

MODELOS DE MÁQUINAS SÍNCRONAS PARA
PROJETOS DE SINAIS ESTABILIZADORES
USANDO-SE TEORIA DE CONTROLE ÓTIMO.

3
6934 m

MODELOS DE MÁQUINAS SÍNCRONAS PARA PROJETO
PROJETO DE SINAIS ESTABILIZADORES USANDO-SE
TEORIA DE CONTROLE ÓTIMO.

MARIA DE FÁTIMA ALMEIDA GUERRA.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM

Wellington Santos Mota
WELLINGTON SANTOS MOTA - Ph.D.

orientador

Jose Calazans de Castro
JOSE CALAZANS DE CASTRO - Doutor

componente da banca.

Cursino Brandão Jacobina
CURSINO BRANDÃO JACOBINA - Dr. Ing.

componente da banca.

CAMPINA GRANDE

JUNHO 1987



G934m Guerra, Maria de Fátima Almeida.
Modelos de máquinas síncronas para projeto de sinais estabilizadores usando-se teoria de controle ótimo / Maria de Fátima Almeida Guerra. - Campina Grande, 1987.
108 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 1987.
"Orientação : Prof. Dr. Wellington Santos Mota".
Referências.

1. Máquinas Síncronas - Modelos. 2. Teoria de Controle Ótimo. 3. Sinais Estabilizadores - Projeto. 4. Dissertação - Engenharia Civil. I. Mota, Wellington Santos. II. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB). III. Título

CDU 621.313.32(043)

AGRADECIMENTOS

Agradeço às pessoas que colaboraram para a realização deste trabalho :

- Prof. Wellington Santos Mota, pela eficiente e prestimosa orientação.

- Prof. José Calazans de Castro, pelos esclarecimentos prestados, relativos à Teoria de Controle Moderno.

- Prof. Francisco das Chagas F. Guerra, pela revisão do manuscrito.

- Prof. Benemar Alencar de Souza, pelos esclarecimentos prestados na utilização do microcomputador.

- Em especial, agradeço ao doutorando João Viana da Fonseca Neto pela valiosa colaboração, a qual consistiu na implementação do programa de resolução gráfica em microcomputador.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise comparativa entre os modelos de máquinas síncronas utilizados em projetos de sinais estabilizadores baseados na teoria de controle ótimo. Esta comparação leva em consideração a praticabilidade dos estabilizadores numa implementação realística, na qual apenas algumas variáveis são fisicamente acessíveis para a medição. Nesta pesquisa, para fins ilustrativos, considera-se um sistema constituído de três máquinas e uma barra infinita. Baseando-se na realimentação ótima de estados, projeta-se vários sinais de controle a partir do modelo linearizado de 7^º, 6^º, 4^º e 3^º ordem para máquina síncrona/regulador de tensão. A seguir, são realizados testes de implementação dos diversos controladores para fins de comparação e obtenção de resultados conclusivos.

ABSTRACT

This work presents a comparative analysis among synchronous machines models used for stabilizer signals design based on optimal control theory. This comparison takes into account the practicability of stabilizers in a realistic implementation, where only some variables are physically accessible for measurements. In this research, for illustrative purposes, it was assumed a system consisting of three machines and one infinite bus. Based on optimal state feedback, several stabilizer signals are designed from linearized models of 7th, 6th, 4th and 3th order, representative of synchronous machine / voltage regulator. In addition, implementation tests of controllers were performed for comparison purposes, and to obtain conclusive results.

KEYWORDS : Design of Controllers ; Optimal Control ; Power Systems Dynamics ; Stabilizing Signals ; Synchronous Machines.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1 - Diagrama unifilar do sistema tomado como ilustração. 08
- Figura 2.2 - Diagrama de blocos para o regulador de tensão, tipo estático. 08
- Figura 2.3 - Diagrama fasorial que ilustra a transformação de eixos, referência sistema \leftrightarrow máquina. 31
- Figura 2.4 - Simulação dos modelos linear e não-linear sem controladores para o caso máquina 1/barra infinita. 57
- Figura 3.1 - Diagrama de blocos para o sistema linear com e sem realimentação. 62
- Figura 4.1 - Diagrama de blocos do sinal estabilizador aplicado ao modelo não-linear. 67
- Figura 4.2 - Simulação do modelo linear com sete estados (6 para a máquina e 1 para o sistema de excitação), para o caso 1 (máquina 1 / barra infinita). Plota a variação do ângulo de torque da máquina sem controlador e com a implementação dos controladores ótimo e sub-ótimo. 75

Figura 4.3 - Simulação do modelo linear com seis estados (5 para a máquina e 1 para o sistema de excitação), para o caso 1 (máquina 1 / barra infinita). Plota a variação do ângulo de torque da máquina sem controlador e com a implementação dos controladores ótimo e sub-ótimo. 76

Figura 4.4 - Simulação do modelo linear com quatro estados (3 para a máquina e 1 para o sistema de excitação), para o caso 1 (máquina 1 / barra infinita). Plota a variação do ângulo de torque da máquina sem controlador e com a implementação dos controladores ótimo e sub-ótimo. 77

Figura 4.4 - Simulação do modelo linear com três estados para a máquina no caso 1 (máquina 1/ barra infinita) Plota a variação do ângulo de torque da máquina sem e com a implementação dos controladores ótimo e sub-ótimo. 78

Figura 4.6 - Simulação do modelo não-linear (pequena perturbação), sem e com a implementação dos controladores projetados com 3,4,6 e 7 estados no caso 1 (máquina 1 /infinita. 82

Figura 4.7 - Simulação do modelo não-linear (grande perturbação), sem e com a implementação dos controladores projetados com 3,4,6 e 7 estados no caso 1 (máquina 1 /barra infinita. 83

Figura 4.8 - Simulação do modelo não linear (pequena perturbação) sem controladores no caso 2 (3 máquinas/barra infinita). Plota a variação do ângulo de torque das máquinas 1, 2 e 3. 95

Figura 4.9 - Simulação do modelo não linear (grande perturbação) sem controladores no caso 2 (multimáquina). Plota a variação do ângulo de torque das máquinas 1, 2 e 3. 96

Figura 4.10- Simulação do modelo não-linear (pequena perturbação) sem e com a implementação dos controladores projetados com 9, 12 e 18 estados, no caso 2 (3 máquinas / barra infinita). Plota a variação do ângulo de torque da máquina 1. 97

Figura 4.11- Simulação do modelo não-linear (pequena perturbação) sem e com a implementação dos controladores projetados com 9, 12 e 18 estados, no caso 2 (3 máquinas / barra infinita). Plota a variação do ângulo de torque da máquina 2. 98

Figura 4.12- Simulação do modelo não-linear (pequena perturbação) sem e com a implementação dos controladores projetados com 9, 12 e 18 estados, no caso 2 (3 máquinas / barra infinita). Plota a variação do ângulo de torque da máquina 3. 99

Figura 4.13- Simulação do modelo não-linear (grande perturbação) sem e com a implementação dos controladores proje-

tados com 9, 12 e 18 estados, no caso 2 (3 máquinas / barra infinita). Plota a variação do ângulo de torque da máquina 1. 100

Figura 4.14- Simulação do modelo não-linear (grande perturbação) sem e com a implementação dos controladores projetados com 9, 12 e 18 estados, no caso 2 (3 máquinas / barra infinita). Plota a variação do ângulo de torque da máquina 2. 101

Figura 4.15- Simulação do modelo não-linear (grande perturbação) sem e com a implementação dos controladores projetados com 9, 12 e 18 estados, no caso 2 (3 máquinas / barra infinita). Plota a variação do ângulo de torque da máquina 3. 102

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	- Dados dos geradores em p.u. na base de 100 MVA.	15
Tabela 2.2	- Dados das linhas de transmissão em p.u..	16
Tabela 2.3	- Dados de carga em p.u. na base de 100 MVA.	16
Tabela 2.4	- Dados do sistema de excitação.	16
Tabela 2.5	- Dados iniciais das máquinas.	17
Tabela 2.6.1.a-	Submatriz P_1 da matriz P , formada a partir das equações algébricas e diferenciais da máquina síncrona (modelo de 6 ^a ordem) mais a equação de 1 ^a ordem do sistema de excitação.	20
Tabela 2.6.1.b-	Sub-matriz P_2 da matriz P .	20
Tabela 2.6.1.c-	Sub-matriz P_3 da matriz P .	21
Tabela 2.6.1.d-	Sub-matriz P_4 da matriz P .	22
Tabela 2.6.2	- Matriz Q da equação (2.22), formada a partir das equações (2.1) a (2.17) linearizadas.	23
Tabela 2.6.3	- Matriz S da equação (2.22), formada a partir das equações (2.1) a (2.17) linearizadas.	24

Tabela 2.6.4	- Matriz R da equação (2.22), formada a partir das equações (2.1) a (2.17) linearizadas.	24
Tabela 2.7.1	- Matriz w_1 da equação (2.23), utilizada na obtenção das variáveis de saída.	25
Tabela 2.7.2	- Matriz w_2 da equação (2.23)	25
Tabela 2.7.3	- Matriz w_3 da equação (2.23)	25

SUMÁRIO

CAPÍTULO

I INTRODUÇÃO

1.1 - Visão Geral do Assunto.	01
1.2 - Revisão dos Trabalhos Anteriores.	03
1.3 - Motivação da Pesquisa.	05
1.4 - Contribuição da Pesquisa.	05

II DESCRIÇÃO DOS MODELOS LINEARES E NÃO-LINEARES DE SISTEMAS DE POTÊNCIA.

2.1 - Introdução.	06
2.2 - Sistema Considerado no Estudo.	06
2.3 - Modelagem Não-Linear Máquina / Regulador de Tensão.	09
2.4 - Modelagem Linear Máquina / Regulador de Tensão.	17

III TEORIA BÁSICA PARA O PROJETO DE CONTROLADORES BASEADO EM TEORIA DE CONTROLE ÓTIMO.

3.1 - Introdução.	58
3.2 - Estratégia de Controle.	58
3.3 - Projeto dos Controladores.	63

IV	PROJETO, IMPLEMENTAÇÃO E ANÁLISE DE SINAIS DE CONTROLE EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA.	
4.1	- Introdução	66
4.2	- Projeto Análise e Implementação dos Controladores para Caso Máquina 1/ Barra Infinita.	66
4.2.1	- Obtenção dos Controladores.	68
4.2.2	- Implementação dos Controladores nos Modelos Lineares.	72
4.2.3	- Análises Gráficas e dos Autovalores na Simulação dos Modelos Lineares.	72
4.2.4	- Implementação dos Controladores e Análises Gráficas para o Modelo Não-Linear.	79
4.2.4.1	- Implementação dos Controladores num Programa de Estabilidade.	79
4.2.4.2	- Análises dos Resultados.	80
4.3	- Projeto Análise e Implementação dos Controladores para o Caso de Três máquinas/Barra Infinita.	84
4.3.1	- Projeto dos Controladores Ótimos Baseados no Modelo do Sistema Multi-Máquina Interligadas.	84
4.3.2	- Implementação dos Controladores num Programa de Estabilidade.	92
4.3.3	- Análise dos Resultados da Implementação dos Controladores para o Sistema Multi-Máquina.	94
V	CONCLUSÕES	103
	BIBLIOGRAFIA	106

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 Visão Geral do Assunto.

Nos dias atuais, com a crescente demanda de energia elétrica, têm sido projetados e construídos grandes sistemas de geração e transmissão. Idealmente, as cargas supridas devem ser constantemente alimentadas com tensão e frequência constantes, ou em termos práticos, dentro de uma certa tolerância aceitável pelos consumidores. Para que isso ocorra, é indispensável que se faça estudos prévios relativos à estabilidade elétrica desses sistemas.

A estabilidade de um sistema de potência está ligada ao comportamento dinâmico das máquinas síncronas após a ocorrência de uma perturbação. Se esta 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 saída ou entrada de carga, geração, linha de transmissão, etc., haverá um desbalanceamento entre

geração e carga. Se o sistema é estável, as máquinas síncronas interligadas deverão permanecer em sincronismo, ou seja, operando em paralelo com a mesma velocidade (ANDERSON & FOUAD, 1977).

Em parte, o problema da estabilidade tem sido solucionado com a utilização de sistemas de excitação estáticos de alta velocidade, usados normalmente pelas companhias de eletricidade. Adicionalmente, usa-se também um sinal estabilizador suplementar que, levado ao regulador de tensão, introduzirá um amortecimento adicional positivo ao sistema. Abordando esse tema, muitos trabalhos foram publicados usando-se técnicas de controle clássico ou de controle moderno. Neste trabalho serão utilizadas técnicas de controle moderno, uma vez que o emprego das mesmas torna possível o projeto de sinais estabilizadores levando em consideração a interação entre as várias máquinas do sistema (MOTA, 1981 ; YU and MOUSSA, 1971).

A maioria dos trabalhos abordando o projeto de sinais estabilizadores usa o modelo de máquina síncrona de 3ª ordem. Este modelo é considerado satisfatório pelo fato de que apenas as variáveis acessíveis à medição serão realimentadas, o que torna realística a sua implementação. O presente trabalho tem como objetivo investigar a veracidade da proposição acima, através de projetos de controladores, onde são considerados os modelos de máquinas síncronas/regulador de tensão de 3ª, 4ª, 6ª e 7ª ordem, baseando-se em realimentação ótima de estados.

1.2 Revisão dos Trabalhos Anteriores.

A necessidade da utilização de um sinal estabilizador suplementar para melhorar em parte o problema da estabilidade de grandes sistemas de potência interligados é que tem motivado os engenheiros a desenvolverem projetos de controladores baseados em controle clássico ou controle moderno. LARSEN and SWANN (1981) tratam de três tipos de sinais, os quais são derivados da velocidade, frequência e potência elétrica. O projeto desses sinais é baseado em controle clássico, o que torna laboriosa a procura dos parâmetros correspondentes. SILVA (1982) apresenta um método sistemático para se projetar sinais derivados da velocidade da máquina. A técnica usada para computar esses parâmetros utiliza otimização através do algoritmo de FLETCHER, maximizando o torque de amortecimento equivalente das máquinas.

Apesar do controle clássico apresentar várias formas de projeto de sinais estabilizadores, atualmente os engenheiros de sistemas de potência já optam pelo controle moderno. Isto vem ocorrendo devido às muitas vantagens oferecidas pelo mesmo, tais como:

- Possibilidade de escolha de um modelo de máquina síncrona de ordem mais elevada .
- Possibilidade de se levar em conta a interação dinâmica entre as várias máquinas do sistema.
- Possibilidade de escolha das máquinas mais sensíveis a perturbações, através da técnica de

seleção de geradores (CASTRO, 1984).

Com todas essas flexibilidades oferecidas pelo controle ótimo, muitos trabalhos enfocando o projeto de sinais estabilizadores são feitos com o objetivo de comprovar as vantagens do mesmo. PEDROSO E FERREIRA (1984) comparam dois tipos de compensadores, o ótimo e o convencional, com o intuito de avaliar os reais benefícios que trará o controlador ótimo. A conclusão é que, apesar dos desempenhos dos mesmos conduzirem ao mesmo resultado, o compensador ótimo deverá ser mais viável, visto que o mesmo torna possível o projeto de sinais estabilizadores para sistemas multi-máquina.

Embora o projeto de sinais estabilizadores apresente a possibilidade de se escolher um modelo de máquina mais completo, deve-se ter o cuidado de observar as vantagens e desvantagens em se escolher este em detrimento a um outro mais simplificado. ELMETWALLY, RAO and MALIK (1975) implementaram controladores ótimos baseado no modelo reduzido de 3^ª ordem em micro-alternadores, com resultados satisfatórios. Os mesmos analisaram as vantagens em se usar um modelo de máquina síncrona simplificado, ao invés de um mais completo, considerando os seguintes fatores :

- Precisão.
- Dificuldades de uma implementação prática de estabilizadores.
- Dificuldades na implementação computacional dos algoritmos.

Os mesmos concluíram que a escolha de um modelo de ordem alta permite melhor precisão mas, em contrapartida, traz

dificuldades quanto a implementação prática e computacional.

1.3 - Motivação da Pesquisa

Ao se projetar sinais de controle baseados em realimentação ótima de estados, deve-se inicialmente escolher um modelo de máquina síncrona que seja viável à realização deste controle. Deve-se ainda levar em consideração a viabilidade na implementação física do mesmo.

Este trabalho foi realizado com o propósito de levantar dados mais concretos para a escolha de um modelo que seja mais adequado ao projeto de sinais de controle em sistemas de potência.

1.4 - Contribuição da Pesquisa.

As principais contribuições desta pesquisa consistiram em:

- Formular uma versão linearizada para modelos detalhados de máquinas síncronas interligadas a um sistema de transmissão para fins de análises e projeto de controladores.

- Escolher uma modelagem adequada de máquinas síncronas para fins de projeto de sinais estabilizadores.

CAPÍTULO II

DESCRIÇÃO DOS MODELOS LINEARES E NÃO-LINEARES DE SISTEMAS DE POTÊNCIA.

2.1 INTRODUÇÃO.

Neste capítulo, descreve-se:

- o sistema utilizado no projeto de sinais estabilizadores.
- um modelo não-linear para simular a resposta transitória de um sistema de Potência.
- um modelo linear para projeto de controladores em sistemas de potência.

2.2 - Sistema Considerado no Estudo.

O sistema considerado no presente trabalho é o mostrado na Fig. 2.1. Em relação aos elementos o que compõe, são feitas as seguintes considerações:

Máquinas Síncronas.

Os modelos de máquina considerados são os de 3^a, 5^a e 6^a ordem. Considerações acerca dos mesmos são feitas a partir do item 2.3. Os dados das máquinas encontram-se na Tab.2.1.

Linhas de Transmissão.

As linhas de transmissão são representadas por parâmetros concentrados em Π . Os dados referentes às mesmas encontram-se na Tab. 2.2.

Cargas.

As cargas são representadas por impedância constante. Os dados de potência ativa e reativa referentes às mesmas encontram-se na Tab.2.3.

Regulador de Tensão.

O diagrama de blocos do regulador de tensão é mostrado na Fig.2.2. Os dados referentes ao mesmo encontram-se na Tab.2.4.

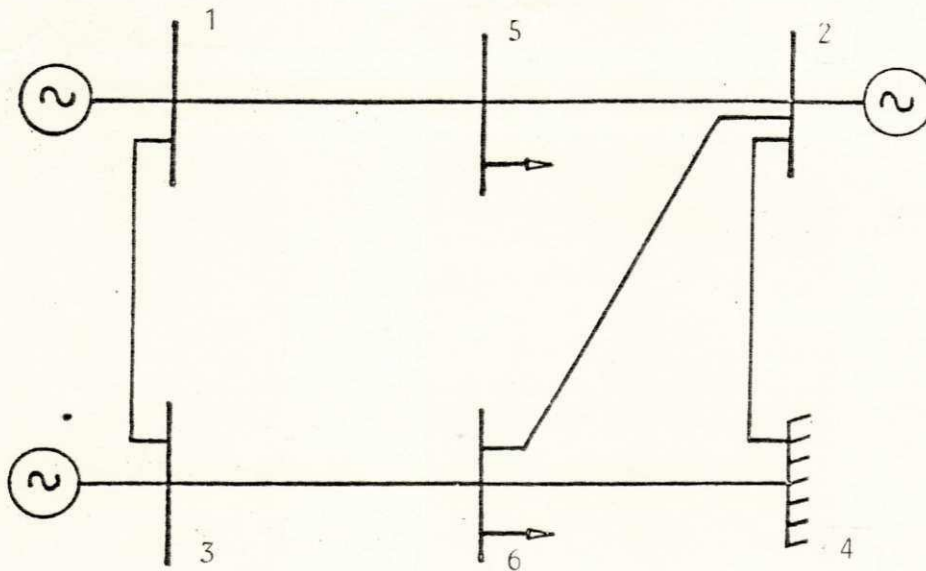


FIGURA 2.1 - Diagrama unifilar do sistema exemplo.

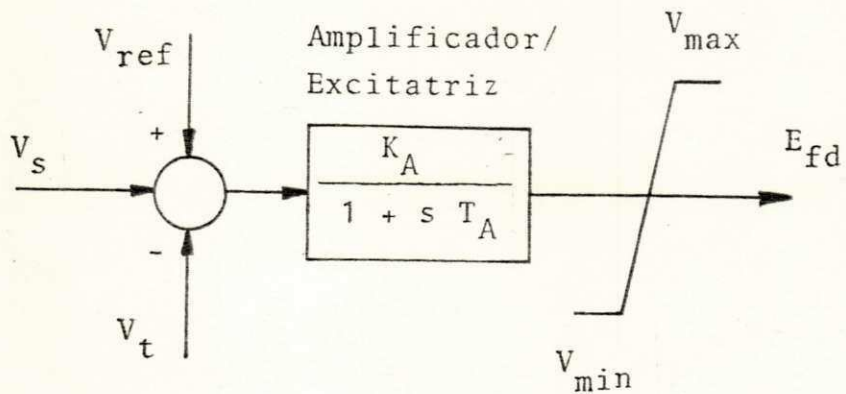


FIGURA 2.2 - Diagrama de blocos para o regulador de tensão tipo estático.

Regulador de Velocidade.

Seus efeitos não são considerados neste projeto.

Com a inclusão de um modelo de 1ª ordem para os reguladores de tensão, obtém-se os modelos máquina/regulador de tensão de 4ª, 6ª e 7ª ordem respectivamente.

2.3 - Modelagem Não-linear Máquina/Regulador de Tensão.

Os modelos de máquina síncrona anteriormente citados são detalhados a seguir.

Modelo de 6ª ordem para a máquina.

