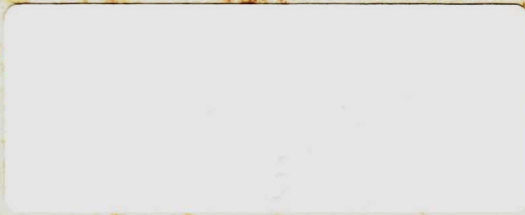


ELIZABETH FERREIRA CARTAXO

IMPLEMENTAÇÃO DE SINAIS ESTABILIZADORES PARA COMPENSADORES
SÍNCRONOS USANDO TÉCNICA DE CONTROLE ÓTIMO

Dissertação a ser apresentada à coordenação
dos cursos de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica da Universidade Federal da Paraíba,
em cumprimento parcial às exigências para
obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Elétrica.



ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Processamento de Energia

ORIENTADOR: Wellington Santos Mota

Campina Grande - Pb

Agosto - 1989

5-313-
21-
C-3821



C322i Cartaxo, Elizabeth Ferreira
Implementacao de sinais estabilizadores para
compensadores sincronos usando tecnica de controle otimo /
Elizabeth Ferreira Cartaxo. - Campina Grande, 1989.
127 f. : il.

Dissertacao (Mestrado em Engenharia Eletrica) -
Universidade Federal da Paraiba, Centro de Ciencias e
Tecnologia.

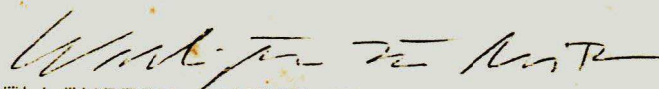
1. Maquinas Sincronas 2. Fluxo de Potencia Ativa 3.
Controle Otimo 4. Dissertacao I. Mota, Wellington Santos,
Ph.D. II. Universidade Federal da Paraiba - Campina Grande
(PB) III. Titulo

CDU 621.313.32(043)

IMPLEMENTAÇÃO DE SINAIS ESTABILIZADORES PARA
COMPENSADORES SÍNCRONOS USANDO TÉCNICA DE
CONTROLE ÓTIMO

ELIZABETH FERREIRA CARTAXO

DISSERTAÇÃO APROVADA EM


WELLINGTON SANTOS MOTA, Ph.D., UFPB
Orientador


JOSÉ CALAZANS DE CASTRO, Dr., UFPB
Componente da Banca


WASHINGTON EVANGELISTA DE MACEDO, Mestre, UFPB
Componente da Banca

CAMPINA GRANDE - PB
AGOSTO - 1989

AGRADECIMENTOS

Aos professores Wellington Santos Mota e João Viana da Fonseca Neto pela orientação, apoio e incentivo que tornaram este trabalho possível.

A Maria de Fátima Almeida Guerra pela colaboração na programação computacional do método de linearização de equações, utilizado nesta pesquisa.

Ao professor José Calazans de Castro pelas noções dos métodos de controle usados neste trabalho.

Aos operadores do computador VAX/11 - 750 pelo apoio na parte computacional.

RESUMO

Este trabalho propõe uma sistemática para projeto e implementação de sinais estabilizadores em compensadores síncronos de um sistema de potência interligado. O sistema de 230/500KV da CHESF-ELETRONORTE foi utilizado para fins de ilustração.

O projeto baseia-se em modelos de máquinas conectados a um equivalente dinâmico. A estratégia de controle utilizada foi a realimentação ótima de estados através de ganhos constantes.

Os sinais usados na realimentação foram derivados da tensão terminal, do fluxo de potência ativa na linha e da velocidade do compensador. No caso do fluxo de potência na linha, esta variável não está representada na modelagem, portanto esta será identificada pelo método dos mínimos quadráticos recursivo generalizado e incorporada ao modelo.

Inicialmente o controlador foi implementado na versão linearizada do sistema máquina/equivalente dinâmico.

Afim de se verificar a eficácia do controlador numa implementação real, fêz também simulações num programa de estabilidade transitória (modelagem não linear).

SUMMARY

This work presents a systematic way for implementation and design of stabilizing signals in synchronous compensator of an interconnected power system. For illustration purposes the CHESF-ELETRONORTE 230/500KV has been used.

The design is based on dynamic equivalent model connected to the machine model. The used control strategy was optimum state feedback through constant gains.

The stabilizing signals for feeding-back was derived from terminal voltage, active line power flow and machine velocity. In the case of line power flow, this variable is not represented in the modelling; then it will be identified by the generalized recursive least square method and incorporated to the model.

Initially, the controller was implemented in a linearized version of machine/dynamic equivalent system.

In order to verify the controller efficacy, for a real implementation, a dynamic simulation in a transient stability program (nonlinear model) is proposed.

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 : Resultados de um fluxo de cargas em P.U. na base de 100MVA e bases de tensões do sistema.....	13
Tabela 2.2 : Dados de carga em P.U. (base de 100MVA).....	15
Tabela 2.3 : Dados das linhas de transmissão na base de 100MVA e tensão do sistema.....	17
Tabela 2.4 : Dados dos transformadores em P.U. na base de 100MVA e bases de tensões do sistema.....	19
Tabela 2.5 : Dados dos reatores em P.U. na base de 100MVA e bases de tensão do sistema.....	21
Tabela 2.6(a) : Dados do sistema de excitação da figura 2.2.	24

Tabela 2.6(b) : Dados do sistema de excitação da figura 2.3.
..... 24

Tabela 2.7 : Dados dos geradores em P.U. na base de 100MVA.
..... 25

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 : Representação Esquemática do Compensador Síncrono	08
Figura 2.1 : Diagrama Unifilar do Sistema de 230/500KV, CHESF-ELETRONORTE.....	12
Figura 2.2 : Diagrama do Sistema de excitação das Máquinas Síncronas 1, 2, 4, 6, 8, 9, 10, 12 e 13.....	22
Figura 2.3 : Diagrama do Sistema de excitação simplificado da Máquina Síncrona 13.....	23
Figura 2.4 : Diagrama do Sistema de excitação das Máquinas Síncronas 3, 5, 7 e 11.....	23
Figura 3.1 : Sistema Equivalente Dinâmico.....	33
Figura 3.2 : Diagrama para transferência de eixos.....	34

Figura 4.1 : Função de Transferência	$\Delta I_D / \Delta V_D$	59
Figura 4.2 : Função de Transferência	$\Delta I_Q / \Delta V_D$	60
Figura 4.3 : Função de Transferência	$\Delta I_D / \Delta V_Q$	61
Figura 4.4 : Função de Transferência	$\Delta I_Q / \Delta V_Q$	62
Figura 4.5 : Variação de 5% na Tensão Terminal da Máquina 13, modelo de 5ª ordem, sistema não linear.....		63
Figura 4.6 : Variação de 5% na Tensão Terminal da Máquina 13, modelagem não linear de 5ª ordem/equivalente dinâmico do Sistema.....		64
Figura 4.7 : Variação de 5% na Tensão Terminal da Máquina 13, modelo de 3ª ordem, sistema não linear...		65
Figura 4.8 : Variação de 5% na Tensão Terminal da Máquina 13, modelagem não linear de 3ª ordem/equivalente dinâmico do Sistema.....		66
Figura 4.9 : Variação de 5% na Tensão Terminal da Máquina 13, modelo linearizado de 5ª ordem/equivalente dinâmico do Sistema.....		67

- Figura 4.10 : Identificação do desvio do fluxo de potência ativa na linha 19-20, do sistema de ordem 18..... 68
- Figura 4.11 : Variação de 5% na Tensão terminal da barra 13, modelo de 5^a ordem do compensador, controlador derivado de V_t , sistema não linear..... 69
- Figura 4.12 : Variação de 5% na Tensão terminal da barra 13, modelo de 5^a ordem do compensador, controlador derivado de V_t , sistema não linear..... 70
- Figura 4.13 : Variação de 5% na Tensão terminal da barra 13, modelo de 3^a ordem do compensador, controlador derivado de P1, sistema não linear..... 71
- Figura 4.14 : Variação de 5% na Tensão terminal da barra 13, modelo de 3^a ordem do compensador, controlador derivado de P1, sistema não linear..... 72
- Figura 4.15 : Variação de 5% na Tensão terminal da barra 13, modelo de 3^a ordem do compensador, controlador derivado de $\dot{\delta}$, sistema não linear..... 73
- Figura 4.16 : Variação de 5% na Tensão terminal da barra 13, modelo de 3^a ordem do compensador, controlador derivado de $\dot{\delta}$, sistema não linear..... 74

- Figura 4.17 : Variação de 5% na Tensão terminal da barra 13, modelo de 3ª ordem do compensador, controlador derivado de V_t , sistema não linear..... 75
- Figura 4.18 : Variação de 5% na Tensão terminal da barra 13, modelo de 3ª ordem do compensador, controlador derivado de V_t , sistema não linear..... 76
- Figura 4.19 : Variação de 5% na Tensão terminal da barra 13, modelo de 3ª ordem do compensador, controlador derivado de P1, sistema não linear..... 77
- Figura 4.20 : Variação de 5% na Tensão terminal da barra 13, modelo de 3ª ordem do compensador, controlador derivado de $\dot{\delta}$, sistema não linear..... 78
- Figura 4.21 : Variação de 5% na Tensão terminal da barra 13, modelo de 3ª ordem do compensador, controlador derivado de V_t , sistema não linear..... 79

ÍNDICE

CAPITULO - 1

INTRODUÇÃO

1.1 - Considerações Preliminares.....	01
1.2 - Revisão Bibliográfica e Motivação da Pesquisa.....	02
1.3 - Contribuição da Pesquisa.....	04
1.4 - Compensador Síncrono.....	05
1.5 - Revisão dos Capítulos.....	09

CAPITULO - 2

O COMPENSADOR SÍNCRONO E O SISTEMA

MULTI-MÁQUINA TESTE

2.1 - Introdução.....	10
2.2 - Sistema Multi-Máquina Utilizado.....	11
2.3 - Dados do Sistema C.A.....	11

CAPITULO - 3

MODELAGEM E TÉCNICA DO PROJETO

DE SINAIS ESTABILIZADORES

3.1 - Introdução.....	26
3.2 - Modelo Linearizado do Compensador.....	27
3.3 - Modelo Equivalente Dinâmico de Sistemas de Potência.....	31

3.4 - Modelo Linearizado da Máquina Conectado ao Equivalente Dinâmico do Sistema.....	33
3.5 - Identificação de Variáveis em Função dos Estados do Modelo Interligado.....	36
3.6 - A Técnica de Controle Ótimo.....	39

CAPÍTULO - 4

IMPLEMENTAÇÃO DOS SINAIS ESTABILIZADORES

4.1 - Introdução.....	42
4.2 - Levantamento do Modelo, do Sistema de Potência para fins de Projeto.....	43
4.3 - Identificação e Acoplamento do Fluxo de Potência na Linha ao Modelo.....	44
4.4 - Aplicação da Técnica de Controle Ótimo.....	47
4.4.1 - Otimização Empregando Modelo de 5ª Ordem para o Compensador.....	48

4.4.2 - Otimização Empregando Modelo de 3ª Ordem para o Compensador.....	51
4.5 - Implementação dos Sinais Projetados.....	52
4.5.1 - Implementação e Simulação do Sinal junto ao Modelo não li- near do S.E.P. para o Compensa- dor Síncrono de 3ª ordem.....	53
CAPÍTULO - 5	
Comentários e Conclusões.....	80
APÊNDICE	
I - Linearização do Compensador Síncrono/Sis- tema de Potência.....	83
II - Modelo Equivalente Dinâmico do Sistema de Potência Teste.....	109
Referências Bibliográficas.....	124

CAPÍTULO - I

INTRODUÇÃO

1.1 - Considerações Preliminares:

Três principais motivos para preocupação em se transmitir tanta potência quanto possível através de uma dada linha de transmissão hoje, são:

Primeiro, a dependência dos centros de cargas na continuidade do suprimento de energia elétrica tornou-se mais crítica, ou seja, evitar-se o blackout, como os ocorridos em 1965 e 1977 nos Estados Unidos. Isto significa que a segurança, ou a confiabilidade dos sistemas de transmissão precisam serem melhorados continuamente. Métodos modernos de compensação têm ajudado a tornar estes melhoramentos possíveis.

