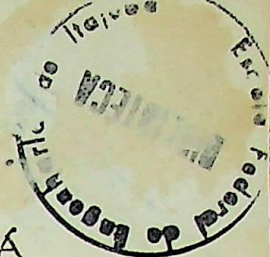


TESE

113

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ



TESE DE MESTRADO

"CRITÉRIOS PARA OTIMIZAÇÃO DOS PARÂ
METROS DO SISTEMA DE EXCITAÇÃO"

Paulo Gomes

Itajubá - 1976

Class. 621.313.321621.3.016.500
CMA. 9633c
Tombo 113



ORIENTADOR

José Abel Royo dos Santos

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

Torno público meu agradecimento à ELETROBRÁS CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS S.A., pela indicação de meu nome para o Curso de Engenharia de Sistemas Elétricos - EFEI - ELETROBRÁS - CESE IV, aos colegas EDMUNDO ALFREDO POCHMANN DA SILVA, JOÃO CARLOS FERREIRA DA LUZ, JOSÉ JOÃO GARCIA COURI e JOSÉ WAGNER M. KAEHLER pela colaboração prestada, ao Professor JOSÉ ABEL ROYO DOS SANTOS pela orientação dada no decurso da elaboração deste trabalho, ao desenhista Argemiro dos Santos e a datilógrafa Therezinha Rita Corrêa de Salles Dias pela presteza e eficiência na execução de suas tarefas, e ao Professor HÉLIO MOKARZEL como membro da banca examinadora.

Itajubá, dezembro de 1976

AGRADECIMENTO ESPECIAL

HAMILTON DE OLIVEIRA VASQUES

DEDICATÓRIA

À minha esposa MARILIA e ao
meu filho ALLAN.

O B J E T I V O

Este Trabalho apresenta o desenvolvimento de testes que nos permite definir ou ajustar os parâmetros do sistema de excitação, de tal modo que possamos obter uma operação estável do conjunto máquina síncrona - sistema de excitação.

SIMBOLOGIA ADOPTADA

E_S - Tensão atrás da reatância síncrona

X - Reatância de transferência

P_e - Potência elétrica transferida

P_m - Potência mecânica

δ_{12} - Defasagem angular entre as tensões E_1 e E_2

R - Resistência

C - Capacitância

K, K_1, K_2, K_3 - Constantes de tempo

N - Número total de espiras do enrolamento

ϕ_a - Fluxo na armadura

ϕ_d - Fluxo de dispersão

ϕ_f - Fluxo total no campo

i_f - Corrente de campo da excitatriz

i_g - Corrente de campo da excitatriz não considerando a saturação

- i_s - Corrente de campo adicional na excitatriz para considerar a saturação.
- T_E - Constante de tempo da excitatriz
- K_E - Constante da excitatriz relacionada à excitação própria do campo.
- S_E - Função de saturação da excitatriz
- E_{fd} - Tensão proporcional a tensão de campo
- K_A - Ganho do amplificador
- T_A - Constante de tempo do amplificador
- V_R - Tensão de saída do amplificador
- i_{est} - Corrente na malha estabilizadora
- V_{est} - Tensão na saída da malha estabilizadora
- M - Indutância mútua
- L - Indutância própria
- K_f - Ganho da malha estabilizadora
- T_{SE}, T_f - Constantes de tempo da malha estabilizadora

V_f - Tensão de referência

I_{fd} - Corrente no campo do gerador

I_t - Corrente terminal do gerador

KI - Ganho do circuito de corrente (para o sistema de excitação tipo 3).

KP - Ganho do circuito de potencial (para o sistema de excitação tipo 1S ou tipo 3).

KV - Ajuste do contato de variação rápida (para o sistema de excitação tipo 4).

TR - Constante de tempo do transdutor de entrada

TRH - Constante de tempo do reostato (para o sistema de excitação tipo 4).

V_t - Tensão terminal do gerador.

ΔV_t - Erro na tensão terminal do gerador

ΔV_{tHEV} - Tensão obtida pela soma vetorial de sinais proporcionais a tensão e corrente (para o sistema de excitação tipo 3).

ψ_F - Fluxo produzido no campo

Δt - Intervalo de integração

- T'_{do} - Constante de tempo do campo a circuito aberto.
- A_G, B_G - Constantes que dependem da curva de excitação da máquina síncrona.
- Δ_{EI} - Correção da saturação da máquina síncrona
- EI - Tensão proporcional a corrente de campo.
- X_d - Reatância de eixo direto.
- I_d - Componente de eixo direto da corrente da armadura
- ΔI_{fd} - Acréscimo na corrente de campo da excitatriz
- A_{ex}, B_{ex} - Constantes que dependem da curva de saturação da excitatriz
- E'_q - Tensão proporcional ao enlace de fluxo no campo
- P - Potência ativa
- Q - Potência reativa
- X_c - Reatância capacitiva
- X'_d - Reatância transitória de eixo direto.
- E_L - Tensão atrás da reatância de dispersão.
- X_L - Reatância de dispersão.

- V_b - Tensão base.
- N_b - Potência base
- V_2 - Tensão de teto ("ceiling") da excitatriz
- V_1 - Tensão nominal da excitatriz
- N - Potência aparente
- $\cos\theta$ - Fator de potência
- X_q - Reatância de eixo em quadratura
- I_q - Componente de eixo em quadratura da corrente da armadura.
- δ - Ângulo entre o eixo de quadratura da máquina e uma referência que gira com a velocidade síncrona.
- θ - Ângulo entre E_t e I_t
- α - Ângulo entre E_t e o eixo de quadratura
- β - Ângulo entre I_t e o eixo de quadratura
- γ - Ângulo entre E_t e a referência
- E_∞ - Tensão na barra infinita

- X_{pq} - Reatância da linha de transmissão
- φ - Ângulo entre I_t e a referência
- ω - Velocidade angular da máquina
- I_{t_r} - Componente real da corrente terminal do gerador
- I_{t_i} - Componente imaginária da corrente terminal do gerador.
- E_{t_r} - Componente real da tensão terminal do gerador.
- E_{t_i} - Componente imaginária da tensão terminal do gerador
- E_{L_r} - Componente real da tensão atrás da reatância de dispersão
- E_{L_i} - Componente imaginária da tensão atrás da reatância de dispersão.
- f - Frequência
- P_a - Potência aceleradora
- E_q - Tensão atrás da reatância em quadratura
- H - Constante de inércia da máquina
- E_{q_r} - Componente real da tensão atrás da reatância em quadratura

E_{q_i} - Componente imaginária da tensão atrás da reatância em quadratura.

V_{tr} - Tensão do lado de alta do transformador

X_t - Reatância do transformador

μ_s - Componente do ganho da malha estabilizadora

NOTA: O sinal-sobre o símbolo indica valor em pu.

Í N D I C E

	pág.
1 - INTRODUÇÃO	1
2 - EFEITOS DO SISTEMA DE EXCITAÇÃO NA ESTABILIDADE	4
2.1 - Efeitos na Estabilidade Dinâmica	6
2.2 - Efeitos na estabilidade transitória	9
3 - TIPOS DE SISTEMAS DE EXCITAÇÃO	13
3.1 - Sistema de excitação Genérico	14
3.1.1 - Funcionamento	15
3.1.2 - Componentes do diagrama de bloco	15
4 - REPRESENTAÇÃO DOS SISTEMAS DE EXCITAÇÃO EM COMPUTADORES DIGITAIS	26
4.1 - Listados símbolos utilizados nos modelos	28
4.2 - Modelo IEEE - Tipo 1	30
4.3 - Modelo IEEE - Tipo 2	32
4.4 - Modelo IEEE - Tipo 3	33

	pág.
4.5 - Modelo IEEE - Tipo 4	34
4.6 - Valores típicos dos parâmetros utiliza <u>dos</u> .	36
5 - AJUSTE DOS PARÂMETROS DO SISTEMA DE EXCITA <u>ÇÃO</u>	38
5.1 - Representação da máquina síncrona	40
5.2 - Testes para otimização.	45
5.2.1 - Teste de carga capacitiva	45
5.2.1.1 - Descrição do teste	45
5.2.1.2 - Obtenção das equações da máquina	46
5.2.2 - Determinação da resposta ASA	49
5.2.2.1 - Descrição do teste	49
5.2.2.2 - Obtenção das equações da máquina	51
5.2.3 - Teste de sensibilidade do siste <u>ma</u> de excitação	54
5.2.3.1 - Descrição do teste	54
5.2.3.2 - Obtenção das equações da máquina.	54

	pág.
5.2.4 - Teste de estabilidade transitória.	59
5.2.4.1 - Descrição do teste	59
5.2.4.2 - Obtenção das equações da máquina	60
6 - APLICAÇÃO	68
6.1 - Sistema de excitação utilizado	69
6.2 - Resultados obtidos	70
6.2.1 - Teste de carga capacitiva	70
6.2.2 - Determinação da resposta ASA	
6.2.3 - Teste de sensibilidade do sistema de excitação.	72
6.2.4 - Teste de estabilidade transitória	73
7 - CONCLUSÕES	74
8 - BIBLIOGRAFIA	76
9 - ANEXOS - LISTAGEM DOS PROGRAMAS	81
- Programa para teste de Carga Capacitiva	
- Programa para determinação da Resposta ASA	
- Programa para teste de Sensibilidade do Sistema de Excitação	
- Programa para teste de Estabilidade Transitória	

I - I N T R O D U Ç Ã O

1 - INTRODUÇÃO

A Energia Elétrica é um dos fatores fundamentais e decisivos no desenvolvimento econômico e social de uma nação. Todo o parque industrial dela depende, e sua confiabilidade e qualidade são requisitos essenciais para o perfeito funcionamento do complexo industrial, bem como para o bem estar da população.

Esforços têm sido dispendidos na preservação e melhoria do comportamento dos sistemas elétricos. Entretanto, por razões econômicas entre outras, a tendência atual de projeto resulta em uma diminuição da margem de estabilidade dos sistemas (ocasionando prejuízo para a confiabilidade e qualidade no fornecimento de energia). Esta tendência inclui:

- aumento da capacidade das unidades geradoras, acompanhada de baixas constantes de inércia e alto valor de reatância em por-unidade.
- crescente dependência do carregamento do sistema de transmissão.

Houve-se por bem, então, pesquisar e aprimorar outros meios que pudessem auxiliar o sistema a suportar os problemas de estabilidade.

Isto conduziu a um significativo avanço tecnológico dos "sistemas de excitação" (entre outros) como meio de melhorar o comportamento dos sistemas elétricos.

Para os sistemas elétricos é de vital importância a operação dos geradores durante perturbações que conduzem a oscilações, visto que um só gerador, que não seja capaz de acompanhar as oscilações do sistema, poderá agravar as condições oscilatórias deste, pois arrastará máquinas elétrica-mente próximas e desta maneira levará o sistema a uma operação instável.

Os sistemas de excitação dos geradores são, então, de fundamental importância na operação dos sistemas elétricos durante oscilações, pois influem o comportamento dos respectivos geradores.

O ajuste adequado do sistema de excitação de um gerador garantirá um amortecimento positivo das oscilações do respectivo gerador, contribuindo assim para a estabilidade do sistema, enquanto que um ajuste inadequado em seus parâmetros poderá até ocasionar amortecimento negativo, dando lugar à instabilidade da operação.

2 - EFEITOS DO SISTEMA DE EXCITAÇÃO

NA ESTABILIDADE

2 - EFEITOS DO SISTEMA DE EXCITAÇÃO NA ESTABILIDADE

A estabilidade de um sistema se constitui na sua capacidade em retornar às condições estáveis de operação, após ter sido submetido a alguma perturbação, e pode ser dividida em estabilidade dinâmica e estabilidade transitória, sendo visível em ambas o efeito dos sistemas de excitação.

O sistema de potência está sempre sujeito a pequenas perturbações, uma vez que a cada instante estão ocorrendo pequenos distúrbios na carga.

A estabilidade dinâmica se manifesta através destas pequenas variações de carga, que são lentas quando comparadas com a taxa de variação do enlace de fluxo nas máquinas rotativas em resposta a aquelas variações.

A estabilidade transitória em um sistema elétrico se manifesta através de grandes distúrbios (curtos circuitos, variação brusca de carga, abertura de importantes linhas de transmissão, etc).

Neste caso o objetivo é o sistema manter o sincronismo durante tais oscilações. Durante este tempo a máquina estará sujeita a apreciáveis variações na potência de saída, ocasionando aceleração ou desaceleração do rotor, o que poderá ocasionar a perda do sincronismo.

Cumprido salientar que, no fim da estabilidade transitória (se o sistema não perder o sincronismo), temos uma estabilidade dinâmica.

Os vários componentes do sistema de excitação (excitatriz, regulador de tensão, malhas estabilizadoras, etc.) podem individualmente ou em grupos afetar a estabilidade transitória, a dinâmica, ou ambas. Algumas características desses componentes são:

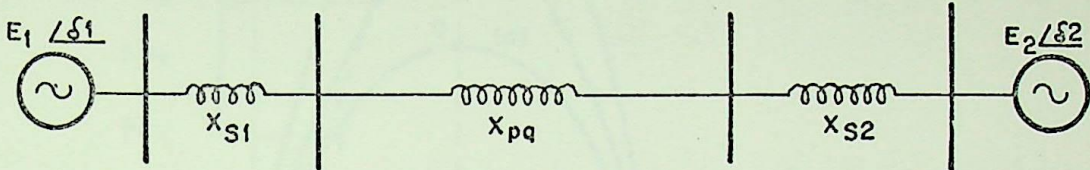
- RESPOSTA DE TENSÃO - Aumenta o fluxo no gerador e com isto ajuda na estabilidade transitória.
- TENSÃO DE TETO ("CEILING") DA EXCITATRIZ - produz suficiente potência reativa na saída do gerador, ajudando tanto à estabilidade transitória como à dinâmica.
- MALHAS ESTABILIZADORAS - Utilizam grandezas das máquinas tais como: tensão, velocidade, ângulo, etc., ajudando à estabilidade dinâmica.
- AÇÃO RÁPIDA E CONTÍNUA - Característica que aumenta a estabilidade dinâmica.
- CORRENTE MÍNIMA DE SUBEXCITAÇÃO - não deixa o gerador operar em regiões potencialmente instáveis.

2.1 - EFEITOS NA ESTABILIDADE DINÂMICA

Na estabilidade dinâmica a potência a ser transferida é calculada com a utilização das reatâncias síncronas saturadas e as tensões atrás destas reatâncias.

No caso de duas máquinas, teremos:

$$P_e = \frac{E_{S1} \cdot E_{S2}}{X} \sin \delta_{12}$$



$$X = X_{S1} + X_{pq} + X_{S2}$$

FIG. 2.1

As tensões E_1, E_2 são proporcionais às respectivas correntes de campo.

Sem a utilização do regulador de tensão, a máxima potência a ser transferida seria a correspondente ao ponto 0 (E_1 e E_2 constantes e $\delta_{12} = 90^\circ$).

Normalmente, porém, os geradores têm a sua tensão terminal mantida constante, utilizando para isto o seu sistema de excitação.

No caso de uma variação lenta ou gradual, imediatamente far-se-á sentir a ação do sistema de excitação (o regulador de tensão atua no campo da excitatriz de modo que a tensão terminal seja ajustada no valor previsto).

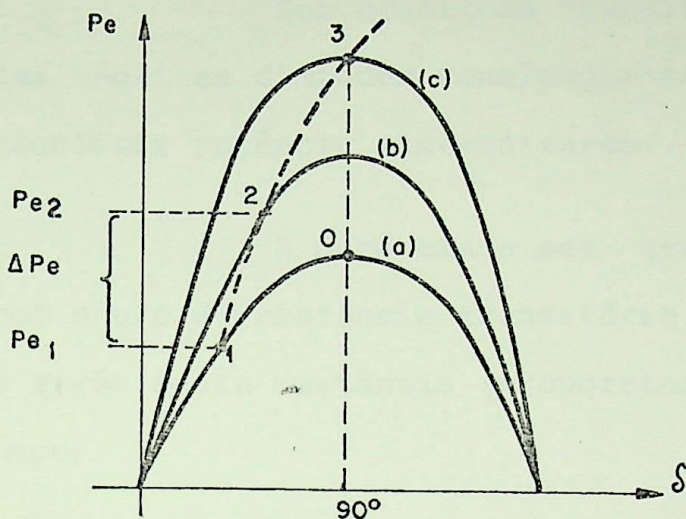


FIG. 2.2

Admitamos por exemplo que a máquina esteja operando no ponto 1 (FIG.2.2) e que haja um aumento de carga ΔL . Para a nova carga, teremos um maior valor de corrente que ocasionará uma maior queda na reatância X_S . Isto nos dará uma queda no valor da tensão terminal.

O regulador de tensão então atua no campo da excitatriz de modo a levar a tensão terminal para o valor especificado. Como consequência a tensão atrás da reatância síncrona saturada também aumentará, ocorrendo o mesmo com a potência de transferência, e passaremos a trabalhar na curva b (ponto 2). Isto poderá ser feito continuamente até atingirmos o ponto 3, que nos dá uma defasagem angular de 90° e representa o limite de estabilidade dinâmica.

2.2 - EFEITOS NA ESTABILIDADE TRANSITÓRIA

Sob condições transitórias, as tensões terminais das máquinas diminuem sensivelmente e afetam a capacidade em transferir potência sincronizante.

A potência a ser transferida é agora calculada com o uso da reatância transitória da máquina síncrona e a tensão atrás desta reatância (proporcional ao enlace de fluxo no campo).

Na ocorrência de uma falta (t_{o+}), o enlace de fluxo é o mesmo que no instante anterior a falta (t_{o-}). Durante a falta, entretanto, o enlace de fluxo decresce segundo uma lei de variação exponencial que é descrita pela constante de tempo em curto-circuito da máquina (T'_d).

Se a falta for mantida, o enlace de fluxo continuará decrescendo, e a máquina apesar de sobreviver a primeira oscilação ("swing"), poderá perder o sincronismo nas oscilações ("swings") subsequentes.

A ação do sistema de excitação, através do seu regulador de tensão, consiste em aumentar o enlace de fluxo, possibilitando assim às máquinas que não perdem o sincronismo nas primeiras oscilações ("swings"), mantê-lo nas posteriores.

Em grandes sistemas a máquina poderá sair de sincronismo nas primeiras oscilações. Uma resposta da excitatriz da ordem de 150 a 250 Volts/segundo é normalmente suficiente para a preservação da estabilidade nas oscilações ("swings") posteriores a primeira.

Já foi também comprovado que quanto mais

rápida for a resposta da excitatriz, maior benefício teremos para o sistema sob o ponto de vista de estabilidade, contudo é importante observar que o ganho na estabilidade é pequeno quando se aumenta a velocidade de resposta além dos valores anteriormente citados (150 a 250 Volts/segundo).

Anteriormente ao aparecimento dos disjuntores e relés, que ^{de} permitem a retirada de faltas em poucos ciclos, o sistema de excitação era um fator primordial na preservação da estabilidade dos sistemas.

Atualmente, apesar do advento destes equipamentos, o sistema de excitação também é importante. Com faltas de curta duração, o decréscimo do enlace de fluxo neste intervalo será pequeno, o mesmo acontecendo com a influência do sistema de excitação. Após a retirada da falta, as máquinas continuam oscilando, porém a reação da armadura apresenta um efeito desmagnetizante menor que durante a falta, permitindo assim ao sistema de excitação aumentar o enlace de fluxo. Desta maneira o sistema de excitação ajuda a precivelmente na estabilidade transitória, mesmo que alta velocidade seja empregada na retirada das faltas.

Convém aqui observar os resultados de estudos feitos por Concordia, que nos dizem que a constante de tempo requerida pela excitação, decresce com o chaveamento. Isto indica que o tempo de eliminação da falta é mesmo mais importante que o indicado por muitos estudos de estabilidade transitória, nos quais a constância do enlace de fluxo é assumida.

Uma outra maneira de visualizarmos o efeito do sistema de excitação na estabilidade transitória é mostrado a seguir.

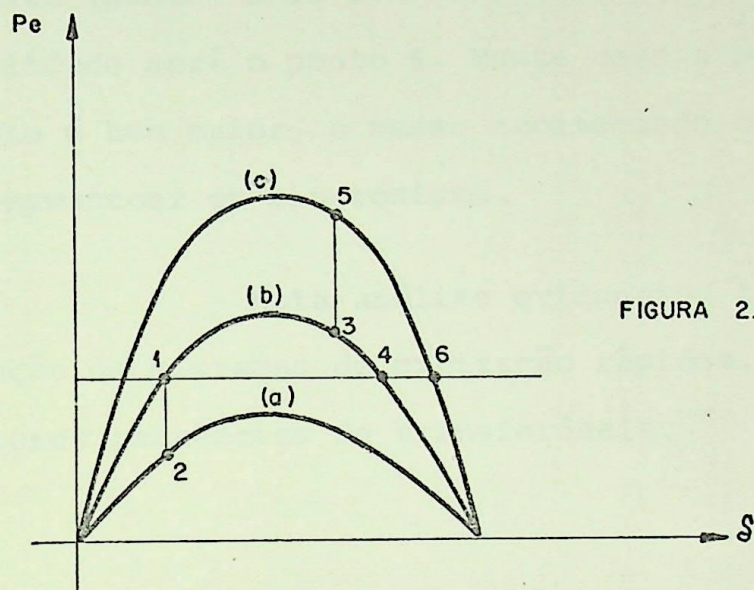


FIGURA 2.3

FIG. 2.3

Consideremos a curva P versus δ , (FIG. 2.3), e que no instante anterior à falta o gerador estivesse operando no ponto 1 (curva b).

Durante a falta (gerador operando na curva a) a potência mecânica permanece constante e a potência elétrica diminui ocasionando entre elas uma diferença que provocará uma aceleração do rotor.

Após a eliminação da falta, se admitirmos que não houve variação da reatância de transferência e que não há controle da excitação (não há regulador de tensão), o gerador voltará a operar na curva b (ponto 3, por exemplo). Nesta ocasião (o rotor mesmo desacelerando) o ponto de operação desloca-se ao longo da curva b em direção

ao ponto 4. Caso ultrapasse este ponto, o rotor acelera no
vamente, e a máquina perderá o sincronismo.

Porém, se o controle da excitação for
usado, o gerador passará a operar na curva c, após a elimina -
ção da falta (ponto 5), e com isto vemos que o novo limite
de estabilidade será o ponto 6. Neste caso a potência de
sacelerante é bem maior, o mesmo acontecendo com a possibilili
dade de permanecer em sincronismo.

Esta análise evidenciou também que com
a utilização de sistemas de excitação rápidos, poderemos per
mitir maiores reatâncias de transferência.

3 - TIPOS DE SISTEMA DE EXCITAÇÃO

Este sistema de excitação pode ser representado pelo diagrama de blocos mostrado na FIG.3.2.

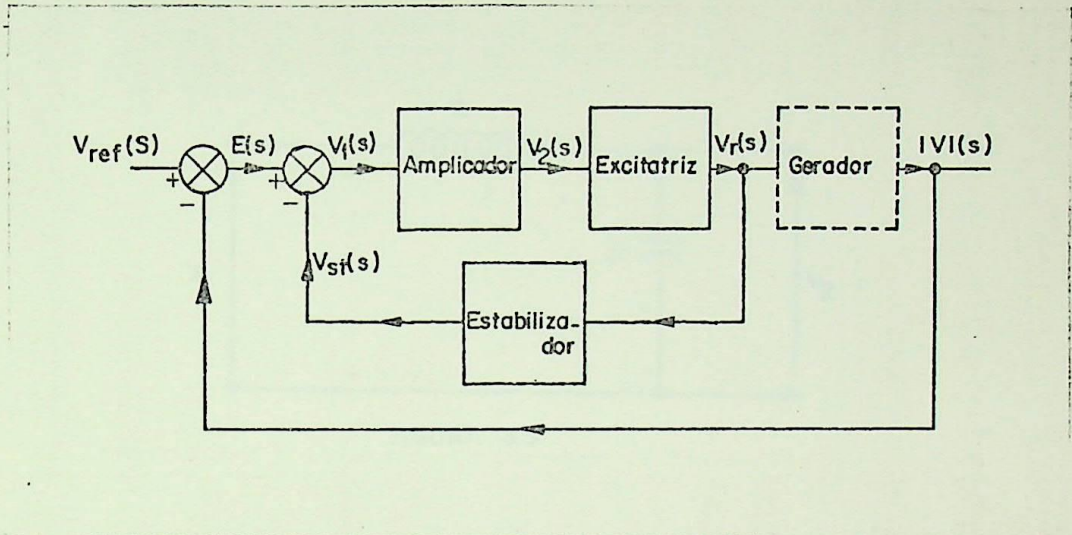


FIG. 3.2

3.1.1 - FUNCIONAMENTO

Basicamente o regulador de tensão com para a tensão terminal do gerador (reduzida por um transformador, retificada e filtrada) com a tensão de referência (1º somador), produzindo um erro que será comparado com o sinal da malha estabilizadora (2º somador). O sinal resultante é amplificado e controla o campo da excitatriz de maneira que a tensão terminal do gerador se mantenha no valor desejado.

3.1.2 - COMPONENTES DO DIAGRAMA DE BLOCO

Neste ponto torna-se interessante conhecer o que venha a ser cada bloco componente do diagrama, sua função de transferência e seus parâmetros.

3.1.2.1 - RETIFICADOR E FILTRO

A tensão terminal após ser rebaixada é retificada, e então é aplicada a um filtro, como por exemplo o filtro RC, mostrado na figura 3.3.

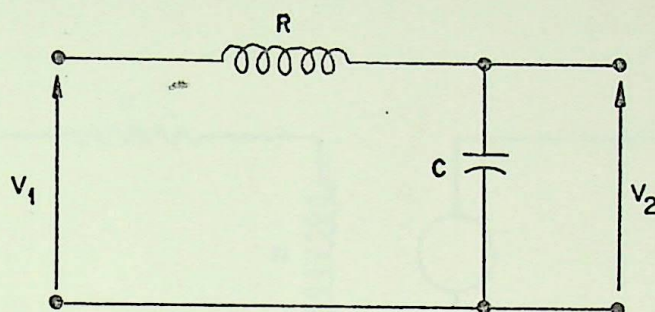


FIGURA 3.3

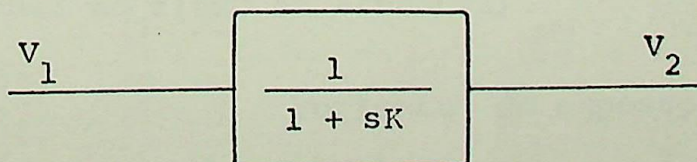
FIG. 3.3

A função de transferência para este circuito pode ser facilmente encontrada.