Neste modelo, considera-se na armadura apenas as equações algébricas associadas aos enrolamentos de eixo direto e em quadratura; as equações diferenciais correspondentes às variações de fluxos são desprezadas. No rotor, são considerados quatro enrolamentos: segundo o eixo direto, o enrolamento de campo e um enrolamento amortecedor; segundo o eixo em quadratura, dois enrolamentos amortecedores, sendo que um deles representa os efeitos das correntes induzidas no ferro para o caso de máquinas de polos lisos (YOUNG, 1972). As equações diferenciais correspondentes são as seguintes:

- Equação de oscilação.

$$\ddot{S} = \omega_0/2.H (T_m - T_e) - (\omega_0/2.H) \dot{S} K_d \quad (2.1)$$

- Fluxo concatenado no campo.

$$\dot{U}_{fd} = \omega_0 r_f (e_{fd}/x_{ad} - i_{fd}) \quad (2.2)$$

- Fluxo concatenado no eixo direto.

$$\dot{U}_{kd} = -\omega_0 r_{kd} i_{kd} \quad (2.3)$$

- Fluxos concatenados no eixo em quadratura.

$$\dot{U}_{kq} = -\omega_0 r_{kq} i_{kq} \quad (2.4)$$

$$\dot{U}_e = -\omega_0 r_e i_e \quad (2.5)$$

Adicionalmente, tem-se as seguintes equações algébricas:

- Tensão e fluxos no eixo direto.

$$v_d = -r i_d - U_q \quad (2.6)$$

$$U_{fd} = -x_{ad} i_d + x_{ad} i_{kd} + x_{fd} i_{fd} \quad (2.7)$$

$$U_d = -x_d i_d + x_{ad} i_{kd} + x_{ad} i_{fd} \quad (2.8)$$

$$U_{kd} = -x_{ad} i_d + x_{kd} i_{kd} + x_{ad} i_{fd} \quad (2.9)$$

- Tensão e fluxos no eixo em quadratura.

$$v_q = -r i_q - \dot{U}_d \quad (2.10)$$

$$U_q = -x_q i_q + x_{aq} i_{kq} + x_{aq} i_e \quad (2.11)$$

$$U_{kq} = -x_{aq} i_q + x_{kq} i_{kq} + x_{aq} i_e \quad (2.12)$$

$$U_e = -x_{aq} i_q + x_{aq} i_{kq} + x_e i_e \quad (2.13)$$

- Torque elétrico.

$$T_e = U_d i_q - U_q i_d \quad (2.14)$$

- Tensão terminal.

$$v_t^2 = v_d^2 + v_q^2 \quad (2.15)$$

- Potência terminal.

$$P_t = v_d i_d + v_q i_q \quad (2.16)$$

Para o regulador de tensão do tipo estático, cujo diagrama de blocos é mostrado na Fig.2.2, tem-se a seguinte equação diferencial:

$$\dot{e}_{fd} = 1./T_A (K_A (V_{ref} + V_s - v_t)) - e_{fd} \quad (2.17)$$

Forma-se assim um modelo de 7^a ordem máquina/regulador de tensão.

A variação do torque mecânico devido à ação do regulador de velocidade não foi considerada. Logo, T_m será considerado constante.

Os símbolos correspondentes as variáveis se encontram logo após as descrições dos modelos de máquina/regulador de tensão de 6^a, 4^a ordem e de máquina de 3^a ordem.

Modelo de 5^a ordem para a máquina.

Neste modelo despreza-se os efeitos de um enrolamento amortecedor no eixo em quadratura. Assim, não leva-se em consideração as equações (2.5) e (2.13) e faz-se $i_e = 0$ em (2.11) e (2.12). Neste modelo adiciona-se mais uma equação diferencial para o regulador de tensão. Forma-se assim um modelo de 6^a máquina/regulador de tensão.

Modelo de 3^a ordem para a máquina.

Para este modelo, despreza-se os enrolamentos amortecedores de eixo direto e em quadratura. Nesta modelagem tenta-se compensar os efeitos destes amortecedores pela inclusão do fator de amortecimento $K_d = 0.02$ para cada máquina. Deste modo, não são consideradas as equações (2.3), (2.4), (2.5), (2.9),

(2.12) e (2.13). Faz-se também $i_{kd} = i_{kq} = i_e = 0$ em (2.7), (2.8) e (2.11). Neste modelo ainda está incluído a equação diferencial do regulador de tensão. Desta forma obtém-se um modelo de 4ª máquina/regulador de tensão.

Modelo de 3ª ordem para a máquina.

Este modelo é análogo ao anterior. Despreza-se, entretanto, a constante de tempo T_A do sistema de excitação, ou seja, o regulador de tensão neste caso é ultra rápido. Assim, a equação diferencial (2.17) modifica-se para a seguinte equação algébrica:

$$e_{fd} = K_A (V_{ref} + V_s - v_t) \quad (2.18)$$

Todas as variáveis correspondente aos modelos não-lineares de máquina/regulador de tensão são mostradas abaixo.

S	- Ângulo de torque	(rad.)
ω_0	- Velocidade angular	(rad./s)
H	- Constante de inércia	(Mw.s/MVA)
T_m	- Torque mecânico	(p.u.)
T_e	- Torque elétrico	(p.u.)
K_d	- Fator de amortecimento	(p.u.)
P_t	- Potência ativa terminal	(p.u.)
V_{ref}	- Tensão de referência	(p.u.)
v_t	- Tensão terminal da máquina	(p.u.)
e_{fd}	- Tensão de campo	(p.u.)

x_d	- Reatância síncrona de eixo direto	(p.u.)
x'_d	- Reatância transitória de eixo direto	(p.u.)
x''_d	- Reatância subtransitória de eixo direto	(p.u.)
x_q	- Reatância síncrona em quadratura	(p.u.)
x'_q	- Reatância transitória de eixo em quadratura	(p.u.)
x''_q	- Reatância subtransitória quadratura	(p.u.)
x_{ad}	- Reatância mútua no eixo direto	(p.u.)
x_{aq}	- Reatância mútua no eixo em quadratura	(p.u.)
x_{fd}	- Reatância de campo no eixo direto	(p.u.)
x_{kd}	- Reatância associada ao enrolamento amortecedor no eixo direto	(p.u.)
x_{kq}	- Reatância associada ao primeiro enrolamento amortecedor no eixo em quadratura	(p.u.)
x_e	- Reatância associada ao segundo enrolamento amortecedor no eixo em quadratura	(p.u.)
r	- Resistência de armadura	(p.u.)
r_f	- Resistência do enrolamento de campo no eixo direto	(p.u.)
r_{kd}	- Resistência do enrolamento amortecedor do eixo direto	(p.u.)
r_{kq}	- Resistência do primeiro enrolamento amortecedor no eixo em quadratura	(p.u.)
r_e	- Resistência do segundo enrolamento amortecedor no eixo em quadratura	(p.u.)
v_d	- Componente de tensão terminal do eixo direto	(p.u.)
v_q	- Componente de tensão terminal do eixo em quadratura	(p.u.)
i_d	- Componente da corrente terminal do eixo direto	(p.u.)

i_q	- Componente da corrente terminal do eixo em quadratura	(p.u.)
i_{fd}	- Corrente de campo do eixo direto	(p.u.)
i_{kd}	- Corrente do enrolamento amortecedor do eixo direto	(p.u.)
i_{kq}	- Corrente do primeiro enrolamento amortecedor de eixo em quadratura	(p.u.)
i_e	- Corrente do segundo enrolamento amortecedor de eixo em quadratura	(p.u.)
Ψ_{fd}	- Fluxo concatenado no campo	(p.u.)
Ψ_{kd}	- Fluxo concatenado no eixo direto	(p.u.)
Ψ_{kq}	- Fluxo concatenado no eixo em quadratura (1 ^o enrolamento)	(p.u.)
Ψ_e	- Fluxo concatenado no eixo em quadratura (2 ^o enrolamento)	(p.u.)
T'_{do}	- Constante de tempo de circuito aberto transitória de eixo direto	(s)
T'_{qo}	- Constante de tempo de circuito aberto transitória do eixo em quadratura	(s)
T''_{do}	- Constante de tempo de circuito aberto subtransitória no eixo direto	(s)
T''_{qo}	- Constante de tempo de circuito aberto subtransitória no eixo em quadratura	(s)

Dados dos geradores (em p.u. na base de 100 MVA)												
maq	x'_d	x_d	x'_q	x_q	x_2	H	T'_{d0}	T'_d	T'_{g0}	T'_g		
1	1.089	1.093	1.95	1.089	1.23	1.90	1.12	8.2	16.2	1.033	1.535	1.076
2	1.185	1.179	1.75	1.185	1.380	1.68	1.20	4.3	15.2	1.033	1.300	1.076
3	1.087	1.114	1.825	1.087	1.27	1.80	1.10	6.3	14.8	1.030	1.300	1.099

Tabela 2.1

* Lembrando que na tabela acima as constantes de tempo (T'_{d0} , T'_d , etc..., são em segundo).

Linha de transmissão em p.u.				
Bar.	Bar.	R	X	Y
1	6	0.0101	0.0615	0.800
3	6	0.0057	0.046	0.098
3	5	0.0836	0.236	0.1856
3	4	0.0628	0.110	0.3654
4	5	0.0033	0.0313	1.1440
2	5	0.0255	0.1720	0.650
1	2	0.0836	0.236	0.1856

Tabela 2.2

Dados de carga (p.u. p/ 100MVA)		
Barra n ^o	Pot.ativa	Pot.reativa
5	4.28	2.14
6	0.99	0.45

Tabela 2.3

Dados do excitador em p.u. na base do rotor				
Maqs.	K_A	T_A (s)	V_{max}	V_{min}
1	200	0.05	5	-5
2	50	0.04	5	-5
3	100	0.02	5	-5

Tabela 2.4

Dados iniciais			
	Maquina 1	Maquina 2	Maquina 3
v_{d0} (p.u.)	1.01	1.00	1.01
v_{q0} (p.u.)	0.220	0.125	0.124
v_{t0} (p.u.)	1.01	1.01	1.01
S_0 (gr)	86.60	67.20	74.085
e_{fd0} (p.u.)	1.648	1.4337	1.186
P_0 (p.u.)	1.7	0.72	1.35
Q_0 (p.u.)	-0.64	-0.18	-0.70

Tabela 2.5

2.4 - Modelagem Linear Máquina /Regulador de Tensão.

Para cada modelo de máquina síncrona foi efetuada uma linearização baseada no modelo linearizado para máquina síncrona de 3^a ordem MOTA(1982). As equações foram linearizadas no

ponto de operação inicial do sistema. Todas as equações linearizadas são variações em torno do ponto de operação do sistema. Os valores iniciais do sistema encontram-se na Tab.2.5. Assim, tem-se o seguinte conjunto de equações :

$$\dot{X} = A X + B u + C I \quad (2.19)$$

$$Y = D X + E u + F I \quad (2.20)$$

$$V = G X + H I \quad (2.21)$$

Onde

$$X = (S, \dot{S}, \psi_{fd}, \psi_{kd}, \psi_e, \psi_{kq}, e_{fd})^t, \text{ para sete estados}$$

$$X = (S, \dot{S}, \psi_{fd}, \psi_{kd}, \psi_{kq}, e_{fd})^t, \text{ para seis estados}$$

$$X = (S, \dot{S}, \psi_{fd}, e_{fd})^t, \text{ para quatro estados}$$

$$X = (S, \dot{S}, \psi_{fd})^t, \text{ para três estados}$$

$$Y = (v_t, \dot{S}, P_t)^t, \text{ é o vetor de saída}$$

$$u = V_s, \text{ é o vetor do sinal de entrada}$$

$$v = (v_d, v_q), \text{ é o vetor das tensões}$$

$$I = (i_d, i_q), \text{ é o vetor de correntes}$$

Para obter-se as matrizes A, B, C, D, E, F, G e H, as equações de (2.1) a (2.17) são linearizadas e escritas em forma matricial, como é descrito a seguir.

$$P \begin{pmatrix} X \\ Z \end{pmatrix} = Q X + R u + S I \quad (2.22)$$

$$Y = W_1 X + W_2 Z + W_3 I \quad (2.23)$$

onde

$$Z = (v_d, v_q, \psi_d, \psi_q, i_{fd}, i_{kd}, i_e, i_{kq})^t,$$

$$Z = (v_d, v_q, \psi_d, \psi_q, i_{fd}, i_{kd}, i_{kq})^t,$$

$$Z = (v_d, v_q, \psi_d, \psi_q, i_{fd})^t$$

$$Z = (v_d, v_q, \psi_d, \psi_q, i_{fd})^t$$

são os vetores correspondentes às equações algébricas para os modelos de máquina/regulador de tensão de 7^a, 6^a, 4^a e 3^a ordem respectivamente.

A formação das matrizes P, Q, R, S, W₁, W₂ e W₃ para o modelo de máquina síncrona/regulador de tensão de 7^a ordem se encontram nas Tabelas de 2.6.1.a à 2.7.3 logo a seguir. Para os modelos de ordem menor que sete, serão feitas considerações

Por conveniência P terá a seguinte forma:

$$P = \begin{array}{|c|c|} \hline P_1 & P_2 \\ \hline P_3 & P_4 \\ \hline \end{array}$$

$P_1 =$

	S	\dot{S}	U_{fd}	U_{kd}	U_e	U_{kg}	e_{fd}
S	1						
\dot{S}		$2H/w_0$					
U_{fd}			$1/w_0$				
U_{kd}				$1/w_0$			
U_e					$1/w_0$		
U_{kg}						$1/w_0$	
e_{fd}							T_A

Tabela 2.6.1.a

	v_d	v_q	U_d	U_q	i_{fd}	i_{kd}	i_e	i_{kq}
S								
\dot{S}			i_{q0}	$-i_{d0}$				
U_{fd}					r_f			
U_{kd}						r_{kd}		
U_e							r_e	
U_{kq}								r_{kq}
e_{fd}	k_1	k_2						

Tabela 2.6.1.b

onde

$$k_1 = K_A v_{d0} / v_{t0} \quad e \quad k_2 = K_A v_{q0} / v_{t0}$$

	S	\dot{S}	U_{fd}	U_{kd}	U_e	U_{kq}	e_{fd}
v_d							
v_q							
U_d							
U_q							
i_{fd}							
i_{kd}							
i_e							
i_{kq}							

Tabela 2.6.1.c

Todos os elementos da matriz P_3 são nulos.

$$P_4 = \begin{array}{c|cccccccc} & v_d & v_a & U_d & U_a & i_{fd} & i_{kd} & e & i_{kq} \\ \hline v_d & 1 & & & 1 & & & & \\ v_a & & 1 & -1 & & & & & \\ U_d & & & 1 & & -x_{ad} & -x_{ad} & & \\ U_a & & & & 1 & & & -x_{aq} & -x_{aq} \\ i_{fd} & & & & & x_{fd} & x_{ad} & & \\ i_{kd} & & & & & x_{ad} & x_{kd} & & \\ e & & & & & & & x_e & x_{aq} \\ i_{kq} & & & & & & & x_{aq} & x_{kq} \end{array}$$

Tabela 2.6.1.d

	s	\dot{s}	U_{fd}	U_{kd}	U_e	U_{kq}	e_{fd}
s		1					
\dot{s}		$-k_d$					
U_{fd}							$\frac{-r_f}{x_{ad}}$
U_{kd}							
U_e							
U_{kq}							
e_{fd}							-1
v_d							
v_q							
ψ_d							
ψ_q							
i_{fd}			1				
i_{kd}				1			
i_e					1		
i_{kq}						1	

Tabela 2.6.2

$$w_1 =$$

	S	S	U _{fd}	U _{kd}	U _e	U _{kg}	e _{fd}
v _t							
S		1					
P _t							

Tabela 2.7.1

$$w_2 =$$

	v _d	v _g	U _d	U _g	i _{fd}	i _{kd}	e	i _{kg}
v _t	v _{do} / v _{to}	v _{go} / v _{to}						
S								
P _t	i _{do}	i _{go}						

Tabela 2.7.2

$$w_3 =$$

	i _d	i _g
v _t		
S		
P _t	v _{do}	v _{go}

Tabela 2.7.3

Considerações feitas para os modelos de:

- 6^ª ordem de máquina/regulador de tensão.

Seguindo as mesmas considerações feitas no modelo não-linear, são eliminadas as seguintes linhas e colunas das matrizes consideradas no modelo de 7^ª ordem :

- Linha 5 das sub-matrizes P_1 e P_2 .
 - Colunas 5 das sub-matrizes P_1 e P_3 e 7 das submatrizes P_2 e P_4 .
 - Linhas 5 e 14 das matrizes Q, R e S.
 - Coluna 5 das matrizes Q e W_1 .
 - Coluna 7 da matriz W_2 .
-
- 4^ª ordem máquina/regulador de tensão

De acordo com as considerações feitas no modelo de não-linear, são eliminadas as seguintes linhas e colunas das matrizes consideradas no modelo de 7^ª ordem :

- Linhas e colunas 4, 5 e 6 das sub-matrizes P_1 e P_2 .
- Linhas 6, 7 e 8 das sub-matrizes P_3 e P_4 .
- Linhas 4,5,6,13,14 e 15 das matrizes Q, R e S.
- Colunas 4,5 e 6 das sub-matrizes P_1 e P_3 e das matrizes Q, W_1 .

- 3^ª ordem para a máquina.

Além das considerações feitas no modelo de 4^ª ordem, serão eliminadas ainda as seguintes linhas e colunas:

- Linha e coluna 7 das sub-matrizes P_1 e P_2 .
- Linha 7 das matrizes Q , R e S .
- Coluna 7 da matriz W_1 .

Neste caso, os elementos P_{33} , P_{34} e R_{31} das matrizes P e R modificam-se para :

$$P_{33} = K_A r_f v_{d0} / x_{ad} v_{t0}$$

$$P_{34} = K_A r_f v_{q0} / x_{ad} v_{t0}$$

$$R_{31} = K_A r_f / x_{ad}$$

Essas modificações ocorrem devido ao fato de ter sido desprezado a constante T_A neste modelo.

A equação (2.22) pode ser escrita como :

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ Z \end{bmatrix} = P^{-1} Q x + P^{-1} R u + P^{-1} S I \quad (2.24)$$

ou, particionando-se :

$$\dot{X} = A x + B u + C I \quad (2.25)$$

$$Z = M_1 x + M_2 u + M_3 I \quad (2.26)$$

onde

$$\begin{bmatrix} A \\ \hline M_1 \end{bmatrix} = P^{-1} Q, \quad \begin{bmatrix} B \\ \hline M_2 \end{bmatrix} = P^{-1} R, \quad \begin{bmatrix} C \\ \hline M_3 \end{bmatrix} = P^{-1} S$$

Para as equações (2.22) e (2.23), o vetor de saída é obtido da seguinte forma:

$$Y = (W_2 M_1 + W_1) X + W_2 M_2 u + (W_2 M_3 + W_3) I$$

e V é obtido por particionamento das equações (2.25) e (2.26).

Para o sistema multi-máquina, tem-se as seguintes equações para m geradores :

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \\ \vdots \\ \dot{X}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & & & \\ & A_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 & & & \\ & B_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_1 & & & \\ & C_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ \vdots \\ m \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_1 & & & 0 \\ & D_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_1 & & & 0 \\ & E_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & & & 1 \\ & 0 & & 2 \\ & & \ddots & \\ F_m & & & m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ \vdots \\ m \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_1 & & & 0 \\ & G_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} H_1 & & & 0 \\ & H_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ \vdots \\ m \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

Para o sistema de transmissão, uma equação de correntes nodais é escrita para a rede (MOTA, 1981) :

$$I = Y V \quad (2.30)$$

com

$$I = (i_{D1}, i_{Q1}, i_{D2}, i_{Q2}, \dots, i_{Dp}, i_{Qp})^t$$

$$V = (v_{D1}, v_{Q1}, v_{D2}, v_{Q2}, \dots, v_{Dp}, v_{Qp})^t$$

A referência é o eixo do sistema e p é o número de barras da rede.

Uma nova matriz admitância Y de dimensão 2p*2p é

dada por :

$$Y = \begin{bmatrix} g_{11} & -b_{11} & g_{12} & -b_{12} & \dots & g_{1p} & -b_{1p} \\ b_{11} & g_{11} & b_{12} & g_{12} & \dots & b_{1p} & g_{1p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ g_{p1} & -b_{p1} & g_{p2} & -b_{p2} & \dots & g_{pp} & -b_{pp} \\ b_{p1} & g_{p1} & b_{p2} & g_{p2} & \dots & b_{pp} & g_{pp} \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

onde os elementos de Y são obtidos a partir dos elementos da matriz Y_{bus} definidos da seguinte forma:

$$Y_{bus}(r,s) = g_{rs} + j b_{rs} \quad (2.32)$$

A equação (2.30) pode ser particionada de forma a separar os nós que contém geradores e os que não contém, da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} I_N \\ I_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{NN} & Y_{NB} \\ Y_{BN} & Y_{BB} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_N \\ V_B \end{bmatrix}$$

onde os subscritos N e B referem-se aos nós que contém geradores e aos que não os contém, respectivamente.

Nos modelos de máquinas síncronas, as equações referem-se às coordenadas nos eixos de cada máquina em estudo, enquanto os valores de tensão e correntes do sistema de transmissão referem-se a um eixo comum do sistema, originado da barra de balanço. Logo, efetua-se as transformações de valores da

referência do sistema (D,Q) para a referência da máquina (d,q) do seguinte modo :

$$\begin{bmatrix} v_D \\ v_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos S_0 & \sin S_0 \\ -\sin S_0 & \cos S_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

onde S_0 é o ângulo inicial entre D e q, como mostra a Fig.2.3.