Segundo, transmissão de alta potência a longa

distância. O desenvolvimento de esquemas de compensação têm ajudado a se fazer economicamente e tecnicamente transmissão acção bem quanto a transmissão dc.

E terceiro, a dificuldade de se adquirir novas e melhores redes de transmissão. A urgência de maximizar a utilização das novas e das já existentes linhas, têm motivado o desenvolvimento de sistemas de compensação (MILLER, 1982).

O presente trabalho propõe estudar o comportamento dinâmico de compensadores síncronos, ou seja, o projeto de um sinal adicional para amortecer oscilações do fluxo de potência ativa na linha, do angulo de torque da máquina e, agindo de forma secundária, melhoria do desempenho dinâmico do sistema na região próxima ao compensador. O projeto utiliza técnicas de controle ótimo e teoria da identificação (MOTA, 1981).

1.2 - Revisão Bibliográfica e Motivação da Pesquisa.

Por mais de 50 anos os compensadores síncronos vêm sendo utilizados para controlar tensão e potência reativa em sistemas de transmissão (MILLER, 1982).

A literatura especializada sobre os compensadores

síncronos e suas aplicações é muito vasta, a exemplo, a instalação do compensador síncrono de Presidente Dutra no Brasil, pela Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (SHWITALLA, 1987).

Estabilizadores de sistema de potência aplicados ao sistema de excitação dos geradores síncronos têm sido usadas para prover operação normal do sistema quando este opera com cargas altas e em situações de pequenas perturbações (BUSBY, HURLEY, KEAY e RACZKOWSKI, 1979).

Resultados experimentais mostram que, para pequenas perturbações, estabilizadores projetados usando-se a técnica de controle ótimo, baseados na dinâmica do sistema linear, têm desempenho satisfatório na estabilização dos sistemas de potência (ELMETWALLY, RAO e MALIK, 1975).

Em (MOTA, 1981) projetos de estabilizadores em sistemas de excitação de máquinas síncronas para sistemas de potência foram desenvolvidos utilizando-se esta técnica.

As técnicas de estimação de estados e controle ótimo foram também empregadas por (VIANA DA FONSECA, 1986) no projeto de sinais adicionais através do sistema de regulação de tensão dos compensadores estáticos de reativos, onde uma função de custo J é escolhida para minimizar variáveis acessíveis na barra de interligação C.E.R./Sistema de Potência.

Estas técnicas foram utilizadas nesta pesquisa.

Devido a grande constante de tempo de campo do compensador síncrono, sugere-se a implementação de um controle suplementar para melhorar as oscilações transitórias de tensão, através de um sinal proporcional a taxa de variação de tensão; a necessidade crescente de compensação de reativos para estabilização de sistemas de potência e a aplicação das técnicas usadas no projeto em um sistema real de grande porte motivaram esta pesquisa.

1.3 - Contribuição da Pesquisa

O emprego da técnica de controle ótimo (realimentação de estados), na estabilidade de sistemas elétricos de potência foi uma contribuição de relevante importância desta pesquisa, o projeto sistemático de sinais estabilizadores derivados da tensão terminal e/ou fluxo de potência na linha e/ou velocidade, do sistema de excitação do compensador síncrono, baseado no modelo em forma de variáveis de estado do compensador interligado a um modelo equivalente dinâmico do sistema de potência. As publicações existentes só mencionam a aplicação desta técnica em sistemas de excitação de geradores síncronos e compensadores estáticos de reativos.

1.4 - Compensador Síncrono

Os compensadores síncronos compõem a classe dos compensadores ativos, isto é, equipamentos ligados em paralelo ao sistema C.A. que tendem a manter a tensão constante nos seus terminais através da geração ou absorção de potência reativa.

A seguir, uma comparação entre a atuação dos compensadores estáticos de reativos e os compensadores síncronos para duas diferentes situações de defeito: o curto-circuito trifásico equilibrado e sobretensões.

Durante um curto-circuito os compensadores síncronos atuam de forma a minimizar os seus efeitos, já que são capazes de suprir transitoriamente a potência reativa, devido a constância de seu fluxo, durante certo período de tempo, enquanto que os compensadores estáticos mostram-se ineficientes devido a redução de tensão nos seus terminais. Em sobretensões, como rejeição de carga, os compensadores síncronos não operam satisfatoriamente em relação aos compensadores estáticos, pois devem reduzir o fluxo, o qual depende do transitório ligado a constante de tempo do equipamento, e os compensadores estáticos atuam de forma rápida e benéfica para o sistema C.A., pois o dispositivo está na faixa de operação contínua do reator controlado a tiristores, e sua potência reativa (absorção) cresce

com o nível de sobretensão dentro da capacidade do dispositivo.

Um compensador síncrono é uma máquina síncrona que funciona com a velocidade sincronizada com o S.E.P., sem torque de entrada e sem gerar ou absorver ativos em regime permanente, o campo é controlado seja para gerar ou absorver a potência reativa necessária ao sistema.

Atualmente, a maioria das aplicações dos compensadores síncronos têm os seguintes objetivos:

- 1 - Controle de tensão dos sistemas de potência.
 - Controle de tensão normal
 - Controle de tensão de emergência
 - Melhoria da estabilidade e aumento da rigidez do sistema com introdução do momento de inércia.

2 - Aplicações HVDC

Operação "normal" de um sistema de potência é caracterizado por contínuas mudanças de carga, que compreendem

períodos entre carga leve e picos de carga, tais mudanças requerem fluxos de potência reativa diferentes do sistema. Nas redes de transmissão as variações entre carga leve e carga pesada exige um controle de potência reativa adequado para manter os níveis de tensão corretas.

Os compensadores síncronos possuem vantagens técnicas para estes propósitos.

- Prover ajustes contínuos na potência reativa capazes de manter controle sobre as tensões de transmissão.
- Têm a capacidade de fornecer potência reativa capacitiva e indutiva.

A capacidade de controlar tensão em casos de emergência, durante a maioria dos distúrbios no sistema, é provavelmente o principal motivo das mais recentes utilidades da aplicação dos componentes síncronos (MILLER, 1982).

Vantagens da compensação através de compensadores síncronos:

- Capacidade de sobrecarga
- Totalmente controlável
- Baixas harmônicas

Desvantagens:

- Requer frequentes manutenção
- Resposta lenta do controle
- Exige bases fortes de construção

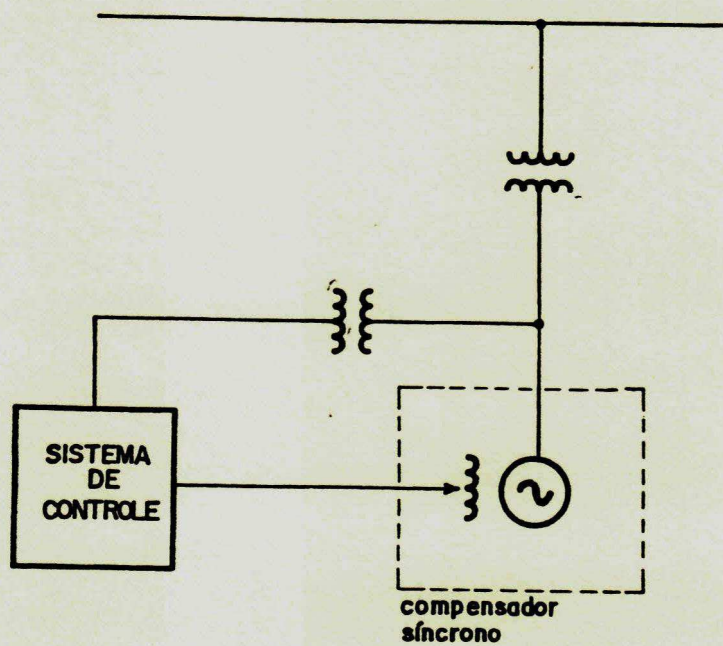


Fig. 1.1 - Representação esquemática do compensador síncrono

1.5 - Revisão dos Capítulos

O segundo capítulo apresenta o compensador síncrono, o sistema 230/500KV CHESF-ELETRONORTE utilizado na pesquisa, seu diagrama, sua modelagem e suas condições de carga para o estudo de estabilidade dinâmica.

O terceiro capítulo mostra a técnica de controle empregada para o projeto do sinal estabilizador e suas manipulações necessárias para sua aplicação no sistema utilizado.

O quarto capítulo trata do conjunto dos dois capítulos anteriores, caracterizado pela análise dos resultados da implementação de sinais estabilizadores em compensadores síncronos usando técnica de controle ótimo.

O quinto capítulo expõe comentários e conclusões do projeto dos sinais desenvolvidos no trabalho.

CAPÍTULO - II

O COMPENSADOR SÍNCRONO E O SISTEMA

MULTI-MÁQUINA TESTE

2.1 - Introdução:

Este capítulo apresenta a modelagem das máquinas do sistema C.A. utilizado e a sua configuração.

Os dados e resultados da simulação de um fluxo de cargas são apresentados, assim como os dados dos parâmetros das máquinas.

2.2 - Sistema Multi-Máquina utilizado.

O sistema C.A. utilizado para fins de demonstração é o sistema CHESF-ELETRONORTE o qual é constituído por quarenta e três barras, vinte e cinco geradores síncronos, oito compensadores síncronos, vinte e um indutores, trinta e duas linhas e quarenta e três transformadores. Os geradores síncronos ligados à mesma barra são representadas por uma máquina equivalente, onde seus parâmetros representam o equivalente das máquinas individuais vistas em paralelo a partir do barramento comum, e a constante de inércia equivalente é a soma das constantes de inércia de cada máquina.

A figura 2.1 mostra o diagrama unificar do sistema real de 230/500KV, CHESF-ELETRONORTE, utilizado para os estudos da influência dos sinais estabilizadores projetados nesta pesquisa, empregando técnicas de controle ótimo, durante pequenas e grandes perturbações.

2.3 - Dados do Sistema C.A.

Os resultados do fluxo de cargas e os dados do sistema C.A. em estudo, são apresentados nas tabelas seguintes:

