

MARIA DA GUIA DA SILVA

PROJETO DE SINAIS ESTABILIZANTES
EM SISTEMAS DE POTÊNCIA USANDO
TÉCNICAS DE CONTROLE CLÁSSICO
E OTIMIZAÇÃO.

Dissertação apresentada ao Cur-
so de Mestrado em Engenharia
Elétrica da Universidade Fede-
ral da Paraíba, em cumprimento
às exigências para obtenção do
grau de Mestre.

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PROCESSAMENTO DA ENERGIA

WELLINGTON SANTOS MOTA

(Orientador)

CAMPINA GRANDE

JULHO - 1983

F-1
Dir. 61.1312.521012
S. 5864



S586p Silva, Maria da Guia da.
Projeto de sinais estabilizantes em sistemas de potência usando técnicas de controle clássico e otimização / Maria da Guia da Silva. - Campina Grande, 1983.
112 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 1983.
"Orientação : Prof. Wellington Santos Mota".
Referências.

1. Sistema Elétrico de Potência. 2. Técnicas de Controle. 3. Otimização. 4. Dissertação - Engenharia Elétrica. I. Mota, Wellington Santos. II. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB). III. Título

CDU 621.313.52(043)

PROJETO DE SINAIS ESTABILIZANTES EM
SISTEMAS DE POTÊNCIA USANDO TÉCNICAS
DE CONTROLE CLÁSSICO E OTIMIZAÇÃO

MARIA DA GUIA DA SILVA

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 28/07/83

Wellington Santos Mota
WELLINGTON SANTOS MOTA

Orientador

Jose Calazans de Castro
JOSE CALAZANS DE CASTRO
Componente da Banca

Telmo Silva de Araújo
TELMO SILVA DE ARAÚJO
Componente da banca

CAMPINA GRANDE - PB

JULHO - 1983

PROJETO DE SINAIS ESTABILIZANTES EM
SISTEMAS DE POTÊNCIA USANDO TÉCNICAS
DE CONTROLE CLÁSSICO E OTIMIZAÇÃO

Aos meus Pais,
Irmãos e Sobrinhos.



RESUMO

Este trabalho apresenta um método sistemático para se projetar sinais estabilizantes convencionais derivados da velocidade da máquina usando teoria de controle clássico e baseado num modelo linearizado do sistema interligado onde toda a interação dinâmica do sistema é levada em consideração.

A técnica usada para se computar os parâmetros dos sinais estabilizantes usa otimização e através do algoritmo de Fletcher-Reeves maximiza-se o torque de amortecimento equivalente das máquinas.

Dois exemplos numéricos de sistemas com várias máquinas são apresentados para ilustrar a técnica proposta.

ABSTRACT

This work presents a systematic method to design power system stabilizers derived from machine velocity using classic control theory. Based on a linearized model of the interconnected power system, the design process take into account the dynamic interaction of the whole power system.

To compute the parameters of the stabilizers, a technique of optimization by Fletches-Reeves's algorithm is used in order to maximize the equivalent damping torque of the synchronous machines.

Two examples of multi-machine power systems are used to illustrate the proposed techniques.

AGRADECIMENTOS

Aos professores WELLINGTON SANTOS MOTA e JANUSZ STANISLAW LIPOWSKI pela contribuição que deram para a realização deste trabalho.

Aos professores do GSP-UFPB pelo apoio, particularmente, Dagoberto Lourenço Ribeiro e José Calázans de Castro.

A todos aqueles, que contribuíram para a realização deste trabalho.

ÍNDICE

	PÁGINA
CAPÍTULO I - <u>Introdução</u>	1
I.1 - Considerações Preliminares	1
I.2 - Revisão de Trabalhos Anteriores e Motivação da Pesquisa	2
I.3 - Contribuição da Pesquisa e um Esboço dos Capítulos Seguintes	4
I.3.1 - Contribuição da Pesquisa	4
I.3.2 - Esboço dos Capítulos Se guintes	5
CAPÍTULO II - <u>Estabilidade de Sistemas de Potência</u>	7
II.1 - Introdução	7
II.2 - Comportamento da Máquina Síncro na Durante um Transitório	7

PÁGINA

II.3 - Análise da Perda de Estabilidade Através do Ângulo de Torque das Máquinas	9
II.4 - Definição de Instabilidade de Acordo com a Perturbação	12
II.5 - Simulação Digital do Regime Transitório	12
CAPÍTULO III - <u>Sinais Estabilizantes em Sistemas de Potência</u>	13
III.1- Introdução	13
III.2- Conceitos Fundamentais de Estabilidade da Máquina Síncrona	13
III.2.1- Torque Elétrico	18
III.2.2- Torque Sincronizante e Torque de Amortecimento	21
III.3- Projeto de um Sinal Estabilizante Convencional Derivado da Velocidade da Máquina Baseado em Máquina/Barra Infinita	23

	PÁGINA
CAPÍTULO IV - <u>Projeto de Estabilizadores de Sistemas de Potência Considerando-se as Interações Dinâmicas entre as Máquinas</u>	34
IV.1 - Introdução	34
IV.2 - Interações Dinâmicas em um Sistema de Várias Máquinas	34
IV.2.1- Efeitos das Interações Dinâmicas na Máquina-i	36
IV.3 - Técnica de Otimização	42
IV.3.1- Formulação das Restrições	44
CAPÍTULO V - <u>Aplicação em Sistemas Realísticos de Estabilizadores Baseados em Técnicas de Controle Clássico e Otimização</u>	48
V.1 - Introdução	48
V.2 - Sistema 1	48
V.3 - Sistema 2	53
V.4 - Apresentação de Resultados e Análises dos Estabilizadores	62

PÁGINA

V.4.1-	Simulação do Sistema	1.	62
V.4.2-	Simulação do Sistema	2.	63
CAPÍTULO VI	- <u>Conclusões</u>		82
APÊNDICE 1	-		84
APÊNDICE 2	-		93
BIBLIOGRAFIA	-		107
 <u>TABELAS</u>			
Tabela I			63
Tabela II			63
Tabela III			73
Tabela IV			74
Tabela 2.1			95

FIGURAS

Fig. II.3.1(a)	10
Fig. II.3.1(b)	11
Fig. III.2.1.	15
Fig. III.2.2.	18
Fig. III.2.3.	20
Fig. III.3.1.	25
Fig. III.3.2.	26
Fig. III.3.3.	27
Fig. III.3.4.	30
Fig. IV.2.1.	35
Fig. IV.2.2.	38
Fig. IV.2.3.	47
Fig. V.2.1.	51
Fig. V.2.2.	52
Fig. V.3.1.	60
Fig. V.3.2.	61
Fig. V.4.1.	66
Fig. V.4.2.	67

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
 Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior
 Coordenação Especial de Pós-Graduação
 Rua Aprígio Veloso 872 - Tel. (31) 3171-355
 58100-1 - Campina Grande - Paraíba

PÁGINA

FIGURAS

Fig. V.4.3.	68
Fig. V.4.4.	69
Fig. V.4.5.	70
Fig. V.4.6.	71
Fig. V.4.7.	76
Fig. V.4.8.	77
Fig. V.4.9.	78
Fig. V.4.10.	79
Fig. V.4.11.	80
Fig. V.4.12.	81
Fig. 1.1.	83
Fig. 2.1.	99

CAPÍTULO I

Introdução

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA
Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior
Coordenação Setorial de Pós-Graduação
Rua Aprígio Veloso 832 Tel (031) 321 722-R 355
58.100 - Campina Grande - Paraíba

I.1 Considerações Preliminares

Com o crescimento constante de sistemas de potência e o uso de altas tensões de transmissão a longa distância, sistemas de excitação estático de alta velocidade de resposta para melhorar a estabilidade transitória na primeira oscilação do ângulo de potência, se faz necessário [9]. Reguladores de tensão rápidos atuam diminuindo o tempo de desequilíbrio entre carga e geração. Infelizmente estes reguladores rápidos de altos ganhos, prejudicam o amortecimento inerente das máquinas podendo ocorrer instabilidade em oscilações subsequentes à primeira. Nesta situação é muito importante o uso de sinais estabilizantes através dos reguladores de tensões.

Entre os vários aspectos da estabilidade da máquina síncrona, um que merece muita atenção relaciona-se à estabilidade devido a pequenas perturbações (estabilidade dinâmica). O problema de melhorar a estabilidade dinâmica de sistemas de potência por meio de sinais estabilizantes tem recebido considerável atenção nos últimos anos. Estes sinais foram desenvolvidos para aumentar o amortecimento das oscilações do sistema através da excitação do gerador.

A finalidade do presente trabalho é mostrar co

mo sinais estabilizantes convencionais (sinal projetado por técnicas de controle clássico), podem ser projetados para melhorar o comportamento dinâmico de sistemas de potência de várias máquinas levando em consideração todo o acoplamento dinâmico do sistema.

I.2 Revisão de Trabalhos Anteriores e Motivação da Pesquisa

Pelo fato das excitatrizes de ação rápida frequentemente introduzirem um torque de amortecimento negativo [9], vários métodos tem sido propostos para a estabilização da máquina síncrona [11, 13, 20 e 27], e várias aproximações usando teoria de controle clássico tem sido sugeridas para analisar o efeito do regulador de tensão na estabilidade de sistemas de potência [9, 19, 17 e 22], etc.

Um sinal estabilizante derivado da velocidade da máquina é usado para melhorar o amortecimento da máquina [9, 11, 13, 19, 27 e 28]. Um sinal estabilizante originado do desvio da velocidade do eixo tem comprovado ser consistente em aumentar o amortecimento das oscilações das máquinas e para melhorar a estabilidade transitória do sistema após o período transitório inicial. Este fato tem sido observado em estudos feitos em computadores digitais, usando-se sistemas

de potência reais de várias máquinas e atualmente existem muitos em operação [9, 11, 13, 19, 27 e 28].

Na prática tem-se confirmado que sinais estabilizantes derivados da velocidade da máquina em conjunto com o sistema de excitação estático de alta velocidade aumentam os limites de estabilidade do gerador [9, 11, 13, 19, 27 e 28].

Além dos desvios de velocidade, o efeito de outros sinais estabilizantes tais como potência da máquina, ângulo de carga, aceleração do rotor, corrente de armadura e corrente de campo, na estabilidade transitória e dinâmica do sistema tem sido estudado [11].

Portanto, não há dúvida acerca do uso e implementação prática de sinais estabilizantes convencionais para melhorar o amortecimento de sistemas elétricos de potência. Entretanto, a maioria dos estudos feitos sobre sinais estabilizantes convencionais são baseados no modelo máquina/barras infinita. Isto não leva em conta o acoplamento dinâmico do sistema de várias máquinas que sempre deve ser incluído no estudo de estabilização.

Em [28] uma técnica usando a teoria de controle ótimo foi aplicada para melhorar a resposta dinâmica de sistemas de potência através de um projeto sistemático para a

implementação de controladores ótimo em sistemas de potência reais, considerando-se toda a dinâmica do sistema.

Como os estabilizantes convencionais já encontram-se em operação ou em fase de projeto na maioria dos sistemas de potência, surge a necessidade de se desenvolver uma técnica sistemática para projeto e implementação destes sinais em sistemas de potência de várias máquinas considerando-se toda a interação dinâmica do sistema. Este fato motivou a presente pesquisa.

I.3 Contribuição da Pesquisa e um Esboço dos Capítulos Seguintes.

I.3.1 Contribuição da Pesquisa

A principal contribuição desta pesquisa é:

Projetar sinais estabilizantes convencionais derivados da velocidade da máquina usando teoria de controle clássico e baseado num modelo linearizado do sistema interligado [12] onde toda a interação dinâmica do sistema é levada em consideração.

A técnica apresentada usa otimização pa-

ra se implementar um algoritmo através do qual consegue-se otimizar os parâmetros dos sinais estabilizantes pela maximização do torque de amortecimento equivalente [2 e 3].

I.3.2 Esboço dos Capítulos Seguintes

No capítulo 2 faz-se uma ligeira revisão teórica sobre estabilidade de sistemas de potência. Nele, introduz-se os conceitos de estabilidade transitória e estabilidade dinâmica necessários ao entendimento do trabalho desenvolvido. No capítulo 3 trata-se da análise da estabilidade da máquina síncrona sob a ação de pequenas perturbações, através do estudo de uma máquina ligada a uma barra infinita. O objetivo desta análise é desenvolver conceitos essenciais e estabelecer o entendimento dos mesmos para sua utilização em sistemas de potência de várias máquinas. Introduz-se os conceitos de torques de amortecimento e sincronizante necessários à formulação do problema e apresenta-se de maneira bastante clara a formulação matemática necessária para o estudo de sinais estabilizantes derivados da velocidade da máquina. O capítulo 4 apresenta a formulação matemática do problema para um sistema de potência de várias máquinas, levando-se em consideração toda a dinâmica do sistema e incluindo-se sinais estabilizantes convencionais.

No capítulo 5 são usados dois exemplos de sistemas de potência de várias máquinas e faz-se uma ilustração das técnicas desenvolvidas em capítulos anteriores.

Apresenta-se no capítulo 6 todas as conclusões resultantes do trabalho desenvolvido.

CAPÍTULO II

Estabilidade de Sistemas de Potência

II.1 Introdução

A estabilidade de um sistema de potência está ligada ao comportamento dinâmico das máquinas síncronas após a ocorrência de uma perturbação. Se a perturbação não envolve qualquer mudança na configuração do sistema, as máquinas deverão voltar ao mesmo estado de operação inicial em um tempo finito após a extinção da perturbação. Porém, se houver qualquer mudança na configuração do sistema, tais como: carga, geração, linhas de transmissão, etc, haverá um desequilíbrio entre geração e carga. Conseqüentemente, as máquinas deverão se estabelecer em um novo ponto de operação. Em qualquer caso, todas as máquinas síncronas interligadas deverão permanecer em sincronismo se o sistema é estável, i. é., operando em paralelo com a mesma velocidade.

II.2 Comportamento da Máquina Síncrona Durante um Transitório

A estabilidade transitória estuda o problema do comportamento de um sistema de potência quando submetido a um grande distúrbio. Um defeito em uma linha, que requer a

abertura da mesma para eliminá-lo, a rejeição de geradores, são exemplos de uma grande perturbação.

Durante um transitório, o sistema visto pela máquina síncrona será modificado por variação das seguintes grandezas:

- a) Tensão terminal
- b) Impedância vista pela máquina
- c) Ângulo de torque
- d) Frequência, etc.

conseqüentemente haverá variação da potência de saída da máquina, acarretando um desequilíbrio entre o torque mecânico e o torque elétrico, dando origem às oscilações na máquina.

Até que a variação da velocidade seja sentida e corrigida pelo conjunto turbina-regulador de velocidade, a variação da potência de saída será compensada pela energia armazenada nas partes girantes da máquina, podendo ocorrer perda de estabilidade.

II.3 Análise da Perda de Estabilidade Através do Ângulo de Torque das Máquinas.

Qualquer desbalanço entre geração e carga dá origem a uma oscilação do ângulo de torque da máquina devido a torques de aceleração ou desaceleração no rotor. Se o torque líquido é suficientemente grande, poderá haver deslizamento de polos e conseqüentemente perda de estabilidade.

Por exemplo, na ocorrência de um curto-circuito no sistema de transmissão, haverá uma redução na carga e grande parte do excesso de energia gerada será convertida em energia cinética. Então, haverá um aumento das velocidades das máquinas que poderá ou não levar o sistema a instabilidade. Isto pode ser verificado pela diferença dos ângulos de torques das máquinas, onde os ângulos são medidos com relação a uma referência girante em sincronismo.

A figura II.3.1 mostra os ângulos de torques em função do tempo para um sistema de quatro máquinas.

No caso (a), todos os ângulos foram além de 180° , porém as diferenças entre eles se mantiveram pequenas. O sistema será estável e deverá se estabelecer em um novo ponto de operação. No caso (b), há uma separação das máquinas em dois grupos; os ângulos continuam a se afastarem, indicando que o sistema é instável.

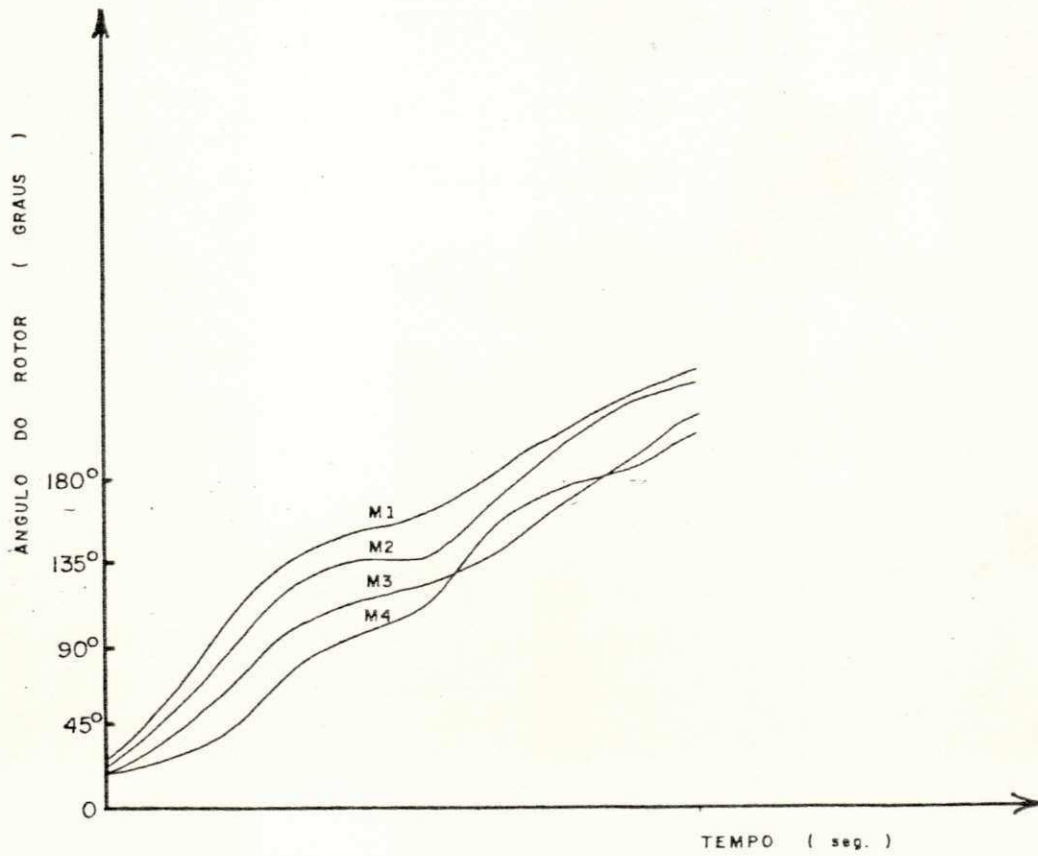


Fig. II.3.1 Resposta de um sistema de quatro máquinas durante um transitório: (a) sistema estável [21].

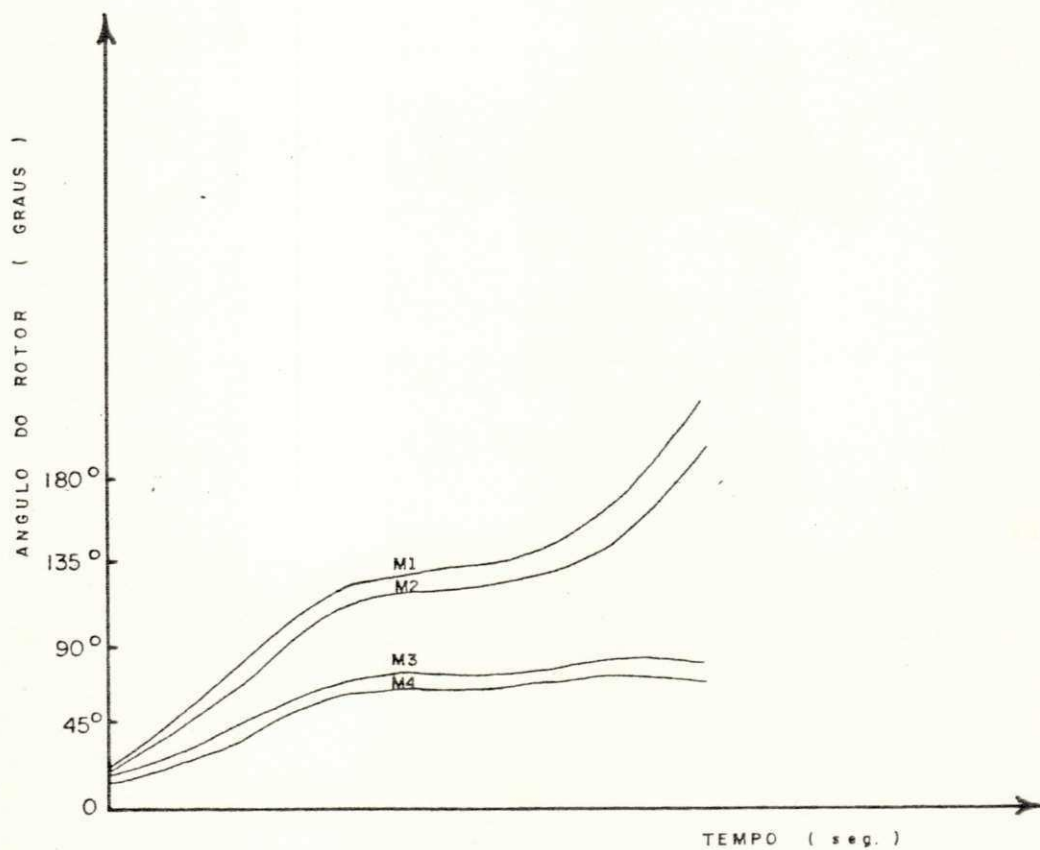


Fig. II.3.1 Resposta de um sistema de quatro máquinas durante um transitório: (b) sistema instável [21].

II.4 Definição de Instabilidade de Acordo com a Perturbação

Instabilidade Transitória é a perda de estabilidade quando o sistema é submetido a uma grande perturbação .

Instabilidade Dinâmica é a perda de estabilidade quando o sistema é submetido a pequenas perturbações. Por exemplo: pequenas mudanças no carregamento dos sistemas, pequenas variações na tensão de referência das máquinas, etc.

II.5 Modelo Dinâmico de Um Sistema de Potência Para Simulação Digital

O modelo matemático para simulação digital consiste de equações algébricas e diferenciais as quais descrevem o comportamento dinâmico das máquinas, sistemas de excitação, turbinas, reguladores de velocidade e equações que descrevem a rede interligada de linhas, cargas, etc, formando um conjunto complexo de equações diferenciais e algébricas não linear.

Para fins de análise e projeto de elementos de controle, modelos linearizados de sistemas de potência poderão ser desenvolvidos e técnicas de controle de sistemas lineares poderão ser aplicadas [29].

CAPÍTULO III

Sinais Estabilizantes em Sistemas de Potência

III.1 Introdução

Neste capítulo os conceitos fundamentais de torques de amortecimento e sincronizante da máquina síncrona são apresentados. Estes conceitos são necessários para a implementação de sinais estabilizantes convencionais usados nos sistemas de potência estudados.

Um método para projetar sinais estabilizantes convencionais derivados da velocidade da máquina é descrito. O projeto é baseado num modelo linearizado de um sistema de potência [9] representado por uma máquina ligada a uma barra infinita através de uma impedância equivalente.

III.2 Conceitos Fundamentais de Torques de Amortecimento e Sincronizante da Máquina Síncrona

Amortecimento ocorre nas máquinas síncronas devido a indução de correntes no rotor durante as oscilações causadas por uma perturbação. Como a corrente no rotor é afetada por mudanças na tensão de campo, pode-se esperar que o amortecimento das oscilações seja relacionado com o sistema de excitação.

Como já foi dito, a ação do regulador de tensão de alta velocidade de resposta reduz o amortecimento das oscilações do rotor, podendo ser melhorado pelo uso de sinais estabilizantes através do sistema de excitação. Com a regulação do fluxo no campo, o sinal estabilizante introduz um torque de amortecimento em fase com a variação de velocidade no eixo, amortecendo assim, as oscilações da máquina.

O diagrama de blocos da figura III.2.1 é a representação de um modelo simplificado e linearizado de um sistema de potência representado por uma máquina e barra infinita [9]. É através dele que desenvolveremos conceitos que explicam a natureza de problemas que estão ligados ao estudo de estabilidade da máquina síncrona sob o efeito de pequenas perturbações e que serão necessários ao entendimento do uso de sinais estabilizantes em sistemas de potência.