Do circuito, temos:

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

onde RC é a constante de tempo do circuito, que chamaremos de K . Logo, o diagrama de bloco para este circuito, será:



3.1.2.2 - EXCITATRIZ

Consideremos o caso em que a excitatriz é uma máquina rotativa de corrente contínua, que poderá ser excitada em série ou em paralelo. Consideremo-la operando em vazio.

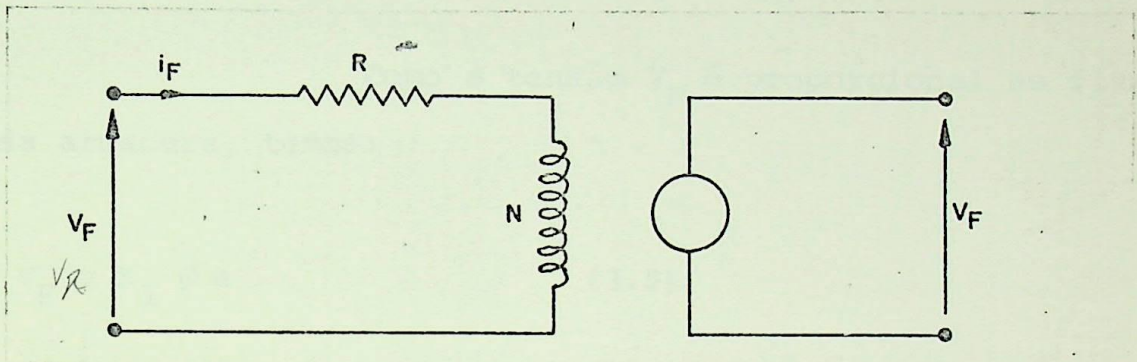


FIG. 3.4

Chamando (FIG.34) de R a resistência total do circuito de campo, N o número total de espiras e ϕ_f o fluxo no campo, pela lei de Lenz, poderemos escrever:

$$N \frac{d\phi_f}{dt} = V_R - Ri \quad (3.1)$$

O fluxo ϕ_f é constituído de duas parcelas: uma (ϕ_a), que é o fluxo na armadura e outra (ϕ_d), que é responsável pelo fluxo de dispersão (sendo diretamente, proporcional ao fluxo na armadura).

Portanto do exposto acima, podemos escrever:

$$\phi_f = \phi_a + \phi_d \quad (3.2)$$

$$\phi_d = K_2 \phi_a \quad (3.3)$$

Substituindo (3.3) em (3.2), teremos:

$$\phi_f = (1 + K_2) \phi_a \quad (3.4)$$

Como a tensão V_F é proporcional ao fluxo ϕ_a da armadura, temos:

$$V_F = K_1 \phi_a \quad (3.5)$$

$$(3.5) \longrightarrow (3.4)$$

$$\phi_f = (1 + K_2) \times \frac{V_F}{K_1} \quad (3.6)$$

Levando (3.6) em (3.1) vem:

$$N \frac{(1 + K_2)}{K_1} \times \frac{dV_F}{dt} = V_R - R i_F \quad (3.7)$$

Sabemos, da teoria das máquinas de corrente contínua, que a curva de saturação em vazio deste tipo de máquina é a seguinte. (FIG. 3.5).

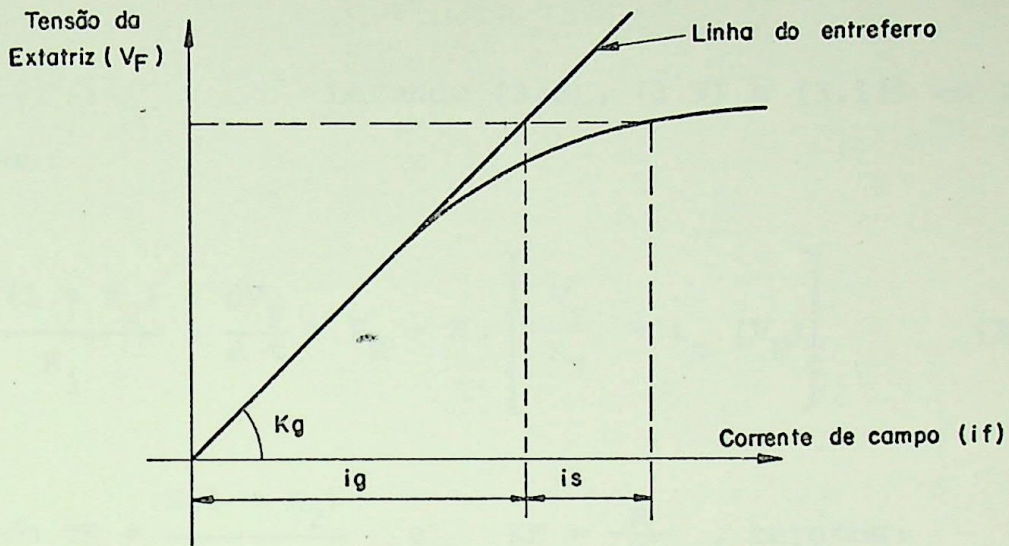


FIG. 3.5

Pela figura vemos que a corrente total do campo pode ser decomposta em 2 parcelas:

- a corrente necessária para produzir V_F , levando em consideração a linha do entreferro.
- a corrente adicional para obter-se o mesmo V_F , considerando agora a saturação.

Logo;

$$i_F = i_g + i_s \quad (3.8)$$

Sabemos ainda que:

V_F é proporcional a i_g

$$\therefore (V_F = K_3 i_g) \quad (3.9)$$

i_s é função da tensão V_F :

$$i_s = f(V_F) \quad (3.10)$$

Levando (3.8), (3.9) e (3.10) em (3.7),

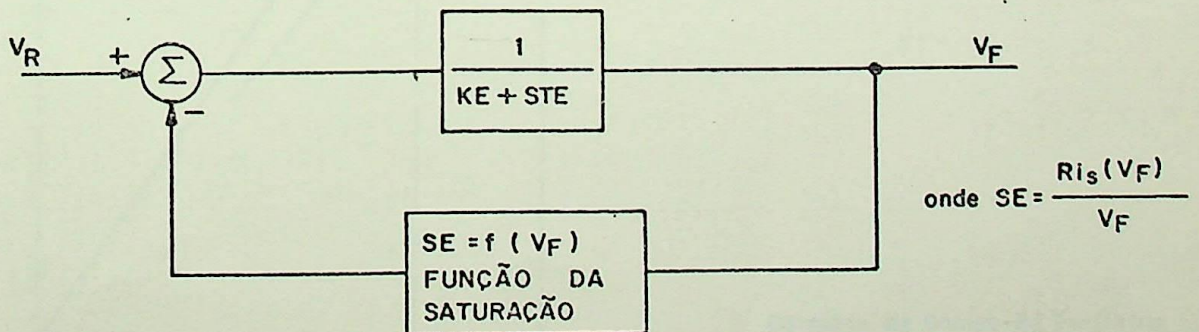
teremos:

$$\frac{N(1 + K_2)}{K_1} \cdot \frac{dV_F}{dt} = V_R - R \cdot \left[\frac{V_F}{K_3} + i_s(V_F) \right] \quad (3.11)$$

Tomando $TE = \frac{N(1 + K_2)}{K_1}$ e $KE = \frac{R}{K_3}$, teremos:

$$TE \frac{dV_F}{dt} + KE V_F = V_R - R i_s(V_F), \quad (3.12)$$

o que nos dá o seguinte diagrama de blocos.



Onde:

KE - nos dá a constante da excitatriz relacionada à excitação própria do campo.

TE - nos dá a constante de tempo da própria máquina.

O efeito da saturação (SE) pode ser calculado a partir da curva de saturação da excitatriz (FIG. - 3.6).

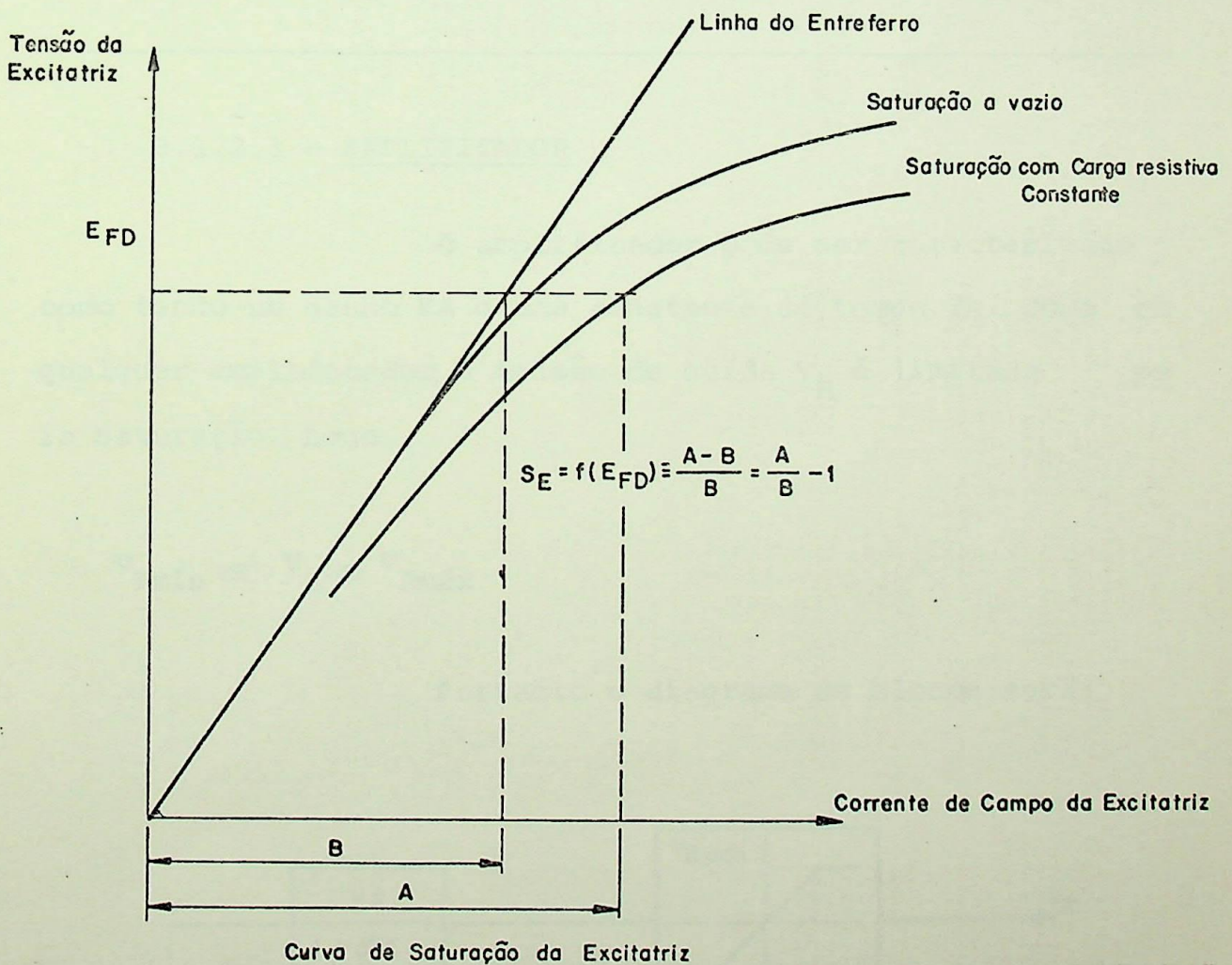


FIG. 3.6

$$SE = \frac{A - B}{B} = \frac{A}{B} - 1 \quad (3.13)$$

Dependendo do programa a ser utilizado, o efeito da saturação pode ser representado de várias maneiras, mas em geral dois pontos da curva são suficientes para representá-la, e neste caso é sugerido que se utilize:

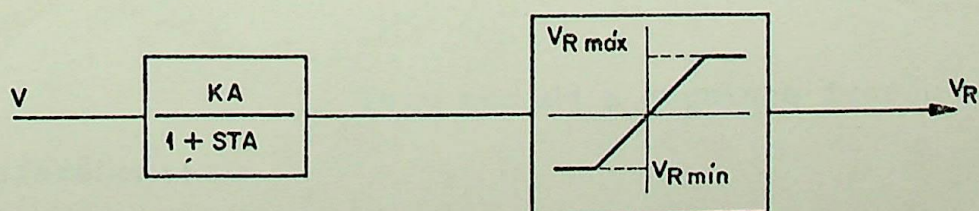
TENSÃO	SATURAÇÃO
$E_{fd_{m\acute{a}x}}$	$SE_{m\acute{a}x}$
$0,75 E_{fd_{m\acute{a}x}}$	$SE_{0,75_{m\acute{a}x}}$

3.1.2.3 - AMPLIFICADOR

O amplificador pode ser caracterizado como tendo um ganho KA e uma constante de tempo TA . Como em qualquer amplificador, a tensão de saída V_R é limitada pela saturação. Logo.

$$V_{Rm\acute{a}x} \leq V_R \leq V_{Rm\acute{a}x}$$

Portanto o diagrama de blocos será:



3.1.2.4 - ESTABILIZADOR

A malha estabilizadora pode ser constituída por um simples transformador como mostrado na FIG.3.1. O transformador fornece uma tensão V_{est} proporcional à derivada da corrente i_{est} , o que equivale a dizer que V_{est} é proporcional à tensão aplicada ao campo do gerador.

A tensão V_{est} pode então ser escrita como:

$$V_{est} = M \frac{di_{est}}{dt}$$

Sabemos ainda que:

$$V_r = Ri_{est} + L \frac{di_{est}}{dt}$$

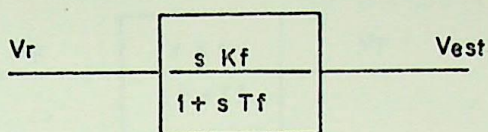
então,

$$\frac{V_{est}(s)}{V_r(s)} = \frac{sM}{R + sL}$$

ou:

$$\frac{V_{est}(s)}{V_r(s)} = \frac{s K f}{1 + s T f} \quad (3.14)$$

Isto nos dá a seguinte função de transferência:



A malha estabilizadora também poderia , ser obtida com um circuito RC série (FIG. 3.7).

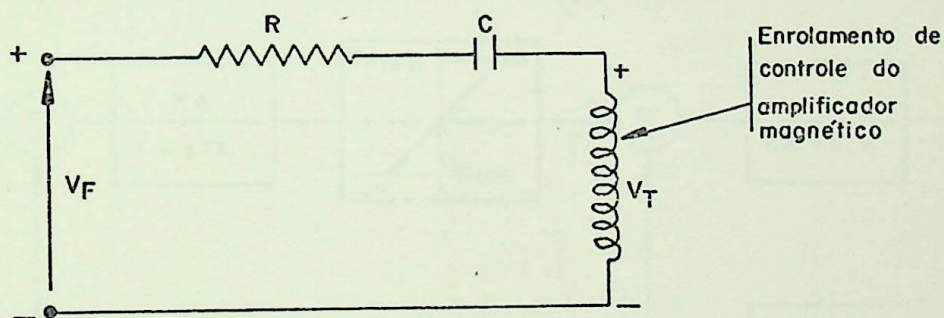


FIG. 3.7

A impedância de entrada do enrolamento de controle do amplificador magnético é baixa e praticamente igual à resistência r do enrolamento; logo:

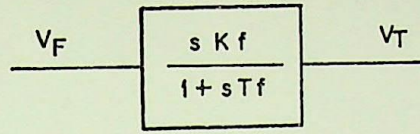
$$V_T = \frac{r}{R+r+1/sC} V_F$$

Fazendo $rC = K_f$ e $(R+r)C = T_f$, te

remos:

$$V_T = \frac{s K_f}{1 + s T_f} V_F \quad (3.15)$$

que nos dá o seguinte diagrama de blocos :



De posse de todas as funções de transferência obtidas, teremos o diagrama da figura 3.8.

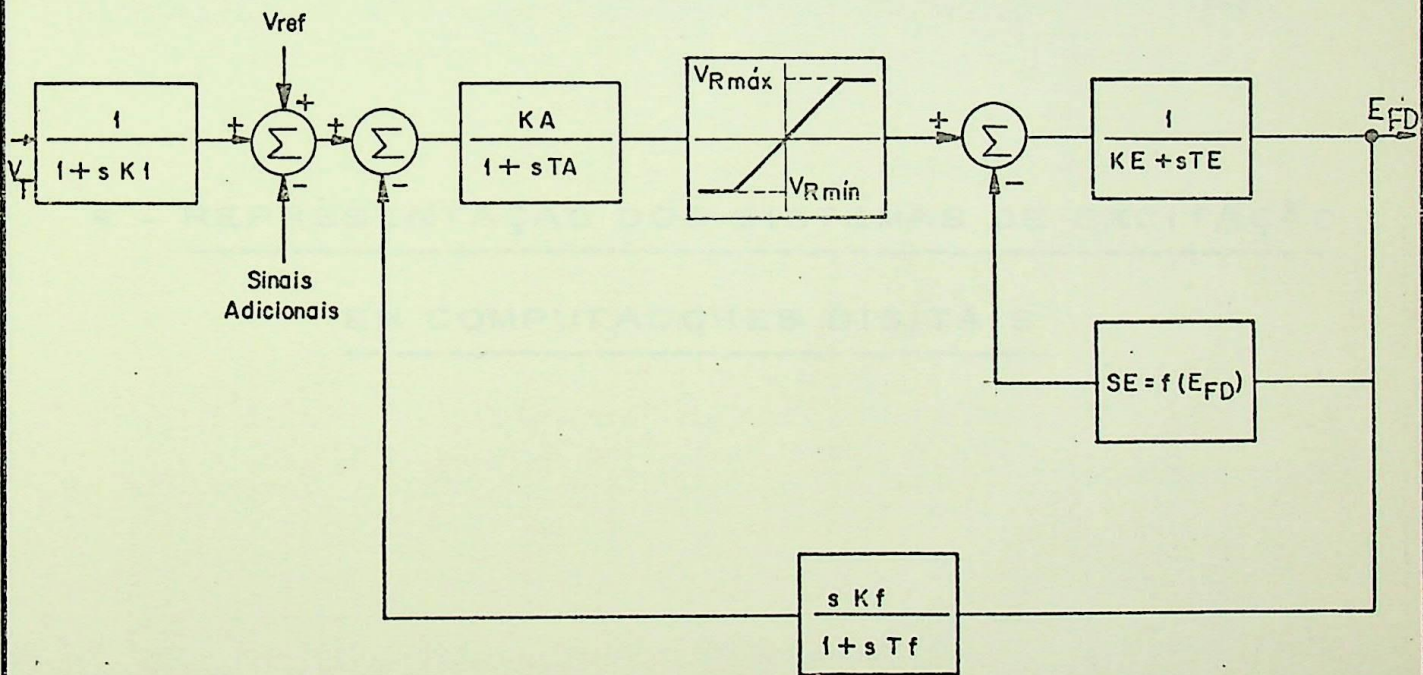


FIG. 3.8

4 - REPRESENTAÇÃO DOS SISTEMAS DE EXCITAÇÃO

EM COMPUTADORES DIGITAIS

4 - REPRESENTAÇÃO DOS SISTEMAS DE EXCITAÇÃO EM COMPUTADORES

A maioria dos problemas que envolvem o comportamento dos sistemas requer o uso de computadores. Tor_{na}-se necessário então definir um conjunto de modelos, a fim de obter-se maior simplicidade para uso em computadores, bem como introduzir uma nomenclatura e representação padrão aos vários sistemas de excitação disponíveis.

Isto, além de permitir uma linguagem co_mum em termos de sistemas de excitação, também permitirá aos fabricantes escolher o melhor modelo que represente o seu sistema, e em função disto calcular os valores dos parâme_{nt}ros.

Estes padrões de representação já fo_{ra}m desenvolvidos pelo IEEE Working Group of the Excitation Systems, Subcommittee of the IEEE Power Generation Committee

Este grupo definiu quatro tipos bá_sicos de sistemas de excitação a serem utilizados em computa_{do}res.

Antes de mencionarmos os modelos, se_{rá} interessante que se conheçam as bases a serem consideradas e os símbolos utilizados.

Tomar-se-ã como tensão base do gerador a tensão nominal do mesmo, e como tensão base da excitatriz a tensão necessária na mesma para que se produza a tensão no_minal no gerador, considerando-se a linha do entreferro.

4.1 - LISTA DOS SIMBOLOS UTILIZADOS

- E_{fd} - Tensão de saída da excitatriz
- I_{fd} - Corrente no campo do gerador
- I_t - Corrente terminal do gerador
- K_A - Ganho do amplificador
- KE - Constante da excitatriz relacionada à excitação própria do campo
- K_f - Ganho da malha estabilizadora
- KI - Ganho do circuito de corrente (sistema de excitação, tipo 3).
- KP - Ganho do circuito de potencial (sistema de excitação tipo 1S ou tipo 3).
- KV - Ajuste do contato de variação rápida (sistema de excitação tipo 4).
- SE - Função de saturação da excitatriz.
- TA - Constante de tempo do amplificador
- TE - Constante de tempo da excitatriz

- TF - Constante de tempo da malha estabilizadora
- TF_1, TF_2 - Constantes de tempo da malha estabilizadora (Rotating rectifier system).
- TR - Constante de tempo do transdutor de entrada
- TRH - Constante de tempo do reostato (sistema de excitação tipo 4)
- V_R - Tensão de saída do regulador
- V_T - Tensão terminal do gerador
- V_{THEV} - Tensão obtida pela soma vetorial de sinais proporcionais à tensão e corrente (sistema de excitação tipo 3)
- ΔV_T - Erro na tensão terminal do gerador

De posse do significado dos símbolos u utilizados, passaremos aos modelos, tecendo alguns comentários sobre os mesmos.

4.2 - MODELO IEEE - TIPO 1

Reúne os sistemas de excitação que possuem ação contínua do regulador e da excitatriz. Este tipo representa a maioria dos sistemas de excitação em uso, e como exemplo podemos citar entre outros, os seguintes sistemas de excitação:

- ALLIS CHALMERS - With regulex regulator
- GENERAL ELECTRIC - With amplidyne regulator
 - Alterex
 - Alterex - thyristor
- WESTINGHOUSE - With mag - A - stat regulator
 - Brushless (1970n)
 - Rototrol
 - With silverstat regulator
 - With TRA regulator

O diagrama de bloco da FIG.4.1 representa este tipo de sistema de excitação para uso em computador.

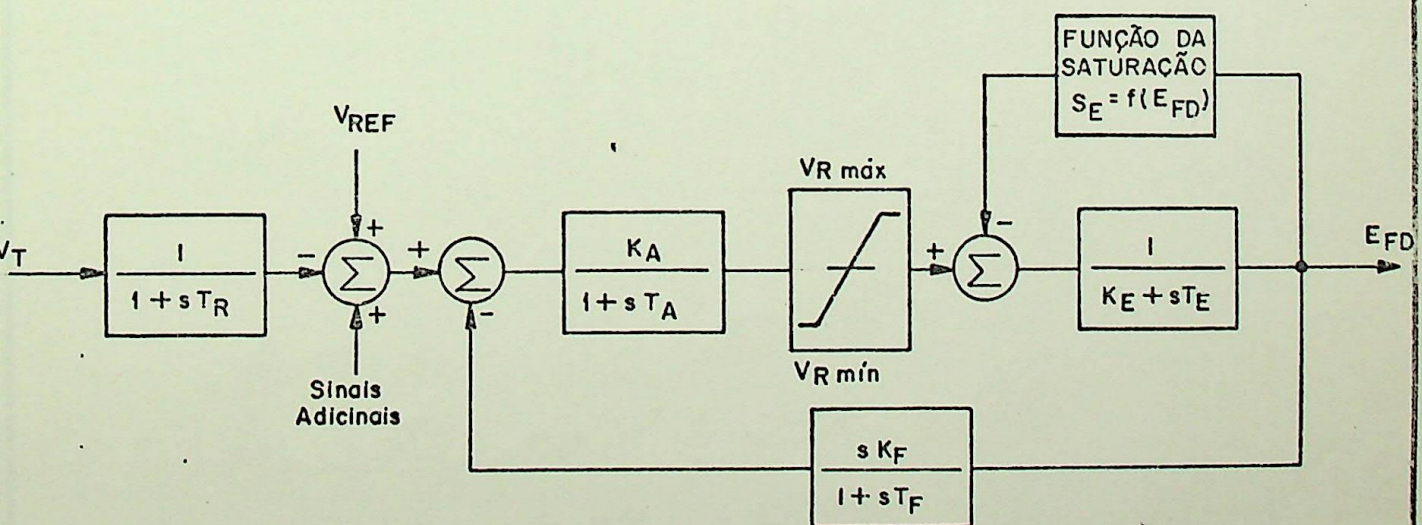


FIG.4.1

Representação de sistema de excitação com regulador e excitatriz de ação contínua.

Cumpre salientar que podemos utilizar este mesmo diagrama para representar outros sistemas de excitação, bastando-se admitir que a tensão máxima ("ceiling") do amplificador não é constante e sim proporcional à tensão terminal da máquina V_T , isto é:

$$V_{R_{\text{m\acute{a}x}}} = K_P \cdot V_T$$

Em geral, para este tipo, temos:

$$KE = 1; \quad TE = 0 \quad \text{e} \quad SE = 0$$

É importante não esquecer que em regime permanente existe uma relação entre $E_{fd_{\text{m\acute{a}x}}}$, $V_{R_{\text{m\acute{a}x}}}$, SE e KE . Estando tres destas variáveis definidas, a quarta também estará. A equação que rege esta dependência é mostrada abaixo.

$$V_{R_{\text{m\acute{a}x}}} - (KE + SE_{\text{m\acute{a}x}}) E_{fd_{\text{m\acute{a}x}}} = 0$$

4.3 - MODELO IEEE TIPO 2

Este tipo (FIG. 4.2) é muito semelhante ao interior, excetuando-se a malha estabilizadora. Neste caso, a realimentação não inclui a excitatriz (tensão na excitatriz não disponível) e, para compensar este fato, teremos uma constante de tempo adicional como mostrado na FIG. 4.2.

Enquadra-se neste tipo o Westinghouse-Brushless.