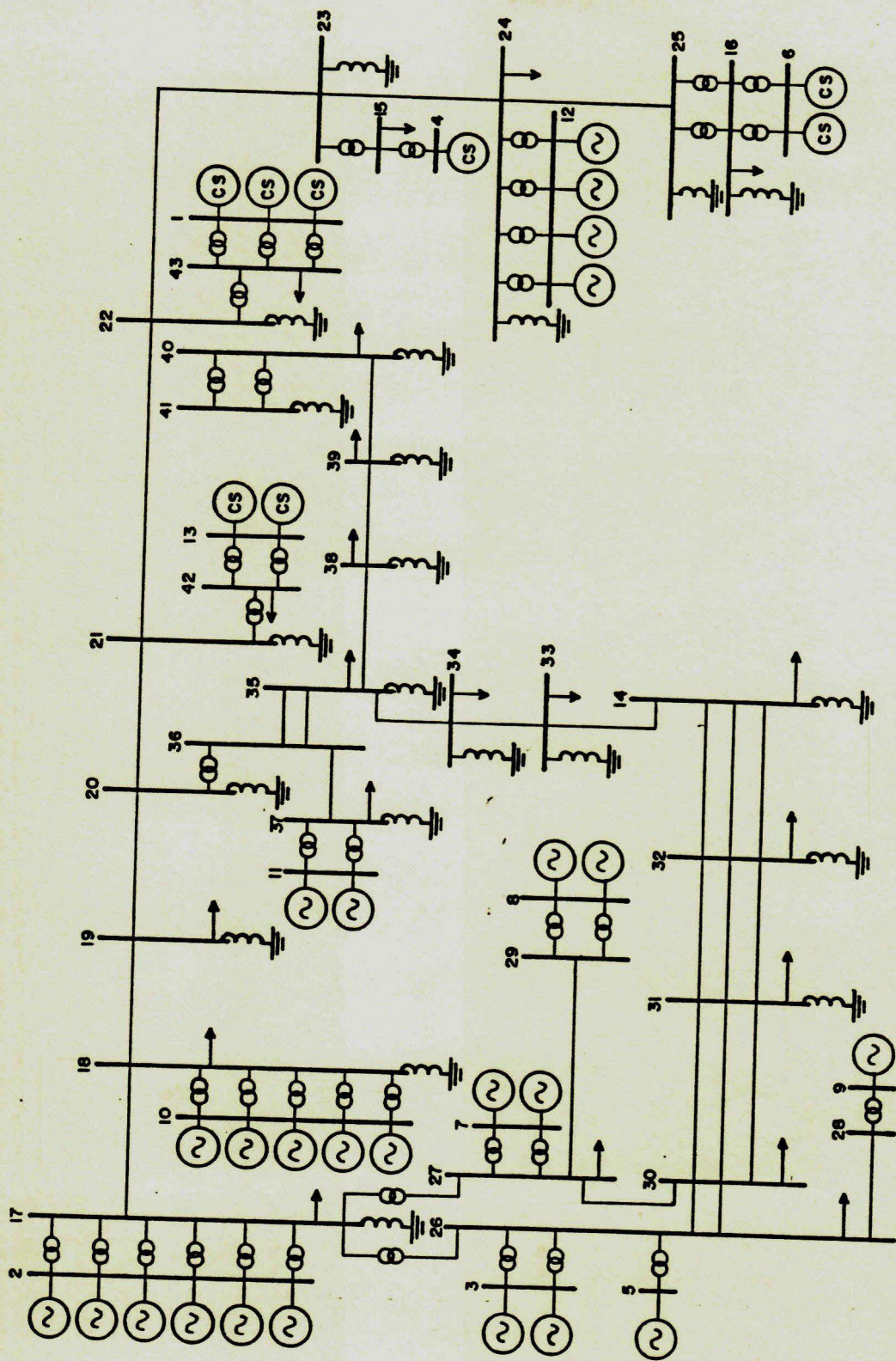


Fig. 2.1 - Diagrama Unifilar do Sistema Chesf-Eletronorte

Tabela 2.1 : Resultados de um fluxo de cargas em P.U.
na base de 100MVA

BARRA	TENSÃO		GERAÇÃO	
	MODULO	ÂNGULO	ATIVA	REATIVA
1	1.030	36.0	0.0	2.759
2	1.020	25.1	17.995	-4.288
3	1.020	25.5	3.78	0.479
4	1.030	45.2	0.0	0.663
5	1.040	21.5	0.6	-0.111
6	1.020	49.7	0.0	1.503
7	1.020	26.0	3.78	0.544
8	1.030	17.0	1.36	-0.46
9	1.030	16.3	0.68	-0.255
10	1.050	36.1	7.5	-0.261
11	1.050	38.6	1.02	0.365
12	1.030	85.5	11.8	-0.096
13	1.020	18.7	0.0	1.626
14	1.030	-48.5	-	-
15	1.015	45.2	-	-
16	0.998	49.7	-	-
17	1.094	-4.3	-	-
18	1.082	10.6	-	-
19	1.092	12.3	-	-
20	1.081	14.6	-	-
21	1.093	18.8	-	-

Continuação da Tabela - 2.1

BARRA	TENSÃO		GERAÇÃO	
	MODULO	ÂNGULO	ATIVA	REATIVA
22	1.081	36.0	-	-
23	1.071	45.6	-	-
24	1.086	57.5	-	-
25	1.072	50.9	-	-
26	1.039	-5.8	-	-
27	1.037	-5.2	-	-
28	1.038	-5.6	-	-
29	1.036	-4.7	-	-
30	1.050	-20.6	-	-
31	1.064	-27.2	-	-
32	1.050	-40.6	-	-
33	0.980	-36.6	-	-
34	0.935	-20.1	-	-
35	0.965	-2.2	-	-
36	1.043	12.1	-	-
37	1.044	12.2	-	-
38	0.976	1.7	-	-
39	0.976	5.3	-	-
40	1.004	10.7	-	-
41	1.085	11.7	-	-
42	1.015	18.7	-	-
43	1.018	36.0	-	-

Tabela 2.2 : Dados de Carga em P.U. (base de 100MVA)

BARRA	CARGA	
	ATIVA	REATIVA
14	3.57	-0.542
15	0.255	0.107
16	3.206	1.06
17	20.93	-7.11
18	1.533	-0.601
19	0.202	0.072
20	-	-
21	-	-
22	-	-
23	-	-
24	0.199	0.120
25	-	-
26	4.462	-0.655
27	4.896	-0.752
28	-	-
29	-	-
30	0.323	0.028
31	0.794	-1.023
32	0.720	-0.144

Continuação da Tabela - 2.2

BARRA	CARGA	
	ATIVA	REATIVA
33	0.535	-0.344
34	0.214	-0.054
35	0.990	0.340
36	-	-
37	0.150	0.12
38	0.248	0.003
39	0.291	0.109
40	2.914	0.139
41	-	-
42	0.056	0.019
43	0.455	0.166

Tabela 2.3 : Dados das linhas de transmissão
na base de 100MVA

LINHA	BARRA	BARRA	R	X	Y
1	26	28	0.0010	0.0056	0.0096
2	26	30	0.0294	0.1658	0.2904
3	26	30	0.0294	0.1658	0.2904
4	37	36	0.0004	0.0020	0.0034
5	24	32	0.0022	0.0289	2.8784
6	30	31	0.0147	0.0807	0.1456
7	30	31	0.0147	0.0824	0.1450
8	30	31	0.0147	0.0824	0.1436
9	30	27	0.0294	0.1623	0.2954
10	31	32	0.0385	0.2182	0.3818
11	31	32	0.0385	0.2129	0.3740
12	31	32	0.0385	0.2129	0.3758
13	32	14	0.0297	0.1677	0.2938
14	32	14	0.0297	0.1606	0.3044
15	32	14	0.0297	0.1606	0.3044
16	33	14	0.0375	0.2125	0.3684
17	33	34	0.290	0.1634	0.2834
18	34	35	0.0268	0.1509	0.2590
19	35	38	0.0328	0.1855	0.3200
20	35	36	0.0352	0.1993	0.3484

Continuação da Tabela - 2.3

LINHA	BARRA	BARRA	R	X	Y
21	35	36	0.0352	0.1992	0.3492
22	38	39	0.0166	0.0932	0.1590
23	39	40	0.0183	0.1029	0.1774
24	27	29	0.0010	0.0056	0.0096
25	17	18	0.0029	0.0418	4.3940
26	18	19	0.0021	0.0269	2.7312
27	20	19	0.0023	0.0297	3.0332
28	20	21	0.0021	0.0262	2.6380
29	41	21	0.0026	0.0378	3.9098
30	21	22	0.0036	0.0480	5.0573
31	22	23	0.0019	0.0236	2.3553
32	24	25	0.0032	0.0419	4.2764

Tabela 2.4 : Dados de Transformadores
(P.U. - 100MVA e Tensões do Sistema)

TRAFO	BARRA	BARRA	X	TAP
1	26	5	0.1567	0.980
2	26	3	0.0603	1.027
3	26	3	0.0603	1.027
4	26	17	0.0115	0.943
5	28	9	0.1167	0.978
6	37	11	0.2128	1.025
7	37	11	0.2128	1.025
8	42	21	0.0296	0.896
9	42	13	0.0670	1.050
10	42	13	0.0670	1.050
11	43	22	0.0123	0.919
12	43	1	0.0670	1.050
13	43	1	0.0674	1.050
14	16	25	0.0147	0.923
15	16	25	0.0147	0.923
16	16	6	0.0147	0.923
17	16	6	0.0625	1.025
18	15	23	0.0625	1.025
19	15	4	0.0340	0.933
20	27	7	0.0625	1.025

Continuação da Tabela - 2.4

TRAFO	BARRA	BARRA	X	TAP
21	27	7	0.0603	1.027
22	27	17	0.0115	0.943
23	29	8	0.1167	0.978
24	29	8	0.1167	0.978
25	36	20	0.0291	0.973
26	40	41	0.0115	0.923
27	40	41	0.0115	0.923
28	17	2	0.0267	1.050
29	17	2	0.0267	1.050
30	17	2	0.0267	1.050
31	17	2	0.2673	1.050
32	17	2	0.2670	1.050
33	17	2	0.0267	1.050
34	18	10	0.0550	1.025
35	18	10	0.0550	1.025
36	18	10	0.0550	1.025
37	18	10	0.0550	1.025
38	18	10	0.0550	1.025
39	24	12	0.0317	1.050
40	24	12	0.0317	1.050
41	24	12	0.0317	1.050
42	24	12	0.0317	1.050
43	43	1	0.6745	1.050

Tabela 2.5 : Dados dos Reatores

(P.U. - 100MVA)

REATOR	BARRA	Y
1	31	-0.30
2	32	-0.30
3	14	-0.40
4	34	-0.20
5	35	-0.10
6	37	-0.20
7	38	-0.10
8	39	-0.20
9	16	1.00
10	40	-0.60
11	17	-3.00
12	18	-3.50
13	20	-3.09
14	41	-2.00
15	19	-2.05
16	21	-4.92
17	22	-3.98
18	24	-1.58
19	25	-3.20
20	23	-2.64
21	33	-0.20

As figuras 2.2, 2.3 e 2.4 representam os diagramas de excitação das máquinas síncronas.

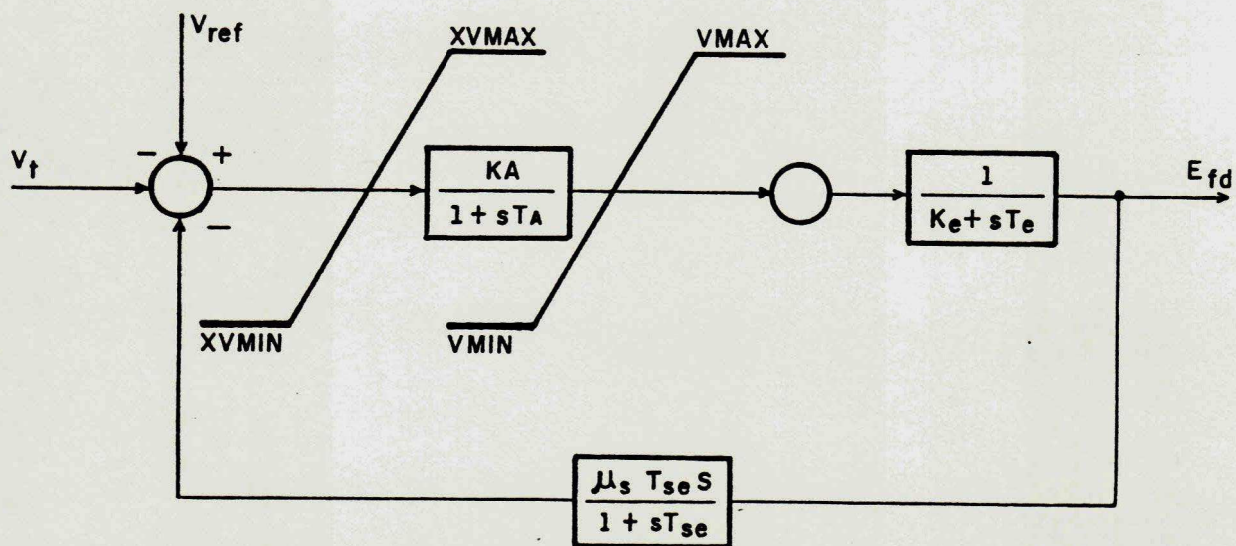


Fig. 2.2 - Diagrama do Sistema de Excitação das Máquinas Síncronas 1,2,4,6,8,10,12 e 13.

