulo da barra 2 |
| X_{12} | - | Reatância de transferência entre as barras 1 e 2. |
| E_{ex} | - | Tensão de excitação. |
| E_q | - | Tensão da máquina no eixo em quadratura |
| E'_q | - | Tensão transitória da máquina no eixo em quadratura |
| V_{FRC} | - | Tensão na barra FRC |
| V_{GA} | - | Tensão nos terminais do gerador GA. |
| V_{FIM} | - | Tensão na barra FIM |
| E_{FD} | - | Tensão de saída da excitatriz |
| I_{FD} | - | Corrente no campo do gerador |
| I_T | - | Corrente nos terminais do gerador |
| K_A | - | Ganho do regulador |

- K_E - Constante da excitatriz do campo auto-excitado.
- K_F - Ganho da malha estabilizadora do regulador.
- K_I - Ganho da malha de corrente para o sistema de excitação tipo 3.
- K_P - Ganho da malha de tensão para o sistema de excitação, tipo 3.
- K_V - Ajuste do contato de variação rápida para o sistema de excitação tipo 4.
- S_E - Função de saturação da excitatriz.
- $S_{E_{m\acute{a}x}}$ - Valor de S_E especificado para $E_{FD_{m\acute{a}x}}$
- $S_{E_{0,75}}$ - Valor de S_e especificado para $0,75 E_{FD_{m\acute{a}x}}$
- T_A - Constante de tempo do amplificador do regulador.
- T_E - Constante de tempo da excitatriz.
- T_F - Constante de tempo da malha estabilizadora do regulador.
- T_{F_1}, T_{F_2} - Constantes de tempo do circuito estabilizador do regulador (sistema de excitação com retificador rotativo).
- T_R - Constante de tempo do transdutor de entrada do regulador.
- T_{RH} - Constante de tempo do reostato para o sistema de excitação tipo 4.
- V_R - Tensão de saída do regulador.

- $T_{R_{\text{máx}}}$ - Valor máximo de V_R
- $T_{R_{\text{min}}}$ - Valor mínimo de V_R
- V_{REF} - Tensão de referência do regulador.
- V_{THEV} - Tensão obtida pela soma vetorial de sinais proporcionais à tensão e corrente para o sistema de excitação tipo 3.
- ΔV_T - Erro na tensão terminal do gerador
- KQ_1, KQ_2, KQ_3, KQ_4 - Ganhos dos sinais adicionais.
- V_1, V_2 - Tensões terminais do filtro no item 4.1.1 da 1ª parte
- R_1 - Resistência do filtro no item 4.1.1 da 1ª parte.
- C_1 - Capacitância do filtro no item 4.1.1 da 1ª parte.
- K_1 - Ganho estático do conjunto filtro e retificador.
- τ - Constante de tempo em razão da filtragem
- i_e - Corrente de entrada do amplificador.
- V_e - Tensão de saída da ponte do comparador
- i_a, i_b - Corrente através da ponte de diodos Zener
- R, R_L - Resistências do comparador.
- V_N - Tensão nos terminais do diodo Zener
- K_1 - Ganho do comparador
- KR_1 - Ganho do conjunto retificador-filtro-comparador.
- K_A - Ganho estático do amplificador magnético no item 4.1.3

- τ_A - Constante de tempo do amplificador magnético.
- R - Resistência total do campo da excitatriz do item 4.1.4
- N - Número de espiras do enrolamento de excitatriz
- ϕ_f - Fluxo do campo
- ϕ_a - Fluxo da armadura
- ϕ_d - Fluxo de dispersão
- C, K - Constantes de proporcionalidade
- i_g - Corrente que produz v_f dado pela linha do entre-ferro
- i_s - Corrente adicional para compensar o efeito da saturação
- Kg - Coeficiente angular da reta representativa da linha do entreferro.
- T_E - Constantes de tempo igual a $N(1+c)/K$
- K_E - Constantes igual a R/Kg
- R - Resistência do circuito de compensação
- C - Capacitância do circuito de compensação
- i - Corrente do circuito de compensação

- V_C - Tensão do enrolamento de controle do amplificador magnético.
- r - Resistência do enrolamento de controle do amplificador magnético.
- K_F - Constante do circuito de compensação e igual a rC no item 4.1.5 da 1ª parte.
- ζ_F - Constante de tempo do circuito de compensação e igual a $(R + r) C$.
- K_3 - Constante igual a $K_A \cdot KR_1$
- K_4 - Constante igual a $K_F / \zeta_F \cdot KR_1$
- $Y(S)$ - Sinal qualquer de saída.
- $X(S)$ - Sinal qualquer de entrada
- $P(S)$ - Função de transferência entre $Y(S)$ e $X(S)$.
- T - Constante de tempo qualquer
- A, B, C - Constantes
- ξ - Constante denominada de razão de amortecimento
- ν_n - Constante denominada de frequência natural não amortecida.

- ω_d - Constante denominada de frequência natural amortecida.
- M_P - Valor de sobrepasso (Overshoot)
- K_F - Constante do ajustador de Tensão - Capítulo 5 da 1ª Parte.
- T_F - Constante de tempo do ajustador de tensão - Capítulo 5 da 1ª Parte.
- K_A - Ganho do detetor de erro - Capítulo 5 da 1ª Parte
- T_A - Constante de tempo do detetor de erro - Capítulo 15 da 1ª Parte.
- K_{FV} - Ganho do amplificador de tensão do campo
- T_{FV} - Constante de tempo do amplificador de tensão do campo
- K_{ex} - Ganho do gerador de pulso de disparo
- K_P - Ganho da 2ª malha estabilizadora - Capítulo 5
- T_P - Constante de tempo da 2ª malha estabilizadora.
- K_{d1} - Ganho da 1ª malha estabilizadora
- T_{d1} - Constante de tempo da 1ª malha estabilizadora

| | | |
|------------|---|--|
| V_{CE} | - | Tensão máxima do Thyristor |
| $-V_{CE}$ | - | Tensão mínima do Thyristor |
| G_1, G_2 | - | Funções de transferência do regulador de tensão |
| G_3 | - | Função de transferência do amplificador de Thyristor |
| G_4 | - | Função de transferência da excitatriz |
| G_5 | - | Função de transferência da máquina síncrona |
| H | - | Função de transferência da malha estabilizadora |
| RV | - | Regulador de velocidade |
| RT | - | Regulador de tensão |
| MM | = | Máquina motriz |
| G | - | Gerador |
| f | - | Frequencímetro |
| v | - | Voltímetro |
| Δf | - | Variação de frequência |
| P | - | Variação de potência |
| e | - | Potência elétrica |

- P_m - Potência mecânica
 P_r - Potência de referência
 w_r - Frequência de referência
 R - Velocidade de amortecimento (speed-droop)
 $G, 1/R$ - Ganho de regime permanente do regulador de velocidade
 v - Quantidade de movimento da válvula de admissão
 Δw - Variação de velocidade
 K - Ganho total efetivo do sistema de regulação
 T_1, T_2, T_3 - Constantes de tempo do regulador de velocidade
 $\left. \begin{array}{l} P_{up} \\ P_{down} \end{array} \right\}$ - Limites de taxa de variação de potência, impostos pelos limites de válvula de controle
 $\left. \begin{array}{l} P_{max} \\ P_{min} \end{array} \right\}$ - Limites de potência incremental impostos pelo curso de válvula principal ou pela posição das palhetas da turbina.
 $\left. \begin{array}{l} P_{max} \\ P_{min} \end{array} \right\}$ - Limites de potência impostos pelo curso da válvula principal ou pela posição das palhetas da turbina.
 P_{CV} - Potência na saída da válvula ou das palhetas
 S - Operador de Laplace

- EH - Eletro-hidráulico
- SR - Velocidade de referência
- T_F - Constante de tempo da válvula piloto
- T_G - Constante de tempo da válvula do servomotor
- T_R - Constante de tempo de amortecimento
- δ - Coeficiente de amortecimento da velocidade transitória.
- σ - Coeficiente de amortecimento da velocidade permanente.
- C_V - Posição da válvula principal
- T_W - Constante de tempo da água
- H - Constante de inércia
- T_A - Constante de tempo e igual a $T_R \cdot T_G / \sigma$
- T_B - Constante de tempo e igual a:
- $$\frac{1}{\sigma} \left[(\delta + \sigma) T_R + T_G \right]$$
- KG - Igual a K.
- K_P - Ganho associado com a retroação do fluxo de vapor

- M_{HP} - Fluxo de vapor da turbina de alta pressão
- T_{SM} - Constante de tempo da posição da válvula do servo - motor.
- $C_{Vaberto}$ }
 $C_{Vfechado}$ } - taxas limites da válvula de comando de injeção
- C_{Vmax} }
 C_{Vmin} } - limites das posições da válvula de comando de injeção
- C_V - Posição efetiva da válvula do regulador controlado
- V - Velocidade da água
- H_T - Altura total, medida em relação ao nível de água na tomada d'água e ao nível médio da água no canal de fuga.
- g - Aceleração da gravidade
- L - Comprimento do conduto forçado
- η_T - Eficiência da turbina
- η_G - Eficiência do gerador
- A - Área do conduto forçado, no Apêndice I

- H_e - Constante de inércia de \underline{n} máquinas em paralelo na base N_T
- w_T - Energia cinética total.
- N_T - Potência total de \underline{n} máquinas
- PD^2 - Momento de inércia do rotor e da turbina
- RPM - Número de rotações por minuto
- N - Potência da máquina em MVA
- L_1, L_2 - Indutâncias do circuito do detetor de velocidade
- C_1, C_2 - Capacitâncias do circuito do detetor de velocidade
- f_o - Frequência fundamental
- e_{fd} - Tensão em CC proporcional ao desvio de frequência, na saída do detetor de velocidade.
- K_o - Ganho do detetor de velocidade
- T_o - Constante de tempo do detetor de velocidade, em razão do atraso da filtragem.
- D_1 - Ganho do potenciômetro ajustável do circuito de retorno rígido (ajuste de amortecimento (droop)).
- D_o - Ganho estático do retorno rígido.

- E_1, E_2, E_3 - Tensões do circuito do retorno flexível.
- X - Deslocamento da haste do servo-motor auxiliar
- A_1 - Ganho em razão do ajuste do potenciômetro.
- A_2 - Ganho igual a razão entre E_3 e E_2
- T_1 - Constante de tempo igual a RC , do item 4.1.4 da 2^a parte.
- Y_1 - Deslocamentos da haste de acoplamento mecânico
- Y_2 - Deslocamento da haste da válvula piloto
- K_2 - Ganho do amplificador eletrônico
- K_3 - Ganho do transdutor, no item 4.1.5 da 2^a parte.
- T_2 - Constante de tempo de atraso do solenoide, no item 4.1.5 da 2^a parte.
- Q_1 - Vazão do óleo no orifício
- P_1 - Pressão na câmara inferior do pistão
- P_2 - Pressão na câmara superior do pistão
- a, b - Constantes de proporcionalidade
- A - Seção do pistão do servomotor no item 4.1.5 da 2^a

parte.

- M - Massa total no eixo do pistão
- F - Força
- \dot{x} - Velocidade da haste do servo-motor auxiliar
- K_4' - Ganho igual a a/A
- T_4 - Constante de tempo igual a $bM/2A^2$
- r, s - Distâncias na haste de acoplamento mecânico
- K_4 - Constante de tempo igual a $(s/r) \cdot K_4'$
- p_u - Pressão de alimentação
- p - Pressão da câmara 1
- A_1 - Seção útil da câmara 1
- A_2 - Seção útil da câmara 2
- x_1 - Posição da haste de comando
- x_2 - Posição do êmbolo
- t_g - Constante de tempo igual a A_1/a

- a - Constante de proporcionalidade do item 4.1.6 da 2^a parte, e igual a $K \sqrt{p_u - p_o}$
- K_5 - Ganho da válvula e do servo-motor principal
- T_5 - Constante de tempo da válvula e do servo-motor principal
- Z - Deslocamento da haste que comanda as palhetas
- K_6 - Ganho da realimentação proporcional



1ª PARTE

"REGULADOR DE TENSÃO"

(Sistema de Excitação)

1.^a PARTE

"REGULADORES DE TENSÃO"

| | PÁG. |
|---|------|
| 1 - INTRODUÇÃO | 20 |
| 1.1 - Conceito de Estabilidade | 21 |
| 1.2 - O sistema de excitação e seu diagrama de bloco. | 26 |
| 1.3 - Tipos de sistemas de Excitação | 29 |
| 1.4 - Custo dos sistemas de excitação. | 37 |
| 2 - INFLUÊNCIA DOS SISTEMAS DE EXCITAÇÃO (REGULADORES DE TENSÃO) NA ESTABILIDADE DO SISTEMA ELÉTRICO. | 38 |
| 2.1 - Sua influência na estabilidade. | 39 |
| 2.2 - Fenômenos nos quais o Regulador (ou Sistema de Excitação) intervem | 45 |
| 2.3 - Verificação da influência dos Sistemas de Excitação (reguladores de tensão) em Estudos de Estabilidade. | 47 |
| 3 - MODELOS MATEMÁTICOS DOS SISTEMAS DE EXCITAÇÃO DO IEEE | 59 |
| 3.1 - Sistema por unidade | 61 |
| 3.2 - Tipo 1 - Regulador e excitatriz de ação contínua. | 61 |

| | |
|--|-----|
| 3.3 - Função de Saturação | 66 |
| 3.4 - Tipo 1S - Sistema de retificação controlada com fonte de potencial. | 72 |
| 3.5 - Tipo 2 - Sistema de excitação com retificação rotativa. | 73 |
| 3.6 - Tipo 3 - Sistema de excitação estática com fonte terminal de tensão e corrente | 75 |
| 3.7 - Tipo 4 - Sistema de excitação de atuação não continua. | 77 |
| 3.8 - Outros sistemas | 78 |
| 3.9 - Outros sinais de entrada para o regulador | 79 |
| 3.10- Nomenclatura usada para o sistema de excitação | 81 |
| 4 - FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA DE UM SISTEMA DE EXCITAÇÃO | 83 |
| 4.1 - Componentes de um regulador de tensão e suas funções de transferência | 84 |
| 4.2 - Determinação Experimental das funções de transferência | 100 |
| 4.2.1 - Método da Resposta Transitória | 100 |
| 4.2.2 - Método do Diagrama de Bode | 115 |
| 4.2.3 - Método da Correlação | 118 |

PÁG.

5 - ADAPTAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MODELO DE UM SISTEMA
DE EXCITAÇÃO EM UM DOS MODELOS DO IEEE

122

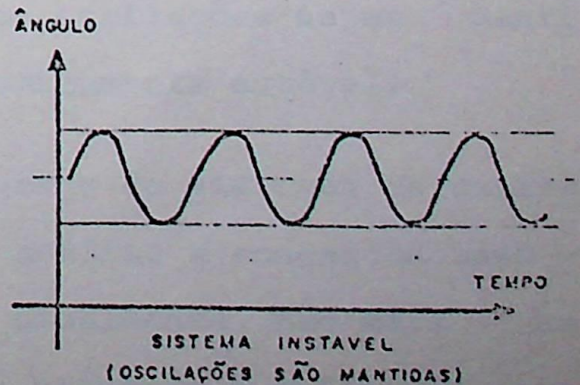
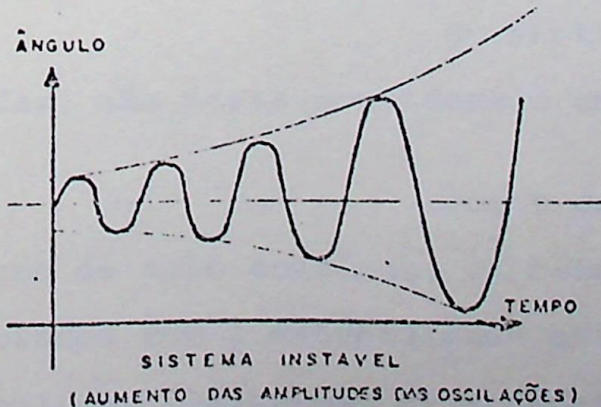
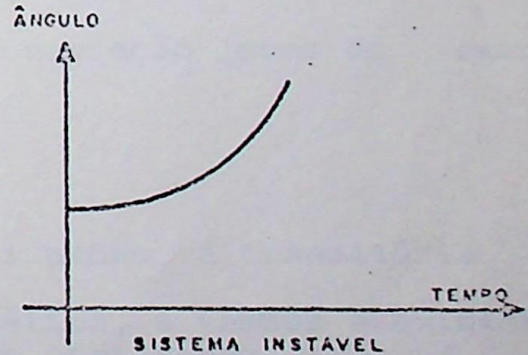
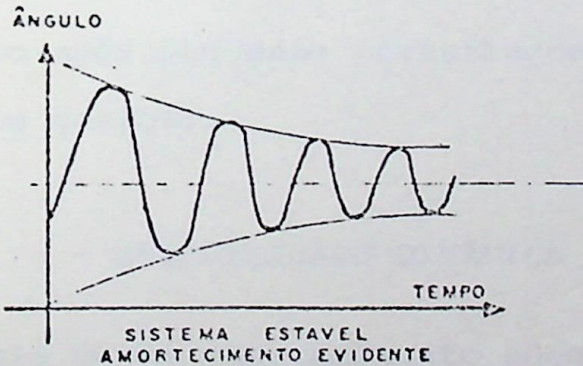
1 - INTRODUÇÃO

1 - INTRODUÇÃO

1.1 - CONCEITO DE ESTABILIDADE

Entende-se por estabilidade a capacidade de um sistema de produzir, durante perturbações, forças de forma a restabelecer seu equilíbrio.

Durante perturbações, os ângulos internos das máquinas deslocam-se entre si no decorrer do tempo (vide observação no final do item 1.1). Na figura abaixo estão indicados alguns tipos de oscilações, que são a resposta do sistema à perturbação.



Outra definição de estabilidade seria a capacidade que possuem os sistemas de potência, de operar to das as suas máquinas síncronas em sínronismo, tanto em re gime permanente como depois de distúrbios.

Tem sido comum, na prática, separar-se os fenômenos de estabilidade em grupos, nos quais as técnicas de simulação e os modelos do sistema são diferentes.

- ESTABILIDADE TRANSITÓRIA - é a capacidade que tem o sis tema de permanecer em sínronismo após grandes perturbações, como por exemplo, curtos circuitos, desligamentos de linhas ou de máquinas, ou mesmo grandes cargas.

- ESTABILIDADE ESTÁTICA - é a capacidade que tem o sis tema de permanecer em sínronismo após pequenas perturbações, como variação leves de cargas ou geração.

- ESTABILIDADE DINÂMICA - inclui ambas, a transitória e a estática, e também a existência de um amortecimento adequado das oscilações.

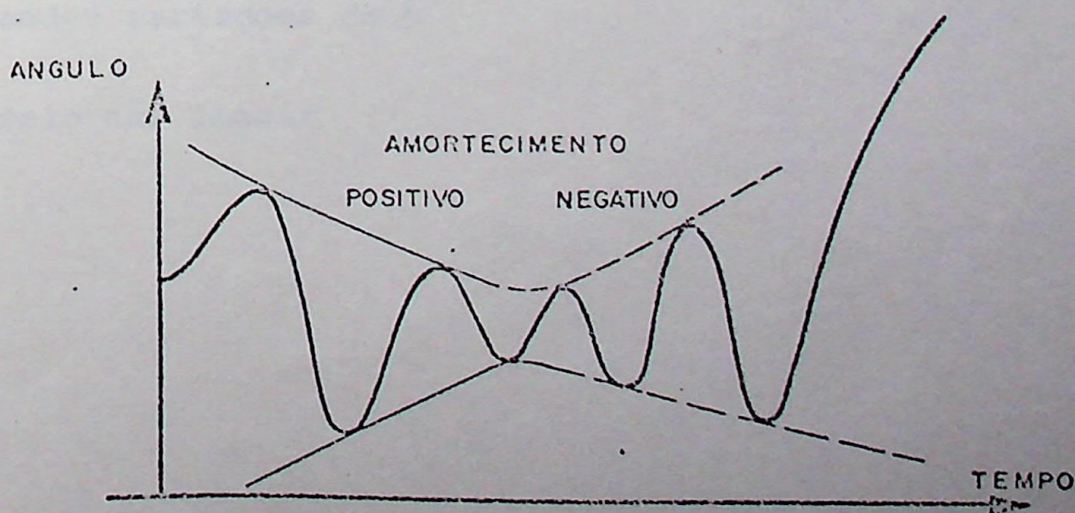
Um sistema cujas oscilações sejam manti das, não seria considerado como dinamicamente estável.

Com o amplo emprego de sistemas de excitação de ação contínua, os métodos de análise e conceitos associados com a estabilidade estática, usualmente, não mais se aplicam à sistemas de potência. Esta situação é enfatizada com a tendência atual de usar-se sistemas de excitação com constantes de tempo próximas de zero. Entretanto, a compreensão des

ses conceitos é ainda importante em razão deles se aplicarem quando os reguladores automáticos de tensão estão fora de serviço.

Em razão dos efeitos dos sistemas de excitação de ação contínua serem significantes nos limites de estabilidade estática, e porque o comportamento do sistema no limite de estabilidade e além do mesmo é tão diferente, um novo termo é aplicado a esta situação que denomina-se de ESTABILIDADE DINÂMICA.

Deve salientar-se que, durante grandes perturbações, o sistema pode não perder de imediato o sincronismo. Entretanto, ao evoluir para uma nova condição de regime, as oscilações que tinham amortecimento positivo passam a tê-lo negativo, o que pode levar a uma perda de sincronismo ou, às vezes, ao retorno a um amortecimento positivo e logo após outro negativo. Neste caso temos o fenômeno denominado BATIMENTO.



Podemos reunir as tres classificações do seguinte modo:

ESTABILIDADE

Estado Permanente

s/ação dos reguladores (estabilidade estática)

c/ação de reguladores (estabilidade dinâmica).

- Pequenas variações de δ

- Modelo linear

- Diagrama de blocos

Estado Transitório

s/ação dos reguladores (estabilidade transitória).

c/ação dos reguladores (estabilidade em estado transitório com ação de reguladores).

- Grandes variações de δ

- Modelo não linear

OBSERVAÇÃO

Os ângulos internos das máquinas que se deslocam entre si no decorrer do tempo também são os ângulos entre as f.e.m., dos geradores síncronos.

Normalmente determina-se a posição angular do rotor de máquina (ângulo θ) em função do tempo, em relação a um eixo estacionário no estator. É mais conveniente, medir a posição angular δ em relação a um eixo de referência girando com a velocidade síncrona, isto é, fixo no rotor.

$$\delta = \theta - \omega_1 t$$

ω_1 - velocidade síncrona nominal.

Então, no caso de várias máquinas, o ângulo δ representa o ÂNGULO RELATIVO entre os rotores das mesmas.

1.2 - O SISTEMA DE EXCITAÇÃO E SEU DIAGRAMA DE BLOCO

Inicialmente é necessário definir o que se entende por "sistema de excitação". Ele compreende não apenas o equipamento e a máquina que realiza a excitação do campo do gerador, mas também todos aqueles elementos que são aptos e necessários a regular a excitação, de modo a realizar todas as ações de controle, do funcionamento do gerador, possíveis através do campo.

O fato de não se distinguir, com termos técnicos diferentes, a "Excitação Verdadeira" do "regulador automático de tensão", é apenas uma questão de terminologia, mas também um problema decorrente da própria integração construtiva dos 2 órgãos.

As funções que se exige de um "sistema de excitação", são de dois tipos:

- 1) aumentar os limites de estabilidade;
- 2) controlar a tensão na condição de subexcitação, seja na energização de linhas longas ou na rejeição de carga

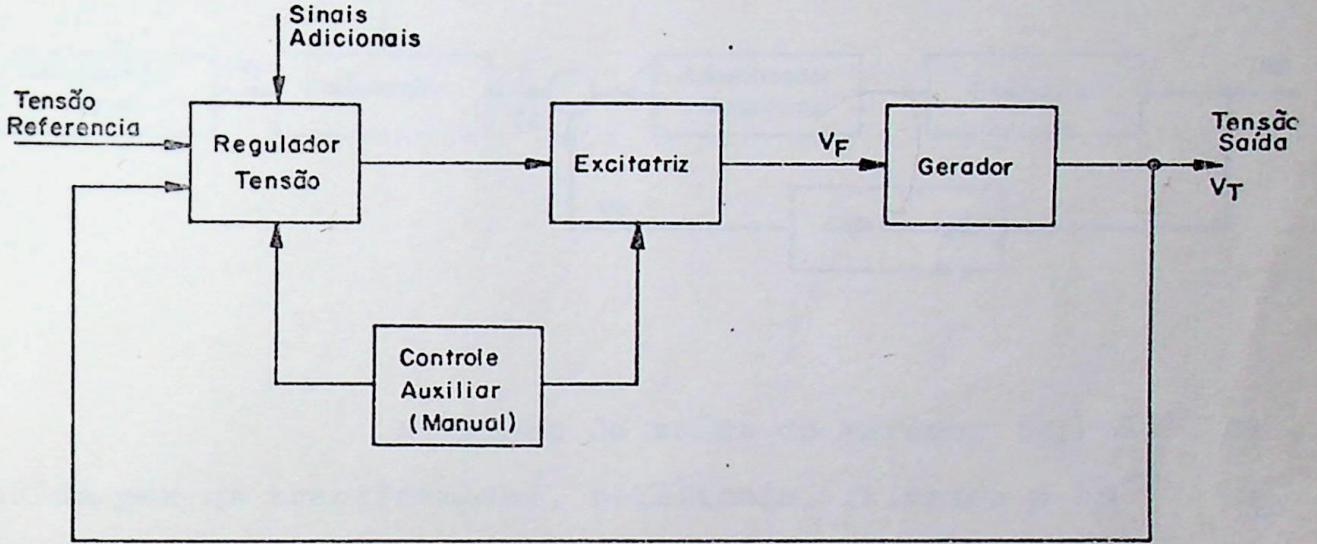
Em ambos os casos se pede ao sistema de excitação 2 características:

- capacidade de variar rapidamente a tensão de excitação, do gerador principal;
- capacidade de variá-la numa faixa ampla positiva e negativa.

A primeira característica é ligada principalmente ao ganho dinâmico do componente final do sistema de

excitação. A segunda, ao limite de saturação do estado final isto é, aos limites positivo e negativo (ceilings).

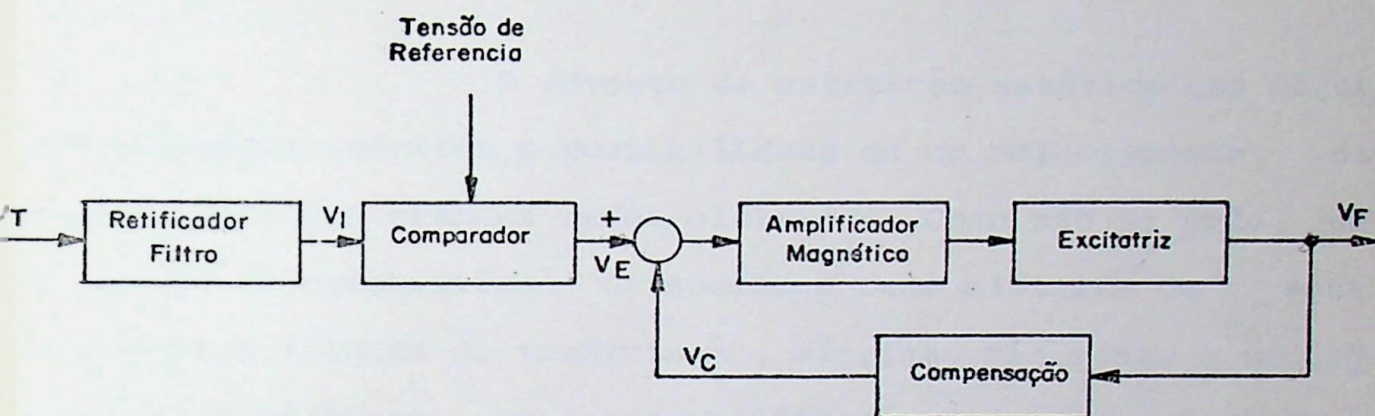
Podemos esquematicamente representar o sistema de controle de tensão pelo seguinte diagrama.



O regulador de tensão basicamente compara a tensão de referência com a tensão de saída do gerador e controla a saída da excitatriz de modo a manter a tensão do gerador próxima do valor desejado.

DIAGRAMA DE BLOCO DE CONTROLE AUTOMÁTICO

Sem levarmos em conta o controle manual, um diagrama mais detalhado do controle automático será:



A tensão de saída do gerador (V_T) é diminuída por um transformador, retificada, filtrada e em seguida comparada com a tensão de referência, resultando, assim, um sinal de êrro que, juntamente com um sinal produzido pela malha de compensação, é amplificado pelo Amplificador Magnético, que por sua vez alimenta o campo da excitatriz.

1.3 - TIPOS DE SISTEMAS DE EXCITAÇÃO

Os sistemas de excitação tiveram, a partir de 1955 a 1960, um grande avanço em razão, sobretudo, da introdução de elementos estáticos em sua cadeia de excitação.