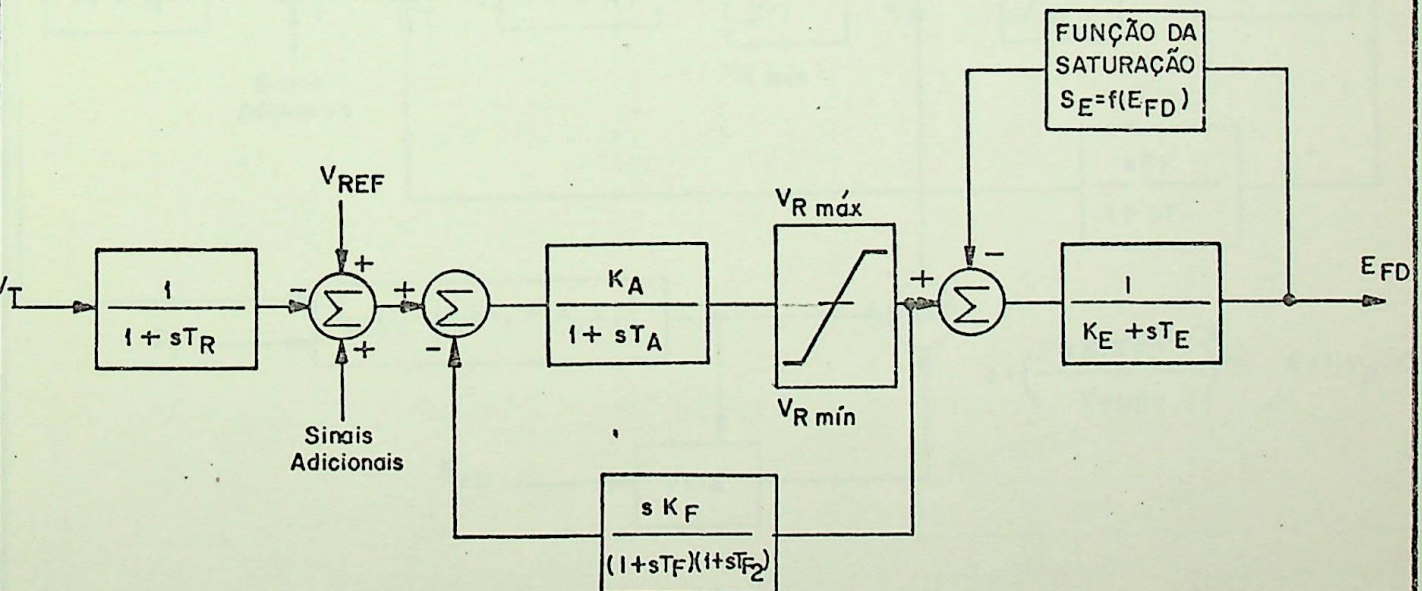


FIG. 4.2

TIPO 2 - Representação de sistemas de excitação com retificação rotativa.

4.4 - MODELO IEEE TIPO 3

Representação de Sistemas de Excitação estáticos com alimentação de tensão e corrente terminais.

Este tipo representa o sistema de excitação S.C.P.T. da General Electric.

Encontra-se na FIG. 4.3 o diagrama de blocos correspondente.

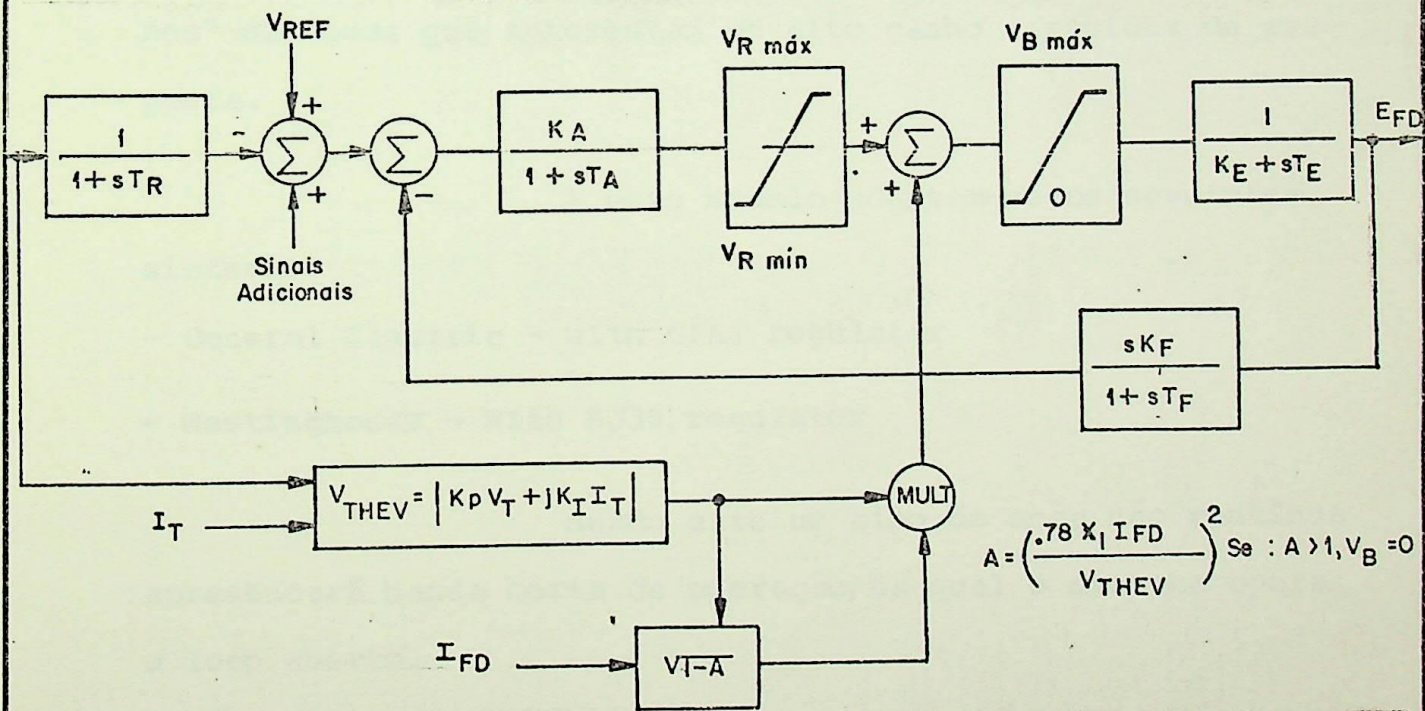


FIG. 4.3

TIPO 3 - Representação de sistemas de excitação estático com fonte terminal de tensão e corrente.

Considerações sobre o modelo. À partir do terceiro somador é que este modelo se diferencia do tipo 1 .

Aqui o sinal de saída deste somador, é a soma do sinal do amplificador, com um sinal que é função de V_T , I_T e I_{fd} .

4.5 - MODELO IEEE TIPO 4

SISTEMAS DE EXCITAÇÃO DE AÇÃO NÃO CONTÍNUA

Este tipo representa sistemas de excitação mais antigos, desenvolvidos antes do advento dos "modernos" sistemas que apresentam um alto ganho e rapidez de resposta.

A este modelo adaptam-se os seguintes sistemas:

- General Electric - with GFA4 regulator
- Westinghouse - With BJ30 regulator

Sendo este um tipo de ação não contínua apresentará banda morta de operação, na qual o sistema opera a loop aberto.

O tipo da resposta depende da amplitude do erro de sinal e apresenta duas velocidades. Os ajustes responsáveis por estas duas diferenças de velocidade são obtidas da seguinte forma:

1º) Para erros pequenos, teremos um ajuste feito através de um reostato que é ajustado por um motor.

2º) Para grandes erros, teremos um ajuste que será feito mediante a inserção ou retirada (curto-circuito) de um reostato, de forma que um forte sinal é aplicado à excitatriz. A FIG. 4.4 apresenta o diagrama de blocos deste tipo de sistema de excitação.

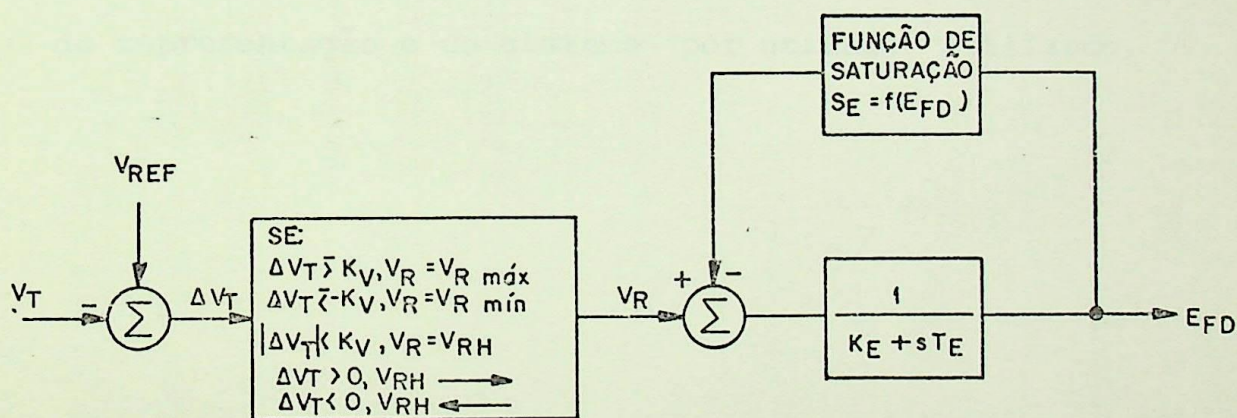


FIG. 4.4

NOTA: V_{RH} é limitado entre $V_{Rmín}$ e $V_{RMáx}$

T_{RH} - constante de tempo da mudança do valor do reostato

TIPO 4 - Representação de Sistemas de Excitação de ação não contínua.



NOTA : Cumpre salientar que os atuais programas de estabilidade permitem a representação (modelagem) de qualquer sistema de excitação.

4.6 - VALORES TÍPICOS DOS PARÂMETROS UTILIZADOS

A tabela 1 nos dá uma noção dos valores a serem encontrados para alguns destes sistemas. Pela análise da tabela, verificam-se diferenças entre ganhos, constantes de tempo e realimentação.

Isto é ocasionado em razão do método de representação e do sistema "por unidade" utilizado.

TABELA 1

- Valores típicos dos parâmetros dos Sistemas de Excitação em operação para máquinas térmicas de 3600rpm -

- Taxa de resposta de tensão dos Sistemas de Excitação=0,5 pu

SIMBOLO	EXCITATRIZ AUTO- EXCITADA OU DIO- DO DE SILICIO C/ REGULADORES DE TENSÃO AMPLIDYNE	EXCITATRIZ AUTO- EXCITADA COM CO- MUTADOR E COM REGULADOR DE TENSÃO Mag - A - Stat	EXCITATRIZ COM RETIFICADORES ROTATIVOS COM REGULADOR DE TENSÃO ESTÂTI- CO.
T_R	0,0 a 0,06	0,0	0,0
K_A	25* a 50*	400	400
T_A	0,06 a 0,20	0,05	0,02
$V_{Rm\acute{a}x}$	1,0	3,5	7,3
$V_{Rm\acute{i}n}$	-1,0	-3,5	-7,3
K_F	0,01 a 0,08	0,04	0,03
T_F	0,35 a 1,0	1,0	1,0
K_E	-0,05	-0,17	1,0
T_E	0,5	0,95	0,8
$S_{Em\acute{a}x}$	0,267	0,95	0,86
$S_{E.75m\acute{a}x}$	0,074	0,22	0,50

* Para geradores com constantes de tempo a circuito aberto (T'_{do}) maior que 4 segundos.

5 - AJUSTE DOS PARAMETROS DO SISTEMA DE EXCI-
TACÃO

5 - AJUSTE DOS PARÂMETROS DO SISTEMA DE EXCITAÇÃO

Normamente um sistema de excitação é escolhido de modo a adaptar-se às características da máquina à qual será conectado.

Porém, estando a máquina ligada a um Sistema de Potência, será também necessário que o sistema de excitação atue de modo adequado no sistema e para isto ele também deve ser escolhido e otimizado em relação ao mesmo.

Conclui-se então que a correta metodologia para a definição ou ajuste dos parâmetros do sistema de excitação consiste em simulá-lo isoladamente com a máquina e depois proceder ao refinamento utilizando para isto a simulação de todo o Sistema de Potência.

Por exemplo, ao ajustarmos o sistema de excitação para energização de linhas, rejeição de cargas, estabilidade, estaremos definindo suas características básicas e depois, com a simulação de todo o Sistema de Potência, os ajustes serão otimizados. Para isto serão utilizados ensaios no domínio do tempo, nos quais a máquina é considerada isolada do sistema, alimentando cargas radiais ou ligada a uma barra infinita. Deste modo será garantido um ajuste para a frequência de oscilação da máquina ensaiada.

Para simular a operação do conjunto sistema de excitação - máquina síncrona, o sistema de excitação será representado por suas equações diferenciais e a máquina síncrona modelada, em cada intervalo de tempo u

tilizado na solução das equações diferenciais do sistema de excitação, pelo seu diagrama vetorial. Serão utilizados os programas CSMP - CONTINUOUS SYSTEM MODELING PROGRAM, da IBM, e o programa de estabilidade da PHILADELPHIA ELECTRIC COMPANY.

5.1 - REPRESENTAÇÃO DA MÁQUINA

Para a realização destes ensaios as máquinas e os respectivos sistemas de excitação serão modelados por modelos lineares.

A máquina síncrona será modelada por seu diagrama vetorial, incluindo as seguintes hipóteses simplificadoras:

- os parâmetros da máquina são independentes da frequência, o que pode ser justificado pela pequena variação da frequência enquanto a máquina não perde o sincronismo.
- o fluxo produzido no campo ψ_F permanece constante durante cada intervalo de integração Δt , o que se justifica por ser a constante de tempo do campo em circuito aberto T'_{do} muito maior que Δt . Deste modo, a tensão e'_q que é proporcional a ψ_F , mantém-se constante em cada intervalo de tempo.
- foi desprezada a resistência da armadura, exceto no caso de estabilidade transitória (curto nos terminais da máquina), onde, para se levar em consideração o seu efeito durante o curto-circuito, se consideram as perdas na armadura iguais a 15% da potência fornecida pela máquina antes do curto.

- o ângulo δ foi considerado constante em cada intervalo de tempo, o que se justifica pela inércia mecânica da máquina
- para a correção da saturação da máquina síncrona será utilizada a mesma correção empregada no programa da PECO, ou seja:

$$\Delta EI = A_G \cdot e^{(B_G (E_L - 0,8))}$$

onde as grandezas entram em valores relativos em pu.

Os valores de A_G e B_G podem ser determinados ajustando-se a equação anterior à curva de excitação da máquina (figura 5.1), onde as grandezas estão em pu, sendo a corrente base de campo escolhida como aquela que fornece a tensão base nos terminais da máquina (considerando um comportamento linear, com a curva de excitação coincidente com a linha de entreferro). Tal sistema de bases conduz para a máquina considerada como linear, a igualdade entre os valores da corrente de campo da máquina e a correspondente tensão induzida.

Assim para os dois valores de E_L , E_1 e E_2 medem-se na curva de excitação os valores correspondentes de ΔEI , Δ_1 e Δ_2 que levados à expressão

$$\Delta EI = A_G \cdot e^{(B_G (E_L - 0,8))}$$

nos permitem escrever:

$$B_G = \frac{\ln (\Delta_2 / \Delta_1)}{E_2 - E_1} \quad (5.1)$$

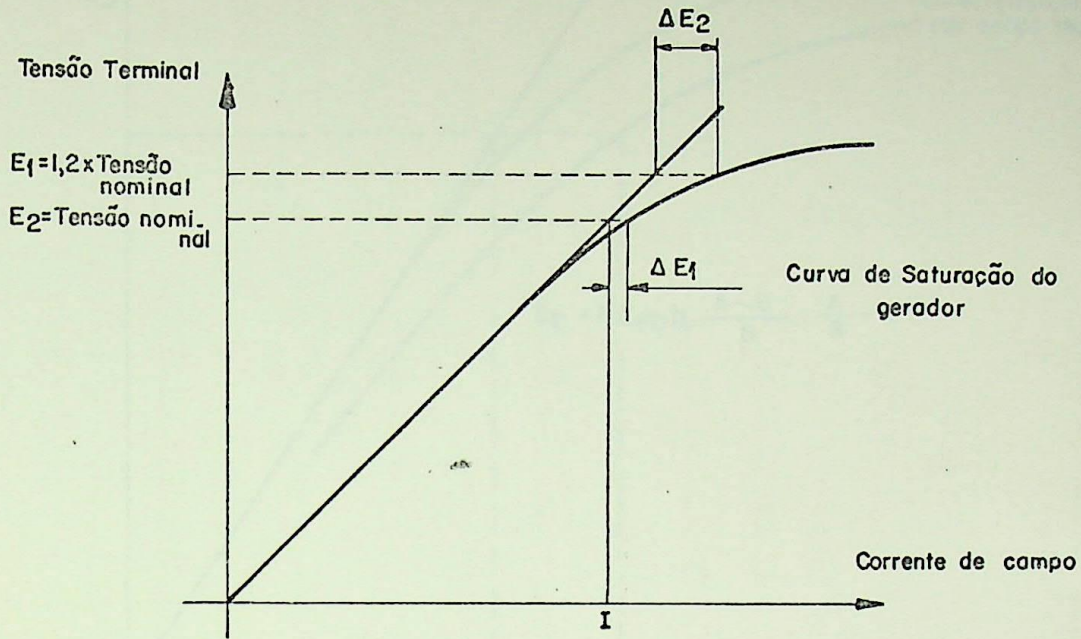


FIG. 5.1.

e.

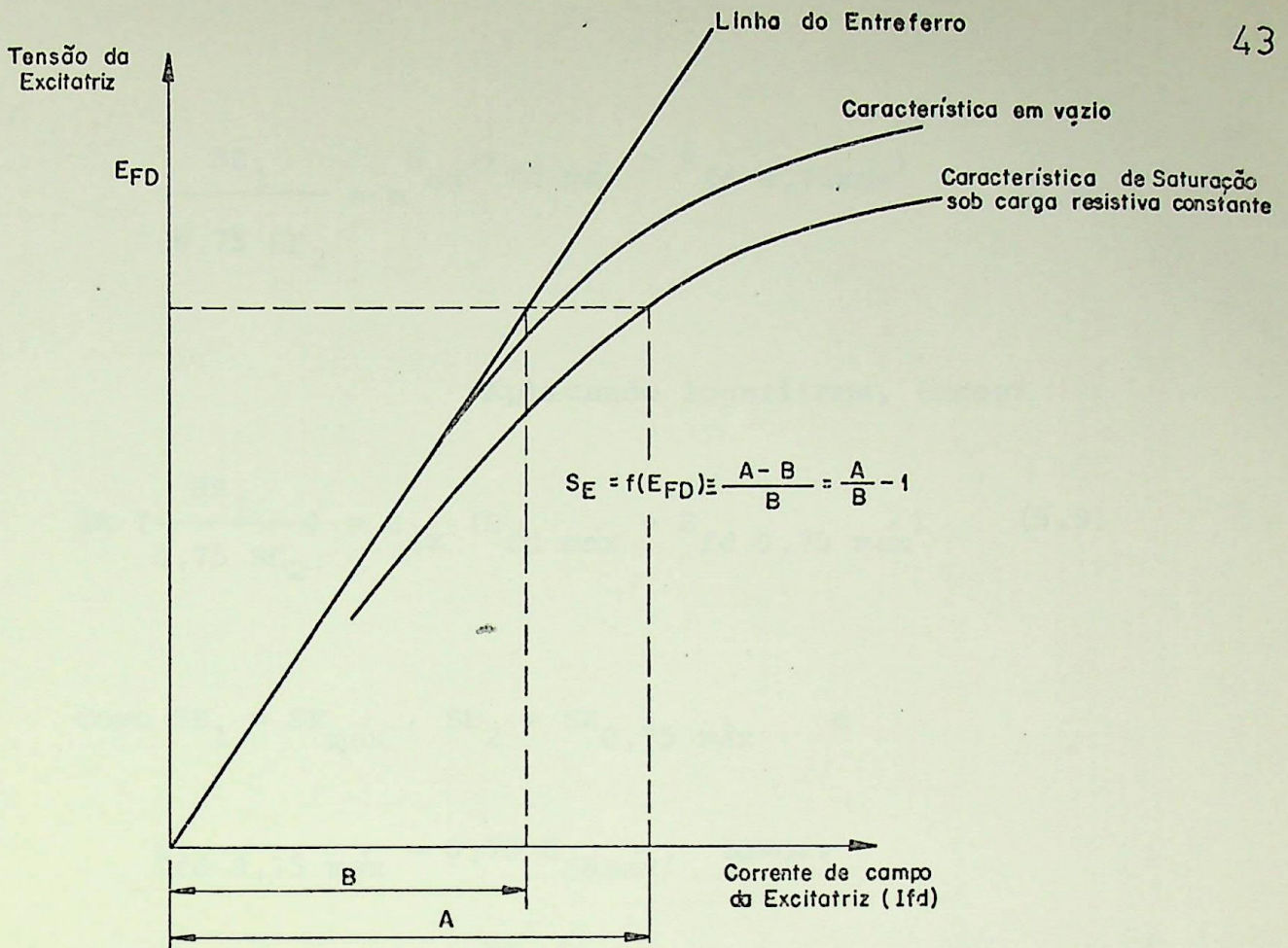
$$A_G = \frac{1}{e^{B_G (E_L - 0,8)}} \quad (5.2)$$

Com a correção da saturação, a expressão para o cálculo de EI passará a ser :

$$EI = E_t + X_d I_d + \Delta EI \quad (5.3)$$

- Para a correção da saturação da excitatriz usaremos a equação $\Delta I_f = A_{ex} e^{(B_{ex} \cdot E_{fd})}$, isto é, a correção da saturação será feita, considerando-se um acréscimo da corrente de campo da excitatriz que é função exponencial da tensão nos terminais da mesma.

Os valores de A_{ex} e B_{ex} podem ser calculados, ajustando-se a equação acima à curva de excitação da excitatriz (FIG. 5.2).



CURVA DE SATURAÇÃO DA EXCITATRIZ

FIG. 5.2

$$\Delta I_{fd} = A_{ex} \cdot e^{B_{ex}} \cdot E_{fd} \quad (5.4)$$

$$A - B = B S_E = \Delta I_{fd} \quad (5.5)$$

- Para $E_{fd} = E_{fdm\acute{a}x}$ temos:

$$B_1 S_{E_1} = A_{ex} \cdot e^{B_{ex}} \cdot E_{fdm\acute{a}x} \quad (5.6)$$

- Para $E_{fd} = E_{fd0,75m\acute{a}x}$, temos:

$$B_2 S_{E_2} = A_{ex} \cdot e^{B_{ex}} \cdot E_{fd0,75m\acute{a}x} \quad (5.7)$$

Dividindo-se (5.6) por (5.7) e sabendo-se que $B_2 = 0,75 B_1$, temos que:

$$\frac{SE_1}{0,75 SE_2} = e^{B_{ex}(E_{fd \text{ máx}} - E_{fd 0,75 \text{ máx}})} \quad (5.8)$$

Aplicando logaritmos, temos:

$$\ln \left(\frac{SE_1}{0,75 SE_2} \right) = B_{ex} (E_{fd \text{ máx}} - E_{fd 0,75 \text{ máx}}) \quad (5.9)$$

Como $SE_1 = SE_{\text{máx}}$, $SE_2 = SE_{0,75 \text{ máx}}$ e

$E_{fd 0,75 \text{ máx}} = 0,75 E_{fd \text{ máx}}$, temos:

$$B_{ex} = \frac{\ln \left(\frac{SE_{\text{máx}}}{0,75 SE_{0,75 \text{ máx}}} \right)}{0,25 E_{fd \text{ máx}}} \quad (5.10)$$

$$\text{mas } SE_{\text{máx}} = A_{ex} e^{B_{ex} \cdot E_{fd \text{ máx}}}$$

Logo,

$$A_{ex} = \frac{SE_{\text{máx}}}{e^{B_{ex} \cdot E_{fd \text{ máx}}}} \quad (5.11)$$

5.2 - TESTES PARA OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DO SISTEMA DE EXCITAÇÃO

5.2.1 - TESTE DE CARCA CAPACITIVA

5.2.1.1 - DESCRIÇÃO DO TESTE

Com este teste pode ser verificado o comportamento da máquina e do sistema de excitação por ocasião de situações que exijam grande absorção de potência reativa pela máquina, tal como ocorre, por exemplo, durante a energização de linhas de transmissão e rejeição de carga.

Durante a energização de linhas longas, as máquinas serão afetadas com um valor de potência reativa que atinge cerca de 30 a 50% da potência nominal da máquina. Para que o regulador de tensão atue convenientemente nesta situação é necessário apresentar as seguintes características:

- velocidade na desexcitação no ato da energização
- rapidez na estabilização da tensão após a energização.
- velocidade na excitação da máquina quando da tomada de carga após o paralelo.

Para que estes requisitos sejam satisfeitos torna-se necessário que:

- existam limites ("ceilings") negativos de tensão em todos os componentes do sistema de excitação.

- a rede estabilizante ou retroação transitória esteja bem ajustada

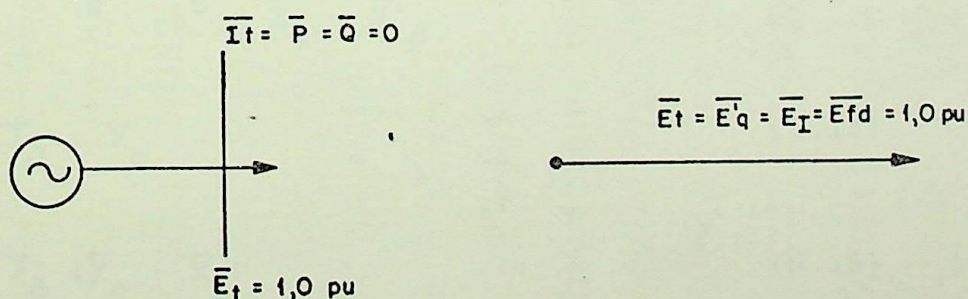
- a velocidade de resposta do regulador seja suficientemente elevada.

Durante a rejeição de carga a característica pedida ao regulador é ser o mais rápido possível na desexcitação, atuando violentamente e rapidamente na tensão, a fim de reduzir a força eletromotriz; isto evidencia a importância dos "ceilings" negativos no sistema de excitação.

Para a realização deste ensaio, uma carga capacitiva correspondente a 40% da potência nominal da máquina é aplicada aos terminais da mesma, tendo-se como condições iniciais a máquina operando em vazio, com tensão nominal em seus terminais.