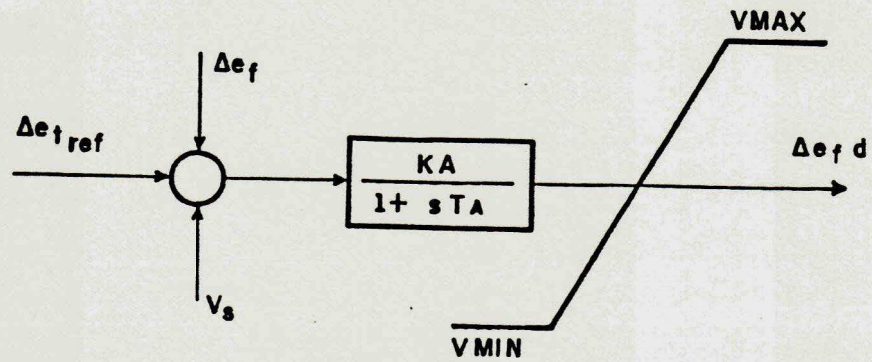


Fig. 2.3 - Diagrama de blocos do sistema de excitação da máquina 13

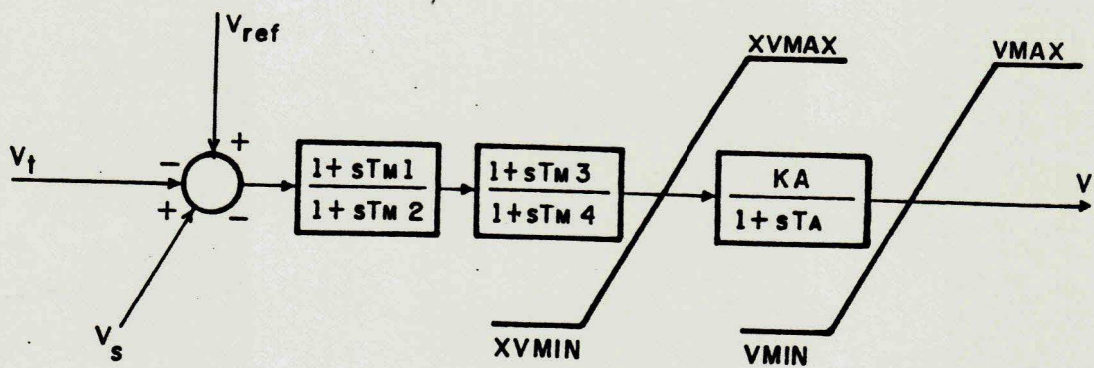


Fig. 2.4 - Diagrama do Sistema de Excitação das Máquinas Síncronas 3,5,7 e 11.

Tabela 2.6 : Dados do sistema de Excitação ds Máquinas Síncronas.

(a). Da figura 2.4

MAQUINA	KA	TA	V _{MAX}	V _{MIN}	XV _{MAX}	XV _{MIN}	T _{M1}	T _{M2}	T _{M3}	T _{M4}
1	400	-	7.0	-7.0	-	-	0.129	0.049	0.10	0.30
2	300	-	-	-	3.75	-2.96	-	-	1.02	6.13
4	400	-	7.0	-7.0	-	-	0.129	0.049	0.10	0.30
6	400	-	7.0	-7.0	-	-	0.129	0.049	0.10	0.30
8	300	-	-	-	3.25	-2.95	-	-	2.00	20.00
9	300	-	-	-	3.25	-2.95	-	-	2.00	20.00
10	50	-	3.04	-2.28	-	-	0.196	0.026	-	-
12	396	-	4.52	-3.92	-	-	-	-	2.32	26.5
13	400	-	7.953	-6.813	-	-	0.129	0.049	0.10	0.30

(b). Da figura 2.2

MAQUINA	KA	TA	V _{MAX}	V _{MIN}	XV _{MAX}	XV _{MIN}	Ke	Te	Ax	Bx	s	Tse
3	400	0.05	3.5	-3.5	0.0	0.0	-0.17	0.949	0.0022	2.79	0.04	1.0
5	92	0.05	0.95	-0.95	0.0	0.0	0.0	0.24	0.0	4.72	0.0654	1.0
7	400	0.05	3.5	-3.5	0.0	0.0	-0.17	0.949	0.0022	2.79	0.04	1.0
11	9.26	0.033	3.278	-2.773	0.0	0.0	-0.0406	3.859	0.0063	1.759	0.02	1.0

Tabela 2.7 : Dados das Máquinas (P.U. - 100MVA)

MAQUINA	X'_d	X_q	X'_d	H	T'_{d0}	XI	T'_{q0}	X'_q	T''_{d0}	T''_{q0}	X''_d
1	0.10	0.2667	0.4167	5.94	10.010	0.0633	10.00	0.2667	0.0553	0.140	0.0633
2	0.0121	0.0244	0.0333	127.20	6.61	0.0086	6.61	0.0244	0.0702	0.132	0.0086
3	0.0595	0.1365	0.2155	21.40	4.62	0.0417	4.62	0.1365	0.0418	0.0982	0.0417
4	0.233	0.60	1.0067	2.17	3.10	0.1673	3.10	0.60	0.70	0.105	0.1673
5	0.350	0.690	1.0401	4.34	5.50	0.2601	5.50	0.690	0.040	0.0786	0.2601
6	0.0965	0.2865	0.4265	5.62	3.70	0.0615	3.70	0.2865	0.094	0.105	0.0615
7	0.0595	0.1365	0.2155	21.40	4.62	0.0417	4.62	0.1365	0.0428	0.0982	0.0417
8	0.092	0.222	0.312	9.88	4.40	0.0435	4.40	0.222	0.0435	0.1055	0.0635
9	0.184	0.444	0.624	4.94	4.40	0.127	4.40	0.444	0.0435	0.1055	0.127
10	0.0328	0.0566	0.0822	41.35	5.60	0.0236	5.60	0.0566	0.0417	0.0717	0.0236
11	0.230	0.4695	0.755	4.28	4.000	0.1082	4.00	0.4695	0.0331	0.0676	0.0122
12	0.0179	0.0378	0.0573	67.20	5.920	0.010	5.92	0.0378	0.0441	0.050	0.0122
13	0.150	0.60	0.70	4.40	7.0	0.075	7.0	0.60	0.060	0.210	0.075

CAPÍTULO - III

MODELAGEM E TÉCNICA DO PROJETO DE SINAIS ESTABILIZADORES

3.1 - Introdução

O objetivo deste capítulo é tratar da modelagem do sistema e das técnicas de controle ótimo necessárias para o projeto dos sinais estabilizadores implementados em compensadores síncronos.

O sistema a ser estudado é modelado por um compensador síncrono interligado ao modelo equivalente dinâmico linear, representando o restante do sistema. Esta modelagem mostrou-se suficiente para representar a dinâmica do sistema elétrico.

A técnica de controle ótimo, utilizada, secção 3.6, requer que as variáveis, a serem amortecidas, sejam função dos estados do modelo linear. Contudo, nem todas as grandezas utilizadas no projeto atendem a esta condição. Uma técnica de identificação de parâmetros resolve este problema, secção 3.5.

3.2 - Modelo Linearizado do Compensador Síncrono.

Nesta secção apresenta-se os modelos de 5ª e 3ª ordem da máquina.

No modelo de 5ª ordem da máquina/regulador de tensão, 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 três enrolamentos; segundo o eixo direto, o enrolamento de campo e um enrolamento amortecedor; segundo o eixo em quadratura, um enrolamento amortecedor.

As equações diferenciais correspondentes são as seguintes:

$$\dot{\delta} = \ddot{\delta} \quad (3.1)$$

$$\ddot{\delta} = \omega_o/2 H(T_m - T_e) - (\omega_o/2) \dot{\delta} K_d \quad (3.2)$$

$$U_{fd} = \omega_o r_f (E_{fd} / X_{ad} - i_{fd}) \quad (3.3)$$

$$U_{Kd} = -\omega_o r_{Kd} i_{Kd} \quad (3.4)$$

$$U_{Kq} = -\omega_o r_{Kq} i_{Kq} \quad (3.5)$$

Para o regulador de tensão do tipo estático, cujo diagrama de blocos é mostrado na fig. 2.3, tem-se a seguinte equação diferencial:

$$\dot{E}_{fd} = 1/TA \{ [K_A (V_{ref} + V_s - V_t)] - E_{fd} \} \quad (3.6)$$

As equações algébricas da máquina:

$$V_d = -r \cdot i_d - U_q \quad (3.7)$$

$$V_q = -r \cdot i_q - U_d \quad (3.8)$$

$$U_d = -X_d \cdot i_d + X_{ad} \cdot i_{Kd} + X_{ad} \cdot i_{fd} \quad (3.9)$$

$$U_q = -X_q \cdot i_q + X_{aq} \cdot i_{Kq} \quad (3.10)$$

$$U_{fd} = -X_{ad} \cdot i_d + X_{ad} \cdot i_{Kd} + X_{fd} \cdot i_{fd} \quad (3.11)$$

$$U_{Kd} = -X_{ad} \cdot i_d + X_{ad} \cdot i_{fd} + X_{Kd} \cdot i_{Kd} \quad (3.12)$$

$$U_{Kq} = -X_{aq} \cdot i_q + X_{Kq} \cdot i_{Kq} \quad (3.13)$$

Torque elétrico

$$T_e = U_d \cdot i_q - U_q \cdot i_d \quad (3.14)$$

Tensão terminal

$$V_t^2 = V_d^2 + V_q^2 \quad (3.15)$$

Potência terminal

$$P_t = V_d i_d + V_q i_q \quad (3.16)$$

A partir de uma modelagem não linear, pode-se obter uma versão linearizada das equações da máquina em torno de um ponto de operação inicial do sistema, aplicando-se o método PQR (MOTA, 1981).

As equações linearizadas da máquina são:

$$\ddot{\Delta\delta} = \Delta\ddot{\delta} \quad (3.17)$$

$$\dot{\Delta\delta} = -\frac{\omega_0}{2H} (- \Delta T_e - K_d \dot{\Delta\delta}) \quad (3.18)$$

$$\dot{\Delta U}_{fd} = \omega_0 \left(\frac{r_f}{X_{ad}} \Delta E_{fd} - r_f \cdot \Delta i_{fd} \right) \quad (3.19)$$

$$\dot{\Delta U}_{Kd} = -\omega_0 r_{Kd} \Delta i_{Kd} \quad (3.20)$$

$$\dot{\Delta U}_{Kq} = -\omega_0 r_{Kd} \Delta i_{Kd} \quad (3.21)$$

$$\Delta V_d = -r \Delta i_d - \Delta U_q \quad (3.22)$$

$$\Delta V_q = -r \Delta i_d + \Delta U_d \quad (3.23)$$

$$\Delta U_d = -X_d \Delta i_d + X_{ad} \Delta i_{Kd} + X_{ad} \Delta i_{fd} \quad (3.24)$$

$$\Delta U_q = -X_q \Delta i_q + X_{aq} \Delta i_{Kq} \quad (3.25)$$

$$\Delta U_{fd} = -X_{ad} \Delta i_d + X_{ad} \Delta i_{Kd} + X_{fd} \Delta i_{fd} \quad (3.26)$$

$$\Delta U_{Kd} = -X_{ad} \Delta i_d + X_{ad} \Delta i_{fd} + X_{Kd} \Delta i_{Kd} \quad (3.27)$$

$$\Delta U_{Kq} = -X_{aq} \Delta i_q + X_{Kq} \Delta i_{Kq} \quad (3.28)$$

$$\Delta T_e = U_{d0} \Delta i_q + i_{q0} \Delta U_d - U_{q0} \Delta i_d - i_{d0} \Delta U_q \quad (3.29)$$

$$\Delta P_t = V_{d0} \Delta i_d + i_{d0} \Delta V_d + V_{q0} \Delta i_q + i_{q0} \Delta V_q \quad (3.30)$$

Equação do regulador de tensão.

$$\dot{\Delta E}_{fd} = 1/T_A [K_A (\Delta V_s - \Delta V_t)] - E_{fd} \quad (3.31)$$

O índice (0) nas equações corresponde ao ponto de operação inicial do sistema. Assim, forma-se o seguinte conjunto de equações:

$$\dot{\Delta X} = A \Delta X + B \Delta U + C \Delta I \quad (3.32)$$

$$\Delta Y = D \Delta X + E \Delta U + F \Delta I \quad (3.33)$$

$$\Delta V = G \Delta X + H \Delta I \quad (3.34)$$

onde:

$$\Delta X = (\Delta \delta, \dot{\Delta \delta}, \Delta U_{fd}, \Delta U_{Kd}, \Delta U_{Kq}, \Delta E_{fd})^T, \text{ Vetor de estados}$$

$$\Delta Y = (\Delta V_t, \dot{\Delta \delta}, \Delta P_t)^T, \text{ Vetor de saída}$$

$$\Delta U = \Delta V_s, \text{ Vetor de entrada}$$

$$\Delta V = (\Delta V_d, \Delta V_q)^T, \text{ Vetor de tensões}$$

$$\Delta I = (\Delta i_d, \Delta i_q)^T, \text{ Vetor de correntes}$$

despreza-se os enrolamentos amortecedores de eixo direto e em quadratura e a constante de tempo T_A do sistema de excitação, então a equação (3.6) passa a ser a equação algébrica seguinte:

$$E_{fd} = K_A (V_{ref} + V_s - V_t) \quad (3.35)$$

O método PQR está descrito, de forma sucinta no APÊNDICE I, este método foi empregado com sucesso por GUERRA (1987) e CAVALCANTI (1988).