O advento da excitação estática das máquinas síncronas suscitou a possibilidade de um melhoramento da estabilidade das grandes redes elétricas. Como não se pode, em um estudo de estabilidade, dissociar a rede elétrica de seus componentes (linhas de transmissão, máquinas síncronas e controles destas máquinas), qualquer modificação de cada um destes parâmetros poderá ter uma influência notável sobre o comportamento da rede. Ainda que todos os esforços para melhorar a estabilidade das redes tenham tradicionalmente levado à modificação dos parâmetros das máquinas e ao reforço das redes de transmissão, não se deve concluir que os sistemas de controle das máquinas sejam somente acessórios e exerçam apenas efeitos secundários sobre a estabilidade das redes. Com efeito, somente os desenvolvimentos técnicos dos últimos anos puderam oferecer sistemas de controle bastante rápidos para influenciarem o comportamento das redes. Enquanto as modificações dos parâmetros das máquinas não puderem ser feitas, a não ser dentro de certos limites, e o reforço das redes de transmissão implicar em investimentos consideráveis, o controle eficaz das máquinas pode a pouco custo influenciar favoravelmente a estabilidade das grandes redes elétricas.

Se por um lado, o problema de custo levou ao sistema de excitação os elementos estáticos, por outro lado um maior conhecimento da importância dos sistemas de excitação no comportamento do conjunto Máquina-Rede, seja no aspecto "estabilidade", seja no aspecto "controle das sobretensões à frequência industrial", fez convergir o interesse para as soluções que aliem a alta velocidade de resposta a um elevado grau de confiabilidade.

Além disso, o aumento da potência unitária dos grupos e ao aumento global da potência por usina impuseram a necessidade de se obter um elevado grau de confiabilidade tanto para as unidades geradoras, como para seus componentes fundamentais, isto é, os sistemas de excitação.

Delinearemos agora, um panorama dos tipos de componentes dos sistemas de excitação atualmente em uso.

1.3.1 - QUANTO ÀS EXCITATRIZES PRINCIPAIS E PILOTO

A excitatriz principal poderá pertencer a uma das seguintes categorias:

- tipo estático
- tipo rotativo

TIPO ESTÁTICO - neste tipo de excitatriz o campo é alimentado diretamente pelos retificadores estáticos e dependendo do tipo de escolha de conversores, se pode ter unidirecionalidade de controle em tensão e corrente (Ponte Mista), b

direcionalidade em tensão e unidirecionalidade em corrente (Ponte completa, onde a tensão negativa só é obtida transitoriamente), e bidirecionalidade em tensão e corrente - (Dupla ponte). A escolha de um tipo ou outro depende das características exigidas do sistema de excitação, do sistema no qual a máquina está ligada, das complicações construtivas e de uma análise econômica.

Os tipos de excitação estática podem ser distinguidos dependendo de sua alimentação, isto é, da fonte de energia que alimenta o retificador. Com isto, se pode ter:

- a) alimentação somente através da tensão nos terminais da máquina ;
- b) alimentação com sinal proporcional à tensão nos terminais, composto com sinal proporcional à corrente nos terminais da máquina.

TIPO ROTATIVO - Nesta classe pode distinguir-se dois tipos:

- a) sistema com dínamo coaxial
- b) sistema com alternador e retificador

a) Este tipo é a solução clássica, e o dínamo é coaxial com o gerador (diretamente ou com redutor) sendo excitado diretamente pelo regulador automático (do tipo estático com tiristores). Este, por sua vez, é alimentado por um gerador de imã permanente.

As vantagens e desvantagens deste tipo são:

VANTAGENS

- máxima segurança no que se refere à fonte de alimentação, seja do campo, seja do regulador.
- disponibilidade natural de tensão e corrente em ambos os sentidos.

DESVANTAGENS:

- a rapidez de resposta está ligada à constante de tempo dos dínamos, isto é, estes podem ter elevados valores limites, embora a velocidade com que são atingidos, possa ser limitada.
- a instalação coaxial do dinamo e do gerador de imã permanente pode apresentar problemas de espaço físico.

Existem algumas modificações destes esquemas com um grupo conversor constituído de motor assíncrono e dínamo. O motor assíncrono é alimentado pelo serviço auxiliar, ou por gerador no eixo.

Além disso, as excitatrizes principais rotativas poderão pertencer a um dos seguintes tipos:

- com excitação própria ou auto-excitada.
- com excitação separada.

b) Na realidade, trata-se de uma variação do dínamo. Existem duas soluções do ponto de vista construtivo:

- diodos de retificação fixos
- diodos de retificação girantes, montados diretamente no rotor

As vantagens e desvantagens deste tipo

são:

VANTAGENS

- nos turbo-geradores rápidos não é necessário o redutor , como no caso do dínamo.
- ganho dinâmico superior.
- constantes de tempo do alternador que podem ser menores.

DESVANTAGENS

- são as mesmas do sistema com dínamo.
- os diodos são unidirecionais, não sendo possível a obtenção de tensão e corrente negativas (para diodos fixos isto não acontece).

Uma aplicação desse tipo de sistema é o "BRUSHLESS", que possui os diodos montados diretamente sobre o rotor, sendo entretando o alternador do tipo "INDUTOR ROTATIVO", onde são eliminados os coletores e anéis.

EXCITATRIZ PILOTO

A excitatriz piloto pode ser de dois tipos:

- convencional
- rotativa amplificadora

A excitatriz que possui excitação separada pode operar com mais estabilidade, em regime de baixas tensões, do que outra que possui excitação própria. É caso bastan

te comum um gerador ser solicitado a carregar uma linha de transmissão de alta tensão, longa, de capacitância elevada e pouco carregada. Nestes casos, se a excitação do gerador for diminuída pela redução da tensão da excitatriz auto-excitada, esta poderá tornar-se instável. Por outro lado, as excitatrizes com excitação separada são de resposta mais rápida.

1.3.2 - QUANTO AOS REGULADORES DE TENSÃO

Para os tipos não eletrônicos, podemos ter reguladores de:

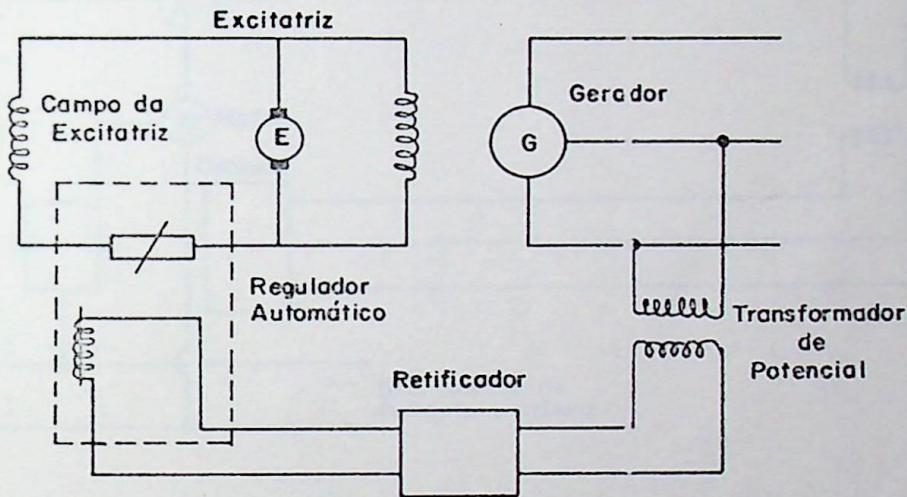
- ação direta
- ação indireta.

O tipo de atuação direta é usualmente utilizado em sistemas de excitação cujas excitatrizes são auto-excitadas, e isto se dá, geralmente, em geradores elétricos de pequeno porte.

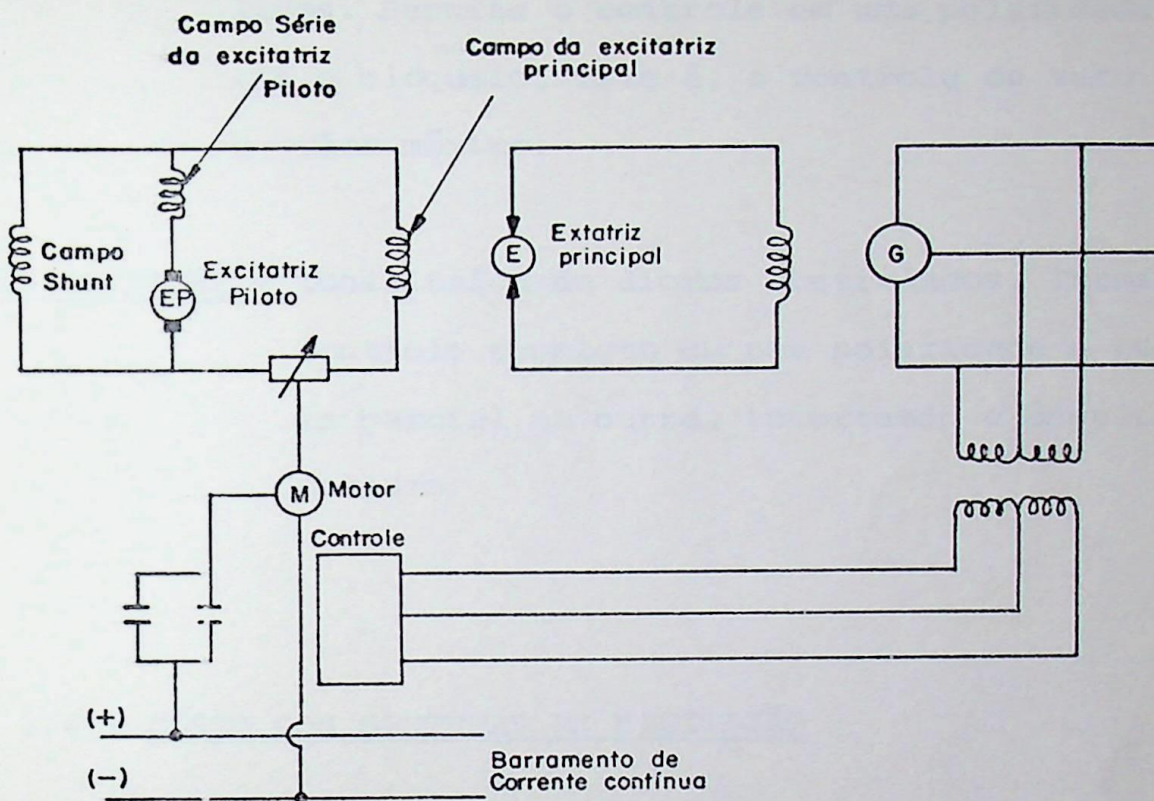
O tipo de atuação indireta é usualmente utilizado em sistemas de excitação cujas excitatrizes possuam excitatrizes piloto convencionais.

Um regulador automático de tensão do tipo de atuação direta pode ser representado desprezando-se os vários equipamentos auxiliares, conforme esquematizado na figura abaixo. O secundário de um transformador de potencial, ligado aos terminais do gerador, transmite as variações de tensão a um retificador. A corrente contínua fornecida por este retificador atua num dispositivo eletro-mecânico, que insere uma maior ou menor resistência no campo da excitatriz,

controlando desta forma, e excitação fornecida ao campo do gerador. Portanto, neste regulador, o dispositivo que é sensibilizado pela variação de tensão atua diretamente no reostato, (que faz parte do regulador), variando e sua resistência, razão por que se denomina de "atuação direta".



Um regulador automático de tensão do tipo de atuação indireta pode ser esquematizado, suprimindo-se os vários equipamentos auxiliares, conforme figura abaixo. O secundário dos transformadores de potencial, ligado aos terminais do gerador, transmite a variação de tensão a uma chave de comando de um motor, que insere maior ou menor resistência, no campo da excitatriz piloto.



1.3.3 - QUANTO AO AMPLIFICADOR

- tipo magnético, amplidino, etc.
- tipo eletrônico.

Nos novos reguladores, os amplificadores, são todos do tipo eletrônico, os quais nada mais são do que retificadores que alimentam o campo da excitatriz.

Quanto ao tipo de ponte de retificação, podemos citar três:

PONTE SIMPLES - constituída somente de diodos; não é controlável e retifica sempre com a mesma amplificação. Não pode ter nem tensão nem corrente negativa

ISTA - constituída de diodos em série com diodos controlados. Permite o controle em uma polaridade até o bloqueio, isto é, o controle de zero até o valor máximo.

COMPLETA - constituída de diodos controlados. Permite o controle completo em uma polaridade e controle parcial na outra, invertendo o ângulo de disparo.

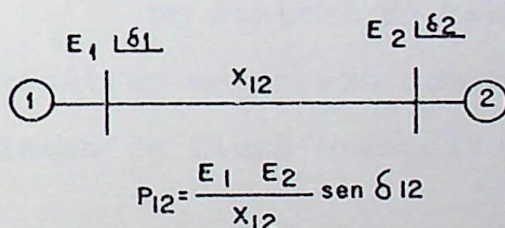
1.4 - CUSTO DOS SISTEMAS DE EXCITAÇÃO

Este pode variar entre 3 a 5% do preço do custo do gerador. Portanto, em face do baixo custo, da importância de tais sistemas e do custo de eventuais falhas nos mesmos (baixa confiabilidade), nunca se deveria fazer economia nos "sistemas de excitação".

2 - INFLUÊNCIA DOS SISTEMAS DE EXCITAÇÃO (REGULADORES DE TENSÃO) EM ESTUDOS DE ESTABILIDADE

2.1 - SUA INFLUÊNCIA NA ESTABILIDADE

O aumento da velocidade de resposta de excitação foi um dos primeiros meios sugeridos e aplicados para melhorar a estabilidade dos sistemas de potência. O sistema de excitação afeta a estabilidade tanto nas condições transitórias como nas de regime permanentes. Podemos entender, isto, sabendo-se que a potência transmitida num sistema de duas máquinas é, de acordo com a equação aproximada, proporcional ao produto das tensões internas das duas máquinas, dividido pela reatância.



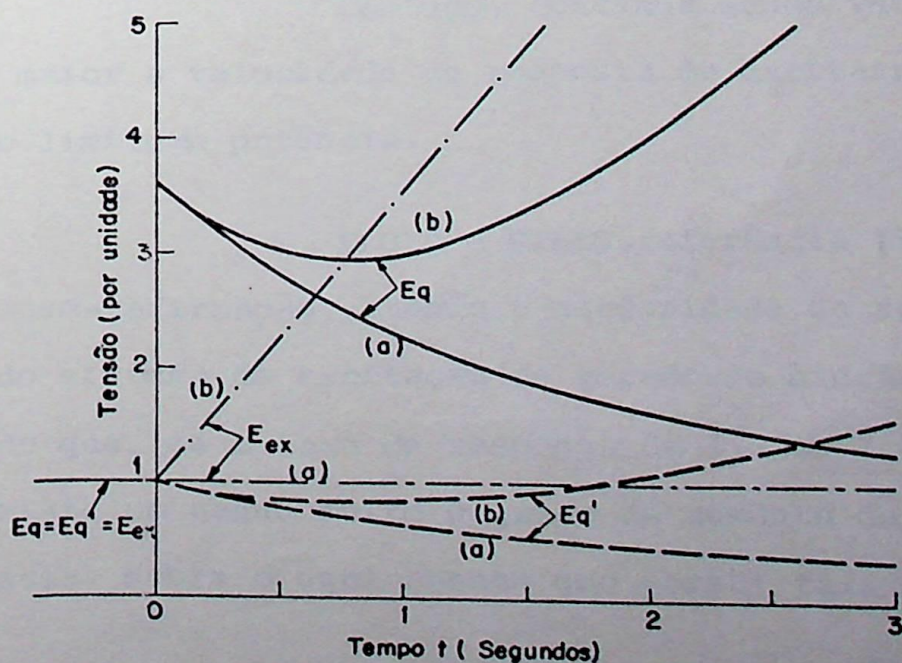
Mesmo quando calculada mais rigorosamente, a potência é aumentada se elevamos uma das duas tensões. Esta afirmativa é também válida para um sistema de multi-máquinas, isto é, aumentando-se as tensões internas, aumenta a potência que pode ser transmitida entre duas máquinas ou grupos de máquinas. Portanto, é lícito afirmar que aumentando-se as tensões internas aumentamos os limites de estabilidade.

Nas condições transitórias, a potência é calculada com o uso da reatância transitória da máquina síncrona e das tensões atrás desta reatância transitória (que são proporcionais aos enlaces de fluxo do campo). Ao ocorrer um curto no sistema, os enlaces de fluxo são inicialmente os mesmos que os enlaces de fluxo instantes antes do curto.

Durante um curto, entretanto, os enlaces de fluxo decrescem a uma taxa estipulada pela constante de tempo de curto-circuito, T'_d , que é mínima no caso de um curto circuito trifásico, nos terminais da máquina, e algumas vezes é maior para outros curtos menos severos em outras localizações.

Se o curto é sustentado por um período de longa duração a máquina pode suportar a primeira oscilação do seu rotor, mas, em razão do declínio contínuo dos enlaces de fluxo do campo, a mesma poderá sair de sincronismo nas próximas oscilações.

Um sistema de excitação controlado por um regulador automático de tensão ocasiona primeiro o decréscimo lento dos enlaces de fluxo e depois o seu aumento.



VARIACÃO DE E'_d DURANTE UM CURTO CIRCUITO TRIFÁSICO

a) Tensão de Excitação constante $E_{ex} = 1$ pu

b) com tensão de excitação linear $E_{ex} = 1 + 2.5t$

Como resultado, dependendo da característica do sistema da resposta da excitatriz, podemos afirmar que, para um dado distúrbio, se a máquina não saiu da estabilidade nas primeiras oscilações, provavelmente não sairá nas oscilações subsequentes.

Entretanto, para um distúrbio mais grave ela poderá sair de sincronismo logo na primeira oscilação.

PARK e BANCKER, referência (50), afirmam que uma resposta moderada da excitatriz (150 e 250 volts por segundo, para 250 volts de tensão de campo) é usualmente suficiente para prevenir a perda de sincronismo da máquina e que o ganho adquirido com o aumento do limite de estabilidade em razão do uso de uma excitatriz, com uma resposta mais rápida (600 volts por segundo) é muito pequeno (cerca de mais 4% e 6% de potência).

Contudo, continua sendo verdadeiro, que quanto maior a velocidade de resposta da excitatriz, tanto maior é o limite de potência.

FLOYD e SILLS, referência (51) também fazem a mesma afirmação, citando a necessidade da rapidez de resposta do sistema de excitação de geradores hidráulicos e acrescentando que, se a taxa de resposta de 1,5 ou 2,0 pu é especificada existe um ganho muito pequeno de aumento de transferência de potência sobre o equipamento que possui taxa de resposta 1.0 pu.

Antigamente, por volta dos anos 30, o tempo de abertura dos disjuntores era de cerca de 30 a 60 ciclos. Nestas condições, a ação do sistema de excitação, durante a falha no sistema, era um fator preponderante para a sua estabilidade. Entretanto, hoje em dia, com o advento dos disjuntores ultra-rápidos (de cerca de 2 a 6 ciclos) o tempo de duração do curto se tornou pequeno, o decréscimo dos enlaces de fluxo durante o curto também se tornou pequeno e o efeito do sistema de excitação, conseqüentemente, também veio a ser pequeno na primeira oscilação.

Após a eliminação do curto, as máquinas do sistema ainda estão oscilando. Portanto, mesmo que se tenha dado uma abertura rápida, o sistema de excitação pode atenuar o decréscimo dos enlaces de fluxo, ou, melhor ainda, aumentar os enlaces de fluxo. Isto pode ser obtido mais efetivamente após a eliminação da falta do que antes, por ser o efeito desmagnetizante da corrente da armadura menor.

Em conclusão temos que:

- a) o sistema de excitação pode melhorar a estabilidade transitória de um sistema consideravelmente, mesmo que se use proteção e disjuntores muito rápidos;
- b) quando mais rápido o sistema de excitação responde para corrigir a tensão baixa, mais efetiva está sendo a sua participação para melhorar a estabilidade do sistema elétrico.

Concordia já nos mostrou que a resposta da excitatriz, necessária para nos fornecer o mesmo limite de estabilidade que o obtido considerando-se enlaces de fluxo constantes, não é constante, mas aumenta proporcionalmente ao tempo de chaveamento. Em outras palavras, assim que aumenta o tempo de chaveamento (de eliminação do curto), é necessário diminuirmos a constante de tempo da excitatriz. Abaixo temos um quadro resumo de seu estudo, feito para um sistema de transmissão de 200 milhas:

| TEMPO DE CHAVEAMENTO | | CONSTANTE DE TEMPO DA |
|----------------------|--------|-----------------------|
| Seg. | Ciclos | EXCITATRIZ (Seg.) |
| 0,02 | 1,2 | 2,7 |
| 0,06 | 3,6 | 0,7 |
| 0,10 | 6,0 | 0,3 |

O exposto vem indicar que o tempo de chaveamento tem ainda maior importância do que a revelada pelos estudos de estabilidade usuais, nos quais se consideram constantes os enlaces de fluxo das máquinas.

Em regime permanente, a potência é calculada com o uso das reatâncias sincronas saturadas e das tensões atras dessas reatâncias (que são proporcionais às respectivas correntes de campo).

A operação estável, com reguladores de tensão automáticos, e potência superior ao limite de estabilidade obtido com a operação manual de excitação, é denominada estabilidade dinâmica. O sistema de excitação ao elevar a tensão interna, deve aumentar a potência sincronizada mais rapidamente do que o acrescimento angular.

A tendência do uso atual de geradores de baixa relações de curto-circuito (short-circuit ratio), e portanto com o limite mais baixo de estabilidade estática, fez crescer novamente o interesse no uso de sistemas de excitação de resposta rápida. Embora os geradores sejam estáveis quando a excitação é operada manualmente, o uso de reguladores de tensão adequados aumenta a margem de estabilidade; entretanto, para que isto seja verdadeiro, é necessário que o sistema de excitação possua um regulador de tensão quase sem banda morta.

Os sistemas de excitação de resposta rápida, além de aumentarem os limites de estabilidade, diminuem, os distúrbios de tensão causados por eventos como: curto-circuitos, abertura de circuitos, oscilação de máquinas, perda de carga, ou perda de geração. Tudo isso só vem a melhorar a qualidade de serviço da energia entregue ao consumidor.

2.2 - FENÔMENOS NOS QUAIS O REGULADOR (OU SISTEMA DE EXCITAÇÃO) INTERVEM.

O regulador de tensão intervem em to dos os fenômenos nos quais existe uma variação de tensão.

Podemos distinguir tais fenômenos em du as categorias:

- a) fenômenos que provocam uma variação da tensão em uma direção somente (aumento ou diminuição);
- b) fenômenos que provocam variação oscilatória da tensão , (aumento e diminuição).

Nos fenômenos (a) o sistema de excitação, deve atuar de modo a levar o mais rapidamente possível, a tensão ao seu valor de regime.

Nos fenômenos (b) o sistema de excitação, deve atuar de modo a anular as oscilações de tensão, procurando ajudar o sistema a eliminar a causa de tais oscilações.

Os fenômenos tipo (a) são principalmente:

- a.1) energização
- a.2) rejeição de carga

Os fenômenos tipo (b) são todos aqueles de nominados, na prática, "fenômenos de estabilidade".

Nota-se que os fenômenos tipo (b) estão sempre ligados a oscilações de tipo eletromecânico em um sistema com mais de uma usina, enquanto os fenômenos tipo (a) ou não provocam (em geral) aceleração das máquinas en

volvidas (porque não criam variações de potência ativa) ou provocam aceleração somente de uma usina que fica desligada do restante do sistema. É o caso de rejeição de carga. É interessante notar que em geral uma rejeição de carga total, sobre uma usina (Tipo a), provoca no restante do sistema um fenômeno de estabilidade (tipo b).

2.3 - VERIFICAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS SISTEMAS DE EXCITAÇÃO (REGULADORES DE TENSÃO) EM ESTUDOS DE ESTABILIDADE

Nas figuras a seguir, estão representadas a influência dos sistemas de excitação nos fenômenos de rejeição de carga, de energização e de estabilidade transitória e dinâmica. Para tais ilustrações nos baseamos na referência bibliográfica (24).

Além dos casos básicos de rejeição e energização, sem regulador e com regulador existem os dois seguintes:

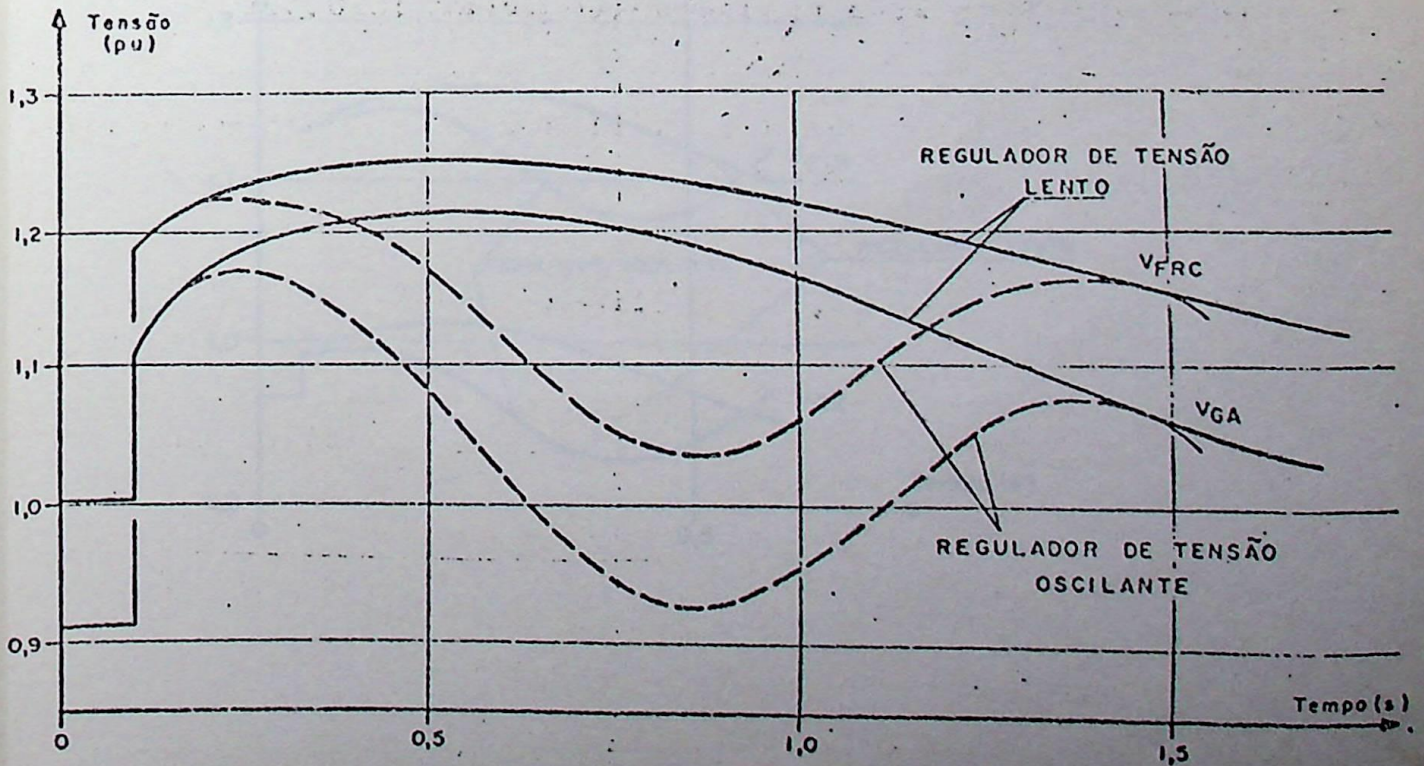
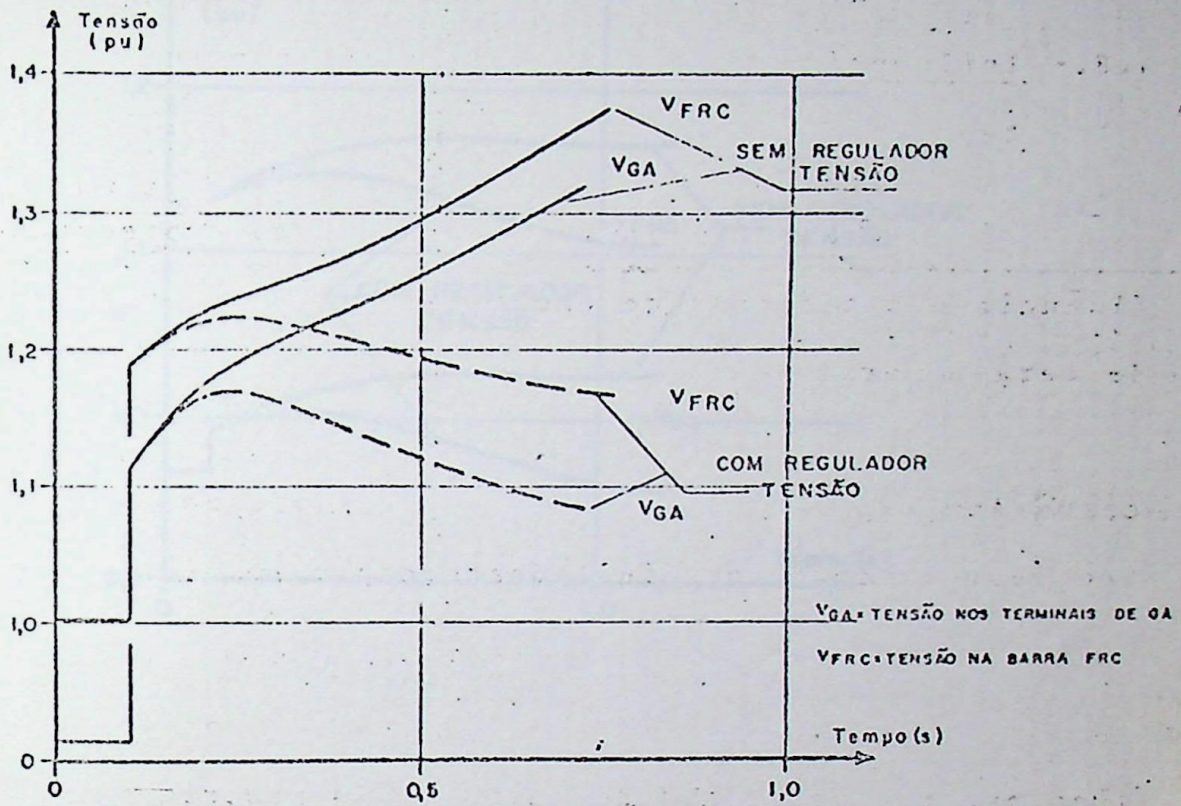
- sistema de excitação lenta diferindo do básico por ter constante de tempo de excitatriz maior que a real;
- regulador oscilante, com ganho pequeno na realimentação transitória.