5.2.1.2 - OBTENÇÃO DAS EQUACÕES DA MÁQUINA

a) CONDIÇÕES INICIAIS:



Máquina em vazão com tensão nominal nos terminais

FIG. 5.3

b) MÁQUINA EM REGIME TRANSITÓRIO EM RAZÃO DA APLICAÇÃO DE CARCA CAPACITIVA IGUAL A 40% DA POTÊNCIA NOMINAL, NA TENSÃO NOMINAL.

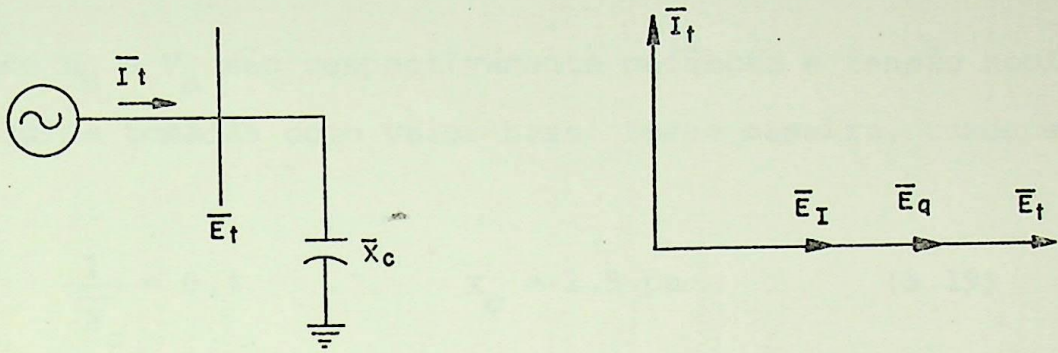


FIG. 5.4

Da FIG.5.4 podemos escrever as relações abaixo entre os módulos dos fasores representando as grandezas elétricas envolvidas.

$$\overline{E}'_q = \overline{E}_t - \overline{I}_d \times \overline{X}'_d = \overline{I}_d (\overline{X}_c - \overline{X}'_d) \quad (5.12)$$

$$\overline{I}_d = \overline{I}_t = \frac{\overline{E}'_q}{\overline{X}_c - \overline{X}'_d} \quad (5.13)$$

$$\overline{E}_t = \overline{I}_d \cdot \overline{X}_c \quad (5.14)$$

$$\overline{E}_L = \overline{I}_d (\overline{X}_c - \overline{X}_L) \quad (5.15)$$

$$\overline{E}_I = \overline{I}_d \cdot (\overline{X}_c - \overline{X}_d) + \Delta \overline{EI} \quad (5.16)$$

onde:

$$\Delta \overline{EI} = A_G e^{(B_G (E_L - 0,8))} \quad (6.17)$$

Quanto ao valor de X_c , deve ser tal que:

$$\bar{Q} = \frac{\bar{V}_b^2}{\bar{X}_c} = 0,4 \bar{N}_b \quad (5.18)$$

onde N_b e V_b são respectivamente potência e tensão nominal da máquina tomadas como valor base. Desta maneira, temos em pu

$$\frac{1}{\bar{X}_c} = 0,4 \quad \therefore \quad \bar{X}_c = 2,5 \text{ pu} \quad (5.19)$$

Em cada intervalo de tempo Δt , considerando-se E'_q e δ constantes e iguais aos valores determinados no intervalo anterior, a solução das equações de (5.12) a (5.19) permite calcular

$$I_d, E_t, E_L \text{ e } E_I$$

Em cada intervalo de tempo a solução das equações diferenciais do sistema de excitação determina o valor da tensão E_{fd} , induzida na máquina, proporcional à tensão aplicada ao campo da mesma. Com a expressão:

$$\frac{dE'_q}{dt} = \frac{1}{T'_{do}} (E_{fd} - E'I),$$

determina-se o valor de E'_q no final do intervalo.

5.2.2 - DETERMINAÇÃO DA RESPOSTA ASA

5.2.2.1 - DESCRIÇÃO DO TESTE

Uma característica desejável do sistema de excitação é um valor razoável da resposta ASA.

As condições iniciais para este teste serão obtidas considerando-se a máquina operando em vazio com excitação igual àquela que produz a tensão nominal, com carga nominal, e nos permitirá avaliar, em sistemas de excitação convencionais, a velocidade de resposta da excitatriz.

A partir das condições iniciais considera-se uma variação brusca na tensão de referência do regulador (50%), fazendo-se assim que seja atingido o teto ("ceiling") do amplificador (entrada da excitatriz). Desta forma determina-se a curva de tensão na excitatriz versus tempo, cujo aspecto é mostrado na figura 5.5.

(Ver FIG. 5.5 à página seguinte)

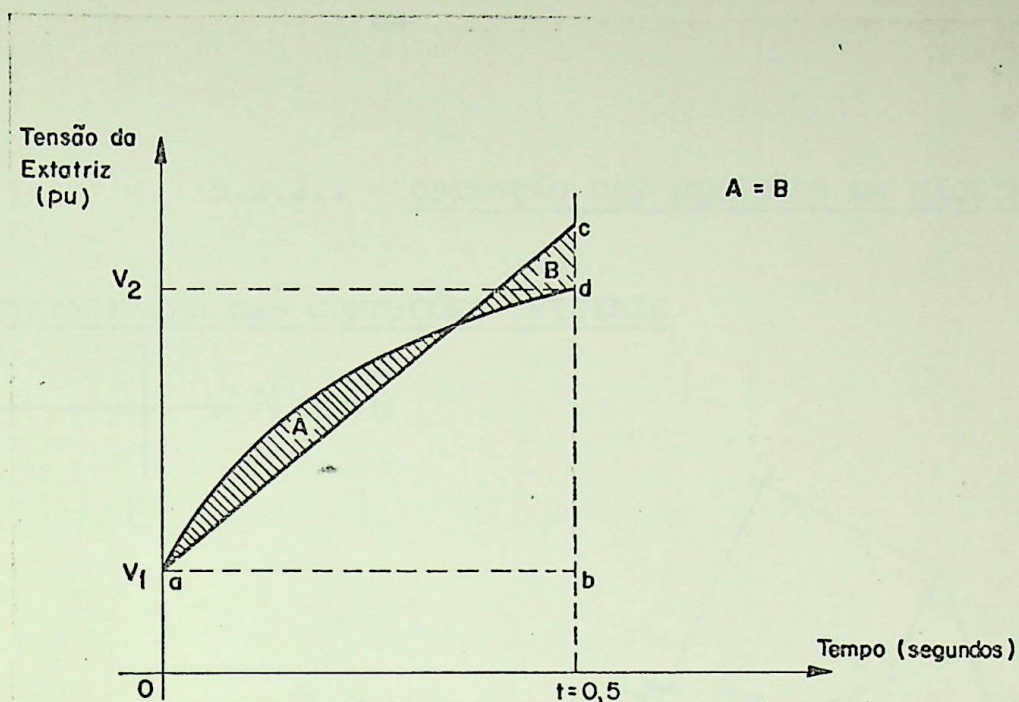


FIG. 5.5

onde: V_2 = tensão de teto ("ceiling") da excitatriz

V_1 = tensão nominal da excitatriz.

A partir do ponto a (correspondente à tensão de excitação nominal) traça-se uma reta, de modo que, a 0,5 segundos, as áreas A e B sejam iguais, o que significa a igualdade das áreas sob a curva e sob a reta no intervalo 0 - 0,5 segundos. A resposta ASA será então obtida dividindo-se a declividade da reta (pu/seg) pela tensão de excitação nominal (em pu).

Da figura temos:

- Inclinação da reta = $\frac{bc}{ab}$ (pu/seg).

- tensão de excitação nominal = V_1 (pu)

$$E_q \operatorname{sen} \delta = (X_q \cdot \cos \theta) I_t \quad (5.20)$$

$$E_q \cos \delta = E_t + I_t \cdot X_q \operatorname{sen} \theta \quad (5.21)$$

em pu:

$$\overline{E}_q \operatorname{sen} \delta = \overline{X}_q \cos \theta \quad (5.22)$$

$$\overline{E}_q \cos \delta = 1 + \overline{X}_q \operatorname{sen} \theta \quad (5.23)$$

Dividindo-se (5.22) por (5.23), temos:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\overline{X}_q \cos \theta}{1 + \overline{X}_q \operatorname{sen} \theta} \quad (5.24)$$

Do diagrama vetorial, temos:

$$E'_q = E_t \cos \delta + I_d X'_d \quad (5.25)$$

$$EI = E_t \cos \delta + I_d \cdot X_d \quad (5.26)$$

$$I_d = I_t \operatorname{sen} (\delta + \theta), \quad (5.27)$$

em pu:

$$\overline{E}'_q = \cos \delta + \overline{X}'_d \operatorname{sen} (\delta + \theta) \quad (5.28)$$

$$\overline{E}_L = \sqrt{\overline{X}_L^2 + 2 \overline{X}_L \cdot \operatorname{sen} \theta + 1} \quad (5.29)$$

$$\Delta \overline{EI} = A_G \cdot e^{\mathbf{B}_G (\overline{E}_L - 0,8)} \quad (5.30)$$

$$\overline{E_I} = \cos \delta + \overline{X_d} \operatorname{sen}(\delta + \theta) + \Delta \overline{E_I} \quad (5.31)$$

$$\overline{E}_{fd} = \overline{E_I} \quad (5.32)$$

Então, as condições iniciais serão:

$$\overline{E}_{fd} = \overline{E_I} \quad (5.33)$$

$$\overline{E}_t = \overline{E_I} \quad (5.34)$$

$$\overline{V}_{ref} = \overline{E}_t = \overline{E_I} \quad (5.35)$$

$$\delta = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{\overline{X_q} \cos \theta}{1 + \overline{X_q} \operatorname{sen} \theta} \right)$$

b) MÁQUINA EM VAZIO EM REGIME TRANSITÓRIO.

Em cada intervalo de tempo Δt , para E'_q e δ considerados constantes e iguais aos valores de terminados no intervalo anterior temos:

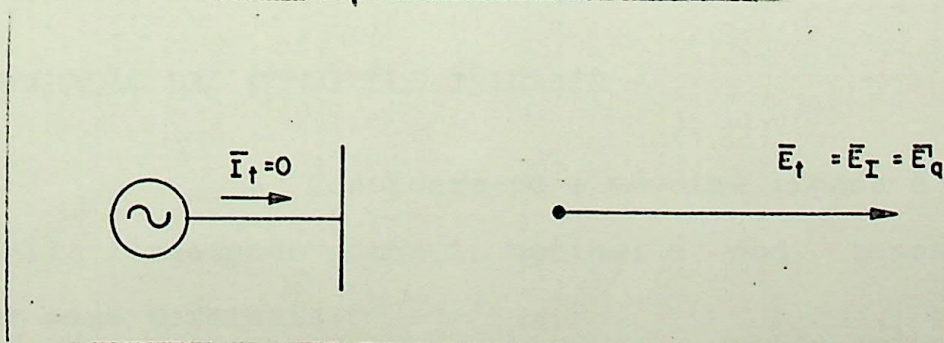


FIG. 5.7

$$\bar{E}_t = \bar{E}'_q$$

$$\bar{E}_I = \bar{E}'_q$$

$$\frac{dE'_q}{dt} = \frac{1}{T'_{do}} (E_{fd} - E_I) \quad (5.36)$$

E_{fd} será determinada em cada intervalo de tempo a partir das equações diferenciais do sistema de excitação.

5.2.3 - TESTE DE SENSIBILIDADE DO SISTEMA DE EXCITAÇÃO

5.2.3.1 - DESCRIÇÃO DO TESTE

Este ensaio visa verificar a sensibilidade do sistema de excitação, para pequenas perturbações, consistindo na variação da tensão de referência do regulador (em intervalos de tempo iguais a 2 segundos) de 100 a 102% , de 102 a 98% e de 98 a 100%, com a máquina a plena carga.

5.2.3.2 - OBTENÇÃO DAS EQUAÇÕES DA MÁQUINA

- DETERMINAÇÃO DAS CONDIÇÕES INICIAIS -

Considera-se a máquina ligada à barra infinita fornecendo potência nominal e com tensão nominal em seus terminais.

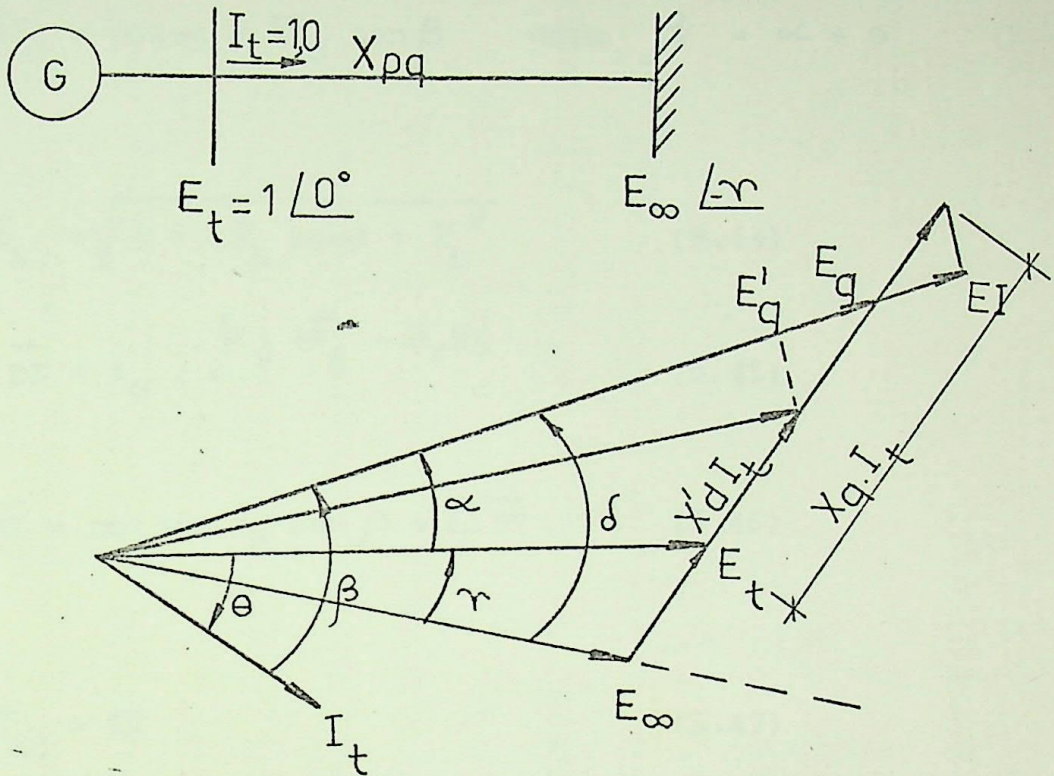


DIAGRAMA VETORIAL PARA ESTA CONDIÇÃO

FIG. 5.8

Do diagrama vetorial (figura 5.8), temos:

$$\overline{E}_\infty = 1 - j (\cos\theta - j \operatorname{sen}\theta) \overline{X}_{pq} \quad (5.37)$$

$$\overline{E}_\infty = 1 - (\operatorname{sen}\theta) \overline{X}_{pq} - (j \cos\theta) \overline{X}_{pq} \quad (5.38)$$

$$\therefore |E_\infty| = \sqrt{1 + \overline{X}_{pq}^2 - 2\overline{X}_{pq} \operatorname{sen}\theta} \quad (5.39)$$

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{\overline{X}_{pq} \cdot \cos\theta}{1 - \overline{X}_{pq} \operatorname{sen}\theta} \quad (5.40)$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\overline{X}_q \cos \theta}{1 + \overline{X}_q \operatorname{sen} \theta} \quad (5.41)$$

$$\overline{E}'_q = \cos \alpha + \overline{X}'_d \operatorname{sen} \beta \quad \text{onde } \beta = \alpha + \theta \quad (5.43)$$

$$\overline{E}_L = \sqrt{1 + 2\overline{X}_L \operatorname{sen} \theta + \overline{X}_L^2} \quad (5.44)$$

$$\Delta \overline{EI} = A_G \cdot e^{B_G (\overline{E}_L - 0,8)} \quad (5.45)$$

$$\overline{EI} = \cos \alpha + \overline{X}_d \operatorname{sen} \beta + \Delta \overline{EI} \quad (5.46)$$

$$\overline{E}_{fd} = \overline{EI} \quad (5.47)$$

$$\delta = \gamma + \alpha \quad (5.48)$$

Então as condições iniciais serão:

$$\overline{V}_{\text{ref}} = \overline{E}_t = 1,0 \text{ pu} \quad (5.49)$$

$$\delta_o = \delta_{\text{calculado}}$$

$$\overline{E}_{fd_o} = \overline{E}_{fd_{\text{calculado}}}$$

$$EI_o = EI_{\text{calculado}}$$

$$\omega_o = 376,9911 \text{ rad/seg.}$$

b) MÁQUINA EM REGIME TRANSITÓRIO

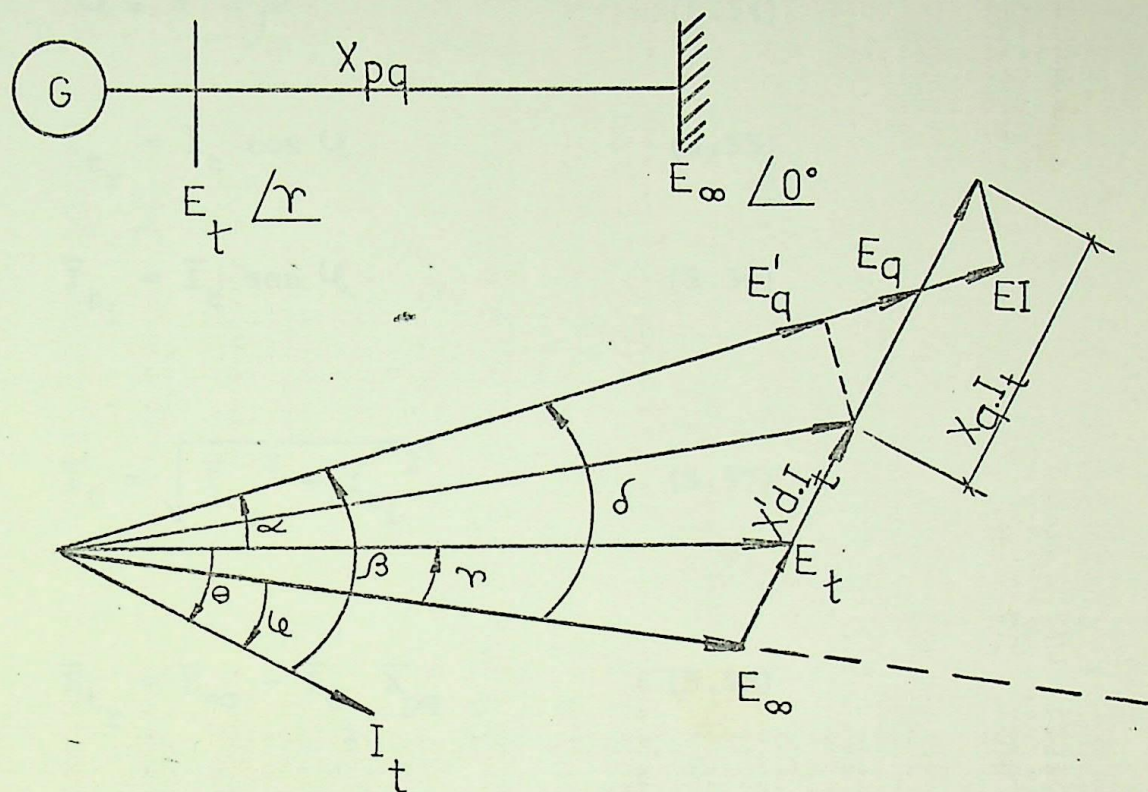


DIAGRAMA VETORIAL DA MÁQUINA EM REGIME TRANSITÓRIO

FIG. 5.9

Do diagrama vetorial (FIG.5.9) podemos escrever:

$$\bar{E}_\infty = \bar{E}_\infty \angle 0^\circ \quad (5.50)$$

$$\bar{I}_d = \frac{\bar{E}'_q - \bar{E}_\infty \cos \delta}{\bar{X}_{pq} + \bar{X}'_d} \quad (5.51)$$

$$\bar{I}_q = \frac{\bar{E}_\infty \cdot \text{sen } \delta}{\bar{X}_{pq} + \bar{X}'_q} \quad (5.52)$$

$$\beta = \operatorname{arctg} \left(\frac{\bar{I}_d}{\bar{I}_q} \right) \quad (5.53)$$

$$\varrho = \delta - \beta \quad (5.54)$$

$$\bar{I}_{t_r} = \bar{I}_t \cos \varrho \quad (5.55)$$

$$\bar{I}_{t_i} = \bar{I}_t \operatorname{sen} \varrho \quad (5.56)$$

$$\bar{I}_t = \sqrt{\bar{I}_{t_r}^2 + \bar{I}_{t_i}^2} \quad (5.57)$$

$$\bar{E}_{t_r} = \bar{E}_\infty - \bar{I}_{t_i} \bar{X}_{pq} \quad (5.58)$$

$$\bar{E}_{t_i} = \bar{I}_{t_r} \bar{X}_{pq} \quad (5.59)$$

$$\bar{E}_t = \sqrt{\bar{E}_{t_r}^2 + \bar{E}_{t_i}^2} \quad (5.60)$$

$$\bar{E}L_r = \bar{E}_\infty - \bar{I}_{t_i} (\bar{X}_{pq} + \bar{X}L) \quad (5.61)$$

$$\bar{E}L_i = \bar{I}_{t_r} (\bar{X}_{pq} + \bar{X}L) \quad (5.62)$$

$$\bar{E}L = \sqrt{\bar{E}L_r^2 + \bar{E}L_i^2} \quad (5.63)$$

$$\bar{E}I = \bar{E}_\infty \cos \delta + \bar{I}_d (\bar{X}_d + \bar{X}_{pq}) + A_G \cdot e^{B_G (\bar{E}L - 0, 8)} \quad (5.64)$$

$$\bar{E}_q = \bar{E}_\infty \cos \delta + \bar{I}_d (\bar{X}_q + \bar{X}_{pq}) \quad (5.65)$$

Temos ainda que:

$$\frac{d \bar{E}_q}{dt} = \frac{1}{T'_{do}} (\bar{E}_{fd} - \bar{E}_I) \quad (5.66)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = w - 2\pi f \quad (5.67)$$

$$\frac{dw}{dt} = \frac{2\pi f}{2H} \cdot \bar{P}_a \quad (5.68)$$

$$\bar{P}_e = \bar{E}_q \cdot \bar{I}_q \quad (5.69)$$

$$\bar{P}_m = \cos \theta \quad (5.70)$$

$$\bar{P}_a = \bar{P}_m - \bar{P}_e \quad (5.71)$$

5.2.4 - TESTE DE ESTABILIDADE TRANSITÓRIA

5.2.4.1 - DESCRIÇÃO DO TESTE

O objetivo é verificar a eficiência do sistema de excitação quando solicitado a intervir em consequência de bruscas perturbações no sistema elétrico.

Com a máquina ligada a uma barra infinita através de duas linhas de transmissão e operando aproximadamente na potência nominal com fator de potência nominal, um curto-circuito trifásico é aplicado no lado de alta do transformador elevador, por um período de 100 milisegundos (6 ciclos), seguido da retirada da falta (abertura permanen-

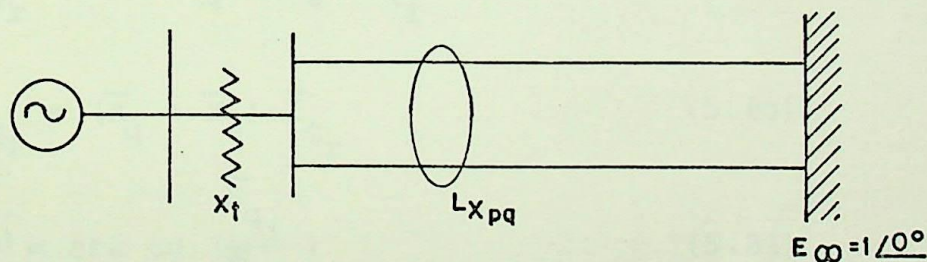
te de um circuito).

Deve-se processar este ensaio com e sem o regulador, a fim de se aquilatar o efeito do mesmo no amortecimento das oscilações.

4.2.4.2 - OBTENÇÃO DAS EQUACÕES DA MÁQUINA

a) CONDIÇÕES INICIAIS

Considera-se a máquina ligada à barra infinita através de um transformador e duas linhas em paralelo (FIG. 5.10), fornecendo potência ativa nominal com fator de potência nominal.



$$X_e = X_{pq} + X'_t$$

FIG. 5.10

$$\bar{E}_{t_r}^2 - \bar{E}_{t_r} - (\bar{Q}\bar{X}_e - \bar{P}^2 \bar{X}_e^2) = 0 \quad (5.72)$$

$$\bar{E}_t = \sqrt{\bar{E}_{t_i}^2 + \bar{E}_{t_r}^2} \quad (5.73)$$

onde: $\bar{E}_{t_i} = \bar{P} \bar{X}_e$

$$\gamma = \text{arc tg } \frac{\bar{E}_{t_i}}{\bar{E}_{t_r}} \quad (5.74)$$

$$\bar{I}_{t_r} = \frac{\bar{E}_{t_i}}{\bar{X}_e} \quad (5.75)$$

$$\bar{I}_{t_i} = \frac{1 - \bar{E}_{t_r}}{\bar{X}_e} \quad (5.76)$$

$$\bar{I}_t = \sqrt{\bar{I}_{t_r}^2 + \bar{I}_{t_i}^2} \quad (5.77)$$

$$\varphi = \text{arc tg } \left(\frac{\bar{I}_{t_i}}{\bar{I}_{t_r}} \right) \quad (5.78)$$

$$\bar{E}_{q_r} = 1 - (\bar{X}_q + \bar{X}_e) \bar{I}_{t_i} \quad (5.79)$$

$$\bar{E}_{q_i} = (\bar{X}_q + \bar{X}_e) \bar{I}_{t_r} \quad (5.80)$$

$$\delta = \text{arc tg } \left(\frac{\bar{E}_{q_i}}{\bar{E}_{q_r}} \right) \quad (5.81)$$

$$\beta = \delta - \varphi \quad (5.82)$$

$$\bar{I}_d = \bar{I}_t \text{ sen } \beta \quad (5.83)$$

$$\bar{E}'_q = \cos \delta + (\bar{X}'_d + \bar{X}_e) \bar{I}_d \quad (5.84)$$

$$\bar{E}L_r = 1 - (\bar{X}_e + \bar{X}L) \bar{I}_{t_i} \quad (5.85)$$

$$\bar{E}L_i = (\bar{X}_e + \bar{X}L) \bar{I}_{t_r} \quad (5.86)$$

$$\overline{EL} = \sqrt{\overline{EL}_r^2 + \overline{EL}_i^2} \quad (5.87)$$

$$\Delta \overline{EI} = \overline{A}_G \cdot e^{\left(\overline{B}_G (\overline{EL} - 0,8) \right)} \quad (5.88)$$

$$\overline{EI} = \cos \delta + \overline{I}_d (\overline{X}_d + \overline{X}_e) + \Delta \overline{EI} \quad (5.89)$$

$$\overline{E}_{fd} = \overline{EI} \quad (5.90)$$

Então, as condições iniciais serão:

$$\overline{EI}_0 = \overline{EI}_{\text{calculado}}$$

$$\overline{E}'_{q_0} = \overline{E}'_{q_{\text{calculado}}}$$

$$\overline{V}_{\text{ref}} = \overline{E}_{t_0} = \overline{E}_{t_{\text{calculado}}}$$

$$\overline{E}_{fd_0} = \overline{EI}_0$$

$$\delta_0 = \delta_{\text{calculado}}$$

$$\omega_0 = 376,9911 \text{ rad/seg.}$$

b) MÁQUINA EM REGIME TRANSITÓRIO

Curto-circuito na barra de alta, com duração de 6 ciclos (100 milissegundos), seguido da abertura permanente de um circuito.