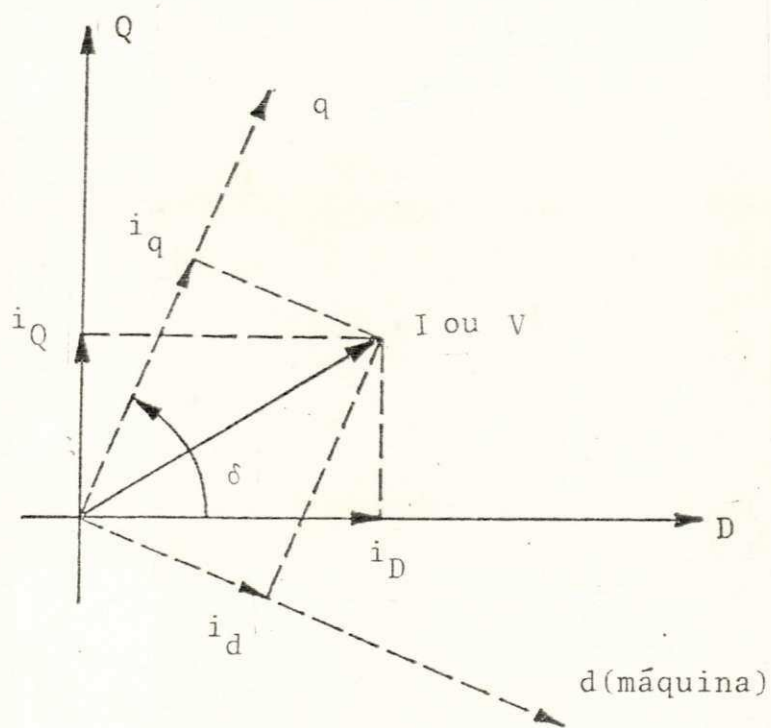


FIGURA 2.3 - Diagrama fasorial que ilustra a transformação de eixos referência sistema (---) máquina.

A linearização desta transformação em torno de um ponto de operação fornece :

$$\begin{pmatrix} v_D \\ \tilde{v}_Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{sen}S_0 & \text{cos}S_0 \\ -\text{cos}S_0 & \text{sen}S_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_d \\ v_q \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} v_{d0} \text{cos}S_0 - v_{q0} \text{sen}S_0 \\ v_{d0} \text{sen}S_0 + v_{q0} \text{cos}S_0 \end{pmatrix} \quad (2.35)$$

A mesma transformação pode ser feita para as correntes terminais.

Escrevendo S como função de X, para sete estados :

$$S = L X \quad (2.36)$$

onde

$$L = (1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)$$

De (2.35) e (2.36), tem-se :

$$\begin{pmatrix} v_D \\ v_Q \end{pmatrix} = T_0 \begin{pmatrix} v_d \\ v_q \end{pmatrix} = T_0 L X \quad (2.37)$$

$$\begin{pmatrix} i_D \\ i_Q \end{pmatrix} = T_{10} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} = T_{10} L X \quad (2.38)$$

onde

$$T_0 = \begin{vmatrix} \text{sen } S_0 & \text{cos } S_0 \\ -\text{cos } S_0 & \text{sen } S_0 \end{vmatrix}$$

$$T_{v0} = \begin{vmatrix} v_{d0} \text{cos} S_0 - v_{q0} \text{sen} S_0 \\ v_{d0} \text{sen} S_0 + v_{q0} \text{cos} S_0 \end{vmatrix}$$

$$T_{i0} = \begin{vmatrix} i_{d0} \text{cos} S_0 - i_{q0} \text{cos} S_0 \\ i_{d0} \text{sen} S_0 + i_{q0} \text{cos} S_0 \end{vmatrix}$$

Assim, a linearização da transferência de eixos para um sistema multi-máquina pode ser dada por :

$$V_N = \bar{T}_0 V_n + \bar{T}_{v0} \bar{L} X \quad (2.39)$$

$$I_N = \bar{T}_0 I_n + \bar{T}_{i0} \bar{L} X \quad (2.40)$$

onde, para m máquinas, fica :

$$V_N = (v_{D1}, v_{Q1}, v_{D2}, v_{Q2}, \dots, v_{Dm}, v_{Qm})^t$$

$$I_N = (i_{D1}, i_{Q1}, i_{D2}, i_{Q2}, \dots, i_{Dm}, i_{Qm})^t$$

$$V_n = (v_{d1}, v_{q1}, v_{d2}, v_{q2}, \dots, v_{dm}, v_{qm})^t$$

$$I_n = (i_{d1}, i_{q1}, i_{d2}, i_{q2}, \dots, i_{dm}, i_{qm})^t$$

$$X = (X_1, X_2, \dots, X_m)^t$$

$$\bar{T}_o = \begin{bmatrix} T_o(1) & & & \\ & T_o(2) & & \\ & & \ddots & \\ & & & T_o(m) \end{bmatrix}$$

$$\bar{T}_{vo} = \begin{bmatrix} T_{vo(1)} & & & \\ & T_{vo(2)} & & \\ & & \ddots & \\ & & & T_{vo(m)} \end{bmatrix}$$

$$\bar{T}_{io} = \begin{bmatrix} T_{io(1)} & & & \\ & T_{io(2)} & & \\ & & \ddots & \\ & & & T_{io(m)} \end{bmatrix}$$

$$L = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & & & & \vdots & & & & \vdots & & \vdots & & & \vdots \\ \vdots & & & & \vdots & & & & \vdots & & \vdots & & & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & \dots & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

Para ter-se o modelo geral interligado com a rede, escreve-se I_N na equação (2.40) como :

$$I_N = Y_{NN} V_N + Y_{NB} V_B \tag{2.41}$$

Se as cargas do sistema são representadas por admitância constante, as barras de carga podem ser eliminadas (STEVENSON, 1974), desde que estas sejam incluídas na matriz Y_{bus} .

A linearização, neste caso, é :

$$I_N = Y V_N$$

Três diferentes casos podem ser considerados :

a) Sistema de uma máquina/barra infinita.

Para este sistema, a tensão da barra infinita é constante. Logo, $V_B = 0$ e a linearização de I_N passa a ser :

$$I_N = Y_{NN} V_N \quad (2.42)$$

b) Sistema composto por geradores e barras de carga, sem barra infinita.

Neste caso, as barras são representadas por admitância constante. Assim, as barras de carga podem ser eliminadas, desde que sejam incluídas na matriz Y_{bus} . Assim $I_B = 0$ e a equação (2.41) passa a ser :

$$I_N = (Y_{NN} - Y_{NB} Y_{BB}^{-1} Y_{BN}) V_N = Y'_{NN} V_N \quad (2.43)$$

Assim :

$$I_N = Y'_{NN} V_N$$

c) Sistema composto por geradores, barras de carga e uma barra infinita.

As barras de carga serão eliminadas seguindo o mesmo procedimento anterior, e

$$I_N = Y_{NN} V_N + Y_{NB} V_B \quad (2.44)$$

Como $V_B = 0$ para a barra infinita então :

$$I_N = Y'_{NN} V_N$$

O sistema linear geral é obtido quando as máquinas são interconectadas com a rede. Para a equação (2.29) :

$$V_n = G x + H I_n \quad (2.45)$$

Agora, para as equações (2.41), (2.42), (2.43), (2.44) e (2.45), I_N é obtida em termos dos estados do sistema como:

$$I_n = (\bar{T}_0 - Y_{NN} \bar{T}_0 H^{-1}) [Y_{NN} \bar{T}_{v0} - \bar{T}_{i0}] L x \quad (2.46)$$

Substituindo a equação (2.46) nas equações (2.27)

e 2.28, a representação linear geral terá a forma de :

$$\dot{x} = A x + B u \quad (2.47)$$

$$Y = C x + E u \quad (2.48)$$

onde

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_m)^t,$$

$$y = (y_1, y_2, \dots, y_m)^t \text{ e}$$

$$u = (u_1, u_2, \dots, u_m)^t$$

Quando o sistema de potência é grande, é preferível usar o modelo linear máquina/equivalente dinâmico (MOTA, 1981).

O sistema linear aqui representado é de fácil implementação computacional, exigindo apenas multiplicações e inversões de matrizes. Vale frizar que a inversão é feita apenas para a matriz P e esta normalmente possui dimensão pequena. A linearização do sistema máquina/regulador de tensão foram feitas para três diferentes tipos de modelos de máquina síncrona (3^a, 5^a e 6^a ordem), para dois casos diferentes (máquina/barra infinita e três máquinas/barra infinita) do sistema em estudo.

Considerou-se as condições iniciais e os parâmetros das máquinas e sistema de excitação em tabelas no fim deste capítulo. Seguindo o procedimento aqui descrito por MOTA, (1981), obteve-se as matrizes A, B e C para cada modelo de máquina considerado e para dois diferentes casos. As mesmas são

mostradas a seguir :

Caso 1 - Máquina 1 / barra infinita.

- Modelagem linear com sete estados

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -108.6 & 0 & -154.4 & 19.3 & -3.07 & 16.26 & 0 \\ -0.72 & 0 & -1.77 & 0.84 & -0.04 & 0.23 & 0.156 \\ 3.84 & 0 & 35.84 & -30.87 & 0.234 & -1.24 & 0 \\ 0.61 & 0 & 0.57 & -0.07 & -16.70 & 19.28 & 0 \\ -2.19 & 0 & -2.03 & 0.254 & 12.95 & -21.87 & 0 \\ -53.00 & 0 & -1249.60 & 156.20 & -513.00 & 2717.00 & -20 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 4000 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^t$$

$$C = \begin{bmatrix} 0.013 & 0 & 0.312 & -0.039 & 0.128 & -0.679 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4.70 & 0 & 6.71 & -0.839 & 0.133 & -0.707 & 0 \end{bmatrix}$$

- Modelagem linear com seis estados

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -108.6 & 0 & -154.40 & 19.30 & 13.19 & 0 \\ -0.72 & 0 & -1.77 & 0.84 & 0.189 & 0.156 \\ 3.84 & 0 & 35.84 & -30.87 & -1.00 & 0 \\ -15.58 & 0 & -14.40 & 1.80 & -63.24 & 0 \\ -53.00 & 0 & -1249.60 & 156.20 & 2203.60 & -20 \end{bmatrix}$$

$$B = [0 \ 0 \ 4000 \ 0 \ 0 \ 0]^t$$

$$C = \begin{bmatrix} 0.013 & 0 & 0.312 & -0.030 & -0.550 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4.70 & 0 & 6.71 & -0.800 & -0.57 & 0 \end{bmatrix}$$

- Modelagem linear com quatro estados.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -109.3 & -0.45 & -134.40 & 0 \\ -0.656 & 0 & -0.83 & 0.156 \\ -566.90 & 0 & -1496.0 & -20 \end{bmatrix}$$

$$B = [0 \ 0 \ 4000 \ 0]^t$$

$$C = \begin{bmatrix} 0.142 & 0 & 0.374 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 4.75 & 0 & 5.84 & 0 \end{bmatrix}$$

- Modelagem linear com três estados.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -109.3 & -0.45 & -134.40 \\ -4.98 & 0 & -12.24 \end{bmatrix}$$

$$B = [0 \ 0 \ 31.24]$$

$$C = \begin{bmatrix} 0.142 & 0 & 0.374 \\ 0 & 1 & 0 \\ 4.75 & 0 & 5.84 \end{bmatrix}$$

Caso 2 - Três máquinas/barra infinita.

Para sistema com várias máquinas, o modelo linearizado toma a seguinte forma :

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ \vdots \\ X_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \dots & A_{1m} \\ A_{21} & A_{22} & \dots & A_{2m} \\ A_{31} & A_{32} & \dots & A_{3m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{m1} & A_{m2} & \dots & A_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ \vdots \\ X_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & & & 0 \\ & B_{22} & & \\ & & B_{33} & \\ & & & \ddots \\ 0 & & & & B_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ \vdots \\ u_m \end{bmatrix} \quad (2.49)$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_3 \\ \vdots \\ y_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & \dots & C_{1m} \\ C_{21} & C_{22} & \dots & C_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{m1} & C_{m2} & \dots & C_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_3 \\ \vdots \\ y_m \end{bmatrix} \quad (2.50)$$

onde m é o número de máquinas do sistema.

A seguir apresenta-se as matrizes A , B e C para o sistema multímáquina, conforme equações (2.49) e (2.50).

Modelagem linear com 21 estados.

$$A_{11} = \begin{array}{c} \begin{array}{ccccccc} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -114.1 & 0 & -155.0 & 19.3 & -0.17 & 0.94 & 0 \\ -0.78 & 0 & -1.82 & 0.84 & -0.02 & 0.13 & 0.15 \\ 4.19 & 0 & 36.00 & -30.90 & 0.13 & -0.72 & 0 \\ 0.48 & 0 & 0.33 & -0.04 & -16.90 & 19.59 & 0 \\ -1.70 & 0 & -1.18 & 0.14 & 13.03 & -22.33 & 0 \\ -100.90 & 0 & -1012.40 & 126.50 & -504.40 & 2670.90 & -20 \end{array} \end{array}$$

$$A_{12} = \begin{array}{c} \begin{array}{ccccccc} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 19.71 & 0 & 11.15 & 4.4 & -0.95 & 14.18 & 0 \\ 0.12 & 0 & 0.09 & 0.04 & -0.002 & 0.04 & 0 \\ -0.67 & 0 & -0.52 & -0.205 & 0.014 & -0.21 & 0 \\ -0.14 & 0 & 0.07 & 0.028 & 0.026 & -0.39 & 0 \\ 0.49 & 0 & -0.25 & -0.100 & -0.093 & 1.37 & 0 \\ 35.24 & 0 & -122.49 & -48.37 & -20.27 & 300.00 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \end{array}$$

$$A_{13} = \begin{array}{c} \begin{array}{ccccccc} 38.49 & 0 & -24.48 & 52.86 & -1.78 & 34.47 & 0 \\ 0.28 & 0 & -0.23 & 0.51 & -0.006 & 0.12 & 0 \\ -1.49 & 0 & 1.25 & -2.71 & 0.035 & -0.68 & 0 \\ -0.07 & 0 & -0.28 & 0.61 & 0.04 & -0.77 & 0 \\ 0.27 & 0 & 0.99 & -2.14 & -0.14 & 2.72 & 0 \\ -113.43 & 0 & 386.01 & -833.45 & -29.08 & 560.79 & 0 \end{array} \end{array}$$

$$A_{21} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 36.99 & 0 & 44.77 & -5.59 & -2.35 & 12.44 & 0 \\ 0.12 & 0 & 0.21 & -0.02 & 0.02 & -0.09 & 0 \\ -0.37 & 0 & -0.63 & 0.08 & -0.05 & 0.29 & 0 \\ -0.27 & 0 & -0.17 & 0.02 & 0.08 & -0.44 & 0 \\ 1.55 & 0 & 1.01 & -0.12 & -0.479 & 2.54 & 0 \\ 64.12 & 0 & -28.61 & 3.57 & -50.70 & 268.46 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_{22} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -136.66 & 0 & -99.98 & -39.48 & 3.69 & -54.64 & 0 \\ -0.59 & 0 & 3.43 & -4.25 & -0.004 & 0.06 & 0.18 \\ 1.78 & 0 & 32.18 & -29.72 & 0.013 & -0.20 & 0 \\ 0.65 & 0 & 0.08 & 0.03 & -29.51 & 31.11 & 0 \\ -3.79 & 0 & -0.50 & -0.19 & 12.11 & -21.34 & 0 \\ 2.80 & 0 & -227.49 & -89.84 & -29.98 & 443.74 & -25 \end{bmatrix}$$

$$A_{23} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 14.36 & 0 & -11.01 & 23.78 & -0.46 & 8.88 & 0 \\ 0.06 & 0 & -0.06 & 0.14 & 0.0003 & -0.006 & 0 \\ -0.17 & 0 & 0.19 & -0.42 & -0.001 & 0.018 & 0 \\ -0.07 & 0 & 0.009 & -0.02 & 0.008 & -0.154 & 0 \\ 0.45 & 0 & -0.050 & 0.12 & -0.046 & 0.891 & 0 \\ 6.14 & 0 & 30.78 & -66.46 & -4.08 & 78.71 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_{31} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 52.83 & 0 & 56.85 & -7.10 & -6.47 & 34.26 & 0 \\ -0.22 & 0 & -0.307 & 0.038 & -0.001 & 0.005 & 0 \\ 0.77 & 0 & 1.06 & -0.132 & 0.003 & -0.019 & 0 \\ -0.14 & 0 & -0.006 & 0.0008 & 0.079 & -0.422 & 0 \\ 1.38 & 0 & 0.065 & -0.008 & -0.797 & 4.221 & 0 \\ 40.08 & 0 & -374.46 & 46.80 & -188.202 & 996.52 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_{32} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 9.81 & 0 & 5.62 & 2.22 & -0.4600 & 6.920 & 0 \\ -0.04 & 0 & -0.03 & -0.01 & 0.0006 & -0.008 & 0 \\ 0.14 & 0 & 0.11 & 0.046 & -0.002 & 0.028 & 0 \\ -0.03 & 0 & 0.007 & 0.003 & 0.004 & -0.064 & 0 \\ 0.28 & 0 & -0.071 & -0.028 & -0.043 & 0.645 & 0 \\ 14.07 & 0 & -58.69 & 23.675 & -9.49 & 140.58 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_{33} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -200.90 & 0 & 191.55 & -413.59 & 2.35 & -45.34 & 0 \\ 0.84 & 0 & -21.06 & 22.18 & 0.008 & -0.15 & 0.21 \\ -2.92 & 0 & 35.47 & -39.33 & -0.030 & 0.53 & 0 \\ 0.54 & 0 & -0.16 & 0.34 & -14.55 & 15.98 & 0 \\ -5.47 & 0 & 1.61 & -3.48 & 8.30 & -22.61 & 0 \\ -207.70 & 0 & 1076.76 & -2324.86 & -93.74 & 1807.57 & -50 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4000 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1250 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 5000 \end{bmatrix}^t$$

$$C_{11} = \begin{bmatrix} -0.025 & 0 & 0.25 & -0.031 & 0.126 & -0.667 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4.963 & 0 & 6.74 & -0.843 & 0.007 & -0.041 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$C_{12} = \begin{bmatrix} -0.008 & 0 & 0.03 & 0.012 & 0.005 & -0.075 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.857 & 0 & -0.48 & -0.191 & 0.041 & -0.617 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C_{13} = \begin{bmatrix} 0.028 & 0 & -0.096 & 0.208 & 0.007 & -0.14 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1.673 & 0 & 1.06 & -2.299 & 0.077 & -1.49 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C_{21} = \begin{bmatrix} -0.051 & 0 & 0.02 & -0.003 & 0.04 & -0.215 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.843 & 0 & -1.02 & 0.127 & 0.05 & -0.284 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C_{22} = \begin{bmatrix} -0.002 & 0 & 0.18 & 0.07 & 0.024 & -0.35 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3.11 & 0 & 2.28 & 0.90 & -0.08 & 1.24 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$C_{23} = \begin{bmatrix} -0.005 & 0 & -0.02 & 0.05 & 0.003 & -0.063 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.327 & 0 & 0.25 & -0.54 & 0.01 & -0.02 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C_{31} = \begin{bmatrix} -0.008 & 0 & 0.07 & -0.009 & 0.037 & -0.19 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1.76 & 0 & -1.90 & 0.23 & 0.21 & -1.145 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C_{32} = \begin{bmatrix} -0.0028 & 0 & 0.012 & 0.004 & 0.002 & -0.028 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.328 & 0 & -0.18 & -0.074 & 0.015 & -0.23 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C_{33} = \begin{bmatrix} 0.04 & 0 & -0.215 & 0.465 & 0.018 & -0.36 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 6.71 & 0 & -6.40 & 13.82 & -0.078 & 1.51 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Modelagem linear com 18 estados.

$$A_{11} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -114.09 & 0 & -155.02 & 19.37 & 0.76 & 0 \\ -0.78 & 0 & -1.82 & 0.84 & 0.11 & 0.156 \\ 4.19 & 0 & 36.08 & -30.09 & -0.58 & 0 \\ -12.07 & 0 & -8.40 & 1.05 & -65.96 & 0 \\ 100.91 & 0 & -1012.5 & 126.55 & 2166.44 & -20 \end{bmatrix}$$

$$A_{12} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 19.71 & 0 & 11.15 & 4.40 & 13.22 & 0 \\ 0.126 & 0 & 0.09 & 0.038 & 0.037 & 0 \\ -0.67 & 0 & -0.52 & -0.205 & -0.206 & 0 \\ 3.48 & 0 & -1.79 & -0.71 & 9.11 & 0 \\ 35.24 & 0 & -122.49 & -48.37 & 279.74 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_{13} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 38.49 & 0 & 5.24 & 22.40 & 31.82 & 0 \\ 0.28 & 0 & 0.05 & 0.216 & 0.119 & 0 \\ -1.49 & 0 & -0.26 & -1.15 & -0.63 & 0 \\ 1.97 & 0 & -1.51 & -6.45 & 17.81 & 0 \\ -113.36 & 0 & -82.71 & -353.21 & 517.65 & 0 \end{bmatrix}$$

$A_{21} =$	0	0	0	0	0	0
	36.99	0	44.77	-5.59	10.09	0
	0.124	0	0.21	-0.026	-0.08	0
	-0.37	0	-0.63	0.078	0.23	0
	12.79	0	8.35	-1.044	16.94	0
	64.12	0	-28.61	3.57	217.75	0

$A_{22} =$	0	1	0	0	0	0
	-136.66	0	-99.98	-39.48	-50.95	0
	-0.59	0	3.42	-4.25	0.06	0.18
	1.78	0	32.18	-29.72	-0.18	0
	-31.18	0	-4.12	-1.62	-75.95	0
	2.80	0	-227.49	-89.84	413.76	-25