Na estabilidade dinâmica foi simulada a perturbação nas máquinas GB com regulador estático.

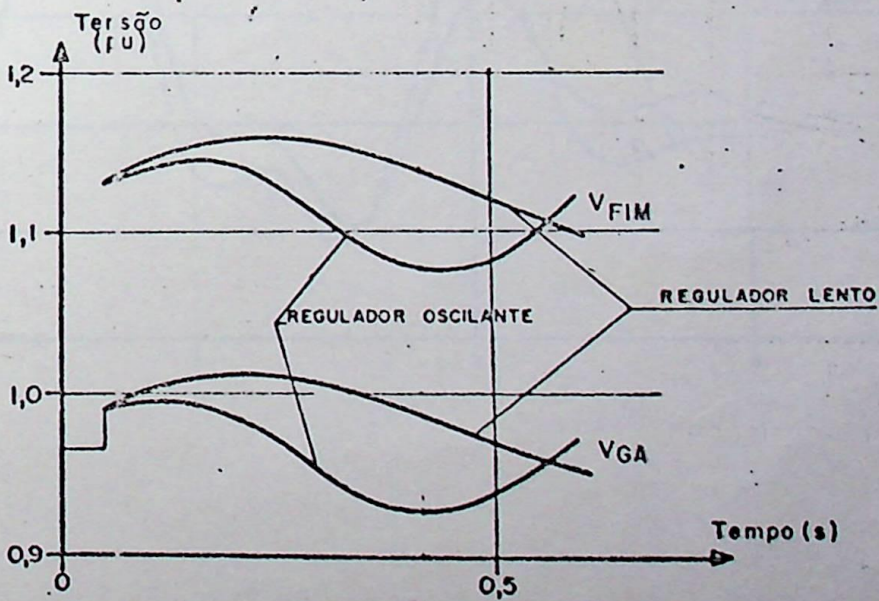
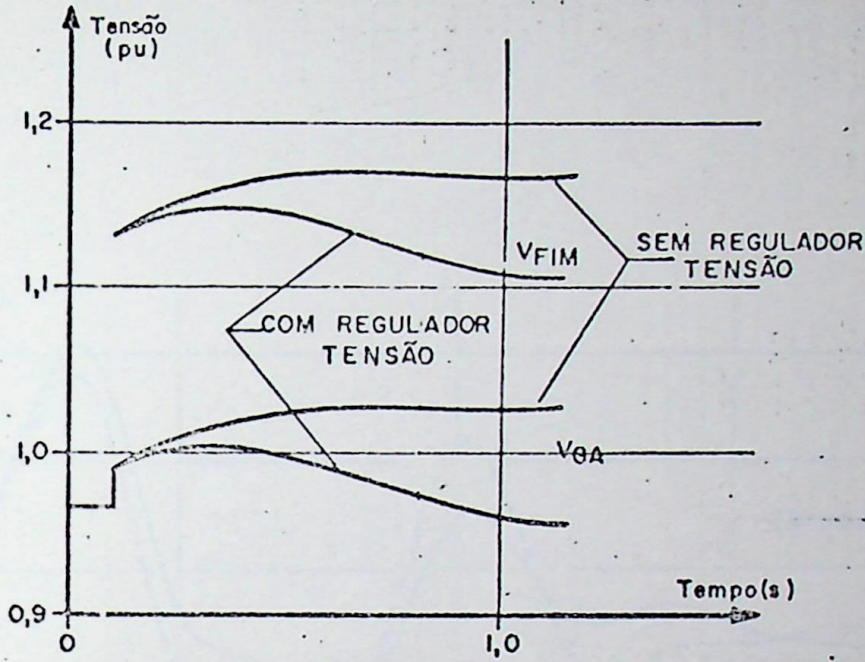
Das curvas apresentadas pode constatar-se a indispensabilidade do sistema de excitação nos fenômenos, de rejeição e energização, bem como sua grande influência na estabilidade transitória. Na estabilidade dinâmica, em razão de sua atuação mesmo para pequenas variações de tensão nos terminais da máquina, ele pode ser um pouco prejudicial.

Em anexo estão os sistemas representados, no estudo para as diversas situações.

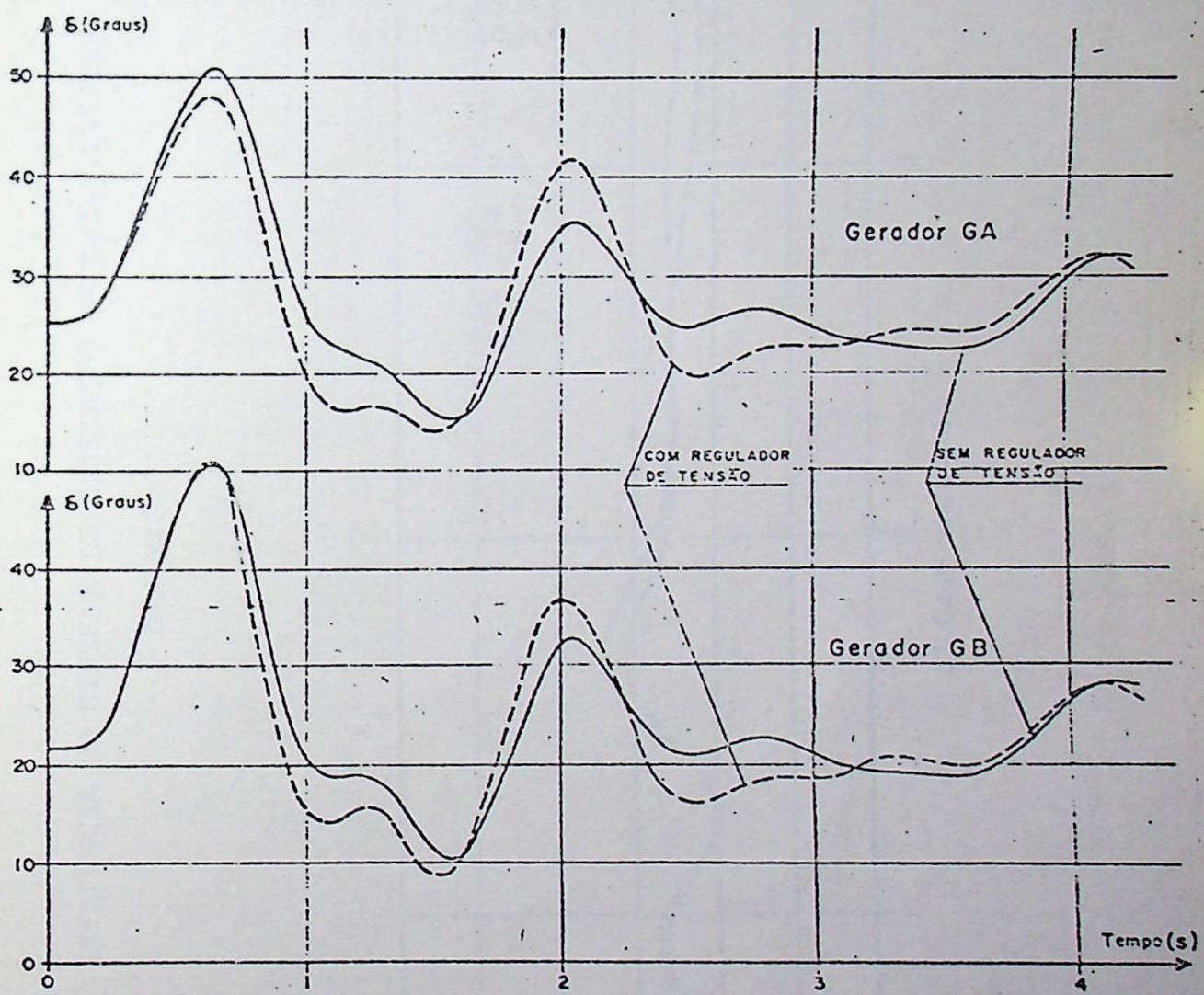
INFLUÊNCIA DOS SISTEMAS DE EXCITAÇÃO NA REJEIÇÃO DE CARGA



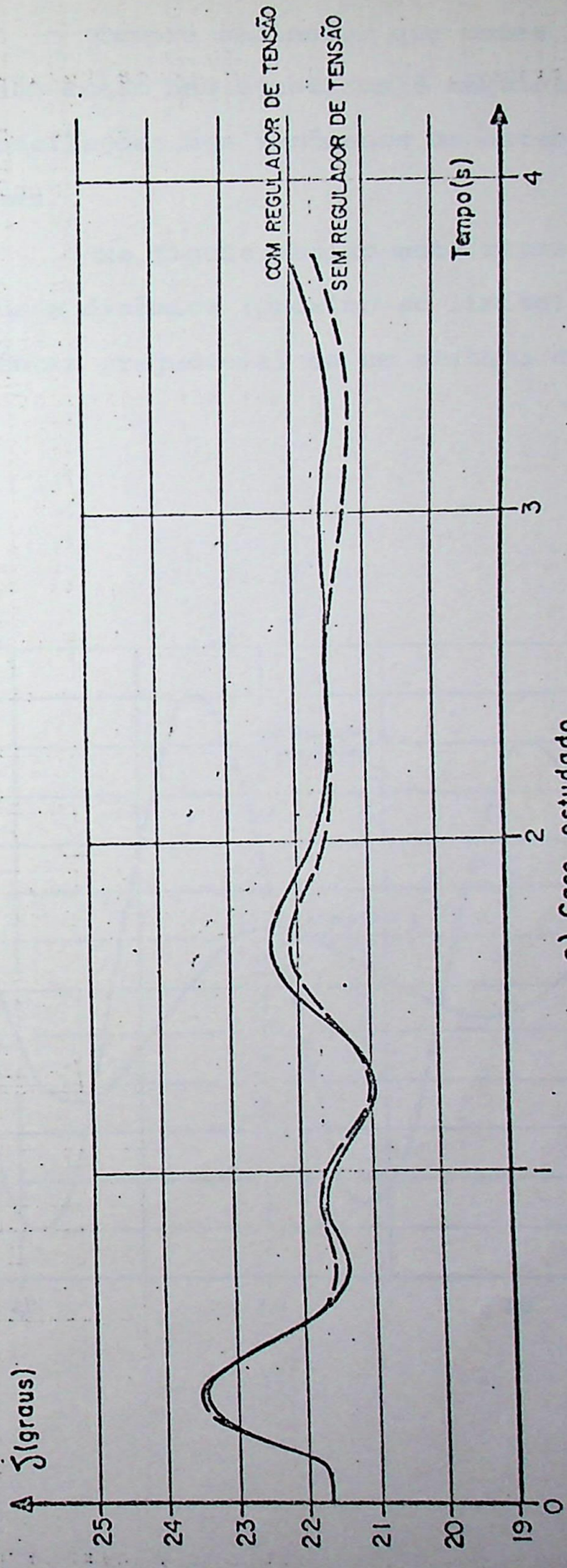
INFLUÊNCIA DO SISTEMA DE EXCITAÇÃO NA ENERCIZAÇÃO



INFLUÊNCIA DOS SISTEMAS DE EXCITAÇÃO NA ESTABILIDADE TRANSITÓ -
RIA.



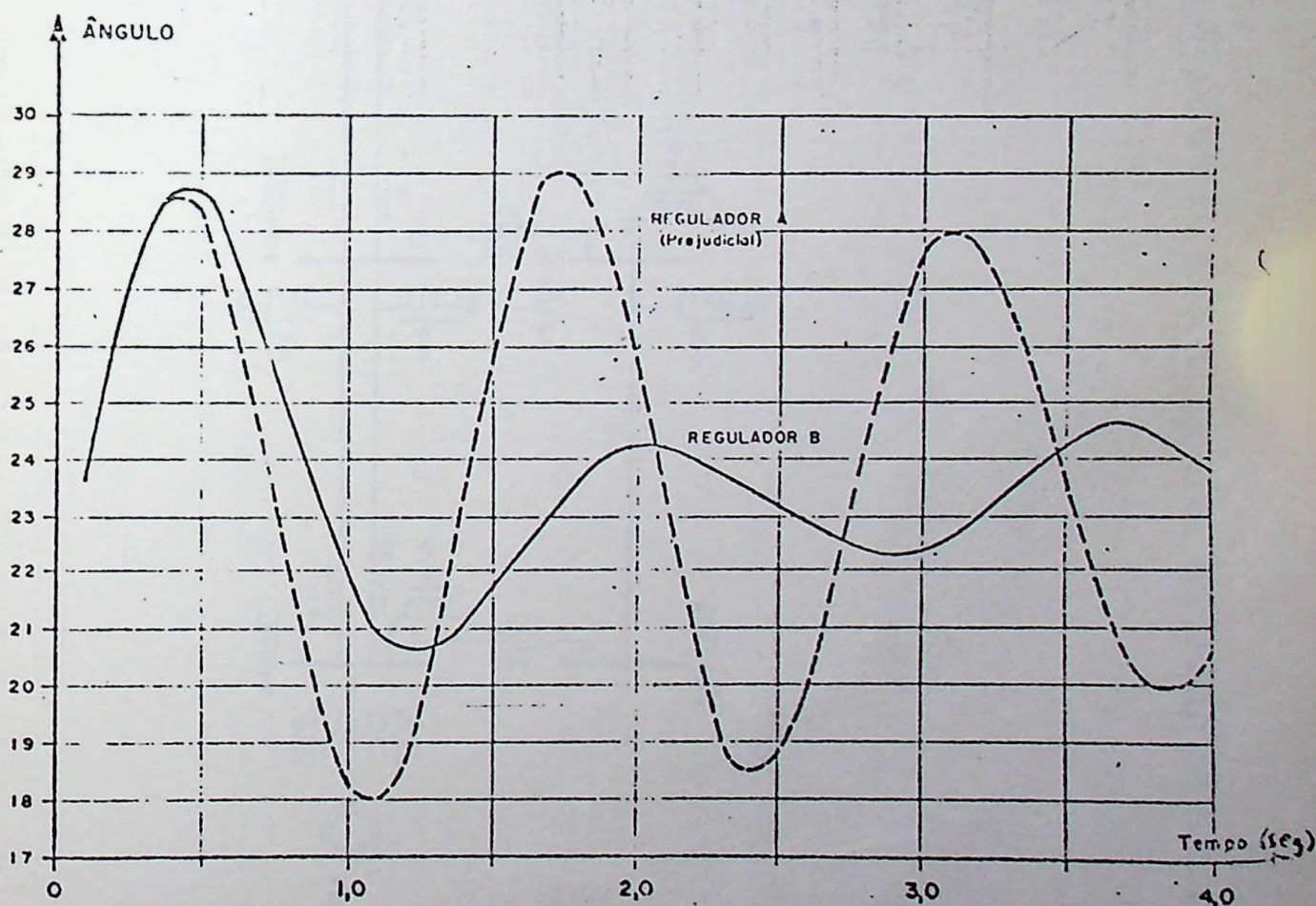
INFLUÊNCIA DO SISTEMA DE EXCITAÇÃO NA ESTABILIDADE
DINÂMICA



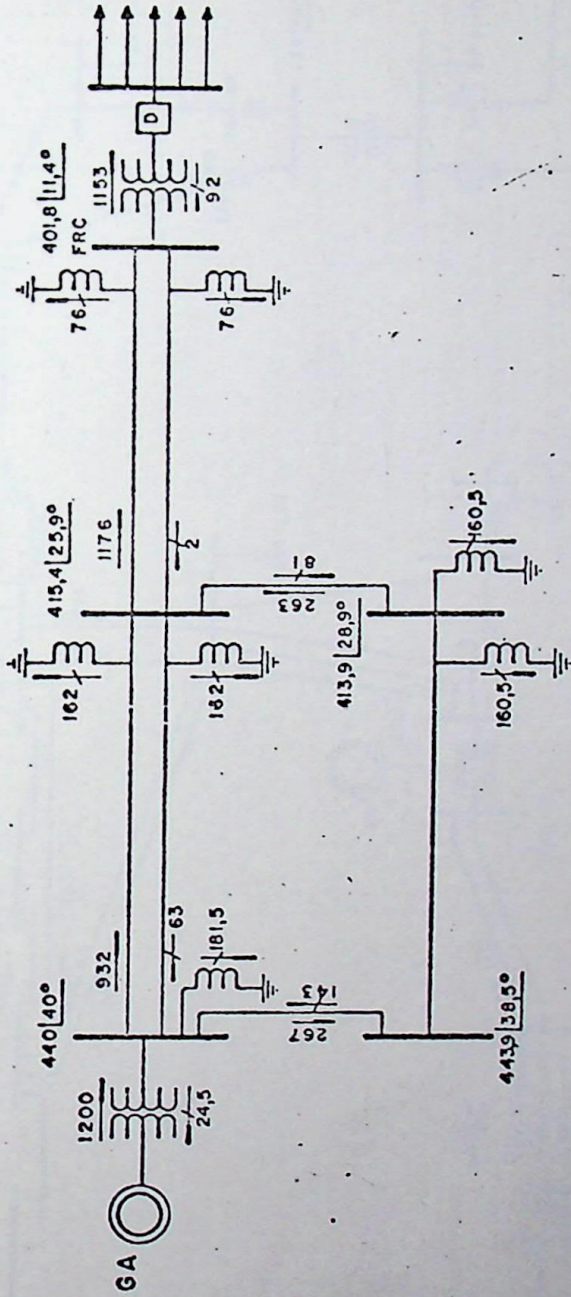
a) Caso estudado

Cumpra salientar que estes reguladores, se seus parâmetros não estão bem ajustados à máquina e ao sistema, podem sustentar oscilações nos fenômenos de estabilidade tornando-se inconvenientes.

Na figura abaixo está representando um caso de estabilidade dinâmica (próximo ao limite) onde pode-se observar a influência prejudicial de um sistema de excitação.

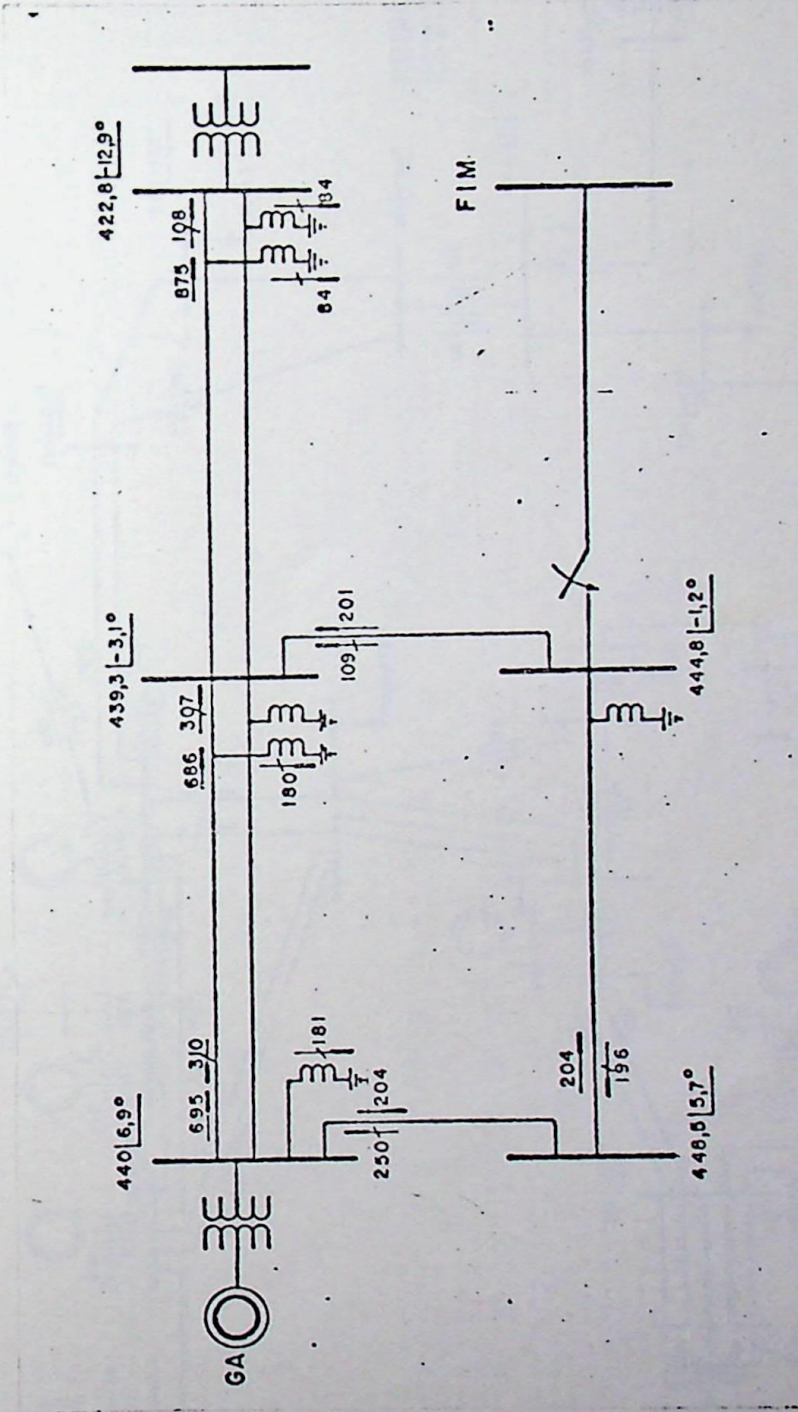


CASO DE ESTABILIDADE DINÂMICA ONDE O SISTEMA DE EXCITAÇÃO É PREJUDICIAL

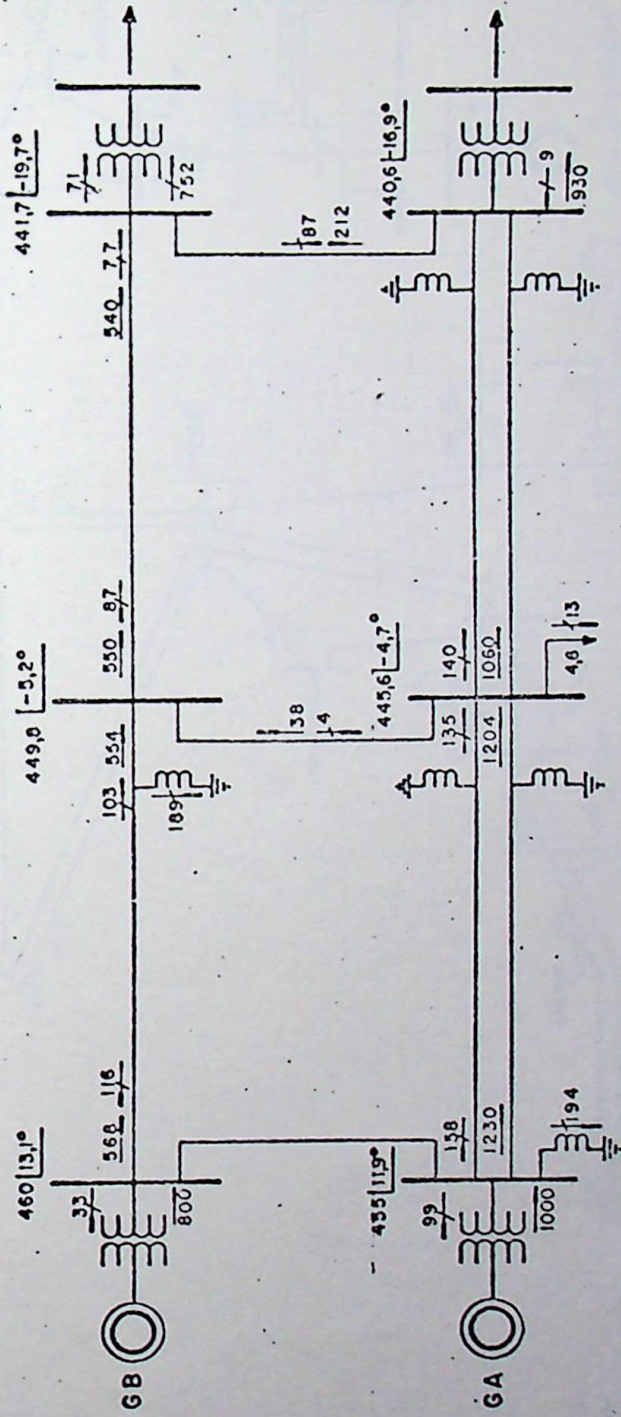


A rejeição é devida a abertura do disjuntor D na baixa tensão do transformador.

REDE 400 kV UTILIZADA PARA ESTUDOS DE REJEIÇÃO DE CARCA



REDE 400 kV UTILIZADA NOS ESTUDOS DE ENERCIÇÃO



REDE 400 KV UTILIZADA PARA ESTUDOS DE ESTABILIDADE
DINÂMICA E TRANSITÓRIA

3 - MODELOS MATEMÁTICOS DOS SISTEMAS DE EXCITAÇÃO DO IEEE

3 - MODELOS MATEMÁTICOS DOS SISTEMAS DE EXCITAÇÃO DO IEEE

A modelagem em Sistemas de Potência tem se tornado recentemente mais complicada, em razão de não ser mais possível a determinação da estabilidade de grandes sistemas interligados na base da tradicional "análise da primeira oscilação", ("first swing analysis"). Os sistemas de excitação modernos melhoram a primeira oscilação, mas podem produzir a mortecimento negativo nas oscilações subsequentes. Para simularmos o sistema precisamente, em um período mais longo, é necessário modelá-lo em maiores detalhes do que numa simples análise do "first swing". É aí que as respostas dos sistemas de excitação e dos reguladores de velocidade se tornam mais importantes.

Com o advento dos grandes computadores digitais e das técnicas modernas de simulação, os estudos de estabilidade dos sistemas de potência puderam representar melhor as "tendências" do sistema quando de uma simulação, em razão de usarmos modelos mais detalhados. Portanto, é nosso objetivo, agora, apresentar uma nomenclatura comum e usual, e representações de sistemas de controle de vários sistemas de excitação hoje disponíveis. Esta nomenclatura poderá ser usada para definir requisitos de dados de entrada para programas de computador e fornecer um formato consistente, no qual os fabricantes possam responder as informações de dados, do sistema de excitação, a serem usados em estudos do sistema.

O grupo de trabalho dos sistemas de excitação do IEEE definiu quatro tipos básicos de sistema de excitação, O grupo concluiu que estes quatro tipos deveriam ser

adequados para representar todos os sistemas modernos em uso .

Outros sistemas mais antigos têm de ser aproximados de modo a se assemelhar a um dos tipos ou então, temos que assumir que a máquina possua excitação fixa.

3.1 - SISTEMA POR UNIDADE

No desenvolvimento dos diagramas de blocos dos sistemas de excitação foi necessário estabelecer-se uma tensão base, para obtermos o sistema por unidade. Portanto, 1 pu de tensão do gerador é definido como a tensão nominal e 1 pu de tensão na saída da excitatriz é a tensão requerida para produzir a tensão nominal do gerador, na linha do entreferro.

3.2 - TIPO 1 - REGULADOR E EXCITATRIZ DE AÇÃO CONTINUA

O sistema de excitação tipo 1 representa, a maior parte dos sistemas de excitação modernos em serviço e que continuam a ser fabricados. Isto inclui a maioria dos sistemas de ação continua com excitatrizes rotativas, tais como:

ALLIS CHALMERS - Regulex

GENERAL ELECTRIC - Amplydine

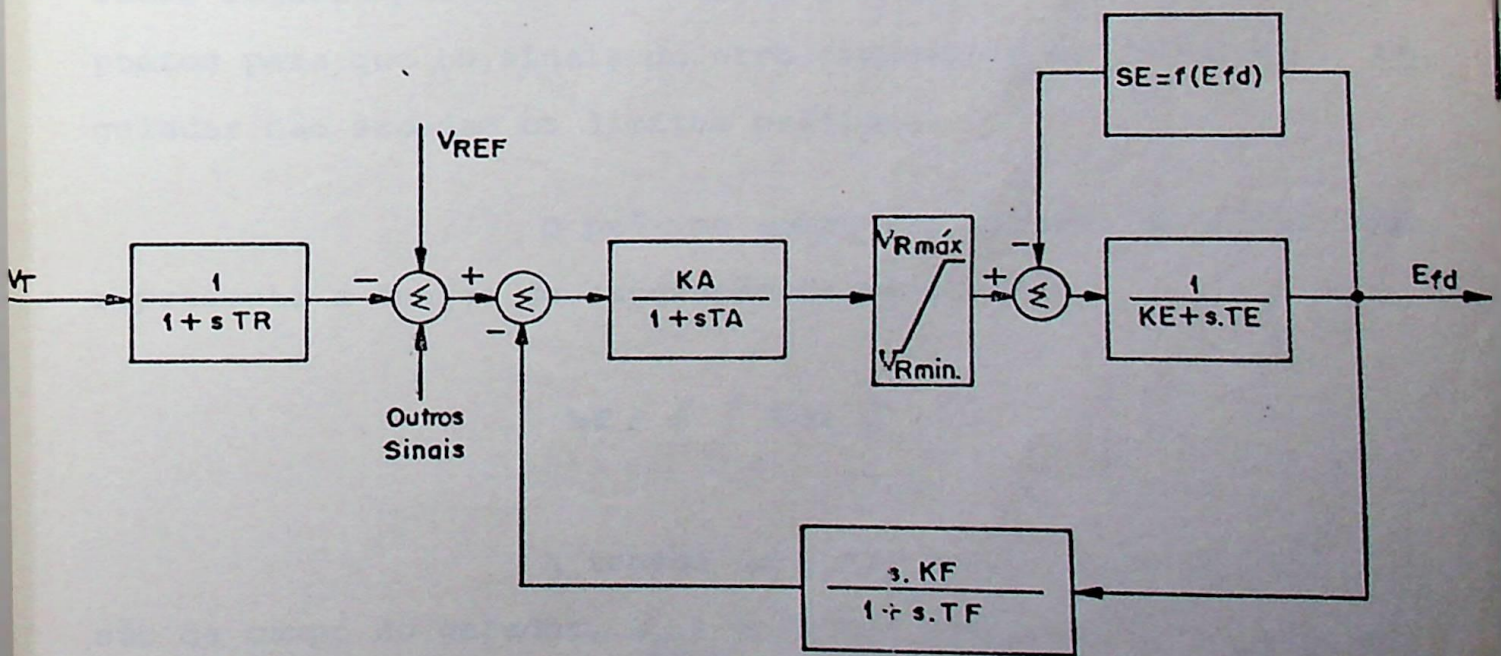
Alterrex

Alterrex - Thyristor

WESTINGHOUSE - Mag-a-stat
 Brushless (desde 1967)
 Rototrol
 Silverstat
 TRA

Outros de fabricantes tais como BROWN BOVERI, ASEA, etc., A Figura 3.1 nos mostra as funções de transferência do sistema de excitação tipo 1, que devem ser usadas para uma representação satisfatória em estudos computacionais, Muitos outros tipos de sistemas podem ser representados, se for possível considerar as tensões de teto (de ceiling), independentes das condições terminais do gerador.