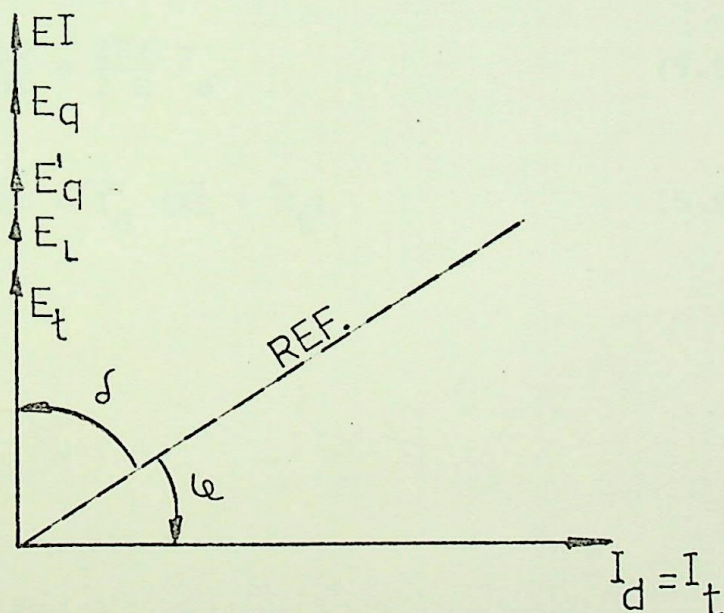
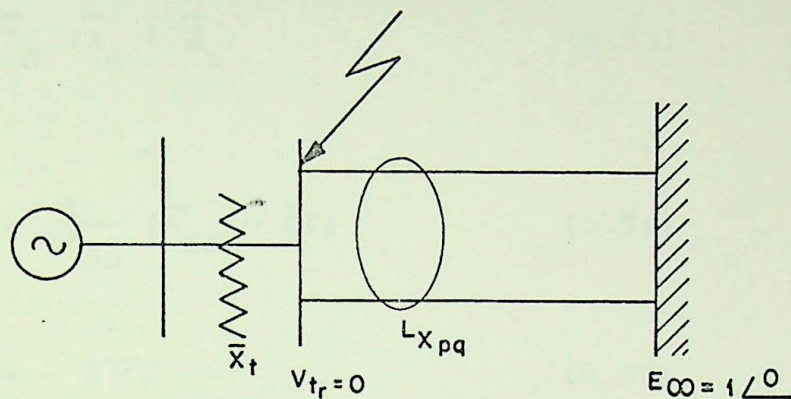


DIAGRAMA VETORIAL

FIG. 5.11

Em cada intervalo Δt , temos: (FIG

5.11).

$$\bar{P}_m = \cos \theta$$

$$\bar{P}_e = 0,15 \bar{P}_m \quad (\text{perdas na armadura})$$

$$\bar{P}_a = 0,85 \bar{P}_m$$

$$\bar{I}_d = \frac{\bar{E}'_q}{\bar{X}'_d + \bar{X}_t} \quad (5.91)$$

$$\bar{E}_t = \bar{I}_d \cdot \bar{X}_t \quad (5.92)$$

$$\bar{E}I = \bar{I}_d (\bar{X}_d + \bar{X}_t) \quad (5.93)$$

$$\frac{d\bar{E}'_q}{d\tau} = \frac{1}{T'_{do}} (\bar{E}_{fd} - \bar{E}I) \quad (5.94)$$

$$\frac{d\delta}{d\tau} = w - 2\pi f \quad (5.95)$$

$$\frac{dw}{d\tau} = \frac{2\pi f}{2H} \bar{P}_a \quad (5.96)$$

$$\bar{E}L = \bar{I}_d (\bar{X}_L + \bar{X}_t) \quad (5.97)$$

c) REGIME TRANSITÓRIO APÓS A ELIMINAÇÃO DO CURTO-CIRCUITO

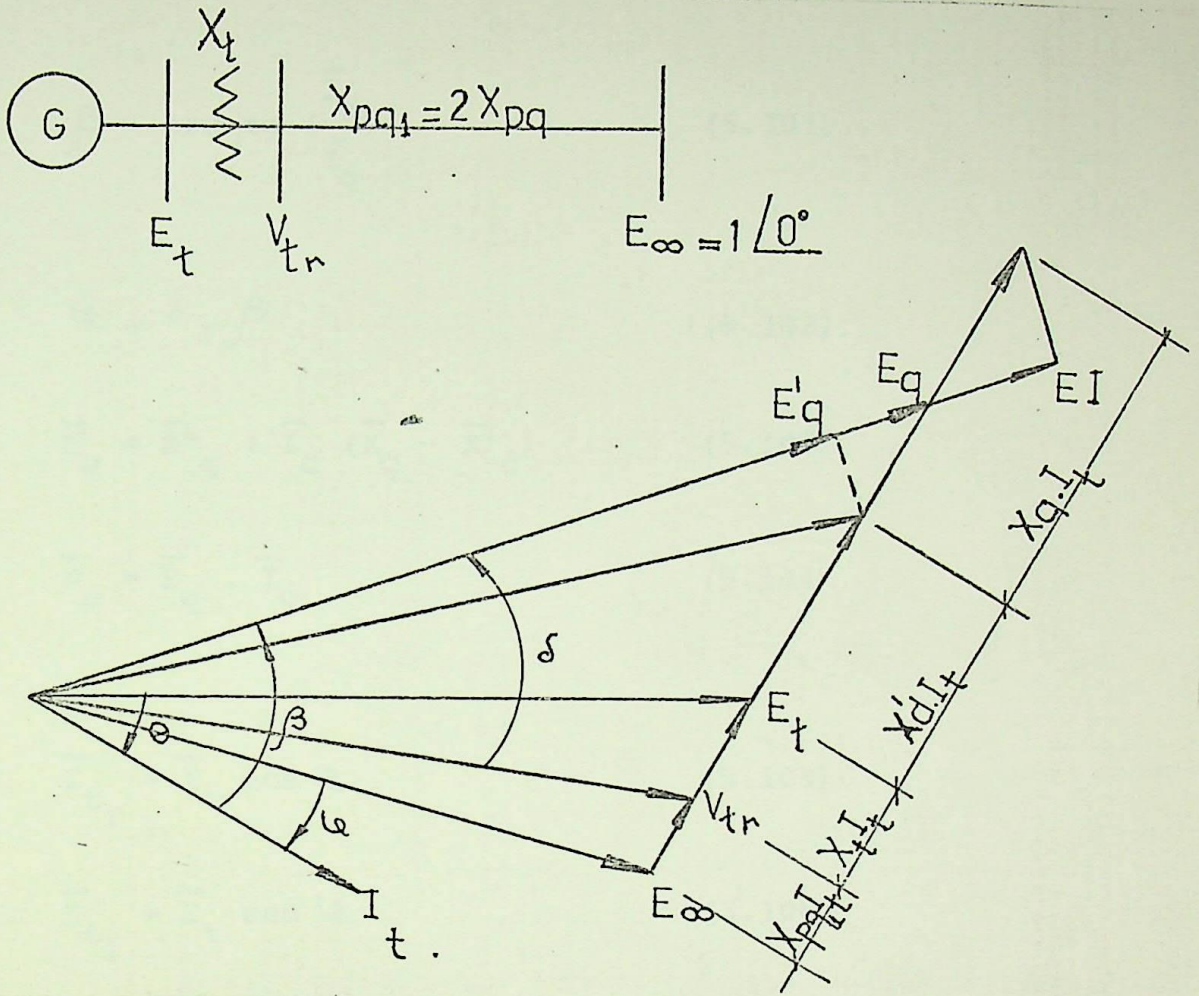


FIG. 5.12

Do diagrama vetorial (FIG.5.12) podemos escrever:

$$\bar{P}_m = \cos \theta$$

$$\bar{X}_e = \bar{X}_t + 2\bar{X}_{pq}$$

$$\bar{I}_d = \frac{\bar{E}'_q - \cos \delta}{\bar{X}_e + \bar{X}'_d} \quad (5.98)$$

$$\bar{I}_q = \frac{\text{sen} \delta}{\bar{X}_e + \bar{X}_q} \quad (5.99)$$

$$\bar{I}_t = \sqrt{\bar{I}_d^2 + \bar{I}_q^2} \quad (5.100)$$

$$\beta = \text{arc tg} \left(\frac{\bar{I}_d}{\bar{I}_q} \right) \quad (5.101)$$

$$\varrho = \delta - \beta \quad (5.102)$$

$$\bar{E}_q = \bar{E}'_q + \bar{I}_d (\bar{X}_q - \bar{X}'_d) \quad (5.103)$$

$$\bar{P}_e = \bar{E}_q \cdot \bar{I}_q \quad (5.104)$$

$$\bar{I}_{t_r} = \bar{I}_t \cos \varrho \quad (5.105)$$

$$\bar{I}_{t_i} = \bar{I}_t \text{sen} \varrho \quad (5.106)$$

$$\bar{I}_t = \sqrt{\bar{I}_{t_r}^2 + \bar{I}_{t_i}^2} \quad (5.107)$$

$$\bar{E}_{t_r} = 1 - \bar{I}_{t_i} \cdot \bar{X}_e \quad (5.108)$$

$$\bar{E}_{t_i} = \bar{I}_{t_r} \cdot \bar{X}_e \quad (5.109)$$

$$\bar{E}_t = \sqrt{\bar{E}_{t_r}^2 + \bar{E}_{t_i}^2} \quad (5.110)$$

$$\overline{EL}_r = 1 - \overline{I}_{t_i} (\overline{X}_e + \overline{XL}) \quad (5.111)$$

$$\overline{EL}_i = \overline{I}_{t_r} (\overline{X}_e + \overline{XL}) \quad (5.112)$$

$$\overline{EI} = \cos \delta + \overline{I}_d (\overline{X}_d + \overline{X}_e) + \Delta \overline{EI} \quad (5.113)$$

Temos ainda que:

$$\frac{d\overline{E}'_q}{dt} = \frac{1}{T'_{do}} (\overline{E}_{fd} - \overline{E}'_q) \quad (5.114)$$

$$\overline{P}_a = \overline{P}_m - \overline{P}_e \quad (5.115)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - 2\pi f \quad (5.116)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{2\pi f}{2H} \cdot P_a \quad (5.117)$$

6 - APLICACÃO

6 - APLICAÇÃO

6.1 - SISTEMA DE EXCITAÇÃO UTILIZADO

Veremos agora a aplicação destes testes ao sistema de excitação, cujo diagrama de bloco é mostrado abaixo (sistema de excitação da máquina de Passo-Fundo).

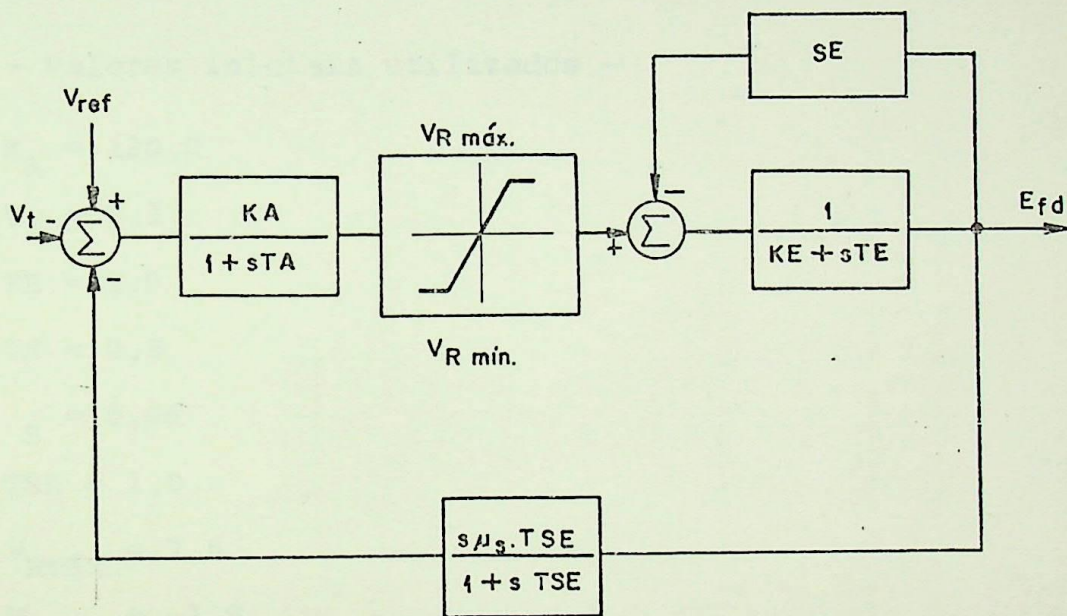


FIG. 6.0.

Os dados da máquina ao qual o regulador está aplicado são os seguintes:

Potência nominal - 130 MVA

Potência ativa - 110 MW

Constante de inércia - 427 seg

Reatância síncrona de eixo direto - 0,87 pu

Reatância transitória de eixo direto - 0,26 pu

Reatância subtransitória de eixo direto - 0,21 pu

Reatância síncrona de eixo em quadratura - 0,62 pu

Constante de tempo a circuito aberto - 3,64 seg.

Neste trabalho tomando-se como partida os valores abaixo listados, variamo-los, a fim de verificar a sua influência, na resposta do teste de carga capacitiva e no teste de sensibilidade.

Para estes ajustes foi também aplicado o teste de estabilidade transitória.

- Valores iniciais utilizados -

$$K_A = 120,0$$

$$T_A = 0,1$$

$$K_E = 1,0$$

$$T_E = 0,8$$

$$S = 0,06$$

$$T_{SE} = 1,0$$

$$V_{Rm\acute{a}x} = 7,6$$

$$V_{Rm\grave{i}n} = -1,9$$

Foi também determinado o valor da RESPOSTA ASA.

6.2 - RESULTADOS OBTIDOS

6.2.1 - TESTE DE CARGA CAPACITIVA

As Figuras 6.1, 6.2, 6.3, 6.4 e 6.5, apresentam os resultados obtidos variando-se os parâmetros, S , K_A , T_A , T_E e K_E .

Das curvas observamos:

- quando se reduziu o ganho do amplificador, tivemos um maior undershoot e um maior erro em regime permanente.

- quando se aumentou o ganho do amplificador, não se observou melhora substancial.
- que a malha estabilizadora tem atuação decisiva no comportamento do conjunto sistema de excitação - máquina diante de tais situações. Um baixo valor do ganho da malha estabilizadora provoca um comportamento oscilatório da tensão terminal da máquina, enquanto que um alto valor deste ganho atrasará o sinal da realimentação, ocasionando um retardo de tempo na resposta.
- que, quanto maior a constante de tempo do amplificador, maior será a oscilação verificada na tensão terminal.

Embora não tenhamos meios físicos de variar o valor de T_E e K_E , processaram-se alguns casos variando-os, a fim de aquilatar os efeitos destes parâmetros (que dependem basicamente dos aspectos construtivos na excitatriz). Verificamos que uma excitatriz que apresente uma alta constante de tempo prejudica em muito o comportamento da máquina. O valor de K_E não tem grande influência.

6.2.2 - DETERMINAÇÃO DA RESPOSTA ASA

A FIG. 6.6 nos mostra como variou a tensão E_{fd} com o tempo.

Da listagem do programa, obteve-se o valor da resposta ASA: $3,30 \text{ s}^{-1}$.

6.2.3 - TESTE DE SENSIBILIDADE DO SISTEMA DE EXCITAÇÃO

As figuras 6.7, 6.8, 6.9 e 6.10 apresentam os resultados obtidos variando-se K_A , T_A , μ_S e TSE.

Das curvas, observamos:

- que, quanto menor o ganho do amplificador, mais tempo demorará o sistema de excitação a responder às variações de tensão.
- que a malha estabilizadora tem grande influência no comportamento da tensão terminal nestas circunstâncias. Um pequeno valor do ganho da malha estabilizadora conduzirá a uma grande oscilação da tensão terminal, enquanto um alto valor deste ganho, embora não conduza a oscilações, introduz um retardo na resposta do sistema de excitação.
- que a variação da constante de tempo do amplificador não apresentou sensíveis variações nas respostas obtidas.
- que a variação de TSE (que influencia tanto no ganho como na constante de tempo da malha estabilizadora) conduz a um afastamento em relação à resposta esperada de um sistema de excitação bem ajustado.

6.2.4 - TESTE DE ESTABILIDADE TRANSITÓRIA

A FIG. 6.11 nos mostra os resultados obtidos. Observa-se que não há praticamente amortecimento positivo das oscilações, o que poderá ser obtido através de uma análise paramétrica.

Entretanto, se isto não foi obtido, deveremos utilizar sinais adicionais no regulador de tensão para melhorarmos o comportamento da máquina e assegurarmos um amortecimento positivo das oscilações.

Estes sinais adicionais poderão ser provenientes de grandezas elétricas ou mecânicas. A escolha da grandeza a ser utilizada bem como a função de transferência à qual será submetida foge ao escopo deste trabalho.

7 - CONCLUSÕES

7 - CONCLUSÕES

7.1 - Este trabalho poderá ainda ser refinado, considerando-se uma melhor representação da máquina síncrona, na qual se considere os efeitos dos enrolamentos a mortecedores.

7.2 - Não foi nosso objetivo o desenvolvimento de testes no domínio de frequência. Estes entretanto, são fundamentais para estudar-se os efeitos dos sinais adicionais, bem como para o seu ajuste relativo. Cabe aqui a sugestão para a continuação deste trabalho, com o desenvolvimento destes testes no domínio da frequência.