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior
Coordenação Setorial de Pós-Graduação
Rua Aprígio Veloso, 832 Tel. (083) 321 7222-R 355
58.100 - Campina Grande - Paraíba

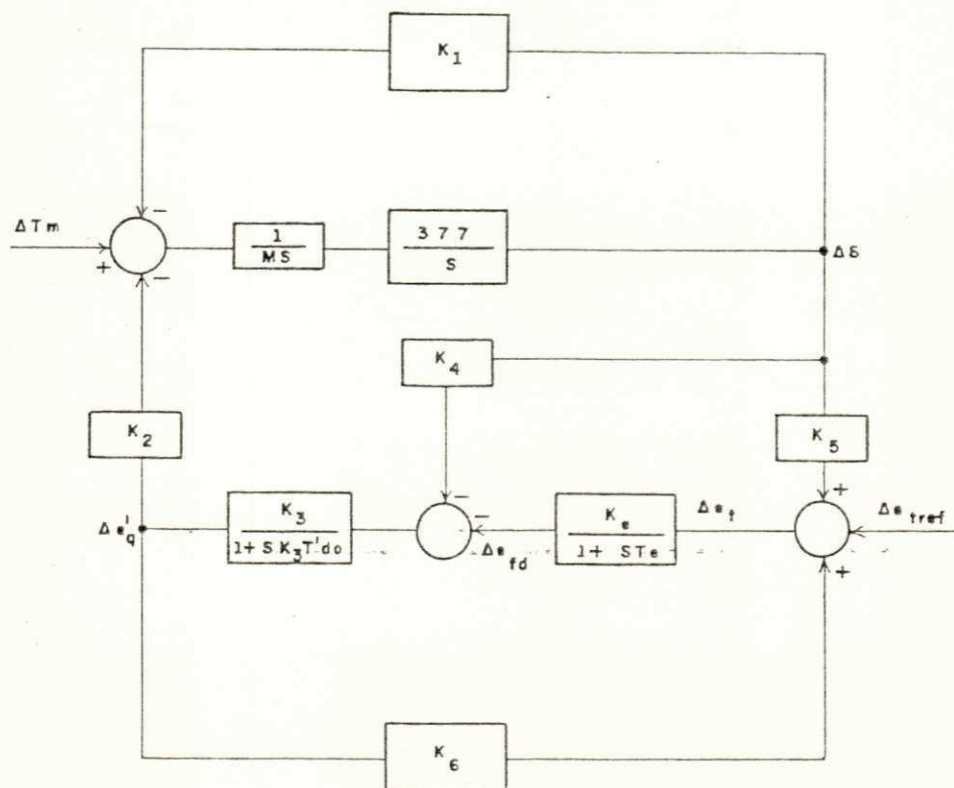


Fig. III.2.1 Representação de um modelo simplificado de sistema de potência representado por uma máquina ligada a uma barra infinita.

Os parâmetros da figura acima são definidos como segue [9]:

K_1 está relacionado com as variações no torque elétrico devido as variações no ângulo do rotor considerando-se o fluxo

no eixo direto constante.

$$K_1 \triangleq \frac{\Delta T_e}{\Delta \delta} \Big|_{E'_q = \text{const.}}$$

K_2 está relacionado com as variações no torque elétrico devido às variações do fluxo no eixo direto com o ângulo do rotor constante.

$$K_2 \triangleq \frac{\Delta T_e}{E'_q} \Big|_{\delta = \text{const.}}$$

K_3 é um fator de impedância que leva em consideração o efeito do carregamento do sistema e a impedância externa.

K_4 está relacionado com o efeito desmagnetizante devido às variações do ângulo do rotor.

$$K_4 \triangleq \frac{1}{K_3} \cdot \frac{\Delta E'_q}{\Delta \delta}$$

K_5 relaciona-se com variações na tensão terminal devido às variações no ângulo do rotor, considerando-se o fluxo no eixo direto constante.

$$K_5 \triangleq \frac{\Delta e_t}{\Delta \delta} \Big|_{E'_q = \text{const.}}$$

K_6 relaciona-se com variações na tensão terminal devido variações no fluxo, considerando-se o ângulo do rotor constante.

$$K_6 \triangleq \left. \frac{\Delta e_t}{\Delta e'_q} \right|_{\delta = \text{const.}}$$

T'_{do}	Constante de tempo de circuito aberto
K_e	Ganho do sistema de excitação
T_e	Constante de tempo do sistema de excitação
ΔT_m	Variação do torque mecânico
$\Delta \delta$	Variação do ângulo de torque
Δe_{tref}	Variação da tensão terminal de referência
Δe_t	Variação da tensão terminal
Δe_{fd}	Variação da tensão do campo
$\Delta e'_q$	Tensão interna no eixo - q
s	Operador de Laplace

III.2.1 Torque Elétrico

Numa dada frequência de oscilação, desenvolve-se um torque elétrico que tem uma componente em fase com as variações da velocidade do rotor e outra componente em fase com as variações do ângulo de torque [Fig. III.2.2]. A primeira é chamada torque de amortecimento e a última, torque sincronizante. Um estudo dos seus efeitos na estabilidade da máquina síncrona é de grande importância, já que ambos são funções dos parâmetros definidos anteriormente, os quais são relacionados com os parâmetros das máquinas, configuração do sistema e ponto de operação.

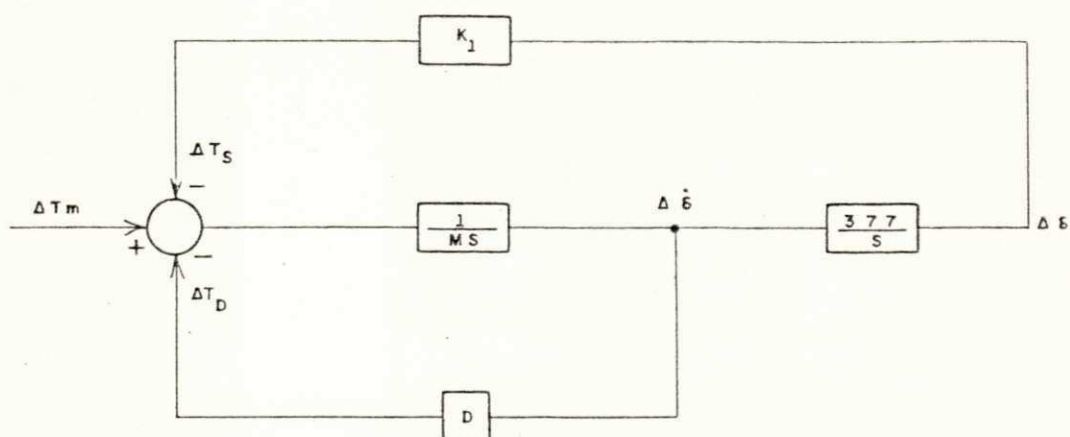


Fig. III.2.2 Definição dos torques de Amortecimento ΔT_D
 e Sincronizante ΔT_S

onde:

ΔT_s é a variação do torque sincronizante

ΔT_D é a variação do torque de amortecimento

$\Delta \dot{\delta}$ variação da velocidade

D coeficiente de amortecimento

É aconselhável que os torques de amortecimento e sincronizante sejam ambos positivos para se ter um bom desempenho dinâmico do sistema. Torque sincronizante positivo assegura que o ângulo do rotor da máquina em seguida a um pequeno distúrbio é restaurado. Torque de amortecimento positivo é necessário para amortecer oscilações devido uma perturbação.

Como o problema da estabilidade está relacionado ao comportamento do ângulo do rotor e da velocidade da máquina, torna-se importante a compreensão das equações que serão apresentadas.

Usando-se o diagrama de blocos da figura III.2.3 [9] pode-se analisar o efeito do regulador de tensão nos torques de amortecimento e sincronizante.

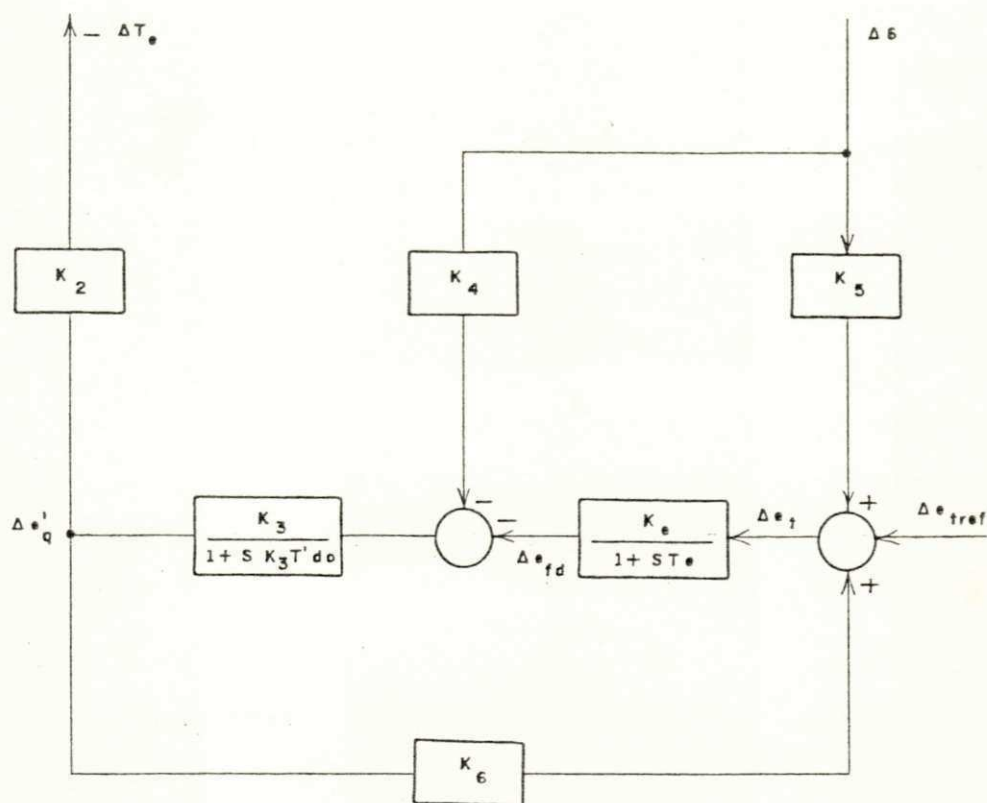


Fig. III.2.3 Torque elétrico produzido pela ação do regulador de tensão.

A variação no torque elétrico devido a uma mudança no ângulo do rotor pode ser determinada através da figura III.2.3. A expressão encontrada é:

$$\Delta T_e = \frac{-K_2 \{ [K_e K_5 + K_4] + s T_e K_4 \}}{1/K_3 + K_4 K_6 + s(T_e/K_3 + T'_{do}) + s^2 T'_{do} T_e} \cdot \Delta \delta$$

(III.2.1)

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
 Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior
 Coordenação Setorial de Pós-Graduação
 Rua Aprígio Veloso, 832 - Tel. (333) 301 7222-R 355
 58.100 - Campina Grande - Paraíba

pode-se mostrar que o efeito dos termos K_2K_4 e $sK_2K_4T_e$ no numerador da expressão III.2.1 é muito pequeno comparado com o termo $K_2K_eK_5$. Considerando-se esta simplificação, a equação do torque reduz-se a:

$$\Delta T_e \cong \frac{K_2K_eK_5}{1/K_3 + K_eK_6 + s(T_e/K_3 + T'_{do}) + s^2 T'_{do}T_e} \cdot \Delta\delta \quad (\text{III.2.2})$$

Para uma dada frequência de oscilação, ω , a expressão do torque pode ser decomposta em uma componente de amortecimento e uma componente sincronizante. É o que se faz a seguir.

III.2.2 Torque Sincronizante e Torque de Amortecimento

O torque sincronizante sendo a componente do torque elétrico que está em fase com as variações do ângulo do rotor, pode ser encontrado substituindo-se s por $j\omega$ na expressão (III.2.2). Feito isto, (como mostrado no apêndice I) tem-se:

$$\Delta T_s = - \frac{K_2K_eK_5}{1/K_3 + K_eK_6 - \omega^2 T'_{do}T_e} \cdot \Delta\delta \quad (\text{III.2.3})$$

o mesmo é feito para a componente do torque elétrico que está em fase com as variações da velocidade (torque de amortecimento) e sua expressão é :

$$\Delta T_D = \frac{K_2 K_e K_5 (T_e / K_3 + T'_{do}) \omega}{(1/K_3 + K_e K_6 - \omega^2 T'_{do} T_e)^2 + (T_e / K_3 + T'_{do})^2 \cdot \omega^2} \cdot \Delta \delta \quad (\text{III.2.4})$$

Em frequências de oscilação baixas a equação III.2.3 depois de algumas considerações pode ser simplificada para:

$$\Delta T_S = - \frac{K_2 K_e K_5}{1/K_3 + K_e K_6} \cdot \Delta \delta \quad (\text{III.2.5})$$

Se K_5 é positivo esta componente de torque sincronizante é negativa. Entretanto, o torque sincronizante total se torna positivo devido a contribuição da parcela $K_1 \Delta \delta$ (ver figura III.2.2) cujo valor é maior que essa componente. Para tal situação o torque de amortecimento é sempre positivo e não se tem maiores problemas com oscilações. Se K_5 é negativo pode-se notar pela equação (III.2.3) que o torque sincronizante é positivo em baixas frequências e somente em frequências de oscilação muito altas, este pode chegar a valores negativos. Isto não chega a ocorrer porque nesta situação, devido as altas frequências de oscilação pode ocorrer instabilidade tendo-se em consequência amortecimento negativo. Então, torna-se necessário o uso de reguladores de tensão r \grave{a} pi

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior
Coordenação Setorial de Pós-Graduação
Rua Aprígio Veloso, 832 Tel (083) 321 7222-R 355
58.100 - Campina Grande - Paraíba

dos, de maneira que o torque sincronizante não seja prejudicado e o problema de instabilidade seja solucionado. Entretanto, usando-se reguladores de tensão de alta velocidade de resposta, o amortecimento inerente às máquinas síncronas é reduzido e o sistema torna-se extremamente oscilatório. Este problema pode ser resolvido, usando-se um sinal estabilizante através do sistema de excitação.

III.3 Projeto de um Sinal Estabilizante Convencional Derivado da Velocidade da Máquina Baseado em Máquina/Barra Infinita

Um sinal estabilizante (convencional) de sistemas de potência que utiliza as variações da velocidade no eixo como entrada deve compensar o ângulo de atraso do conjunto máquina-sistema de excitação. Tal compensação serve para produzir uma componente de torque em fase com as mudanças na velocidade do gerador, tal que aumente o amortecimento das oscilações do ângulo. Este sinal deve utilizar um compensador dinâmico em avanço para compensar o ângulo de atraso introduzido pelo conjunto máquina-sistema de excitação na frequência predominante do sistema. Ele age na tensão de campo do gerador por meio do sistema de excitação como mostra a figura III.3.1.

A função de transferência comumente usada para inserir o sinal estabilizante que usa variações da velocidade da máquina como sinal de entrada é da forma:

$$H(s) = K_q \cdot \frac{(1 + T_1 s)}{(1 + T_2 s)} \quad (\text{III.3.1})$$

onde K_q é o ganho do sinal estabilizante, que normalmente necessita de ajustamento no campo em implementação real, e $(1 + T_1 s)/(1 + T_2 s)$ representa o termo em avanço do compensador dinâmico. Uma função "washout" do tipo:

$$F(s) = \frac{sT_q}{(1 + sT_q)} \quad (\text{III.3.2}),$$

não mostrada na expressão (III.3.1), é também usada para impedir que o regulador de tensão atue devido a erros prolongados na frequência. T_q é geralmente grande, na faixa de 1.0 a 60.0 segundos [29]. A figura III.3.1 mostra uma representação simplificada de sistema de excitação e sinal estabilizante derivado da velocidade da máquina.

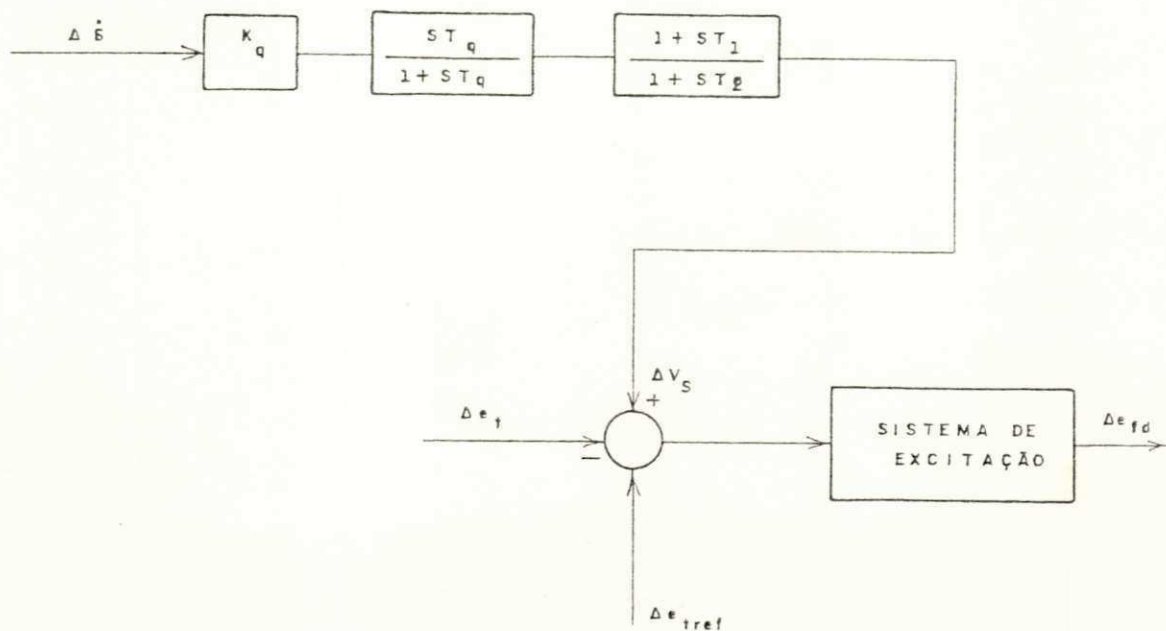
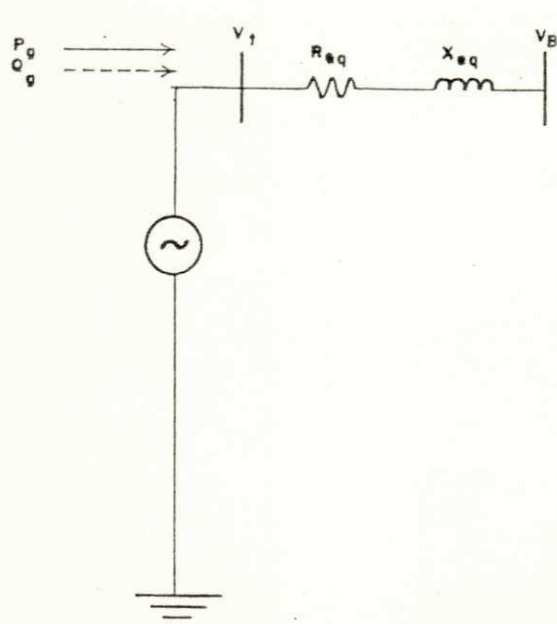


Fig. III.3.1 Diagrama de blocos do sinal estabilizante derivado da velocidade da máquina

Considerando-se uma determinada máquina do sistema a ser estabilizada, chega-se a equação mostrada a seguir. Inicialmente, uma função de transferência simplificada representando esta máquina ligada a uma barra infinita através de uma impedância equivalente é considerada [29]. A representação da máquina ligada a uma barra infinita está na figura III.3.2.



Com,

$$R_{eq} + jX_{eq} = \frac{|V_t|^2 - V_B \cdot V_t}{P_g - j Q_g}$$

onde:

P_g = Potência Ativa gerada nos terminais da máquina.

Q_g = Potência Reativa gerada nos terminais da máquina.

V_B = Tensão da Barra Infinita.

Fig. III.3.2 Máquina ligada a uma barra infinita através de uma impedância equivalente.

Um modelo linear de segunda ordem incluindo máquina e sistema de excitação é considerado [9 e 21] como se mostra na figura III.3.3. O mesmo se presta para análises de pequenas perturbações e será usado para computar o ângulo de atraso de máquina/sistema de excitação.

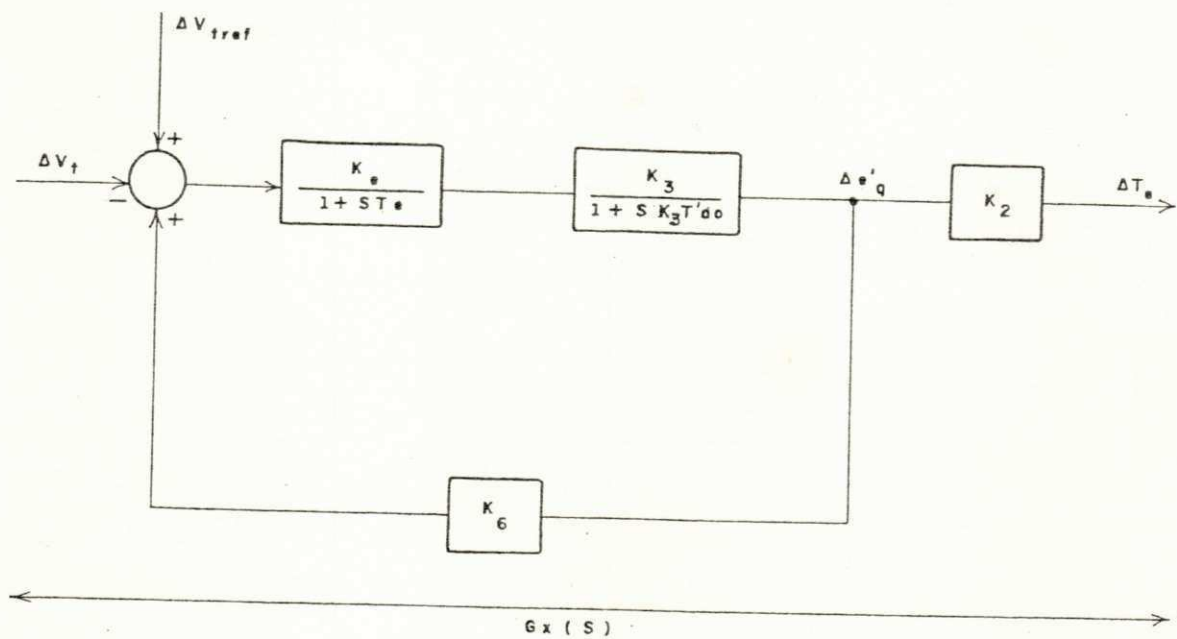


Fig. III.3.3 Representação aproximada de máquina/sistema de excitação

Sendo:

$$G_x(s) = \frac{K_2 K_e / T'_e}{s^2 + [(T_e + K_3 T'_do) / K_3 T'_do] s + K_6 K_e / T'_e} \quad (\text{III.3.3})$$

que pode também ser escrita na forma seguinte:

$$G_x(s) = \frac{K_2 K_e / T'_e}{d(s)} \quad (\text{III.3.4})$$

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior
Coordenação Setorial de Pós-Graduação
Rua Aprígio Veloso, 882 Tel (083) 321 7222-R 355
58.100 - Campina Grande - Paraíba

onde:

$$K_2 = K_I \{ R_{eq} \cdot V_{xo} + I_{qo} [R_{eq}^2 + (X_q + X_{eq})^2] \} ,$$

$$K_3 = 1 / [1 + K_I (x_d - x'_d) (X_q + X_{eq})]$$

$$K_6 = (V_{qo}/V_{to}) [1 - K_I X'_d (X_q + X_{eq})] - (V_{do}/V_{to}) K_I X_q R_{eq} ,$$

com,

$$K_I = 1 / [R_{eq}^2 + (X_q + X_{eq}) (X'_d + X_{eq})]$$

o índice (o) corresponde ao ponto de operação inicial.

Para qualquer frequência de oscilação, ω , de interesse, $d(j\omega)$ fornece a fase, γ , do conjunto máquina/sistema de excitação.

Os parâmetros do compensador dinâmico são calculados pela teoria de controle clássico [21 e 28] de maneira que seja introduzido no sistema o ângulo em atraso desejado na frequência predominante do sistema. Esta frequência é estimada pela oscilação da potência terminal da máquina, quando o sistema de potência é submetido a uma pequena variação do carregamento. Para compensação de θ graus tem-se as se

guintes equações para encontrar-se os parâmetros do compensador.

$$T_2 = 1 / \omega \sqrt{a} \quad (\text{III.3.5})$$

onde:

ω = frequência angular predominante,

$$a = \frac{1 + \text{sen } \theta}{1 - \text{sen } \theta} \quad (\text{III.3.6})$$

$$T_1 = a T_2 \quad (\text{III.3.7})$$

A figura III.3.4. é a representação de um modelo linearizado de uma máquina alimentando uma barra infinita, incluindo o sinal estabilizante, derivado da velocidade da máquina.