Na FIG. 3.1, temos:



REGULADOR E EXCITATRIZ DE AÇÃO CONTÍNUA

FIG. 3.1 - REGULADOR E EXCITATRIZ DE AÇÃO CONTINUA

V_T - Tensão terminal de geração aplicada à entrada do regulador.

T_R - Atraso causado pela filtragem da entrada do regulador
Em geral é muito pequeno e pode às vezes ser anulado.

No primeiro somatório a referência do regulador é comparada com a saída do filtro a fim de determinar o erro de tensão para o amplificador. Muitos programas computacionais não requerem a entrada de V_{ref} , mas internamente calculam seu valor, assumindo para V_T o valor de V_{ref} quando $t=0$.

O segundo somatório combina a entrada de erro de tensão com o sinal da malha de amortecimento da excitatriz (malha estabilizadora).

A função de transferência principal é representada por um ganho K_A e por uma constante de tempo T_A , sendo seguida pelos limites máximos e mínimos do regulador impostos para que os sinais de erro produzidos na saída do regulador não excedam os limites práticos.

O próximo somatório subtrai um sinal que representa a função de saturação da excitatriz.

$$SE = f (E_{fd})$$

A tensão de saída da excitatriz (ou tensão de campo do gerador, E_{fd}) é função da curva de saturação não linear e subtraída da saída do regulador.

O resultado é aplicado na função de transferência da excitatriz.

$$\frac{1}{K_E + s T_E}$$

Quando um campo paralelo auto-excitado é usado, K_E representa a posição do reostato do mesmo, e prevê uma realimentação na saída da excitatriz.

Para as condições iniciais atribui-se a muitas vezes, um valor que é igual em magnitude à função de saturação para o valor inicial de E_{fD} .

Para este valor, o campo derivativo com pensa exatamente a saturação da excitatriz e nenhuma saída do regulador é necessária para estabelecer o valor inicial de E_{fD} .

Para os sistemas com excitatriz separada, é necessário que a saída do regulador forneça o campo da excitatriz e estabeleça o valor inicial de E_{fD} .

A malha de amortecimento é provida pela função de realimentação.

$$\frac{s K_F}{1 + s \cdot T_F}$$

Deve ser frisado que entre a saída da excitatriz E_{fD} , e o segundo somatório há uma interrelação entre a tensão máxima limite da excitatriz (E_{fDMX}), a tensão máxima limite do regulador (V_{RMX}), a saturação da excitatriz (SE) e K_E .

A seguinte expressão deve ser satisfeita, sob condições de regime permanente.

$$V_R - (K_E + SE) E_{fD} = 0$$

$$E_{fD \text{ MIN}} \leq E_{fD} \leq E_{fD \text{ MAX}}$$

Para o campo derivativo auto-excitado ,

K_E é negativo.

Para o limite máximo $E_{fD} = E_{fD \text{ MAX}}$

$$V_{R \text{ MAX}} - (K_E + SE_{\text{MAX}}) E_{fD \text{ MAX}} = 0$$

K_E é sempre especificado como dado de entrada, ou pertence à lógica do programa para permitir o cálculo automático. Além disso, das três constantes que restam:

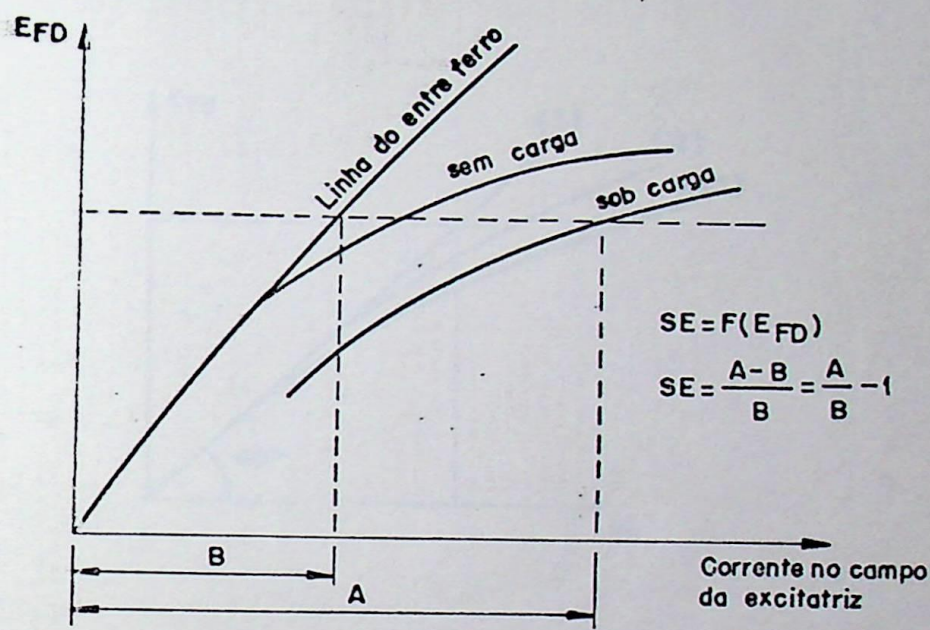
- $V_{R \text{ MAX}}$,
- SE_{MAX} ,
- $E_{fD \text{ MAX}}$,

a especificação de duas quaisquer estabelece a terceira. Como programas diferentes podem usar dados de entrada diferentes, é preciso tomar cuidado para que a equação acima seja satisfeita.

Para alguns tipos de regulação não contínuas, o valor mínimo de E_{fD} é zero, não podendo ser negativo.

3.3 - FUNÇÃO DE SATURAÇÃO

SE é um multiplicador da saída da excitatriz E_{fD} , para representar o incremento de excitação requerido pela saturação.



Para uma dada tensão de saída da excitatriz, E_{fD} , os valores de A e B são definidos como a excitação para produzir a tensão de saída na curva de magnetização sob carga e na linha do entreferro, respectivamente:

$$SE = \frac{A - B}{B}$$

Para os programas computacionais em geral informa-se:

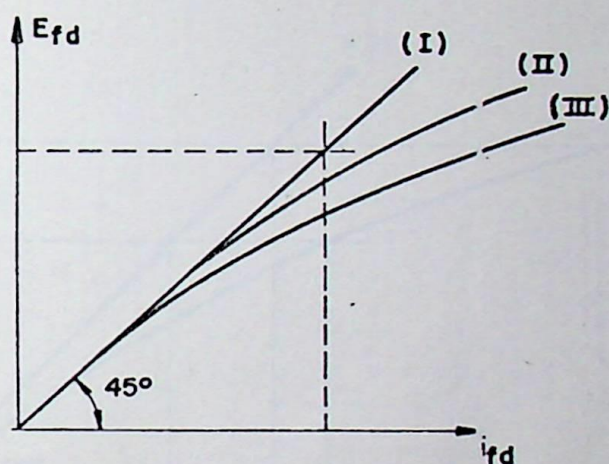
$$SE_{MAX} \longrightarrow E_{fD MAX}$$

$$0.75 SE_{MAX} \longrightarrow 0.75 E_{fD MAX}$$

DETERMINAÇÃO DAS CONSTANTES A_{EX} E B_{EX} PARA UTILIZAÇÃO NO

PROGRAMA DE ESTABILIDADE DA PECO (Philadelphia Electric Company)

A figura 3.2 é a curva de saturação da excitatriz em p.u.



CURVA I - linha do entreferro

CURVA II - Curva de saturação em vazio

CURVA III - Curva de saturação em carga.

Tomando as curvas (I) e (III) vem; a

FIG. 3.3.

De acordo com o IEEE:

$$SE_{MAX} = \frac{A - B}{B} \quad (1)$$

$$SE_{0.75 MAX} = \frac{C - D}{D} \quad (2)$$

De acordo com o programa da PECO de estabilidade, es

$$\Delta i_{fD} = A_{EX} \cdot e^{(B_{EX} \cdot E_{fD})} \quad (3)$$

para qualquer E_{fD} .

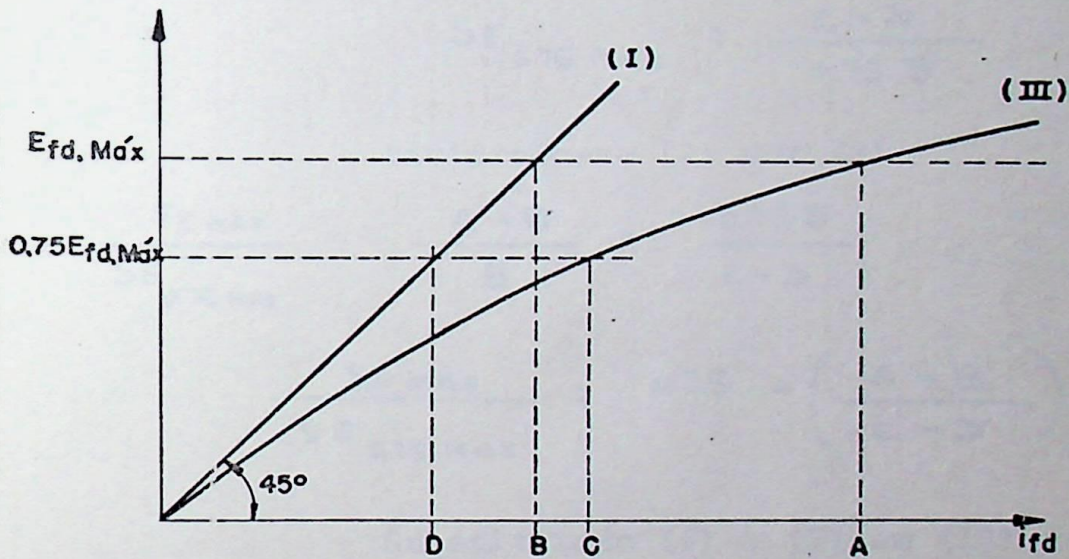


FIG. 3.3

Considerando o diagrama da FIG.3.3.

$$(4) \quad A - B = \Delta i_{fD} \quad \text{quando} \quad E_{fD} = E_{fD \text{ MAX}}$$

$$(5) \quad C - D = \Delta i_{fD} \quad \text{quando} \quad E_{fD} = 0.75 E_{fD \text{ MAX}}$$

Comparando a equação (3) com as equações

(4) e (5) temos:

$$A - B = A_{EX} \cdot e^{(B_{EX} \cdot E_{fD \text{ MAX}})} \quad (6)$$

$$C - D = A_{EX} \cdot e^{(B_{EX} \cdot 0.75 \cdot E_{fD \text{ MAX}})}$$

Como na FIG. 3.3 a curva de saturação está em pu, vem:

$$D = 0.75 B \quad (8)$$

Substituindo (8) em (2) apenas no denominador:

$$SE_{0.75 \text{ MAX}} = \frac{C - D}{0.75 B}$$

Dividindo-se (1) por (9):

$$\frac{SE_{\text{MAX}}}{SE_{0.75 \text{ MAX}}} = \frac{A - B}{B} \times \frac{0.75 B}{C - D}$$

$$\frac{SE_{\text{MAX}}}{SE_{0.75 \text{ MAX}}} = 0.75 \times \left(\frac{A - B}{C - D} \right) \quad (10)$$

Substituindo (6) e (7) em (10) vem:

$$\frac{SE_{\text{MAX}}}{SE_{0.75 \text{ MAX}}} = 0.75 \times \frac{A_{\text{EX}} \cdot e^{(B_{\text{EX}} \cdot E_{\text{FD MAX}})}}{A_{\text{EX}} \cdot e^{(B_{\text{EX}} \cdot 0.75 \cdot E_{\text{FD MAX}})}}$$

$$\frac{SE_{\text{MAX}}}{SE_{0.75 \text{ MAX}}} = 0.75 \times e^{(B_{\text{EX}} \cdot E_{\text{FD MAX}} - (B_{\text{EX}}) 0.75 E_{\text{FD MAX}})}$$

$$\frac{SE_{\text{MAX}}}{SE_{0.75 \text{ MAX}}} = 0.75 \times e^{(0.25 B_{\text{EX}} \cdot E_{\text{FD MAX}})}$$

$$e^{(0.25 B_{\text{EX}} \cdot E_{\text{FD MAX}})} = \frac{SE_{\text{MAX}}}{0.75 SE_{0.75 \text{ MAX}}}$$

Logaritimizando ambos os membros:

$$0.25 B_{EX} \cdot E_{fd MAX} = \ln \left(\frac{SE_{MAX}}{0.75 SE_{0.75 MAX}} \right)$$

CONCLUSÃO:

$$B_{EX} = \frac{\ln \left(\frac{SE_{MAX}}{0.75 SE_{0.75 MAX}} \right)}{0.25 E_{fd MAX}} \quad (11)$$

Para determinar A_{EX} basta lembrar que:

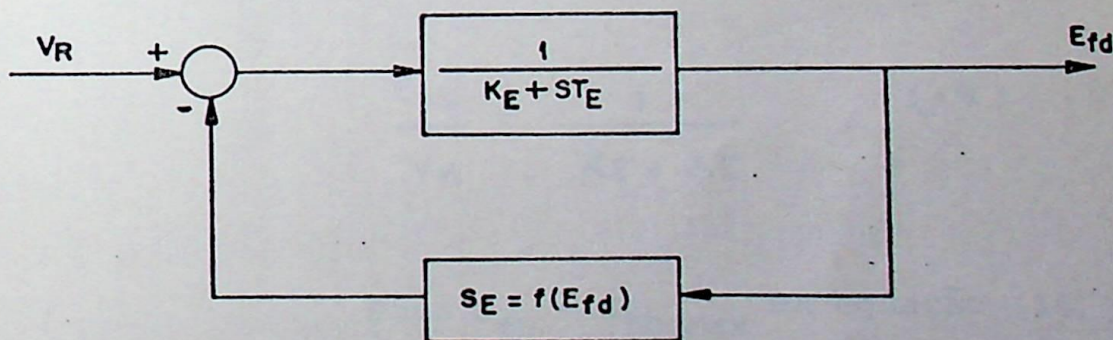


DIAGRAMA DE BLOCOS DE UMA EXCITATRIZ ROTATIVA

FIG. 3.4 - DIAGRAMA DE BLOCOS DE UMA EXCITATRIZ ROTATIVA

$$\frac{O(s)}{I(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)}$$

Para a FIG. 3.4, fica:

$$T(s) = \frac{E_{fD}(s)}{V_R(s)} = \frac{\frac{1}{KE + sTE}}{1 + \left(\frac{1}{KE + sTE}\right)SE} \quad (12)$$

Tomando-se a expressão (12) em estado permanente, isto é, aplicando-se o teorema do valor final, vem:

$$\lim_{s \rightarrow 0} T(s) = \frac{\frac{1}{KE}}{1 + \frac{SE}{KE}}$$

Portanto:

$$\frac{E_{fD}}{V_R} = \frac{\frac{1}{KE}}{\frac{KE + SE}{KE}}$$

$$\frac{E_{fD}}{V_R} = \frac{1}{KE + SE} \quad (14)$$

Para $E_{fD} = E_{fD, \text{Max}}$ na equação (14) vem:

$$E_{fD \text{ MAX}} = \frac{V_{R \text{ MAX}}}{KE + SE_{\text{MAX}}} \quad (15)$$

Considerando novamente a curva da FIG.

3.3, vê-se que:

$$B = E_{fD \text{ MAX}}$$

Logo, pela equação (6):

$$SE_{MAX} = \frac{A-B}{B} = \frac{A_{EX} \cdot e^{(B_{EX} \cdot E_{fD MAX})}}{E_{fD MAX}} \quad (16)$$

Tirando-se o valor de SE_{MAX} da equação (15) vem:

$$SE_{MAX} = \frac{V_{R MAX} - (K_E \cdot E_{fD MAX})}{E_{fD MAX}} \quad (17)$$

Igualando-se (17) e (16):

$$\frac{A_{EX} \cdot e^{(B_{EX} \cdot E_{fD MAX})}}{E_{fD MAX}} = \frac{V_{R MAX} - (K_E \cdot E_{fD MAX})}{E_{fD MAX}}$$

CONCLUSÃO:

$$A_{EX} = \frac{V_{R MAX} - (K_E \cdot E_{fD MAX})}{e^{(B_{EX} \cdot E_{fD MAX})}} \quad (18)$$

3.4 - TIPO 1 S - SISTEMA DE RETIFICAÇÃO CONTROLADA COM FONTE DE POTENCIAL

É idêntico ao tipo 1, e emprega uma fonte de excitação vinda da tensão terminal com retificadores controlados.

Um sistema deste tipo responde rapidamente, mas com tensão máxima limite proporcional à tensão terminal do gerador.

V_{RMAX} não é constante e é definido pela relação:

$$V_{R \cdot MAX} = K_P \cdot V_T$$

Em geral para este tipo de regulador:

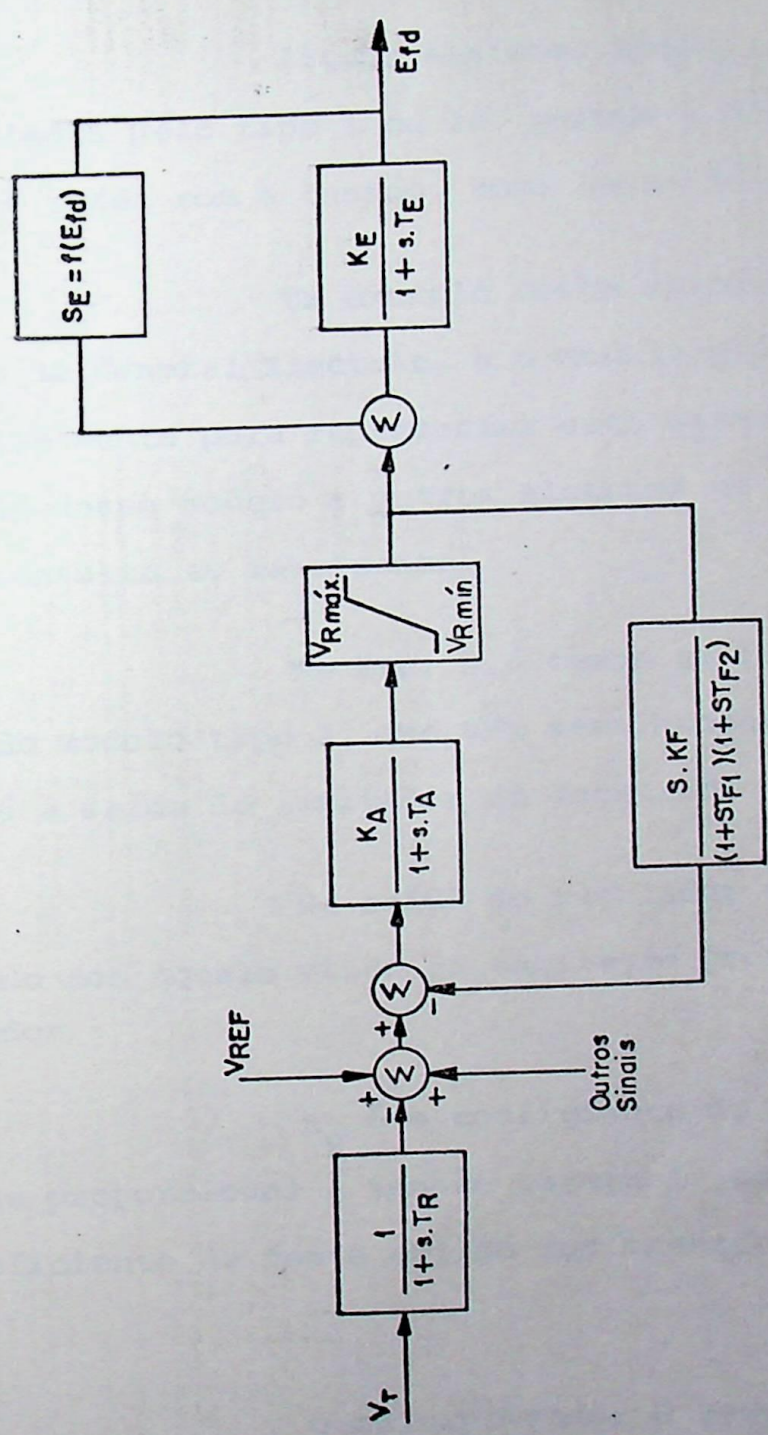
$$K_E = 1 \quad , \quad T_E = 0 \quad , \quad S_E = 0$$

3.5 - TIPO 2 - SISTEMA DE EXCITAÇÃO COM RETIFICAÇÃO ROTA - TIVA

Aplica-se a equipamentos cuja malha principal de amortecimento tem como entrada a resposta de saída do regulador de tensão. Neste modelo é incluída uma constante de tempo adicional para compensar a não inclusão da excitatriz na malha amortecedora, como podemos constatar na FIG. 3.5.

As outras características do sistema tipo 2 são similares as já descritas no modelo tipo 1.

Um exemplo desse sistema é o sistema "BRUSHLESS" da Westinghouse construído até 1966.



— SISTEMA DE EXCITAÇÃO COM RETIFICAÇÃO ROTATIVA

FIG. 3.5 - SISTEMA DE EXCITAÇÃO COM RETIFICAÇÃO ROTATIVA

3.6 - TIPO 3 - SISTEMA DE EXCITAÇÃO ESTÁTICA COM FONTE
TERMINAL DE TENSÃO E CORRENTE

Alguns sistemas estáticos não podem ser representados pelo tipo 1 ou 1S, porque a corrente terminal do gerador é usada com a tensão, como fonte de excitação.

Um exemplo deste sistema é o SCPT de fabricação da General Electric, e o modelo tipo 3 foi desenvolvido especialmente para representar este sistema estático. A aplicação desse modelo a outros sistemas de excitação depende, de uma consulta ao fabricante.

Na FIG. 3.6 temos as funções de transferência do modelo tipo 3, que são semelhantes as do modelo tipo 1 até a saída do limitador do regulador ($V_{Rmax} - V_{Rmin}$).

Na saída do regulador o sinal deste é combinado com aquele vindo da excitação própria dos terminais do gerador.

K_p é o coeficiente da fonte de excitação derivada proporcional à tensão terminal. Da mesma forma, K_1 é o coeficiente da fonte obtido dos transformadores de corrente.

O multiplicador é responsável pelas variações de auto-excitação com variação na relação angular da corrente de campo I_{FD} e da tensão de auto-excitação V_{THEV} .

O limitador V_{BMX} ajusta a saída do sistema de excitação em zero quando $A > 1$, isto é, quando a corrente do campo excede a corrente de saída de excitação.

O excesso da corrente de campo do gerador contorna a fonte de excitação passando através do retificador de saída.

K_E e T_E são as constantes do transformador de saída.

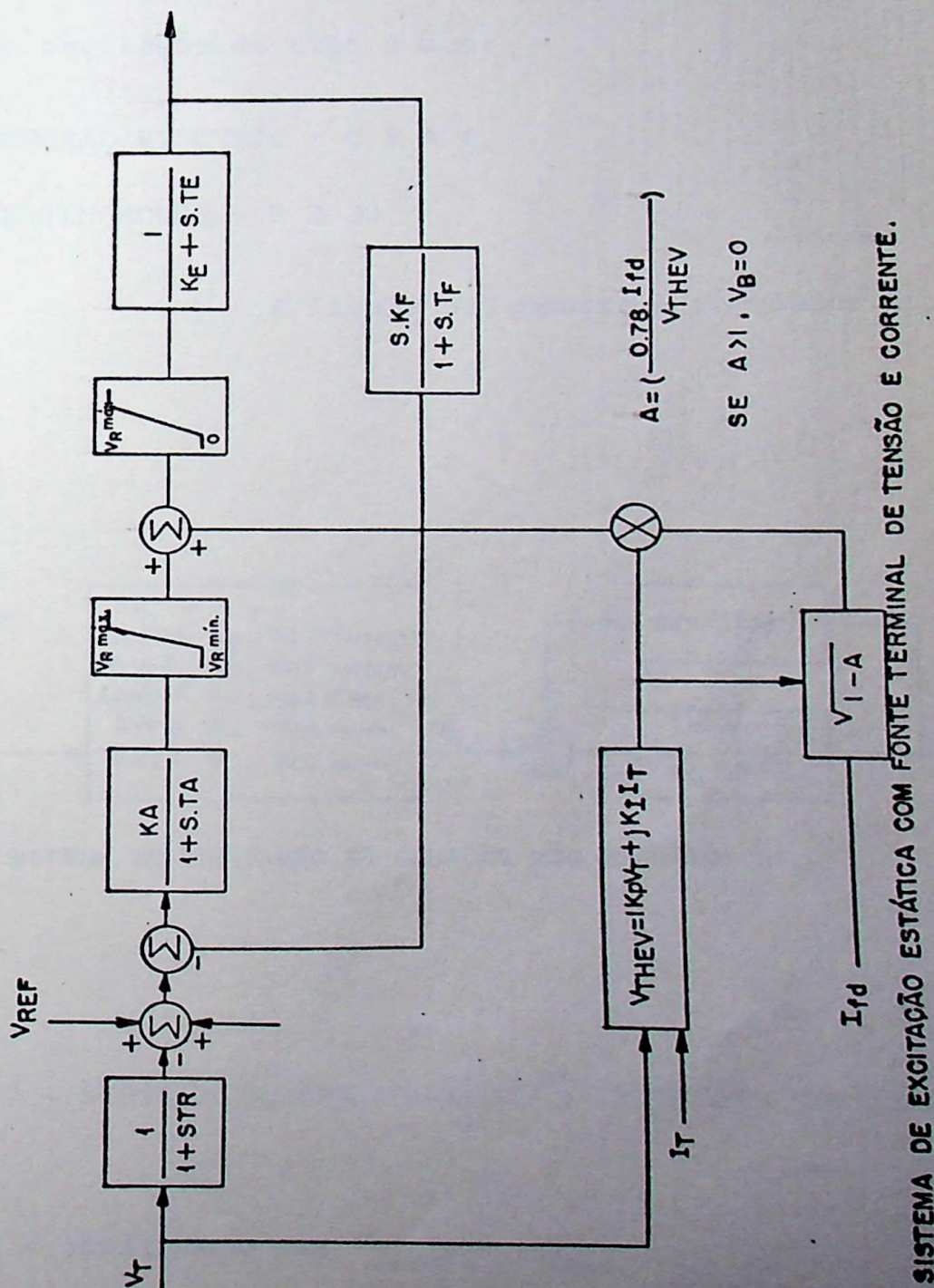


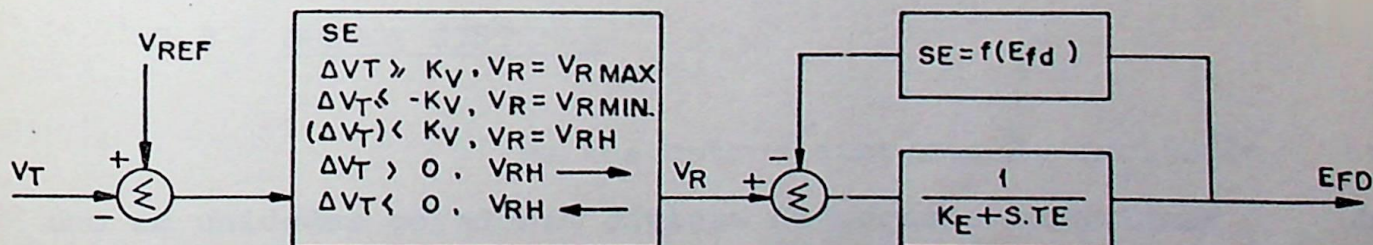
FIG. 3.6 - SISTEMA DE EXCITAÇÃO ESTÁTICA COM FONTE TENSÃO E CORRENTE.