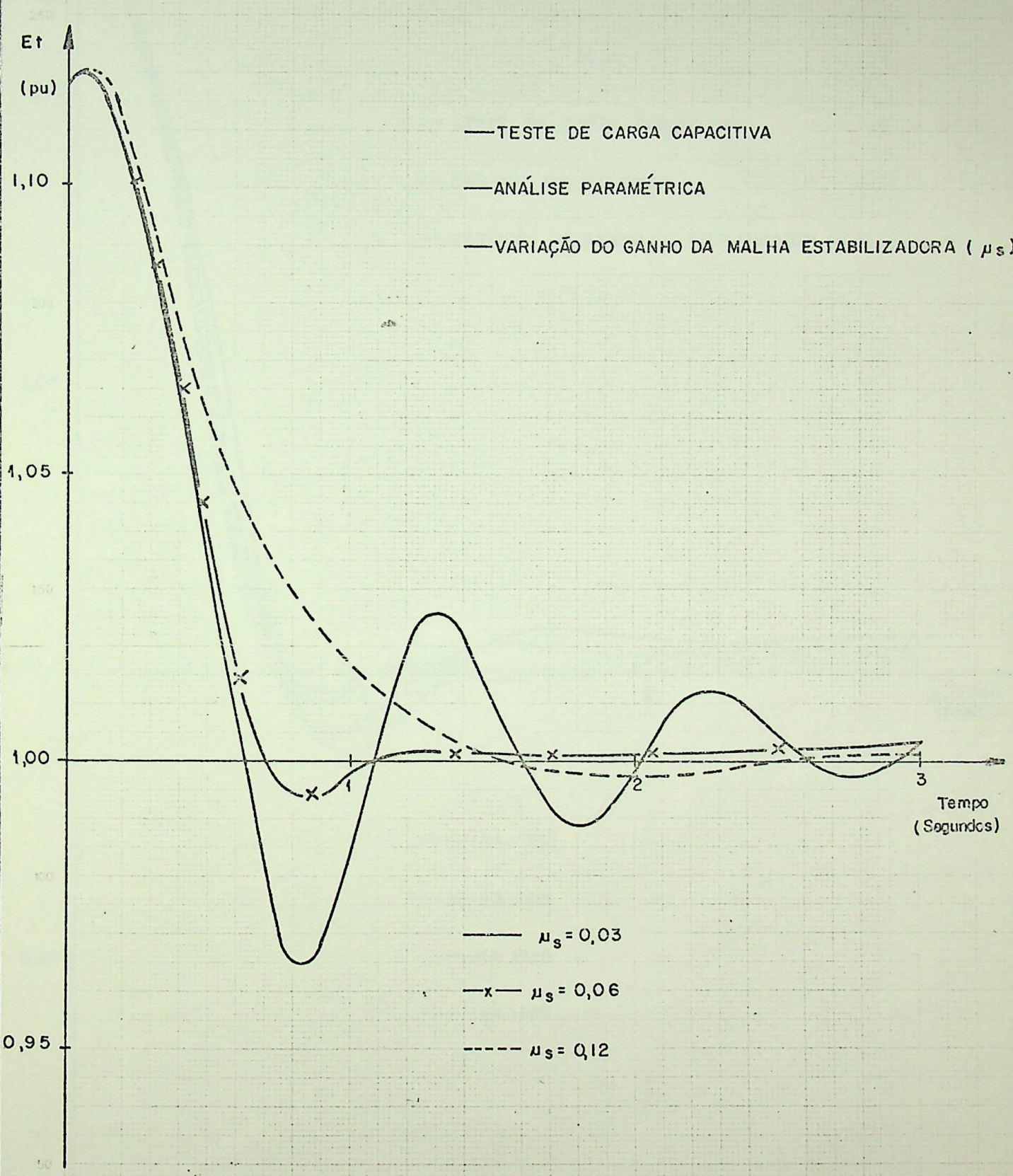


FIGURA 6.1

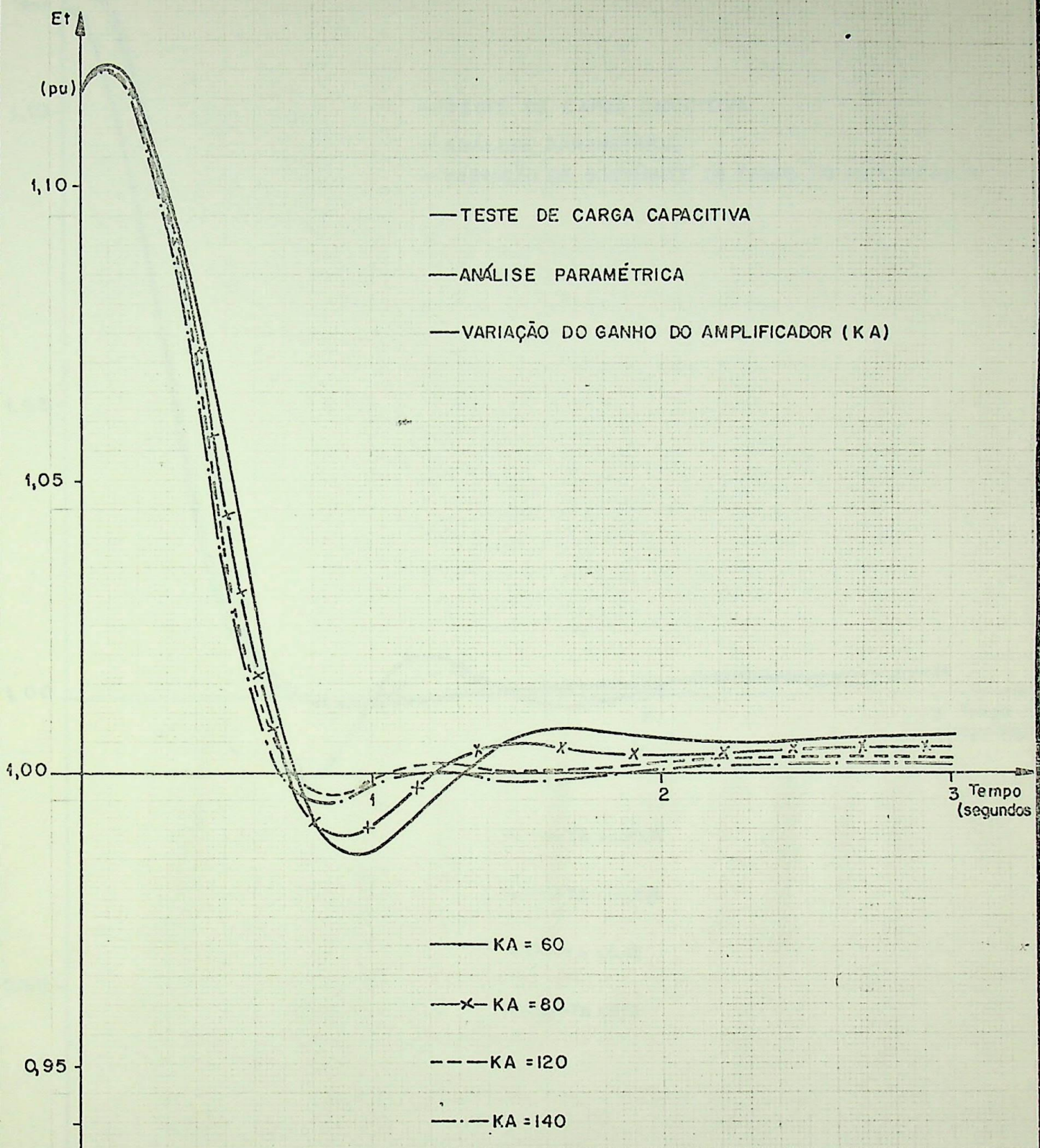


FIGURA 6.2

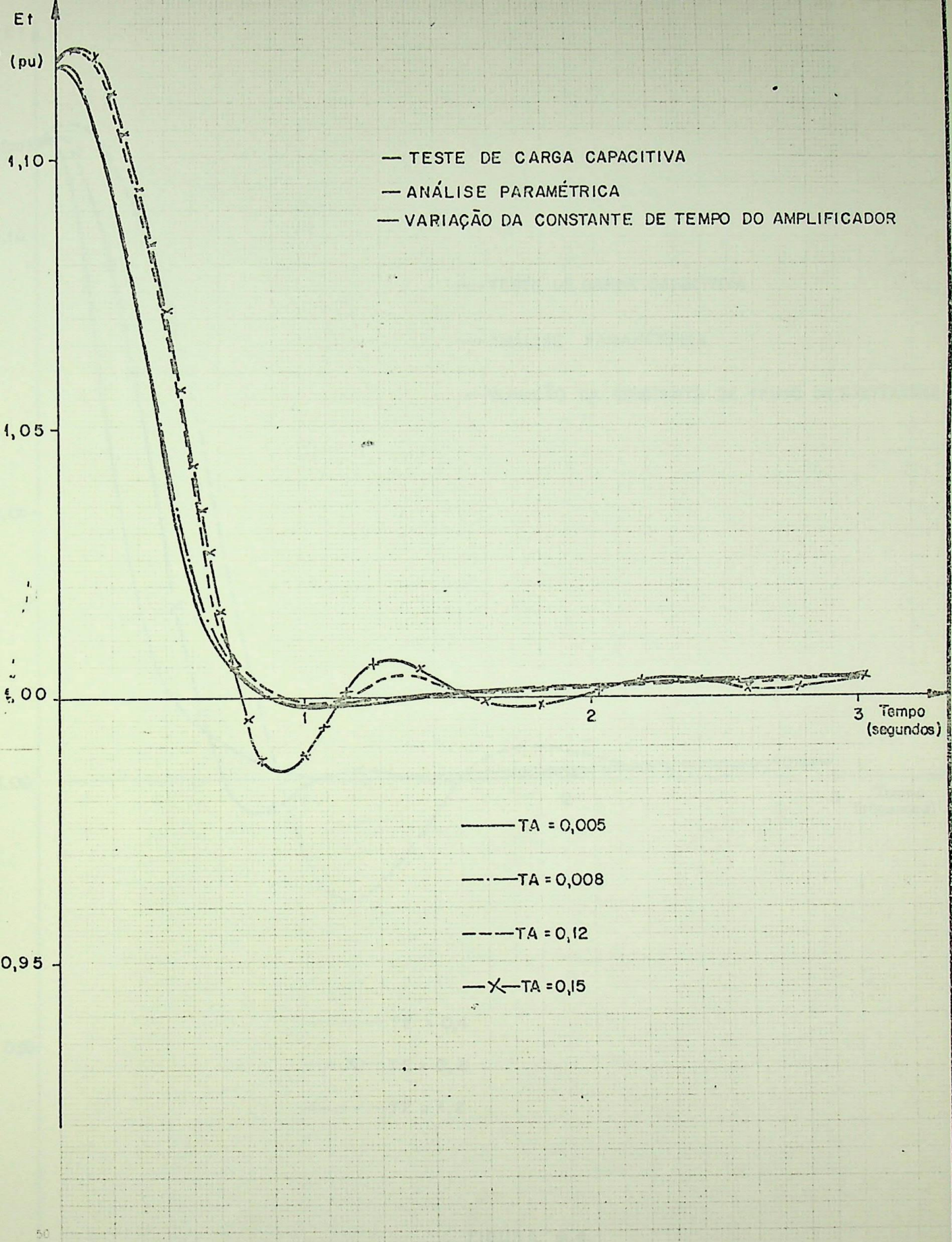


FIGURA 6.3

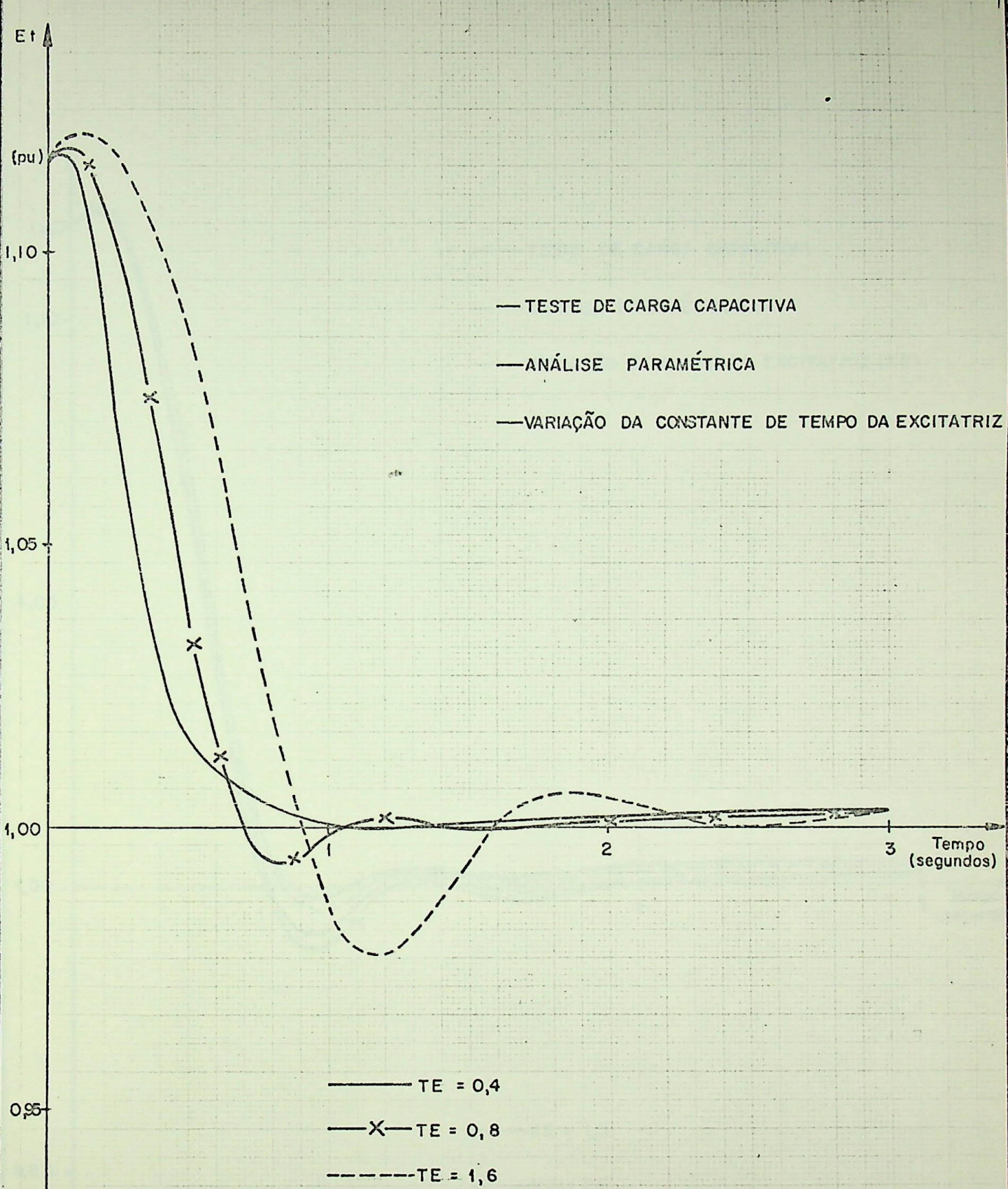


FIGURA 6.4

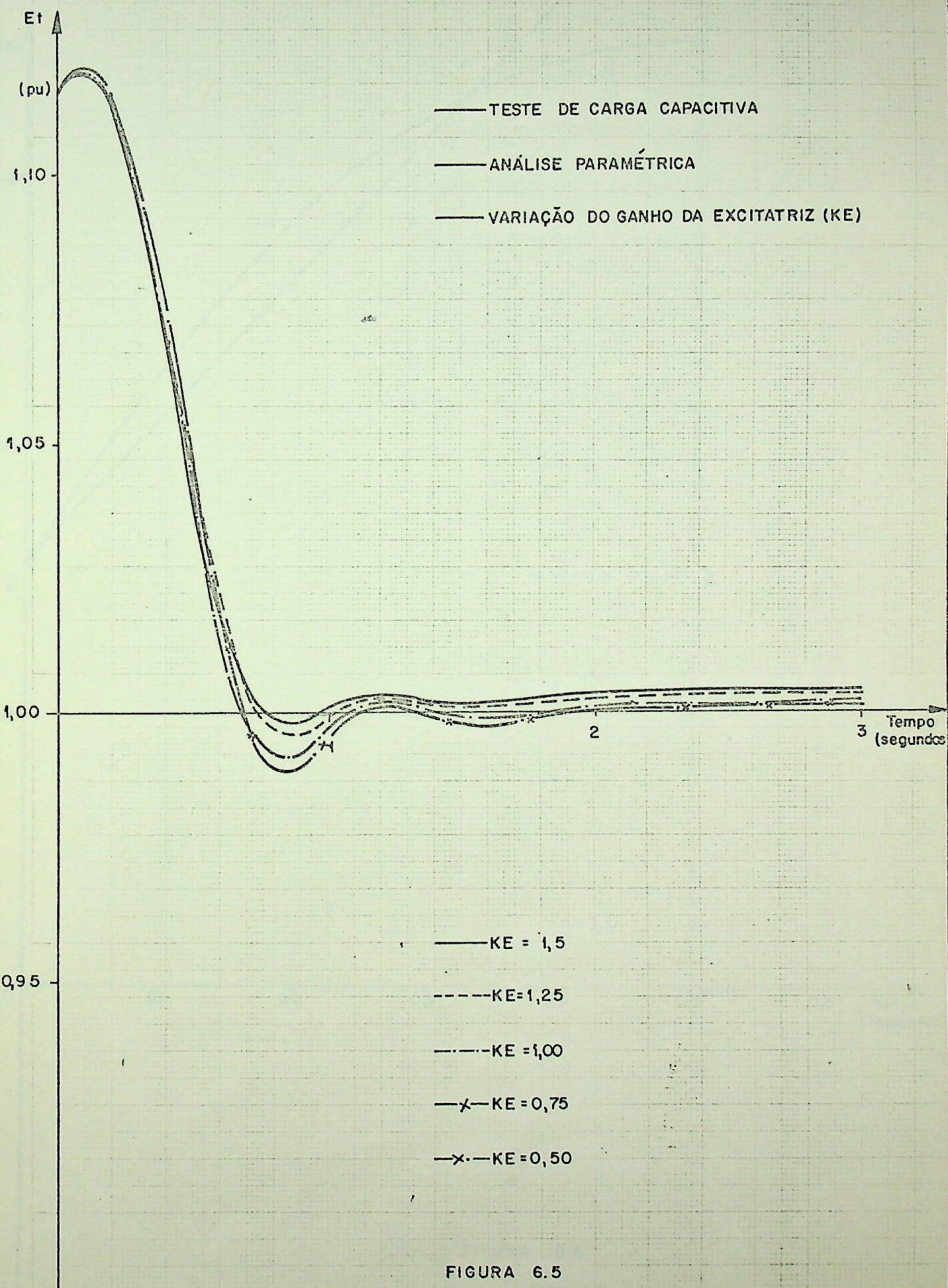


FIGURA 6.5

DETERMINAÇÃO DA RESPOSTA ASA

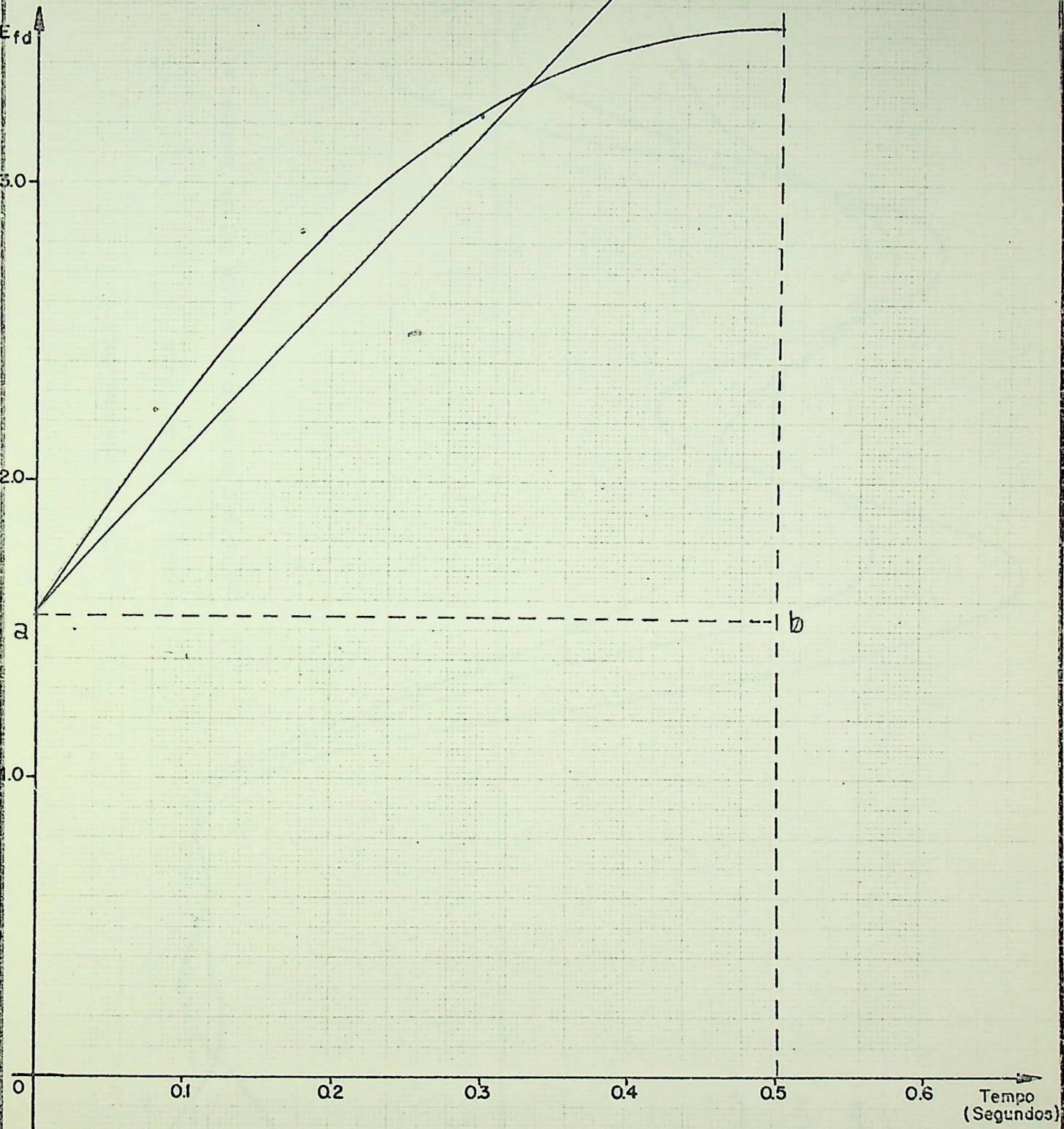


FIGURA 6.6

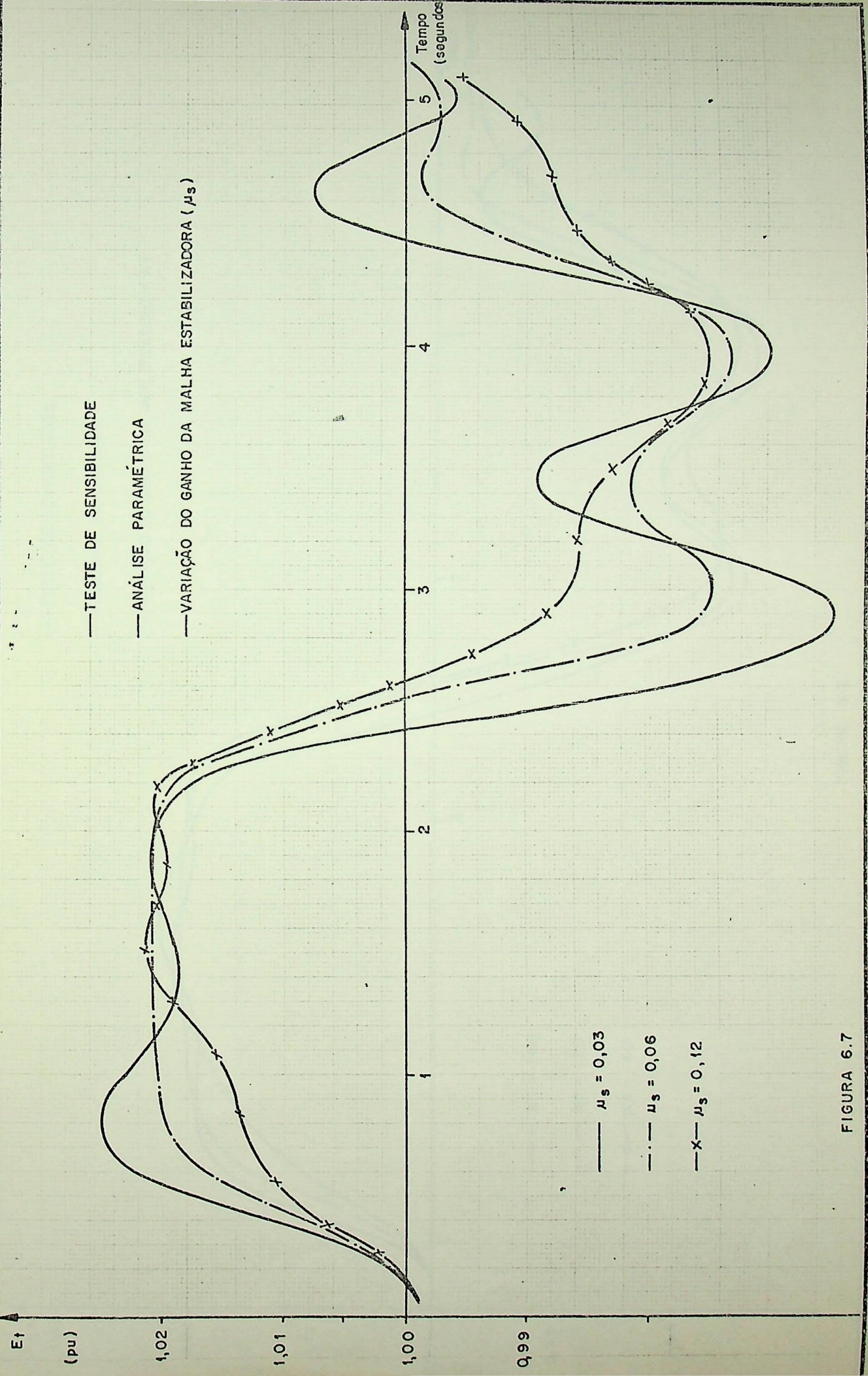
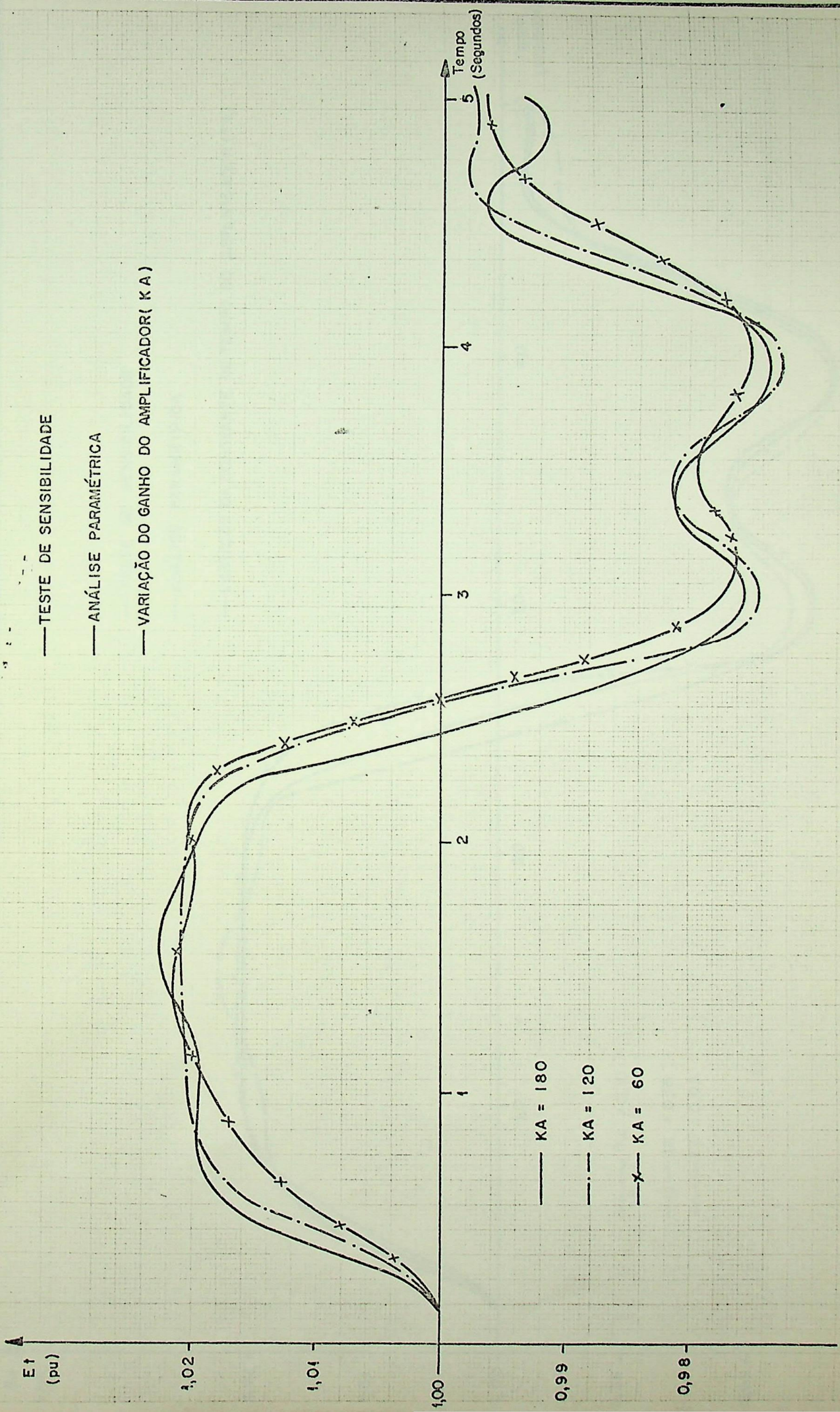


FIGURA 6.7



— TESTE DE SENSIBILIDADE

— ANÁLISE PARAMÉTRICA

— VARIACÃO DO GANHO DO AMPLIFICADOR (K A)