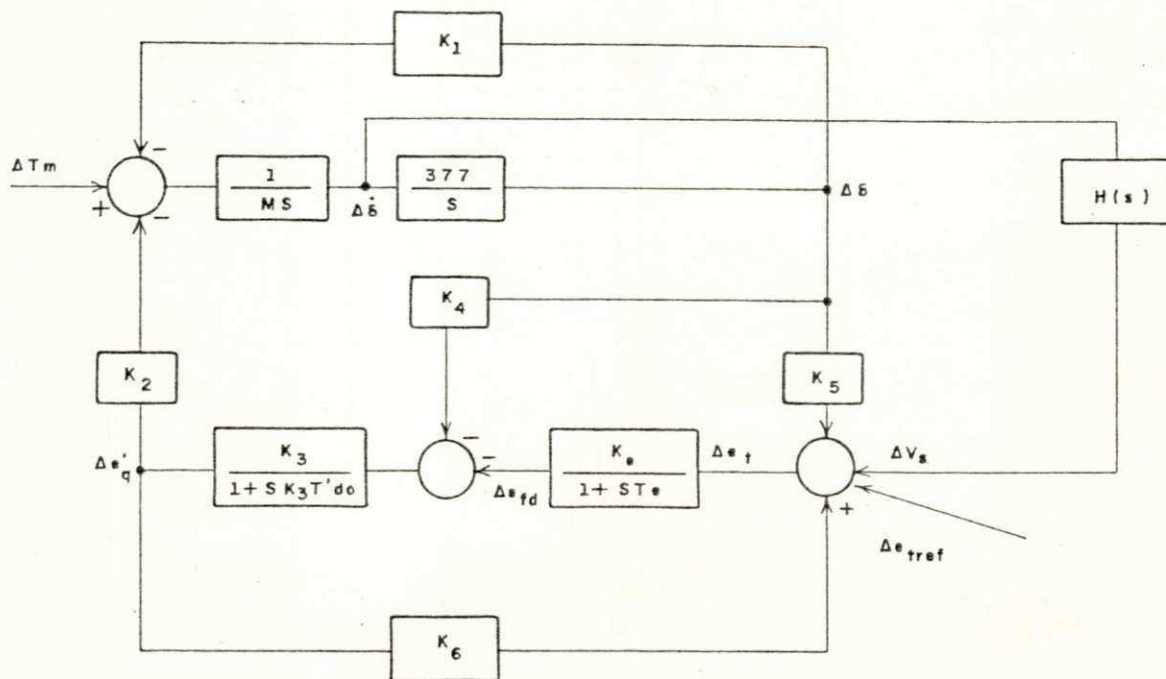


Fig. III.3.4 Modelo linearizado de um sistema de potência incluindo-se sinal estabilizante

$H(s)$ é a função de transferência do sinal estabilizante dada pela equação (III.3.1) em cujas características estamos interessados, de maneira que se consiga amortecimento satisfatório dentro de uma determinada faixa de parâmetros da máquina, do sistema e também das condições de operação.

Considerando-se:

$$F_1(s) = \frac{-K_e}{(1+sT_e)} \quad (\text{III.3.8})$$

e

$$F_2(s) = \frac{K_3}{1 + sK_3T'_{do}} \quad (\text{III.3.9})$$

pode-se encontrar as expressões para os torques de amortecimento e sincronizante como segue:

$$\Delta T_s = \text{Real}_{s=j\omega} \left\{ \left[\frac{F_1(s) \cdot F_2(s) \cdot K_2}{1 + F_1(s)F_2(s) \cdot K_6} \right] \left[-K_5 + \frac{sH(s)}{377} - \frac{K_4}{F_1(s)} \right] \right\} \quad (\text{III.3.10})$$

$$\Delta T_D = I_{\text{mag}} \left\{ \left[\frac{F_1(s) \cdot F_2(s) \cdot K_2}{1 + F_1(s) \cdot F_2(s) \cdot K_6} \right] \left[-K_5 + \frac{sH(s)}{377} - \frac{K_4}{F_1(s)} \right] \frac{377}{\omega} \right\} \quad (\text{III.3.11})$$

Em frequências de oscilação baixas, indicativo de torques sincronizantes fracos, a função de transferência do conjunto máquina-regulador de tensão tem um ângulo de atraso bem pequeno. Nestes casos, o compensador dinâmico deve ter, correspondentemente, um pequeno ângulo de adiantamento para fornecer amortecimento sem prejudicar o torque sincronizante da máquina.

Em frequências de oscilação altas, o ângulo do conjunto máquina-regulador de tensão se torna altamente atrasado e não há perigo em aumentar o ângulo de compensação.

Seja θ o ângulo em avanço de $H(s)$, em uma dada frequência de oscilação ω , e γ o ângulo em atraso da função de transferência de máquina/regulador de tensão, $\Delta T_e / \Delta e_{tref}$, na mesma frequência.

A relação entre as amplitudes do torque sincronizante, T_s e do torque de amortecimento, T_D , na frequência produzida pelo sinal estabilizante, é [9]:

$$\frac{T_s}{T_D} = \frac{\text{sen}(\gamma - \theta)}{\text{cos}(\gamma - \theta)} \quad (\text{III.3.12})$$

Num sistema de potência, há muitos modos de oscilação entre máquinas; estes modos podem mudar com as condições de carregamento e mudanças na configuração do sistema de potência. Logo, não existe uma maneira para se desenvolver uma função de transferência de um sinal estabilizante que seja aplicável universalmente e que possa ser ótima para grandes faixas de valores de parâmetros da máquina, do sistema e condições de operação. O que se pode conseguir é uma função de transferência que possa fornecer amortecimento onde o mesmo é necessário, sem que o amortecimento naqueles casos onde não há necessidade particular de fornecê-lo adicionalmente, seja prejudicado.

Desde que a diferença entre os ângulos θ e γ , esteja na faixa $\pm 30^\circ$ [9] resultados satisfatórios poderão ser obtidos para uma implementação real.

CAPÍTULO IV

Projeto de Estabilizadores de Sistemas de Potência Considerando-se as Interações Dinâmicas entre as Máquinas

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior
Coordenação Setorial de Pós-Graduação
Rua Aprígio Veloso 832 - Tel (083) 321 7222-R 355
58.100 - Campina Grande - Paraíba

IV.1 Introdução

Este capítulo apresenta uma técnica para projeto de sinais estabilizantes convencionais derivados da velocidade da máquina levando em consideração o mútuo acoplamento entre as máquinas do sistema. Esta técnica usa otimização no cálculo dos parâmetros de sinais estabilizantes.

IV.2 Interações Dinâmicas em um sistema de Várias Máquinas

Os efeitos das interações dinâmicas entre os vários modos de oscilação de um sistema de potência de várias máquinas são considerados como segue:

O diagrama de blocos de uma máquina genérica i , de um sistema de potência é apresentado na figura IV.2.1 e é semelhante àquele da referência [9], porém com as interações dinâmicas incluídas. Tais interações são apresentadas em termos dos ângulos das máquinas, tensões e coeficientes

que são funções dos parâmetros do sistema e condições de operação. A modelagem da rede de transmissão e interligação com as máquinas será mostrada no apêndice 2.

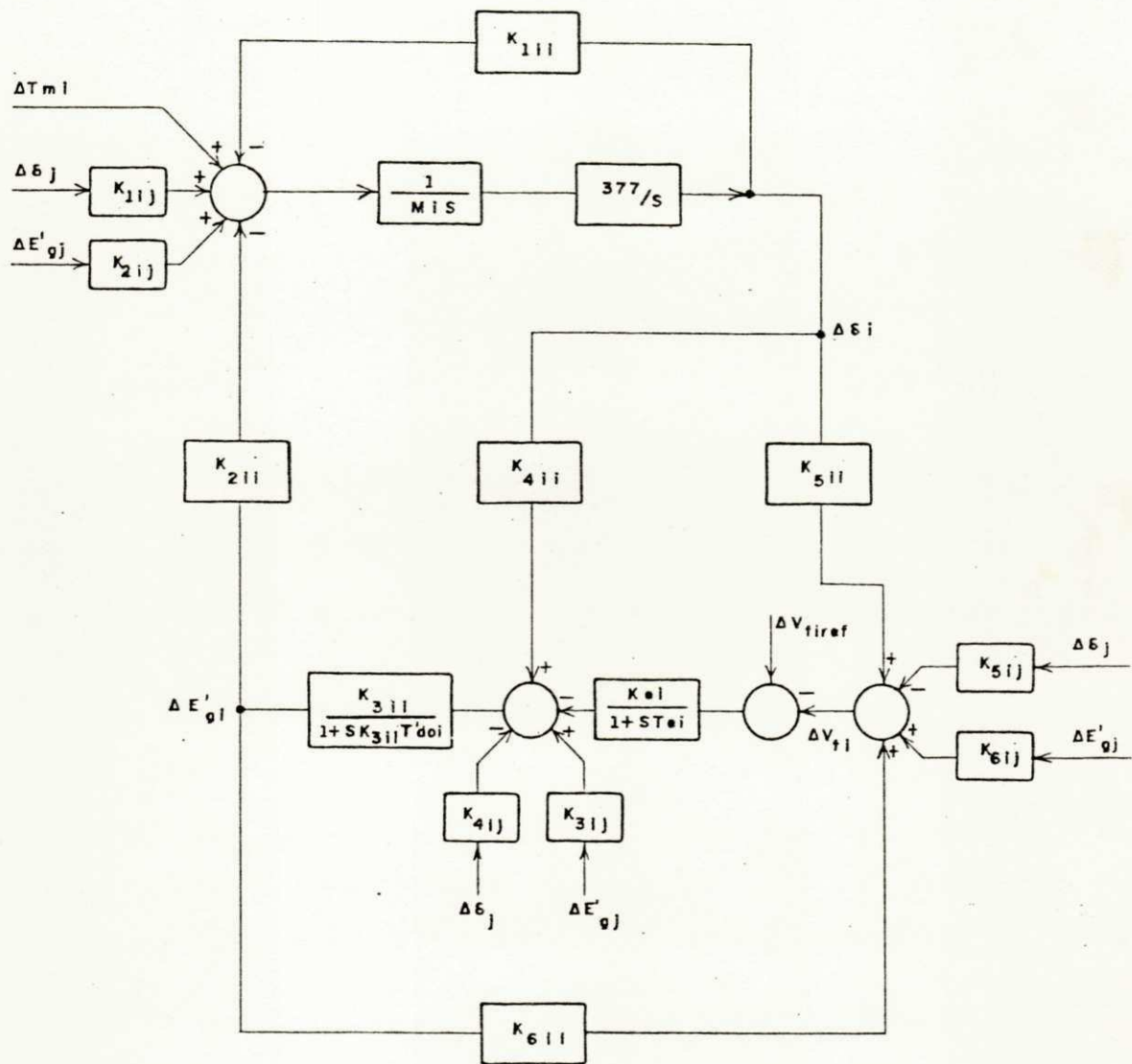


Fig. IV.2.1 Modelo linearizado de uma máquina genérica i de um sistema de potência com várias máquinas considerando-se o efeito das interações dinâmicas.

Com,

$$j = 1, 2, \dots, NG \quad j \neq i$$

onde:

N é o número de máquinas do sistema.

Os conceitos desenvolvidos no capítulo III são agora aplicados, porém de forma generalizada. Inicialmente, calculam-se os torques de amortecimento e sincronizante equivalentes levando-se em consideração as interações dinâmicas.

Através da maximização do torque de amortecimento equivalente, usando-se o método de Fletcher-Reeves, os parâmetros dos sinais estabilizantes serão computados.

IV.2.1 Efeitos das Interações Dinâmicas na Máquina-i.

No capítulo III formulou-se uma maneira de se calcular os torques de amortecimento e sincronizante como função dos parâmetros do sinal estabilizante derivado da velocidade da máquina, para um sistema de potência representado por uma máquina e uma barra infinita. O modelo linearizado que usou-se foi o apresentado em [9], que inclui o efeito do regulador de tensão/sistema de excitação. A este modelo

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior
Coordenação Setorial de Pós-Graduação
Rua Aprígio Veloso 832 Tel (83) 321 7222-R 355
58.100 - Campina Grande - Paraíba

foi adicionado um sinal estabilizante derivado da velocidade da máquina.

Mostrou-se que a componente de torque produzida por K_4 é desprezível devido sua contribuição ser muito pequena para o amortecimento. As expressões desenvolvidas para os torques de amortecimento e sincronizante foram analisadas levando-se em consideração a frequência de oscilação do sistema tanto alta como baixa. Estas análises foram muito importantes porque deixaram claramente identificada a origem dos torques de amortecimento e sincronizante para várias faixas de frequências.

O mesmo modelo usa-se agora e admite-se a mesma análise, sendo que as interações dinâmicas são incluídas. A figura IV.2.2 mostra o diagrama de blocos de um sistema de potência com várias máquinas, levando em consideração o acoplamento dinâmico de uma máquina "j" em uma máquina "i".

A função $H_j(s)$ é a mesma mostrada na equação III.3.1.

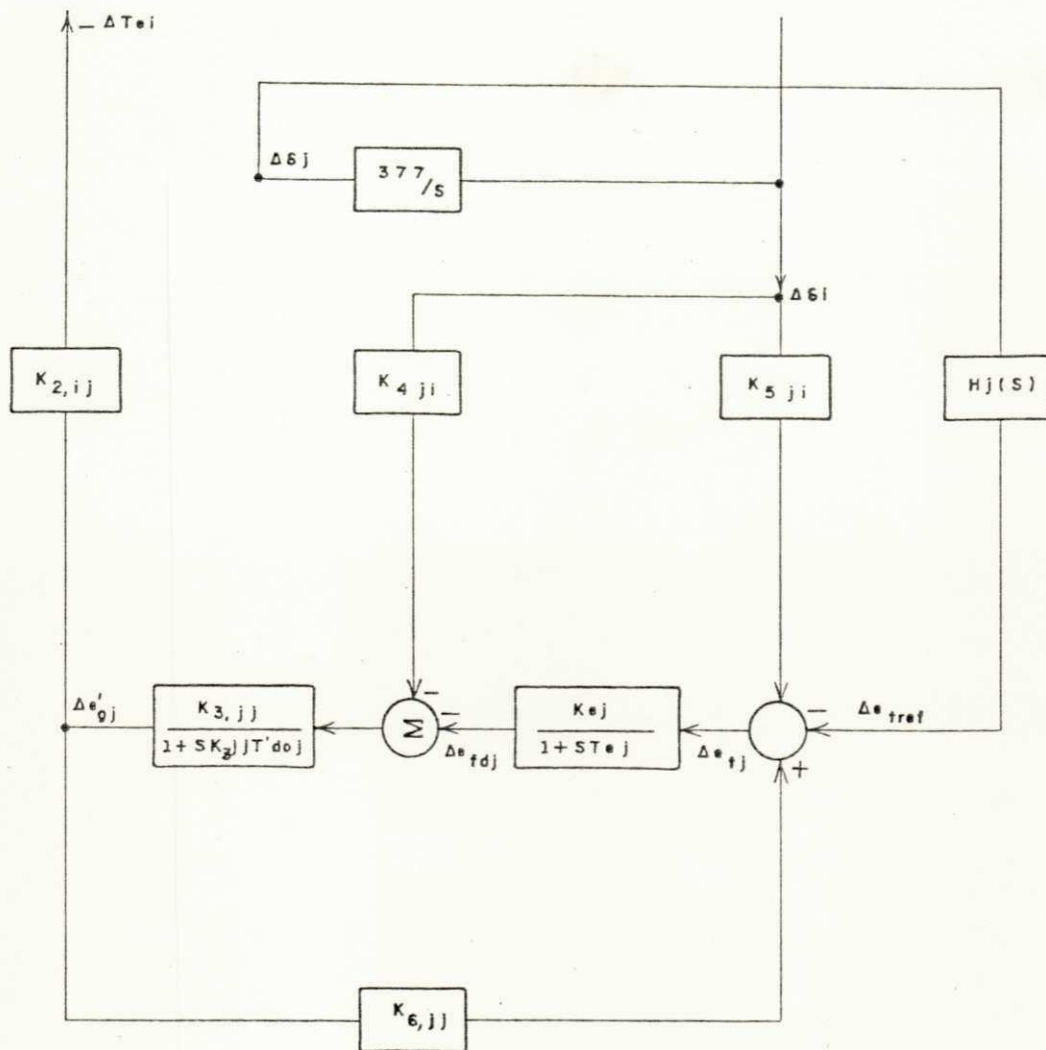


Fig. IV.2.2 Acoplamento dinâmico entre os modos de oscilação da máquina "j" na máquina "i".

Da figura anterior pode-se calcular a componente de torque elétrico da máquina *i* devido à contribuição das outras máquinas e conseqüentemente as componentes de torques de amortecimento e sincronizante equivalentes.

$$\Delta T_{Di} = \text{IMAG}_{s=j\omega_i} \left\{ \left[\frac{F_{1i}(s) \cdot F_{2i}(s) \cdot K_{2,ii}}{1 + F_{1i}(s) \cdot F_{2i}(s) \cdot K_{6,ii}} \right] \left[K_{5,ii} - \frac{K_{4,ii}}{F_{1i}(s)} - \frac{sH_i(s)}{377} \right] \frac{377}{\omega_i} \right\} +$$

$$\sum_{\substack{NG \\ i \neq j}} \text{IMAG}_{s=j\omega_j} \left\{ \left[\frac{F_{1j}(s) \cdot F_{2j}(s) \cdot K_{2,ij}}{1 + F_{1j}(s) \cdot F_{2j}(s) \cdot K_{6,jj}} \right] \left[K_{5,ji} - \frac{K_{4,ji}}{F_{1j}(s)} - \frac{sH_j(s)}{377} \right] \frac{377}{\omega_j} \right\}$$

(IV.2.1)

$$\Delta T_{si} = \text{Real}_{s=j\omega_i} \left\{ \left[\frac{F_{1i}(s) \cdot F_{2i}(s) \cdot K_{2,ii}}{1 + F_{1i}(s) \cdot F_{2i}(s) \cdot K_{6,ii}} \right] \left[K_{5,ii} - \frac{K_{4,ii}}{F_{1i}(s)} - \frac{sH_i(s)}{377} \right] \right\} +$$

$$\sum_{\substack{NG \\ i \neq j}} \text{IMAG}_{s=j\omega_j} \left\{ \left[\frac{F_{1j}(s) \cdot F_{2j}(s) \cdot K_{2,ij}}{1 + F_{1j}(s) \cdot F_{2j}(s) \cdot K_{6,jj}} \right] \left[K_{5,ji} - \frac{K_{4,ji}}{F_{1j}(s)} - \frac{sH_j(s)}{377} \right] \right\}$$

(IV.2.2)

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA
 Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior
 Coordenação Setorial de Pós-Graduação
 Rua Aprígio Veloso, 832 Tel (083) 321 7222-R 355
 58.100 - Campina Grande - Paraíba

onde:

N_G é o número de geradores do sistema de potência.

$$K_{1,ii} = \sum_{i \neq j}^{NG} K_{1,ij}$$

$$K_{1,ij} = E'_{qi} \cdot E'_{qj} \cdot Y_{ij} \cdot S_{ij}$$

$$K_{2,ii} = 2E'_{qi} G_{ii} - \sum_{i \neq j}^{NG} E'_{qj} \cdot Y_{ij} \cdot C_{ij}$$

$$K_{2,ij} = -E'_{qi} \cdot Y_{ij} \cdot C_{ij}$$

$$K_{3,ii} = 1/[1 - (x_{di} - x'_{di}) B_{ii}]$$

$$K_{3,ij} = 1/[(x_{di} - x'_{di}) E'_{qi} Y_{ij} C_{ij}]$$

$$K_{4,ii} = \sum_{i \neq j}^{NG} K_{4,ij}$$

$$K_{4,ij} = (x_{di} - x'_{di}) E'_{qi} Y_{ij} C_{ij}$$

$$K_{5,ii} = \sum_{i \neq j}^{NG} K_{5,ij}$$

$$K_{5,ij} = E'_{qj} \cdot x'_{di} \cdot Y_{ij} \cos(\beta_{ij} + \delta_{ij} - \gamma_i)$$

$$K_{6,ii} = \cos \gamma_i - x'_{di} Y_{ii} \sin(\beta_{ii} - \gamma_i)$$

$$K_{6,ij} = x'_{di} Y_{ij} \sin(\beta_{ij} + \delta_{ij} - \gamma_i)$$

$$S_{ij} \stackrel{\Delta}{=} \text{sen} (\beta_{ij} + \delta_{ij})$$

$$C_{ij} \stackrel{\Delta}{=} \text{cos} (\beta_{ij} + \delta_{ij})$$

$$\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$$

$$\gamma_i \stackrel{\Delta}{=} \tan^{-1} \frac{V_{di}}{V_{qi}}$$

$$F_{1i}(s) = \frac{K_{ei}}{1 + sT_{ei}}$$

$$F_{1j}(s) = \frac{K_{ej}}{1 + sT_{ej}}$$

$$F_{2i}(s) = \frac{K_{3,ii}}{1 + sT'_{doi} K_{3ii}}$$

$$F_{2j}(s) = \frac{K_{3,jj}}{1 + sT'_{doj} K_{3jj}}$$

IV.3 Técnica de Otimização

Sabe-se que os sistemas de excitação estáticos devido ao seu alto ganho melhoram a potência sincronizante das máquinas e em contrapartida decrescem o torque de amortecimento líquido das mesmas. Deve-se então usar sinais estabilizantes os quais introduzem dentro do regulador de tensão torques de amortecimento positivo. Para uma computação ótima dos parâmetros dos sinais estabilizantes sugere-se a maximização do torque de amortecimento equivalente em sistemas de potência de várias máquinas.

Para a solução deste problema, optou-se pelo método de Fletcher-Reeves, por ser um método de rápida convergência e que se adapta a este tipo de problema. Este método é processado através de uma sequência de pesquisas unidimensional feitas em direções que são determinadas pelas derivadas parciais da função objetiva. Os vetores de pesquisa são determinados de maneira que cada um é uma função do vetor gradiente atualizado e do vetor de pesquisa anterior [2,3].

De um ponto de pesquisa inicial arbitrário, X_k , (onde K é uma variável que conta as iterações necessárias para se calcular o valor do escalar β) localiza-se uma sequência de pontos que estão sucessivamente mais perto do mínimo. O novo ponto é dado por: $X_{k+1} = X_k + \alpha_k d_k$, onde α_k é

um escalar positivo que define a distância entre X_k e X_{k+1} ao longo do vetor direção de pesquisa d_k .

O algoritmo completo pode ser descrito como segue:

1º passo: Dado um ponto inicial de pesquisa X_k , calcula-se o gradiente da função objetiva, f , no ponto dado, como: $g_k = \nabla f(X_k)$ e faz-se o vetor direção inicial de pesquisa, d_k igual a $-g_k$.

2º passo: Faz-se a pesquisa linear ao longo do vetor direção de pesquisa, d_k , para encontrar-se o novo ponto de pesquisa X_{k+1} tal que $f(X_{k+1}) = \min_{\alpha_k} f(X_k + \alpha_k d_k)$, ou seja, $X_{k+1} = X_k + \alpha_k d_k$ onde, α_k minimiza $f(X_k + \alpha_k d_k)$.

3º passo: Calcula-se o novo gradiente da função no ponto atualizado; $g_{k+1} = \nabla f(X_{k+1})$

4º passo: Se $k < n$, calcula-se

a) o escalar
$$\beta_k = \frac{g_{k+1}^T \cdot g_{k+1}}{g_k^T \cdot g_k}$$

b) a nova direção de pesquisa
$$d_{k+1} = -g_{k+1} + \beta_k d_k$$

5º passo: Atualiza-se o vetor de pesquisa X e o vetor gradiente g até que as condições satisfatórias para finalizar a pesquisa sejam encontradas, ou (se não encontradas) o número de iterações máximo seja atingido.

IV.3.1 Formulação das Restrições

Nossa função objetiva, $f(x)$, será a expressão do torque de amortecimento equivalente (IV.2.1), sendo x o vetor cujos elementos são os parâmetros dos sinais estabilizantes mostrados em $H(s)$, equação III.3.1.

A escolha das restrições está justificada no capítulo III, onde desenvolveu-se todos os conceitos necessários à compreensão da formulação do problema e sua resolução.

No item III.3 apresentou-se a relação entre as amplitudes de T_s e T_D na equação:

$$\frac{T_s}{T_D} = \frac{\text{sen} (\gamma - \theta)}{\text{cos} (\gamma - \theta)} \quad (\text{IV.2.3})$$

Lã, foi dito também que resultados satisfatórios de amorteci-
 mento-das-oscilações-do-sistema-poderão-ser obtidos se $(\gamma - \theta)$
 está na faixa de $\pm 30^\circ$. A partir daí, formula-se agora as
 restrições sob as quais a função objetiva está submetida.