$A_{23} =$	0	0	0	0	0	0
	14.35	0	2.36	10.08	8.20	0
	0.059	0	0.014	0.05	-0.005	0
	-0.176	0	-0.042	-0.17	0.017	0
	3.70	0	0.099	0.42	6.76	0
	6.145	0	-6.59	-28.16	72.60	0

$A_{31} =$	0	0	0	0	0	0
	52.82	0	56.84	-7.10	27.79	0
	0.05	0	0.06	-0.008	-0.001	0
	1.83	0	2.50	-0.31	-0.036	0
	5.87	0	0.27	-0.03	14.48	0
	40.04	0	-374.53	46.80	808.32	0

$$A_{32} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 9.80 & 0 & 5.62 & 2.22 & 6.45 & 0 \\ 0.009 & 0 & 0.007 & 0.003 & 0.002 & 0 \\ 0.33 & 0 & 0.27 & 0.109 & 0.063 & 0 \\ 1.18 & 0 & -0.30 & -0.11 & 2.54 & 0 \\ 14.06 & 0 & -59.70 & -23.57 & 131.08 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_{33} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -200.86 & 0 & -41.04 & -175.27 & -41.86 & 0 \\ -0.19 & 0 & -3.85 & 3.60 & 0.03 & 0.218 \\ -6.89 & 0 & 30.45 & -39.33 & 1.16 & 0 \\ -23.13 & 0 & -1.46 & -6.24 & -58.96 & 0 \\ -207.53 & 0 & -230.73 & -985.27 & 1668.50 & -50 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 4000 & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 1250 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 5000 \end{bmatrix}^t$$

$$C_{11} = \begin{bmatrix} 0.025 & 0 & 0.253 & -0.031 & -0.541 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4.90 & 0 & 6.70 & -0.84 & -0.033 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$C_{12} = \begin{bmatrix} -0.008 & 0 & 0.030 & 0.012 & -0.069 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.857 & 0 & -0.485 & -0.191 & -0.575 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C_{13} = \begin{bmatrix} 0.028 & 0 & 0.02 & 0.088 & -0.129 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1.674 & 0 & -0.228 & -0.974 & -1.38 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C_{21} = \begin{bmatrix} -0.051 & 0 & 0.023 & -0.003 & -0.174 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.843 & 0 & -1.02 & 0.127 & -0.23 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C_{22} = \begin{bmatrix} -0.002 & 0 & 0.182 & 0.072 & -0.331 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3.11 & 0 & 2.28 & 0.9 & 1.16 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$C_{23} = \begin{bmatrix} -0.005 & 0 & 0.005 & 0.0225 & -0.058 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.33 & 0 & -0.054 & -0.23 & -0.187 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C_{31} = \begin{bmatrix} -0.008 & 0 & 0.075 & -0.009 & -0.161 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1.71 & 0 & -1.89 & 0.237 & -0.928 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C_{32} = \begin{bmatrix} -0.003 & 0 & 0.012 & 0.004 & -0.026 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.327 & 0 & -0.187 & -0.074 & -0.215 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C_{33} = \begin{bmatrix} 0.041 & 0 & 0.046 & 0.196 & -0.33 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 6.71 & 0 & 1.37 & 5.85 & 1.39 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Modelagem linear com 12 estados.

$$A_{11} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -106.70 & -0.45 & -131.30 & 0 \\ -0.86 & 0 & -0.83 & 0.156 \\ -148.50 & 0 & -1119 & -20 \end{bmatrix} ; A_{12} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 14.30 & 0 & 13.500 & 0 \\ 0.09 & 0 & 0.109 & 0 \\ -102 & 0 & 351.8 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_{13} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 21.34 & 0 & 17.13 & 0 \\ 0.16 & 0 & 0.16 & 0 \\ -373.10 & 0 & -771.8 & 0 \end{bmatrix} ; A_{21} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 29.19 & 0 & 34.78 & 0 \\ 0.20 & 0 & 0.28 & 0 \\ 94.59 & 0 & -22.40 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_{22} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -117.90 & -0.87 & -138.60 & 0 \\ -0.88 & 0 & -1.17 & 0.18 \\ -175.30 & 0 & -378.7 & -25 \end{bmatrix} ; A_{23} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 9.07 & 0 & 10.1 & 0 \\ 0.07 & 0 & 0.10 & 0 \\ -27.90 & 0 & -87.3 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_{31} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 37.50 & 0 & 37.50 & 0 \\ 0.218 & 0 & 0.24 & 0 \\ 4.30 & 0 & -497.30 & 0 \end{bmatrix} ; A_{32} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 5.84 & 0 & 5.4 & 0 \\ 0.03 & 0 & 0.04 & 0 \\ -55.6 & 0 & -201.6 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_{33} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -153.3 & -0.59 & -178.60 & 0 \\ -0.85 & 0 & -1.87 & 0.2 \\ -715 & 0 & 1385.3 & -50 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 4000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1250 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5000 \end{bmatrix}^t$$

$$C_{11} = \begin{bmatrix} 0.037 & 0 & 0.279 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 4.60 & 0 & 5.70 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$C_{12} = \begin{bmatrix} 0.025 & 0 & 0.08 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.62 & 0 & -0.59 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C_{13} = \begin{bmatrix} 0.093 & 0 & 0.190 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.92 & 0 & -0.74 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C_{21} = \begin{bmatrix} -0.075 & 0 & 0.018 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.66 & 0 & -0.79 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C_{22} = \begin{bmatrix} 0.140 & 0 & 0.303 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 2.69 & 0 & 3.16 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$C_{23} = \begin{bmatrix} 0.022 & 0 & 0.069 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.206 & 0 & -0.23 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C_{31} = \begin{bmatrix} -0.0009 & 0 & 0.090 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1.25 & 0 & -1.25 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C_{32} = \begin{bmatrix} 0.011 & 0 & 0.04 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.195 & 0 & -0.18 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C_{33} = \begin{bmatrix} 0.143 & 0 & 0.277 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 5.12 & 0 & 5.97 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Modelagem linear com 9 estados.

$$A_{11} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -106.6 & -0.46 & -131.24 \\ 1.84 & 0 & -9.41 \end{bmatrix}$$

$$A_{12} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 14.3 & 0 & 13.58 \\ -0.67 & 0 & -2.56 \end{bmatrix}$$

$$A_{13} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 21.38 & 0 & 17.2 \\ -2.66 & 0 & -5.70 \end{bmatrix}$$

$$A_{21} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 29.18 & 0 & 34.75 \\ 0.91 & 0 & 0.104 \end{bmatrix}$$

$$A_{22} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -117.9 & -0.87 & -138.60 \\ -2.20 & 0 & -4.02 \end{bmatrix}$$

$$A_{23} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 9.06 & 0 & 10.16 \\ -0.12 & 0 & -0.55 \end{bmatrix}$$

$$A_{31} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 37.50 & -0.46 & 37.44 \\ 0.22 & 0 & -1.86 \end{bmatrix}$$

$$A_{32} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 5.84 & 0 & 5.40 \\ -0.19 & 0 & -0.804 \end{bmatrix}$$

$$A_{33} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -153.3 & -0.598 & -178.60 \\ 3.80 & 0 & -6.91 \end{vmatrix}$$

$$B = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 31.24 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 9.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 21.2 \end{vmatrix}^t$$

$$C_{11} = \begin{vmatrix} 0.038 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 4.64 & 0 & 5.7 \end{vmatrix} ; C_{12} = \begin{vmatrix} 0.02 & 0 & 0.08 \\ 0 & 0 & 0 \\ -0.62 & 0 & -0.59 \end{vmatrix}$$

$$C_{13} = \begin{vmatrix} 0.09 & 0 & 0.19 \\ 0 & 0 & 0 \\ -0.93 & 0 & -0.74 \end{vmatrix} ; C_{21} = \begin{vmatrix} -0.07 & 0 & 0.018 \\ 0 & 0 & 0 \\ -0.66 & 0 & -0.79 \end{vmatrix}$$

$$C_{22} = \begin{vmatrix} 0.140 & 0 & 0.3 \\ 0 & 1 & 0 \\ 2.69 & 0 & 3.16 \end{vmatrix} ; C_{23} = \begin{vmatrix} 0.022 & 0 & 0.069 \\ 0 & 0 & 0 \\ -0.206 & 0 & -0.23 \end{vmatrix}$$

$$C_{31} = \begin{vmatrix} -0.0003 & 0 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1.25 & 0 & -1.25 \end{vmatrix} ; C_{32} = \begin{vmatrix} 0.011 & 0 & 0.04 \\ 0 & 0 & 0 \\ -0.19 & 0 & -0.18 \end{vmatrix}$$

$$C_{33} = \begin{vmatrix} 0.142 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 5.12 & 0 & 5.9 \end{vmatrix}$$

A fim de comprovar a eficácia do programa de linearização dos modelos de máquina síncrona, observou-se a variação do ângulo de torque nas simulações dos modelos linear e não-linear com sete (7) estados, conforme Fig. 2.4. As curvas desta figura demonstram que a linearização é eficiente, pois não houve quase diferença entre as duas curvas, no primeiro pico.

O erro 0.91% foi calculado considerando-se a variação do modelo não-linear como verdadeira.

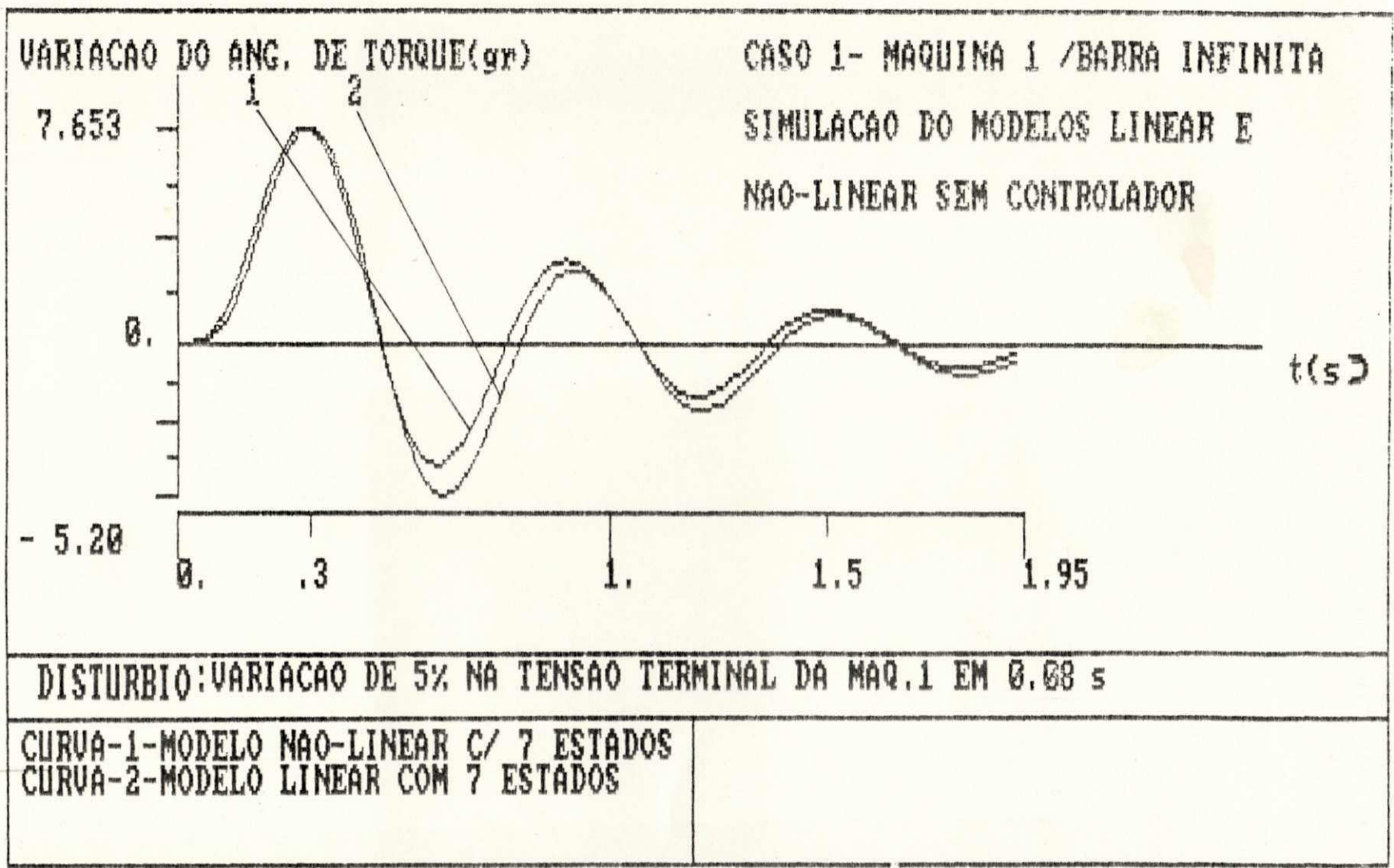


Fig. 2.4

CAPÍTULO III

TEORIA BÁSICA PARA O PROJETO DE CONTROLADORES BASEADO EM TEORIA DE CONTROLE ÓTIMO.

3.1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresenta-se a teoria básica para o projeto de sinais estabilizadores ótimos aplicados a sistemas de potência, cuja estratégia baseia-se na realimentação ótima de estados.

3.2 - Estratégia de Controle

A estratégia de realimentação ótima de estados é baseada num modelo linear em forma de variáveis de estado :

$$\dot{x} = A x + B u \quad (3.1)$$

$$y = C x \quad (3.2)$$

Sabe-se que, sob completa controlabilidade, um sistema linear invariante no tempo pode ser estabilizado por uma lei linear de realimentação de estados. Após uma perturbação, escolhendo-se os pólos bem afastados do eixo imaginário no plano complexo, a convergência do sistema para o estado inicial poderá ser feita de modo arbitrariamente rápido. Entretanto, o sistema requererá ganhos altos e, conseqüentemente, valores altos para o sinal de entrada. Em qualquer problema prático, o sinal de entrada é sempre limitado, o qual impõe um limite de deslocamento dos pólos para a esquerda do eixo imaginário. Estas considerações naturalmente conduzem à formulação de um problema de otimização no qual a velocidade de convergência e a grandeza de amplitude do sinal de entrada são levadas em consideração (MOTA, 1982). O problema de otimização é formulado como se segue.

Considere o seguinte índice de desempenho :

$$J = \int_0^{\infty} (x^t Q x + u^t R u) dt \quad (3.3)$$

onde Q é uma matriz simétrica positiva semidefinida e R é uma matriz peso simétrica positiva definida.

A lei de controle é então calculada pela minimização de J na equação (3.1). A quantidade $(x^t Q x)$ está ligada ao comprimento do desvio do estado num tempo t para o estado inicial $t=0$. O termo $(u^t R u)$ reduz a amplitude do sinal de entrada se desejarmos minimizar J na equação (3.3). Sabe-se que a estratégia de controle ótimo é dada por (ATHANS & FALB, 1966):

$$u^* = -R^{-1} B^t P x = k^* x \quad (3.4)$$

onde P é a matriz simétrica positiva semi-definida e única, obtida da solução da equação de Riccati em regime permanente (KWAKERNAAK and SIVAN, 1972):

$$P A + A^t P - P B R^{-1} B^t + Q = 0 \quad (3.5)$$

Para uma implementação real, é necessário que se tenha a realimentação em função de algumas saídas mensuráveis. Assim, define-se um índice de desempenho, J , em função destas, considerando-se o seguinte índice de desempenho (MOTA, 1984):

$$J = \int_0^{\infty} (y^t Q_c y + u^t R u) dt \quad (3.6)$$

onde Q_c é uma matriz peso diagonal. Substituindo-se a equação (3.2) na equação (3.6), tem-se :

$$J = \int_0^{\infty} (x^t Q x + u^t R u) dt \quad (3.7)$$

onde $Q = C^t Q_c C$, idêntica à equação (3.3).

A lei de controle da equação (3.4) é feita por realimentação de estados, os quais são facilmente obtidos se a matriz C é inversível, isto é, quando o número de saídas (medições) é igual ao número de estados. Assim :

$$u = K x = K C^{-1} y \quad (3.8)$$

Nesta estratégia o controlador é considerado ótimo se todas as variáveis de estado são realimentadas, ou seja, se o número de variáveis de estado for igual ao número de variáveis de saída. Se este requisito não for satisfeito, utiliza-se um artifício que consiste em adicionar ao vetor y , quando este for menor que o vetor x , as variáveis finais deste último, de forma a obter-se uma matriz C' quadrada. Assim :

$$\begin{array}{c|c}
 \begin{array}{c} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \vdots \\ x_{n-1} \\ x_n \end{array} \\
 \hline
 = \\
 \hline
 \begin{array}{cccccccc} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & \dots & 0 & & \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & \dots & 0 & & \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & \dots & 0 & & \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \\ 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 1 & & \end{array} \\
 \hline
 \begin{array}{c} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \vdots \\ x_{n-1} \\ x_n \end{array}
 \end{array}$$

Logo, para fins de projeto, na equação (3.8), será considerado:

$$y = (v_t \dot{S} P_t U_{fd} U_{kd} U_e U_{kq}), \text{ para sete estados, ou}$$

$$y = (v_t \dot{S} P_t U_{fd} U_{kd} U_{kq}), \text{ para seis estados, ou}$$

$$y = (v_t \dot{S} P_t U_{fd}), \text{ para quatro estados, ou}$$

$$y = (v_t \dot{S} P_t), \text{ para três estados.}$$

Os vetores y mostrados são válidos para o projeto

de uma máquina.

A Fig. 3.1, mostra um diagrama de blocos para o sistema linearizado com e sem realimentação.

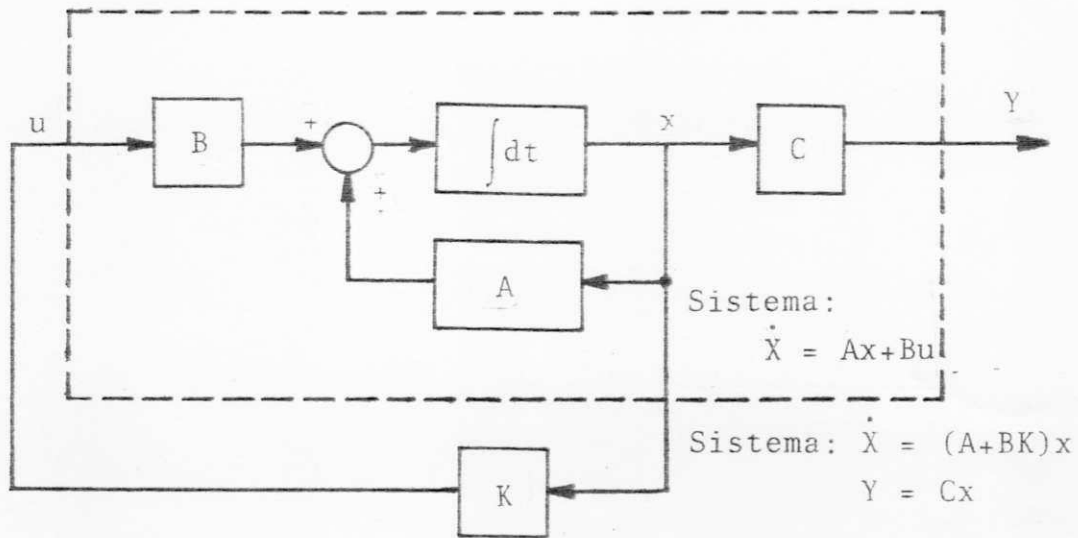


FIGURA 3.1 - Diagrama de blocos para o sistema linearizado com e sem implementação dos controladores.

3.2 - Projeto dos Controladores

O problema de controle ótimo com índice de desempenho quadrático se resume em arbitrar adequadamente as matrizes $Q \geq 0$ e $R > 0$ e resolver a equação matricial de Riccati .

Devido às dificuldades encontradas na solução da equação de Riccati para os modelos linearizados de ordem maior que doze, dois métodos numéricos foram aqui utilizados na solução da mesma:

- Método dos autovetores, cujo algoritmo para a solução pode ser encontrada em CASTRO(1982). Este método, apesar de utilizar muita memória, não apresenta problemas de convergência.

- Método iterativo de DAVISON & MAN (1968). O mesmo é de fácil implementação, exige pouca memória, mas só funciona quando o sistema inicial é estável. A formulação para este método, feita resumidamente a seguir, pode ser encontrado com mais detalhe em DAVISON & MAN (1968).

Seja a equação matricial de Riccati:

$$A^t P + P A - P S Q = - Q \quad (3.9)$$

onde

$$S = B R^{-1} B^t \quad (3.10)$$

Somando-se $-PSP$ aos dois membros da equação (3.9), após algumas manipulações, chega-se a:

$$(A - S P)^t + P (A - S P) = -Q - P S P \quad (3.11)$$

O método da iteração direta consiste em determinar P_{k+1} , $k = 0, 1, 2, \dots$, da seguinte equação de Lyapunov :

$$(A - S P_k)^t P_{k+1} + P_{k+1} (A - S P_k) = -Q - P_k S P_k \quad (3.12)$$

P_0 pode ser qualquer matriz positiva semidefinida ou até $P_0 = 0$. O método converge se a cada iteração a matriz $(A - S P_k)$ tiver autovalores com partes reais negativas. Além disso, $(Q - P_k S P_k)$ deve ser positiva semidefinida. A equação (3.12) é uma equação de Lyapunov que a cada iteração deve ser resolvida, também iterativamente. Essa equação é do tipo:

$$G^t Y + Y G = -C \quad (3.13)$$

A cada iteração, G e C são conhecidas.