3.7 - TIPO 4 - SISTEMA DE EXCITAÇÃO DE ATUAÇÃO NÃO CONTÍNUA

Os sistemas de excitação apresentados até aqui representam os sistemas modernos de alto ganho com fonte de excitação de ação rápida. O tipo 4 é usado para representar outros sistemas, em particular aqueles que antecederam os de excitação de ação contínua. Os dois exemplos clássicos de sistemas de excitação do tipo 4 são:

- GENERAL ELECTRIC - G F A 4
- WESTINGHOUSE - B J 30

A figura 3.7 mostra o regulador tipo 4.



SISTEMA DE EXCITAÇÃO DE ATUAÇÃO NÃO CONTÍNUA

FIG. 3.7 - SISTEMA DE EXCITAÇÃO DE ATUAÇÃO NÃO CONTÍNUA

onde:

V_{RH} - limitado entre V_{Rmin} e V_{Rmax}

T_{RH} - constante de tempo de percurso do reostato.

Estes sistemas respondem basicamente a duas velocidades diferentes, dependendo da magnitude da tensão de erro. Para pequenos erros, o ajuste é feito com um reostato motorizado. Os erros maiores causam a inserção ou eliminação rápida de resistores e a aplicação de um sinal forte à excitatriz

Dependendo da magnitude do erro de tensão, ΔV_1 , são especificadas diferentes maneiras de regular.

Se o erro de tensão é maior do que o ajuste K_V (tipicamente 5%) do contacto de variação rápida, a tensão $V_{Rm\acute{a}x}$ ou $V_{Bm\grave{i}n}$ é aplicada a excitatriz, dependendo do sinal de erro. Para um erro menor do que K_V a entrada da excitatriz é igual ao ajuste do reostato V_{RH} . O reostato é ajustado para baixo ou para cima, dependendo do sinal do erro. TRH é constante de atraso de ajuste da tensão do campo da excitatriz.

3.8 - OUTROS SISTEMAS

Muitos outros sistemas de excitação, em uso em unidades geradoras antigas de pequena capacidade de geração não foram discutidas. Isto inclui sistemas que nem são mais fabricados. Como eles representam somente uma pequena fração da capacidade total instalada, poderão ser representados pelos sistemas tipo 1 ou 4, desde que seja feita uma escolha adequada das constantes.

3.9 - OUTROS SINAIS DE ENTRADA PARA O RECALADOR

Com o advento dos sistemas de excitação de ação contínua, com um ganho muito elevado, passamos a ter no sistema um grande amortecimento na primeira oscilação, isto é, um aumento de torque sincronizante, mas, por outro lado, podemos obter um amortecimento negativo nas oscilações subsequentes. Portanto, é aí que os sinais estabilizadores tem papel importante nos sistemas de excitação, pois permitem prover sinais positivos de amortecimento das oscilações, melhorando a estabilidade dos geradores e o amortecimento das oscilações das interligações.

Podemos citar alguns desses sinais como o de:

- potência acelerante
- velocidade
- frequência
- razão de variação da tensão terminal.

Quando usados, eles são adicionados no ponto somatório da tensão de referência, ao erro da tensão terminal e são indicados, nos diagramas de blocos, como outros sinais.

Usualmente o sinal estabilizante é inserido através de uma função de transferência proporcionando um ajuste de ganho e de compensação "lead-lag" para a variação de fase ("phase shifting"). A função de transferência lead-lag é

$$\frac{Y}{X} = \frac{1 + s T_1}{1 + s T_2}$$

Na Figura abaixo vemos as funções de transferência de alguns sinais estabilizantes dos sistemas de excitação.

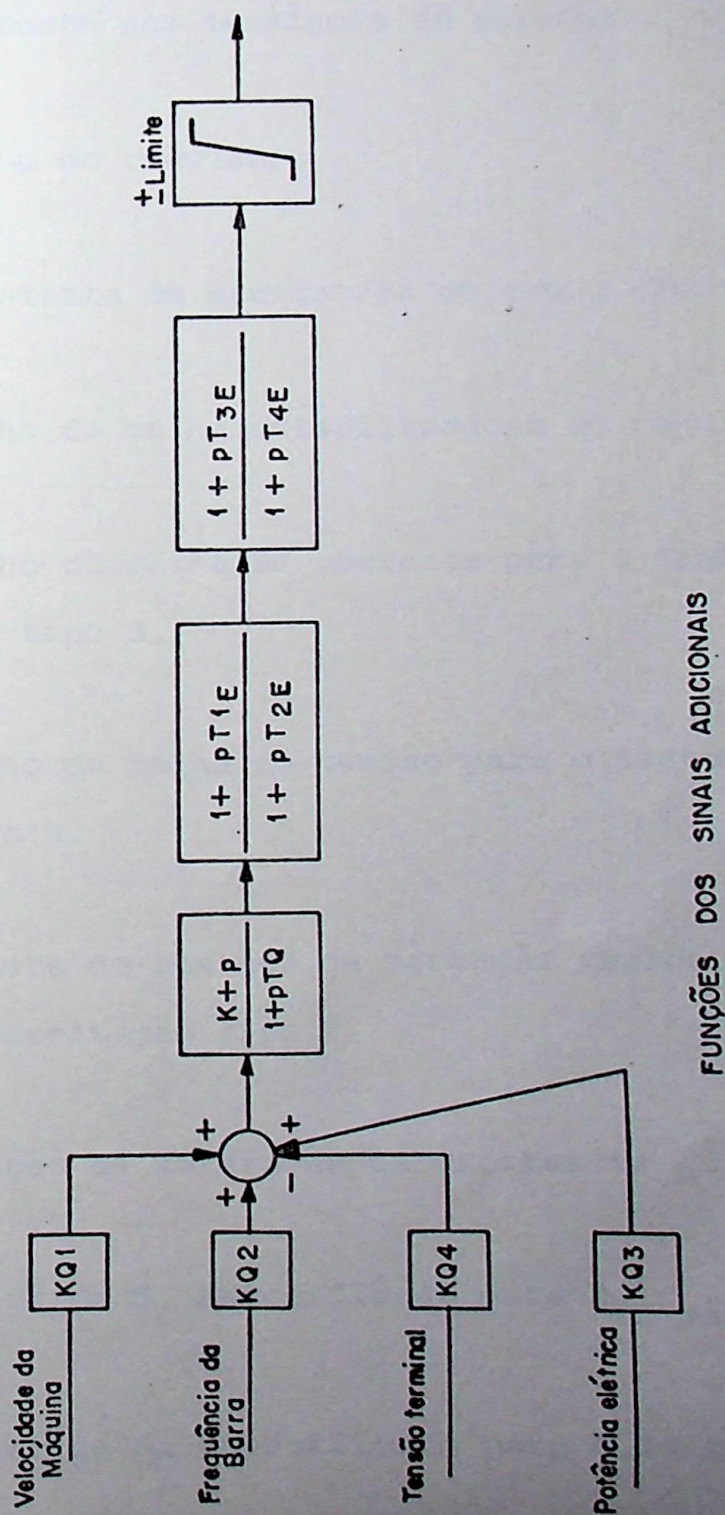


FIG. 3.8 - FUNÇÕES DOS SINAIS ADICIONAIS

3.10 - NOMENCLATURA USADA PARA O SISTEMA DE EXCITAÇÃO

- E_{FD} - Tensão de saída da excitatriz (aplicada ao campo do gerador).
- I_{FD} - Corrente no campo do gerador
- I_T - Corrente nos terminais do gerador
- K_A - Ganho do regulador
- K_E - Constante da excitatriz do campo auto-excitado
- K_F - Ganho da malha estabilizadora do regulador
- K_1 - Ganho da malha de corrente para o sistema de excitação tipo 3.
- K_P - Ganho da malha de tensão para o sistema de excitação tipo 3.
- K_V - Ajuste do contato de variação rápida para o sistema de excitação tipo 4.
- S_E - Função de saturação da excitatriz
- $S_{EMáx}$ - Valor de S_E especificado para $E_{FD máx}$
- $S_{E0,75}$ - Valor de S_E especificado para $0,75 E_{FD Máx}$
- T_A - Constante de tempo do amplificador do r

- T_E - Constante de tempo da excitatriz
- T_F - Constante de tempo da malha estabilizadora do regulador.
- T_{F1}, T_{F2} - Constantes de tempo do circuito estabilizador do regulador (sistema de excitação com retificador rotativo).
- T_R - Constante de tempo do transdutor de entrada do regulador.
- T_{RH} - Constante de tempo do reostato para o sistema de excitação tipo 4.
- V_R - Tensão de saída do regulador.
- $T_{RMáx}$ - Valor máximo de V_R
- $V_{RMín}$ - Valor mínimo de V_R
- V_{REF} - Tensão de referência do regulador
- V_T - Tensão terminal do gerador
- V_{THEV} - Tensão obtida pela soma vetorial de sinais proporcionais à tensão e corrente para o sistema de excitação tipo 3.
- ΔV_T - Erro na tensão terminal do gerador.
- KQ_1, KQ_2, KQ_3, KQ_4 - Ganhos dos sinais adicionais

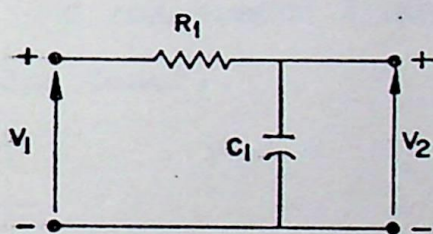
4 - FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA DE UM SISTEMA DE EXCITAÇÃO

4.1 - COMPONENTES DE UM REGULADOR DE TENSÃO E SUAS FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA

A função de transferência de cada um dos componentes do regulador pode ser obtida facilmente como veremos a seguir:

4.1.1 - RETIFICADOR E FILTRO

A tensão terminal já rebaixada e retificada é aplicada a um filtro R-C, cuja função de



transferência é:

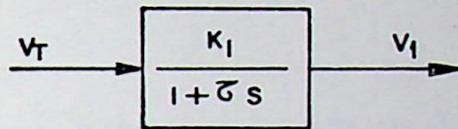
$$V_2(t) = \frac{1}{C_1} \int i dt \quad \longrightarrow \quad V_2(s) = \frac{1}{C_1 s} I(s)$$

$$V_1(t) = R_1 i + V_2(t)$$

$$V_1(t) = R_1 i + \frac{1}{C_1} \int i dt \quad \longrightarrow \quad V_1(s) = I(s) \left(R_1 + \frac{1}{C_1 s} \right)$$

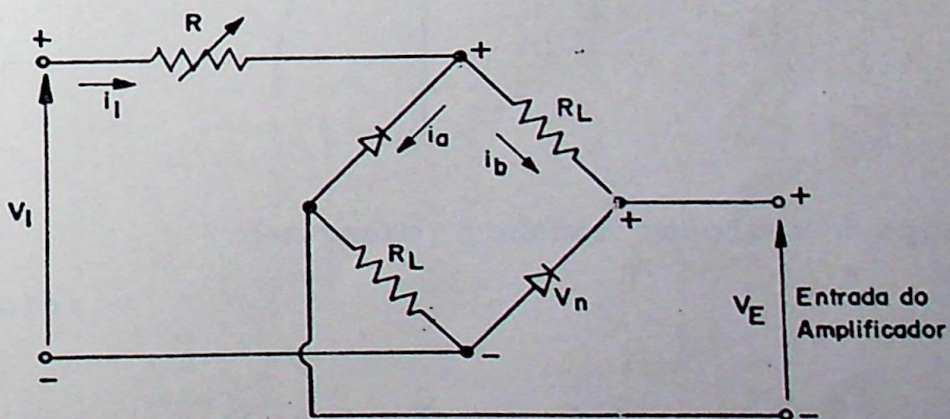
$$\frac{V_2(s)}{V_1(s)} = \frac{\frac{1}{C_1 s}}{R_1 + \frac{1}{C_1 s}} = \frac{1}{1 + R_1 C_1 s}$$

Chamando de K_1 o ganho estático do conjunto e de τ a constante de tempo, em razão da filtragem, teremos:



4.1.2 - COMPARADOR

O comparador é constituído por uma parte não linear com diodos Zener.



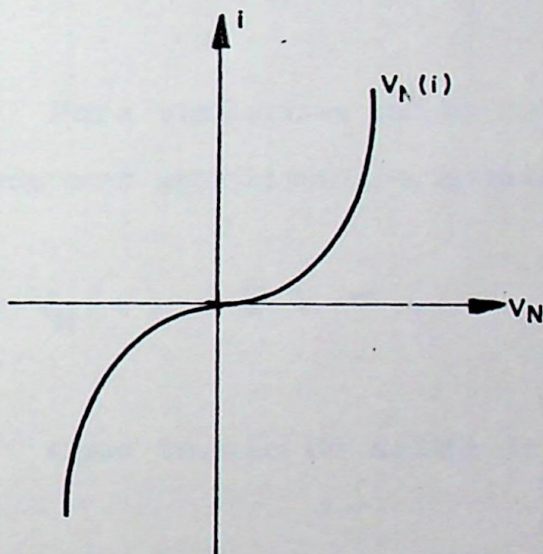
Supondo-se a corrente de entrada do amplificador desprezível ($i_e \approx 0$), teremos as correntes i_a e i_b iguais $i_a = i_b = i$. Podemos então escrever que:

$$V_1 = R \hat{i}_1 + R_L \frac{\hat{i}_1}{2} + V_N (\hat{i}_1/2)$$

Como $i_1 = 2i$, temos:

$$V_1 = (2R + R_L)i + V_N(i) \quad (1)$$

A característica do diodo Zener é não linear e, com as polaridades indicadas acima, ela tem o seguinte aspecto:

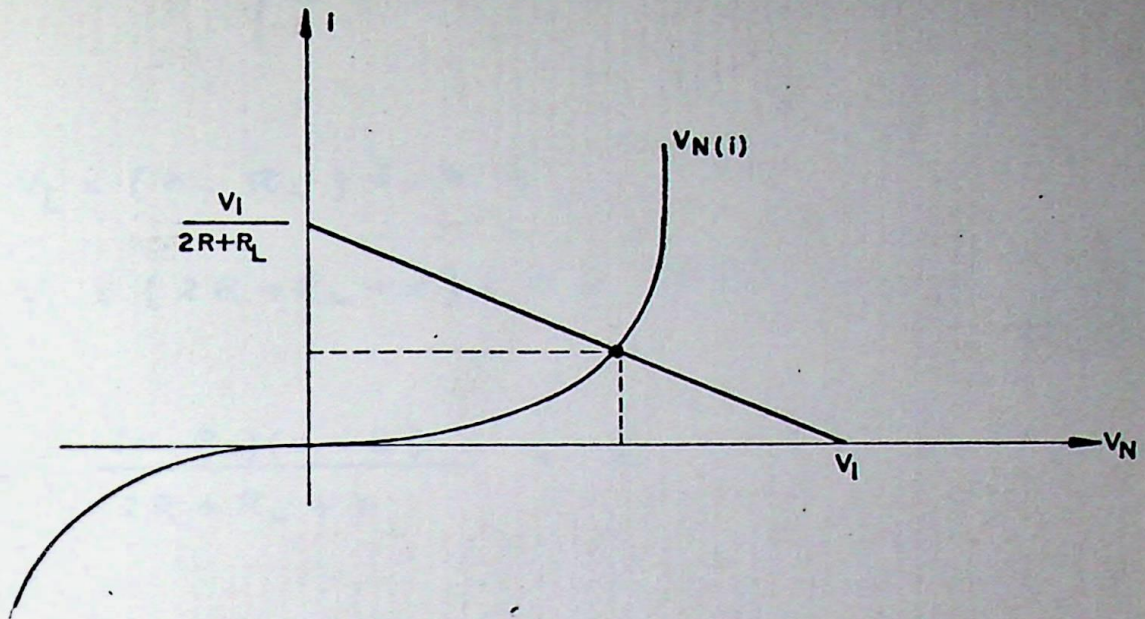


Portanto, podemos resolver a equação (1)

graficamente:

$$V_1 = (2R + R_L)i + V_N(i)$$

$$V_N(i) = V_1 - (2R + R_L)i$$



Para variações muito pequenas, a característica do diodo pode ser aproximada e considerada retilínea.

$$V_N(i) = E + r i \quad (2)$$

Como tensão de saída da ponte temos:

$$V_E = V_N(i) - R_L i \quad (3)$$

Para obtermos uma função de transferência que relacione V_E com V_1 , basta que combinemos as equações (1) (2) e (3).

$$\begin{cases} V_1 = (2R + R_L) i + V_N(i) & (1) \\ V_N(i) = E + r i & (2) \\ V_E = V_N(i) - R_L i & (3) \end{cases}$$

$$\begin{cases} V_E = E + r i - R_L i \\ V_1 = (2R + R_L) i + E + r i \end{cases}$$

$$\begin{cases} V_E = (r - R_L) i + E & (4) \\ V_1 = (2R + R_L + r) i + E & (5) \end{cases}$$

$$\longrightarrow \frac{V_1 - E}{2R + R_L + r} = i$$

$$V_E = \frac{(r - R_L)(V_1 - E)}{2R + R_L + r} + E$$

$$V_E = \frac{(r - R_L) V_1}{2R + R_L + r} - \frac{(r - R_L) E}{2R + R_L + r} + \frac{(2R + R_L + r) E}{2R + R_L + r}$$

$$V_E = \frac{(r - R_L) V_1}{2R + R_L + r} + \frac{2(R + R_L) E}{2R + R_L + r}$$

$$V_E = \frac{2(R + R_L) E}{2R + R_L + r} - \frac{(R_L - r) V_1}{2R + R_L + r} \quad (6)$$

Onde $E = V_{REF}$.

O valor da resistência R é ajustado de tal maneira que, para $V_1 = K_1 \cdot V_{REF}$, a tensão de saída do comparador seja nula, isto é, $V_E = 0$. Podemos constatar isto através das equações (4) e (5).

$$\begin{cases} V_E = (r - R_L) \dot{i} + V_{REF} & (4) \\ V_I = (2R + R_L + r) \dot{i} + V_{REF} & (5) \end{cases}$$

$$V_E = 0$$

$$0 = (r - R_L) \dot{i} + V_{REF} \longrightarrow \dot{i} = \frac{V_{REF}}{R_L - r}$$

$$V_I = \frac{(2R + R_L + r)}{(R_L - r)} V_{REF} + V_{REF}$$

$$V_I = V_{REF} \left(\frac{2R + R_L + \cancel{r} + R_L - \cancel{r}}{R_L - r} \right)$$

$$V_I = V_{REF} \frac{(2R + 2R_L)}{R_L - r}$$

$$V_I = K_1 \cdot V_{REF}$$

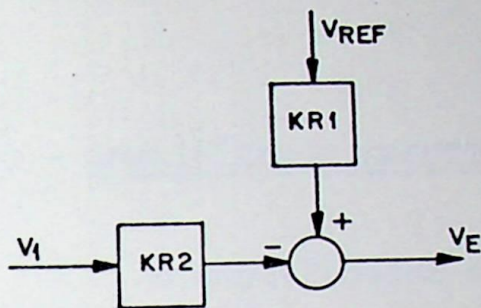
Voltando-se à equação (6) e colocando-se $(R_L - r)/2R + R_L + r$, em evidência temos:

$$V_E = \frac{(R_L - r)}{2R + R_L + r} \left\{ \frac{2(R + R_L)}{R_L - r} V_{REF} - V_I \right\}$$

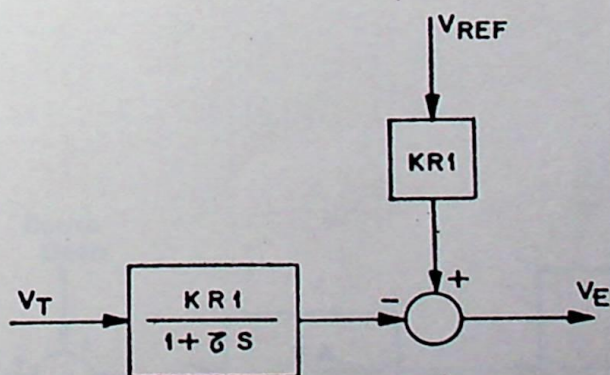
$$V_E = \frac{(R_L - r)}{2R + R_L + r} \left\{ K_1 V_{REF} - V_I \right\}$$

$$V_E = KR_1 \cdot V_{REF} - KR_2 \cdot V_I$$

Portanto, o retificador-filtro pode ser representado pelo seguinte diagrama de blocos:



E o conjunto retificador-filtro-comparador pode ser representado pelo diagrama de blocos abaixo.



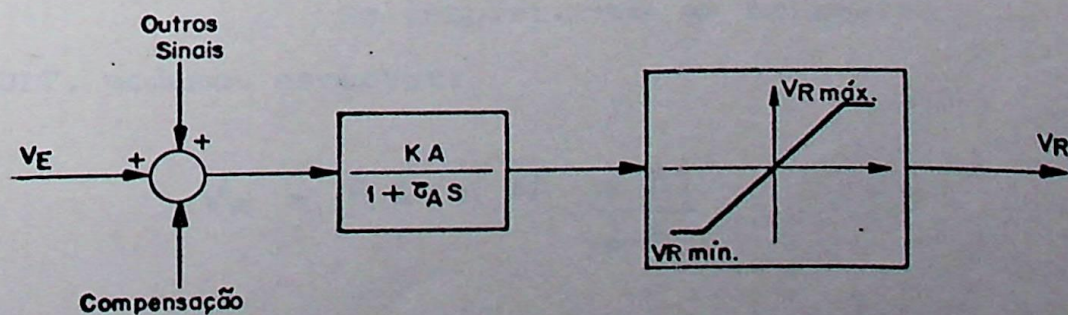
O produto dos ganhos $KR2-K1$, no caso, é igual a $KR1$ (característica do nosso equipamento).

4.1.3 - AMPLIFICADOR MAGNÉTICO

O amplificador magnético dispõe de diversos enrolamentos de controle e de uma realimentação interna. Cada um dos dois estágios de amplificação apresenta uma constante de tempo; entretanto, podemos representar todo o conjunto por uma constante de tempo τ_A e um ganho estático K_A . Como em qualquer amplificador a tensão de saída é limitada pela saturação, isto é,

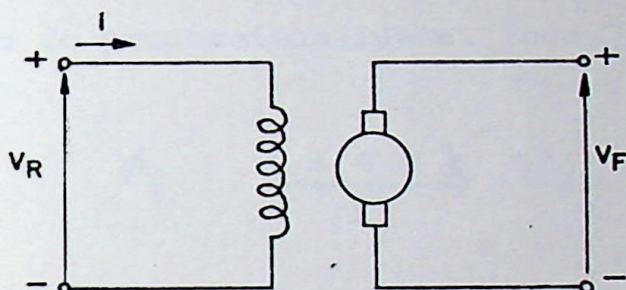
$$V_{R \min} \leq V_R \leq V_{R \max}$$

o seu diagrama de blocos será:



4.1.4 - EXCITATRIZ

Ao termos a excitatriz operando em va zio verificamos:



Onde:

R = resistência total do campo

N = número de espiras

ϕ_f = fluxo do campo

ϕ_a = fluxo da armadura

ϕ_d = fluxo de dispersão

Se desprezarmos as correntes de FOUCAULT, podemos escrever:

$$V_R - Ri = N \frac{d\phi_f}{dt} \quad (1)$$

O somatório dos enlaces de fluxo do campo é igual ao somatório dos enlaces de fluxo da armadura mais os de dispersão:

$$\phi_f = \phi_a + \phi_d$$

Supondo que o fluxo de dispersão seja proporcional ao fluxo da armadura, temos:

$$\phi_f = \phi_a + c \phi_a = (1 + c) \phi_a$$

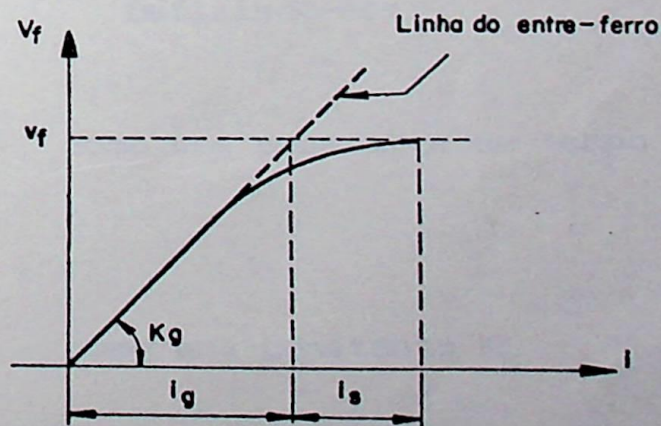
Por outro lado, $V_F = K \phi_a$, onde K é uma constante de proporcionalidade. Logo;

$$\phi_f = \frac{(1 + c)}{K} V_F$$

Substituindo esta ultima expressão em (1), temos:

$$V_R - R i = \frac{N(1+c)}{K} \frac{d V_f}{dt} \quad (2)$$

A curva de saturação a vazio $v_f = f(i)$ é da forma



Decompomos a corrente em duas parcelas como indicado na figura:

$$i = i_g + i_s$$

onde:

i_g = corrente que produz v_f dado pela linha do entreferro

i_s = corrente adicional para compensar o efeito da saturação

Sabemos que:

$$V_f = K_g \cdot i_g$$

Por outro lado, a corrente i_s é uma função de V_F .

$$i_s = i_s (V_F)$$

Substituindo i_g e i_s na equação (2) temos:

$$V_R - R \left(\frac{V_F}{K_g} + i_s (V_F) \right) = \frac{N(1+c)}{K} \frac{dV_f}{dt}$$

Definindo-se:

$$\frac{N(1+c)}{K} \quad \text{como uma constante de tempo } T_E$$

$$\frac{R}{K_g} \quad \text{como uma constante } K_E$$

temos:

$$T_E \frac{dV_F}{dt} + K_E V_F = V_R - R i_s (V_F)$$

cuja transformada de Laplace é

$$(T_E s + K_E) V_F(s) = V_R(s) - SE \cdot V_F(s) \quad 95$$

onde:

$$(T_E s + K_E) V_F(s) + SE V_F(s) = V_R(s)$$

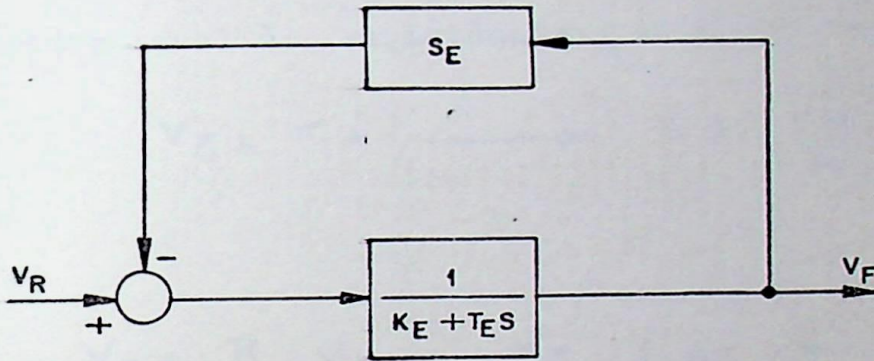
$$V_F(s) [(T_E(s) + K_E) + SE] = V_R$$

$$SE = \frac{R \hat{i}_s(V_F)}{V_F}$$

é a função de saturação.