Para uma máquina genérica i a equação anterior
 fica da forma:

$$\frac{T_{Si}(x)}{T_{Di}(x)} = \frac{\text{sen}(\gamma_i - \theta_i)}{\text{cos}(\gamma_i - \theta_i)} = \text{tg}(\gamma_i - \theta_i)$$

(IV.2.4)

Como, $-30^\circ \leq (\gamma_i - \theta_i) \leq 30^\circ$ pode-se dizer que:

$$-\frac{1}{\sqrt{3}} \leq \text{tg}(\gamma_i - \theta_i) \leq \frac{1}{\sqrt{3}},$$

e a equação (IV.2.4) torna-se na seguinte inequação:

$$-\frac{1}{\sqrt{3}} \leq \frac{T_{Si}(x)}{T_{Di}(x)} \leq \frac{1}{\sqrt{3}}$$

Deixando-se o ângulo de atraso θ de máquina/sistema de exci-
 tação em forma de inequação, tem-se agora para uma máquina
 genérica i , o seguinte:

$$-30^\circ \leq (\gamma_i - \theta_i) \leq 30^\circ,$$

ou

$$\gamma_i - 30^\circ \leq \theta_i \leq \gamma_i + 30^\circ ,$$

onde

$$(i=1, \dots , NG)$$

Agora pode-se organizar as restrições consideradas como segue:

$$a) \quad \frac{-1}{\sqrt{3}} \leq \frac{T_{Si}(x)}{T_{Di}(x)} \leq \frac{1}{\sqrt{3}} \quad i=1, \dots, NG$$

$$b) \quad \gamma_i - 30^\circ \leq \theta_i \leq \gamma_i + 30^\circ$$

$$c) \quad T_{Si}(x) > 0$$

$$d) \quad T_{Di}(x) > 0$$

As restrições c e d são tiradas do item 3.2.

O fluxograma da figura IV.2.3 mostra a lógica necessária para calcular os parâmetros dos sinais estabilizantes nas frequências predominantes do sistema e determinar a condição de operação.

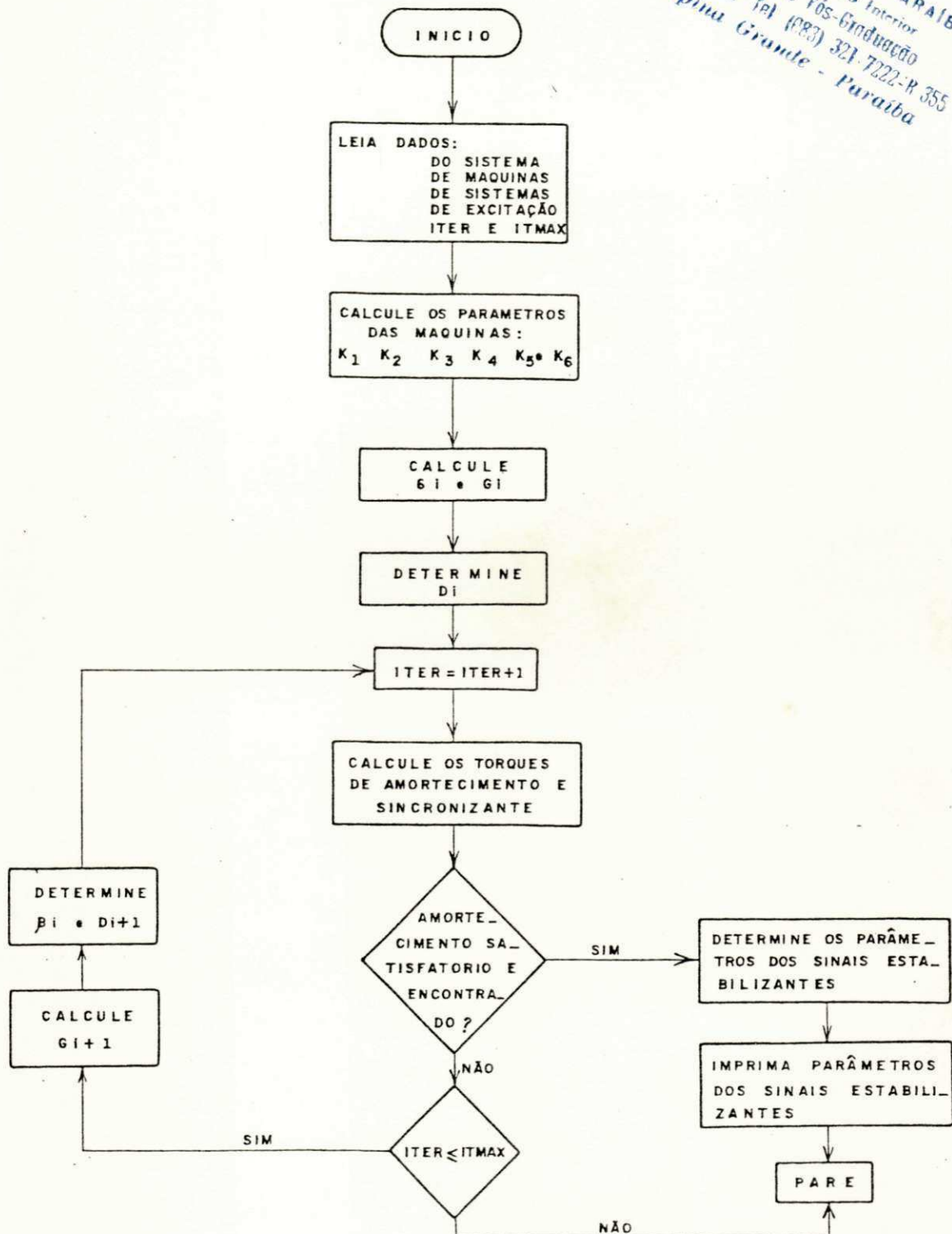


Fig. IV.2.3 Fluxograma para projetos de sinais estabilizantes convencionais derivados da velocidade da máquina.

CAPÍTULO V

Aplicação em Sistemas Realísticos de Estabilizadores Baseados em Técnicas de Controle Clássico e Otimização

V.1 Introdução

Dois exemplos de sistemas de potência de várias máquinas foram escolhidos para ilustrar as técnicas desenvolvidas anteriormente. O primeiro sistema, sistema 1, consiste de três máquinas e uma barra infinita. O sistema 2 é o Oeste da CHESF em 500 kV. Estes exemplos são usados para mostrar como a teoria de controle clássico pode ser aplicada para melhorar o comportamento dinâmico de grandes sistemas de potência.

V.2 Sistema 1

Este exemplo é um sistema de potência de três máquinas que é parte de um grande sistema representado por uma barra infinita.

Um diagrama esquemático do mesmo é mostrado na figura V,2.1. Cada máquina é equipada com sistema de excita

ção de alta velocidade de resposta.

Dados do Sistema 1

Dados de Linhas de Transmissão (em PU, base de 100 MVA e tensões do sistema)

Barra	Barra	R	X	Y
1	6	0.0101	0.0615	0.800
3	6	0.0057	0.0460	0.0980
3	5	0.0836	0.2360	0.1856
3	4	0.0628	0.1100	0.3654
4	5	0.0033	0.0313	1.1440
2	5	0.0255	0.1720	0.6500
1	2	0.0856	0.2360	0.1856

Resultados de um Fluxo de Cargas

Barra	Tensão		Geração	
	Módulo	Ângulo	Ativa	Reativa
1	1.01	2.62	1.70	-0.64
2	1.00	7.17	0.72	-0.18
3	1.01	7.16	1.35	-0.70
4	1.02	0.00	1.43	1.38

Dados de Carga (PU - 100 MVA)

Barra	Tensão		Carga	
	Módulo	Ângulo	Ativa	Reativa
5	0.95	-4.3	4.28	2.14
6	1.00	8.1	0.99	0.45

Dados dos Geradores (PU- 100 MVA e Tensão da Máquina)

Máquina	X'_d	X_1	X_g	X_d	H	T'_{do}
1	0.093	0.120	0.900	0.950	8.2	6.2
2	0.179	0.200	1.680	1.750	4.3	5.2
3	0.114	0.100	0.800	0.825	6.3	4.8

Dados do Sistema de Excitação (PU do Sistema de Tensão Unitária) Ver Figura V.2.2

Máquina	K_A	T_A	V_{MAX}	V_{MIN}
1	200	0.05	5.0	-5.0
2	50	0.04	5.0	-5.0
3	100	0.02	5.0	-5.0

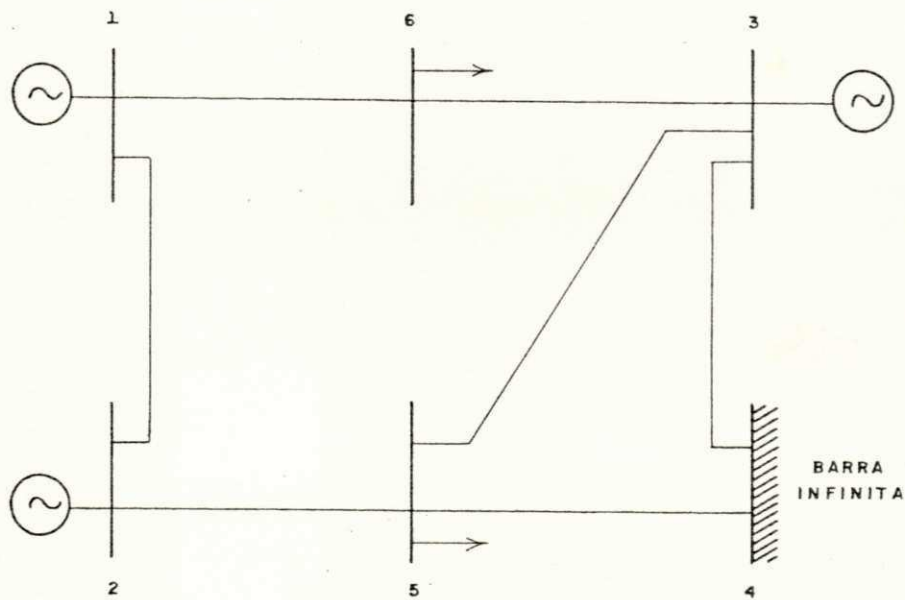


Fig. V.2.1 Sistema de Potência de 3 máquinas, que é parte de um grande sistema modelado com uma barra infinita.

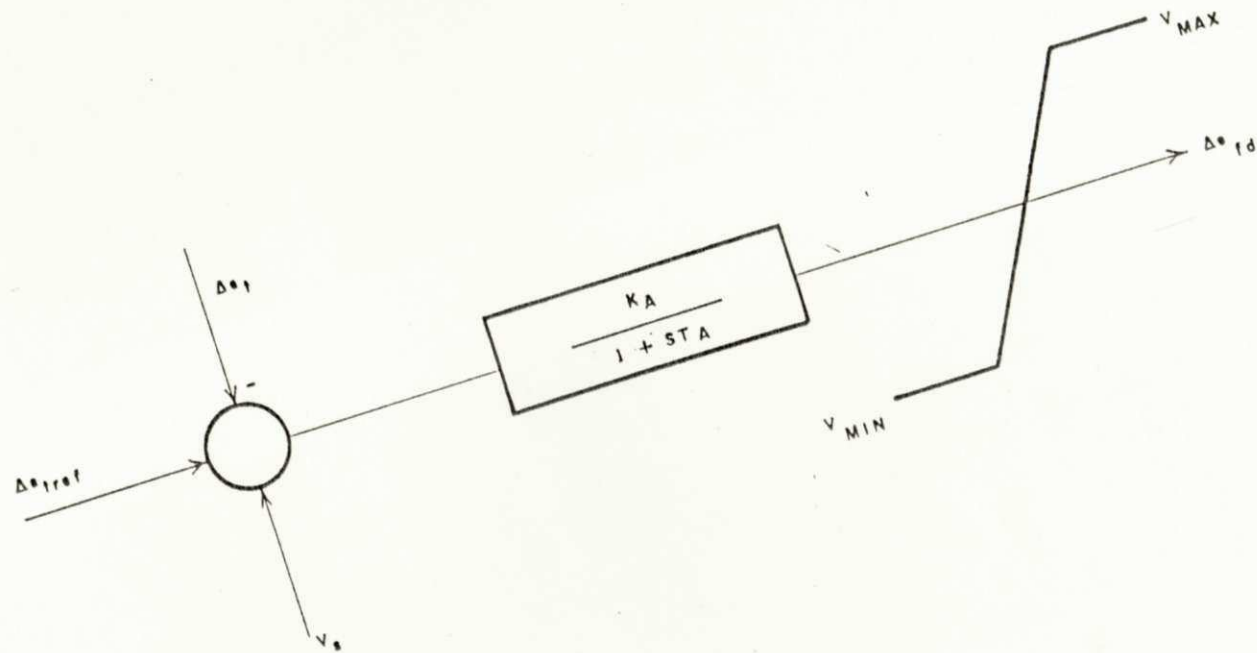


Figura V.2.2 Circuito do Controle de Excitação
 Sistema do Exemplo 1
 Constantes em PU do Sistema de Tensão Unitária

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA
 Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior
 Coordenação Setorial de Pós-Graduação
 Rua Aprígio Veloso, 832 - Tel (083) 321-7222-R 355
 58.100 - Campina Grande - Paraíba

V.3 Sistema 2

Este exemplo consiste do sistema oeste da Campanhia Hidroelétrica do São Francisco (CHESF), em 500 kV. A figura V.3.1 mostra a configuração do sistema composto de 29 barras, 24 geradores e 4 compensadores síncronos.

Aqui, vários geradores iguais são reunidos em vários grupos e ligados em uma barra comum. Eles são representados por uma máquina equivalente cujos parâmetros são obtidos como se os parâmetros correspondentes das máquinas individuais fossem conectadas em paralelo. A constante de inércia equivalente é a soma das constantes de inércia das máquinas individuais.

Dados do Sistema 2

Dados de Linhas de Transmissão (PU=100 MVA e tensões do sistema)

Barra	Barra	R	X	Y
27	26	0.0029	0.0417	4.3646
26	25	0.0018	0.0256	2.6056
25	24	0.0022	0.0313	3.2082
24	22	0.0019	0.0264	2.6840
22	29	0.0031	0.0454	4.7966

(continuação)

Barra	Barra	R	X	Y
10	11	0.0005	0.0028	0.0192
10	12	0.0105	0.0549	0.8598
12	13	0.0052	0.0271	0.4250
13	14	0.0139	0.0719	1.1379
14	15	0.0098	0.0559	0.8598
15	16	0.0372	0.2125	0.3682
16	17	0.0287	0.1634	0.2808
18	23	0.0147	0.0777	0.1271
17	18	0.0295	0.1554	0.2543
18	19	0.0362	0.1905	0.3117
19	20	0.0181	0.0953	0.1558
20	21	0.0087	0.0684	0.9172

Dados de Transformadores (PU - 100 MVA e tensões do sistema)

Barra	Barra	X
2	27	0.0044
10	27	0.0059
4	10	0.0655
5	10	0.0151
3	11	0.0389
9	15	0.0400
6	23	0.0588
7	21	0.0400

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
 Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior
 Coordenação Setorial de Pós-Graduação
 Rua Aprígio Veloso, 882 - Tel. (833) 321 7222-R 355
 58.100 - Campina Grande - Paraíba

(continuação)

Barra	Barra	X
8	28	0.0200
23	24	0.0300
21	22	0.0150
1	26	0.0112
28	29	0.0300

Dados de Reatores (PU - 100 MVA)

Barra	Y
14	-0.3
15	-0.4
16	-0.2
17	-0.2
18	-0.1
20	-0.2
22	-3.5
23	-0.2
24	-2.0
25	-2.0
26	-3.5
27	-3.0
29	-4.0

Resultados de um Fluxo de Cargas (Figura V.3.1)

Barra	Tensão		Geração	
	Módulo	Ângulo	Ativa	Reativa
1	1.020	2.80	8.75	0.208
2	1.040	0.00	22.34	-1.516
3	1.010	0.20	2.70	-0.840
4	1.040	1.20	2.07	-0.018
5	1.040	-0.10	7.40	-0.260
6	1.020	-13.20	1.80	0.322
7	1.000	-25.60	0.0	-0.461
8	1.040	-33.30	0.0	0.617
9	1.040	-49.40	0.0	1.154
10	1.049	-6.0	0.0	0.0
11	1.048	-5.5	-	-
12	1.022	-19.9	-	-
13	1.017	-26.3	-	-
14	1.010	-40.2	-	-
15	0.996	-49.4	-	-
16	0.965	-43.9	-	-
17	0.953	-36.5	-	-
18	0.977	-27.7	-	-
19	1.016	-29.9	-	-
20	1.032	-29.5	-	-
21	1.018	-25.6	-	-
22	1.014	-24.8	-	-
23	1.007	-19.1	-	-

(continuação)

Barra	Tensão		Geração	
	Módulo	Ângulo	Ativa	Reativa
24	1.017	-18.4	-	-
25	1.022	-9.9	-	-
26	1.022	-2.6	-	-
27	1.051	-5.2	-	-
28	1.028	-33.3	-	-
29	1.010	-33.3	-	-

Dados de Carga (PU - 100 MVA)

Barra	Carga	
	Ativa	Reativa
10	10.05	-1.94
12	0.31	0.12
13	0.72	0.12
14	0.37	-0.23
15	3.19	0.62
16	0.28	0.07
17	0.20	0.11
18	0.79	0.30
19	0.26	0.15
20	0.89	-0.17
23	0.30	0.18

(continuação)

Barra	Carga	
	Ativa	Reativa
25	0.27	0.13
26	2.48	0.12
27	20.80	-5.54
29	3.32	-1.43

Dados dos Geradores (PU - 100 MVA)

Máquina	X'_d	X_q	X_d	H	T'_{do}
1	0.0329	0.0566	0.0823	39.68	5.6
2	0.0121	0.0263	0.0344	122.02	5.0
3	0.0615	0.1489	0.2090	14.82	4.4
4	0.1167	0.2292	0.3479	13.01	5.5
5	0.0297	0.0682	0.1077	42.64	4.6
6	0.1286	0.2626	0.4234	7.65	4.0
7	0.35	0.90	1.5	2.25	9.0
8	0.175	0.45	0.75	4.50	9.0
9	0.350	0.90	1.50	2.25	9.0

Dados do Sistema de Excitação (PU do Sistema de Tensão Unitária) Ver Figura V.2.2 e V.3.2

Máquina	K_A	T_A	V_{MAX}	V_{MIN}	V'_{MAX}	V'_{MIN}	T_{M1}	T_{M2}	T_{M3}	T_{M4}
1	50	-	-	-	2.0	-1.5	-	-	0.196	0.026
2	300	-	4.0	4.0	-	-	2.0	20.0	-	-
3	300	-	3.28	-2.95	3.28	-2.95	-	-	2.0	20.0
7	400	-	-	-	7.0	-7.0	0.129	0.045	0.1	0.3
8	400	-	-	-	7.0	-7.0	0.129	0.045	0.1	0.3
9	400	-	-	-	7.0	-7.0	0.129	0.045	0.1	0.3

Dados do Sistema de Excitação. Ver Figura V.2.2 e V.3.2.

Máquina	K_A	T_A	V_{MAX}	V_{MIN}	K_E	T_E	A_X	B_X	μ_S	T_{SE}
4	400	0.04	3.5	-3.5	-0.17	0.95	0.0027	1.918	0.04	1.19
5	400	0.05	3.5	-3.5	-0.17	0.95	0.0027	1.918	0.04	1.00
6	400	0.04	3.5	-3.5	-0.17	0.95	0.0027	1.918	0.04	1.19

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA
Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior
Coordenação Setorial de Pós-Graduação
Rua Aprigio Veloso, 882 - Tel. (083) 321-7222-R 355
58.100 - Campina Grande - Paraíba