3.3 - Modelo Equivalente Dinâmico de Sistemas de Potência.

A necessidade de se simplificar sistemas de potência para análise de estabilidade motivou estudos para se levantar modelos dinâmicos de ordem reduzida.

O modelo equivalente dinâmico linear em forma de variáveis de estado, apresentado nesta pesquisa é baseado em teoria de identificação de sistemas dinâmicos (MOTA, 1981), e representa o sistema de potência a partir do ponto de interligação com o compensador síncrono, figura 3.1.

A seguir, apresenta-se um resumo para identificação

do modelo.

Realizada as medições de tensão e corrente, no ponto onde se deseja levantar o modelo equivalente dinâmico, identifica-se quatro funções de transferência discretas de 3ª ordem, pelo método dos mínimos quadráticos recursivo generalizado (MOTA, 1981), onde em cada função de transferência, a tensão é a entrada e a corrente é a saída.

O modelo equivalente discreto é transformado em forma de variáveis de estado contínuas, para que se possa simular com o restante do sistema num programa de estabilidade (MOTA, 1981) e (SILVEIRA, 1985).

O modelo final produzido, na forma de variáveis de estado contínuas é:

$$\dot{X}_e = A_e X_e + B_e \Delta V \quad (3.36)$$

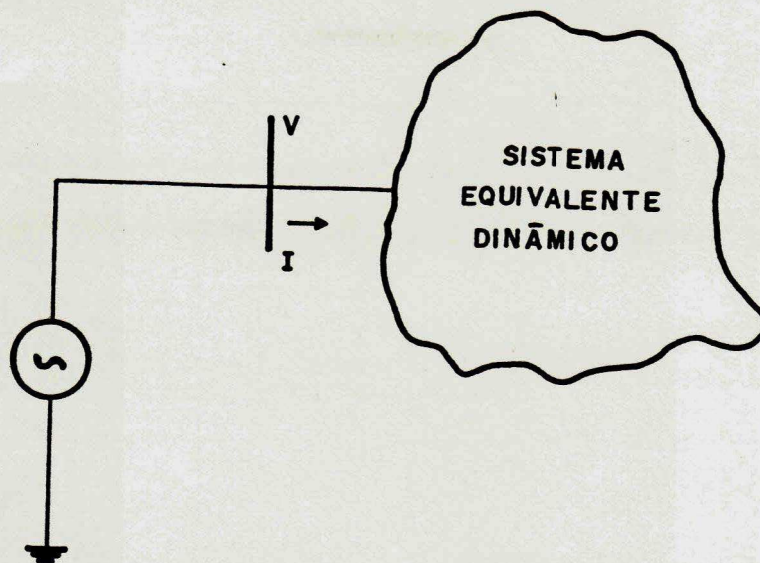
$$\Delta I = C_e X_e + D_e \Delta V \quad (3.37)$$

onde,

$$X_e = [X_1, X_2, \dots, X_{12}]^T$$

$$\Delta V = [\Delta V_D, \Delta V_Q]^T$$

$$\Delta I = [\Delta I_D, \Delta I_Q]^T$$



A descrição sobre o levantamento do modelo equivalente dinâmico linear e sua aplicação no sistema teste, consta no APÊNDICE II.

3.4 - Modelo Linearizado da Máquina Conectado ao Equivalente Dinâmico do Sistema.

A fim de se fazer a interligação máquina/equivalente dinâmico do S.E.P., o modelo do compensador síncrono, equações 3.33 - 3.35, deve estar na referência do sistema; para isto utiliza-se as equações 3.39, que transforma as equações na referência interna da máquina para a referência do sistema.

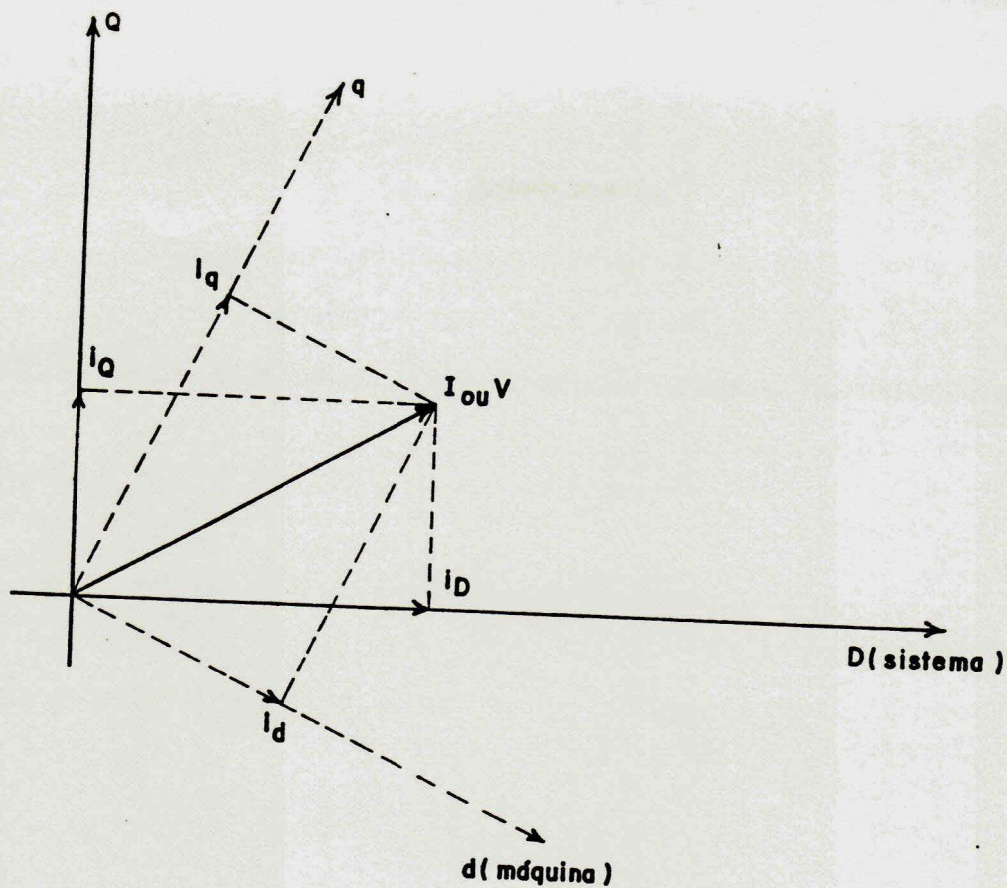


Fig. 3.2 - Diagrama de transferência de eixos

A equação para transformação na forma linearizada

(MOTA, 1981).

$$\begin{bmatrix} V_D \\ V_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Sen } \delta_0 & \text{Cos } \delta_0 \\ -\text{Cos } \delta_0 & \text{Sen } \delta_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (V_{d0} \text{ Cos } \delta_0 - V_{q0} \text{ Sen } \delta_0) \\ (V_{d0} \text{ Sen } \delta_0 + V_{q0} \text{ Cos } \delta_0) \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

Transformadas a tensão (V) e a corrente (I), o modelo passará para referência do sistema na forma das equações 3.33 - 3.35.

As equações transformadas são:

$$\dot{X}_m = A_m + B_m U + C_m \Delta I \quad (3.40)$$

$$Y = D_m X_m + E_m U + F_m \Delta I \quad (3.41)$$

$$\Delta V = G_m X_m + H_m I \quad (3.42)$$

O modelo da máquina, eqs. (3.40) - (3.42) combinado com o modelo equivalente dinâmico, equação (3.37) e (3.32), através da eliminação de V e I, resulta no seguinte modelo:

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_m \\ \dot{X}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_m + D_m D_e R G_m, & D_m C_e + D_m D_e R H_m C_e \\ B_e R G_m, & A_e + B_e R H_m C_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_m \\ X_e \end{bmatrix} +$$

$$+ \begin{bmatrix} B_m \\ 0 \end{bmatrix} U$$

$$Y = [C_m + F_m D_e R G_m, F_m C_e + F_m D_e R H_m C_e] \begin{bmatrix} X_m \\ X_e \end{bmatrix}$$

onde,

$$R = (I - Hm De)^{-1}$$

Então, o modelo linearizado compensador síncrono/equivalente dinâmico é da forma:

$$\dot{X} = AX + BU \quad (3.43)$$

$$Y = CX \quad (3.44)$$

onde,

$$X = (\delta, \dot{\delta}, Y_{fd}, Y_{Kd}, Y_{Kq}, E_{fd}, X_1, X_2, \dots, X_{12})^t$$

$$Y = (V_t, \dot{\delta}, P_t)^t$$

$$U = V_s$$

A variável P_t , corresponde ao fluxo de potência ativa na linha, deverá fazer parte de vetor de medidas (Y) do modelo máquina/equivalente dinâmico, para isso deve-se identificar uma linha na matriz C que corresponda a esta variável.

3.5 - Identificação de Variáveis em função dos estados do modelo interligado.

Para o projeto de um sinal derivado do fluxo de potência ativa na linha, tornou-se necessário utilizar uma

técnica de identificação de parâmetros, tendo em vista que a estratégia de controle usada requer que as variáveis a serem amortecidas, sejam função dos estados do modelo linear interligado, compensador síncrono/equivalente dinâmico, o que não acontece com o fluxo de potência na linha.

Esta secção descreve de forma sucinta a técnica de identificação de parâmetros.

Um vetor de medidas do fluxo de potência na linha selecionada, é obtido através de uma pequena perturbação na tensão de referência do compensador síncrono em um programa para estudos de estabilidade de sistema elétrico. O vetor de parâmetros determinado pelo estimador de Markov \hat{a} , é derivado de:

$$W = Y - U \hat{a} \quad (3.45)$$

onde:

- W - Vetor de ruído associado às medidas
- Y - Vetor de medidas de dimensão r.
- U - Entrada do modelo,
- \hat{a} - Vetor de parâmetros

Após manipulações envolvendo a equação (3.45), (VIANA DA FONSECA, 1986), chega-se a equação que determina um estimador equivalente ao estimador dos mínimos quadrados

ponderados.

$$\hat{a}^* = (U^T N^{-1} U)^{-1} U^T N^{-1} Y \quad (3.46)$$

Para se evitar problemas de mal condicionamento na inversão das matrizes da equação (3.46), utiliza-se o método de formulação recursiva na forma de Kalman, onde cada medida é processada uma de cada vez após a medição. O estimador é dado por:

$$\hat{a} = [U^{Tm} N^{-m} U^m + U^{TS} (N^S)^{-1} U^S]^{-1} * \\ * [U^{Tm} (N^m)^{-1} Y^m + U^{TS} (N^S)^{-1} Y^S] \quad (3.47)$$

Feitas algumas manipulações algébricas, na formulação recursiva de Kalman, obtém-se o seguinte algoritmo para estimação dos parâmetros:

$$K = P_K U_{K+1}^T (q_{K+1} + U_{K+1} P_K U_{K+1}^T)^{-1} \quad (3.48)$$

$$\hat{a}_{K+1}^* = \hat{a}_K^* + K (Y_{K+1} - U_{K+1} a_K^*) \quad (3.49)$$

$$P_{K+1} = (1 - K U_{K+1}) P_K \quad (3.50)$$

com $K = 1, 2, \dots, r$

Onde a e p são arbitradas no início do processo.

3.6 - A Técnica de Controle Ótimo.

De posse da modelagem do sistema, resultando no sistema interligado compensador síncrono/equivalente dinâmico, pode-se formular um problema de otimização para estabilidade do sistema, quando sujeito a distúrbios, levando-se em consideração a velocidade de convergência dos estados e a amplitude do sinal de entrada.