3.2.1 - Método de solução de DAVISON & MAN (1968).

A solução da equação (3.13) é dada por:

$$Y = \lim_{n \rightarrow \infty} h (G + \tau^t C \tau + (\tau^t)^2 C \tau^2 + \dots + (\tau^t)^n C \tau^n + \dots) \quad (3.14)$$

A soma matricial da equação (3.14) é realizada pelo seguinte algoritmo:

i - arbitre um valor pequeno para h, DAVISON & MAN (1968) estabelecem um valor típico, o qual é :

$$h = 1 / (200 | \lambda_{\text{dom}(A)} |) \quad (3.15)$$

onde

$| \lambda_{\text{dom}(A)} |$ é o valor absoluto do maior autovalor da matriz A.

ii - calcule

$$\tau = (I - h/2 A + h^2/12 A^2)^{-1} (I + h/2 A + h^2/12 A^2) \quad (3.16)$$

onde I é a matriz identidade

iii - tome

$$Y_0 = h C \quad (3.17)$$

iv - calcule

$$Y_{j+1} = (\tau^t)^2 Y_j (\tau)^2 + Y_j, \quad j = 0, 1, 2, \dots \quad (3.18)$$

A cada passo verifica-se a convergência, pois à medida que j cresce (na ordem de 10 a 15), tem-se Y_{j+1} aproximadamente igual à solução da equação de Lyapunov.

CAPÍTULO IV

PROJETO, IMPLEMENTAÇÃO E ANÁLISE DE SINAIS DE CONTROLE EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA.

4.1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresenta-se o projeto, a análise e a implementação dos sinais estabilizadores. O projeto destes sinais é feito com base em realimentação ótima de estados para os modelos de máquina/regulador de tensão de 4^a, 6^a e 7^a ordem. Para este projeto considera-se dois diferentes casos, tomados com ilustração: máquina 1/barra infinita e três máquinas/barra infinita. A seguir, implementa-se estes sinais para fins de comparações e obtenção de resultados conclusivos. Para isto, observa-se através de autovalores e comportamento gráfico os diversos controladores projetados a partir de diversos modelos de máquina síncrona, já citados. As análises gráficas serão feitas para o ângulo de torque das máquinas considerada no projeto, com e sem implementação dos controladores.

Foram feitas simulações com modelos lineares e

não-lineares para os dois casos considerados. Nestas simulações foram observados dois tipos de defeito, os quais consistem de uma pequena e grande perturbação. Para cada tipo de defeito, foram feitas implementações dos controladores calculados a partir dos modelos de máquina síncrona citados anteriormente. A Fig. 4.1 mostra o diagrama de blocos correspondente à implementação do sinal estabilizador na simulação do modelo não-linear.

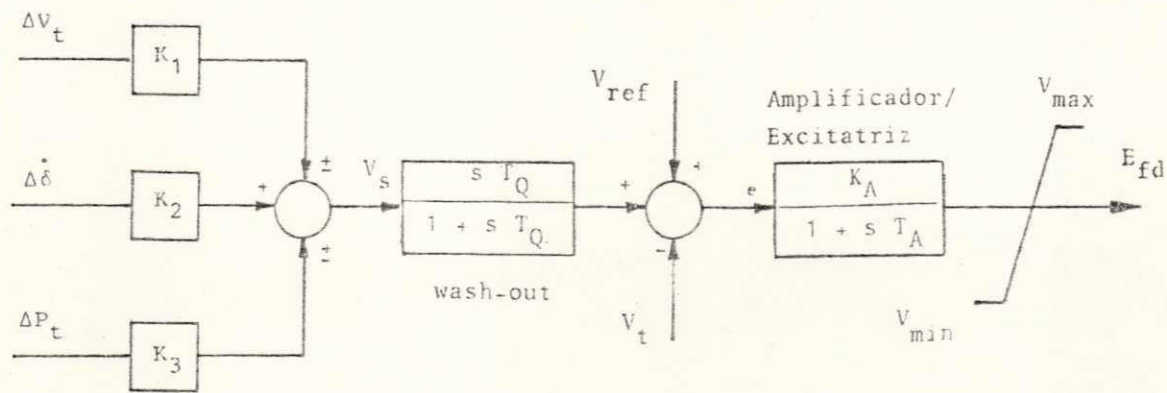


FIGURA 4.1 - Diagrama de blocos dos controladores no modelo não-linear.

4.2 - Projeto Análise e implementação dos Controladores para o
 Caso Máquina 1 / Barra Infinita.

4.2.1- Obtenção dos Controladores.

Para o sistema de uma máquina / barra infinita, a matriz R é formada de um único elemento correspondente a entrada V_s .

$$R = \begin{matrix} V \\ | R^s | V_s \end{matrix} \quad (4.1)$$

e Q é uma matriz quadrada nxn

$$Q = \begin{matrix} & | s & | \dot{s} & | \dots & | e_{fd} \\ \hline s & | Q_{11} & | Q_{12} & | \dots & | Q_{1n} \\ \hline \dot{s} & | Q_{21} & | Q_{22} & | \dots & | Q_{2n} \\ \hline \vdots & | \vdots & | \vdots & | \vdots & | \vdots \\ \hline e_{fd} & | Q_{n1} & | Q_{n2} & | \dots & | Q_{nn} \\ \hline \end{matrix} \quad (4.2)$$

Para se obter uma melhoria no torque de amortecimento, o elemento Q_{22} correspondente a \dot{s} deverá ser bem maior que os outros elementos da matriz Q (MOTA, 1981). As matrizes Q e R utilizadas no projeto seguem o mesmo procedimento de escolha utilizado por MOTA (1981). Para as matrizes Q e R tem-se :

$$Q_{diag} = \begin{bmatrix} 0.001 & 0.03 & 0.001 & 0.001 & \dots & 0.001 \end{bmatrix}$$

sendo que os elementos fora da diagonal são nulos. Tem-se ainda:

$$R = \begin{bmatrix} 20 \end{bmatrix}$$

Após a solução da equação de Riccati, para cada modelo de máquina síncrona apresentado, obteve-se os controladores na forma de :

$$u = -K y \tag{4.3}$$

$$u = - \begin{bmatrix} K_1 & K_2 & \dots & K_7 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_t \\ \dot{s} \\ s \\ P_t \\ U_{fd} \\ U_{kd} \\ U_{kq} \\ U_e \end{bmatrix}$$

A Tab.4.1 mostra os controladores obtidos para o caso estudado, conforme modelos de máquina síncrona/regulador de tensão aqui tratados.

Modelo	Ganhos do vetor u						
17 ^a ordem	0.221	0.0171	-0.0561	-0.0421	-0.0053	-0.0171	-0.0201
16 ^a ordem	0.229	0.0131	-0.05	0.044	-0.0106	-0.0048	
14 ^a ordem	0.002	0.0131	-0.0451	-0.0051			
13 ^a ordem	-0.0017	0.0241	-0.0361				

Tabela 4.1

Mostra-se a seguir os autovalores das matrizes do sistema original, do sistema com realimentação ótimo e com realimentação sub-ótima, para os modelos de máquinas síncrona/regulador de tensão de 7^a, 6^a e 4^a ordem e de 3^a ordem para máquina.

Vetor x	Auto-valores da matriz original	Auto-valores da matriz A (ótima)	Auto-valores da matriz A (sub-ótima)
s	-36.64	-36.65	-36.5
\dot{s}	- 1.70 + j10.5	-29.00	-29.85
U_{fd}	- 1.70 - j10.5	- 7.01 + j13.73	-6.23 + j 17.92
U_{kd}	-10.03 + j7.30	- 7.01 - j13.73	-6.23 - j 17.92
U_e	-10.03 - j7.30	-8.85 + j1.17	-5.23 + j 4.49
U_{kg}	-28.9	-8.85 - j1.17	-5.23 - j 4.49
e_{fd}	- 2.66	-24.61	- 2.45

Tabela 4.2

Vetor x	Auto-valores da matriz original	Auto-valores da matriz A (ótima)	Auto-valores da matriz A (sub-ótima)
s	-64.98	-65.35	-64.89
\dot{s}	- 7.657 + j11.5	-5.12 + j11.14	- 6.95 + j19.2
U_{fd}	- 7.657 - j11.5	-5.12 - j11.14	- 6.95 - j19.2
U_{kd}	- 3.405 + j7.94	-28.25 + j6.42	-3.71 + j3.9
U_{kg}	- 3.405 - j7.94	-28.25 - j6.42	-3.71 - j3.9
e_{fd}	-28.79	- 3.24	- 29.67

Tabela 4.3

Vetor x	Auto-valores da matriz original	Auto-valores da matriz A (ótima)	Auto-valores da matriz A (sub-ótima)
S	-7.47 + j12.37	-5.28 + j11.24	-6.89 + j18.66
S̄	-7.47 - j12.37	-5.28 - j11.24	-6.89 - j18.66
U _{fd}	-3.16 + j7.44	-26.47	-3.75 + j4.52
e _{fd}	-3.16 - j7.44	-3.35	-3.75 - j4.52

Tabela 4.4

Vetor x	Auto-valores da matriz original	Auto-valores da matriz A (ótima)
S	-2.12 + j8.63	-7.49 + j9.98
S̄	-2.12 - j8.63	-7.49 - j9.98
U _{fd}	-8.45	-4.29

Tabela 4.5

4.2.2 - Implementação dos Controladores nos Modelos Lineares.

- Realimentação ótima e sub-ótima.

Nas simulações dos modelos lineares a realimentação ótima foi feita considerando-se todas as variáveis de estado. Assim :

$$u^* = -K^* x$$

A realimentação sub-ótima foi feita de modo a considerar apenas os ganhos correspondentes a (x_1, x_2, x_3) . Os ganhos correspondentes as demais variáveis de estado foram consideradas iguais a zero. Logo, têm-se:

$$u = -K'x$$

4.2.3 - Análises Gráficas e dos Autovalores na Simulação dos Modelos Linearizados.

Considerando os autovalores das tabelas 4.2, 4.3 e 4.4, pode-se ver que os autovalores da realimentação ótima mostram-se um pouco mais estáveis que na realimentação sub-ótima. Este efeito pode ser melhor observado através das Figs. 4.2, 4.3 e 4.4, as quais mostram o ângulo de torque da máquina 1 no modelo linearizado, para uma variação de 5% na tensão terminal da mesma, durante 0.08 segundos. Os controladores das respectivas figuras são projetados a partir dos modelos linearizados de 7^a, 6^a e 4^a ordem. A simulação é linear. As curvas das respectivas figuras correspondem aos casos onde têm-se o sistema perturbado com :

- ausência de controladores
- controlador ótimo projetado com todos estados
- controlador sub-ótimo projetado com três estados

De acordo com as Figs. 4.2, 4.3 e 4.4, os controles ótimo e sub-ótimo implementados nos diversos modelos lineares apresentaram os seguintes desempenhos:

- Para os modelos linearizados com quatro e seis estados (Figs. 4.4 e 4.3), os controladores ótimo e sub-ótimo correspondentes tiveram comportamentos análogos para as duas modelagens.

- Para o modelo linearizado com sete estados (Fig.4.2), os controladores ótimo e sub-ótimo tiveram desempenhos análogos entre si, o que não aconteceu para os modelos lineares, citados no item anterior. Com isto observa-se que o controle sub-ótimo deste modelo apresenta melhor desempenho que os controles projetados a partir de modelos de ordem menor (4^{a} e 6^{a}). Esta diferença deve-se aos efeitos do segundo enrolamento amortecedor de eixo em quadratura (T'_{q0}), o qual não foi considerado no modelo de máquina síncrona de 5^{a} ordem. Este enrolamento representa os efeitos da corrente induzida no ferro (máquinas de pólos lisos). Como a constante de tempo T'_{q0} é bem maior a constante de tempo T'_{q0} (associada ao 1^{o} enrolamento amortecedor em quadratura), esta última não apresenta tanta influência no comportamento do sistema quanto a primeira. Desta forma, os modelos de máquina síncrona de 3^{a} e 5^{a} ordem passam a apresentar comportamentos análogos antes que o sinal estabilizador passe a atuar efetivamente. Assim, pode-se dizer que para projetos de sinais de controle baseados em realimentação ótima de estados em máquinas de polos salientes onde não é considerado o 2^{o} enrolamento amortecedor em quadratura, o modelo de 3^{a} ordem não trará maiores prejuízo em termos da atuação do sinal de controle. Entretanto, se o projeto for feito para uma máquina de polos lisos, ligada a uma barra infinita, o modelo de 6^{a} ordem irá produzir um controle sub-ótimo

melhor que o controlador ótimo do modelo de máquina de 3^ª ordem.
Este efeito pode ser também observado na implementação do modelo
não-linear, a seguir.

VARIACAO DO ANG. DE TORQUE(gp)

CASO 1- MAQUINA 1 / BARRA INFINITA
SIMULACAO DO MODELO LINEARIZADO
COM SETE ESTADOS

1
2
3

7.653

0.

t(s)

- 4.19

0.3

1.

1.5

1.95

DISTURBIO: VARIACAO DE 5% NA TENSAO TERMINAL DA MAQ. 1 EM 0.08 s

CURVA-1-AUSENCIA DE CONTROLADOR

CURVA-2-CONTROLADOR OTIMO

CURVA-3-CONTROLADOR SUB-OTIMO

Fig. 4.2

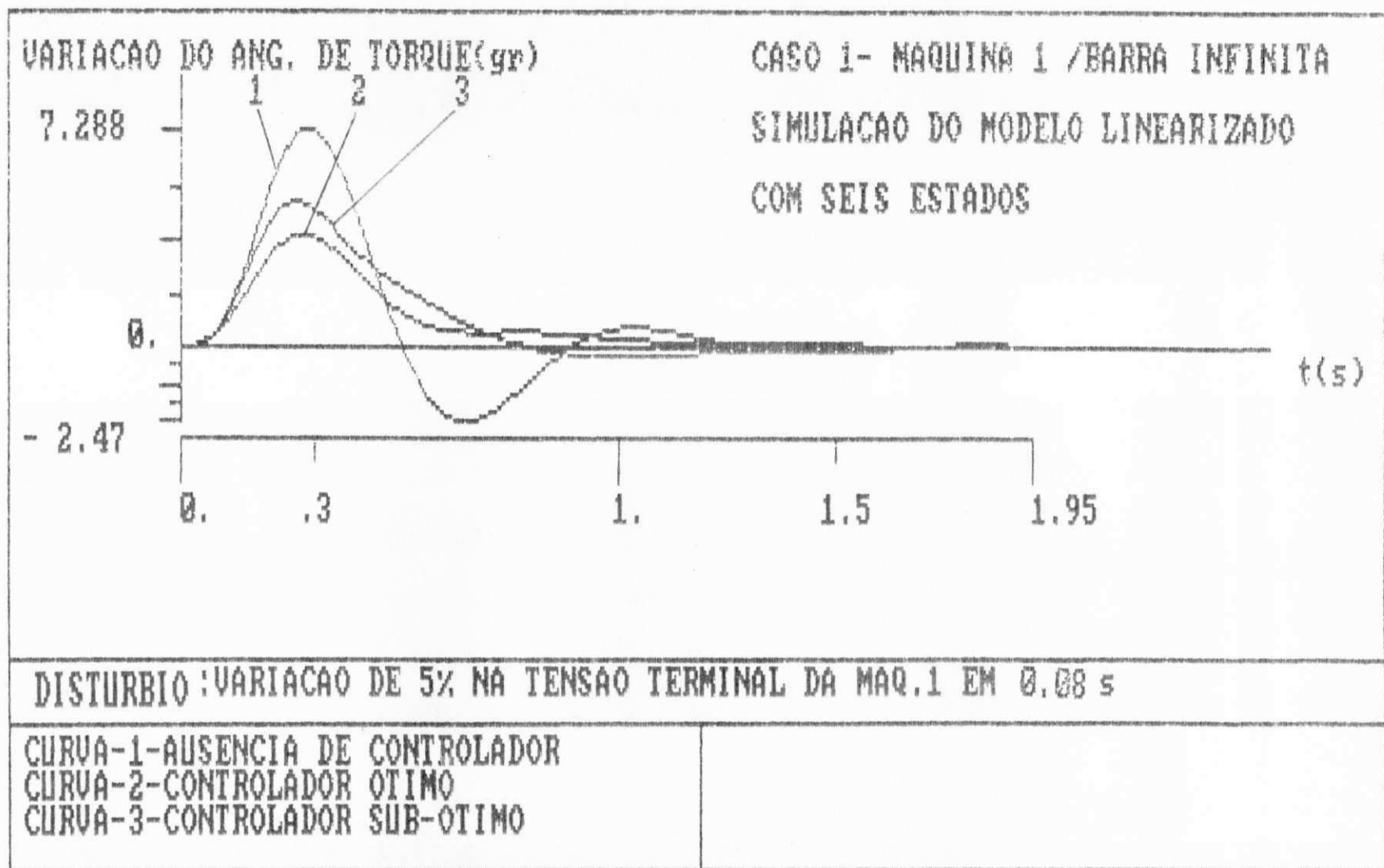
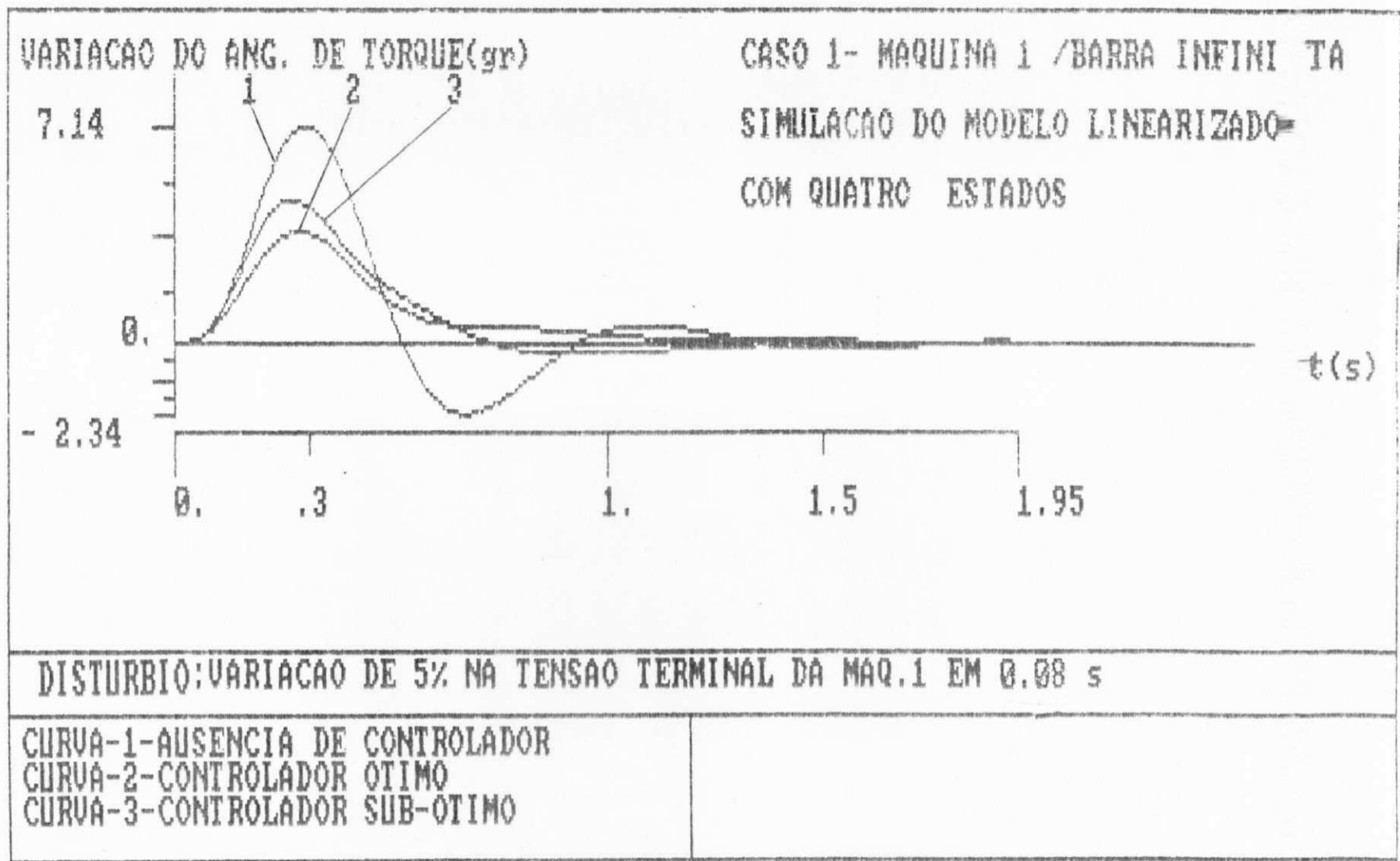


Fig. 4.3



77

Fig. 4.4

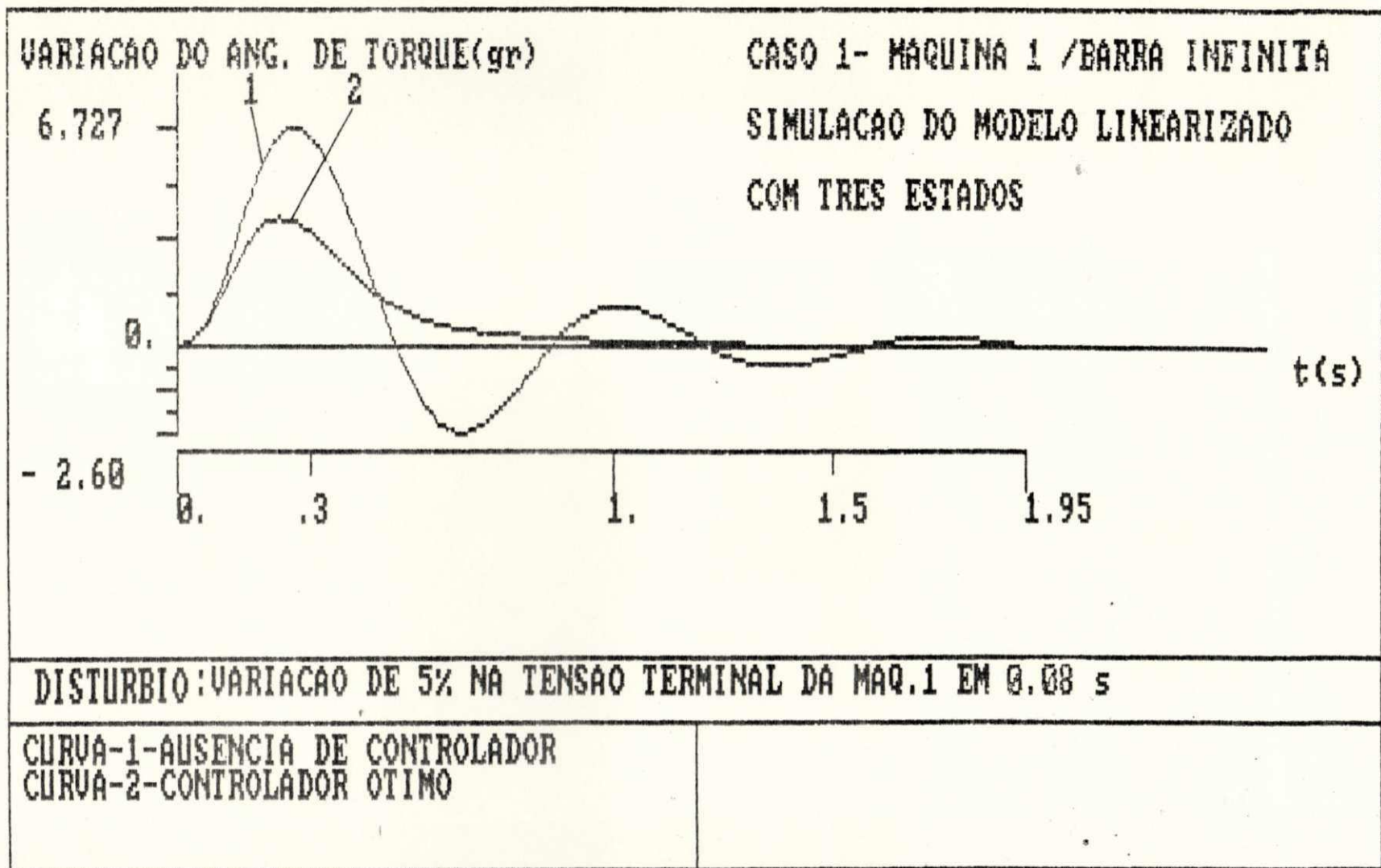


Fig. 4.5

4.2.4 - Implementação dos Controladores e Análises Gráficas para o Modelo Não-Linear.