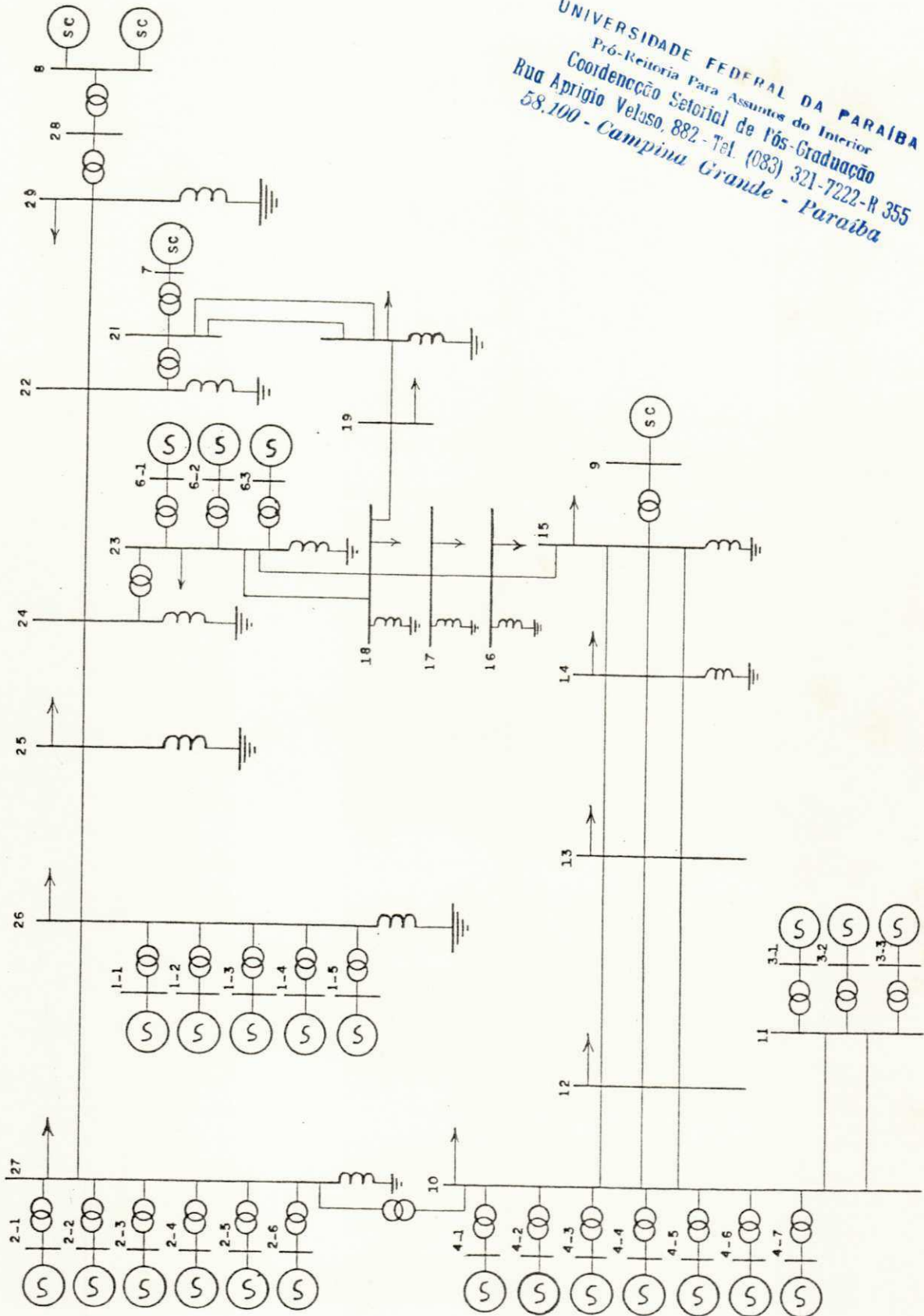


Figura V.3.1. Sistema 2

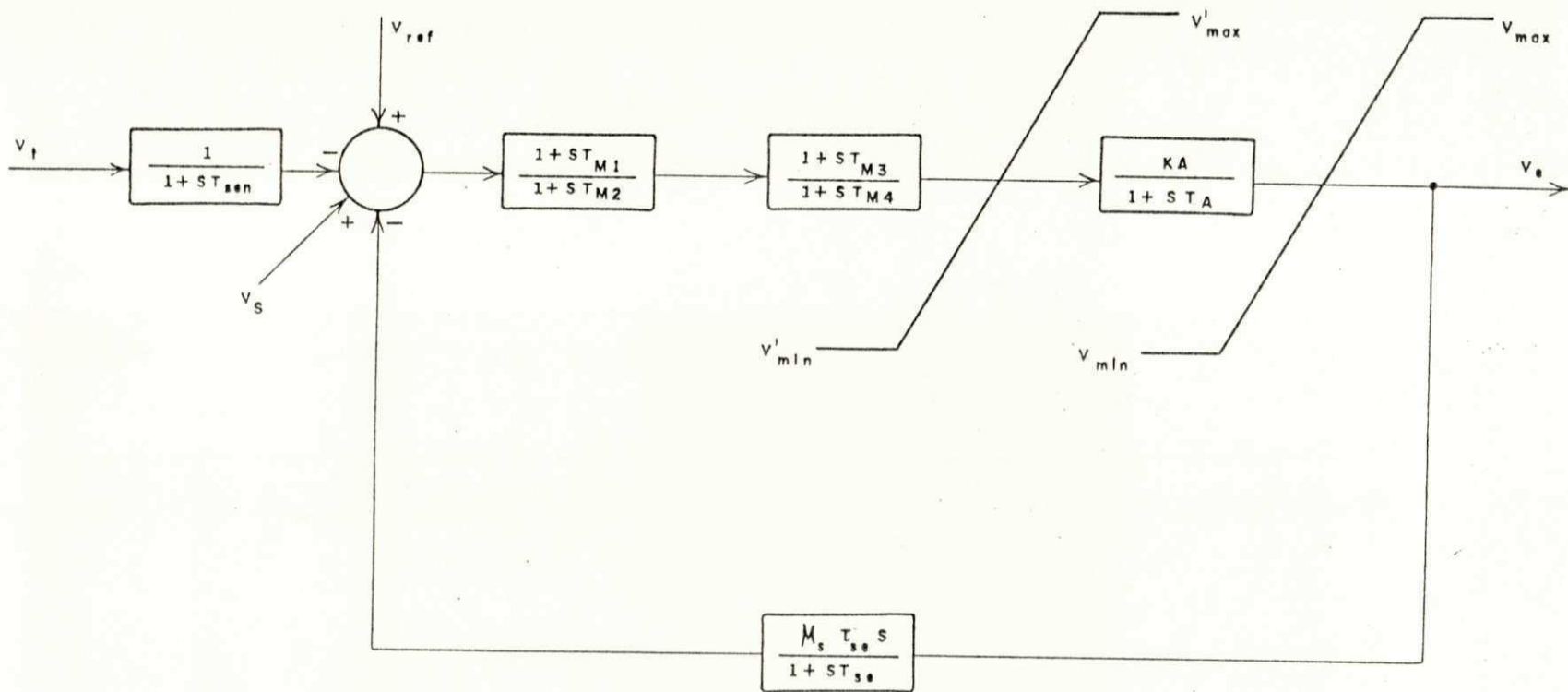


Figura V.3.2 Circuito do Controle de Excitação

Constantes em PU do sistema de Tensão Unitária

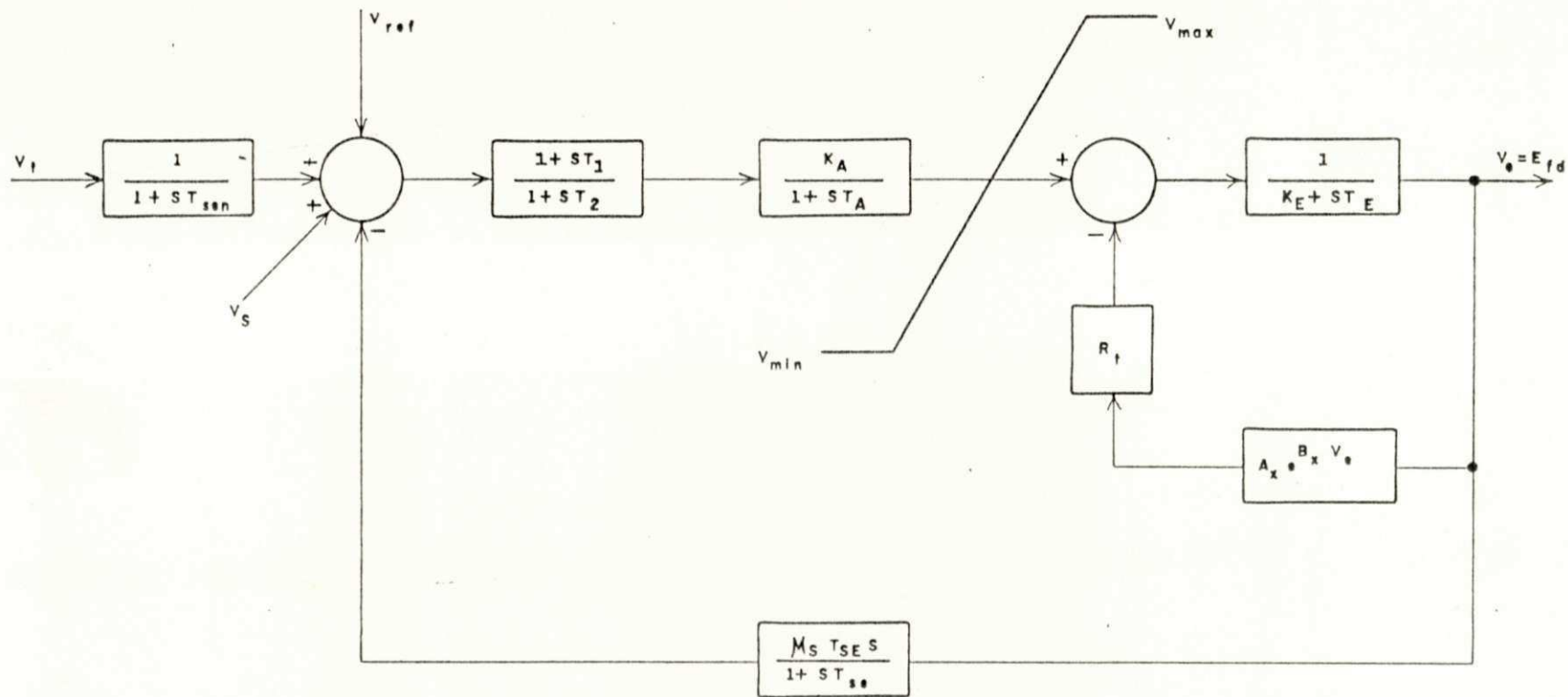


Figura V.3.3 Circuito do Controle de Excitação
 Sistema de Excitação Tipo 1-IEEE
 Constantes em PU do Sistema de Tensão Unitária

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
 Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior
 Coordenação Setorial de Pós-Graduação
 Rua Aprígio Veloso, 892, Tel. (083) 321 7222-4 355
 58.100 - Campina Grande - Paraíba

V.4 Apresentação de Resultados e Análises dos Estabilizadores.

Neste item apresenta-se os resultados de projetos e análises das simulações feitas com os sinais estabilizantes. Embora os projetos dos estabilizadores tenham sido baseados em modelos linearizados e simplificados, é esperado que os mesmos sejam eficientes no modelo não linear completo.

V.4.1 Simulação do Sistema 1.

Para este sistema simula-se um curto-circuito trifásico equilibrado na barra 6 (figura V.2.1), durante 0.1 segundos, nos seguintes casos:

- a) Nenhum sinal estabilizante é usado no sistema;
- b) Sinais estabilizantes (convencional) são usados em todas as máquinas pelo método apresentado em [9];
- c) Sinais estabilizantes (convencional) são usados em todas as máquinas pelo método proposto nesta pesquisa (ver capítulo IV).

A tabela I apresenta os parâmetros dos sinais estabilizantes usando a técnica apresentada em [9].

Tabela I

Máquina	K_g	T_1	T_2	T_g
1	0.1	0.3500	0.0464	1.5
2	0.1	0.1687	0.0562	1.5
3	0.1	0.2954	0.0642	1.5

A tabela II apresenta os parâmetros dos sinais estabilizantes usando a técnica proposta.

Tabela II

Máquina	K_g	T_1	T_2	T_g
1	0.1	0.21804	0.07443	1.5
2	0.1	0.10903	0.08696	1.5
3	0.1	0.26306	0.07212	1.5

Das simulações feitas com estabilizadores e sem estabilizadores os seguintes fatos foram observados:

a) Quando nenhum sinal estabilizante é implementado nos sistemas de excitação das máquinas, figuras V.4.1 e V.4.2 (ângulos de torque e tensões no campo respectivamente), tem-se uma resposta bastante oscilatória nos ângulos de torque. Isto é uma consequência da rápida resposta dos sistemas de excitação estática usados nas mesmas. A necessidade de sinais estabilizantes para amortecer estas oscilações é evidente.

b) Quando sinais estabilizantes (baseados em [9]) são implementados simultaneamente em todas as máquinas do sistema, (ver figura V.4.3), as respostas angulares das máquinas são mais amortecidas que aquelas mostradas na figura V.4.1, sem nenhum estabilizador adicional.

A figura V.4.4 mostra as tensões de excitação correspondentes a simulação da figura V.4.3.

c) Quando sinais estabilizantes são implementados simultaneamente em todas as máquinas (baseados no método proposto), as respostas

angulares das mesmas, (ver figura V.4.5.) ,
são também mais amortecidas do que aquelas
mostradas em V.4.1., (sem estabilização adi-
cional). A figura V.4.6. mostra a tensão de
excitação correspondente a esta simulação .

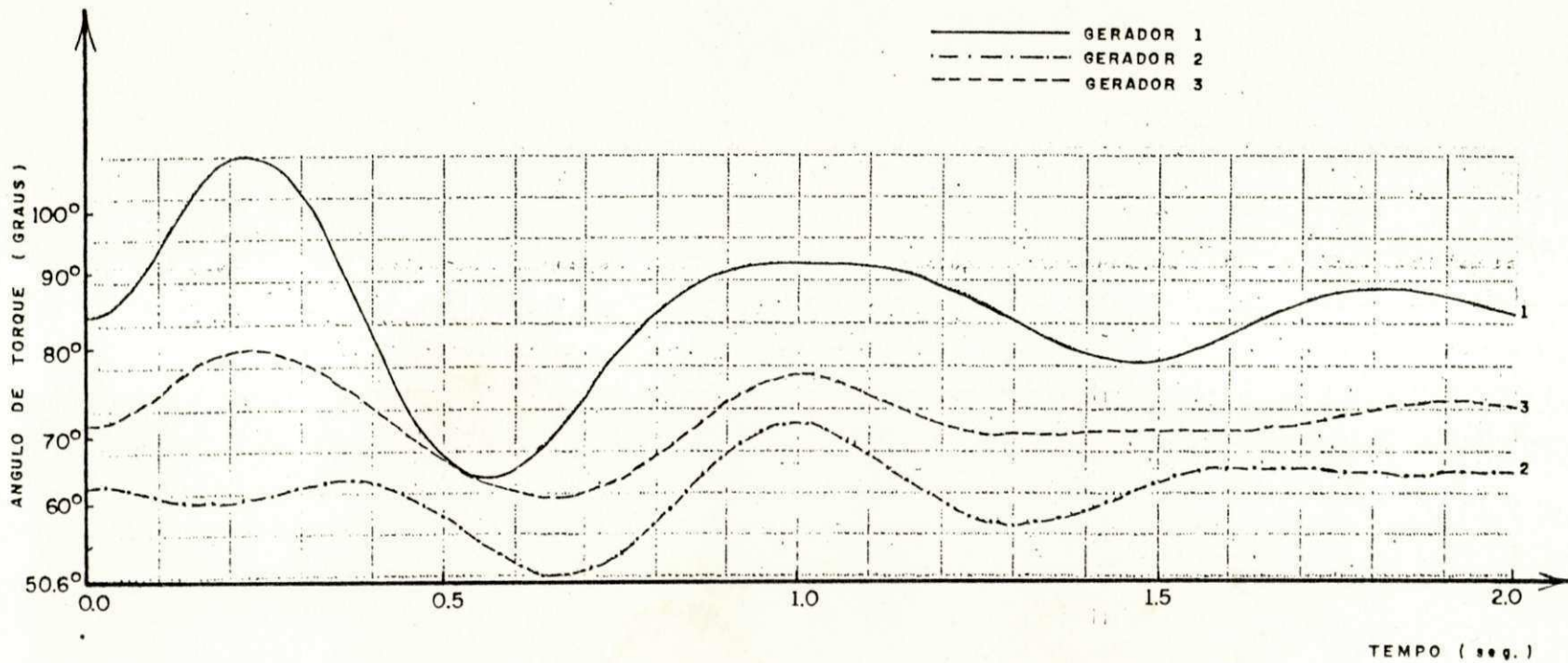


Figura V.4.1

: Curto-Circuito Trifásico Equilibrado na barra 6 durante 0.1 Seg.

Sistema do Exemplo 1

: Nenhum Sinal Estabilizante é Implementado.

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARÁIBA
 Pró-Reitoria de Assuntos do Interior
 Coordenação Setorial de Pós-graduação
 Rua Aprígio Veloso, 882 - Tel (083) 321-7222-R 355
 58.100 - Campina Grande - Paraíba

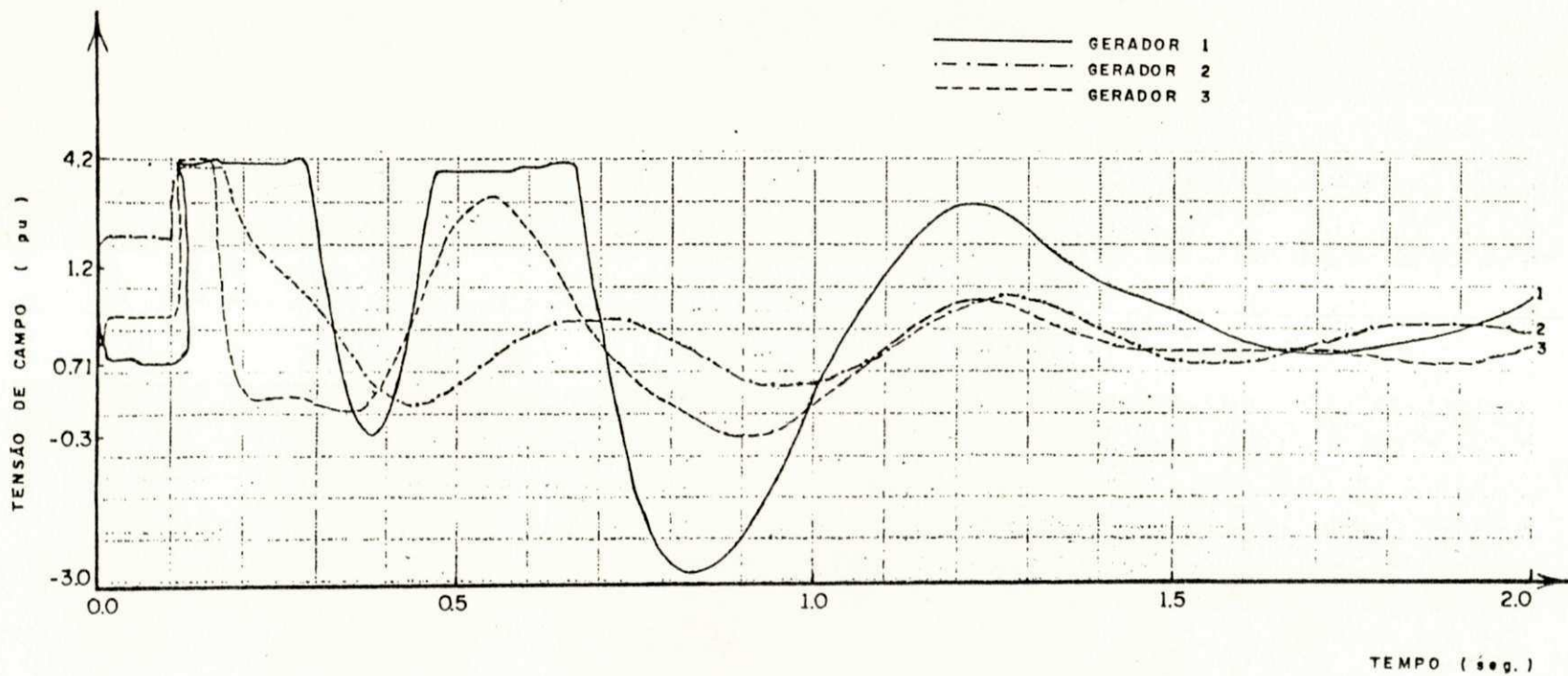


Figura V.4.2

: Curto-Circuito Trifásico Equilibrado na barra 6 durante 0.1 Seg.

Sistema do Exemplo 1

: Nenhum Sinal Estabilizante é Implementado.

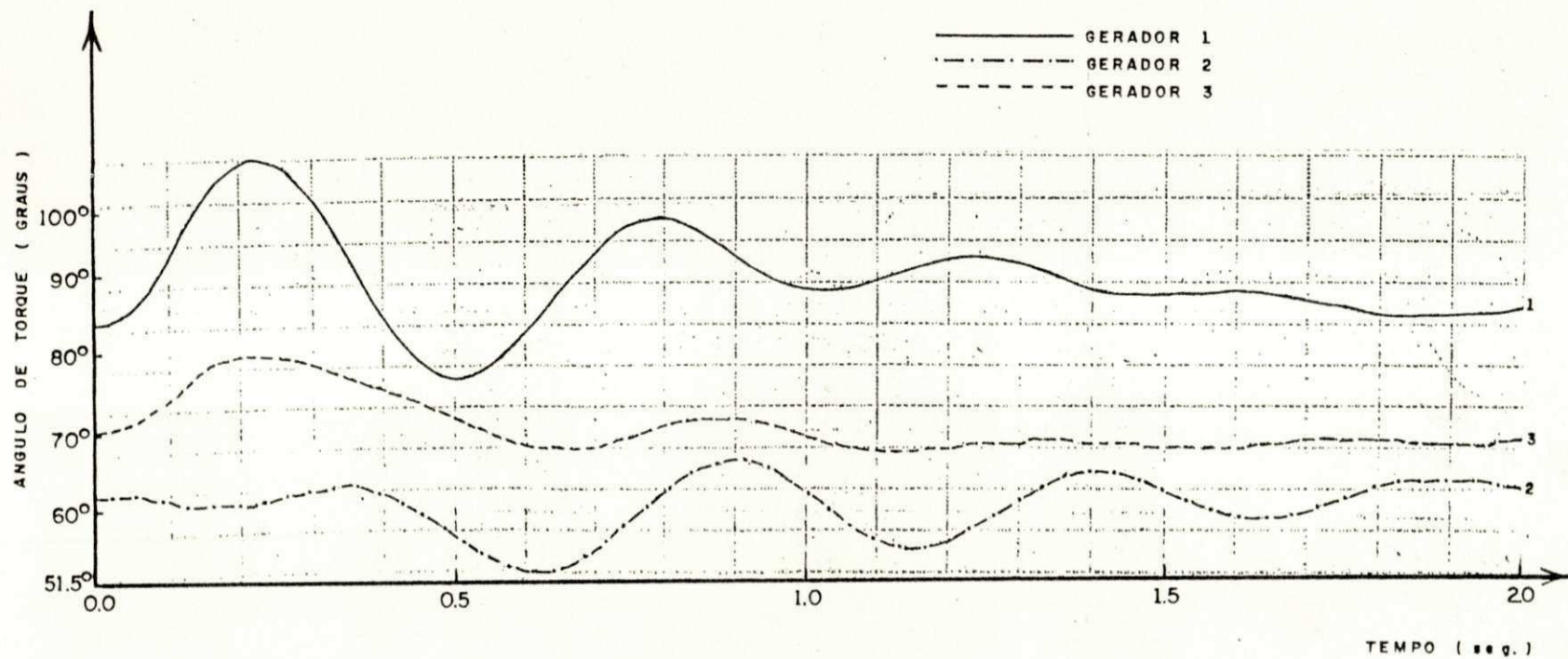


Figura V.4.3

: Curto-Circuito Trifásico Equilibrado na Barra 6 durante 0.1 Seg.

Sistema do Exemplo 1

: Sinais Estabilizantes (convencional) Implementados simultaneamente em todas as máquinas pelo método apresentado em [29].

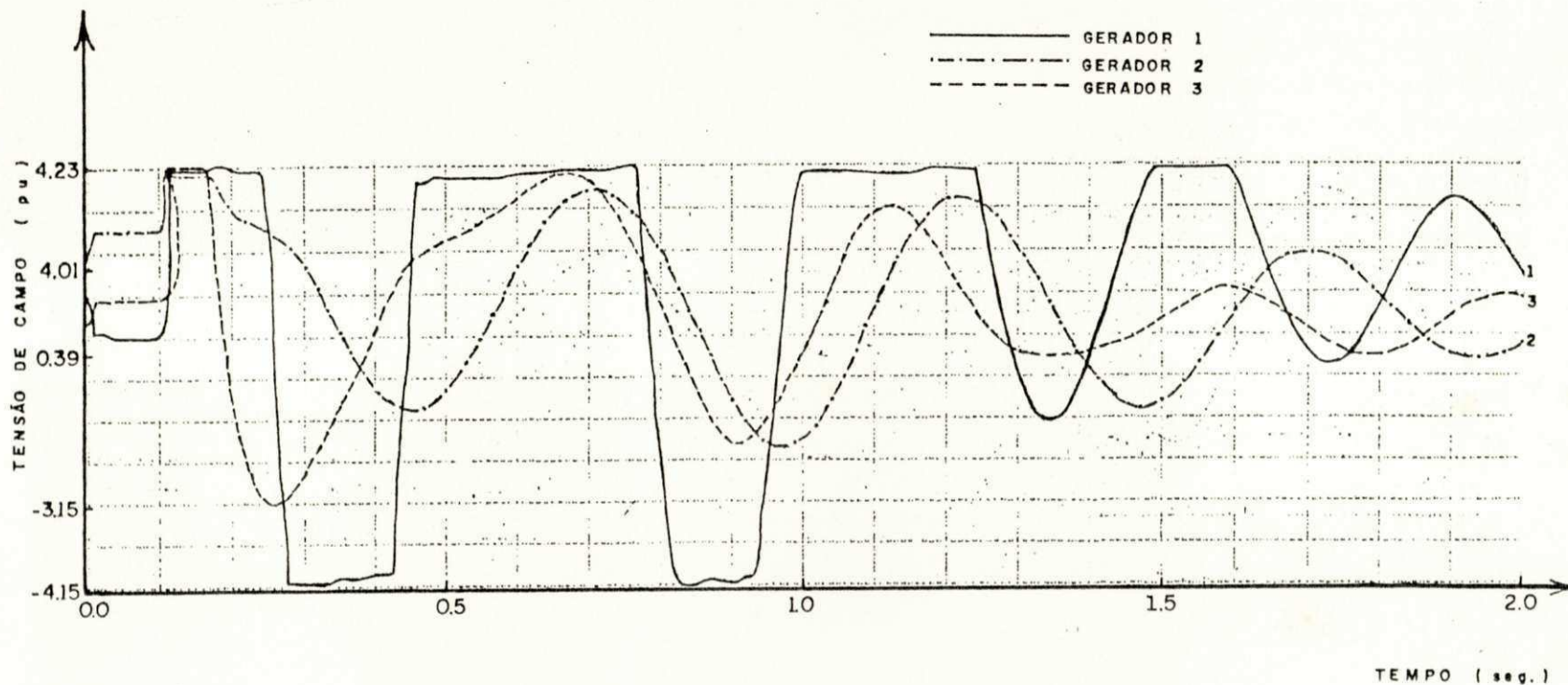


Figura V.4.4

Sistema do Exemplo 1

: Curto-Circuito Trifásico Equilibrado na Barra 6 durante 0.1 Seg.

: Sinais Estabilizantes (convencional) Implementados simultaneamente em todas as máquinas pelo método apresentado em [29].