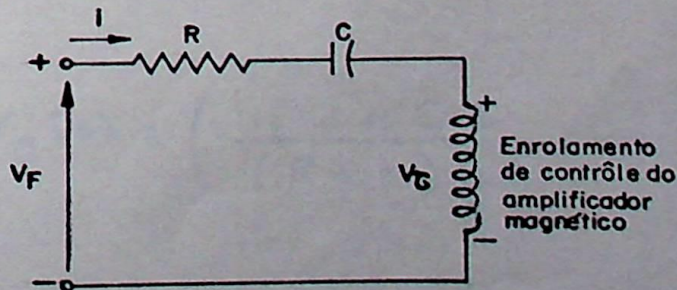
Portanto, o diagrama de bloco da excita -

triz em vazio será:



4.1.5 - COMPENSAÇÃO

O circuito de compensação é constituído ,
por um circuito R-C, série,



onde:

$$V_F = Ri + V_C + V_Z$$

$$V_F = Ri + \frac{1}{C} \int i dt + V_Z$$

Como a impedância de entrada do enrolamento de controle do amplificador magnético é baixa, ela é praticamente igual à resistência r do enrolamento.

$$V_Z = r i \longrightarrow i = \frac{V_Z}{r}$$

logo:

$$V_F = \frac{R}{r} V_Z + \frac{V_Z}{Cr} \int dt + V_Z$$

Achando-se a transformada de Laplace da expressão obtemos:

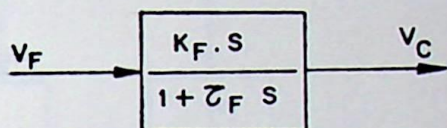
$$V_F(s) = \left(\frac{R}{r} + \frac{1}{Cr s} + 1 \right) V_Z(s)$$

$$V_F(s) = \left(\frac{RCS + 1 + rCs}{rCs} \right) V_Z(s)$$

$$V_Z(s) = \left(\frac{rCs}{(R+r)Cs + 1} \right) V_F(s)$$

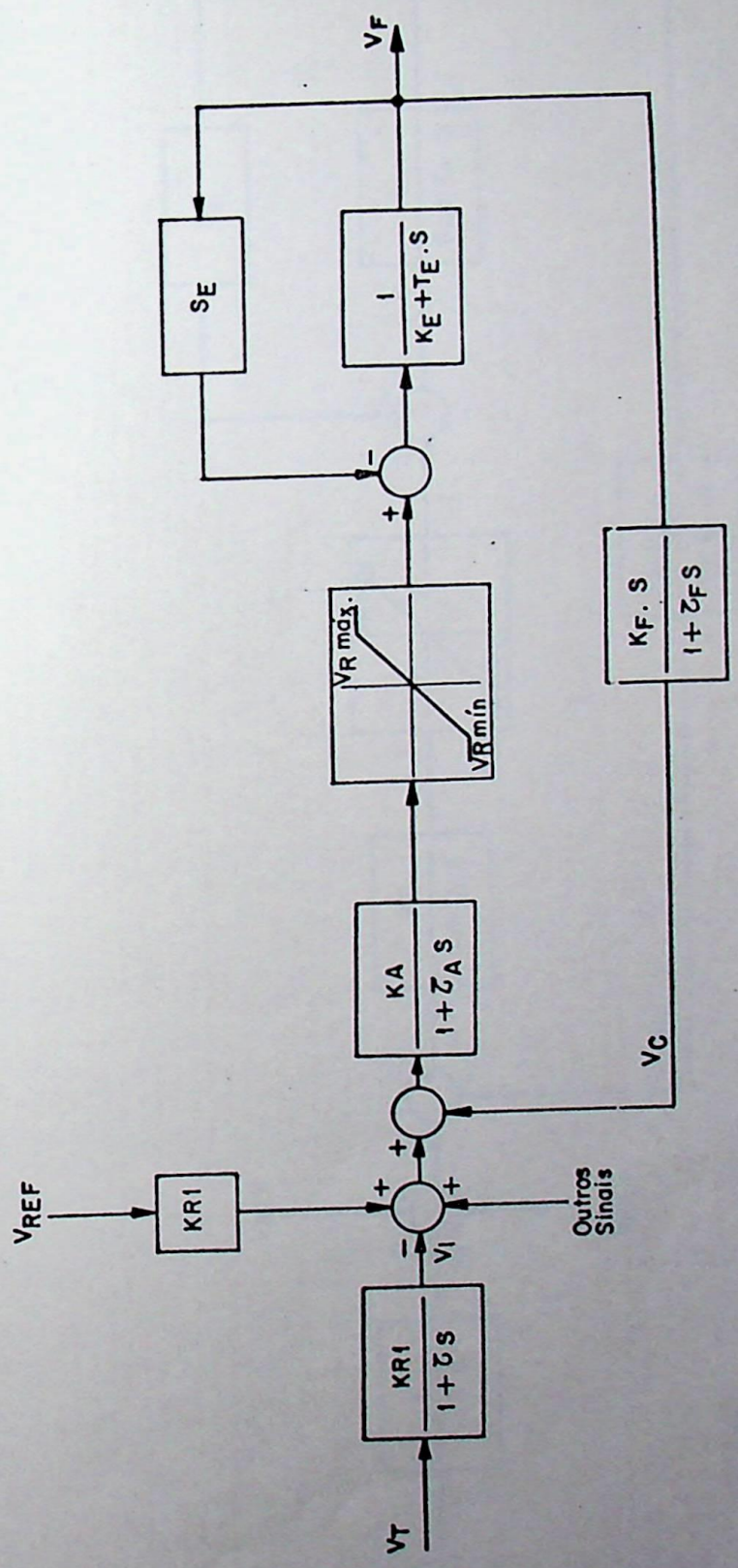
E o diagrama de bloco de compensador é

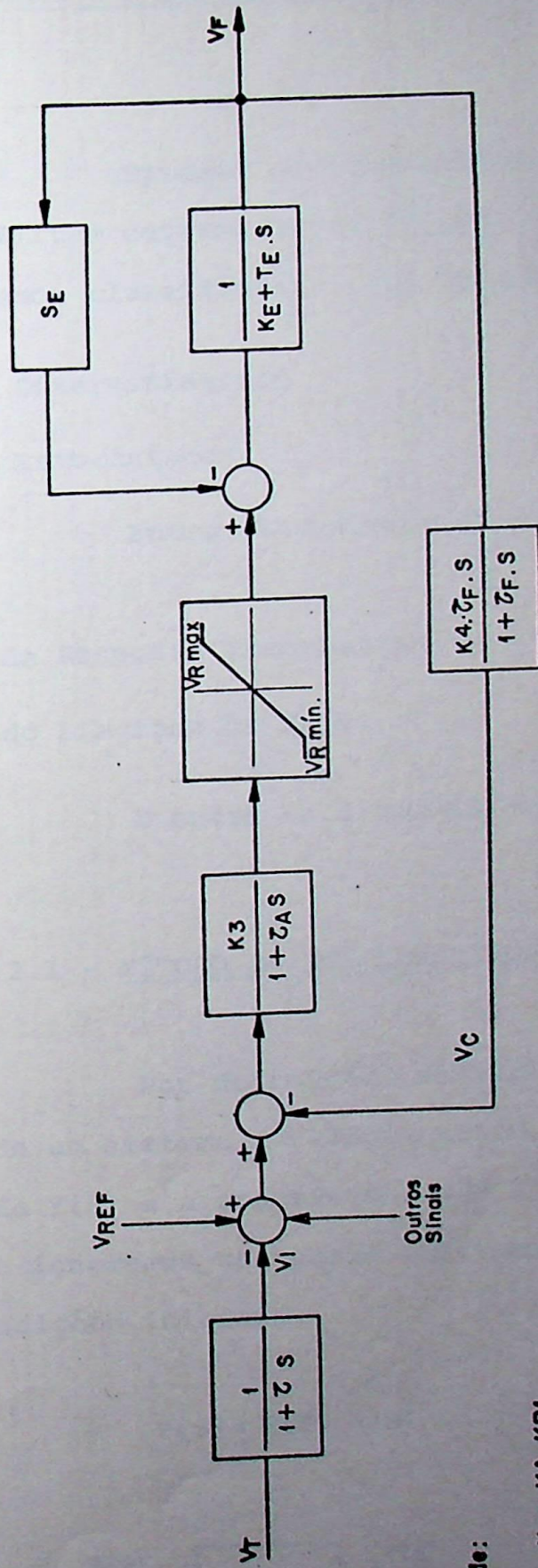
da forma:



4.1.6 - DIAGRAMA DE BLOCOS DO REGULADOR

Reunindo as diversas funções de transferência obtidas, chegamos ao seguinte diagrama ;





Onde:

$$K_3 = K_A \cdot K_{R1}$$

$$K_4 = \frac{K_F}{z_F \cdot K_{R1}}$$

4.2 - DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DAS FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA

Existem diversos métodos que, aliados a ensaios, possibilitam determinar as funções de transferência de um sistema. Podemos classificá-los de um modo geral como:

- Métodos Determinísticos
- Métodos Estocásticos

Entre os determinísticos destacamos:

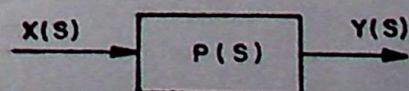
- Método da Resposta Transitória
- Método do Diagrama de Bode.

E entre os estocásticos, o da correlação

4.2.1 - MÉTODO DA RESPOSTA TRANSITÓRIA

Por definição, entende-se como função de transferência de um sistema a relação entre a transformada de Laplace da saída $Y(S)$ e a transformada de Laplace de entrada $X(S)$, desde que ignoremos os termos que resultam dos valores iniciais ou condições iniciais.

$$Y(S) = P(S) \cdot X(S)$$



Visto que a formação da transformada de saída $Y(S)$ é puramente uma multiplicação algébrica de $P(S)$ e $X(S)$, quando as condições iniciais são nulas, a multiplicação, é comutativa, isto é,

$$Y(s) = X(s) \cdot P(s) = P(s) \cdot X(s)$$

O sinal de teste mais usual em testes de campo é o degrau, isto é,

$$\begin{cases} x(t) = 1 & , \quad t \geq 0 \\ x(t) = 0 & , \quad t \leq 0 \end{cases}$$

Por esse motivo deixaremos de apresentar, a análise para outros sinais, tais como o rampa e o impulso.

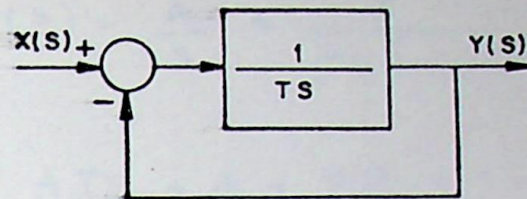
A transformada de Laplace da função de grau é:

$$x(s) = \frac{1}{s}$$

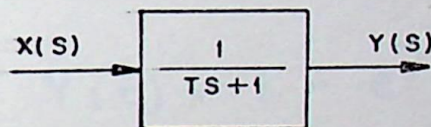
Vamos tomar como exemplo a função

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{Ts + 1}$$

cuja diagrama de blocos é o seguinte:



$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1/TS}{1 + \frac{1}{TS}} = \frac{1}{TS + 1}$$



Aplicando-se a função degrau a $X(s)$ te:

remos:

$$Y(s) = \frac{1}{s} \cdot \frac{1}{TS + 1} \quad (1)$$

Em alguns casos simples, como este, é possível tirarmos informações suficientes para a determinação de $P(s)$, a partir da resposta no tempo de $Y(t)$.

Expandindo a equação (1) em frações parciais e logo após tomando a sua transformada de Laplace inversa teremos:

$$Y(s) = \frac{A}{s} + \frac{B}{Ts + 1} = \frac{1}{s(Ts + 1)}$$

$$ATs + A + Bs = 1$$

$$(AT + B)s + A = 1$$

$$\begin{cases} AT + B = 0 \\ A = 1 \end{cases} \longrightarrow B = -T$$

Logo:

$$Y(s) = \frac{1}{s} - \frac{T}{Ts + 1} = \frac{1}{s} - \frac{1}{s + 1/T}$$

$$Y(t) = 1 - e^{-t/T} \quad (t \geq 0) \quad (2)$$

Examinando-se a equação (2), verificamos, que $Y(t)$ irá variar desde zero até tender a unidade. Uma das características importantes de tal curva de resposta exponencial $Y(t)$ é que para $t=T$ o valor de $Y(t)$ é 0,632, isto é, a resposta $Y(t)$ atingiu 63,2% de toda a sua variação. Isto pode ser facilmente verificado. Substituindo-se $t=T$ na equação (2).

$$Y(t) = 1 - e^{-1} = 0,632$$

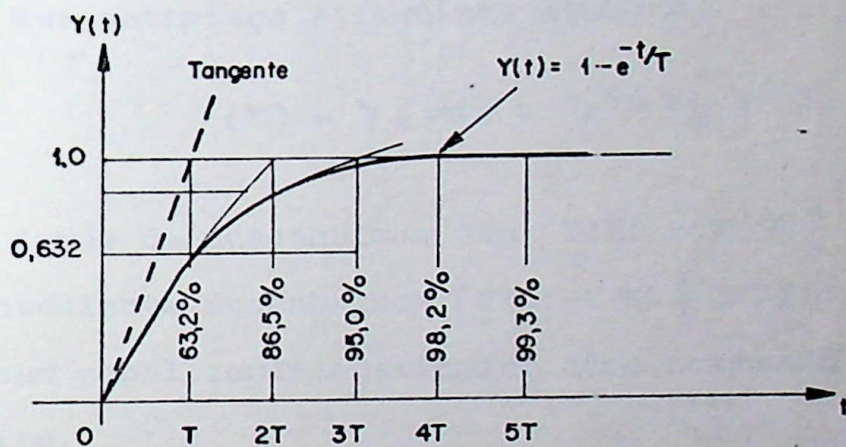
Sabemos que T é a constante de tempo do sistema, e quanto menor ela é, mais rápida é a resposta do sistema.

Outra característica importante da curva de resposta é que a inclinação da tangente à curva no ponto $t=0$ é:

$$\frac{dy}{dt} = \frac{1}{T} e^{-t/T} \Big|_{t=0} = \frac{1}{T}$$

Com isto verificamos que, se a resposta, tivesse mantido sua velocidade inicial, ela teria atingido o seu valor final para $t=T$.

A curva da resposta exponencial é mostrada abaixo:



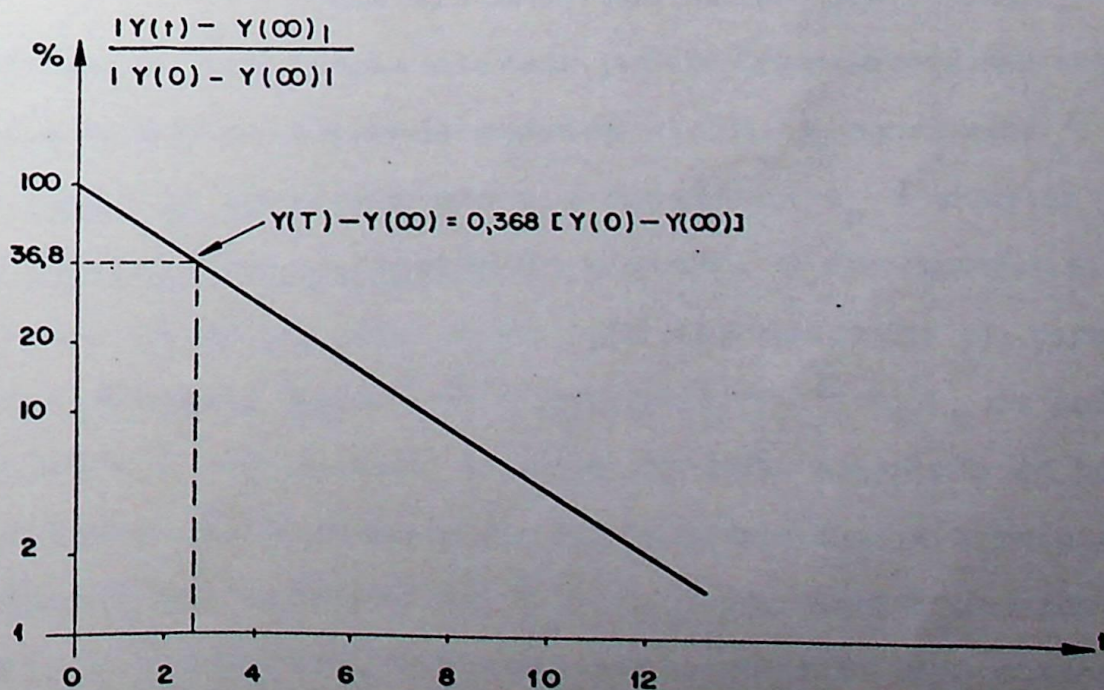
Em uma constante de tempo a resposta do sistema foi de 0 a 63,2% do seu valor final. Em duas constantes de tempo a resposta atingiu 86,5% do seu valor final. Para $t = 3T, 4T$ e $5T$, a resposta atingiu 95,0%, 98,2% e 99,3%, respectivamente do valor final. Portanto, para $t \geq 4T$, a resposta permanece a 2% do seu valor final. Analisando-se a equação (2) o regime permanente é atingido matematicamente, quando t tende para o infinito. Entretanto, na prática, é razoável estimarmos o tempo de resposta como sendo o tempo para que a curva atinja 2% do seu valor final, ou quatro constantes de tempo.

Na prática se tivermos um sistema e quisermos saber se é um sistema de primeira ordem ou não, adotamos o seguinte procedimento:

- 1) desenhamos a curva $\log |Y(t) - Y(\infty)|$, aonde $Y(t)$ é a variável que representa a saída do sistema, que é função do tempo t ; se a curva for uma linha reta, o sistema será de 1ª ordem;
- 2) a constante de tempo T poderá ser lida do gráfico, desde que satisfaça a seguinte equação:

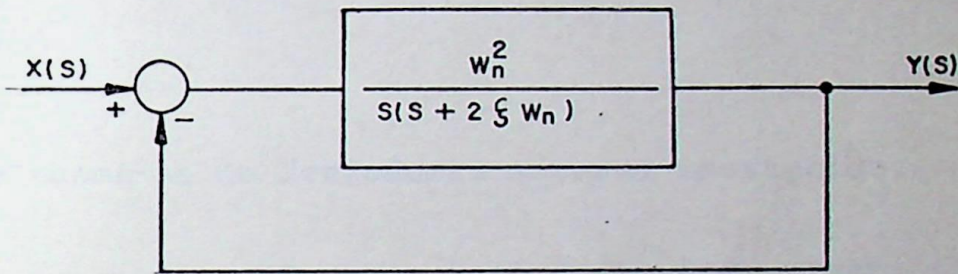
$$Y(T) - Y(\infty) = 0,368 [Y(0) - Y(\infty)]$$

- 3) ao invés de desenharmos $\log |Y(t) - Y(\infty)|$, por t , é conveniente desenharmos $|Y(t) - Y(\infty)| / |Y(0) - Y(\infty)|$ por t num papel semi-logarítmico como mostrado na figura abaixo.



Agora verificaremos a aplicação do método -
 todo a sistemas de segunda ordem, que podem ser representados
 da forma indicada:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$$



Tais sistemas são muito importantes, porque sistemas de ordem mais elevada podem frequentemente ser aproximados pelos sistemas de segunda ordem. A constante ξ é chamada razão de amortecimento e a constante ω_n é chamada frequência natural não amortecida do sistema. O desempenho dinâmico dos sistemas de segunda ordem pode ser descrito em termos dos dois parâmetros acima, ξ e ω_n . Se $0 < \xi < 1$, os polos são complexos e conjugados, e estão do lado esquerdo do plano S . O sistema é então chamado de sub-amortecido, e a resposta transitória é oscilatória. Se $\xi = 1$, o sistema é chamado de criticamente amortecido. Sistemas sobre-amortecidos correspondem a $\xi > 1$. Se $\xi = 0$ o sistema não amortece. Analisaremos, agora, o comportamento da função para as três condições de

1) SISTEMA SUBAMORTECIDO ($0 < \xi < 1$)

Neste caso $Y(S)/X(S)$ pode ser escrita sob a forma:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{\omega_n^2}{(s + \xi \omega_n + j \omega_d)(s + \xi \omega_n - j \omega_d)}$$

onde:
$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2}$$

ω_d - chama-se de frequência natural amortecida.

Para o sinal de um degrau vem:

$$Y(s) = \frac{\omega_n^2}{(s^2 + 2 \xi \omega_n s + \omega_n^2) s}$$

Decompondo-se em frações parciais, para o cálculo da transformada inversa, temos:

$$Y(s) = \frac{A}{s} - \frac{Bs + C}{s^2 + 2 \xi \omega_n s + \omega_n^2} = \frac{\omega_n^2}{s(s^2 + 2 \xi \omega_n s + \omega_n^2)}$$

$$As^2 + 2A \xi \omega_n s + A \omega_n^2 - Bs^2 - Cs = \omega_n^2$$

$$(A - B)s^2 + (2A \xi \omega_n - C)s + A \omega_n^2 = \omega_n^2$$

$$\begin{cases} A - B = 0 & \longrightarrow A = B \\ 2A \xi \omega_n - C = 0 \\ A = 1 \end{cases}$$

$$\begin{cases} A=1 \\ B=1 \\ C=2\xi\omega_n \end{cases}$$

$$Y(s) = \frac{1}{s} - \frac{s + 2\xi\omega_n}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$$

$$Y(s) = \frac{1}{s} - \frac{s + \xi\omega_n}{(s + \xi\omega_n)^2 + \omega_d^2} - \frac{\xi\omega_n}{(s + \xi\omega_n)^2 + \omega_d^2}$$

$$\mathcal{L}^{-1} \left[\frac{s + \xi\omega_n}{(s + \xi\omega_n)^2 + \omega_d^2} \right] = e^{-\xi\omega_n t} \cdot \cos \omega_d t$$

$$\mathcal{L}^{-1} \left[\frac{\omega_d}{(s + \xi\omega_n)^2 + \omega_d^2} \right] = e^{-\xi\omega_n t} \cdot \text{sen } \omega_d t$$

$$\mathcal{L}^{-1} [Y(s)] = Y(t) =$$

$$= 1 - e^{-\xi\omega_n t} \left(\cos \omega_d t + \frac{\xi}{\sqrt{1 - \xi^2}} \text{sen } \omega_d t \right)$$

Da equação acima verificamos que a frequência de oscilação transitória é a frequência natural amortecida ω_d , que varia com a razão de amortecimento ξ . O sinal de erro do sistema é a diferença entre a entrada e a saída.

$$\text{erro}(t) = X(t) - Y(t)$$

$$\text{erro}(t) = e^{-\xi \omega_n t} \left(\cos \omega_d t + \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \text{sen } \omega_d t \right)$$

$$\text{para } (t \geq 0)$$

Este sinal nos mostra uma oscilação se noidal amortecida. Em regime permanente, quando $t = \infty$, não temos erro entre a entrada e a saída.

Se a razão de amortecimento ξ é igual a zero, a resposta torna-se não amortecida e, portanto, as oscilações persistem indefinidamente. Abaixo temos a resposta de $Y(t)$ para um caso sem amortecimento, isto é, quando $\xi = 0$.

$$Y(t) = 1 - \cos \omega_n t \quad (t \geq 0)$$

Verifica-se na equação a apresenta da frequência natural não amortecida do sistema ω_n , isto é, a frequência na qual o sistema oscilaria se o amortecimento de crescesse para zero. Se o sistema linear tem algum amortecimento, a frequência natural não amortecida não pode ser observa da experimentalmente, e por outro lado temos para frequência

$$\omega_n \cdot \sqrt{1 - \xi^2}$$

2 - SISTEMA DE AMORTECIMENTO CRÍTICO ($\xi = 1$)

Temos:

$$Y(s) = \frac{\omega_n^2}{(s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2)s}$$

Como: $\xi = 1$

$$Y(s) = \frac{\omega_n^2}{(s + \omega_n)^2 s}$$

cuja transformada inversa é:

$$Y(s) = \frac{A}{(s + \omega_n)^2} + \frac{B}{(s + \omega_n)} + \frac{C}{s} = \frac{\omega_n^2}{(s + \omega_n)^2 s}$$

$$As + Bs(s + \omega_n) + C(s + \omega_n)^2 = \omega_n^2$$

$$As + Bs^2 + Bs\omega_n + C(s^2 + 2\omega_n s + \omega_n^2) = \omega_n^2$$

$$(B + C)s^2 + (A + B\omega_n + 2C\omega_n)s + C\omega_n^2 = \omega_n^2$$

$$\begin{cases} B + C = 0 \longrightarrow B = -1 \\ A + B\omega_n + 2C\omega_n = 0 \\ C = 1 \end{cases}$$

$$A = -\omega_n$$

$$Y(s) = \frac{-\omega_n}{(s + \omega_n)^2} - \frac{1}{(s + \omega_n)} + \frac{1}{s}$$

$$Y(s) = \frac{1}{s} - \frac{1}{(s + \omega_n)} - \frac{\omega_n}{(s + \omega_n)^2}$$

$$Y(t) = 1 - e^{-\omega_n t} (1 + \omega_n t)$$

$$t \geq 0$$

3 - SISTEMA SOBREAMORTECIDO ($\xi > 1$)

Neste caso, os dois polos de $Y(S)/X(S)$ são reais, negativos e desiguais. Para $X(S) = 1/S$, temos:

$$Y(S) = \frac{\omega_n^2}{(s + \xi \omega_n + \omega_n \sqrt{\xi^2 - 1})(s + \xi \omega_n - \omega_n \sqrt{\xi^2 - 1})s}$$

cuja transformada de Laplace inversa é:

$$Y(t) = 1 + \frac{1}{2\sqrt{\xi^2 - 1}(\xi + \sqrt{\xi^2 - 1})} e^{-(\xi + \sqrt{\xi^2 - 1})\omega_n t} - \frac{1}{2\sqrt{\xi^2 - 1}(\xi - \sqrt{\xi^2 - 1})} e^{-(\xi - \sqrt{\xi^2 - 1})\omega_n t}$$

Portanto, a resposta $Y(t)$ possui dois termos exponenciais decrescentes. Quando ξ é bem maior que a unidade, um dos dois termos exponenciais decresce mais rapidamente do que o outro.

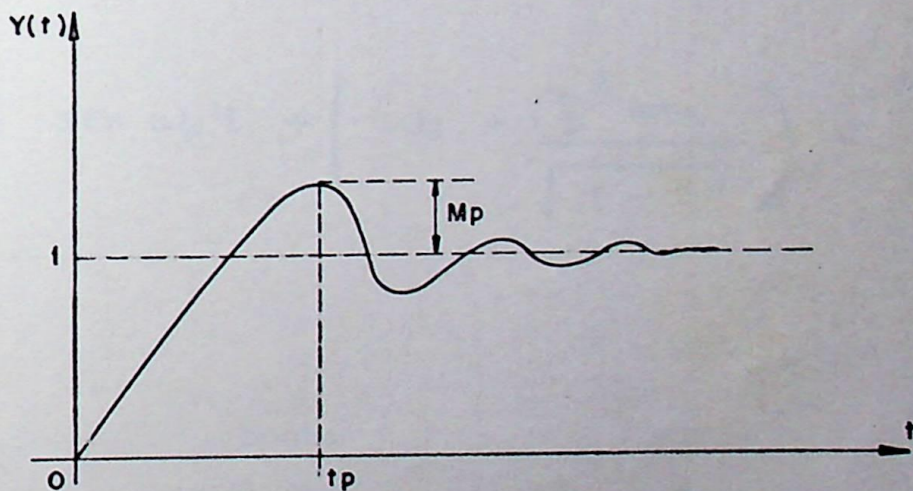
COMENTÁRIOS NAS ESPECIFICAÇÕES DA RESPOSTA TRANSITÓRIA

Exceto para certas aplicações onde não podem ser toleradas oscilações é desejável que a resposta transitória seja suficientemente rápida e amortecida. Portanto, para tal, deveremos ter um sistema cuja razão de amortecimento, se situe entre 0,4 e 0,8, isto é,

$$0,4 < \xi < 0,8 \quad ,$$

que é um sistema sub-amortecido.

Dada a resposta do sistema, determinamos, facilmente o tempo para termos o valor de pico máximo e o valor de sobrepasso máximo (Overshoot).



$$Y(t) = 1 - e^{-\xi \omega_n t} \left(\cos \omega_d t + \frac{\xi}{\sqrt{1 - \xi^2}} \operatorname{sen} \omega_d t \right)$$

Obtemos a constante de tempo de pico de
 rivando $Y(t)$ em relação a t e igualando a derivada a zero.

$$\frac{dY(t)}{dt} = 0 + \text{sen } \omega_d t \cdot (\omega_d) e^{-\xi \omega_n t} + \xi \omega_n e^{-\xi \omega_n t} \cos \omega_d t -$$

$$- \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} e^{-\xi \omega_n t} \cos \omega_d t \cdot (\omega_d) + \frac{\xi^2 \omega_n}{\sqrt{1-\xi^2}} \text{sen } \omega_d t \cdot e^{-\xi \omega_n t} = 0$$

$$\frac{dY(t)}{dt} = \text{sen } \omega_d t \cdot (\omega_d) e^{-\xi \omega_n t} + \xi \omega_n e^{-\xi \omega_n t} \cos \omega_d t -$$

$$- \xi \omega_n e^{-\xi \omega_n t} \cos \omega_d t + \frac{\xi^2 \omega_n}{\sqrt{1-\xi^2}} \text{sen } \omega_d t \cdot e^{-\xi \omega_n t} = 0$$

$$\frac{dY(t)}{dt} = \text{sen } \omega_d t + \left(\omega_d + \frac{\xi^2 \omega_n}{\sqrt{1-\xi^2}} \right) e^{-\xi \omega_n t} = 0$$

Logo:

$$\text{sen } \omega_d t = 0$$

$$\omega_d t = 0, \pi, 2\pi, 3\pi, \dots$$

Como o pico se dá no 1º intervalo, temos:

$$\omega_d t = \pi$$

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_d} = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1 - \xi^2}}$$

Cálculo do valor máximo de sobrepasso M_p .

$$M_p = y(t_p) - 1$$

$$M_p = - e^{-\xi \omega_n (\pi / \omega_d)} \left(\cos \pi + \frac{\xi}{\sqrt{1 - \xi^2}} \operatorname{sen} \pi \right)$$

$$M_p = e^{-(\xi / \sqrt{1 - \xi^2}) \pi}$$

A partir de t_p e M_p , determinamos a frequência natural de oscilação ω_n e o coeficiente de amortecimento relativo ξ .

4.2.2 - MÉTODO DO DIAGRAMA DE BODE

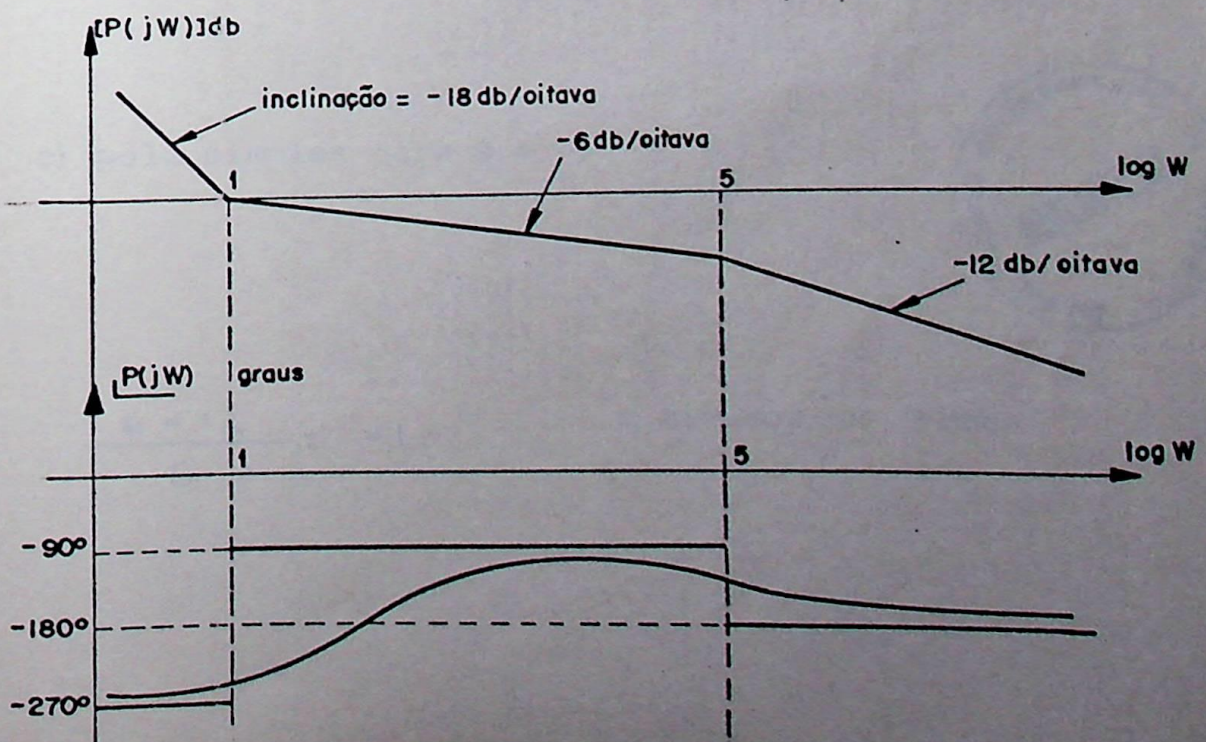
Sabemos que as assíntotas no diagrama de magnitude possuem inclinações que são múltiplas inteiras de 6 db/oitava e que nos pontos em que se cruzam temos polos ou zeros da função de transferência.