Para uma análise comparativa entre os diversos controladores projetados a partir dos modelos de máquina síncrona aqui considerados, faz-se necessário implementar estes controladores num programa de estabilidade transitória. A representação da máquina no mesmo é a mais completa possível, incluindo-se também o efeito de saturação. Por outro lado para uma implementação realística, apenas as saídas acessíveis à medição podem ser realimentadas, resultando num controlador sub-ótimo. Portanto, apenas os ganhos correspondentes a (v_t, \dot{S}, P_t) são consideradas na simulação não-linear a seguir.

4.2.4.1 - Implementação dos Controladores num Programa de Estabilidade Transitória.

Dois tipos de distúrbios foram considerados na simulação do modelo não-linear para o caso de uma máquina / barra infinita. O primeiro trata-se de uma variação de 5% na tensão de referência da máquina, durante 0.08 seg. O segundo consiste em um curto-circuito trifásico na barra 1 durante 0.05 segundos. Para os dois tipos de perturbação as figuras 4.6 e 4.7 mostram a variação do ângulo de torque da máquina, considerando-se as várias modalidades de controladores já mencionadas. Nestas figuras, as curvas correspondem aos seguintes casos :

- Curva 1, ausência de controladores.
- Curva 2, controlador projetado com três estados.
- Curva 3, controlador projetado com quatro estados.
- Curva 4, controlador projetado com seis estados.
- Curva 5, controlador projetado com sete estados.

4.2.4.2 - Análise dos Resultados

De acordo com o exposto nas figuras 4.6 e 4.7, observa-se que as diferentes modalidades de projeto conduzem a resultados análogos, não havendo diferença substancial entre um e outro controlador. Entretanto, um melhor desempenho é encontrado para o controlador sub-ótimo (curva 5), projetado a partir do modelo linearizado com sete estados, pois o mesmo apresentou-se menos oscilatório que os demais controladores. Este efeito deve-se a introdução do segundo enrolamento amortecedor do eixo em quadratura. Uma melhoria significativa poderia ser observada para o controlador com sete estados, caso fosse possível realimentar fisicamente todos os estados. No entanto, para uma implementação real, algo terá de ser perdido no controlador ótimo. Como apenas três variáveis são disponíveis para a realimentação, têm-se as seguintes opções extremas:

Controlador projetado com sete estados

- Vantagem : leva em conta todos os modos de oscilação do sistema.
- Desvantagem : realimenta apenas três estados,

resultando num controlador sub-ótimo.

Controlador projetado com três estados

- Vantagem : realimenta todos os estados, resultando num controlador ótimo.
- Desvantagem : não leva em conta todos os modos de oscilação do sistema.

Os outros controladores projetados com seis e quatro estados têm desempenho intermediário aos outros dois acima mencionados.

A pequena diferença notada no desempenho dos controladores é justificável. Sabe-se que a constante de tempo T'_{d0} é bem maior que as constantes de tempo T'_{q0} , T''_{d0} e T''_{q0} . Em caso de uma perturbação qualquer, quando o controle passa a atuar efetivamente, as últimas constantes de tempo citadas já não estarão influenciando o comportamento do sistema, explicando-se assim a pequena diferença entre os controladores.

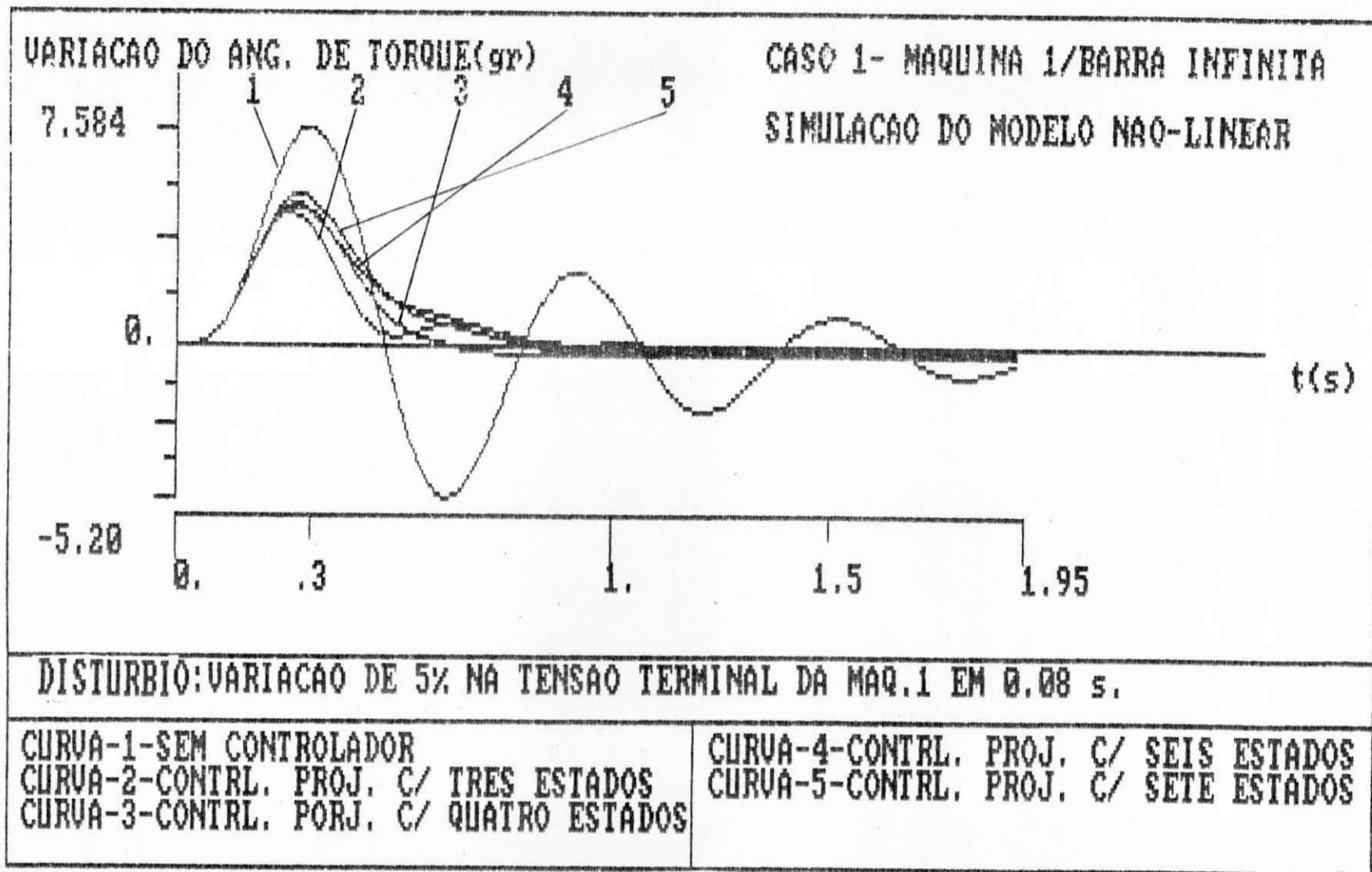


Fig. 4.6

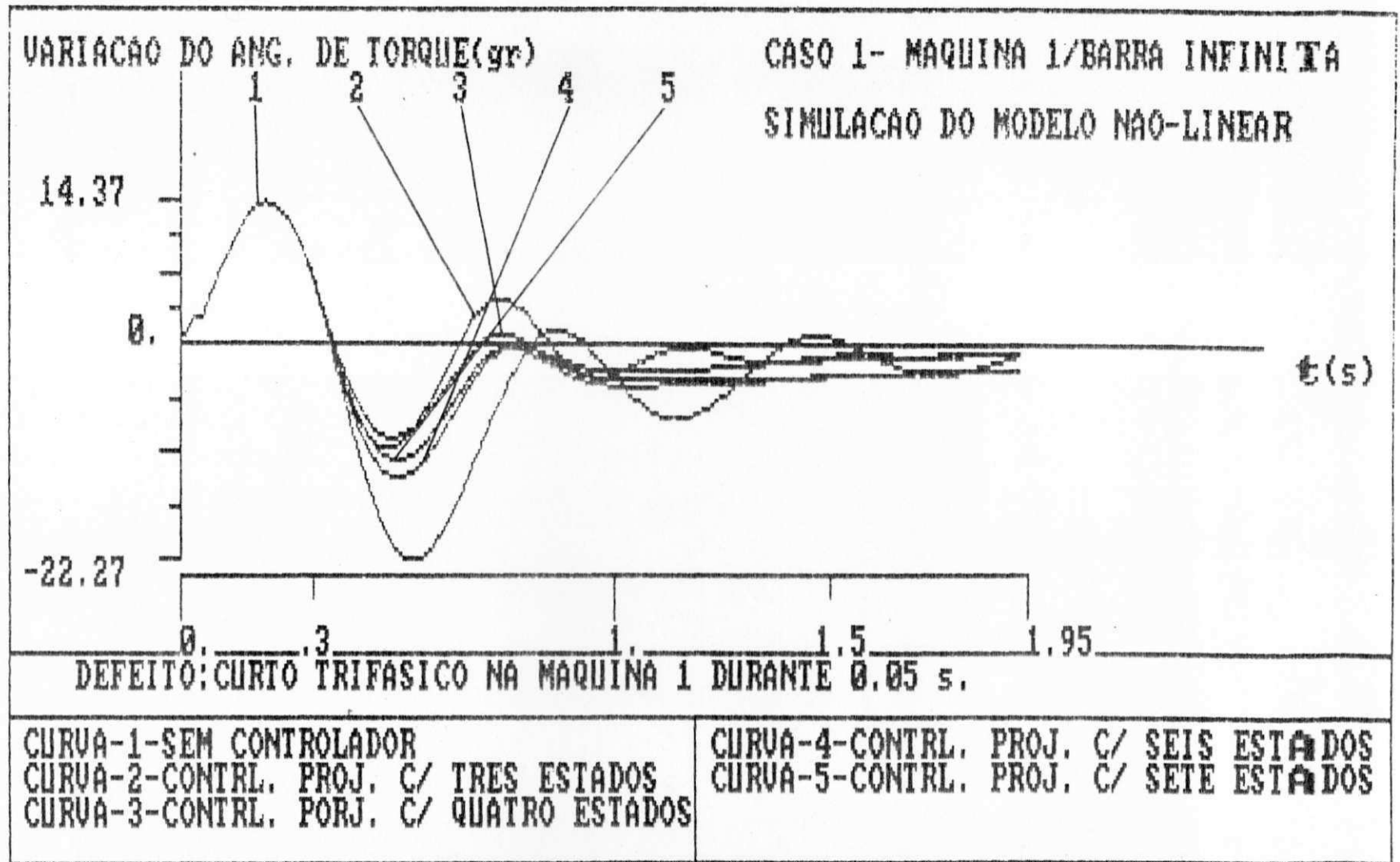


Fig. 4.7

4.3 - Projeto Análise e Implementação dos Controladores para o caso de três máquinas/barra infinita.

4.3.1 - Projeto de Controladores Ótimos Baseados no Modelo do Sistema Multi-Máquina Interligado.

Utilizando-se os modelos linearizados do sistema multi-máquina, toda a interação dinâmica do modelo é levada em consideração.

O sistema da Fig. 2.1 é linearizado na forma de:

$$\dot{x} = A x + B u \quad (4.4)$$

$$y = C x \quad (4.5)$$

com

$$x = [x_1, x_2, x_3]^t, \text{ onde}$$

$$x_1 = [s_1 \dot{s}_1 \psi_{fd1} \psi_{kd1} \psi_{e1} \psi_{kq1} e_{fd1}]^t,$$

$$x_2 = [s_2 \dot{s}_2 \psi_{fd2} \psi_{kd2} \psi_{e2} \psi_{kq2} e_{fd2}]^t,$$

$$x_3 = [s_3 \dot{s}_3 \psi_{fd3} \psi_{k31} \psi_{e3} \psi_{kq3} e_{fd3}]^t,$$

$$y = [v_{t1} \dot{s}_1 P_{t1} v_{t2} \dot{s}_2 P_{t2} v_{t3} \dot{s}_3 P_{t3}]^t e$$

$$u = [V_{s1} V_{s2} V_{s3}]^t$$

Os sub-índices 1, 2 e 3 correspondem as máquinas 1, 2 e 3, respectivamente.

Estes vetores são válidos para o modelo de máquina síncrona/regulador de tensão de ordem sete. Para os modelos de ordem menor, faz-se as seguintes considerações para o vetor x :

- No modelo de ordem seis, os fluxos Ψ_{e1} , Ψ_{e2} e Ψ_{e3} correspondentes ao eixo em quadratura não são considerados.
- No modelo de ordem quatro, não são considerados os fluxos Ψ_{e1} , Ψ_{e2} , Ψ_{e3} , Ψ_{kd1} , Ψ_{kq1} , Ψ_{kd2} , Ψ_{kq2} , Ψ_{kd3} e Ψ_{kq3} .
- No modelo de três estados, não são considerados os fluxos citados no item anterior, bem como a constante de tempo da excitação, T_A . Assim as variações dos fluxos no campo (Ψ_{fd1} , Ψ_{fd2} , Ψ_{fd3}) são desprezadas.

Para uma realimentação sub-ótima, os vetores y e u permanecem inalterados em todos os modelos lineares aqui considerados.

Como a finalidade principal deste trabalho é comparar os controladores projetados a partir de diversos modelos de máquina síncrona, utiliza-se o mesmo sistema e a mesma sistemática de escolha das matrizes pesos R e Q de MOTA (1981). Assim para o projeto dos controladores, considera-se um índice de desempenho com as seguinte matrizes peso :

$$R = \begin{bmatrix} V_{s1} & V_{s2} & V_{s3} \\ 20 & & 0 \\ 0 & 20 & \\ & & 40 \end{bmatrix} \begin{matrix} V_{s1} \\ V_{s2} \\ V_{s3} \end{matrix} \quad (4.5)$$

$$Q = \begin{bmatrix} Q_1 & & \\ 0 & Q_2 & \\ & & Q_3 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Para o modelo de máquina síncrona / regulador de tensão de 7ª ordem, foram escolhidas as seguintes sub-matrizes Q_1 , Q_2 e Q_3 :

$$Q_1 = \begin{bmatrix} s_1 & \dot{s}_1 & \psi_{fd1} & \psi_{kd1} & \psi_{e1} & \psi_{kq1} & e_{fd1} \\ 0.001 & & & & & & \\ & 0.03 & & & & 0 & \\ & & 0.001 & & & & \\ & & & 0.001 & & & \\ & & & & 0.001 & & \\ 0 & & & & & 0.001 & \\ & & & & & & 0.001 \end{bmatrix} \begin{matrix} s_1 \\ \dot{s}_1 \\ \psi_{fd1} \\ \psi_{kd1} \\ \psi_{e1} \\ \psi_{kq1} \\ e_{fd1} \end{matrix}$$

$$Q_2 = \begin{array}{c|cccccc} & s_1 & \dot{s}_1 & U_{fd1} & U_{kd1} & U_{e1} & U_{kq1} & e_{fd1} \\ \hline 0.001 & & & & & & & \\ & 0.08 & & & & & & 0 \\ & & 0.001 & & & & & \\ & & & 0.001 & & & & \\ & & & & 0.001 & & & \\ & 0 & & & & 0.001 & & \\ & & & & & & 0.001 & \\ & & & & & & & 0.001 \end{array} \begin{array}{l} s_2 \\ \dot{s}_2 \\ U_{fd2} \\ U_{kd2} \\ U_{e2} \\ U_{kq2} \\ e_{fd2} \end{array}$$

$$Q_3 = \begin{array}{c|cccccc} & s_3 & \dot{s}_3 & U_{fd3} & U_{kd3} & U_{e3} & U_{kq3} & e_{fd3} \\ \hline 0.001 & & & & & & & \\ & 0.06 & & & & & & 0 \\ & & 0.001 & & & & & \\ & & & 0.001 & & & & \\ & & & & 0.001 & & & \\ & 0 & & & & 0.001 & & \\ & & & & & & 0.001 & \\ & & & & & & & 0.001 \end{array} \begin{array}{l} s_3 \\ \dot{s}_3 \\ U_{fd3} \\ U_{kd3} \\ U_{e3} \\ U_{kq3} \\ e_{fd3} \end{array}$$

R e Q, são submatrizes bloco diagonais associadas a cada máquina do sistema. Logo, para cada modelo linearizado, a matriz A terá o dimensionamento igual ao número de estados da máquina vezes o número de máquinas do sistema. MOTA (1981) mostrou através de simulações que variações nas submatrizes de R ou Q correspondentes a uma determinada máquina afeta predominantemente a resposta angular naquela máquina. Logo, no ajuste

dos controladores, estas submatrizes podem ser manuseadas da mesma forma que no caso de uma máquina/barra infinita .

Usando-se as matrizes peso anteriormente apresentadas, tem-se a seguinte lei de controle:

$$u = - K'y$$

onde K corresponde aos ganhos obtidos através da solução da equação de Riccati. Após a solução da mesma, obteve-se os controladores correspondentes a cada modelo aqui tratado :

- Modelo linear com 9 estados

A lei de controle correspondente é :

$$\begin{bmatrix} v_{s1} \\ v_{s2} \\ v_{s3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix} * y$$

onde

$$y = \begin{bmatrix} v_{t1} & \dot{s}_1 & P_{t1} & v_{t2} & \dot{s}_2 & P_{t2} & v_{t3} & \dot{s}_3 & P_{t3} \end{bmatrix}^t$$

com

$$\begin{aligned} K_{11} &= \begin{bmatrix} -0.008 & 0.027 & -0.0502 \end{bmatrix} ; & K_{12} &= \begin{bmatrix} 0.079 & -0.008 & -0.003 \end{bmatrix} \\ K_{13} &= \begin{bmatrix} 0.049 & -0.0036 & 0.0128 \end{bmatrix} ; & K_{21} &= \begin{bmatrix} -0.065 & 0.008 & -0.013 \end{bmatrix} \\ K_{22} &= \begin{bmatrix} -0.001 & 0.0202 & -0.140 \end{bmatrix} ; & K_{23} &= \begin{bmatrix} -0.028 & 0.0026 & 0.0003 \end{bmatrix} \\ K_{31} &= \begin{bmatrix} -0.018 & 0.0048 & -0.0017 \end{bmatrix} ; & K_{32} &= \begin{bmatrix} 0.0176 & -0.0013 & 0.004 \end{bmatrix} \\ K_{33} &= \begin{bmatrix} -0.0047 & 0.0168 & -0.0507 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

- Modelo linearizado a partir do modelo de máquina

síncrona de 3ª ordem/regulador de tensão.