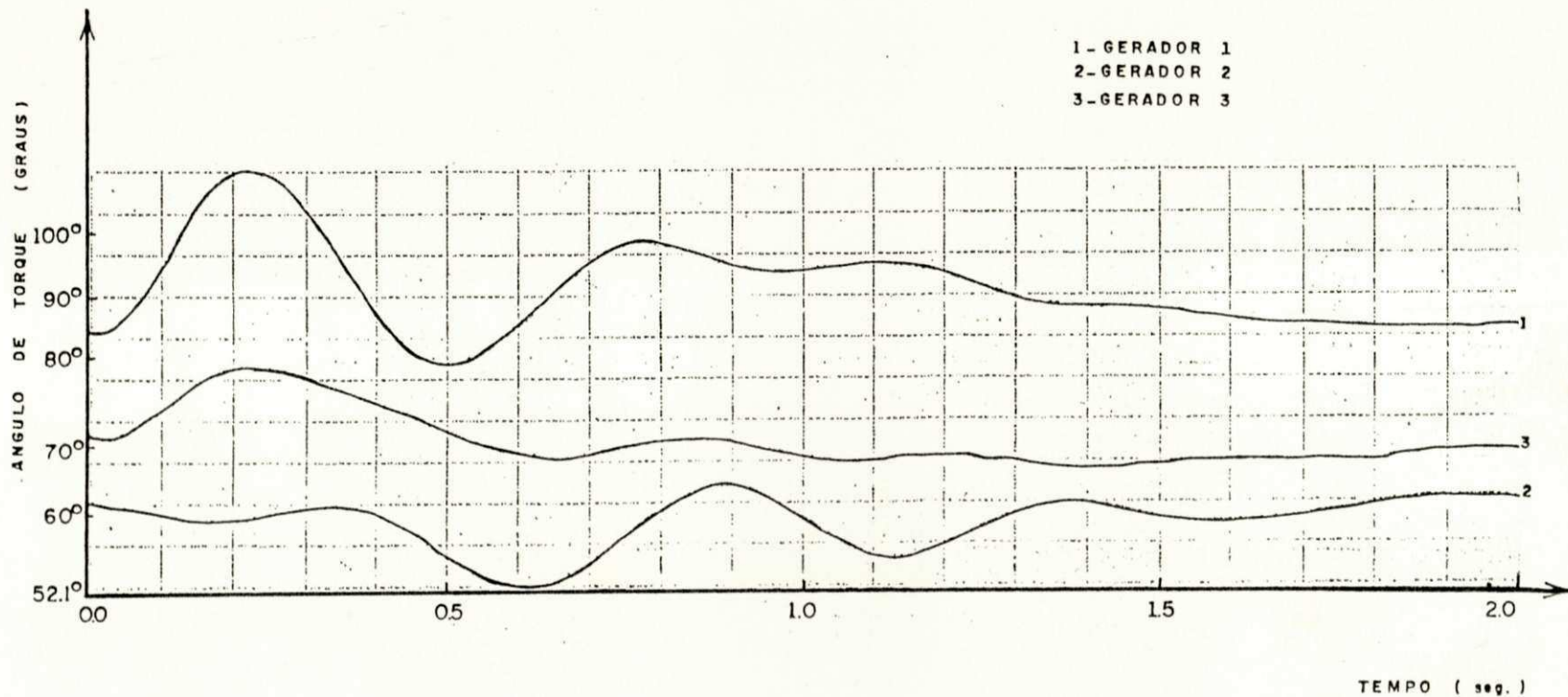


Figura V.4.5

Sistema do Exemplo 1

: Curto-Circuito Trifásico Equilibrado na barra 6 durante 0.1 Seg.

: Sinais Estabilizantes (convencional) Implementados simultaneamente em todas as máquinas pelo método proposto neste trabalho.

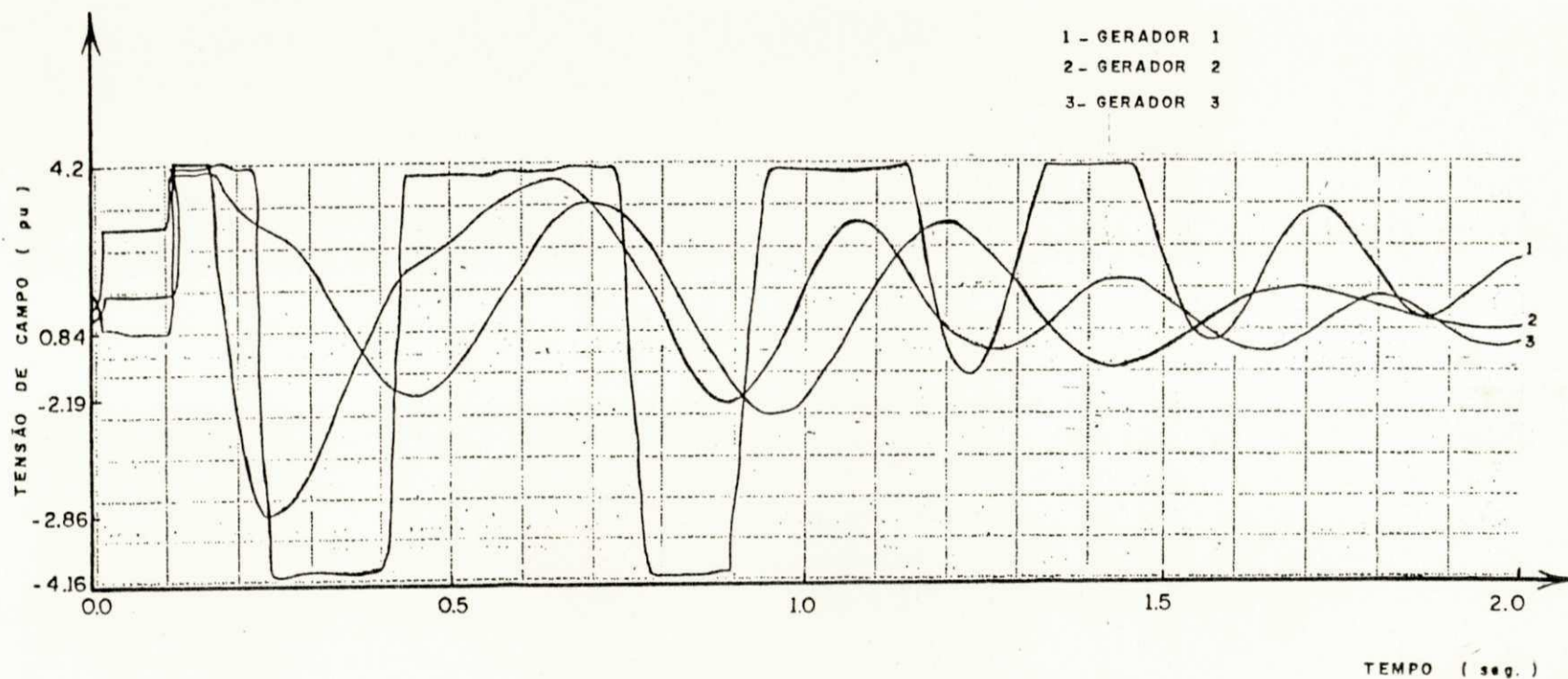


Figura V.4.6

: Curto-Circuito Trifásico Equilibrado na barra 6 durante 0.1 Seg.

Sistema do Exemplo 1

: Sinais Estabilizantes (convencional) Implementados simultaneamente em todas as máquinas pelo método proposto neste trabalho.

Apesar de se conseguir com o método apresentado em [9] resultados semelhantes aos do método desenvolvido neste trabalho, foi necessário para isto um número significativo de simulações, pelo fato deste projeto ser baseado em máquina/barra infinita, o qual não leva em conta o acoplamento dinâmico entre as máquinas do sistema. É provável que para um sistema de grande porte não se chegue a um resultado satisfatório mesmo com uma infinidade de tentativas. A vantagem que o método aqui desenvolvido apresenta é que além de considerar as interações dinâmicas entre as máquinas, calculam-se de uma só vez os parâmetros dos sinais estabilizantes e resultados satisfatórios são obtidos quando da implementação do sistema não linear completo.

V.4.2 Simulação do Sistema 2

Para o sistema 2 simula-se um curto-circuito trifásico equilibrado na barra 25 (figura V.3.1.), durante 0.1 segundos, nos seguintes casos:

- a) Nenhum sinal estabilizante é usado no sistema;
- b) Sinais estabilizantes (convencional) são usados nas máquinas 1, 2 e 3 de acordo com o planejamento do sistema CHESF [28]. Nas máquinas 2 e 3 o sinal é derivado da potência terminal.
- c) Sinais estabilizantes (convencional) são usados nas máquinas 1, 2 e 3 pelo método proposto neste trabalho (capítulo IV).

A tabela III apresenta os parâmetros dos sinais estabilizantes de acordo com a CHESF, como apresentado em [28].

Tabela III

Máquina	K_g	T_1	T_2	T_g
1	0.3	0.589	0.05	4.5
2	7.0	0.290	10.0	3.0
3	3.736	0.428	9.0	3.0

A tabela IV apresenta os parâmetros dos sinais estabilizantes usando a técnica proposta (Cap. IV).

Tabela IV

Máquina	K_g	T_1	T_2	T_g
1	0.3	0.12594	0.08391	3.0
2	0.3	0.28865	0.06223	3.0
3	0.3	4.19691	0.29323	3.0

Os seguintes fatos foram observados depois das simulações:

- a) Quando nenhum sinal estabilizante é implementado nos sistemas de excitação das máquinas, tem-se uma resposta pouco amortecida no ângulo de torque da máquina 1, (figura V.4.7). Este fato ocorre devido a rápida resposta dos sistemas de excitação estática usados nas máquinas. Como no caso anterior, é evidente a necessidade de sinais estabilizantes para amortecer estas oscilações.
- b) Quando sinais estabilizantes (de acordo com a CHESP [28]) são implementados simultaneamente nas máquinas 1, 2 e 3, as

respostas angulares das máquinas são mais amortecidas (figura V.4.9.)

- c) Quando sinais estabilizantes são implementados simultaneamente nas máquinas 1, 2 e 3 (baseados no método proposto), as respostas angulares das mesmas são bem amortecidas. A figura V.4.11 mostra a resposta angular das máquinas. Compare esta figura com as dos itens a e b.

As figuras V.4.8., V.4.10 e V.4.12. correspondem as simulações das figuras V.4.7, V.4.9 e V.4.11 respectivamente.

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior
Coordenação Setorial de Pós-Graduação
Rua Aprígio Veloso, 882 - Tel (083) 321-7222-R 355
58.100 - Campina Grande - Paraíba

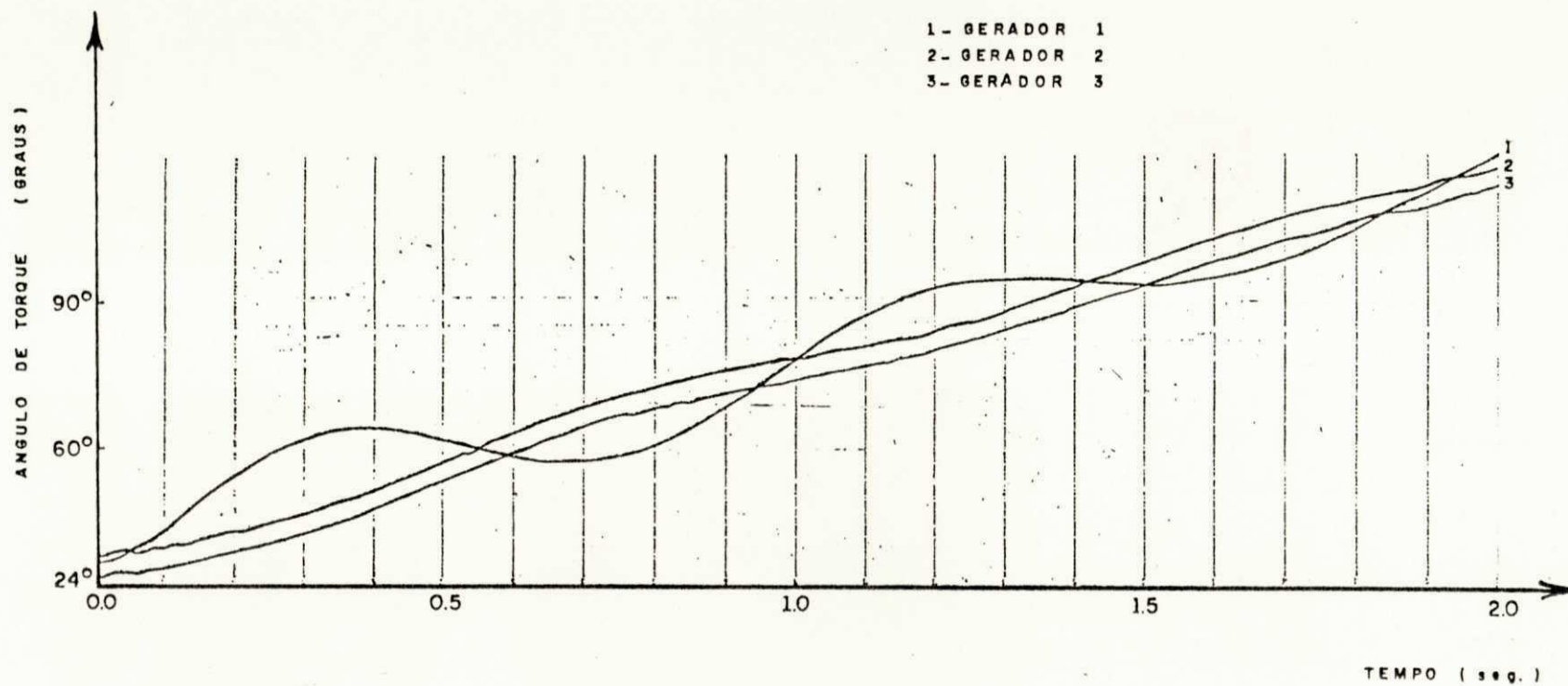


Figura V.4.7

: Curto-Circuito Trifásico Equilibrado na barra 25 durante 0.1 Seg.

Sistema do Exemplo 2

: Nenhum Sinal Estabilizante é Implementado.

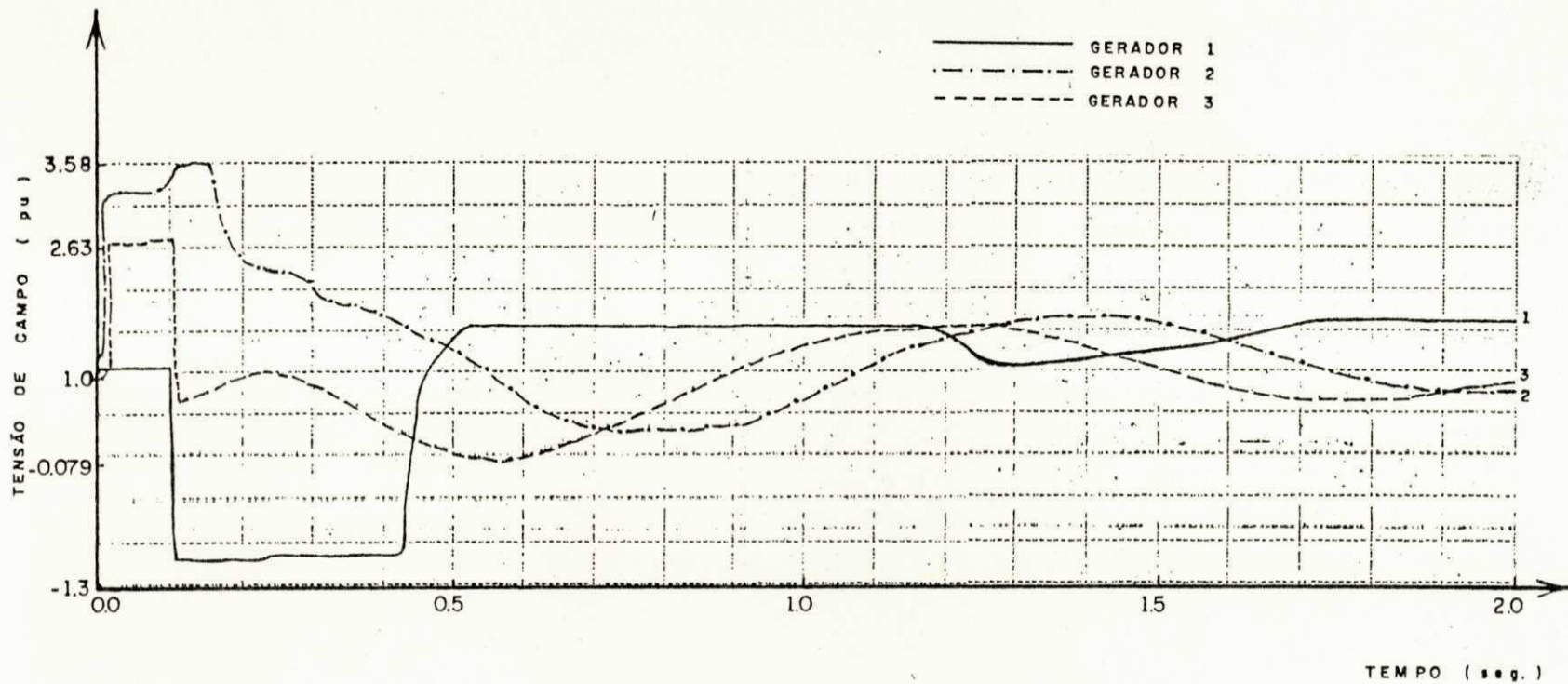


Figura V.4.8

: Curto-Circuito Trifásico Equilibrado na barra 25 durante 0.1 Seg.

Sistema do Exemplo 2

: Nenhum Sinal Estabilizante é Implementado.

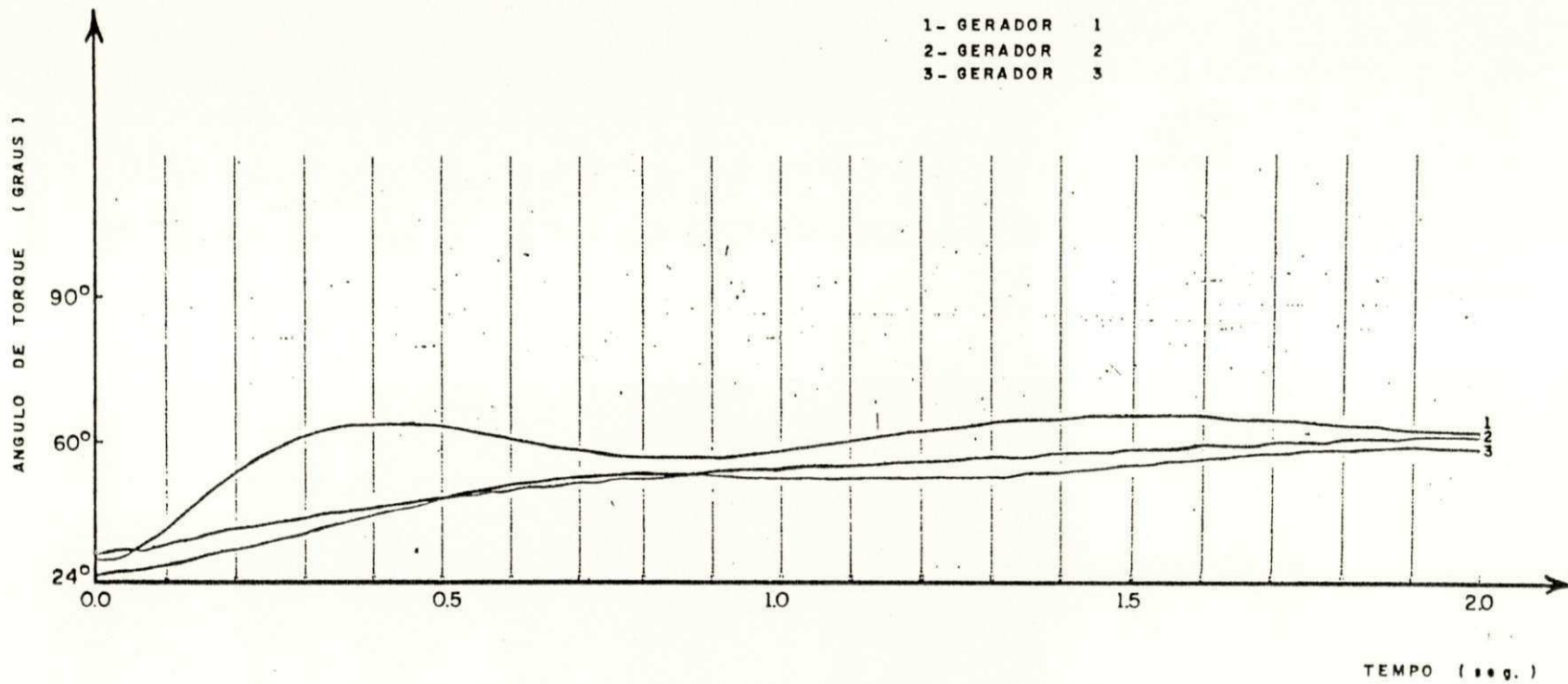


Figura V.4.9

Sistema do Exemplo 2

: Curto-Circuito Trifásico Equilibrado na barra 25 durante 0.1 seg.
 : Sinais Estabilizantes (convencional) Implementados simultaneamente nas máquinas 1, 2 e 3 pelo método apresentado em [28]

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
 Coordenação Geral de Pós-Graduação em Engenharia de Energia
 Rua Apúrgio Veloso, 888 - Tel. (53) 321-7222 e 385
 58.100 - Campina Grande - Paraíba

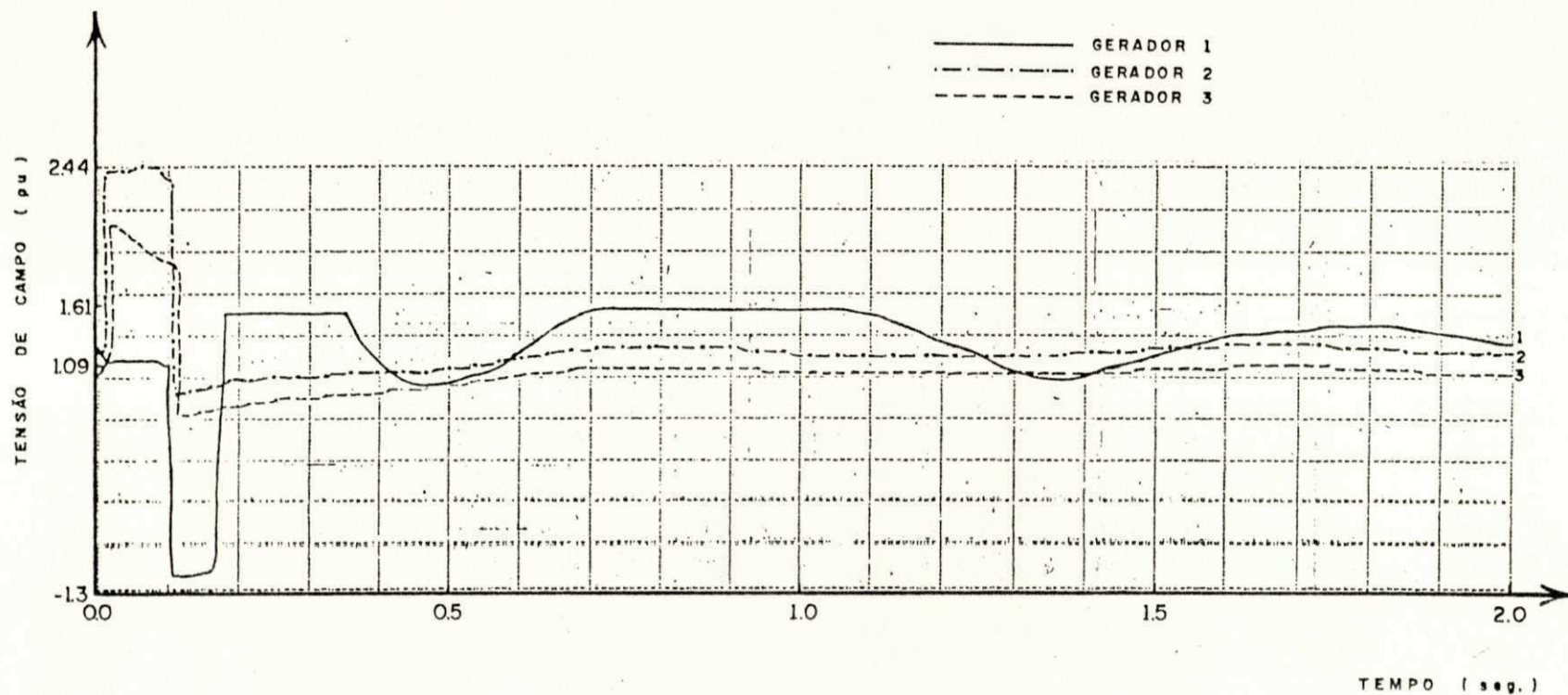


Figura V.4.10

: Curto-Circuito Trifásico Equilibrado na barra 25 durante 0.1 Seg.

Sistema do Exemplo 2

: Sinais Estabilizantes (convencional) Implementados simultaneamente nas máquinas 1, 2 e 3 pelo método apresentado em [28].