— KA = 180

— KA = 120

— X — KA = 60

FIGURA 6.8

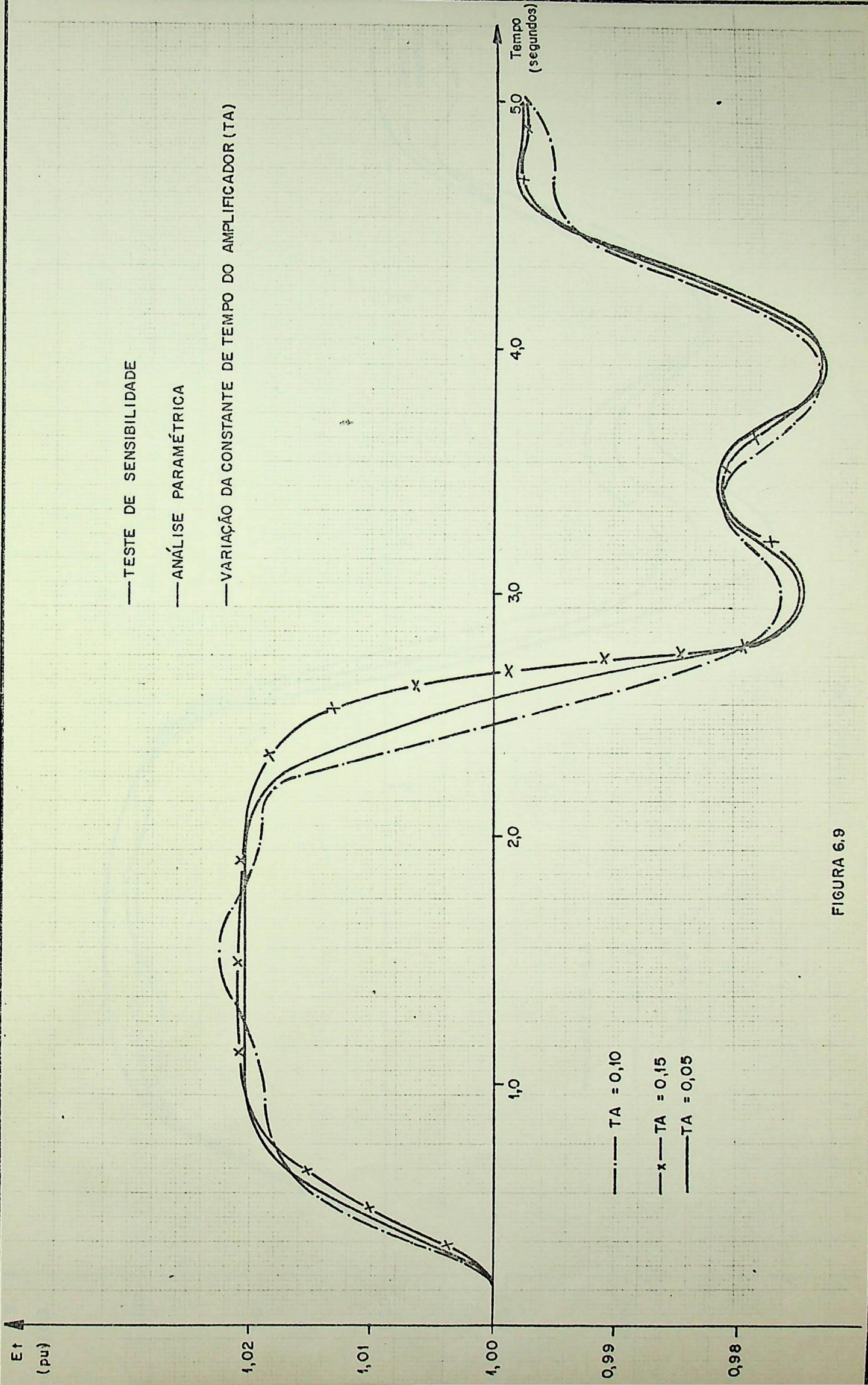


FIGURA 6.9

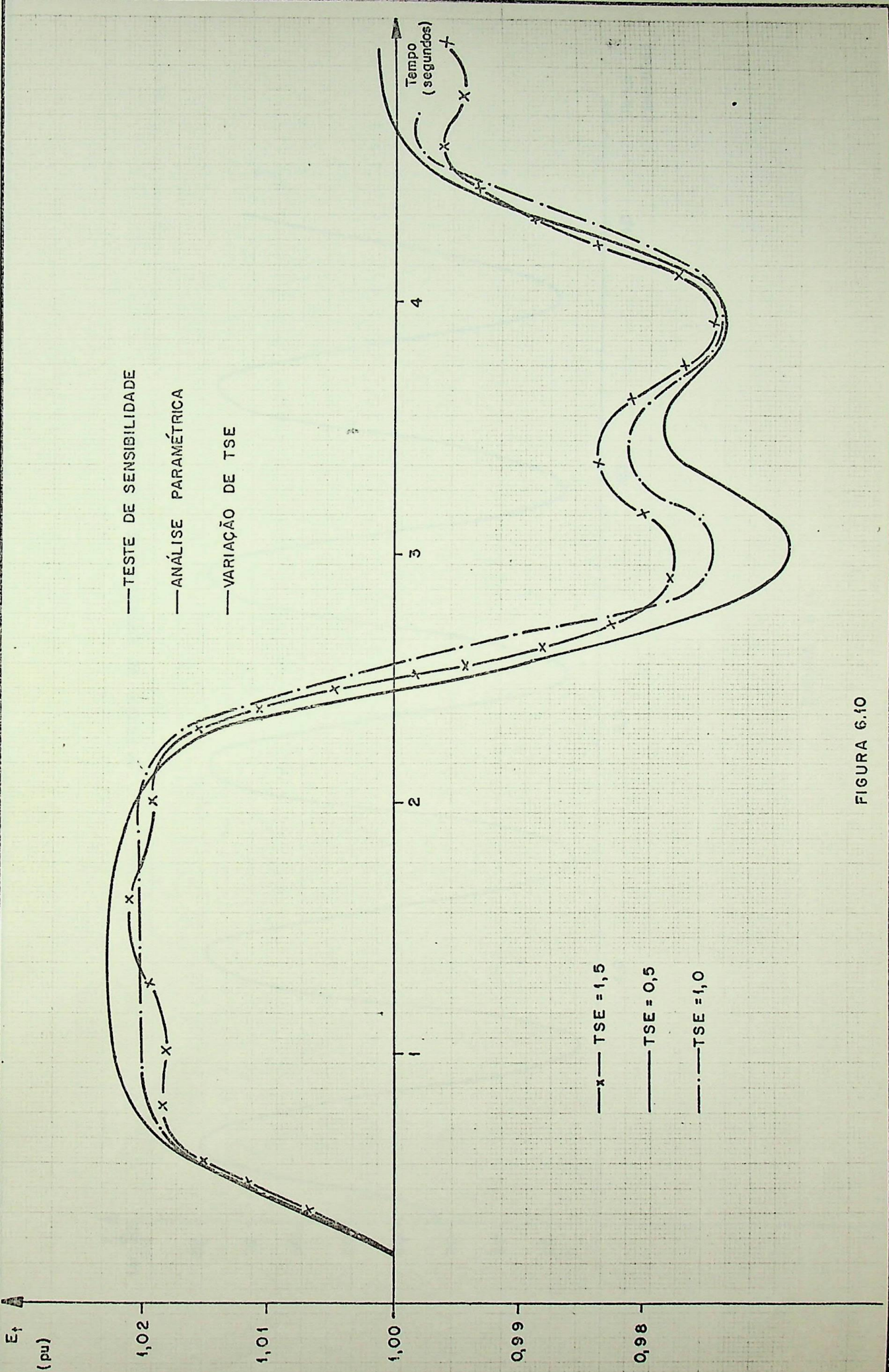


FIGURA 6.10

--- TESTE DE ESTABILIDADE TRANSITÓRIA

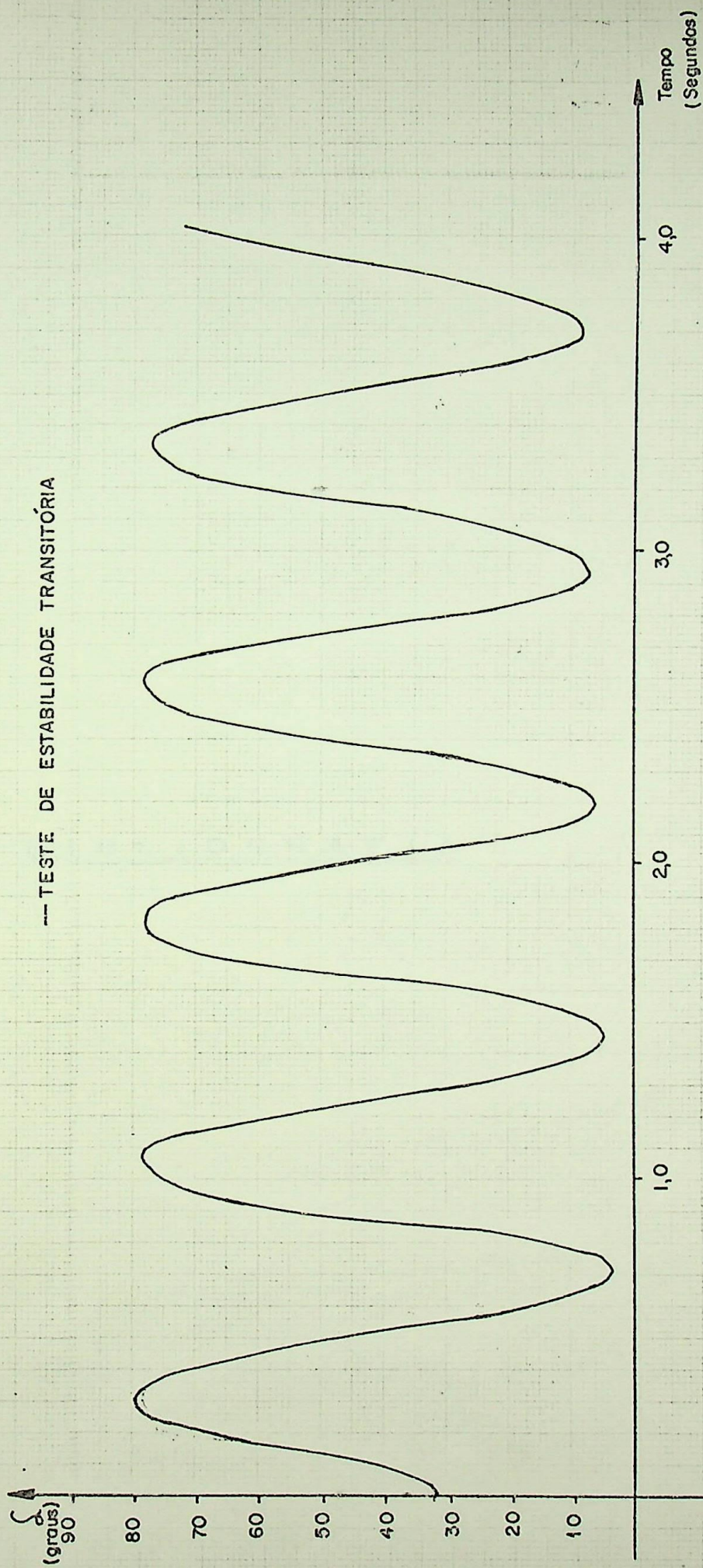


FIGURA 6.11

8 - BIBLIOGRAFIA

8 - BIBLIOGRAFIALIVROS

- EDWARD W. KIMBARD - Power System Stability: Synchronous Machines - Dover Publications Inc., New York, 1968.
- OLLE ELGERD - Electric Energy Systems Theory: An Introduction
Tata McGraw-Hill Publishing Company, Ltd.
1975.
- B.M. WEEDY - Sistemas Elétricos de Potência - Editora da
Universidade de São Paulo, 1973.
- CRARY - Power System Stability - Volumes I e II - General
Electric Series, 1962.
- STEVENSON - Elements of Power Systems Analysis - McGraw-Hill
Book Company, Inc. Second Edition.
- PATERSON - Electric Power System - Volumes I e II. Electronic
and Electrical Engineering Texts: 2 e 8
- FITZGERALD, KINGSLEY and KUSKO - Electric Machinery - Third
Edition McGraw-Hill Book Company, 1971.
- D.O'KELLY and SIMMONS - Introduction to Generalized Electrical
Machine Theory - McGraw-Hill Publishing
Company Limited

- THALER, WILCOX - Electric Machines: Dynamics and Steady State
Wiley International Edition, 1966.

- CHENG - Analysis of Linear Systems - Addison-Wesley Publishing
Company, Inc. 1972.

- DORF - Modern Control Systems - Addison-Wesley Publishing
Company - Reading, Massachusetts - USA, 1967

PUBLICAÇÕES ("PAPERS")

- CONCORDIA, TEMOSHOK - "Generator Excitation Systems and Power System Performance" IEEE Summer Power Meeting, Portland, Oregon July 9-14 1967.

- IEEE COMMITTEE REPORT - "Excitation System Dynamic Characteristics", Trans. Power App. Syst. Jan/Feb. 1973.

- P.T.I. - "Text Procedure for Measurement of Excitation System Characteristics".

- IEEE COMMITTEE REPORT - "Computer Representation of Excitation Systems", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS 87, No. 6 June, 1968, pp.1460 - 1464

- SCHLEIF - "Excitation System Modeling" - Bureau of Reclamation.

- GIBBARD, KANN - "Identification of Excitation System Parameters", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-94, No.4, July/August, 1975.

- BYERLY - "Power System Stability - Effects of Control, System Performance - Westinghouse Electric Corp. East Pittsburgh Pennsylvania.

- IEEE COMMITTEE REPORT - "Proposed Excitation System Definitions for Synchronous Machines" IEEE Winter Power Meeting, New York, N.Y., January 26-31, 1969.

- BROWN, DE MELO, HARRY LENFEST and R.J. MILLS - "Effects of Excitation , Turbine Energy Control and Transmission on Transient Stability. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems , Vol. PAS-89, No. 6, 1247 - 1253 , July/August , 1970.

- YOUNG - "Modern Concepts of Power System Dynamics - The Synchronous Machine" - General Electric Company, Schenectady, N.Y.

- YOUNG - "The Art and Science of Dynamic Stability Analysis" ASME - IEEE Joint Power Generation Conference, San Francisco, Calif. September 15-19/1968.

- ANCELO VIAN - Conferência no Seminário sobre Estabilidade em Sistemas Elétricos de Potência - Florianópolis - 26/11/73 a 01/12/73.

MINIMUM
9.8634E-01

ET VERSUS TIME

MAX
1.121

E	ET	I
	1.1161E+00	=====+
OCE=02	1.1176E+00	=====+
OCE=02	1.1191E+00	=====+
OCE=02	1.1202E+00	=====+
OCE=02	1.1208E+00	=====+
OCE=01	1.1210E+00	=====+
OCE=01	1.1207E+00	=====+
OCE=01	1.1200E+00	=====+
OCE=01	1.1188E+00	=====+
OCE=01	1.1173E+00	=====+
OCE=01	1.1153E+00	=====+
OCE=01	1.1130E+00	=====+
OCE=01	1.1104E+00	=====+
OCE=01	1.1073E+00	=====+
OCE=01	1.1040E+00	=====+
OCE=01	1.1003E+00	=====+
OCE=01	1.0963E+00	=====+
OCE=01	1.0920E+00	=====+
OCE=01	1.0874E+00	=====+
OCE=01	1.0826E+00	=====+
OCE=01	1.0776E+00	=====+
OCE=01	1.0725E+00	=====+
OCE=01	1.0672E+00	=====+
OCE=01	1.0619E+00	=====+
OCE=01	1.0565E+00	=====+
OCE=01	1.0511E+00	=====+
OCE=01	1.0458E+00	=====+
OCE=01	1.0406E+00	=====+
OCE=01	1.0355E+00	=====+
OCE=01	1.0306E+00	=====+
OCE=01	1.0258E+00	=====+
OCE=01	1.0213E+00	=====+
OCE=01	1.0170E+00	=====+
OCE=01	1.0129E+00	=====+
OCE=01	1.0092E+00	=====+
OCE=01	1.0057E+00	=====+
OCE=01	1.0025E+00	=====+
OCE=01	9.9964E-01	=====+
OCE=01	9.9706E-01	=====+
OCE=01	9.9477E-01	=====+
OCE=01	9.9279E-01	=====+
OCE=01	9.9109E-01	=====+
OCE=01	9.8967E-01	=====+
OCE=01	9.8853E-01	=====+
OCE=01	9.8764E-01	=====+
OCE=01	9.8699E-01	=====+
OCE=01	9.8657E-01	=====+
OCE=01	9.8636E-01	=====+
OCE=01	9.8635E-01	=====+
OCE=01	9.8652E-01	=====+
OCE+00	9.8685E-01	=====+

MINIMUM
9.8634E=01

ET VERSUS TIME

MAX
1.1210

E	ET	I
0 CE+00	9.8732E=01	+
0 CE+00	9.8791E=01	+
0 CE+00	9.8862E=01	+
0 CE+00	9.8941E=01	=+
0 CE+00	9.9028E=01	=+
0 CE+00	9.9121E=01	=+
0 CE+00	9.9219E=01	=+ +
0 CE+00	9.9319E=01	=+ +
0 CE+00	9.9422E=01	=+ +
0 CE+00	9.9525E=01	=+ + +
0 CE+00	9.9628E=01	=+ + +
0 CF+00	9.9729E=01	=+ + + +
0 CE+00	9.9828E=01	=+ + + +
0 CE+00	9.9925E=01	=+ + + +
0 CE+00	1.0002E+00	=+ + + + +
0 CE+00	1.0011E+00	=+ + + + +
0 CF+00	1.0019E+00	=+ + + + +
0 CE+00	1.0027E+00	=+ + + + + +
0 CE+00	1.0034E+00	=+ + + + + +
0 CF+00	1.0041E+00	=+ + + + + +
0 CE+00	1.0047E+00	=+ + + + + +
0 CF+00	1.0053E+00	=+ + + + + + +
0 CE+00	1.0058E+00	=+ + + + + + +
0 CE+00	1.0062E+00	=+ + + + + + +
0 CE+00	1.0066E+00	=+ + + + + + +
0 CE+00	1.0069E+00	=+ + + + + + +
0 CE+00	1.0072E+00	=+ + + + + + +
0 CE+00	1.0075E+00	=+ + + + + + +
0 CE+00	1.0077E+00	=+ + + + + + +
0 CE+00	1.0078E+00	=+ + + + + + +
0 CE+00	1.0079E+00	=+ + + + + + + +
0 CE+00	1.0080E+00	=+ + + + + + + +
0 CE+00	1.0080E+00	=+ + + + + + + +
0 CE+00	1.0080E+00	=+ + + + + + + +
0 CE+00	1.0080E+00	=+ + + + + + + +
0 CE+00	1.0079E+00	=+ + + + + + + +
0 CE+00	1.0079E+00	=+ + + + + + + +
0 CE+00	1.0078E+00	=+ + + + + + + +
0 CE+00	1.0077E+00	=+ + + + + + + +
0 CE+00	1.0076E+00	=+ + + + + + + +
0 CE+00	1.0074E+00	=+ + + + + + + +
0 CE+00	1.0073E+00	=+ + + + + + + +
0 CE+00	1.0072E+00	=+ + + + + + + +
0 CE+00	1.0070E+00	=+ + + + + + + +
0 CE+00	1.0069E+00	=+ + + + + + + +
0 CE+00	1.0067E+00	=+ + + + + + + +
0 CE+00	1.0066E+00	=+ + + + + + + +
0 CE+00	1.0065E+00	=+ + + + + + + +
0 CE+00	1.0064E+00	=+ + + + + + + +
0 CE+00	1.0062E+00	=+ + + + + + + +
0 CE+00	1.0061E+00	=+ + + + + + + +

	MINIMUM	ET	VERSUS TIME	MAXIMUM
	9.8634E-01			1.1210E
	ET	I		I
CE+00	1.0060E+00	=====+		
CE+00	1.0060E+00	=====+		
CE+00	1.0059E+00	=====+		
CE+00	1.0058E+00	=====+		
CE+00	1.0057E+00	=====+		
CE+00	1.0057E+00	=====+		
CE+00	1.0057E+00	=====+		
CE+00	1.0056E+00	=====+		
CE+00	1.0056E+00	=====+		
CE+00	1.0056E+00	=====+		
CE+00	1.0056E+00	=====+		
CE+00	1.0056E+00	=====+		
CE+00	1.0056E+00	=====+		
CE+00	1.0056E+00	=====+		
CE+00	1.0056E+00	=====+		
CE+00	1.0057E+00	=====+		
CE+00	1.0057E+00	=====+		
CE+00	1.0057E+00	=====+		
CE+00	1.0058E+00	=====+		
CE+00	1.0058E+00	=====+		
CE+00	1.0059E+00	=====+		
CE+00	1.0059E+00	=====+		
CE+00	1.0060E+00	=====+		
CE+00	1.0060E+00	=====+		
CE+00	1.0061E+00	=====+		
CE+00	1.0061E+00	=====+		
CE+00	1.0062E+00	=====+		
CE+00	1.0062E+00	=====+		
CE+00	1.0063E+00	=====+		
CE+00	1.0064E+00	=====+		
CE+00	1.0064E+00	=====+		
CE+00	1.0065E+00	=====+		
CE+00	1.0065E+00	=====+		
CE+00	1.0065E+00	=====+		
CE+00	1.0066E+00	=====+		
CE+00	1.0066E+00	=====+		
CE+00	1.0067E+00	=====+		
CE+00	1.0067E+00	=====+		
CE+00	1.0067E+00	=====+		
CE+00	1.0068E+00	=====+		
CE+00	1.0068E+00	=====+		
CE+00	1.0068E+00	=====+		
CE+00	1.0068E+00	=====+		
CE+00	1.0069E+00	=====+		
CE+00	1.0069E+00	=====+		
CE+00	1.0069E+00	=====+		
CE+00	1.0069E+00	=====+		
CE+00	1.0069E+00	=====+		
CE+00	1.0069E+00	=====+		
CE+00	1.0070E+00	=====+		

CONTINUOUS SYSTEM MODELING PROGRAM

PROBLEM INPUT STATEMENTS

```

TITLE  TESTE DE SISTEMAS DE EXCITACAO
TITLE  DETERMINACAO RESPOSTA ASA-PAULO GOMES
TITLE  USINA DE PASSO FUNDO
INITIAL
  DELTA=ATAN((XQ*COS(TETA))/(1+XQ*SIN(TETA)))
  CIELQ=COS(TETA)+XLD*SIN(DELTA+TETA)
  CIEI=COS(TETA)+XD*SIN(DELTA+TETA)
  CIEFD=CIEI
  EAO=CIEFD*KE+AEX*EXP(BEX*CIEFD)
*
  DADOS DA MAQUINA
CONSTANT H=4.270,XD=0.87,XQ=.620,XLD=.260,TLDO=3.64,TETA=0.56207
*
  DADOS DO SISTEMA DE EXCITACAO
CONSTANT AEX=0.124,BEX=0.965,...
  KE=1.0,TE=0.8,TA=0.1,KA=120,TSE=1.0,XMUS=0.06,...
  VAMAX=7.600,VAMIN=-1.900
*
  DADOS DO SISTEMA
CONSTANT XPQ=0.315,XC=2.5
*
  CONDICOES INICIAIS
CONSTANT CIEST=0
DYNAMIC
  ET=ELQ
  ELQX=(EFD-EI)/TLDO
  ELQ=INTGRL(CIELQ,ELQX)
  EI=ELQ
*
  EQUACOES DO REGULADOR DE TENSAO
  EFDPT=(EFDX-EFD)/PEFD
  ES=AEX*EXP(BEX*EFD)
  EFDX=(EA-ES)/KE
  EFD=REALPL(CIEFD,PEFD,EFDX)
  PEFD=TE/KE
  VREF=1+0.5*STEP(0)
  EAX=(VREF-ET-EST+EAO/KA)*KA
  EA=REALPL(EAC,TA,EAX)
  ESTX=XMUS*TSE*EFDPT
  EST=REALPL(CIEST,TSE,ESTX)
NOSORT
IF(EA.GT.VAMAX)EA=VAMAX
IF(EA.LT.VAMIN)EA=VAMIN
PRTPLT ET,EST,EA,EFD,VREF
PRINT ELQ,EI,ET,EST,EA,EFD,VREF
TIMER FINTIM=1.0,OUTDEL=0.02,DELT=0.005
METHOD RKSF
END
STOP

```

VARIABLE SEQUENCE

CIELQ	CIEI	CIEFD	EAO	EI	ELQX	ELQ	PEFD	ES
ZZ0003	EFD	ET	VREF	EAX	ZZ0005	EA	EFDPT	ESTX
7 EST	EA	EA						

UTS	INPUTS	PARAMS	INTEGS	MEM	BLKS	FORTRAN	DATA	CDS
00)	76(1400)	22(400)	4+	0=	4(300)	25(600)		14

ENDJOB

CONTINUOUS SYSTEM MODELING PROGRAM

PROBLEM INPUT STATEMENTS

```

TITLE  TESTE DE SISTEMAS DE EXCITACAO
TITLE  TESTE DE SENSIBILIDADE NO REGULADOR DE TENSAO
TITLE  MAQTESTE
MACRO  VREF=REF(VR1,VR2,VR3)
PROCEDURAL
  IF(TIME.LT.0.1)VREF=VR1
  IF(TIME.GE.0.1.AND.TIME.LT.2.1)VREF=VR2
  IF(TIME.GE.2.1.AND.TIME.LT.4.1)VREF=VR3
  IF(TIME.GE.4.1)VREF=VR1
ENDMAC
INITIAL
  EAO=CIEFD*KE+AEX*EXP(BEX*CIEFD)
  EINF=SQRT(1+XPQ*XPQ-2*XPQ*SIN(TETA))
  ALF=ATAN((XQ*COS(TETA))/(1+XQ*SIN(TETA)))
  ABETA=ALF+TETA
  CIELO=COS(ALF)+XLD*SIN(ABETA)
  CIEI=COS(ALF)+XD*SIN(ABETA)
  CIEFD=CIEI
  QCI=ATAN(COS(TETA)*XPQ)/(1-XPQ*SIN(TETA))
  CIDELT=QCI+ALF
*      DADOS DA MAQUINA
CONSTANT H=4.270,XD=0.87,XQ=0.62,XLD=0.26,TLDO=3.64
CONSTANT TETA=0.5556
*      DADOS DO SISTEMA DE EXCITACAO
CONSTANT AEX=0.124,BEX=0.965,...
  KE=1.0,TE=0.8,TA=.10,KA=60.,TSE=1.0,XMUS=0.06,...
  VAMAX=7.600,VAMIN=-1.900
*      DADOS DO SISTEMA
CONSTANT XPQ=0.429,XT=0,PM=0.85
*      CONDICAOES INICIAIS
CONSTANT CIOMEG=376.9911,CIEST=0
DYNAMIC
*      EQUACOES DA MAQUINA
  ID=(ELO-EINF*COS(DELTA))/(XPQ+XLD)
  IQ=(EINF*SIN(DELTA))/(XPQ+XQ)
  BETA=ATAN(ID/IQ)
  PHI=DELTA-BETA
  ITREAL=IT*COS(PHI)
  ITMAG=IT*SIN(PHI)
  IT=SQRT(ID*ID+IQ*IQ)
  ETREAL=EINF-ITMAG*XPQ
  ETIMAG=ITREAL*XPQ
  ET=SQRT(ETREAL*ETREAL+ETIMAG*ETIMAG)
  EI=EINF*COS(DELTA)+ID*(XD+XPQ)
  EQ=ELO+(XQ-XLD)*ID
  PE=EQ*IQ
  PA=PM-PE
  DELTAG=57.29578*DELTA
  DELTAX=OMEGA=376.9911
  OMEGAX=376.9911*PA/(2.0*H)
  DELTA=INTGRL(CIDELT,DELTAX)
  OMEGA=INTGRL(CIOMEG,OMEGAX)
  ELQX=(EFD-EI)/TLDO
  ELQ=INTGRL(CIELQ,ELQX)
*      EQUACOES DO REGULADOR DE TENSAO
  EFDPT=(EFDX-EFD)/PEFD
  ES=AEX*EXP(BEX*EFD)

```

```

EFDX=(EA-ES)/KE
EFD=REALPL(CIEFD,PEFD,EFDX)
PEFD=TE/KE
VREF=REF(.0,1.02,0.98)
EAX=(VREF-ET-EST+EA0/KA)*KA
EA=REALPL(EA0,TA,EAX)
ESTX=XMUS*TSE*EFDPT
EST=REALPL(CIEST,TSE,ESTX)

```

```

NDSORT
IF(EA.GT.VAMAX)EA=VAMAX
IF(EA.LT.VAMIN)EA=VAMIN
PRTPLT ET,EST,EA,EFD,VREF
PRINT ELO,EI,ET,EST,EA,EFD,VREF
TIMER FINTIM=5.5,OUTDEL=0.02,DELT=0.0005
METHOD RKSFX
END
STOP

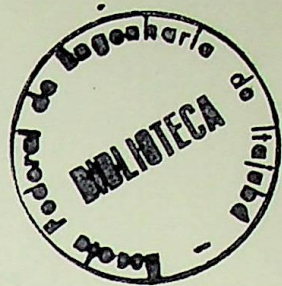
```

UT	VARIABLE	SEQUENCE							
	ABETA	CIEI	CIEFD	EAO	EINF	CIELQ	QCI	CIDELT	DELTAX
AR	IQ	ID	EQ	PE	PA	OMEGAX	OMEGA	EI	ELQX
	PFFD	ES	EFDX	ZZ0005	EFD	BETA	PHI	IT	ITREAL
AG	ITMAG	ETREAL	ET	VREF	EAX	ZZ0007	EA	EFDPT	ESTX
09	EST	DELTA	EA	EA					