O sistema linearizado final terá 12 estados, ou seja, três estados para cada máquina e três estados para o sistema de excitação. A lei de controle correspondente é :

$$\begin{bmatrix} V_{s1} \\ V_{s2} \\ V_{s3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix} * y$$

onde

$$y = [v_{t1} \quad \dot{S}_1 \quad P_{t1} \quad U_{fd1} \quad v_{t2} \quad \dot{S}_2 \quad P_{t2} \quad U_{fd2} \quad v_{t3} \quad \dot{S}_3 \quad P_{t3} \quad U_{fd3}]^t$$

com

$$K_{11} = [-0.0017 \quad 0.016 \quad -0.0638 \quad -0.0027 \quad |$$

$$K_{12} = [0.088 \quad -0.0078 \quad 0.0106 \quad 0.0001 \quad |$$

$$K_{13} = [0.013 \quad 0.0017 \quad 0.0155 \quad 0.0005 \quad |$$

$$K_{21} = [-0.088 \quad 0.0095 \quad -0.0203 \quad 0.0004 \quad |$$

$$K_{22} = [0.022 \quad 0.0058 \quad -0.1484 \quad -0.0033 \quad |$$

$$K_{23} = [-0.037 \quad 0.0037 \quad -0.0025 \quad 0 \quad |$$

$$K_{31} = [-0.010 \quad 0.0060 \quad -0.0017 \quad 0.0003 \quad |$$

$$K_{32} = [0.0192 \quad -0.0009 \quad 0.0050 \quad 0.0001 \quad |$$

$$K_{33} = [0.0039 \quad 0.0115 \quad -0.055 \quad -0.0014 \quad |$$

encontrar-se os controladores para o modelo linearizado com vinte e um estados. Cita-se abaixo as principais dificuldades encontradas nos métodos citados :

- No método dos autovetores o problema de memória é bastante acentuado. Basta citar que quando o dimensionamento deste programa é feito prevendo um sistema com dezpito estados, são necessários 2 Mega-bytes de memória. Mesmo dispondo-se desta memória, o método só possibilitou encontrar os controladores dos modelos lineares com até doze estados. A partir daí, ocorreu instabilidade numérica (perda de endereçamento).

- O método iterativo de DAVISON & MAN (1968) foi então implementado a fim de se conseguir os controladores dos sistemas linearizados com mais de doze estados. Apesar de exigir pouca memória, este método, apresenta uma restrição, a qual consiste em só haver convergencia se o sistema original for estável. O mesmo apresentou bom desempenho para sistemas de até dezoito estados, não sendo possível se conseguir a solução para o sistema linearizado com vinte e um estados. Para este último caso, ocorreu "overflow", mesmo tendo sido utilizado diferentes valores para P_0 . Um outro problema observado neste método é que o tempo computacional cresce à medida que cresce o número de estados do sistema. Para o projeto em estudo observou-se que para sistemas de ordem menor que doze, a solução é conseguida em menos de um segundo. A partir daí o tempo computacional cresceu, chegando a até 10 minutos para o sistema com dezoito estados.

4.3.2 - Implementação dos Controladores num Programa de Estabilidade

Para o sistema da Fig.2.1, três máquinas / barra infinita, utilizou-se dois tipos de defeito:

- uma pequena perturbação, consistindo de uma variação de 5% na tensão terminal da máquina 1 durante 0.08 segundos.

- uma grande perturbação, consistindo em um curto circuito trifásico na barra 6, durante 0.05 segundos.

Para os dois tipos de defeito mencionados, fez-se a simulação do modelo não-linear com a implementação dos controladores baseados nos modelos de máquina síncrona de 3^a e 5^a ordem. O modelo de máquina utilizado no programa de estabilidade transitória foi o mais completo possível. As curvas das figuras 4.8 e 4.9 mostram os ângulos de torque das máquinas 1,2 e 3 para a pequena e grande perturbação sem a implementação dos controladores. Considerando os controladores implementados, as figuras 4.10, 4.11 e 4.12 mostram a variação do ângulo de torque das máquinas 1, 2 e 3, na ocorrência da pequena perturbação e as figuras 4.13, 4.14 e 4.15 na ocorrência da grande perturbação. As curvas das respectivas figuras correspondem aos casos onde têm-se:

Curva 1- ausência de controladores

Curva 2- controladores sub-ótimo projetado com 9 estados.

Curva 3- controladores sub-ótimo projetado com 12

estados.

Curva 4- controladores sub-ótimo projetado com 18 estados.

A implementação destes controladores foi feita de modo a considerar apenas os ganhos correspondentes às variáveis de saída (v_t , S , P_t). Desta forma, para cada modalidade de projeto, os seguintes controladores foram implementados :

- Controlador projetado a partir do modelo linearizado com 9 estados :

$$K'_{11} = \begin{bmatrix} -0.008 & 0.027 & -0.0502 \end{bmatrix}, \text{ para a máquina 1}$$

$$K'_{22} = \begin{bmatrix} -0.001 & 0.0202 & -0.140 \end{bmatrix}, \text{ para a máquina 2}$$

$$K'_{33} = \begin{bmatrix} -0.0047 & 0.0168 & -0.0507 \end{bmatrix}, \text{ para a máquina 3}$$

- Controlador projetado a partir do modelo linearizado com 12 estados:

$$K'_{11} = \begin{bmatrix} -0.0017 & 0.016 & -0.0638 \end{bmatrix}, \text{ para a máquina 1}$$

$$K'_{22} = \begin{bmatrix} 0.022 & 0.0058 & -0.148 \end{bmatrix}, \text{ para a máquina 2}$$

$$K'_{33} = \begin{bmatrix} 0.0039 & 0.0115 & -0.055 \end{bmatrix}, \text{ para a máquina 3}$$

- Controlador projetado a partir do modelo linearizado com 18 estados:

$$K'_{11} = \begin{bmatrix} -0.023 & 0.016 & -0.07300 \end{bmatrix}, \text{ para a máquina 1}$$

$$K'_{22} = \begin{bmatrix} -1.503 & 0.0038 & -0.01578 \end{bmatrix}, \text{ para a máquina 2}$$

$$K'_{33} = \begin{bmatrix} -7.300 & 0.0039 & -0.00620 \end{bmatrix}, \text{ para a máquina 3}$$

4.3.3 - Análise dos Resultados da Implementação dos Controladores para o Sistema Multi-Máquina.

Nas figuras de 4.11 a 4.15, cujos controladores foram implementados, observa-se que não houve diferença substancial entre eles na pequena perturbação (Figs. 4.10, 4.11 e 4.12). Entretanto, observa-se que para a grande perturbação (Fig. 4.13, 4.14 e 4.15), o controle projetado a partir do modelo de máquina síncrona de 5^a ordem mostrou-se inferior aos demais controles. Isto deveu-se aos altos ganhos obtidos para este controlador, causado pelo erro acumulado no cálculo dos controladores, devido ao crescimento da ordem do sistema linear. Deste modo, ao se escolher um modelo de máquina síncrona para projeto de sinais de controle, deve-se levar em conta as dificuldades que serão encontradas na solução da equação de Riccati e na implementação física dos mesmos.