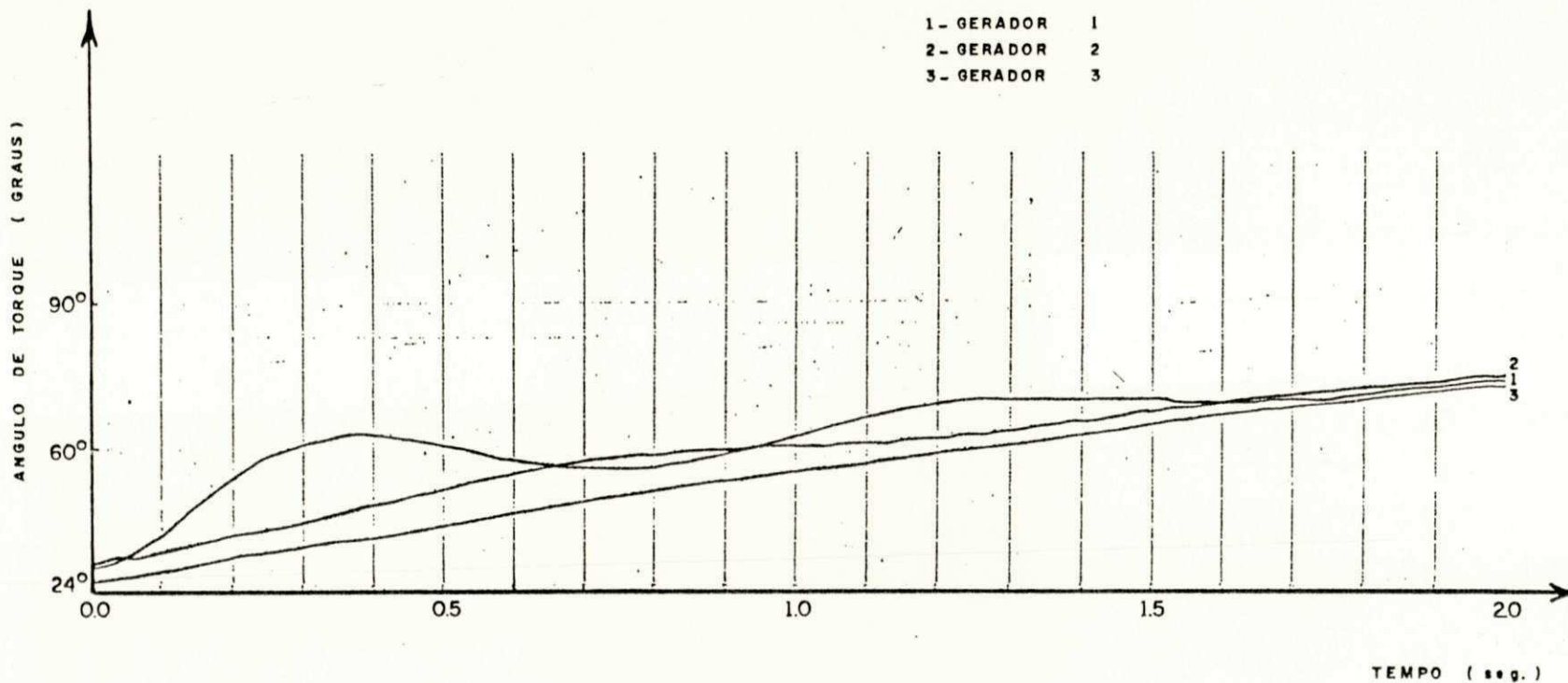


Figura V.4.11

Sistema do Exemplo 2

: Curto-Circuito Trifásico Equilibrado na barra 25 durante 0.1 Seg.

: Sinais Estabilizantes (convencional) Implementados simultaneamente nas máquinas 1, 2 e 3 pelo método proposto neste trabalho.

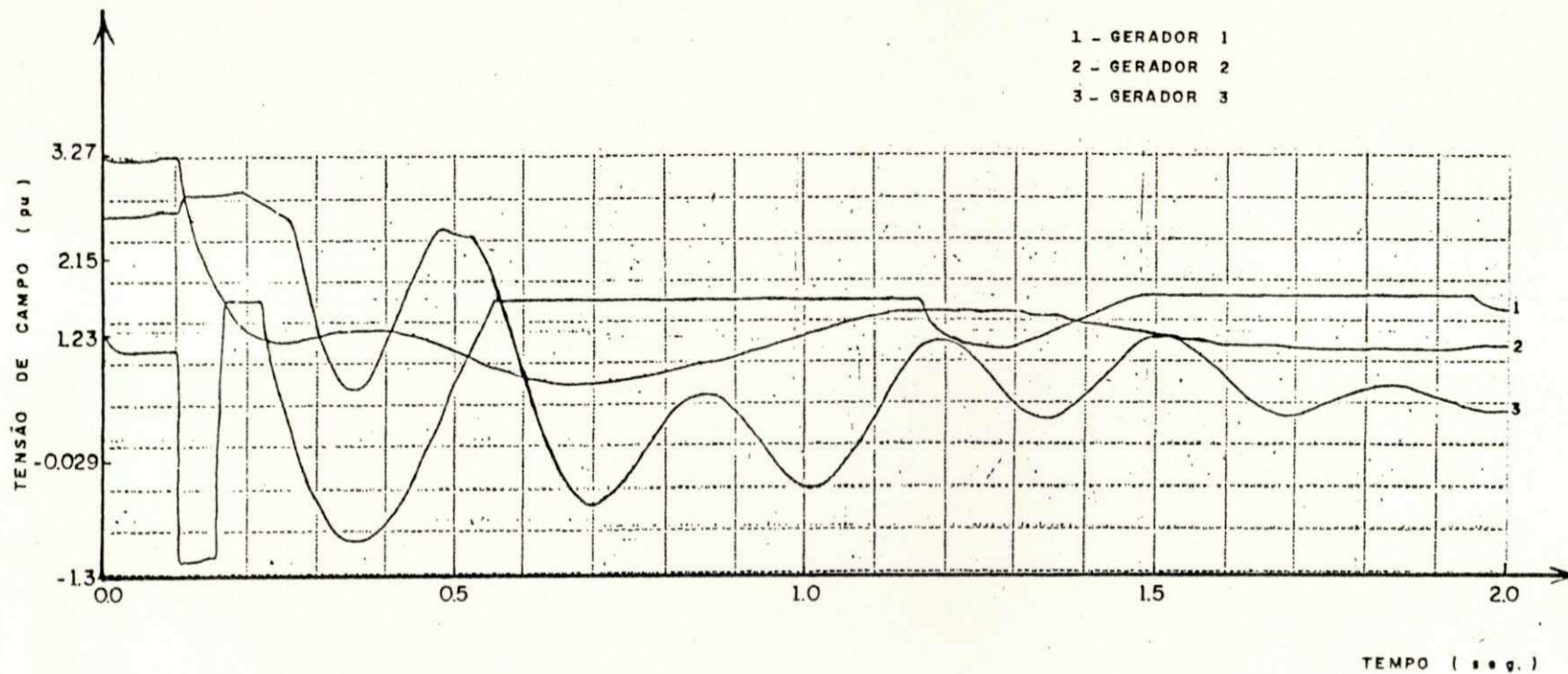


Figura V.4.12

Sistema do Exemplo 2

: Curto-Circuito Trifásico Equilibrado na barra 25 durante 0.1 Seg.

: Sinais Estabilizantes (convencional) Implementados simultaneamente nas máquinas 1, 2 e 3 pelo método proposto neste trabalho.

- Conclusões -

Esta pesquisa desenvolveu uma extensão do trabalho de F. P. de Mello [9], onde o estudo feito sobre sinais estabilizantes é baseado no modelo máquina/barra infinita. As limitações do método apresentado em [9] estão relacionadas com o fato de que o acoplamento dinâmico do sistema de várias máquinas não é levado em consideração no projeto de estabilizadores. A dificuldade de se aplicar esta técnica aumenta quando se estuda sistemas de potência de grande porte, onde as interações dinâmicas entre as máquinas são de grande relevância no desenrolar do projeto, podendo até inviabilizar sua aplicação.

A técnica apresentada neste trabalho supera as deficiências de [9] mostradas anteriormente. O método proposto leva em consideração o mútuo acoplamento entre as máquinas do sistema, evitando-se que um grande número de simulações seja efetuado para se projetar os estabilizadores. Sendo assim tem-se uma aplicação viável, mesmo em sistemas de potência de grande porte com várias máquinas interligadas.

A restrição em se usar modelos linearizados é que estes são válidos apenas para pequenas perturbações no sistema. Entretanto, simulações têm mostrado que elementos de controle projetados na base de modelos linearizados

funcionam bem para o sistema não linear original [28]. Entretanto, dependendo do tipo de estudo a ser feito e do tipo de rotores utilizados nas máquinas, modelos linearizados mais detalhados faz-se necessário.

Utilizando-se dois sistemas de potência para ilustrar as técnicas desenvolvidas nesta pesquisa, observou-se os seguintes fatos:

Quando da implementação dos estabilizadores, por simulação digital, obteve-se resultados semelhantes aqueles obtidos pelo método apresentado em [9]. Mas, como grande contribuição do método aqui proposto, mostrou-se uma maneira sistemática de se projetar sinais estabilizantes independentemente do número de máquinas envolvido. Contudo, ainda existem limitações por conta do grau de detalhamento do modelo utilizado para representar as máquinas síncronas. No entanto, isto pode ser facilmente estendido numa pesquisa adicional, utilizando-se a mesma sistemática aqui apresentada.

APÊNDICE 1

Equações de Torques de Amortecimento e Sincronizante

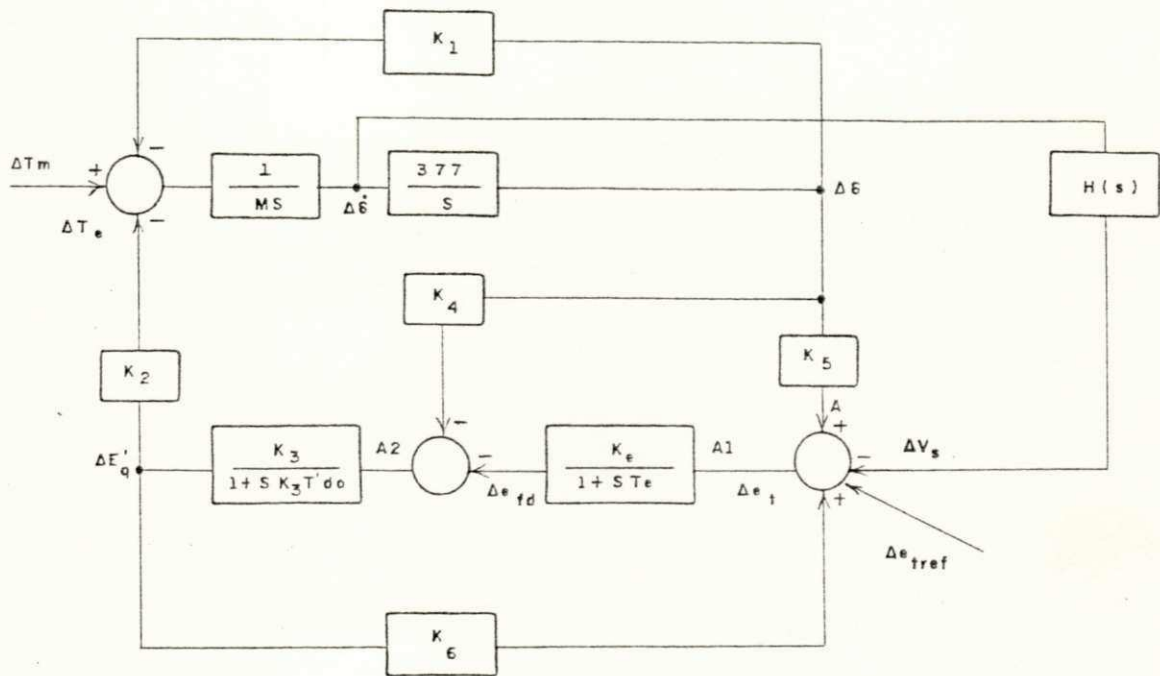


Fig. 1-1 Modelo Linearizado de um sistema de Potência representado por uma Máquina ligada a uma Barra Infinita [9].

COMPONENTE DE TORQUE ELÉTRICO PRODUZIDA PELA AÇÃO DO
REGULADOR DE TENSÃO

Desprezando o efeito de desmagnetização e excluindo o sinal estabilizante, a variação no torque elétrico devido às variações no ângulo de torque pode ser encontrada através da figura 1-1 como segue:

$$\Delta T_e = \frac{-K_2 K_3 K_e K_5 / (1 + sT_e)(1 + sK_3 T'_{do})}{1 + \frac{(K_3 K_e K_6 K_5)}{K_5 (1 + sT_e)(1 + sK_3 T'_{do})}} \cdot \Delta \delta \quad (1-1)$$

Depois de algumas simplificações tem-se:

$$\Delta T_e = \frac{-K_2 K_3 K_e K_5}{(1 + sT_e)(1 + sK_3 T'_{do}) + K_3 K_e K_6} \cdot \Delta \delta \quad (1-2)$$

ou

$$\Delta T_e = \frac{-K_2 K_e K_5}{(1/K_3 + K_e K_6) + s(T_e/K_3 + T'_{do}) + s^2 T_e T'_{do}} \cdot \Delta \delta \quad (1-3)$$

O torque sincronizante é a componente em fase com o ângulo de rotor na frequência de oscilação ω . A mesma pode ser obtida da expressão 1-3 como segue.

$$\Delta T_s = \frac{-K_2 K_e K_5}{(1/K_3 + K_e K_6) - \omega^2 T'_{do} T_e} \cdot \Delta \delta \quad (1-4)$$

O torque de amortecimento é a componente que está em fase com a velocidade do rotor na frequência de oscilação ω . A mesma pode ser encontrada da expressão 1-3 substituindo-se a frequência de oscilação ω e fazendo algumas simplificações, resultam

$$\Delta T_e = \frac{-K_2 K_e K_5 [(1/K_3 + K_e K_6 - \omega^2 T'_{do} T_e) - j\omega (T_e/K_3 + T'_{do})]}{(1/K_3 + K_e K_6 - \omega^2 T'_{do} T_e)^2 + (T_e/K_3 + T'_{do})^2 \cdot \omega^2} \cdot \Delta \delta \quad (1-5)$$

e

$$\Delta T_D = \frac{K_2 K_e K_5 [T_e/K_3 + T'_{do}] \omega}{(1/K_3 + K_e K_6 - \omega^2 T'_{do} T_e)^2 + (T_e/K_3 + T'_{do})^2 \cdot \omega^2} \Delta \delta \quad (1-6)$$

Considerando o efeito de desmagnetização e excluindo o sinal estabilizante, a equação do torque elétrico devido as variações no ângulo de torque pode ser encontrada da figura 1-1 como mostrada abaixo:

$$A = K_5 \cdot \Delta \delta \quad (1-7)$$

$$A_1 = A + K_6 \cdot \Delta E'_g \quad (1-8)$$

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
 Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior
 Coordenação Setorial de Pós-Graduação
 Rua Aprígio Veloso, 882 - Tel (083) 321 7222-R 355
 58.100 - Campina Grande - Paraíba

substituindo (1-7) em (1-8), tem-se:

$$A_1 = K_5 \cdot \Delta\delta + K_6 \cdot \Delta E'_q \quad (1-9)$$

$$A_2 = -K_4 \cdot \Delta\delta - \frac{K_e}{(1 + sT_e)} \cdot A_1 \quad (1-10)$$

substituindo-se (1-9) em (1-10), tem-se:

$$A_2 = -K_4 \cdot \Delta\delta - \frac{K_e}{(1 + sT_e)} (K_5 \Delta\delta + K_6 \Delta E'_q) \quad (1-11)$$

mas:

$$\Delta E'_q = \frac{K_3}{(1 + sK_3 T'_{do})} \cdot A_2 \quad (1-12)$$

Então, substituindo-se (1-11) em (1-12) tem-se agora:

$$\Delta E'_q = \frac{K_3}{(1 + sK_3 T'_{do})} \left[-K_4 \cdot \Delta\delta - \frac{K_e}{1 + sT_e} (K_5 \Delta\delta + K_6 \Delta E'_q) \right] \quad (1-13)$$

Arrumando e deixando a variável $\Delta E'_q$ explícita, tem-se:

$$\Delta E'_q = - \frac{K_3 K_4}{1 + sK_3 T'_{do}} \cdot \Delta \delta - \frac{K_3}{(1 + sK_3 T'_{do})} \cdot \frac{K_e K_5}{(1 + sT_e)} \Delta \delta - \frac{K_3 K_e K_6}{(1 + sT_e)(1 + sK_3 T'_{do})} \cdot \Delta E'_q \quad (1-14)$$

$$\Delta E'_q + \frac{K_3 K_e K_6}{(1 + sT_e)(1 + sK_3 T'_{do})} \cdot \Delta E'_q = - \left[\frac{K_3 K_4}{(1 + sK_3 T'_{do})} + \frac{K_3 K_e K_5}{(1 + sK_3 T'_{do})(1 + sT_e)} \right] \Delta \delta \quad (1-15)$$

$$\Delta E'_q \left[1 + \frac{K_3 K_e K_6}{(1 + sT_e)(1 + sK_3 T'_{do})} \right] = - \left[\frac{K_3 K_4}{(1 + sK_3 T'_{do})} + \frac{K_3 K_e K_5}{(1 + sK_3 T'_{do})(1 + sT_e)} \right] \Delta \delta \quad (1-16)$$

$$\Delta E'_q = \frac{- \left[\frac{K_3 K_4}{1 + sK_3 T'_{do}} + \frac{K_3 K_e K_5}{(1 + sK_3 T'_{do})(1 + sT_e)} \right]}{\left[1 + \frac{K_3 K_e K_6}{(1 + sT_e)(1 + sK_3 T'_{do})} \right]} \cdot \Delta \delta \quad (1-17)$$

mas,

$$\Delta E'_q = \frac{\Delta T_e}{K_2} \quad (1-18)$$

Igualando (1-17) a (1-18) e fazendo algumas arrumações ,
tem-se:

$$\frac{\Delta T_e}{K_2} = - \frac{\left[\frac{K_3 K_4}{1 + s K_3 T'_{do}} + \frac{K_3 K_e K_5}{(1 + s K_3 T'_{do})(1 + s T_e)} \right]}{\left[1 + \frac{K_3 K_e K_6}{(1 + s T_e)(1 + s K_3 T'_{do})} \right]} \cdot \Delta \delta \quad (1-19)$$

$$\Delta T_e = - \frac{K_2 (K_3 K_4 (1 + s T_e) + K_3 K_e K_5)}{(1 + s T_e)(1 + s K_3 T'_{do}) + K_3 K_e K_6} \cdot \Delta \delta \quad (1-20)$$

$$\Delta T_e = - \frac{K_2 [(K_4 + K_e K_5) + s T_e K_e]}{(1/K_3 + K_e K_6) + s(T_e/K_3 + T'_{do}) + s^2 T'_{do} T_e} \cdot \Delta \delta \quad (1-21)$$

O torque sincronizante é a parte real da expressão (1-21) na frequência de oscilação ω . O torque de amortecimento é a componente em fase com a velocidade, ou seja, é a parte imaginária da expressão.

As componentes dos torques de amortecimento é sincronizante devido variações no ângulo de torque podem ser encontradas incluindo-se também o sinal estabilizante. Voltando à figura 1-1 e considerando:

$$F_1(s) = +K_e / (1 + sT_e)$$

$$F_2(s) = K_3 / (1 + sK_3T'_{do})$$

$$\Delta\delta = \Delta\omega \cdot 377/s$$

$$\Delta\omega = \Delta\delta \cdot s/377$$

pode-se encontrar as seguintes equações:

$$\Delta T_e = K_2 \cdot \Delta E'_g \quad (1-22)$$

$$\Delta E'_g = F_2(s) \cdot A_2 \quad (1-23)$$

$$A_2 = -K_4 \cdot \Delta\delta - F_1(s) \cdot K_5 \Delta\delta - F_1(s) K_6 \Delta E'_g + F_1(s) \cdot H(s) \cdot \Delta\omega \quad (1-24)$$

$$A_2 + F_1(s) K_6 \Delta E'_g = -K_4 \Delta\delta - F_1(s) \cdot K_5 \Delta\delta + F_1(s) \cdot H(s) \cdot \Delta\omega \quad (1-25)$$

$$A_2 + F_1(s) K_6 \cdot F_2(s) A_2 = -K_4 \Delta\delta - F_1(s) \cdot K_5 \cdot \Delta\delta + F_1(s) H(s) \Delta\omega \quad (1-26)$$

$$A_2 (1 + F_1(s) K_6 F_2(s)) = -K_4 \Delta\delta - F_1(s) K_5 \Delta\delta + F_1(s) H(s) \Delta\omega \quad (1-27)$$

$$A_2 = \frac{-K_4 \Delta\delta - F_1(s) K_5 \Delta\delta + F_1(s) H(s) \Delta\omega}{1 + F_1(s) K_6 F_2(s)} \quad (1-28)$$

$$\Delta E'_g = F_2(s) \cdot \frac{-K_4 \Delta\delta - F_1(s) K_5 \Delta\delta + F_1(s) H(s) \Delta\omega}{1 + F_1(s) F_2(s) K_6} \quad (1-29)$$

$$\Delta T_e = K_2 \cdot F_2(s) \cdot \frac{-K_4 \Delta \delta - F_1(s) K_5 \Delta \delta + F_1(s) H(s) \Delta \omega}{1 + F_1(s) F_2(s) K_6} \quad (1-30)$$

$$\Delta T_e = \frac{[-K_4 F_2(s) K_2 - K_5 F_1(s) F_2(s) K_6] + F_1(s) F_2(s) H(s) K_2 \frac{s}{377}}{1 + F_1(s) F_2(s) K_6} \cdot \Delta \delta \quad (1-31)$$

$$\Delta T_e = \left[\frac{F_1(s) F_2(s) K_2}{1 + F_1(s) F_2(s) K_6} \right] \left[-K_5 - \frac{K_4}{F_1(s)} + \frac{sH(s)}{377} \right] \cdot \Delta \delta \quad (1-32)$$

A componente de torque elétrico, ΔT_s , em fase com o ângulo de torque, é:

$$\Delta T_s = \text{Real}_{s=j\omega} \left\{ \left[\frac{F_1(s) F_2(s) K_2}{1 + F_1(s) F_2(s) K_6} \right] \left[-K_5 - \frac{K_4}{F_1(s)} + \frac{sH(s)}{377} \right] \right\} \Delta \delta \quad (1-33)$$

se na equação (1-32) substitui-se $\Delta \delta$ por $\frac{377}{s} \cdot \Delta \omega$, tem-se que:

$$\Delta T_e = \left[\frac{F_1(s) F_2(s) K_2}{1 + F_1(s) F_2(s) K_6} \right] \left[-K_5 - \frac{K_4}{F_1(s)} + \frac{sH(s)}{377} \right] \frac{377}{s} \Delta \omega \quad (1-34)$$

conseqüentemente, a componente de torque, ΔT_D , em fase com as variações de velocidade é:

$$\Delta T_D = \text{Imag}_{s=j\omega} \left\{ \left[\frac{F_1(s)F_2(s)K_2}{1 + F_1(s)F_2(s)K_6} \right] \left[-K_5 - \frac{K_4}{F_1(s)} + \frac{sH(s)}{377} \right] \frac{377}{s} \right\} \Delta\omega$$

$H(s)$ é como está descrito no capítulo III, figura III.3.1. As equações aqui demonstradas levaram em consideração um sistema de potência com apenas uma máquina ligada a uma barra in finita. Da mesma forma as mesmas, podem ser generalizadas pa ra sistemas de potência com várias máquinas.

APÊNDICE 2

Modelo Linearizado de um Sistema de Potência

O modelo matemático que descreve o comportamento dinâmico de um sistema de potência é constituído de um conjunto de equações diferenciais e algébricas não lineares. Para um sistema de potência de grande porte este modelo é bastante complexo tornando impraticável a utilização de técnicas de controle não linear para análise e projeto de elementos de controle [28 e 29].

Um sistema de potência é modelado por um conjunto de equações algébricas e diferenciais não lineares que descrevem o comportamento dinâmico das máquinas, sistemas de excitação, reguladores de velocidade e sistema de transmissão.

Neste trabalho, a representação das máquinas síncronas é feita por um modelo simplificado de terceira ordem [28]. Neste modelo são considerados apenas o circuito de armadura e um circuito no eixo direto do rotor (circuito de campo).

Equações descrevendo o comportamento dinâmico das máquinas síncronas são apresentadas abaixo, onde todas as quantidades são medidas na referência da máquina. As equações são apresentadas em p.u [28] onde a base do rotor é a

tensão de campo que produz tensão nominal do gerador na linha do entreferro. A tabela 2-1 mostra a definição dos símbolos usados no modelo da máquina.