O procedimento para a determinação da função de transferência é o seguinte:

- levantamento experimental da resposta em frequência ;
- traçado das curvas do diagrama de Bode ;
- construção das assíntotas ;
- a partir dos cruzamentos das assíntotas obtemos os polos e os zeros da função de transferência.

EXEMPLO:

As assíntotas do diagrama de Bode da função de transferência $P(S)$.



A partir das assíntotas concluimos que

$P(S)$ possui:

a) polo triplo para $S = 0$, pois

$$\frac{0 - 18}{6} = -3$$

b) zero duplo para $S = -1$, pois

$$\frac{18 - 6}{6} = \frac{12}{6} = 2 \text{ e tivemos um "brake".}$$

c) polo simples para $S = -5$

$$\frac{6 - 12}{6} = -1$$

e tivemos um "brake"



Portanto $P(s)$ é da forma:

$$P(s) = K \cdot \frac{(s+1)}{s^3(s+5)}$$

Determinamos K pela assíntota de baixa frequência, onde para $\omega \lll 1$.

$$P(j\omega) = \frac{K}{(j\omega)^3 \cdot 5}$$

$$|P(j\omega)|_{db} = 20 \log \frac{K}{(j\omega)^3 \cdot 5}$$

Para $\omega = 1$

$$|P(j\omega)|_{db} = 0$$

logo:

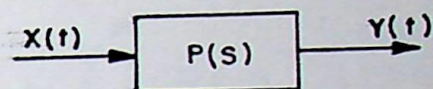
$$\frac{K}{(1)^3 \cdot 5} = 1 \quad \therefore \quad K = 5$$

Finalmente:

$$P(s) = \frac{5(s+1)}{s^3(s+5)}$$

4.2.3 - MÉTODO DA CORRELAÇÃO

Dado um sistema linear cuja função de transferência é $P(S)$, excitamo-lo com um sinal $X(t)$ e temos como saída o sinal $Y(t)$.



A função de correlação entre a saída e a entrada é definida como:

$$f_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t) \cdot y(t+\tau) d\tau$$

$$f_{xy}(\tau) = \overline{x(t) \cdot y(t+\tau)} \quad (1)$$

onde $P(t)$ é a resposta do sistema a um impulso unitário aplicado em $t = 0$, isto é, $P(t)$ é a transformada inversa de $P(S)$. Usando-se a integral de convolução temos:

$$Y(t+\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} P(x) \cdot X(t+\tau-x) dx \quad (2)$$

Substituindo (2) em (1):

$$f_{xy}(\tau) = \overline{x(t) \int_{-\infty}^{\infty} P(x) \cdot X(t+\tau-x) dx}$$

$$f_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} P(x) \cdot X(t) \cdot X(t+\tau-x) dx$$

Efetuada-se a operação de média no tem po, antes da integração com relação à variável x, resulta:

$$f_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} P(x) \cdot \overline{X(t) \cdot X(t+\tau-x)} dx$$

onde:

$$X(t) \cdot X(t+\tau-x) = f_{xx}(\tau-x) \longrightarrow$$

→ função de autocorrelação do sinal de entrada.

Portanto:

$$f_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} P(x) \cdot f_{xx}(\tau-x) dx \quad (3)$$

A equação acima é muito útil, porque ela nos relaciona a função de correlação com a resposta de impulso e com a função de auto-correlação.

Agora, se o sinal de entrada for um ruí do branco (o que corresponde a um espectro de frequência constante), com valor médio nulo, então a função de auto-correlação é um impulso de área K.

$$f_{xx}(\tau-x) = K \cdot \delta(\tau-x) \quad (4)$$

Substituindo (4) em (3).

$$f_{xy}(\tau) = K \cdot \int_{-\infty}^{\infty} P(x) \cdot \delta(\tau - x) dx$$

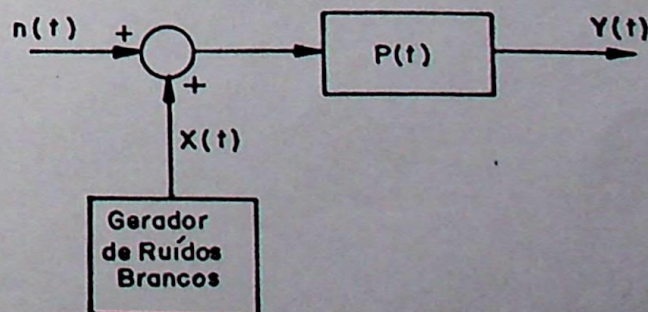
$$f_{xy}(\tau) = K \cdot \int_{\tau^-}^{\tau^+} P(x) \cdot \delta(\tau - x) dx$$

$$f_{xy}(\tau) = K \cdot P(\tau) \int_{\tau^-}^{\tau^+} \delta(\tau - x) dx$$

$$f_{xy}(\tau) = K \cdot P(\tau)$$

Portanto, a função de correlação entre a entrada e a saída nos fornece a resposta impulsiva do sistema, multiplicada por um fator de escala.

Usualmente, a obtenção da dinâmica do processo é desejada durante a operação normal do sistema. Como ilustramos abaixo, é necessário que o ruído branco seja superposto, a um sinal de comando $n(t)$.



Usando-se a integral de convolução temos :

$$Y(t+\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} P(x) X(t+\tau-x) dx + \int_{-\infty}^{+\infty} P(x) \eta(t+\tau-x) dx$$

Procedendo-se como anteriormente, a função de correlação entre o sinal estocástico $X(t)$ e a saída $Y(t)$ é:

$$f_{XY}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} P(x) \cdot f_{XX}(\tau-x) dx + \int_{-\infty}^{+\infty} P(x) \cdot f_{X\eta}(\tau-x) dx$$

Supondo que $X(t)$ e $\eta(t)$ são estocasticamente independentes, a função de correlação $f_{X\eta}$ é nula, e a equação acima é idêntica à equação (3). Em consequência, a determinação da resposta impulsiva pode ser efetuada com o sistema operando normalmente.

5 - ADAPTAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MODELO DE UM SISTEMA DE EXCI-
TAÇÃO EM UM DOS MODELOS DO IEEE



5 - ADAPTAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MODELO DE UM SISTEMA DE EXCI-
TACÃO EM UM DOS MODELOS DO IEEE

Para tal estudo foi utilizado um sistema de excitação estático de tiristores com regulador de estado sólido, cujo modelo está em uso na Usina de Salto Osório pertencente à Eletrosul (subsidiária da Eletrobrás). O diagrama de blocos com as funções de transferência e seus parâmetros é o seguinte:

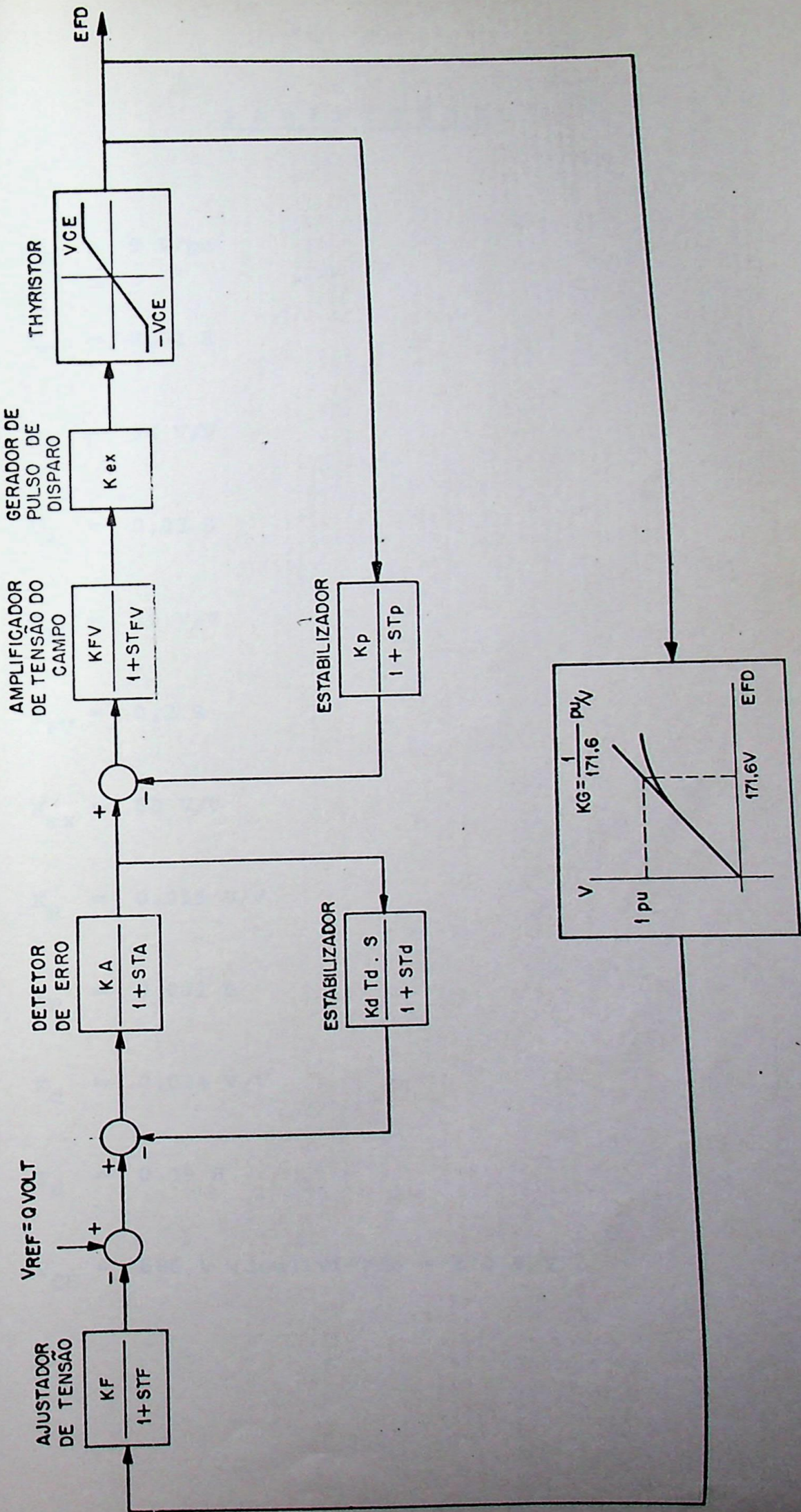


DIAGRAMA DE BLOCOS (Fabricante)

PARÂMETROS

$$K_F = 9 \text{ V/pu}$$

$$T_F = 0,02 \text{ S}$$

$$K_A = 94 \text{ V/V}$$

$$T_A = 0,03 \text{ S}$$

$$K_{FV} = 20 \text{ V/V}$$

$$T_{FV} = 0,2 \text{ S}$$

$$K_{ex} = 68 \text{ V/V}$$

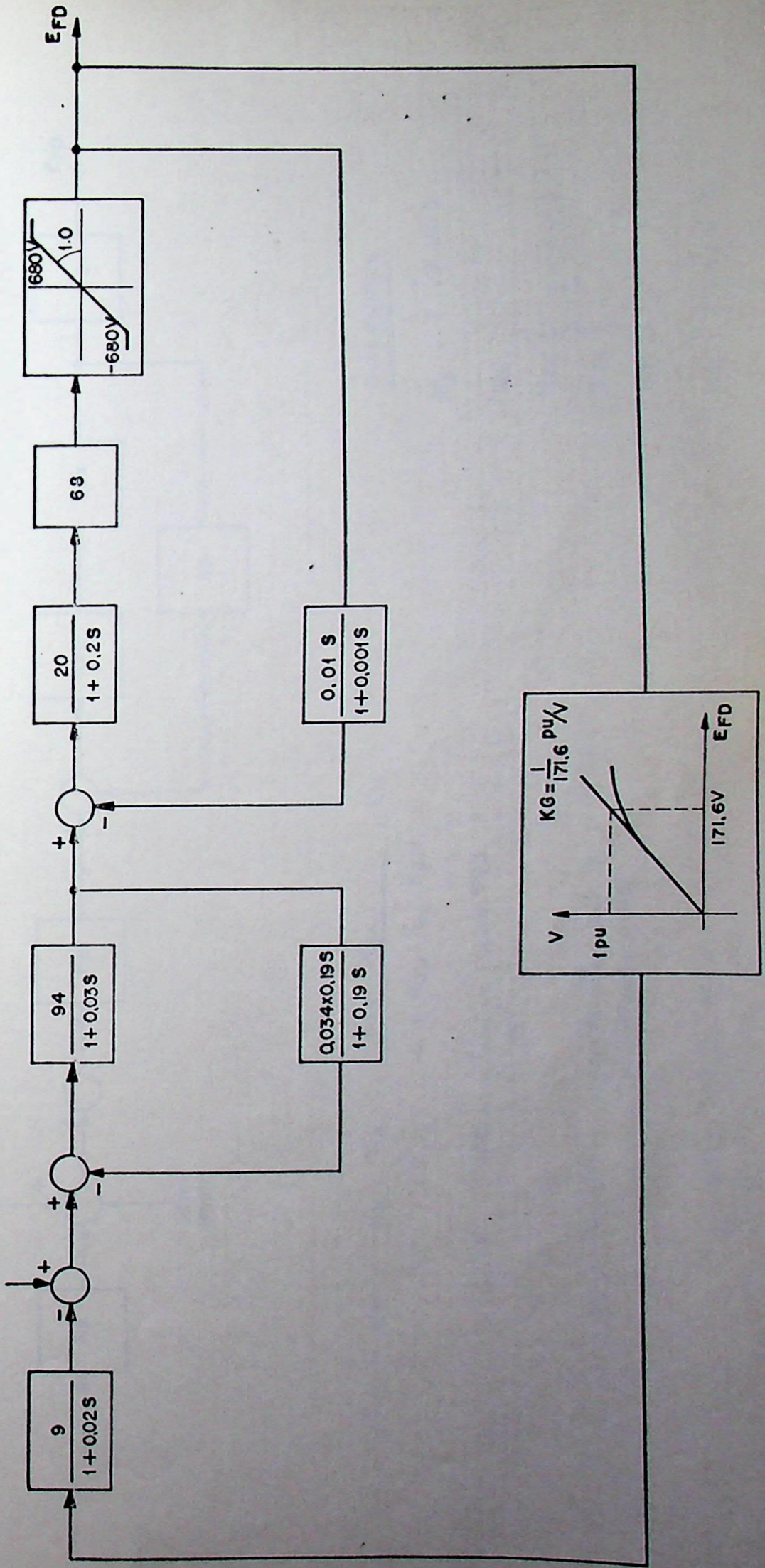
$$K_P = 0,015 \text{ V/V}$$

$$T_P = 0,001 \text{ S}$$

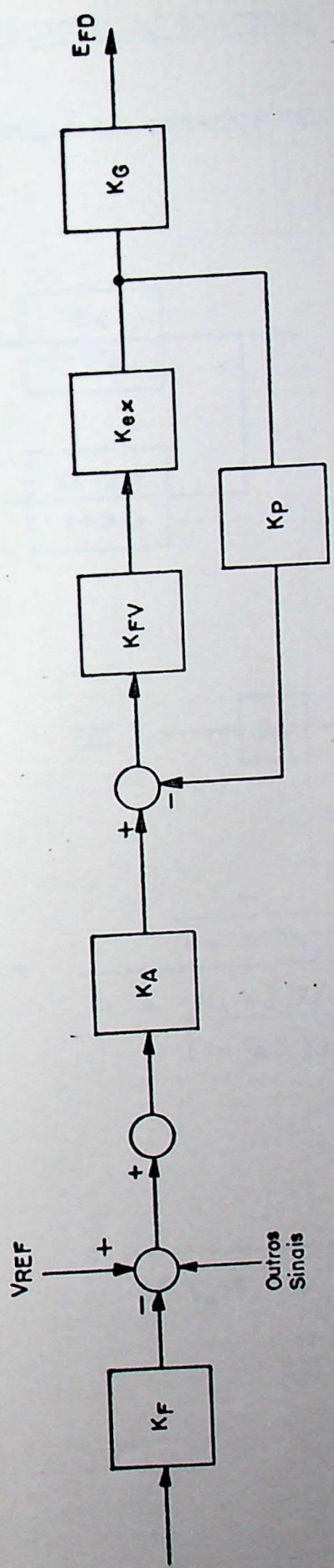
$$K_d = 0,034 \text{ V/V}$$

$$T_d = 0,19 \text{ S}$$

$$V_{CE} = 680 \text{ V (declividade} = 1.0 \text{ V/V)}$$



Calculo do Ganho Total



Unidades

- KF (v / pu)
- KA (v / v)
- KfV (v / v)
- Kex (pu / v)
- KP (pu / v)
- KG (pu / v)

$$GT = K_F \cdot K_A \cdot \frac{K_{FV} \cdot K_{ex}}{1 + K_{FV} \cdot K_{ex} \cdot K_P} \cdot K_G$$

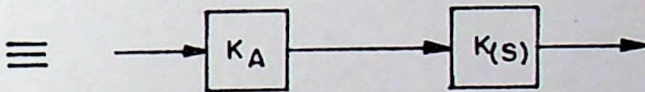
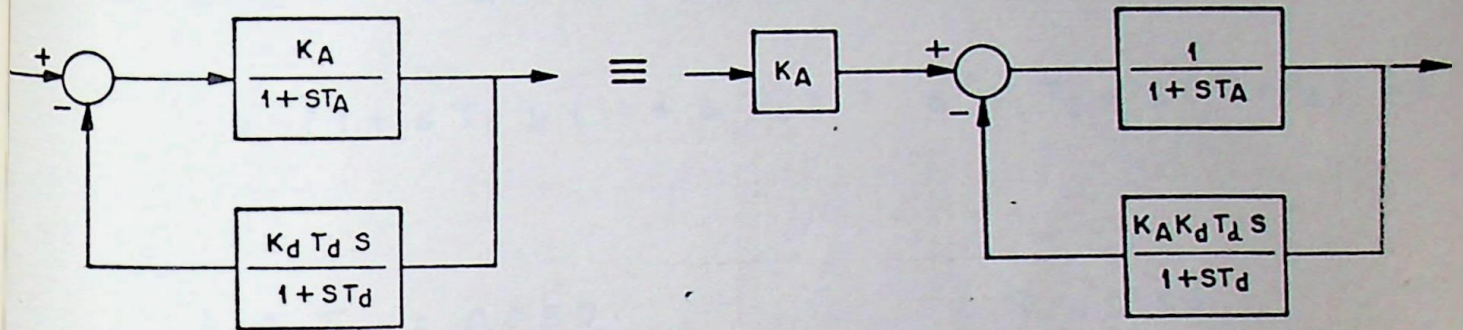
onde $K_G = \frac{1}{171,6} = 0,00583$

$$GT = 2 \times 94 \times \frac{20 \cdot 68}{1 + (20 \times 68 \times 0,015)} \times 0,00583$$

GT = 313,3 v / v

SIMPLIFICAÇÃO DO DIAGRAMA

- MALHA DO DETETOR DE ERRO -



$$K(s) = \frac{\frac{1}{1 + s T_A}}{1 + \frac{K_A K_d T_d s}{(1 + T_A s)(1 + T_d s)}} = \frac{1 + T_d s}{(1 + s T_A)(1 + s T_d) + K_A K_d T_d s} =$$

$$= \frac{1 + s T_d}{s^2 T_A T_d + s (T_A + T_d + K_A \cdot K_d \cdot T_d) + 1}$$

$$T_A \cdot T_d = 0,03 \times 0,19 = 0,0057$$

$$T_A + T_d + (K_A \cdot K_d \cdot T_d) = 0,03 + 0,19 + (94 \times 0,034 \times 0,19) = 0,03 + 0,19 + 0,60724 = 0,82724 \approx 0,827$$

$$s^2 T_A \cdot T_d + s(T_A + T_d + K_A \cdot K_d \cdot T_d) + 1 =$$

$$= (1 + s T_1) (1 + s T_2) = s^2 T_1 T_2 + s(T_1 + T_2) + 1$$

$$\begin{cases} T_1 T_2 = 0,057 \\ T_1 + T_2 = 0,827 \end{cases} \quad \text{onde} \quad \begin{cases} T_1 = 0,82 \\ T_2 = 0,007 \end{cases}$$

$$K_A \cdot K(s) = K_A \cdot \frac{1 + s T_d}{1 + s 0,82} \cdot \frac{1}{1 + s 0,007}$$

Constantes de tempo da ordem do contêsi
mo do segundo são desprezados. Logo:

$$K_A \cdot K(s) = 94 \cdot \frac{1 + 0,19 s}{1 + 0,82 s}$$

UNIDADES

Como quase todos os programas possuem os modelos para constantes com unidades em pu, será necessário fazer a transformação de unidades dos parâmetros.

Assim os parâmetros em V/V não necessitam correção ($V/V = pu/pu$).

Para os parâmetros em V/pu, pu/V e V temos que utilizar a base $V = 171.6$ V, pois na curva de excitação do gerador 1 pu de tensão gerada corresponde, para a máquina trabalhando na linha do entreferro, à tensão $E_{FD} = 171,6$ V; logo, para que tenhamos em pu, $E_{FD} = E_I = 1$ pu, a tensão base deverá ser:

$$V = 171,6 \text{ V}$$

$$E_I = E'_q + (X_D - X'_D) I_D$$

$$\frac{dE'_q}{dt} = \frac{1}{T'_{D0}} (E_{FD} - E_I)$$

Então:

$$K_F = 9 \text{ V/pu} = \frac{9}{171,6} = 5,244 \times 10^{-2} \text{ pu/pu}$$

$$K_G = \frac{1}{171,6/171,6} \text{ pu/V} = 1 \text{ pu/pu}$$

$$V_{CE} = 680 \text{ V} = \frac{680}{171,6} \text{ pu} = 3,962 \text{ pu}$$

Teremos agora o diagrama de blocos simpli-
ficado do fabricante, depois de desprezarmos as constantes pe-
quenas. Os vários sistemas de unidades mistas estão indicados,
nas saídas dos respectivos blocos.

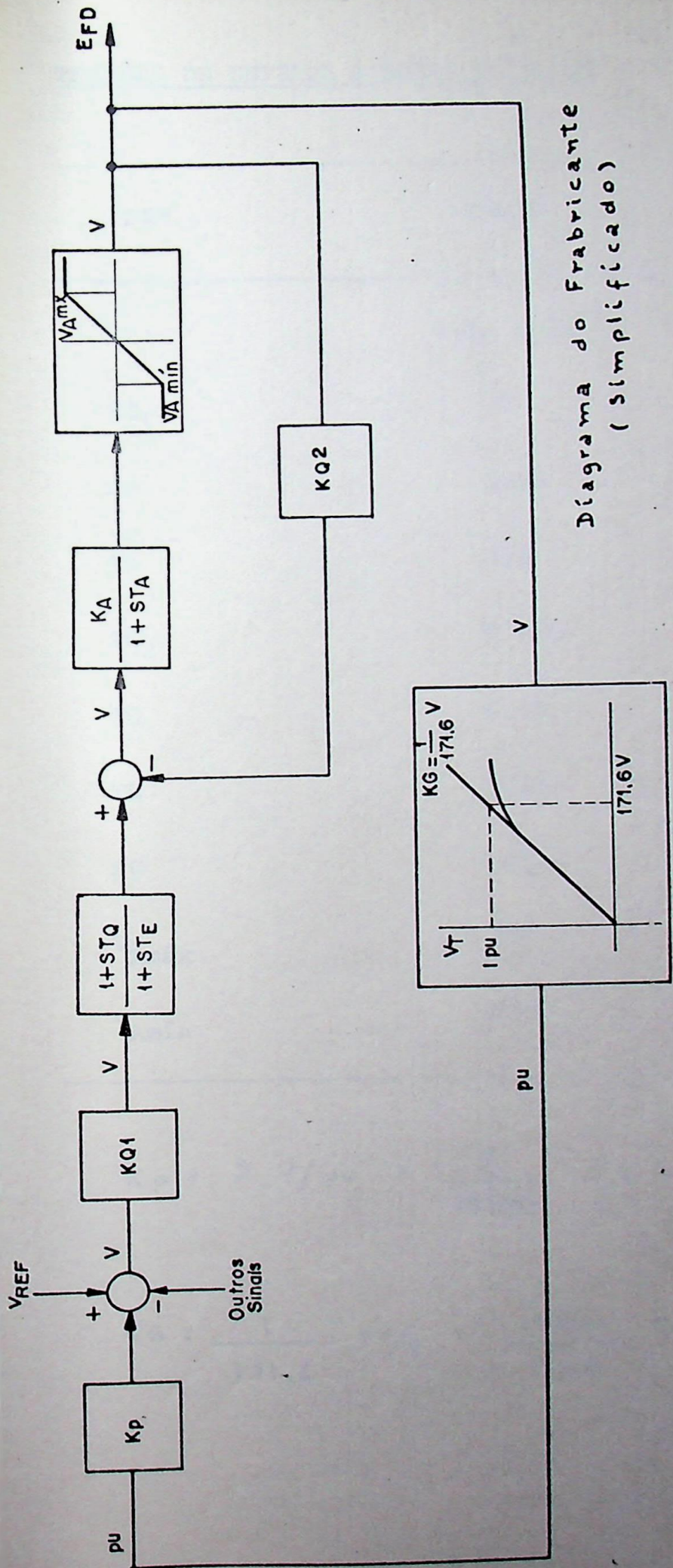
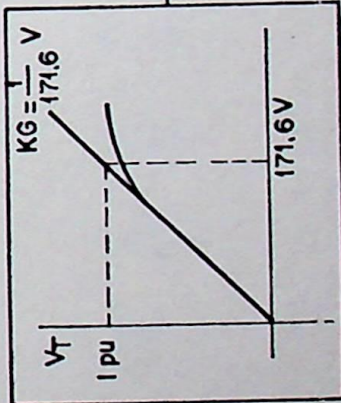


Diagrama do Fabricante
(Simplificado)

Valores dos Parâmetros

$TQ = 0,19 \text{ s}$
 $TE = 0,83 \text{ s}$
 $KG = 0,00583 \text{ pu/V}$
 $V_{A \text{ max}} = 680 \text{ V}$
 $V_{A \text{ min}} = -680 \text{ V}$

$Kp = 9 \text{ V/pu}$
 $KQ1 = 94 \text{ V/V}$
 $KA = 1360 \text{ V/V}$
 $TA = 0,2 \text{ s}$
 $KQ2 = 0,015 \text{ V/V}$



TENSÕES DE ENTRADA E SAÍDA EM VOLTS

| PAR. | VALOR | UNID. |
|-------------------|-----------------------|-------|
| KP | $6,52 \times 10^{-3}$ | V/V |
| KQ ₁ | 94 | V/V |
| KA | 1360 | V/V |
| TA | 0,2 | S |
| KQ ₂ | 0,015 | V/V |
| TQ | 0,19 | S |
| TE | 0,83 | S |
| KG | 80,42 | V/V |
| V _{Amáx} | 680 | V |
| V _{Amín} | -680 | V |

$$K_P = 9 \text{ V/PV} = \frac{9}{13800} \frac{\text{V}}{\text{V}} = 6,52 \times 10^{-3} \text{ V/V}$$

$$K_G = \frac{1}{171,6} \text{ PV/V} = \frac{13800}{171,6} \frac{\text{V}}{\text{V}} = 80,42 \text{ V/V}$$

TENSÕES EM PU

| PAR. | VALOR | UNID. |
|-------------------|--------|-------|
| KP | 0,0524 | pu/pu |
| KQ ₁ | 94 | pu/pu |
| KA | 1360 | pu/pu |
| TA | 0,2 | S |
| KQ ₂ | 0,015 | pu/pu |
| TQ | 0,19 | S |
| TE | 0,83 | S |
| KG | 1 | pu/pu |
| V _{AMáx} | 3,963 | pu |
| V _{AMín} | -3,963 | pu |

$$K_P = 9 \frac{V}{pu} = \frac{9}{171,6} \frac{V}{V} = 0,0524$$

$$K_G = \frac{1}{171,6} \frac{pu}{V} = \frac{1}{(171,6/171,6)} = 1 \text{ pu/pu}$$