O problema de otimização é formulado como segue.

Considere o índice de desempenho quadrático:

$$J = \int_0^{\infty} (X^T Q X + U^T R U) dt \quad (3.51)$$

Onde Q é uma matriz positiva semi-definida real e simétrica, e R positiva definida real e simétrica. Estas matrizes são responsáveis pela minimização do índice na equação.

A estratégia de controle ótimo (KWAKERNAAK e SIVAN, 1972) é dada por:

$$U^* = -R^{-1} B^T P X = -K X \quad (3.52)$$

Onde P é matriz solução única simétrica positiva semi-definida da equação algébrica de Riccati.

$$PA + A^T P - PBR^{-1} B^T P + Q = 0 \quad (3.53)$$

Da solução desta equação, obtém-se conseqüentemente a matriz simétrica positiva definida e única K .

Neste problema o vetor de controle U é determinado para um sistema onde as variáveis de estado são totalmente controláveis.

Uma implementação real de todos os estados não é praticável porque o sistema não é totalmente mensurável, exceto suas saídas, então parte-se para uma realimentação ótima de saídas, que é o caso mais real.

O índice de desempenho quadrático é então:

$$J = \int_0^{\infty} (Y^T Q_c Y + U^T R U) dt \quad (3.54)$$

Onde Q_c e R possuem as mesmas propriedades das matrizes Q e R da equação (3.51).

Substituindo,

$$Y = C X$$

na equação (3.53), tem-se:

$$J = \int_0^{\infty} (X^T Q X + U^T R U) dt$$

Que é a mesma equação (3.51), onde:

$$Q = C^T Q_c C$$

A lei de controle da equação (3.52), passa a ser função das saídas do sistema:

$$U^* = K C^{-1} Y \quad (3.55)$$

A lei de controle, equação 3.56, é determinada considerando-se que a matriz C do sistema é inversível. caso não seja, o controle poderá ser feito estimando-se os estados do sistema através das variáveis mensuráveis de saída (MOTA, 1981).

CAPÍTULO - IV

IMPLEMENTAÇÃO DOS SINAIS ESTABILIZADORES

4.1 - Introdução :

As técnicas de controle e identificação, expostas no capítulo 3, serão utilizadas no projeto de sinais estabilizadores para compensadores síncronos.

Utilizando-se o sistema demonstrativo da fig. (2.3.1), escolheu-se o compensador síncrono da barra 13 para fins de projeto e implementação dos sinais estabilizadores com o objeto de amortecer oscilações eletromecânicas do sistema.

O trabalho investiga dois modelos do compensador síncrono, o de 5ª ordem/regulador de tensão, resultando um modelo de seis equações diferenciais, interligado ao modelo equivalente dinâmico do S.E.P., formando um modelo linear final de ordem 16.

É o modelo de 3ª ordem, incluindo o ganho do regulador, conectado ao equivalente dinâmico, compondo um sistema linear de ordem 15.

A influência dos sinais projetados (lei de controle ótimo) no desempenho dinâmico do sistema linear e não linear do S.E.P, é verificada, através de simulações em computadores digitais (IBM - 4341 e VAX 11-750).

4.2 - Levantamento do Modelo do Sistema de Potência para Fins de Projeto

O modelo equivalente dinâmico é levantado a partir do ponto de interligação com o modelo do compensador síncrono, da barra 13, de conformidade com as equações 3.36 - 3.37 e os valores numéricos (Apêndice II) simulados num programa de estabilidade.

As figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4 mostram resultados da simulação dinâmica do sistema não linear completo e das funções de transferência de terceira ordem correspondentes.

As figuras 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8 mostram que a técnica de identificação utilizada para o levantamento do equivalente dinâmico do sistema, junto ao compensador síncrono,

adequou-se ao tipo de sistema em estudo, pois as curvas salientam um comportamento similar para as várias modelagens.

A figura 4.9 apresenta o modelo linearizado interligado compensador síncrono/equivalente dinâmico do S.E.P. (Apêndice I), e observa-se, comparando-a com as figuras 4.5 e 4.7, que a forma de onda é a mesma retratada pelo modelo não linear.

4.3 - Identificação e Acoplamento do Fluxo de Potência na Linha ao Modelo

Como mostrado na secção 3.5, a técnica de controle usada no projeto do sinal estabilizador, exige que as variáveis a serem amortecidas sejam função dos estados do modelo linear interligado .

A inclusão da variável ΔP_1 , correspondente ao fluxo de potência ativa na linha no modelo equivalente dinâmico, foi obtida através da técnica descrita no capítulo 3, secção 3.5.

O vetor de parâmetros identificado corresponde a linha da matriz C a qual incorpora ΔP_1 ao modelo.

Inicialmente utilizou-se uma modelagem de 5^a ordem para o compensador. O vetor de parâmetros identificado para este modelo é o seguinte:

$$\begin{array}{r}
 \text{---} \\
 \text{---} \quad \text{---} \\
 | P1 | = \begin{array}{r}
 | 7.273 \text{ E-}03 \quad -4.683 \text{ E-}03 \quad 1.243 \text{ E-}03 | \\
 | -3.017 \text{ E-}03 \quad -1.736 \text{ E-}02 \quad -2.528 \text{ E-}06 | \\
 | 6.794 \text{ E-}04 \quad -3.375 \text{ E-}03 \quad 6.121 \text{ E-}04 | \\
 | 0.240 \quad 3.293 \text{ E-}03 \quad -0.240 | \\
 | 4.567 \text{ E-}04 \quad -3.654 \text{ E-}03 \quad 6.811 \text{ E-}04 | \\
 | 0.226 \quad -9.333 \text{ E-}05 \quad -0.227 | \\
 \text{---}
 \end{array}
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 \text{---} \\
 \delta \\
 \delta \\
 U \\
 I \\
 f_d \\
 U \\
 K_d \\
 U \\
 K_q \\
 E \\
 f_d \\
 X_1 \\
 X_2 \\
 \cdot \\
 \cdot \\
 \cdot \\
 X_{12} \quad (4.1) \\
 \text{---}
 \end{array}$$

e,

$$\begin{array}{r}
 \text{---} \\
 \text{---} \quad \text{---} \\
 | P1 | = \begin{array}{r}
 | 4.171 \text{ E-}04 \quad -5.250 \text{ E-}05 \quad 2.091 \text{ E-}04 | \\
 | -4.748 \text{ E-}05 \quad -4.170 \text{ E-}05 \quad 2.802 \text{ E-}04 | \\
 | -8.492 \text{ E-}06 \quad -1.897 \text{ E-}04 \quad 3.286 \text{ E-}04 | \\
 | -1.930 \text{ E-}04 \quad -1.357 \text{ E-}04 \quad 4.066 \text{ E-}04 | \\
 | 8.823 \text{ E-}04 \quad -6.185 \text{ E-}05 \quad -1.066 \text{ E-}03 | \\
 \text{---}
 \end{array}
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 \text{---} \\
 \delta \\
 \delta \\
 U \\
 I \\
 f_d \\
 X_1 \\
 X_2 \\
 \cdot \\
 \cdot \\
 \cdot \\
 X_{12} \quad (4.2) \\
 \text{---}
 \end{array}$$

para a modelagem de 3^a ordem do compensador.

A figura 4.10 mostra a eficiência da técnica quando comparadas a curva identificada com a curva obtida no modelo não linear do sistema de potência.

Para se utilizar da técnica de controle ótimo, seção 3.6, faz-se necessário que a matriz C possua forma quadrática e seja inversível, desta forma a matriz C é completada com o elemento 1.0 na diagonal e 0.0 fora da diagonal. Portanto o vetor de parâmetros identificado, do fluxo de potência ativa na linha 19 - 20, pode ser acoplado ao sistema a fim de que sinais adicionais baseados na técnica de realimentação ótima de saídas sejam projetados.

Para iniciar-se o processo do projeto de sinais estabilizadores, inclui-se o fluxo de potência P1 no vetor de saídas, com posicionamento arbitrário.

Então o modelo a ser manipulado será:

$$\dot{X} = AX + BU \quad (4.3)$$

$$Y_1 = \bar{C} X \quad (4.4)$$

onde,

$$Y_1 = [V_t \quad \dot{\delta} \quad P_t \quad U_{Kd} \quad U_{Kq} \quad E_{fd} \quad X_1 \quad X_2 \quad \dots \quad X_{12}]^T$$

$$\bar{C} = \begin{bmatrix} 0.022 & 0.000 & 0.000 & 0.538 & 0.022 & 0.000 \\ 0.014 & 0.000 & 0.000 & 0.038 & 0.000 & 0.000 \\ 0.014 & 0.000 & 0.000 & 0.038 & 0.000 & 0.000 \\ a_1 & a_2 & a_3 & a_4 & a_5 & a_6 \\ a_7 & a_8 & a_9 & a_{10} & a_{11} & a_{12} \\ a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} & a_{17} & a_{18} \\ 6.400 & 0.000 & 0.000 & 0.314 & 6.260 & 0.000 \\ 0.514 & 0.000 & 0.000 & 0.199 & 0.000 & 0.000 \\ 0.514 & 0.000 & 0.000 & 0.199 & 0.000 & 0.000 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 1 & \dots 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

$a_i, i = 1, \dots, 18$, são os parâmetros das funções identificadas para P_1 , obtido a partir da equação 4.2.

4.4 - Aplicação da Técnica de Controle Ótimo

Conforme o que foi colocado na seção 3.6, a lei de controle com realimentação ótima de estados, consiste na minimização do índice de desempenho quadrático e para isto, são atribuídos valores numéricos as matrizes peso Q e R , onde será dado um maior peso ao elemento correspondente a variável que se deseja derivar o sinal, na matriz Q (MOTA, 1981).

4.4.1 - Otimização Empregando Modelo de 5ª ordem para o Compensador

Inicialmente foi empregado uma modelagem mais completa do compensador, no projeto, para que se considerasse os fluxos nos enrolamentos amortecedores e se obtivesse melhor precisão nos resultados.

Tomou-se então o modelo de 5ª ordem da máquina/regulador de tensão, equações 3.1 a 3.16. No desenvolvimento deste modelo, os efeitos de saturação foram desprezados, isto significa que todas as reatâncias são mantidas constantes e a corrente de campo não foi modificada a fim de levar em consideração o efeito da saturação.

De acordo com a lei do controle com realimentação ótima de estados, primeiramente atribuiu-se maior peso ao elemento referente a δ , na matriz peso Q, para solução da equação algébrica de Riccati, através do método iterativo de Newton Raphson, usando a solução intermediária da equação de Lyapunov, como critério de convergência (MOTA, 1981), já que devido a ordem elevada do sistema, o método dos autovalores (CASTRO & MOTA, 1984) não soluciona a equação corretamente.

O tempo computacional gasto pelo programa, citado acima, para solucionar a equação foi muito alto e seu resultado

insatisfatório, os ganhos muitos baixos não causam nenhum efeito no amortecimento das oscilações angulares da máquina, para pequenas perturbações. Simulações exaustivas foram realizadas para diferentes valores na matriz peso R, responsável pela minimização da energia de controle na função de custo, sem que se obtivesse bons resultados.

A respeito de R, um decréscimo em R, corresponde a um aumento no esforço da excitação, ou seja, os ganhos aumentam, levando os pólos mais a esquerda do eixo imaginário; um aumento em R corresponde uma redução no esforço da excitação, logo, os ganhos diminuem.

Uma alternativa analisada foi derivar o sinal do fluxo de potência ativa na linha, utilizando-se a técnica descrita na secção 3.5, com isso o índice de desempenho é predominantemente função da variação do fluxo de potência ativa na linha, neste caso observou-se que os resultados não se mostraram muito bons, pois para valores da matriz R em que se conseguia obter resultados da solução da equação de Riccati, os valores dos ganhos eram baixos, não afetando a resposta angular da máquina.