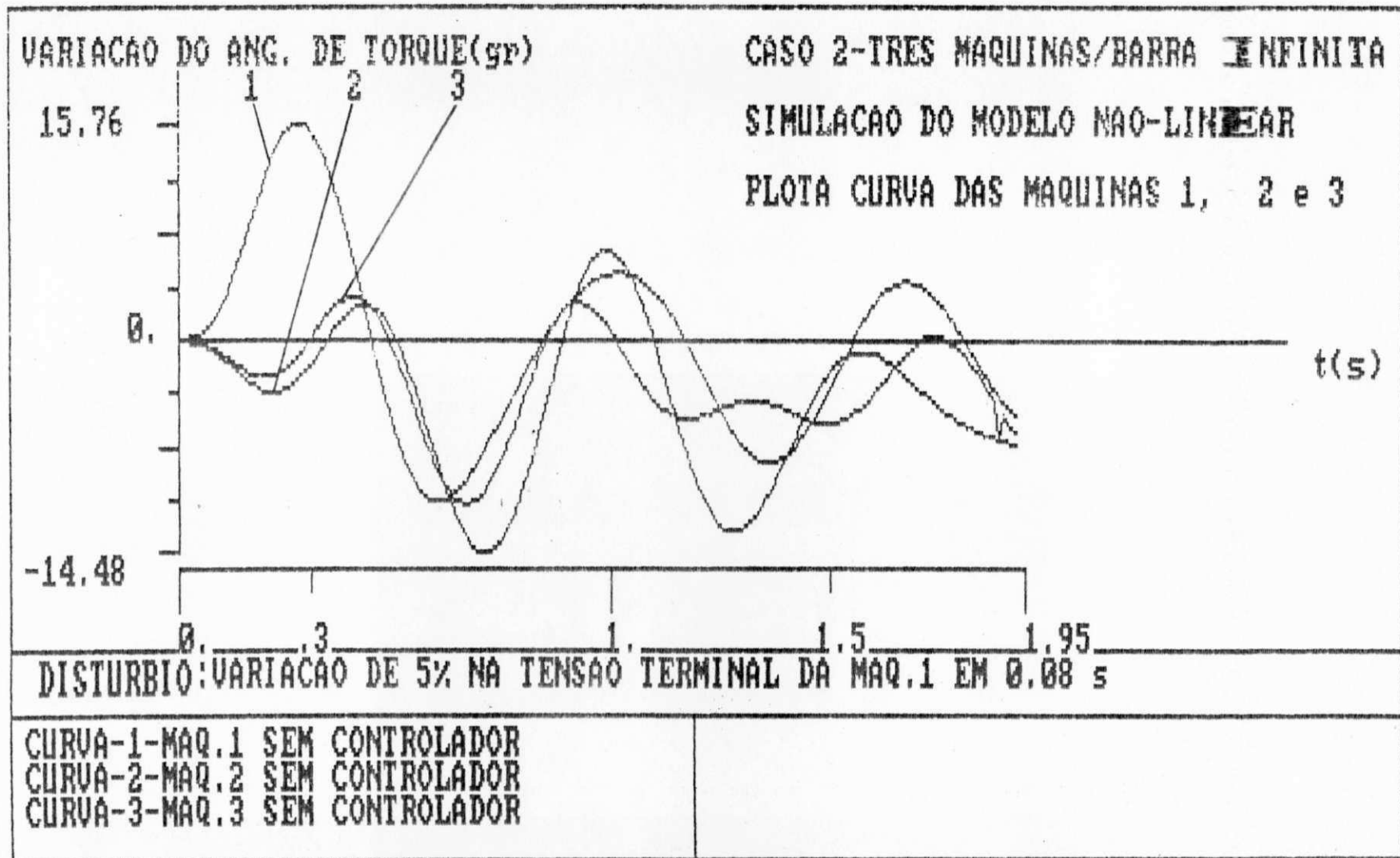


Fig. 4.8

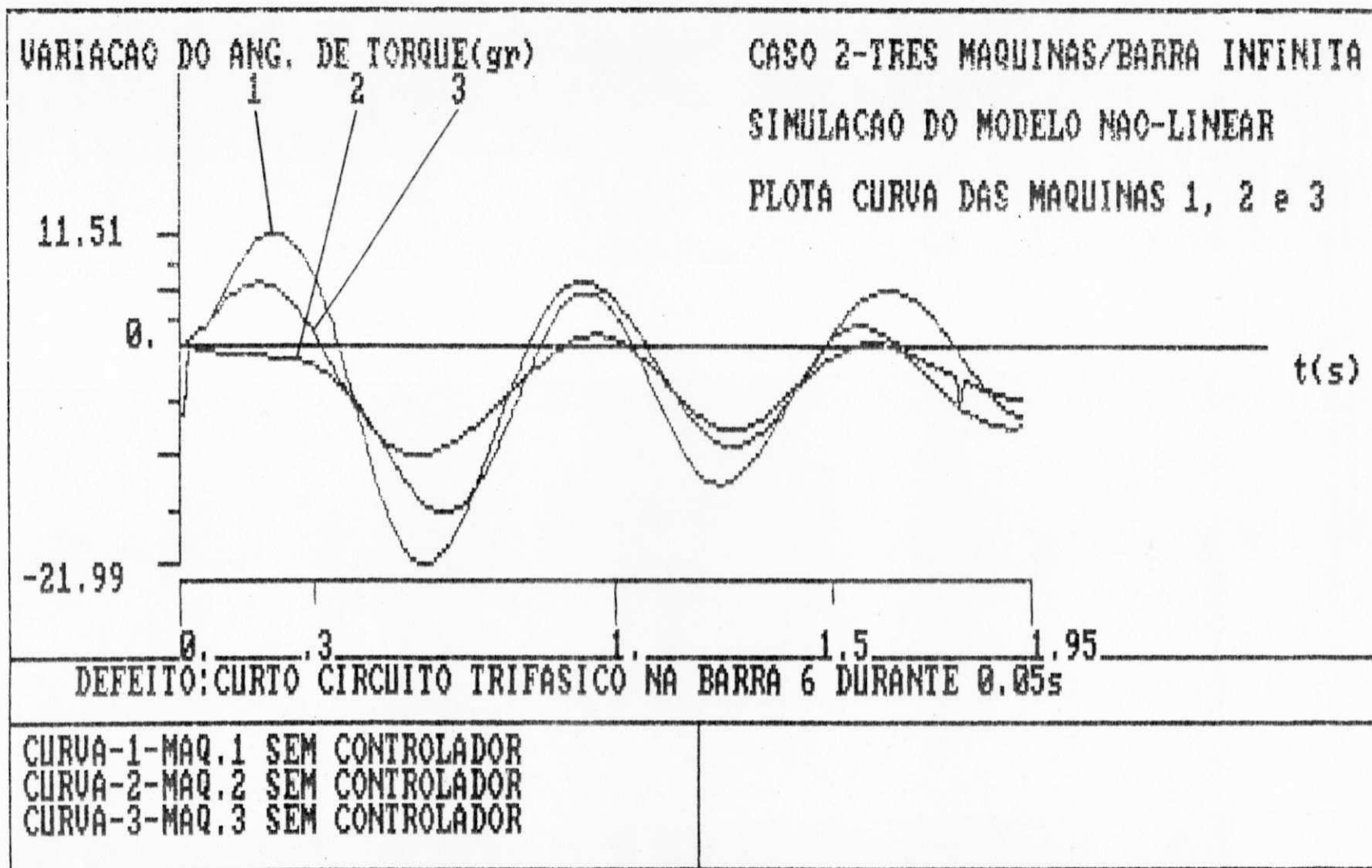


Fig. 4.9

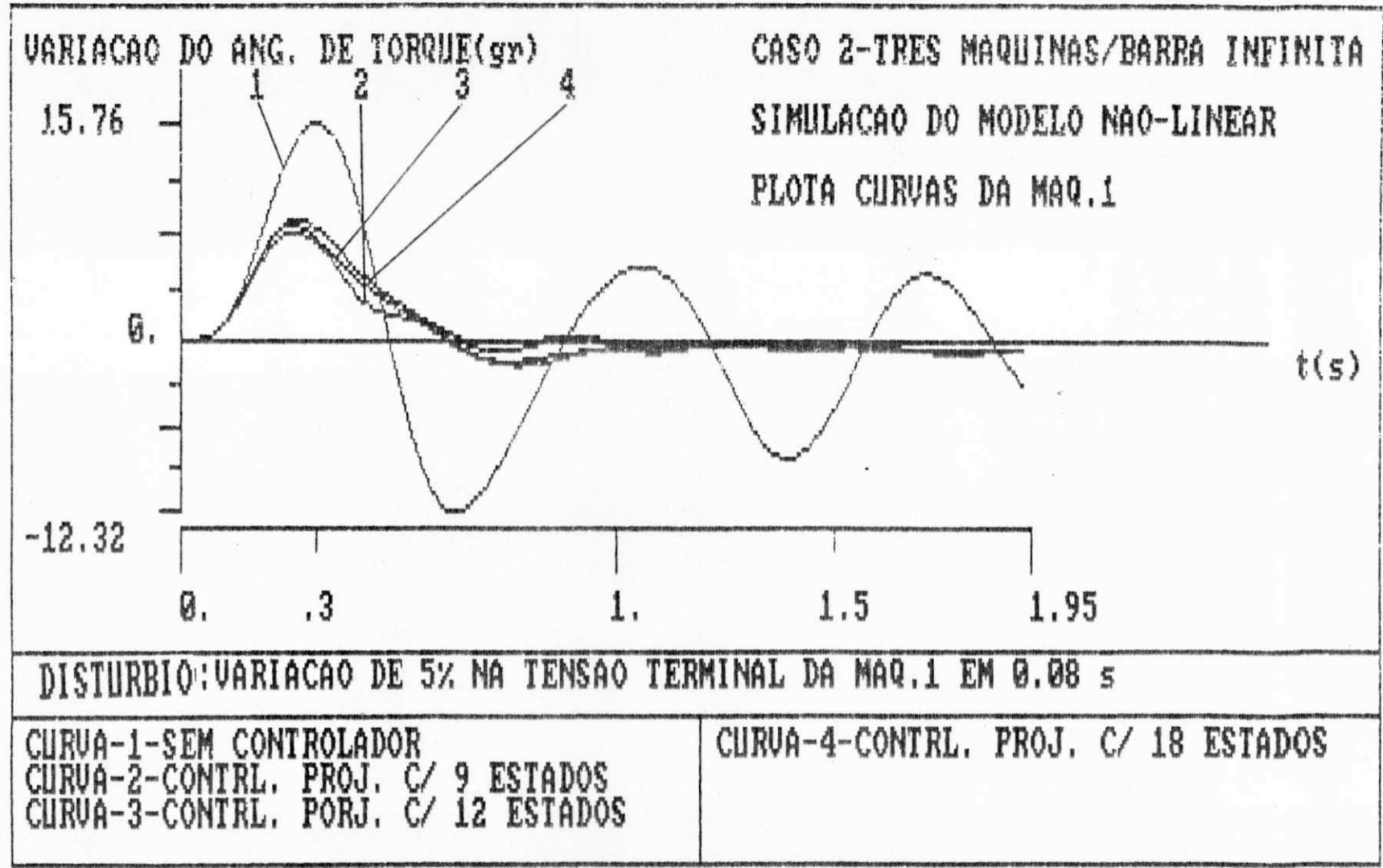


Fig. 4.10

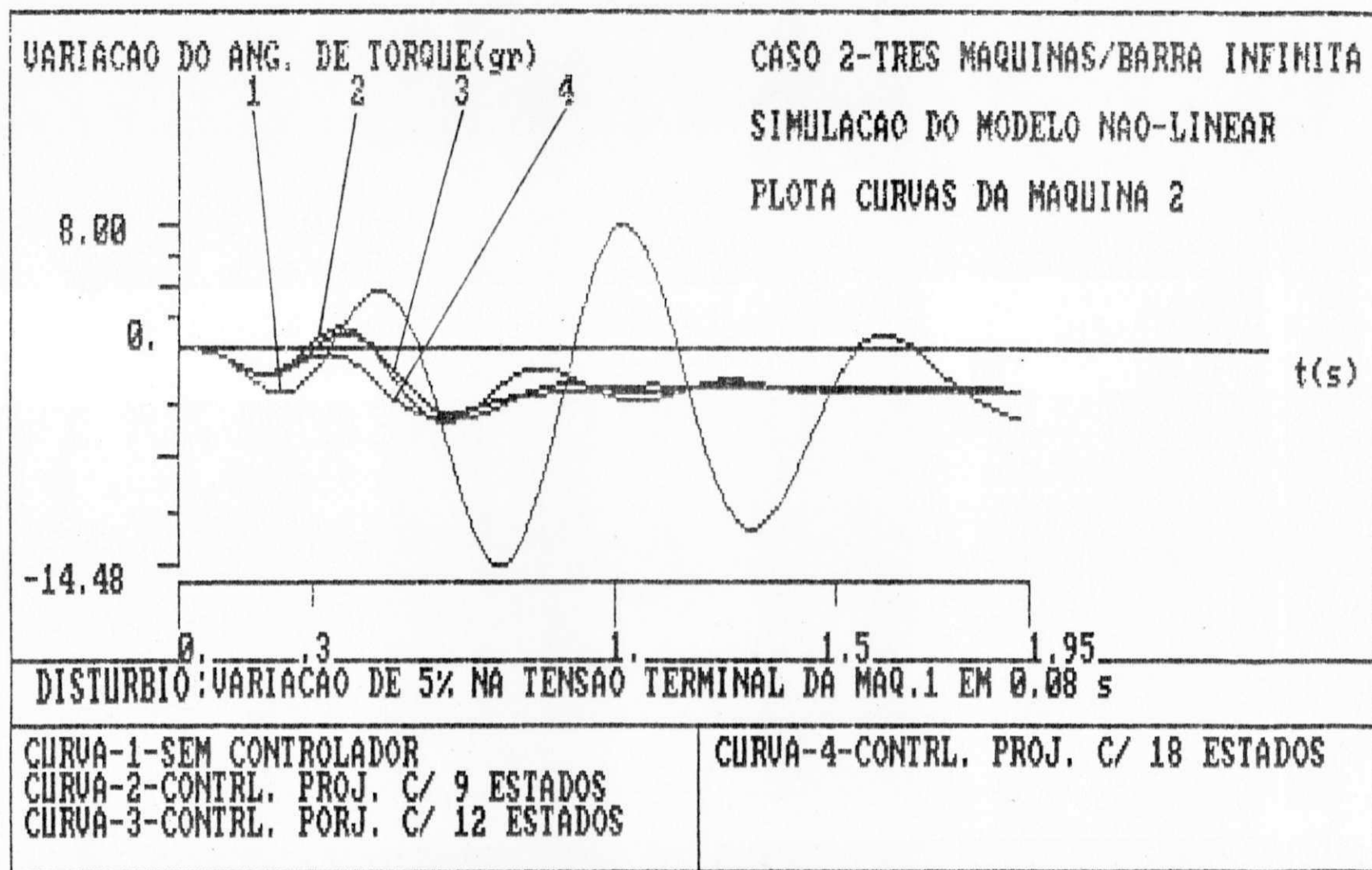


Fig. 4.11

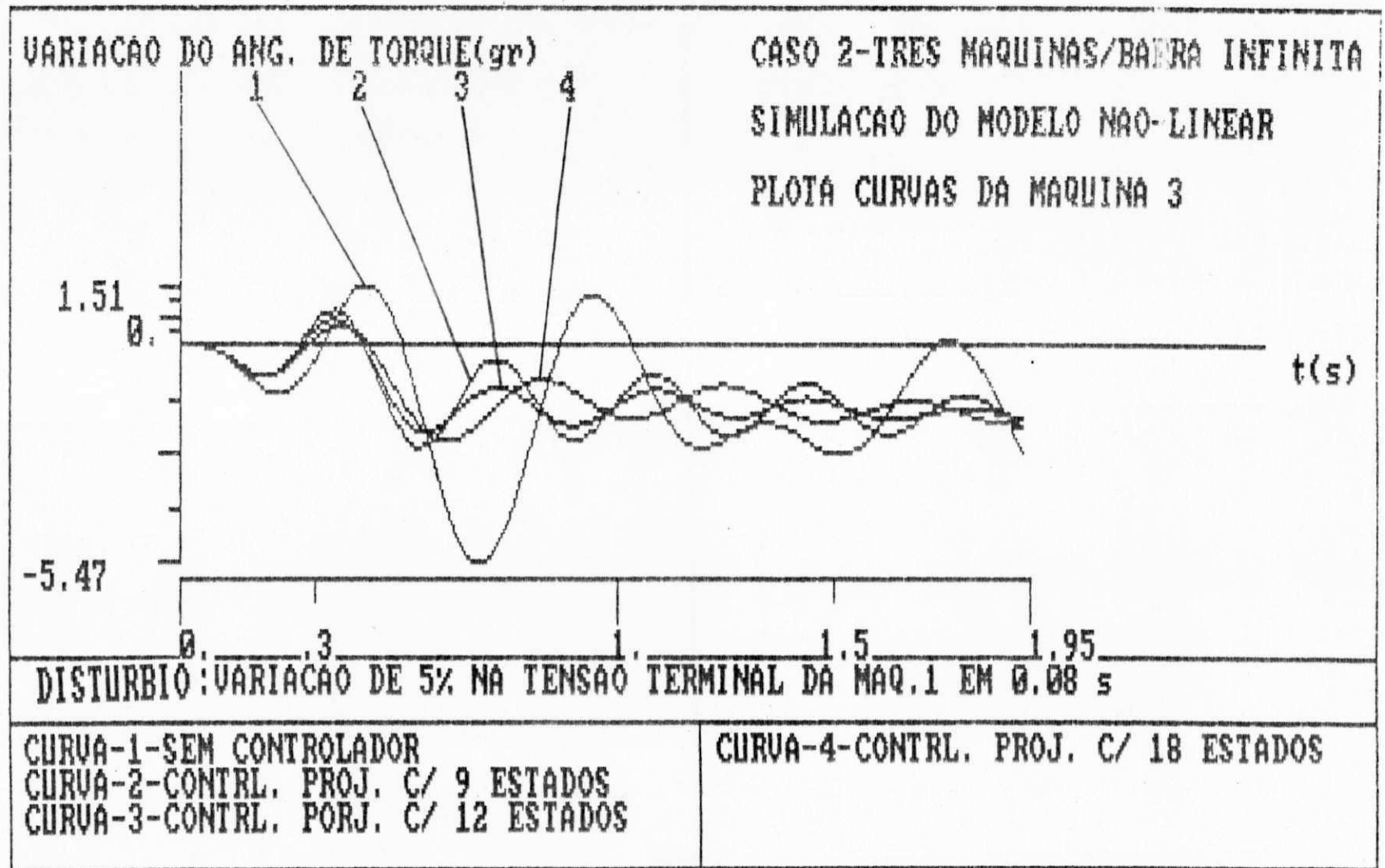


Fig. 4.12

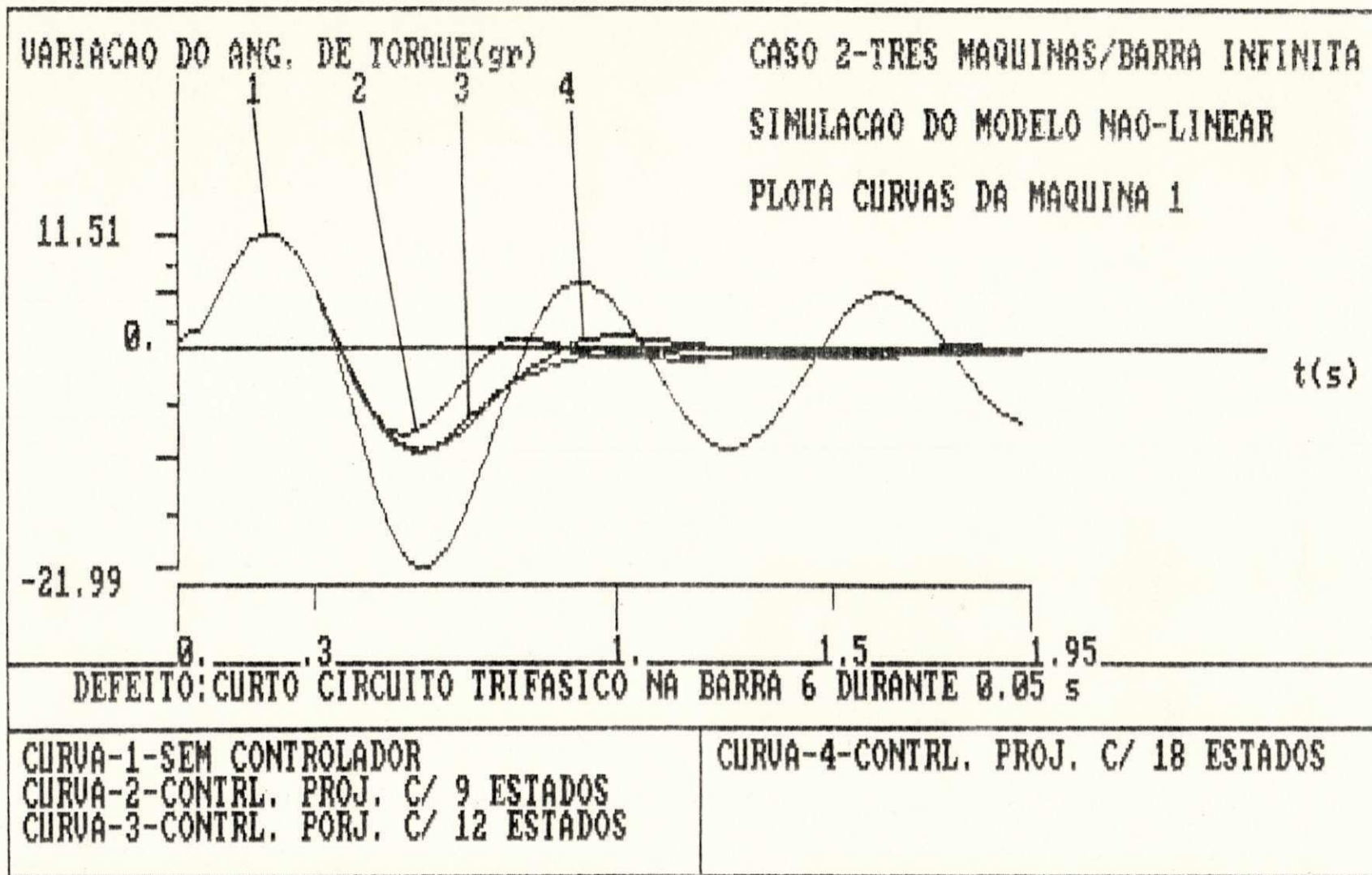


Fig. 4.13

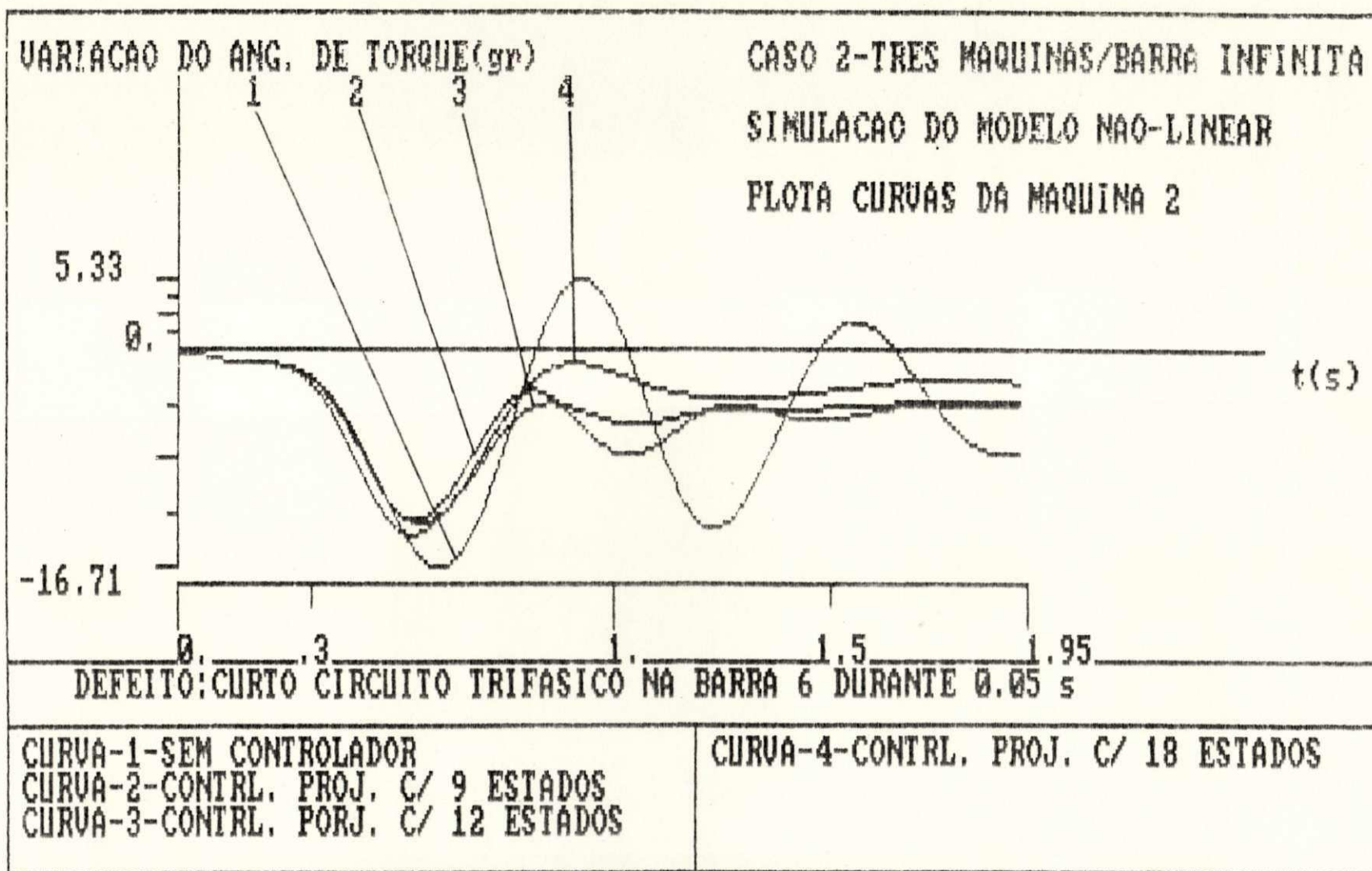


FIG. 14

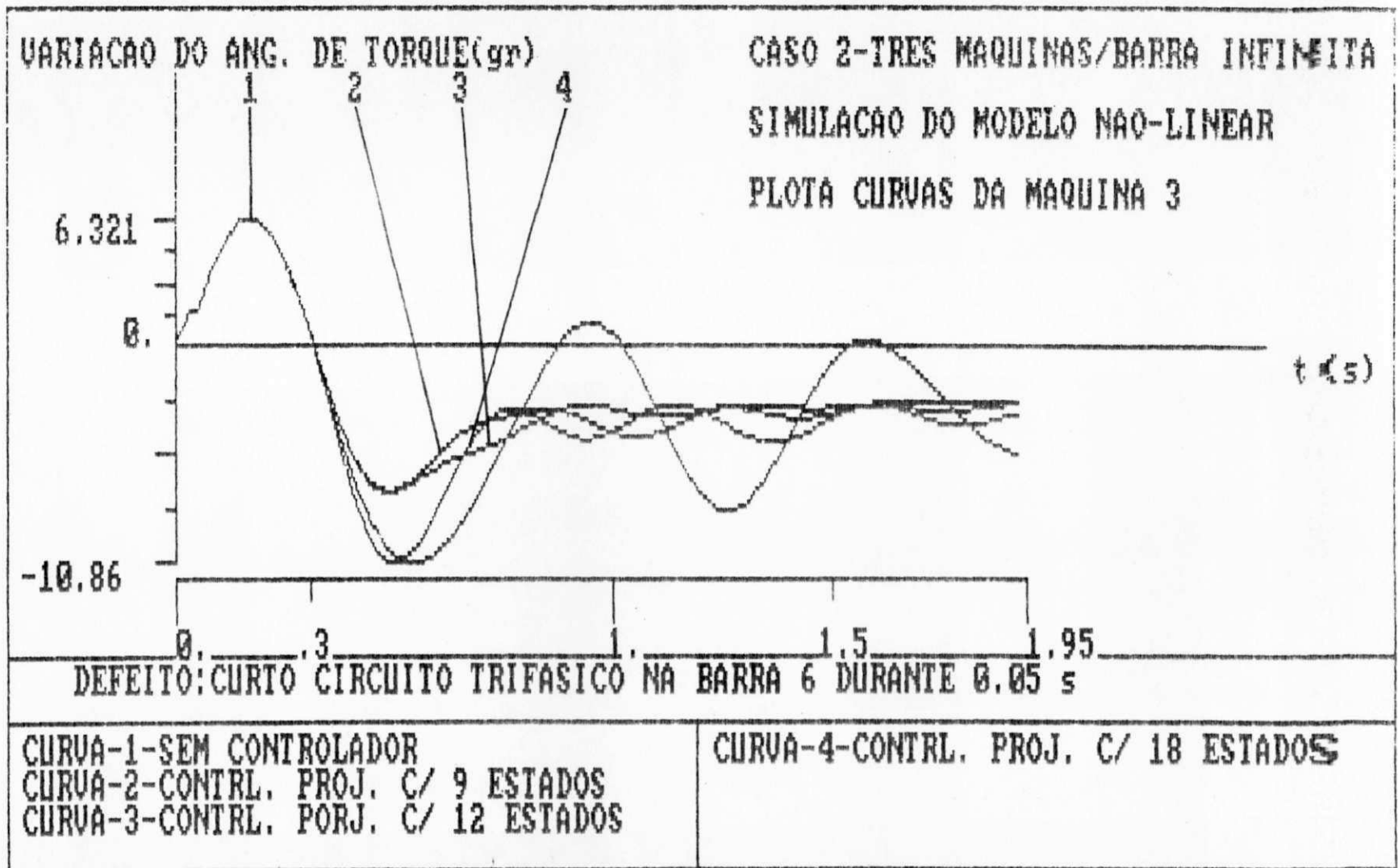


Fig. 4.15

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou diversos modelos lineares para projeto de sinais estabilizadores, os quais envolveram três tipos de modelos não-lineares de máquinas síncronas (3^a, 5^a e 6^a ordem) com a inclusão do regulador de tensão tipo estático.

O passo inicial para os projetos foi o tratamento linear que se deu aos dois casos estudados (máquina 1 / barra infinita e três máquinas / barra infinita). A eficiência do método utilizado para as modelagens lineares foi comprovada através de demonstrações gráficas.

A partir dos modelos lineares, calculou-se os sinais estabilizadores com base na teoria de realimentação ótima de estados. O cálculo dos controladores para o caso de máquina 1 / barra infinita não trouxe qualquer dificuldade quanto a solução da equação de Riccati. Entretanto, para o caso de três máquinas / barra infinita, houve diversas dificuldades computacionais, tais como "overflow", alto requisito de memória, instabilidade numérica e ganhos elevados. Alguns destes problemas foram superados

com a implementação de um outro método de solução da equação de Riccati (DAVISON & MAN, 1968), não sendo possível superar certas dificuldades para o modelo linear com 21 estados, as quais impossibilitam o cálculo dos controladores para esta modelagem.

A fim de observar o desempenho dos controladores ótimos e sub-ótimos, observou-se o posicionamento de autovalores bem como a análise gráfica através da variação do ângulo de torque das máquinas.

As análises gráficas para o caso da máquina 1/barra infinita demonstraram que o controle sub-ótimo projetado a partir da modelagem linear com sete estados (6^a ordem para a máquina) teve melhor desempenho que os demais controladores sub-ótimos, incluindo o controle ótimo projetado com três estados. Nestas análises demonstrou-se também que os controladores projetados com seis e quatro estados tiveram desempenhos análogos (3^a e 5^a ordem para a máquina). Estes efeitos deveram-se à constante de tempo T'_{q0} (associada ao 2^o enrolamento amortecedor em quadratura), não considerada nas duas últimas modelagens. A mesma traz grande influência no comportamento do sistema, pois o seu valor é elevado em relação às outras constantes de tempo associadas aos enrolamentos amortecedores de eixos direto e em quadratura das máquinas síncronas. Quando o sinal atua, esta constante ainda está influenciando no comportamento da máquina, enquanto que as outras constantes já não mais influenciam. Já para o caso de três máquinas/barra infinita, ocorreu que os controladores calculados a partir do modelo linear mais elevado (18 estados) apresentaram desempenho inferior aos calculados a partir dos modelos de ordem menor. Isto deveu-se às dificuldades associadas ao cálculo da

equação de Riccati, resultando em controladores de ganhos elevados. Desta forma, conclui-se que o modelo de máquina síncrona de 3ª ordem é o mais conveniente para se projetar sinais estabilizadores em sistemas de potência, os quais envolvam muitas variáveis na modelagem linear final. Quando o projeto envolve poucas variáveis (caso de apenas uma máquina), o modelo de 6ª ordem para máquina é o mais indicado.

BIBLIOGRAFIA

ANDERSON, P. M. and FOUAD, A. A., "Power System Control and Stability ", Vol. 1 (book), The Iowa State University Press, 1977.

ANDERSON, J. H., "Matrix Methods for the Study of a Regulated Synchronous Machine ", Proc. IEEE, Vol.57, No.12, Dec.1969, pp. 2122-2136.

ATHANS, M. & FALB, P.L., (1971). "Optimal Control", Mc Graw-Hill, 1966.

CASTRO, J. C., "Aplicação da Teoria de Controle Moderno na Estabilização de Sistema de Potência ", 1^o Congr. Latino-Americano de Automática / 5^o Congr. Brasileiro de Automática, Minicursos, pgs. 1-33, Campina Grande, 1984.

DAVISON, E.J. and MAN, F.T., " The Numerical Calculation of $A'Q + QA = -C$ ", IEEE Trans. Aut. Control, Vol. AC-13-1968, pp. 448-449.

ELMETWALLY, M. M., RAO, N. D. and MALIK, O. P., " Experimental Results on the Implementation of an Optimal Control for Synchronous Machines ", IEEE PAS-84, July./Aug. 1975, pp. 1192-2000.

KWAKERNAAK, H. and SIVAN, R. "Linear Optimal Control Systems" (book), Wiley Interscience, New York, 1972.

LARSEN, E. V. and SWANN, D.A., "Applying Power System Stabilizer", IEEE Trans. Vol. PAS-100, No. 6, June 1981, pp. 3017-3046.

MOTA, W. S., "Estabilidade de Sistemas Elétricos", GEPE, 1986, Campina Grande.

MOTA, W. S., "Optimal Control Techniques in The Design of Power Systems Stabilizers", Ph.D Thesis, University of Waterloo, Canada, 1981.

MOTA, W. S., "Estabilização de Sistemas de Potência Através de Controle Ótimo", 1.^o Congr. Latino-Americano de Automática / 5.^o Congr. Brasileiro de Automática, Minicursos, Pgs. 34-88, Campina Grande, 1984.

OGATA, K. "Modern Control Engineering" (book), Prentice Hall, New York, 1970.

PEDROSO, A. de S. e FERREIRA, C.E.B., "Síntese de um Compensador Dinâmico Ótimo para a Estabilização Suplementar da Máquina síncrona", 1.^o Congr. Latino Americano de Automática/5.^o Congr. Brasileiro de Automática, Campina Grande, 1984, vol. 3, pgs. 1004-1009

SILVA, M. G., "Projeto de Sinais Estabilizadores em Sistema de

Potência", Tese de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba,
Campina Grande, 1983.

STEVENSON Jr., W. D., "Elementos de Análise de Sistema de Potência", Editora McGraw-Hill do Brasil, 1974.

YOUNG, G. C., "Equipment and Systems Modelling for Large Scale stability Studies", IEEE PAS Jan./Feb. 1972, pp.1192-1200.

YU, Y. N. and MOUSSA, H.A.M., "Optimal Stabilization of a Multi-Machine System", Companion Paper, Submitted to 1971, IEEE Summer Power Meeting, pp. 1174-1182.