PUTS	INPUTS	PARAMS	INTEGS	+	MEM	BLKS	FORTRAN	DATA	CDS
500)	132(1400)	24(400)	6+	0=	6(300)		49(600)		15

ENDJOB

	MINIMUM	EFD	VERSUS TIME	MAX
	1.5475E+00			3.594
E	EFD	I		
	1.5475E+00	+		
00E-02	1.6605E+00	--+		
00E-02	1.8273E+00	-----+		
00E-02	1.9858E+00	-----+ +		
00E-02	2.1360E+00	-----+ +		
00E-01	2.2778E+00	-----+ +		
00E-01	2.4111E+00	-----+ +		
00E-01	2.5359E+00	-----+ +		
00E-01	2.6521E+00	-----+ +		
00E-01	2.7598E+00	-----+ +		
00E-01	2.8592E+00	-----+ +		
00E-01	2.9503E+00	-----+ +		
00E-01	3.0335E+00	-----+ +		
00E-01	3.1089E+00	-----+ +		
00E-01	3.1769E+00	-----+ +		
00E-01	3.2379E+00	-----+ +		
00E-01	3.2923E+00	-----+ +		
00E-01	3.3405E+00	-----+ +		
00E-01	3.3829E+00	-----+ +		
00E-01	3.4200E+00	-----+ +		
00E-01	3.4522E+00	-----+ +		
00E-01	3.4800E+00	-----+ +		
00E-01	3.5038E+00	-----+ +		
00E-01	3.5239E+00	-----+ +		
00E-01	3.5408E+00	-----+ +		
00E-01	3.5548E+00	-----+ +		
00E-01	3.5662E+00	-----+ +		
00E-01	3.5753E+00	-----+ +		
00E-01	3.5823E+00	-----+ +		
00E-01	3.5875E+00	-----+ +		
00E-01	3.5912E+00	-----+ +		
00E-01	3.5934E+00	-----+ +		
00E-01	3.5944E+00	-----+ +		
00E-01	3.5929E+00	-----+ +		
00E-01	3.5849E+00	-----+ +		
00E-01	3.5670E+00	-----+ +		
00E-01	3.5377E+00	-----+ +		
00E-01	3.4960E+00	-----+ +		
00E-01	3.4422E+00	-----+ +		
00E-01	3.3768E+00	-----+ +		
00E-01	3.3009E+00	-----+ +		
00E-01	3.2157E+00	-----+ +		
00E-01	3.1227E+00	-----+ +		
00E-01	3.0233E+00	-----+ +		
00E-01	2.9189E+00	-----+ +		
00E-01	2.8111E+00	-----+ +		
00E-01	2.7012E+00	-----+ +		
00E-01	2.5907E+00	-----+ +		
00E-01	2.4809E+00	-----+ +		
00E-01	2.3729E+00	-----+ +		
00E+00	2.2679E+00	-----+ +		



9 - A N E X O S - L I S T A G E N S

****CONTINUOUS SYSTEM MODELING PROGRAM****

PROBLEM INPUT STATEMENTS

```

TITLE  TESTE DE SISTEMAS DE EXCITACAO
TITLE  ENERGIZACAO DE CARGA CAPACITIVA METODO RKSF
INITIAL
      EAQ=CIEFD*KE+AEX*EXP(BEX*CIEFD)
*      DADOS DA MAQUINA
CONSTANT H=4.270,XD=0.87,XQ=0.62,XLD=0.26,TLDD=3.64
*      DADOS DO SISTEMA DE EXCITACAO
CONSTANT  AEX=0.124,BEX=0.965,VREF=1.0
CONSTANT  TE=0.8,KE=1.0,KA=60.,TSE=1.0,XMUS=0.06,TA=.1
*      DADOS DO SISTEMA
CONSTANT XC=2.5
*      CONDICAOES INICIAIS
CONSTANT CIELQ=1,CIEFD=1,CIEST=0,EICI=1.0
DYNAMIC
*      EQUACOES DA MAQ. COM CARGA CAPACITIVA
      ID=ELQ/(XC-XLD)
      EL=ID*(XC-XL)
      XEI=ID*(XC-XD)
      ET=ID*XC
      ELQX=(EFD-EI)/TLDD
      ELQ=INTGRL(CIELQ,ELQX)
      EI=FCNSW(TIME,EICI,EICI,XEI)
*      EQUACOES DO REGULADOR DE TENSAO
      EFDPT=(EFDX-EFD)/PEFD
      ES=AEX*EXP(BEX*EFD)
      EFDX=(EA-ES)/KE
      EFD=REALPL(CIEFD,PEFD,EFDX)
      PEFD=TE/KE
      EAX=(1.-ET-EST+EAQ/KA)*KA
      EA=REALPL(EAQ,TA,EAX)
      ESTX=XMUS*TSE*EFDPT
      EST=REALPL(CIEST,TSE,ESTX)
NOSORT
IF(EA.GT.VAMAX)EA=VAMAX
IF(EA.LT.VAMIN)EA=VAMIN
PARAMETER  VAMAX=7.60000,VAMIN=-1.9000
PRTPLOT ET,EST,EA,EFD,ID
PRINT ELQ,EI,EL,ET,EST,EA,EFD,ID
TIMER FINTIM=3.0,OUTDEL=0.02,DELT=0.005
METHOD RKSF
END
STOP

```

VARIABLE SEQUENCE

ID	XEI	EI	ELQX	ELQ	PEFD	ES	EFDX	ZZ0003
ET	EAX	ZZ0005	EA	EFDPT	ESTX	ZZ0007	EST	EL
EA								

VARIABLES NOT INPUT OR OUTPUTS NOT AVAILABLE TO SORT SECTION***SET TO ZERO***

JTS	INPUTS	PARAMS	INTEGS	MEM	BLKS	FORTTRAN	DATA	CDS
00)	78(1400)	25(400)	4+	0=	4(300)	23(600)		13

ENDJOB

MINIMUM
9.7523E-01

ET VERSUS TIME

MAXI
1.0217
I

ET	I
9.9894E-01	+
9.9892E-01	+
9.9893E-01	+
9.9895E-01	+
9.9900E-01	+
9.9906E-01	+
9.9915E-01	+
9.9927E-01	+
9.9945E-01	+
9.9969E-01	+
1.0000E+00	+
1.0004E+00	+
1.0008E+00	+
1.0013E+00	+
1.0018E+00	+
1.0024E+00	+
1.0030E+00	+
1.0037E+00	+
1.0043E+00	+
1.0051E+00	+
1.0058E+00	+
1.0065E+00	+
1.0072E+00	+
1.0079E+00	+
1.0086E+00	+
1.0093E+00	+
1.0099E+00	+
1.0105E+00	+
1.0111E+00	+
1.0117E+00	+
1.0122E+00	+
1.0127E+00	+
1.0131E+00	+
1.0136E+00	+
1.0140E+00	+
1.0144E+00	+
1.0148E+00	+
1.0151E+00	+
1.0154E+00	+
1.0158E+00	+
1.0160E+00	+
1.0163E+00	+
1.0166E+00	+
1.0168E+00	+
1.0170E+00	+
1.0172E+00	+
1.0175E+00	+
1.0177E+00	+
1.0179E+00	+
1.0181E+00	+
1.0184E+00	+

MINIMUM
9.7523E-01

ET VERSUS TIME

MAXI
1.0217

ET	I	MAXI
00E+00	1.0186E+00	1.0217
00E+00	1.0189E+00	1.0217
00E+00	1.0191E+00	1.0217
00E+00	1.0193E+00	1.0217
00E+00	1.0195E+00	1.0217
00E+00	1.0198E+00	1.0217
00E+00	1.0199E+00	1.0217
00E+00	1.0201E+00	1.0217
00E+00	1.0203E+00	1.0217
00E+00	1.0205E+00	1.0217
00E+00	1.0207E+00	1.0217
00E+00	1.0208E+00	1.0217
00E+00	1.0210E+00	1.0217
00E+00	1.0211E+00	1.0217
00E+00	1.0213E+00	1.0217
00E+00	1.0214E+00	1.0217
00E+00	1.0215E+00	1.0217
00E+00	1.0216E+00	1.0217
00E+00	1.0217E+00	1.0217
00E+00	1.0217E+00	1.0217
00E+00	1.0217E+00	1.0217
00E+00	1.0217E+00	1.0217
00E+00	1.0217E+00	1.0217
00E+00	1.0216E+00	1.0217
00E+00	1.0215E+00	1.0217
00E+00	1.0215E+00	1.0217
00E+00	1.0214E+00	1.0217
00E+00	1.0213E+00	1.0217
00E+00	1.0212E+00	1.0217
00E+00	1.0211E+00	1.0217
00E+00	1.0210E+00	1.0217
00E+00	1.0209E+00	1.0217
00E+00	1.0208E+00	1.0217
00E+00	1.0206E+00	1.0217
00E+00	1.0205E+00	1.0217
00E+00	1.0204E+00	1.0217
00E+00	1.0203E+00	1.0217
00E+00	1.0202E+00	1.0217
00E+00	1.0200E+00	1.0217
00E+00	1.0199E+00	1.0217
00E+00	1.0199E+00	1.0217
00E+00	1.0198E+00	1.0217
00E+00	1.0198E+00	1.0217
00E+00	1.0198E+00	1.0217
00E+00	1.0198E+00	1.0217
00E+00	1.0199E+00	1.0217
00E+00	1.0199E+00	1.0217
00E+00	1.0200E+00	1.0217
00E+00	1.0200E+00	1.0217
00E+00	1.0201E+00	1.0217

	MINIMUM	ET	VERSUS TIME	MAXIMUM
	9.7523E-01			1.0217E
ET	I			I
CE+00	1.0202E+00	=====+		
OF+00	1.0203E+00	=====+		
OE+00	1.0203E+00	=====+		
CE+00	1.0204E+00	=====+		
OE+00	1.0205E+00	=====+		
OE+00	1.0205E+00	=====+		
OE+00	1.0205E+00	=====+		
OE+00	1.0203E+00	=====+		
CE+00	1.0201E+00	=====+		
CE+00	1.0198E+00	=====+		
OE+00	1.0194E+00	=====+		
OE+00	1.0189E+00	=====+		
OE+00	1.0182E+00	=====+		
OE+00	1.0175E+00	=====+		
OF+00	1.0166E+00	=====+		
OE+00	1.0156E+00	=====+		
OE+00	1.0146E+00	=====+		
CE+00	1.0134E+00	=====+		
CE+00	1.0122E+00	=====+		
OE+00	1.0110E+00	=====+		
CE+00	1.0097E+00	=====+		
OE+00	1.0083E+00	=====+		
OE+00	1.0069E+00	=====+		
OE+00	1.0055E+00	=====+		
OE+00	1.0041E+00	=====+		
OE+00	1.0027E+00	=====+		
OF+00	1.0012E+00	=====+		
OE+00	9.9977E-01	=====+		
CE+00	9.9833E-01	=====+		
OE+00	9.9690E-01	=====+		
CE+00	9.9548E-01	=====+		
OE+00	9.9408E-01	=====+		
OE+00	9.9269E-01	=====+		
CE+00	9.9134E-01	=====+		
OE+00	9.9002E-01	=====+		
OE+00	9.8874E-01	=====+		
OE+00	9.8750E-01	=====+		
CE+00	9.8631E-01	=====+		
CE+00	9.8516E-01	=====+		
CE+00	9.8407E-01	=====+		
OE+00	9.8304E-01	=====+		
CE+00	9.8208E-01	=====+		
OE+00	9.8117E-01	=====+		
OE+00	9.8033E-01	=====+		
OE+00	9.7957E-01	=====+		
OE+00	9.7889E-01	=====+		
CE+00	9.7828E-01	=====+		
OE+00	9.7775E-01	=====+		
OE+00	9.7730E-01	=====+		
OE+00	9.7692E-01	=====+		
CE+00	9.7662E-01	=====+		

	MINIMUM 9.7523E-01	ET	VERSUS TIME	MAXIMUM 1.0217E
		ET	I	I
CE+00	9.7638E-01		-+	
CE+00	9.7622E-01		-+	
CE+00	9.7613E-01		+	
CE+00	9.7610E-01		+	
CE+00	9.7613E-01		+	
CE+00	9.7620E-01		-+	
CE+00	9.7631E-01		-+	
CE+00	9.7646E-01		-+	
CE+00	9.7664E-01		-+	
CE+00	9.7685E-01		-+	
CE+00	9.7707E-01		-+	
CE+00	9.7731E-01		---+	
CE+00	9.7755E-01		---+	
CE+00	9.7781E-01		---+	
CE+00	9.7805E-01		----+	
CE+00	9.7827E-01		----+	
CE+00	9.7848E-01		----+	
CE+00	9.7867E-01		----+	
CE+00	9.7886E-01		----+	
CE+00	9.7902E-01		-----+	
CE+00	9.7914E-01		-----+	
CE+00	9.7922E-01		-----+	
CE+00	9.7926E-01		-----+	
CE+00	9.7927E-01		-----+	
CE+00	9.7924E-01		-----+	
CE+00	9.7916E-01		-----+	
CE+00	9.7905E-01		-----+	
CE+00	9.7891E-01		----+	
CE+00	9.7875E-01		----+	
CE+00	9.7856E-01		----+	
CE+00	9.7834E-01		----+	
CE+00	9.7810E-01		----+	
CE+00	9.7785E-01		---+	
CE+00	9.7759E-01		---+	
CE+00	9.7733E-01		---+	
CE+00	9.7707E-01		-+	
CE+00	9.7681E-01		-+	
CE+00	9.7655E-01		-+	
CE+00	9.7631E-01		-+	
CE+00	9.7608E-01		+	
CE+00	9.7587E-01		+	
CE+00	9.7568E-01		+	
CE+00	9.7551E-01		+	
CE+00	9.7538E-01		+	
CE+00	9.7529E-01		+	
CE+00	9.7523E-01		+	
CE+00	9.7523E-01		+	
CE+00	9.7527E-01		+	
CE+00	9.7537E-01		+	
CE+00	9.7550E-01		+	
CE+00	9.7569E-01		+	

	MINIMUM 9.7523E-01	ET	VERSUS TIME	MAXIMUM 1.0217E-01
CE+00	9.7591E-01	I	+	I
OF+00	9.7615E-01		+	
OE+00	9.7643E-01		-+	
OF+00	9.7674E-01		-+	
OE+00	9.7711E-01		--+	
OF+00	9.7754E-01		--+	
CE+00	9.7803E-01		---+	
OE+00	9.7857E-01		---+	
CE+00	9.7916E-01		----+	
CF+00	9.7980E-01		----+	
CF+00	9.8048E-01		-----+	
OE+00	9.8121E-01		-----+	
OE+00	9.8196E-01		-----+	
OE+00	9.8273E-01		-----+	
CE+00	9.8352E-01		-----+	
CF+00	9.8430E-01		-----+	
OE+00	9.8509E-01		-----+	
OE+00	9.8587E-01		-----+	
OE+00	9.8663E-01		-----+	
CE+00	9.8738E-01		-----+	
CE+00	9.8811E-01		-----+	
OE+00	9.8882E-01		-----+	
OE+00	9.8951E-01		-----+	
OE+00	9.9016E-01		-----+	
OE+00	9.9078E-01		-----+	
CF+00	9.9136E-01		-----+	
CE+00	9.9191E-01		-----+	
CE+00	9.9242E-01		-----+	
OE+00	9.9289E-01		-----+	
OE+00	9.9332E-01		-----+	
CE+00	9.9373E-01		-----+	
OE+00	9.9411E-01		-----+	
OE+00	9.9447E-01		-----+	
CF+00	9.9480E-01		-----+	
CF+00	9.9512E-01		-----+	
CE+00	9.9541E-01		-----+	
OE+00	9.9569E-01		-----+	
OE+00	9.9594E-01		-----+	
CE+00	9.9618E-01		-----+	
CF+00	9.9642E-01		-----+	
OE+00	9.9667E-01		-----+	
CF+00	9.9692E-01		-----+	
OE+00	9.9717E-01		-----+	
OE+00	9.9742E-01		-----+	
CF+00	9.9769E-01		-----+	
OF+00	9.9796E-01		-----+	
CF+00	9.9824E-01		-----+	
OF+00	9.9854E-01		-----+	
OF+00	9.9883E-01		-----+	
CF+00	9.9914E-01		-----+	
OE+00	9.9945E-01		-----+	

	MINIMUM	ET	VERSUS TIME	MAXI
	9.7523E-01			1.0217
E		I		I
00F+00	9.9974E-01	+		
00E+00	1.0000E+00	+		
00CF+00	1.0003E+00	+		
00DF+00	1.0006E+00	+		
00CE+00	1.0008E+00	+		
00FE+00	1.0011E+00	+		
00DF+00	1.0014E+00	+		
00CF+00	1.0016E+00	+		
00DE+00	1.0018E+00	+		
00DF+00	1.0020E+00	+		
00FE+00	1.0022E+00	+		
00CE+00	1.0024E+00	+		
00DE+00	1.0025E+00	+		
00CF+00	1.0026E+00	+		
00DF+00	1.0027E+00	+		
00DE+00	1.0027E+00	+		
00CE+00	1.0027E+00	+		
00DF+00	1.0027E+00	+		
00DE+00	1.0027E+00	+		
00CF+00	1.0026E+00	+		
00CE+00	1.0025E+00	+		

DATE 12/07/76 TIME 03.00.37

TESTE DE ESTABILIDADE TRANSITORIA -PAULO GOMES

BASE CASE LINE AND TRANSFORMER DATA

TYPE	ACTION	FROM BUS	TO BUS	CKT/A	R	X	MVAC	TAP	TMIN	TMAX	SHIFT	C-BUS	RATINGS	BSMVA
0	ADDITION	2	1	0 F	0.0	9.23	0.0	1.000	0.0	0.0	0.0	0	0.	0.0
0	ADDITION	2	3	0 F	0.0	23.78	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0.	0.0
0	ADDITION	2	3	0 F	0.0	23.78	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0.	0.0
0	END DATA	9999	0	0 F	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0.	0.0

REPORT CF POWER FLOW CALCULATIONS FOR AREA 1,
 BUS - DATA

5 ITERATIONS, SWING BUS IS 3.

BUS	NAME	VOLTS	ANGLE	MW	MVAR	X	LOAD	MW	MVAR	X	CAP/REAC	MVAR	TO	BUS	NAME	MW	MVAR	TAP	SHIFT
1	MAC TESTE 13	1.078	12.4	110.0	52.0R			0.0	0.0						2	MAQ TESTE230	109.98	52.02	
2	MAC TESTE230	1.038	7.2	0.0	0.0			0.0	0.0						1	MAQ TESTE 13	-109.98	-40.27	1.000
															3	INFINITA	55.00	20.14	
															3	INFINITA	55.00	20.14	
3	INFINITA	1.000	0.0	-110.0	-25.1			0.0	0.0						2	MAQ TESTE230	-55.00	-12.57	
															2	MAQ TESTE230	-55.00	-12.57	

AREA TOTALS 0.0 26.9 0.0 0.0 0.0 0.0

SOLUTION TIME 19.22 SECONDS.
 TOTAL TIME 32.87 SECONDS.

PF60 DATA FROM THIS CASE HAS BEEN SAVED AS RECORD 1 ON REEL ON SYS003.

1		3							
MAQ TESTE 13		INFINITA							
POWER	ANGLE	POWER	ANGLE	POWER	ANGLE	POWER	ANGLE	POWER	ANGLE
-0.	32.8	-0.	0.0						
0.	33.4	-0.	0.0						
0.	35.1	-0.	0.0						
-0.	37.8	-0.	0.0						
0.	41.7	-0.	0.0						
-0.	46.7	-0.	0.0						
124.	46.7	-125.	0.0						
155.	58.2	-155.	0.0						
179.	67.9	-179.	0.0						
195.	74.7	-195.	0.0						
202.	78.2	-202.	0.0						
202.	77.8	-202.	0.0						
195.	73.8	-196.	0.0						
180.	66.3	-181.	0.0						
156.	56.0	-157.	0.0						
124.	43.8	-125.	0.0						
89.	31.0	-89.	0.0						
55.	19.1	-55.	0.0						
27.	9.4	-27.	0.0						
9.	3.1	-9.	0.0						
2.	0.8	-2.	0.0						
9.	2.9	-9.	0.0						
27.	9.1	-27.	0.0						
54.	18.7	-54.	0.0						
88.	30.5	-88.	0.0						
124.	43.2	-124.	0.0						
157.	55.3	-156.	0.0						
180.	65.6	-181.	0.0						
196.	73.0	-195.	0.0						
202.	76.9	-202.	0.0						
201.	77.1	-201.	0.0						
194.	73.6	-194.	0.0						
179.	66.7	-180.	0.0						
156.	57.0	-157.	0.0						
126.	45.5	-127.	0.0						
93.	33.3	-94.	0.0						
62.	21.8	-62.	0.0						
35.	12.2	-35.	0.0						
16.	5.7	-16.	0.0						
8.	2.9	-8.	0.0						
12.	4.3	-12.	0.0						
28.	9.6	-28.	0.0						
52.	18.3	-52.	0.0						
84.	29.3	-83.	0.0						
117.	41.4	-117.	0.0						
149.	53.1	-148.	0.0						
174.	63.3	-173.	0.0						
190.	71.0	-189.	0.0						
197.	75.4	-197.	0.0						
198.	76.2	-198.	0.0						

SUMMARY OF POWERS AND ANGLES

(ANGLES RELATIVE TO BUS 3, INFINITA)

1		3							
MAQ TESTE 13		INFINITA							
POWER	ANGLE	POWER	ANGLE	POWER	ANGLE	POWER	ANGLE	POWER	ANGLE
192.	73.6	-192.	0.0						
179.	67.5	-180.	0.0						
159.	58.7	-160.	0.0						
132.	47.9	-133.	0.0						
101.	36.3	-101.	0.0						
70.	25.0	-70.	0.0						
43.	15.3	-43.	0.0						
24.	8.3	-23.	0.0						
14.	4.8	-14.	0.0						
15.	5.2	-15.	0.0						
27.	9.5	-27.	0.0						
49.	17.1	-49.	0.0						
77.	27.2	-77.	0.0						
109.	38.7	-109.	0.0						
140.	50.1	-140.	0.0						
166.	60.4	-165.	0.0						
183.	68.4	-183.	0.0						
193.	73.4	-192.	0.0						
195.	75.1	-195.	0.0						
192.	73.3	-191.	0.0						
180.	68.2	-181.	0.0						
162.	60.3	-163.	0.0						
138.	50.3	-138.	0.0						
108.	39.1	-109.	0.0						
78.	28.1	-79.	0.0						
51.	18.3	-51.	0.0						
31.	10.9	-31.	0.0						
19.	6.7	-19.	0.0						
17.	6.1	-17.	0.0						
27.	9.4	-27.	0.0						
45.	16.0	-45.	0.0						
71.	25.2	-71.	0.0						
101.	36.0	-101.	0.0						
132.	47.1	-131.	0.0						
158.	57.4	-157.	0.0						
177.	65.7	-177.	0.0						
188.	71.3	-188.	0.0						
192.	73.7	-192.	0.0						
190.	72.8	-190.	0.0						
181.	68.6	-181.	0.0						
165.	61.6	-166.	0.0						
143.	52.4	-143.	0.0						
115.	41.8	-116.	0.0						
86.	31.0	-87.	0.0						
59.	21.2	-60.	0.0						
38.	13.4	-38.	0.0						
24.	8.6	-24.	0.0						
20.	7.2	-20.	0.0						
27.	9.4	-27.	0.0						
42.	15.0	-43.	0.0						

SUMMARY OF POWERS AND ANGLES

(ANGLES RELATIVE TO BUS 3, INFINITE)

1		3							
MAQ TESTE 13		INFINITA							
POWER	ANGLE	POWER	ANGLE	POWER	ANGLE	POWER	ANGLE	POWER	ANGLE
66.	23.4	-66.	0.0						
94.	33.5	-94.	0.0						
124.	44.3	-123.	0.0						
150.	54.5	-150.	0.0						
171.	63.0	-170.	0.0						
184.	69.1	-183.	0.0						
189.	72.2	-189.	0.0						
188.	72.1	-139.	0.0						
181.	68.9	-182.	0.0						
168.	62.7	-168.	0.0						
147.	54.3	-148.	0.0						
122.	44.3	-122.	0.0						
94.	33.8	-94.	0.0						
67.	24.0	-67.	0.0						
45.	16.0	-45.	0.0						
30.	10.5	-30.	0.0						
24.	8.4	-24.	0.0						
27.	9.7	-27.	0.0						
40.	14.3	-40.	0.0						
61.	21.8	-61.	0.0						
88.	31.2	-88.	0.0						
116.	41.6	-116.	0.0						
143.	51.6	-142.	0.0						
164.	60.4	-164.	0.0						
179.	66.9	-178.	0.0						
186.	70.7	-186.	0.0						
187.	71.4	-187.	0.0						
181.	68.9	-182.	0.0						
169.	63.6	-170.	0.0						
151.	55.9	-152.	0.0						
127.	46.5	-128.	0.0						
101.	36.4	-101.	0.0						
74.	26.7	-75.	0.0						
52.	18.4	-52.	0.0						
35.	12.5	-35.	0.0						
27.	9.6	-27.	0.0						
29.	10.1	-28.	0.0						
39.	13.9	-39.	0.0						
58.	20.5	-58.	0.0						
82.	29.2	-82.	0.0						
109.	39.1	-109.	0.0						
136.	49.0	-135.	0.0						
158.	57.9	-158.	0.0						
174.	64.8	-173.	0.0						
183.	69.1	-182.	0.0						
185.	70.5	-185.	0.0						
181.	68.8	-181.	0.0						
171.	64.3	-171.	0.0						
154.	57.3	-155.	0.0						
132.	48.5	-133.	0.0						

SUMMARY OF POWERS AND ANGLE

(ANGLES RELATIVE TO BUS 3, INFINIT

1 3
 MAQ TESTE 13 INFINITA

POWER	ANGLE	POWER	ANGLE	POWER	ANGLE	POWER	ANGLE	POWER	ANGLE
107.	38.8	-107.	0.0						
81.	29.2	-81.	0.0						
58.	20.8	-58.	0.0						
41.	14.5	-41.	0.0						
31.	11.0	-31.	0.0						
30.	10.7	-30.	0.0						
38.	13.6	-38.	0.0						
55.	19.4	-55.	0.0						
77.	27.5	-77.	0.0						
103.	36.9	-103.	0.0						
129.	46.6	-129.	0.0						
152.	55.4	-151.	0.0						
169.	62.6	-168.	0.0						
179.	67.4	-179.	0.0						
182.	69.4	-183.	0.0						
180.	68.5	-180.	0.0						
172.	64.7	-172.	0.0						