Por fim, projetou-se um sinal estabilizador derivado da tensão terminal do compensador. Para isto, atribuiu-se os valores abaixo, às matrizes R e Q.

$$R = [0.045]$$

$$Q_c = \begin{bmatrix} V_t & \delta & P_t & U_{Kd} & U_{Kq} & E_{fD} & X_1 & \dots & X_{12} \\ 0.0002 & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

Após inúmeras simulações para solução da equação de Riccati, obteve-se a seguinte lei:

$$[\Delta u] = \begin{bmatrix} -2.72 & 0.000 & 0.938 & 1.46 \\ 0.000 & 0.000 & -0.044 & 0.000 \\ 0.000 & 0.101 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.101 \\ 0.000 & 0.000 & \dots & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_t \\ \delta \\ P_t \\ U_{Kd} \\ U_{Kq} \\ E_{fd} \\ X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_{12} \end{bmatrix} \quad (4.5)$$



Nesta modelagem, o controlador é implementado fisicamente pela realimentação apenas das variáveis mensuráveis. Logo o controlador é sub-ótimo em relação ao modelo.

Na implementação real deste controlador, apenas as três primeiras medições do vetor podem ser realimentadas. A fim de tornar o sinal adicional fisicamente realizável, despreza-se os ganhos correspondentes as variáveis de estado com significado meramente matemático, restando os ganhos referentes as variáveis fisicamente realizáveis e acessíveis para uma realimentação de saídas do sinal. Este sinal é chamado de sinal sub-ótimo.

No desempenho deste controlador observou-se um substancial amortecimento das respostas angular e da potência ativa na linha na barra do compensador, como mostram as figuras 4.11 e 4.12.

4.4.2 - Otimização Empregando Modelo de 3ª Ordem para o Compensador

Devido as dificuldades computacionais encontradas na solução da equação algébrica de Riccati para o modelo de 5ª ordem do compensador, optou-se por uma simplificação na sua modelagem.

Segundo (DAWSON, 1969) e (GUERRA, 1987), um modelo de 3ª ordem para a máquina síncrona é suficiente para estudos de controle. Neste modelo despreza-se as derivadas associadas aos fluxos nos enrolamentos amortecedores. O efeito dos enrolamentos amortecedores são considerados pela inclusão do fator de amortecimento K_d na equação do fluxo de campo.

Esta modelagem foi adequada para os objetivos desta pesquisa. O sistema linear final de ordem 15 possibilitou a solução da equação de Riccati pelo método dos autovalores e seus resultados foram bastante revelantes. Um estudo completo a fim de minimizar cada variável definida no vetor de saída, como também do fluxo de potência ativa na linha, através da matriz Q do índice de desempenho, foi desenvolvido com êxito neste estudo.

4.5 - Implementação dos Sinais Projetados

Neste item, apresenta-se a implementação de sinais estabilizadores para compensadores síncronos, baseado em realimentação de saídas e levando-se em conta todo o acoplamento dinâmico do sistema através do modelo equivalente dinâmico.

O índice de desempenho baseado nas matrizes Q e R fornece um controlador ótimo, o qual está apto a amortecer as

oscilações do sistema devido a pequenas perturbações.

A implementação real dos sinais é sub-ótima em relação ao modelo, visto que apenas os ganhos relacionados com as variáveis mensuráveis do vetor de saídas é fisicamente implementado.

4.5.1 - Implementação e Simulação do Sinal junto ao Modelo não linear do S.E.P. para o Compensador Síncrono de 3ª Ordem.

Implementação e simulação dos sinais em uma modelagem não linear do sistema de potência tornaram-se necessárias a fim de verificar a influência destes sinais no desempenho dinâmico do sistema C.A.. O acloperamento dinâmico do sistema foi observado para pequena perturbação no sistema de transmissão. A pequena perturbação consiste de uma variação de 5% na tensão terminal da barra conectada ao compensador síncrono.

Implementa-se no modelo não linear o sinal sub-ótimo,

$$u = [K_1 \ K_2 \ K_3] \begin{bmatrix} \Delta V_t \\ \Delta \dot{\delta} \\ \Delta P_t \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

obtido a partir do sinal ótimo.

Os sinais sub-ótimos são implementados no modelo não linear, o qual corresponde ao sistema 230/500KV da CHESF-ELETRONORTE, figura 2.3.1, através do sistema de controle do compensador síncrono, localizado na barra 13, em série com um filtro Wash-out. Este filtro impede que o regulador atue devido a erros prolongados na potência.

Foram projetados sinais derivados da tensão terminal, da velocidade angular do compensador, e do fluxo de potência ativa na linha 19 - 20, para o compensador síncrono e observado o desempenho dinâmico do sistema C.A.

Para minimizar PI na função custo, atribuiu-se os seguintes valores as matrizes R e Q.

$$R = [0.0008]$$

$$Q_c = \begin{bmatrix} V_t & P1 & P_t & X_1 & \dots & X_{12} \\ \emptyset & \dots & & & & \\ \vdots & & 0.1 & & & \\ \vdots & & & \emptyset & & \\ \vdots & & & & \emptyset & \\ \vdots & & & & & \vdots \\ \emptyset & \dots & & & & \emptyset \end{bmatrix}$$

A lei de controle ótimo correspondente a função custo é:

$$u = \begin{bmatrix} -0.077 & 4.086 & -0.178 & -25.612 & 53.618 \\ -28.214 & -16.347 & 33.853 & -17.621 & -31.039 \\ 63.308 & -32.409 & -13.767 & 28.235 & 14.520 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_t \\ P_1 \\ P_t \\ X_1 \\ \vdots \\ X_{12} \end{bmatrix}$$

Os ganhos correspondentes as variáveis de estado não mensuráveis, embora seus valores sejam altos, eles se anulam entre si, isto foi verificado observando-se os autovalores do sistema, estes não sofreram muita alteração em relação aos autovalores do sistema sem a introdução dos ganhos.

O controlador sub-ótimo, em que somente as saídas são avaliáveis, foi implementado no sistema de potência completo não linear. A lei de controle torna-se:

$$u = \begin{bmatrix} -0.077 & 4.086 & -0.178 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_t \\ P_1 \\ P_t \end{bmatrix}$$

A figura 4.13 mostra a variação angular do compensador, quando é aplicada uma pequena perturbação, com o sinal sub-ótimo e sem o sinal sub-ótimo.

A figura 4.14 mostra os mesmos dois casos em relação a potência na linha 19-20.

Outro problema formulado, foi a minimização de $\dot{\delta}$.

A seguinte matriz Q que associa o elemento $\dot{\delta}$ à função custo e a matriz R é:

$$R = [0.0001]$$

$$Q_c = \begin{bmatrix} V_t & \dot{\delta} & P_t & X_1 & \dots & X_{12} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & 0.001 & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & 0 & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 \end{bmatrix}$$

Como mostrado antes, o resultado do controlador sub-ótimo é:

$$u = [-0.329 \quad 2.814 \quad -7.457] \begin{bmatrix} V_t \\ \dot{\delta} \\ P_t \end{bmatrix}$$

As figuras 4.15 e 4.16 mostram o desempenho do sinal nas variações angulares e de potência na linha.

Um sinal derivado da tensão terminal do compensador também foi projetado, associando na matriz Q o elemento a V_t na função custo.

$$R = [0.000005]$$

$$Q_c = \begin{bmatrix} V_t & \dot{\delta} & P_t & X_1 & \dots & X_{12} \\ 0.001 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & \dots & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

O controlador sub-ótimo obtido do sinal ótimo é:

$$u = [-1.547 \quad 2.564 \quad -7.593] \begin{bmatrix} V_t \\ \dot{\delta} \\ P_t \end{bmatrix}$$

As figuras 4.17 e 4.18 apresentam o comportamento da variação angular do compensador e da potência na linha, com o sistema sujeito a pequena perturbação, com o sinal e sem o sinal sub-ótimo.

Investigou-se o comportamento dinâmico da tensão de excitação do compensador para os sinais projetados, figuras 4.19, 4.20 e 4.21, considerando-se que se deve ter o cuidado em se projetar sinais que não prejudiquem o controle de tensão efetuado pelo compensador síncrono.

Um esforço maior da tensão de excitação é exigido ao compensador com a atuação do sinal, mas sem comprometer os limites de tensão especificados pelo regulador.

Quando o sistema é submetido a uma grande perturbação, que consiste de um curto-circuito trifásico com duração de 0,2 s, nas proximidades do compensador, o comportamento dinâmico do sistema apresenta-se mais alterado sob o efeito do sinal estabilizador do que quando este não atua; devido a este fato, é aconselhável introduzir um sistema de proteção que impeça que o sinal atue quando detectado uma perturbação grave do sistema. É importante salientar que, o sistema 230/500KV da CHESF-ELETRONORTE utilizado é crítico quando sujeito a grandes perturbações, tais como, curto-circuito, variações de tensão acima de 10%, etc. Com estas perturbações ele não consegue voltar a sua condição de equilíbrio e perde a estabilidade.