Equações relacionadas com tensões do eixo direto -

$$V_d = - r i_d - \dot{\psi}_q \quad (2-1)$$

$$\dot{\psi}_{fd} = \omega_o \left(\frac{r_f}{X_{ad}} e_{fd} - r_f i_{fd} \right) \quad (2-2)$$

Equação da tensão em quadratura -

$$V_q = - r i_q + \dot{\psi}_d \quad (2-3)$$

Equações relacionando fluxos concatenados no eixo direto -

$$\psi_{fd} = - X_{ad} i_d + X_{fd} i_{fd} \quad (2-4)$$

$$\psi_d = - X_d i_d + X_{ad} i_{fd} \quad (2-5)$$

Equação do fluxo no eixo em quadratura -

$$\psi_q = - X_q i_q \quad (2-6)$$

Equações da potência e tensão terminal do gerador -

$$V_t^2 = V_d^2 + V_q^2 \quad (2-7)$$

$$P_t = V_d i_d + V_q i_q \quad (2-8)$$

Equação do torque elétrico -

$$T_e = \psi_d i_q - \psi_q i_d \quad (2-9)$$

Equação do movimento mecânico -

$$\ddot{\delta} = \frac{\omega_0}{2H} (T_m - T_e) - \frac{\omega_0}{2H} K_d \dot{\delta} \quad (2-10)$$

No desenvolvimento deste modelo, efeitos de saturação foram desprezados. Isto significa que todas as reatâncias são mantidas constantes e a corrente de campo não é modificada pelo efeito da saturação.

Deve-se ressaltar que o projeto de estabilizadores baseado neste modelo, é suficiente na maioria dos casos que envolvem estabilidade transitória.

Durante a ocorrência de uma grande perturbação

os reguladores de tensão operam geralmente nos seus limites e não levam em conta a atuação do sinal adicional. O efeito do sinal adicional começa a ser sentido após a extinção do defeito; isto leva algum tempo. Por isso é que se justifica a não inclusão de outros enrolamentos da máquina em sua modelagem. Entretanto, para problemas de estabilidade dinâmica onde desde o início da perturbação se faz necessário o uso de estabilizadores, deve-se recorrer a um modelo mais detalhado.

Tabela 2-1 Símbolos para o modelo da máquina síncrona

δ	=	Ângulo de potência (rad.)
ψ_{fd}	=	Fluxo do campo no eixo direto (P.U)
ω_o	=	Velocidade angular base (rad./s)
T_e	=	Torque elétrico (P.U.)
T_m	=	Torque mecânico (P.U.)
H	=	Constante de Inércia (M ω .s/MVA)
K_d	=	Fator de amortecimento (P.U.)
e_{fd}	=	Tensão de campo (P.U.)
r_f	=	Resistência de campo no eixo direto (P.U.)
X_{ad}	=	Reatância mútua no eixo direto (P.U.)
X_{fd}	=	Reatância do campo no eixo direto (P.U.)
i_{fd}	=	Corrente de campo no eixo direto (P.U.)
r	=	Resistência de armadura (P.U.)
ψ_d	=	Fluxo da armadura no eixo direto (P.U.)
ψ_q	=	Fluxo da armadura no eixo em quadratura (P.U.)
V_d	=	Componente da tensão do estator no eixo direto (P.U)
V_q	=	Componente da tensão do estator no eixo em quadratura (P.U.)
i_d	=	Componente da corrente do estator no eixo direto (P.U.)

i_g = Componente da corrente do estator no eixo em quadratura (P.U.)

P_t = Potência ativa terminal

Para o sistema de excitação, supondo a constante de tempo do mesmo praticamente nula, apenas uma equação algébrica é considerada,

$$e_{fd} = K_e (V_{ref} + V_s - V_t) \quad (2-11)$$

onde:

K_e = ganho do sistema de excitação

V_{ref} = tensão de referência

V_s = sinal estabilizante

Uma versão linearizada das equações da máquina em torno de um ponto de operação pode ser escrita como segue:

$$\Delta \dot{\delta} = \Delta \dot{\delta} \quad (2-12)$$

$$\Delta \dot{\delta} = \frac{\omega_0}{2H} (-\Delta T_e - K_d \Delta \delta) \quad (2-13)$$

$$\Delta \dot{\psi}_{fd} = \omega_0 \left(\frac{r_f}{X_{ad}} \cdot \Delta e_{fd} - r_f \cdot \Delta i_{fd} \right), \quad (2-14)$$

$$\Delta\psi_q = -X_q \Delta i_q \quad , \quad (2-15)$$

$$\Delta\psi_d = -X_d \Delta i_d + X_{ad} \Delta i_{fd} \quad , \quad (2-16)$$

$$\Delta\psi_{fd} = -X_{ad} \Delta i_d + X_{fd} \Delta i_{fd} \quad , \quad (2-17)$$

$$\Delta V_d = -r \Delta i_d - \Delta\psi_q \quad , \quad (2-18)$$

$$\Delta V_q = -r \Delta i_q - \Delta\psi_d \quad , \quad (2-19)$$

$$\Delta V_t = (V_{do} \Delta V_d + V_{ao} \Delta V_q) / V_{to} \quad , \quad (2-20)$$

$$\Delta T_e = \psi_{do} \Delta i_q + i_{qo} \Delta\psi_d - \psi_{qo} \Delta i_d - i_{do} \Delta\psi_q \quad , \quad (2-21)$$

$$\Delta P_t = V_{do} \Delta i_d + i_{do} \Delta V_d + V_{qo} \Delta i_q + i_{qo} \Delta V_d \quad , \quad (2-22)$$

$$\Delta e_{fd} = K_e (\Delta V_s - \Delta V_t) \quad (2-23)$$

O subscrito (o) corresponde ao ponto de operação inicial.

Para o sistema de transmissão, a equação da rede é escrita como segue:

$$I = Y V \quad (2-24)$$

Com
$$I = (i_{D1}, i_{Q1}, i_{D2}, i_{Q2}, \dots, i_{DP}, i_{QP})^T$$

e

$$V = (V_{D1}, V_{Q1}, V_{D2}, V_{Q2}, \dots, V_{DP}, V_{QP})^T$$

referidos a referência do sistema, onde "p" é o número de barras do sistema.

Para interligar o modelo das várias máquinas com a rede, tensões terminais e correntes terminais de ambas devem ser consistentemente referidas a um mesmo eixo.

Inicialmente, considere uma máquina individual e a seguinte transformação de eixo:

$$\begin{bmatrix} V_D \\ V_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{sen} \delta & \text{cos} \delta \\ -\text{cos} \delta & \text{sen} \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix}$$

onde, δ é o ângulo entre os eixos q e D e onde os subscritos D, Q correspondem a referência do sistema e d, q correspondem a referência interna da máquina. Semelhantemente, podemos fazer para as correntes I_D e I_Q .

Esta mesma transformação pode ser feita para um sistema de potência de várias máquinas e a linearização destas transformações em torno de um ponto de operação também pode ser feita para se obter equações generalizadas de tensões e correntes [12 e 29].

A figura 2-1 mostra a transformação de eixos necessária para um sistema de potência.

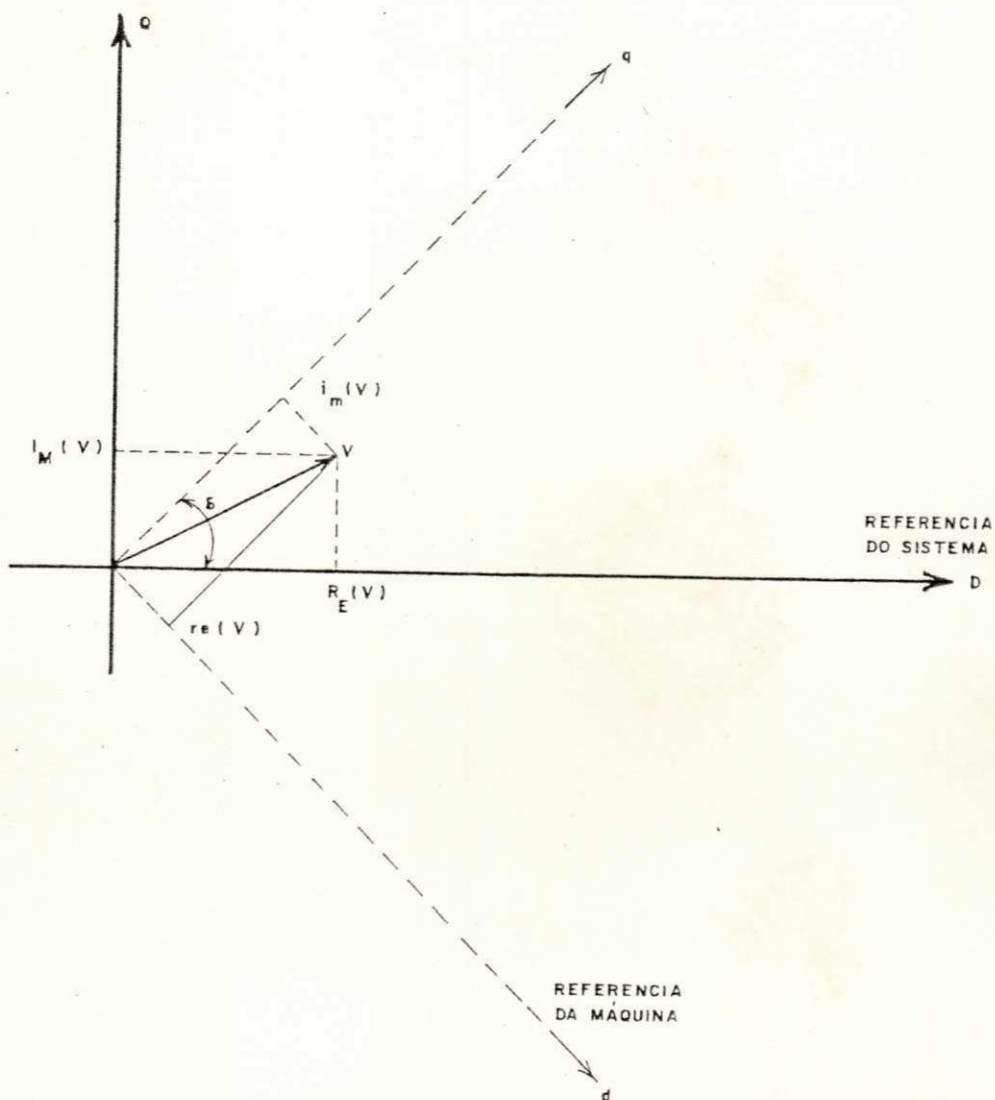


Figura 2-1 Transformação de eixos entre a referência do sistema e da máquina.

Com,

$$\begin{bmatrix} R_E (V) \\ I_M (V) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{sen} \delta & \text{cos} \delta \\ -\text{cos} \delta & \text{sen} \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_e (V) \\ i_m (V) \end{bmatrix}$$

Usando a teoria de solução algébrica de redes [16] pode-se formular as equações (2-8) e (2-9) em função das admitâncias do sistema de transmissão para tornar mais fácil o cálculo dos parâmetros das máquinas (K_1, K_2, \dots, K_6).

A potência de saída da máquina i é:

$$P_i = R_e (I_i^* \cdot e^{j\delta_i}) \quad (2-25)$$

A equação de corrente da máquina i na referência do sistema pode agora ser escrita como segue:

$$I_i = (G_{ii} + jB_{ii}) E'_{qi} \cdot e^{j\delta_i} - \sum_{j \neq i}^{NG} Y_{ij} \cdot e^{j\beta_{ij}} \cdot E'_{qj} \cdot e^{j\delta_j} \quad (2-26)$$

Na referência da máquina as componentes de corrente são:

$$\begin{aligned} i_{di} &= R_e (I_i e^{j(\frac{\pi}{2} - \delta_i)}) \\ &= B_{ii} \cdot E'_{qi} - \sum_{j \neq i}^{NG} E'_{qj} \cdot Y_{ij} \cdot S_{ij} \end{aligned} \quad (2-27)$$

e

$$i_{qi} = G_{ii} \cdot E'_{qi} - \sum_{j \neq i}^{NG} E'_{qj} \cdot Y_{ij} \cdot C_{ij} \quad (2-28)$$

onde:

$$S_{ij} \triangleq \text{sen} (\beta_{ij} + \delta_{ij})$$

$$C_{ij} \triangleq \text{cos} (\beta_{ij} + \delta_{ij})$$

$$\delta_{ij} \triangleq \delta_i - \delta_j$$

Então, a equação (2-25) torna-se:

$$P_i = G_{ii} \cdot E'_{qi}{}^2 - \sum_{j \neq i}^{NG} E'_{qi} \cdot E'_{qj} \cdot Y_{ij} \cdot C_{ij} \quad (2-29)$$

Linearizando-se a equação (2-29) e sabendo-se que para pequenas variações da frequência, o torque elétrico em p.u. é igual a potência elétrica em p.u., tem-se a seguinte equação:

$$\Delta T_{ei} = \Delta P_i = 2G_{ii} \Delta E'_{qi} - \sum_{j \neq i}^{NG} \Delta E'_{qi} \cdot E'_{qj} \cdot Y_{ij} \cdot C_{ij} - \sum_{j \neq i}^{NG} E'_{qi} \cdot \Delta E'_{qj} \cdot Y_{ij} \cdot C_{ij} + \sum_{j \neq i}^{NG} E'_{qi} \cdot E'_{qj} \cdot Y_{ij} \cdot S_{ij} \Delta \delta_{ij} \quad (2-30)$$

Dos conceitos apresentados no capítulo III dos parâmetros ($K_1, K_2, K_3, \dots, K_6$), pode-se agora encontrar o seguinte:

$$K_{1,ij} = E'_{qi} \cdot E'_{qj} \cdot Y_{ij} \cdot S_{ij} \quad (2-31)$$

$$K_{1,ii} = \sum_{j \neq i}^{NG} K_{1,ij} \quad (2-32)$$

A equação de campo da máquina i na forma linearizada pode ser escrita como mostrada abaixo.

$$\Delta e_{fdi} = \Delta E'_{qi} + T'_{doi} s \Delta E'_{qi} + (X_{di} - X'_{di}) \Delta i_{di} \quad (2-33)$$

Linearizando (2-27) e substituindo em (2-33) tem-se o seguinte:

$$T'_{doi} s \Delta E'_{qi} = \Delta e_{fdi} - \Delta E'_{qi} + (X_{di} - X'_{di}) [B_{ii} \Delta E'_{qi} - \sum_{j \neq i}^{NG} \Delta E'_{qj} \cdot Y_{ij} \cdot S_{ij} - \sum_{j \neq i}^{NG} E'_{qj} \cdot Y_{ij} \cdot C_{ij} \cdot \Delta S_{ij}] \quad (2-34)$$

Mais uma vez, revendo os conceitos apresentados no capítulo III pode-se ter:

$$K_{3,ij} = 1 / (X_{di} - X'_{di}) Y_{ij} \cdot S_{ij} \quad (2-35)$$

$$K_{3,ii} = 1 / [1 - (X_{di} - X'_{di}) B_{ii}] \quad (2-36)$$

Das equações (2-18), (2-19) e (2-20) e linearizando (2-27) e (2-28), tem-se o seguinte:

$$V_{ti} \Delta V_{ti} = -V_{di} \cdot X_{qi} \cdot \Delta i_{qi} + V_{qi} (\Delta E'_{qi} + X'_{di} \Delta i_{di})$$

$$V_{ti} \cdot \Delta V_{ti} = -V_{di} \cdot X_{qi} [G_{ii} \cdot \Delta E'_{qi} - \sum_{j \neq i}^{NG} \Delta E'_{qj} \cdot Y_{ij} \cdot C_{ij} + \sum_{j \neq i}^{NG} E'_{qj} \cdot Y_{ij} \cdot S_{ij} \cdot$$

$$\cdot \Delta \delta_{ij}] + V_{qi} [\Delta E'_{qi} + X'_{di} (B_{ii} \Delta E'_{qi} - \sum_{j \neq i}^{NG} \Delta E'_{qj} \cdot Y_{ij} \cdot S_{ij} - \sum_{j \neq i}^{NG} E'_{qj} \cdot Y_{ij} \cdot$$

$$\cdot C_{ij} \cdot \Delta \delta_{ij})]$$

$$\Delta V_{ti} = - \frac{V_{di}}{V_{ti}} \cdot X_{qi} [G_{ii} \cdot \Delta E'_{qi} - \sum_{j \neq i}^{NG} \Delta E'_{qj} \cdot Y_{ij} \cdot C_{ij} + \sum_{j \neq i}^{NG} E'_{qj} \cdot Y_{ij} \cdot S_{ij} \cdot$$

$$\Delta \delta_{ij}] + \frac{V_{qi}}{V_{ti}} [\Delta E'_{qi} + X'_{di} (B_{ii} \cdot \Delta E'_{qi} - \sum_{j \neq i}^{NG} \Delta E'_{qj} \cdot Y_{ij} \cdot S_{ij} - \sum_{j \neq i}^{NG} E'_{qj} \cdot Y_{ij} \cdot$$

$$E'_{qj} \cdot Y_{ij} \cdot C_{ij} \cdot \Delta \delta_{ij})] \quad (2-37)$$

Ainda dos conceitos apresentados no capítulo III chega-se as seguintes equações:

$$K_{5,ij} = - \frac{V_{di}}{V_{ti}} \cdot X_{qi} \cdot E'_{qj} \cdot Y_{ij} \cdot S_{ij} - \frac{V_{qi}}{V_{ti}} X'_{di} \cdot E'_{qj} \cdot Y_{ij} \cdot C_{ij} \quad (2-38)$$

$$K_{5,ii} = \sum_{j \neq i}^{NG} K_{5,ij} \quad (2-39)$$

$$K_{6,ij} = \frac{V_{di}}{V_{ti}} \cdot X_{qi} \cdot Y_{ij} \cdot C_{ij} - \frac{V_{qi}}{V_{ti}} \cdot X'_{di} \cdot Y_{ij} \cdot S_{ij} \quad (2-40)$$

$$K_{6,ii} = - \frac{V_{di}}{V_{ti}} \cdot X_{qi} \cdot G_{ii} + \frac{V_{qi}}{V_{ti}} + \frac{V_{qi}}{V_{ti}} \cdot X'_{di} \cdot B_{ii} \quad (2-41)$$

$$\gamma_i \triangleq \text{tang}^{-1} \frac{V_{di}}{V_{qi}}, \quad \text{então}$$

$$\text{sen}(\gamma_i) = \frac{V_{di}}{V_{ti}} \quad \text{e} \quad \text{cos}(\gamma_i) = \frac{V_{qi}}{V_{ti}}$$

BIBLIOGRAFIA

- [1] A. D. GERHAR ET AEL, "Power System Stabilizer: Field Testing and Digital Simulation", IEEE Trans. Power, App. Syst. Sept./Oct. 1971. Stability of Large Electric Power System (book) pp. 342-348. IEEE Press. 1974.
- [2] BYRON S. GOTTFRIED, and JOEL WEISMAN, " Introduction to Optimization Theory", Prentice Hall.
- [3] DAVID G. LUENBERGER, "Introduction to Linear and Nonlinear Programming", Addison Wesley.
- [4] D. C. LEE, R. E. BEAULIEN and J.R.R. Service, "A Power System Stabilizer Using Speed and Electrical Power Inputs - Design and Field Experience", IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-100, No. 9, September 1981, pp. 4151-4155.
- [5] E. V. LARSEN and D.A. SWANN, "Applying Power System Stabilizers, Part.I: General Concepts, Part.: II: Performance Objectives and Tuning Concepts, Part.III: Pratical Considerations", IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-100, No. 6, June 1981, pp. 3017-3046.

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior
Coordenação Setorial de Pós-Graduação
Rua Aprígio Veloso, 882 Tel (033) 321-7222-R 355
58.100 - Campina Grande - Paraíba

- [6] FERBER R. SCHLEIF, HARVEY D. HUNKINS, GLENN E. MARTIN, and ELLIS E. HATTAN, "Excitation Control to Improve Powerline Stability", IEEE Trans. Power App. Syst., June 1968.
- [7] F. P. DE MELLO, L. N. HANNETT, and J. H. UNDRILL, "Practical Approaches to Supplementary Stabilizing from Accelerating Power", IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-97, No. 5, Sept/Oct 1978, pp. 1515-1521.
- [8] F. P. DE MELLO, P. J. NOLAN, T. F. LASKOWSKI, and J. M. UNDRILL, "Coordinated Application of Stabilizers in Multimachine Power Systems", IEEE Trans. Power App. Syst. Vol. PAS-99, No.3 May/June 1980, pp. 892-901.
- [9] F. P. DE MELLO, "Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control" IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-88, pp. 316-329 ,
- [10] H. B. GOOI, E. F. HILL, M. A. MOBORAK, D. H. THORNE and T. H. LEE, "Coordinated Multi-Machine Stabilizer Settings without Eigenvalue Drift", IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-100, No.8, August 1981, pp. 3879-3887.

- [11] H. M. ELLIS, J. E. HARDY, A. L. BLYTHE and J. W. SKOOG LUND, "Dynamic Stability of the Peace River Transmission System", IEEE Trans. Power App. Syst., June 1966.
- [12] HANDY A. M. MOUSSA and YAO-MAN YU, "Dynamic Interaction of Multi-Machine Power System and Excitation Control", IEEE PES Winter Meeting, January /February 1974, pp. 1150-1158.
- [13] J. P. BAYNE, D. C. LEE, and W. WATSON, "A Power System Stabilizer for Thermal Units Based on Derivation of Acceleration Power", IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-96, No.6, Nov./Dec. 1977, pp. 1777-1783.
- [14] J. P. BAYNE, P. KUNDUR and W. WATSON, "Static Exciter Control To Improve Transient Stabilizer", IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-94, No. 4, July/August 1975, pp. 1141-1146.
- [15] J. H. ANDERSON "Matrix Methods for The Study of a Regulated Synchronous Machine", Proceedings of the IEEE, Vol. 57, No. 12, December 1969, pp. 2122-2136.
- [16] KIMBARK, "Power System Stability", Vol. I, Cap. III

- [17] M. A. LAUGHTON, "Matrix Analysis of Dynamic Stability in Synchronous Multimachine Systems", Proc. IEE, Vol 113, No. 2, February 1966, pp. 325-336.
- [18] MOHAMED K. EL - SHERBINY and DINESH M. MEHTA, "Dynamic System Stability Part. I - Investigation of The Effect of Different Loading And Excitation Systems" IEEE Trans. Power App. and Syst., Sept/Oct., 1973.
- [19] OSCAR W. HANSON, C. J. GOODWIN and PAUL L. DANDENO, "Influence of Excitation and Speed Control Parameters in Stabilizing Intersystem Oscillations", IEEE. Power App. Syst., May 1968.
- [20] PAUL L. DANDENO, ALEX N. KARAS, KENNETH R. McCLYMONT, and WILFRED WATSON", Effect of High-Speed Rectifier Excitation Systems on Generator Stability Limits " , IEEE Trans. Power App. Syst., Jan. 1968.
- [21] P. M. ANDERSON, A. A. FOUAD, "Power System Control and Stability", Vol. I (book) Cap. VI , The Iowa State University Press, 1977.
- [22] R. J. FLEMING, M. A. MOHAN and K. PARVATISAM , "Selection of Parameters of Stabilizers in Multimachine Power Systems", IEEE Trans. Power App. Syst., Vol.

PAS-100, No. 5, May 1981, pp. 2329-2333.

- [23] R. A. LAWSON, D. A. S. WANN, and G. F. WRIGHT ,
"Minimization of Power System Stabilizer Torsional
Interaction on Large Steam Turbine - Generators" ,
IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-97, No. 1 ,
Jan/Feb. 1978, pp. 183-190.
- [24] RICHARD T. BYERLY, F.W. KEAY, and JOHN W. SKOGLUND,
"Damping of Power Oscillations in Salient-Pole
Machines with Static Exciters", IEEE Trans. Power App
Syst., July/Aug. 1970.
- [25] RICHARD M. SHIER, and ALLAN L. BLYTHE, "Field Tests
of Dynamic Stability Using a Stabilizing Signal and
Computer Program Verification", IEEE Trans. Power
App. Syst. Feb. 1968.
- [26] W. G. HEFFRON, and R. A. PHILLIPS, "Effect of a
Modern Amplidyne Voltage Regulator on Underexcited
Operation of Large Turbine Generators", AIEE Trans.
Power App. Syst., Vol. 71, pp. 692-697, August 1952.
- [27] W. WATSON and G. NANCHUR, "Experience with
Supplementary Damping Signals for Generator Static
Excitation System" IEEE Trans. Power App. Syst.

Jan/Feb. 1973. Stability of Large Electric Power
System (book) pp. 349-353. IEEE Press, 1974.

[28] WELLINGTON SANTOS MOTA, "Optimal Control Techniques
in the Design of Power System Stabilizers", Ph.D.
Tesis, Waterloo, Ontário, 1981.

[29] WELLINGTON SANTOS MOTA, "Notas de Aula", curso de Es-
tabilização de Sistemas de Potência, Campina Grande,
1982.