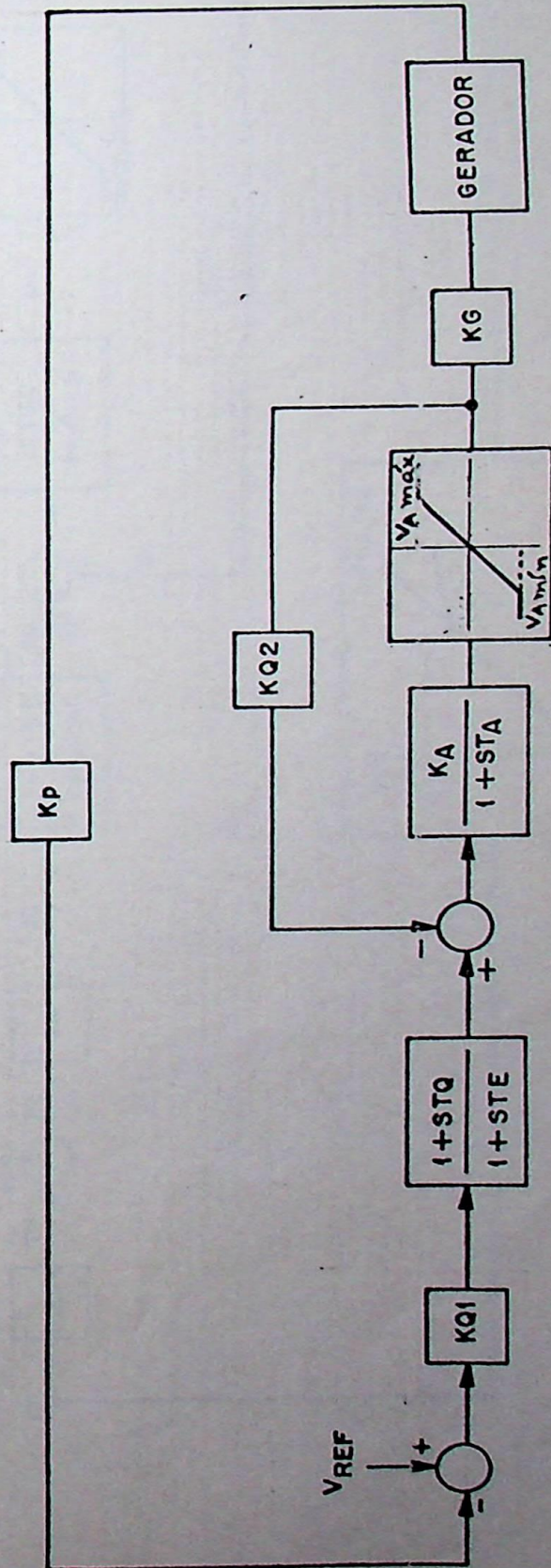
UNIDADES MISTAS

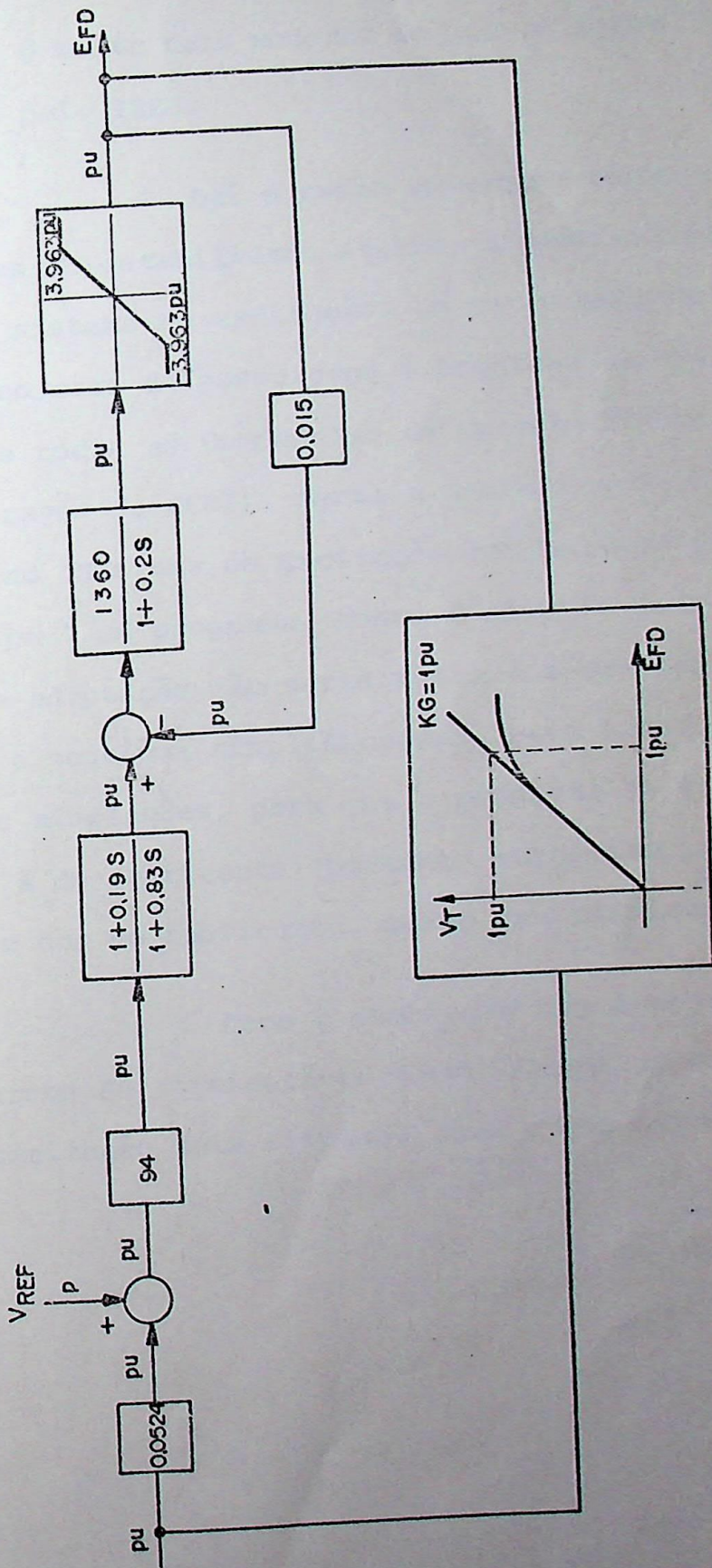
| PAR. | VALOR | UNID. |
|--------------------|--------|-------|
| K_P | 9 | V/pu |
| KQ_1 | 94 | V/V |
| KA | 7,925 | V/pu |
| TA | 0,2 | S |
| KQ_2 | 2,574 | V/pu |
| TQ | 0,19 | S |
| TE | 0,83 | S |
| KG | 1 | pu |
| $V_{AM\acute{a}x}$ | 3,963 | pu |
| V_{AMin} | -3,963 | pu |

$$K_A = 1360 \text{ V/V} = \frac{1360}{171,6} \text{ V/pu} = 7,925 \text{ V/pu}$$

$$K_{Q_2} = 0,015 \text{ V/V} = 0,015 \left(\frac{V}{V} \right) \times 171,6 \left(\frac{V}{pu} \right) = 2,574 \text{ V/pu}$$

A figura abaixo mostra o diagrama de blocos que representa o regulador. Vamos adaptá-lo a um dos modelos do IEEE.





Ao tentarmos adaptar o modelo a um dos 4 tipos do IEEE, verificamos ser isto impossível, pois o modelo apresentado é muito mais moderno do que os sugeridos para re presentação pelo IEEE.

Daí a razão de apresentarem quase todos os programas de estabilidade atuais, a possibilidade de mo delagem do sistema de excitação. Um outro meio de contornar o problema, no caso de "possuirmos o programa de estabilidade da PECO (quase todas as Companhias de Energia Elétrica do país o possuem através do CCOI), seria a tentativa de adaptar o nos so modelo ao "Sistema de Excitação com Retificação Controlada" que é o tipo 7 do programa. Mesmo assim, os erros seriam acer tuados e a adaptação não seria feita com uma simples algebra de blocos e pequenas simplificações, pois haveria necessidade de algumas simulações, para que a resposta do modelo fosse ajustada, à do fabricante (portanto surgiriam parâmetros bem diferentes dos do fabricante, mesmo que otimizados).

Como a simulação não é objeto da tese , aqui deixamos de apresentá-la e escolhemos um modelo de sis tema de excitação mais simples, como o que apresentamos a se guir.

Customer: General. Eléctrica de Furnas S.A.

Plant: Porto Colombia

Quotation:

Order: 0519.1008

Date: 22.3.1971

Calculated values at rated speed and unsaturated machines.

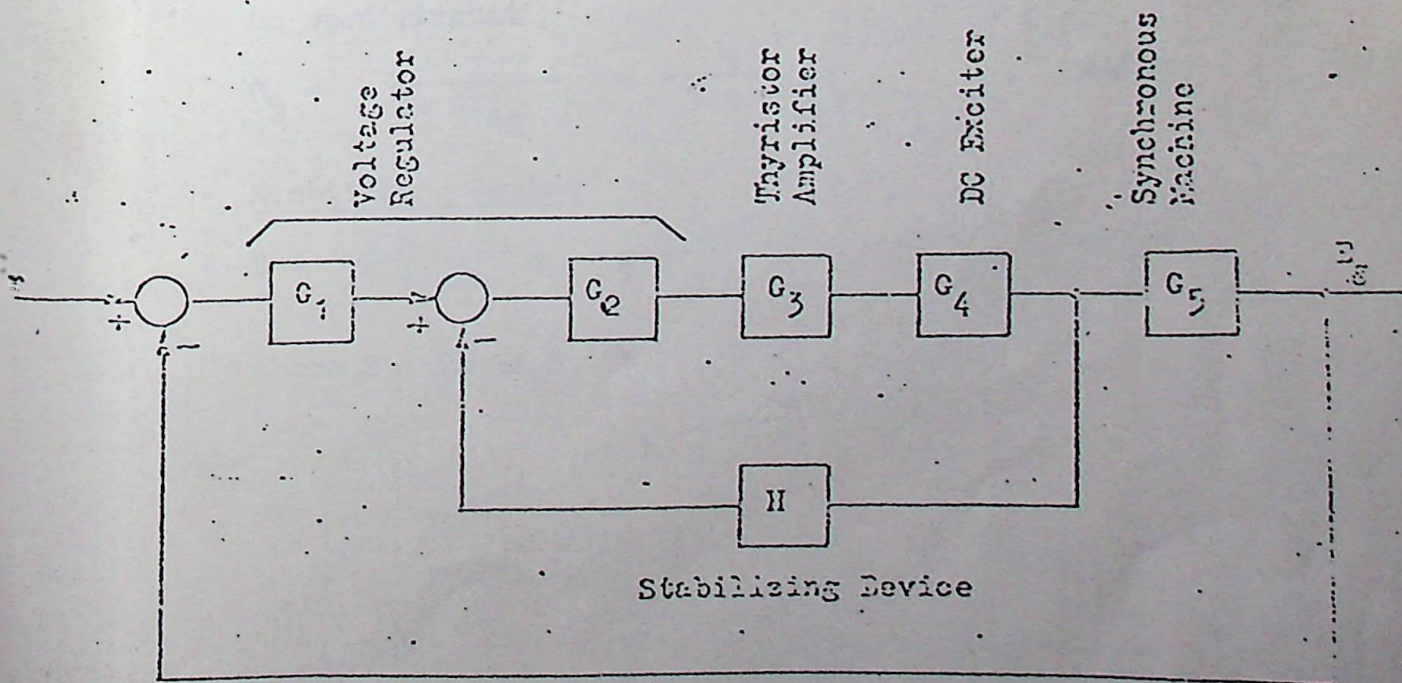
\dot{s} = Laplace operator

Base values for the output per unit (pu) quantities:

DC - exciter: Excitation voltage according to air gap line of the generator at rated generator voltage and speed on open circuit and with generator field winding at 25°C.

Synchronous machine: 10 V = voltage measuring unit rectified voltage at rated generator voltage.

Other blocks: 1V



Voltage regulator

$$G_1 = k_1 \frac{1}{1 + sT_1} = \frac{20}{1 + s 0.025} \quad \text{pu/pu}$$

where $k_1 = 10, 20, 30, 50, 100$

(adjustable on Q/LB 101 with knob marked Gain)

$$T_1 = 0.025 \text{ s}$$

$$G_2 = k_2 = 2 \quad \text{pu/pu (normally } k_2=2)$$

where $k_2 = 1.0, 1.1, 1.3, 1.6, 2.0, 2.7, 4.0, 8.0$ (adjustable by changing connections on Q/LB 102).

(The output is limited to 10 pu).

Excitator amplifiers

$$G_3 = k_3 = 17 \quad \text{pu/pu}$$

(The output is limited to 135 pu)

DC Exciter

$$G_4 = \frac{R_{sh}}{R_{st}} \cdot \frac{N_{st}}{R_{sh}} \cdot \frac{1}{s(T_{sh} + 2T_{st})} \cdot \frac{1}{E_{fo}} =$$

$$= \frac{k_4}{s} = \frac{0.17}{s} \quad \text{pu/pu}$$

(The output is limited to 3.1 pu)

Synchronous machine

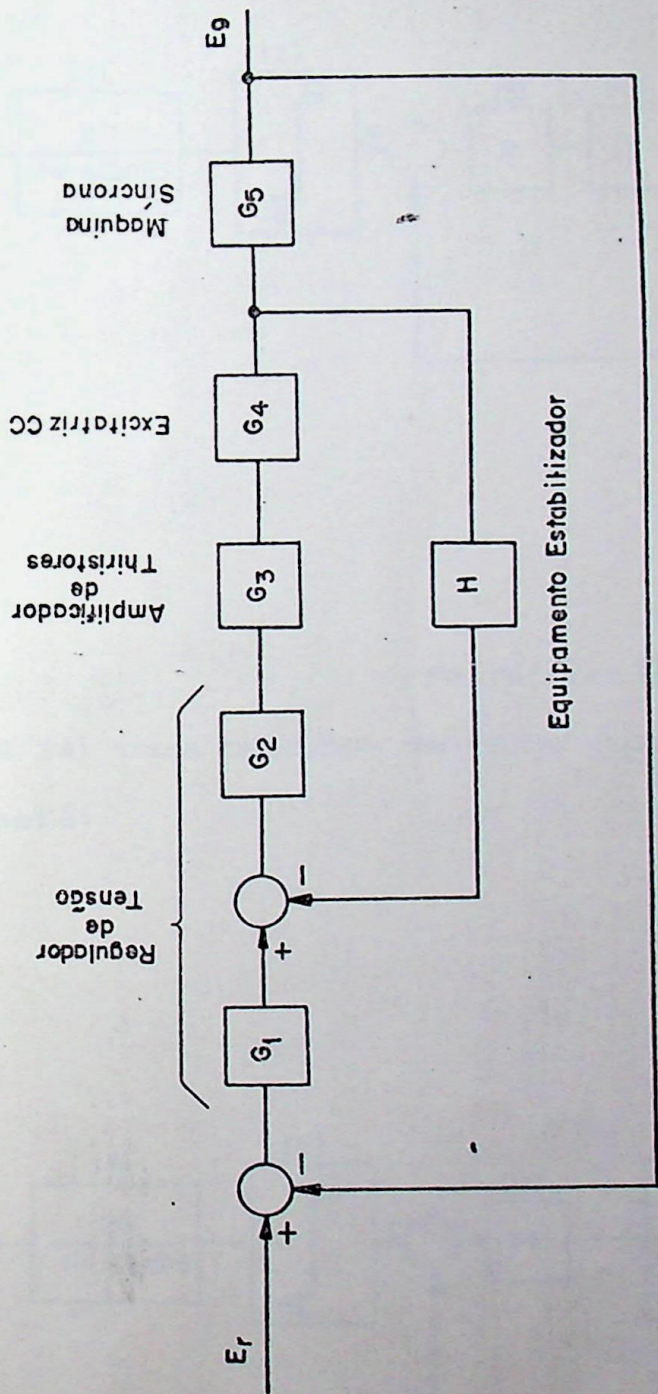
On open circuit

$$G_5 = \frac{1}{1 + sT_{do}} = \frac{1}{1 + s 3.5} \quad \text{pu/pu}$$

Stabilizing device

$$H = \frac{sT_h}{1 + sT_h} = \frac{s 3.5}{1 + s 3.5} \quad \text{pu/pu}$$

where $2 \leq T_h \leq 5 \text{ s}$



Onde:

$$G_1 = K_1 \frac{1}{1 + sT_1} = \frac{20}{1 + s0,025} \quad \text{pu/pu}$$

$$G_2 = K_2 = 2 \text{ pu/pu}$$

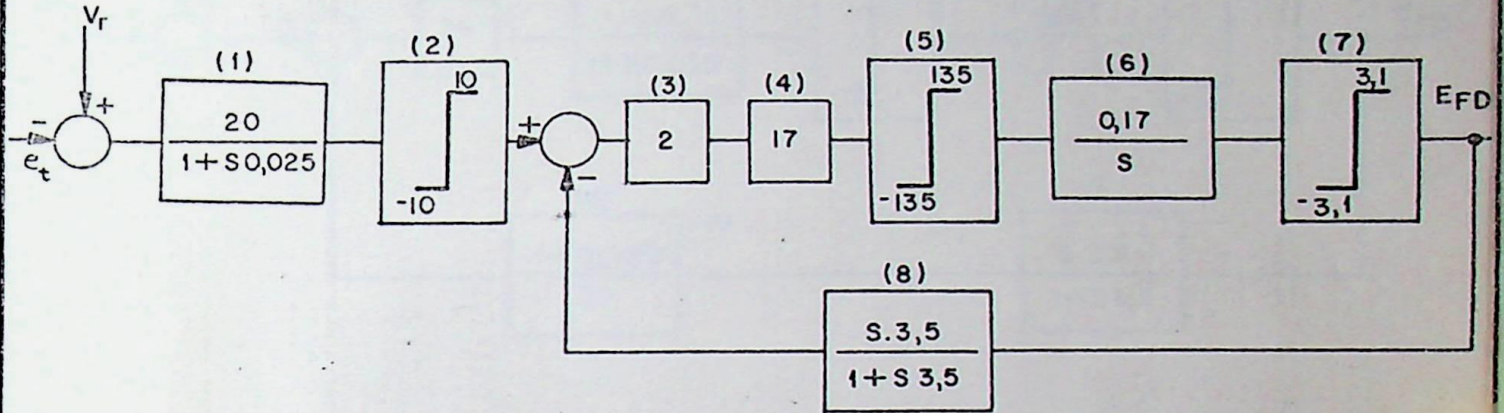
$$G_3 = K_3 = 17 \text{ pu/pu}$$

$$G_4 = \frac{K_4}{s} = \frac{0,17}{s} \quad \text{pu/pu}$$

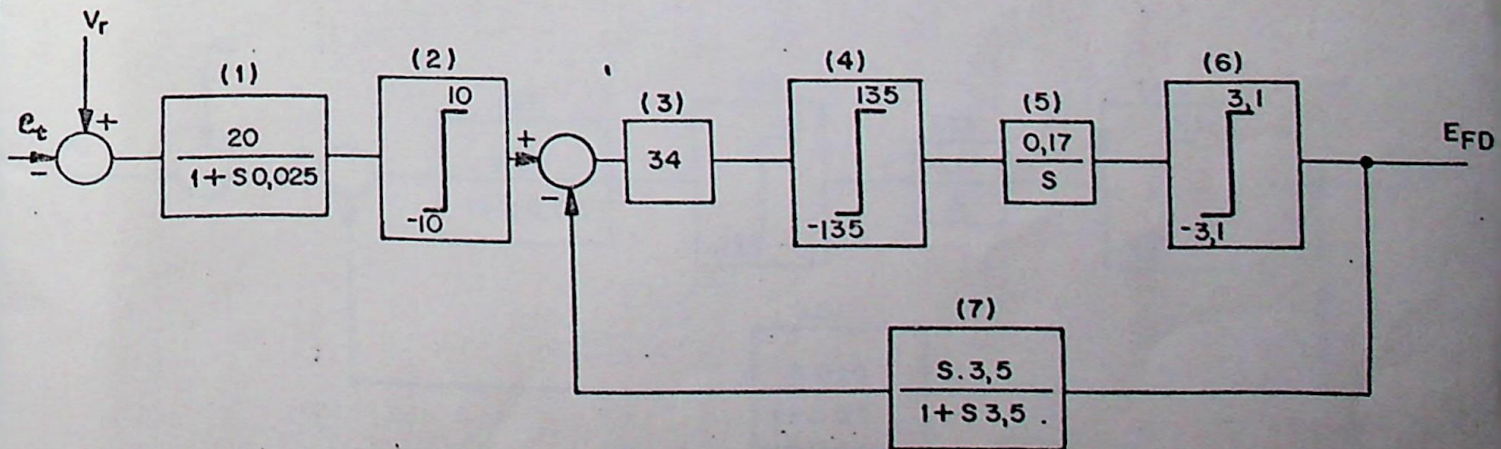
$$G_5 = \frac{1}{1 + sT_{d0}} = \frac{1}{1 + s3,5} \quad \text{pu/pu}$$

$$H = \frac{sT_h}{1 + sT_l} = \frac{s3,5}{1 + s3,5} \quad \text{pu/pu}$$

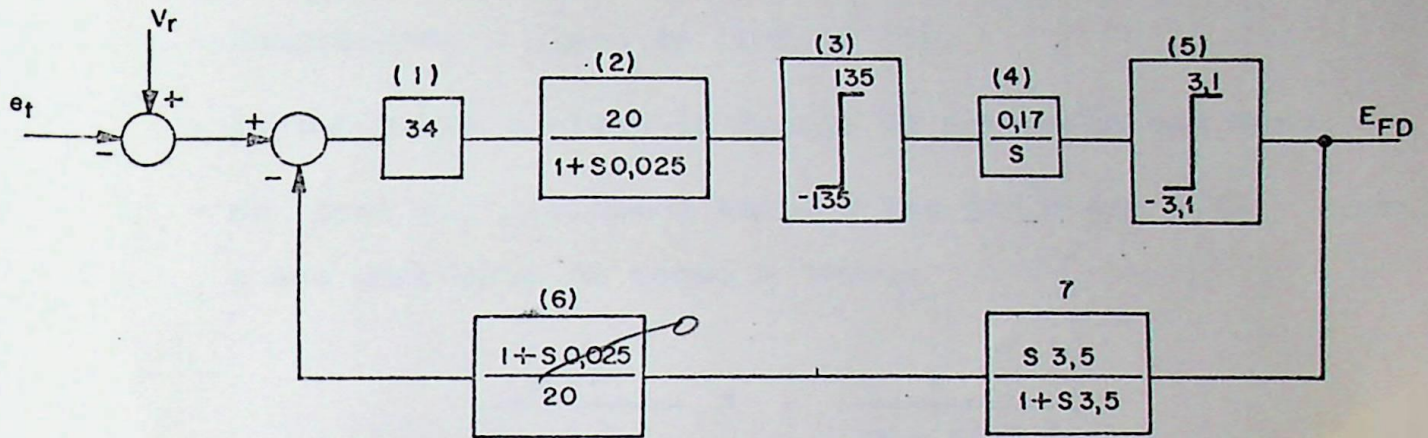
MODELO DO REGULADOR QUE ADAPTAREMOS AO MODELO TIPO 1 DO IEEE
(CONFORME FIG. 3.1)



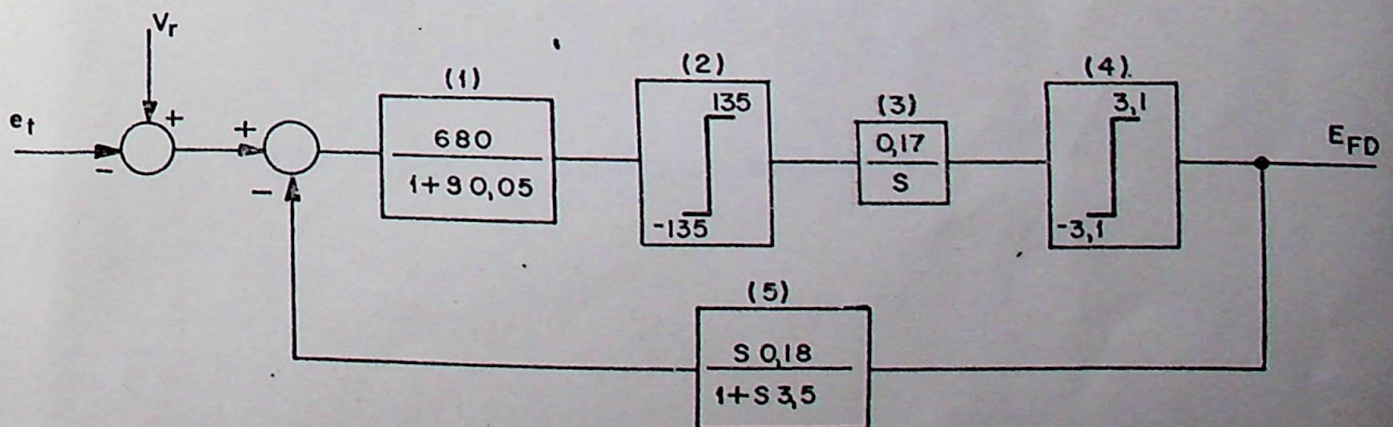
Neste modelo multiplicamos os blocos (3) e (4) para obtermos um ganho único. O novo diagrama de blocos, será:



A seguir passamos o bloco (1) para o interior da malha e desprezamos o bloco (2).



Agora, multiplicamos os ganhos dos blocos (1) e (2) e temos um ganho único; desprezamos a constante de tempo do bloco (6) por ser da ordem de centésimos e multiplicamos os blocos (6) e (7). A constante de tempo do bloco (2) é aproximada para 0,05, caso contrário teríamos problemas na simulação do modelo.



Para que o nosso diagrama de blocos fi que semelhante ao diagrama de blocos da FIG. 3.1, fazemos as seguintes operações:

- desprezamos o bloco de limites (4).
- introduzimos o bloco da função de saturação com $SE=0$.
- no bloco (3) dividimos tanto o seu ganho por 0,17 como a sua constante de tempo e temos:

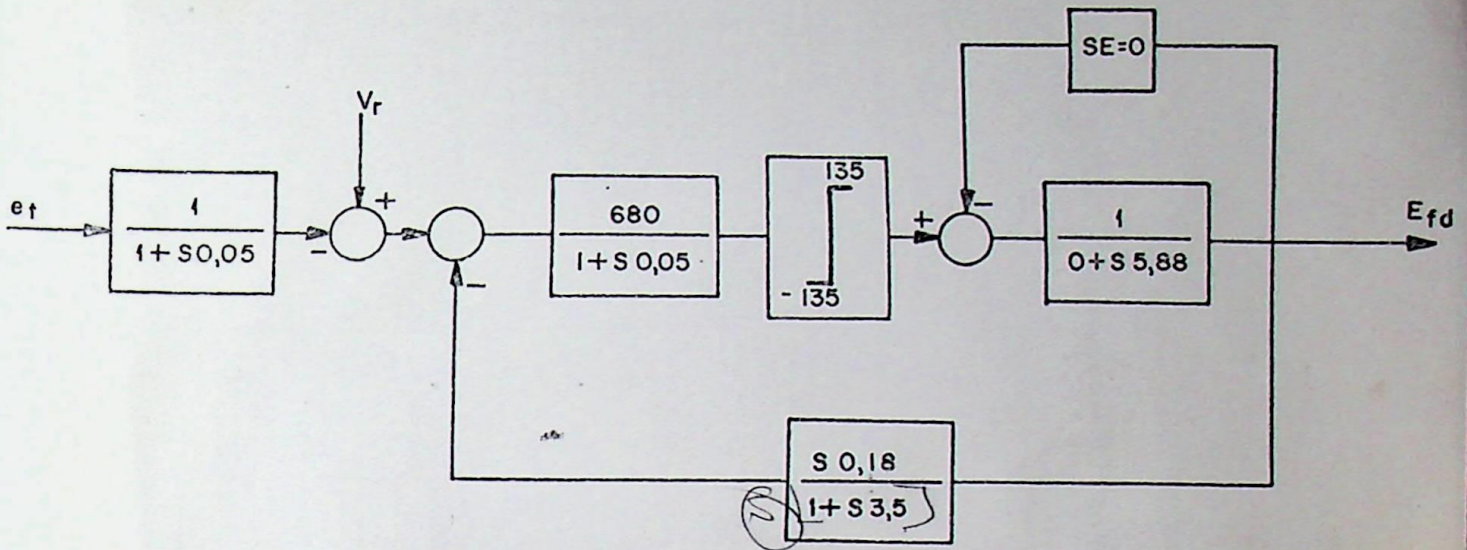
$$\frac{0,17}{0 + 1 s} = \frac{1}{0 + 5,88 s}$$

- consideremos o bloco do retificador + filtro logo após a tensão terminal e_t , com um ganho unitário e com uma constante de tempo mínima possível (para não termos problemas de simulação; no caso de usarmos uma constante de tempo muito pequena).

$$\frac{1}{1 + s 0,05}$$

Portanto, o nosso diagrama final adapta do será:

(Vide diagrama à página seguinte)



Do exposto observamos que, mesmo para um sistema de excitação mais simples que o anterior, a adaptação, requereu simplificações de blocos e agrupamento de constantes. É possível que ao simularmos este modelo tipo 1 a sua resposta esteja longe ou próxima do modelo real. Entretanto, na impossibilidade da simulação do modelo original do fabricante, a adaptação tem a sua validade prática, pois, se na verificação da resposta do modelo adaptado, esta não for satisfatória, sempre resta a possibilidade de ajustar os parâmetros do modelo até ser obtida uma resposta próxima do ideal.