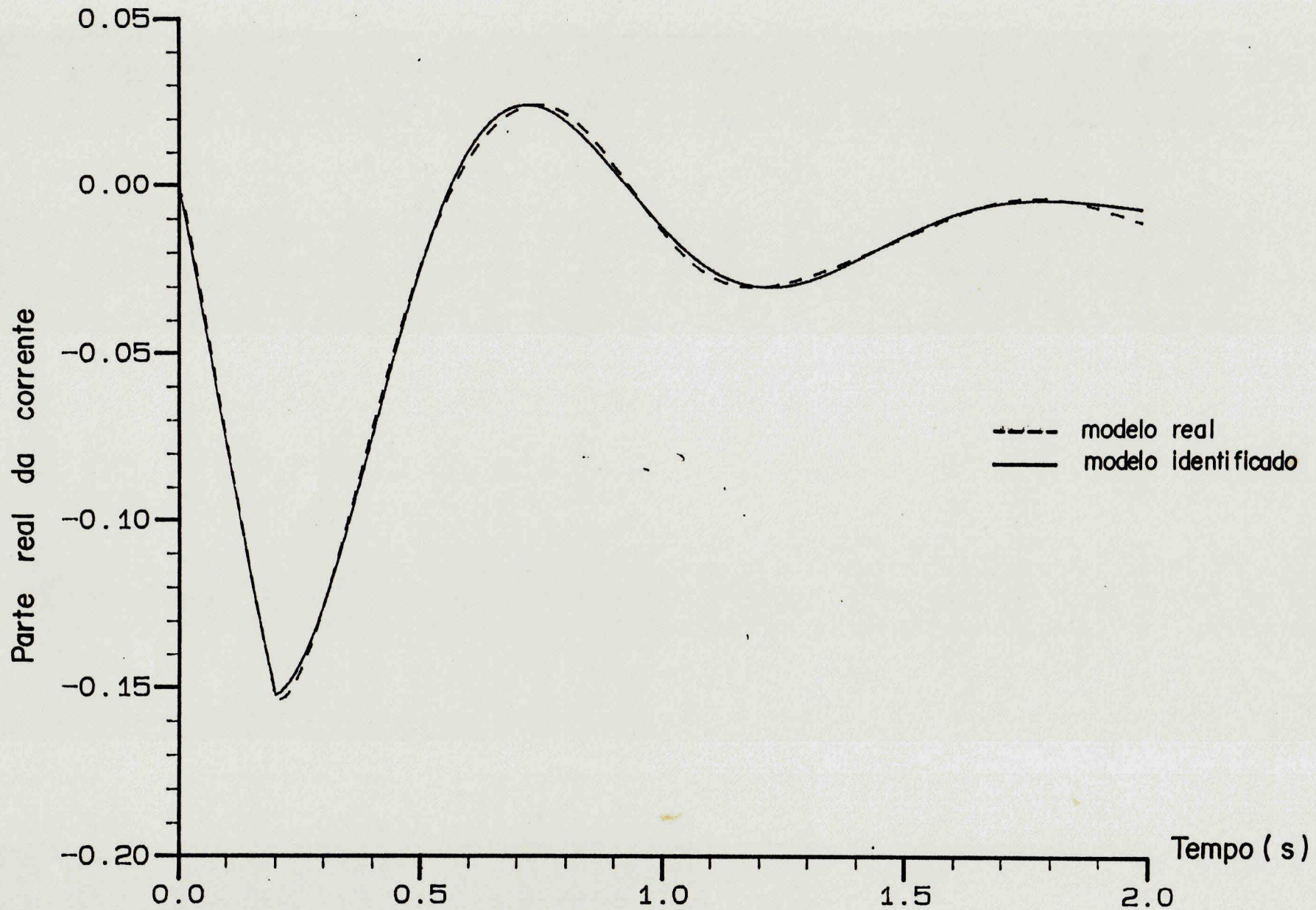


Fig. 4.1 - Função de transferência $\Delta I_D / \Delta V_D$

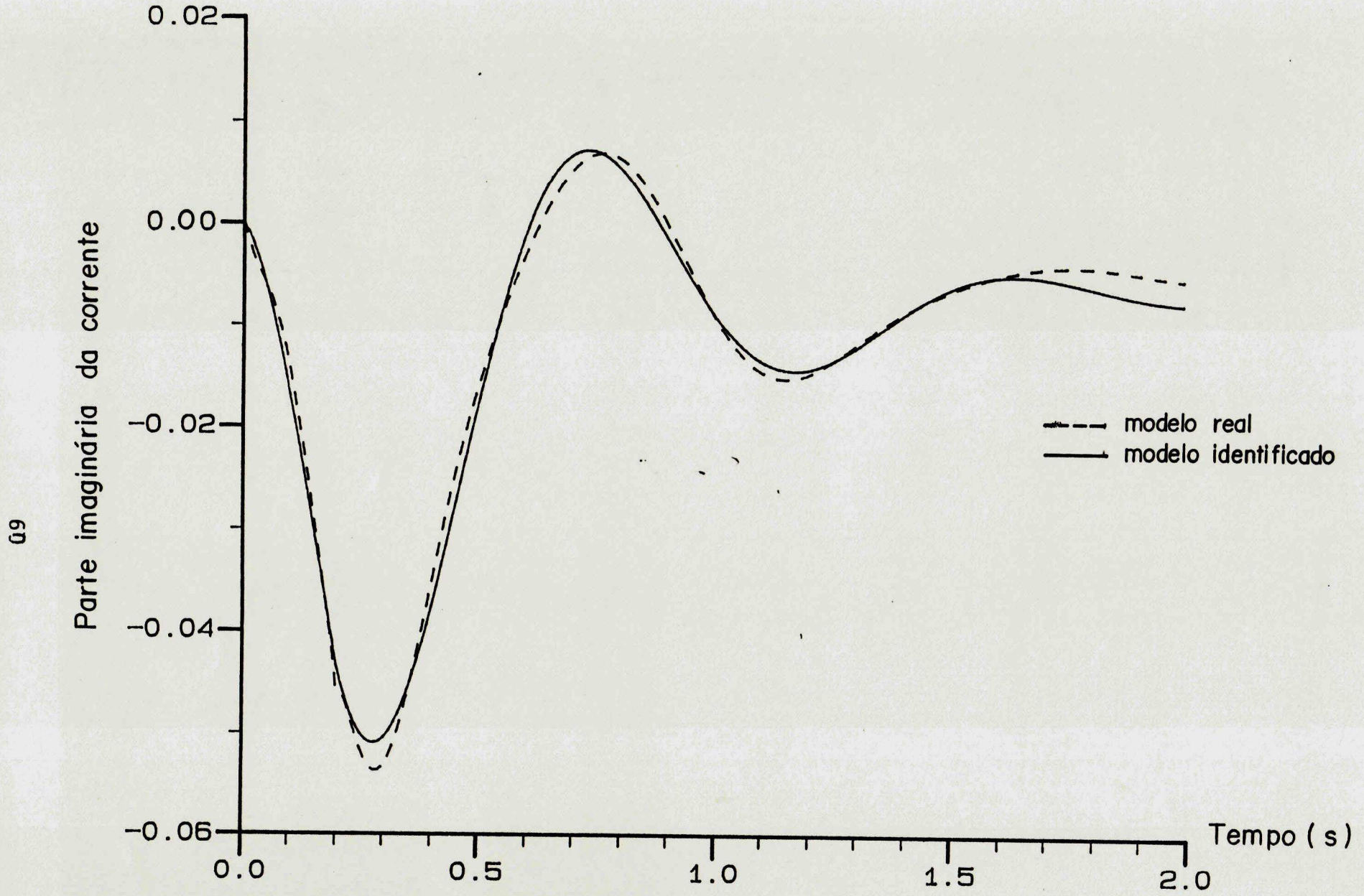


Fig. 4.2 - Função de transferência $\Delta I_Q / \Delta V_D$

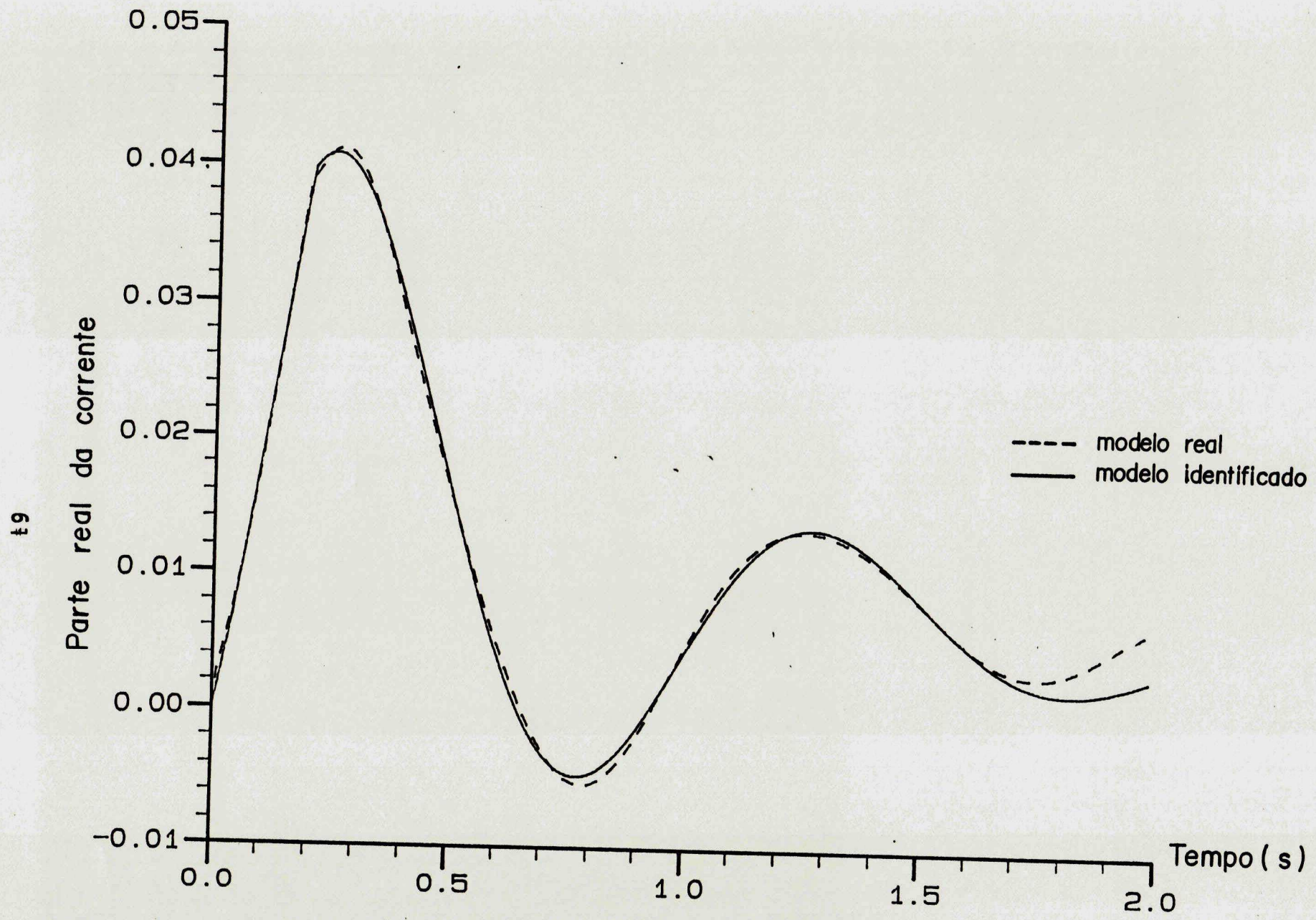


Fig. 4.3 - Função de transferência $\Delta I_D / \Delta V_Q$

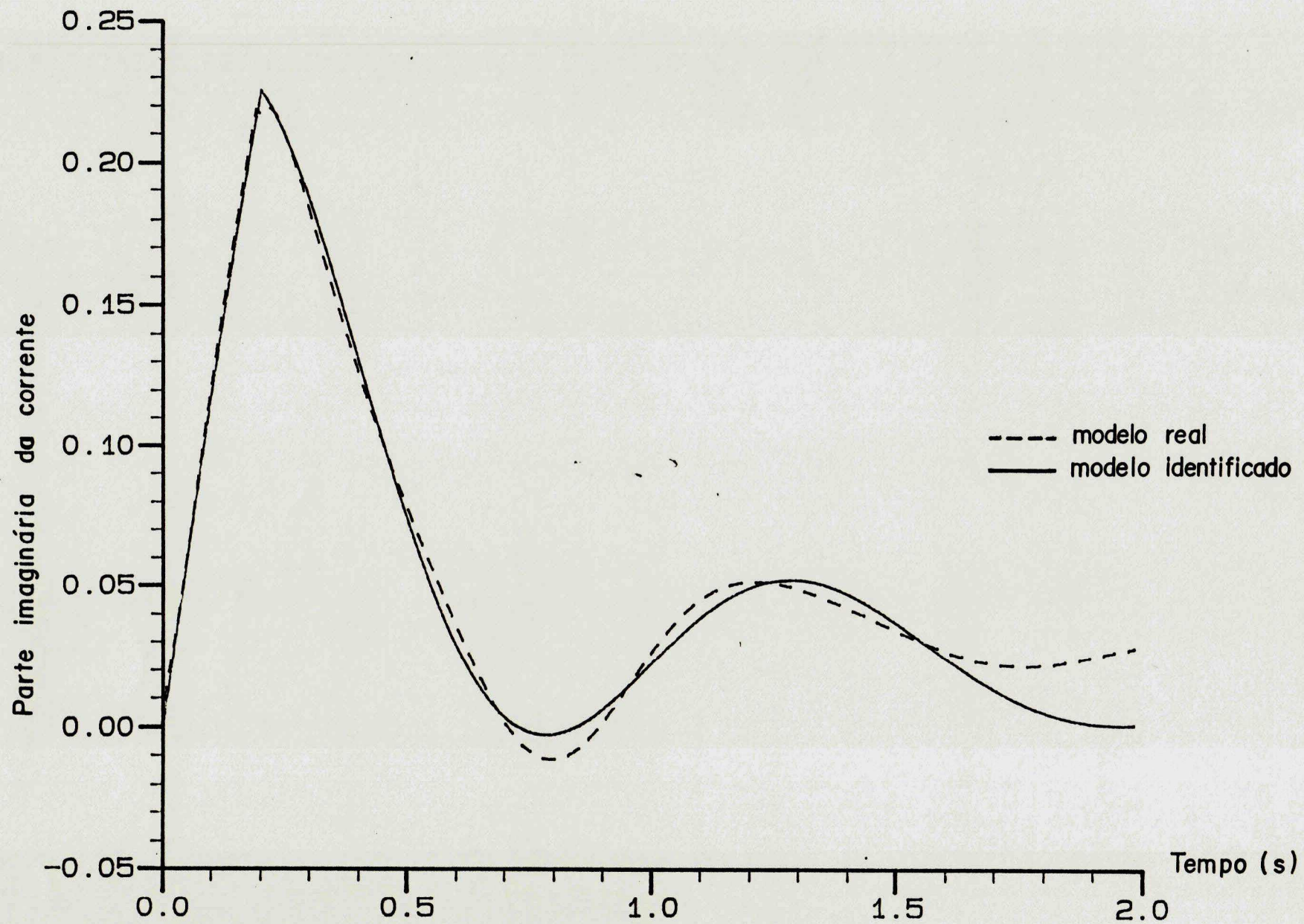


Fig. 4.4 - Função de transferência $\Delta I_Q / \Delta V_Q$

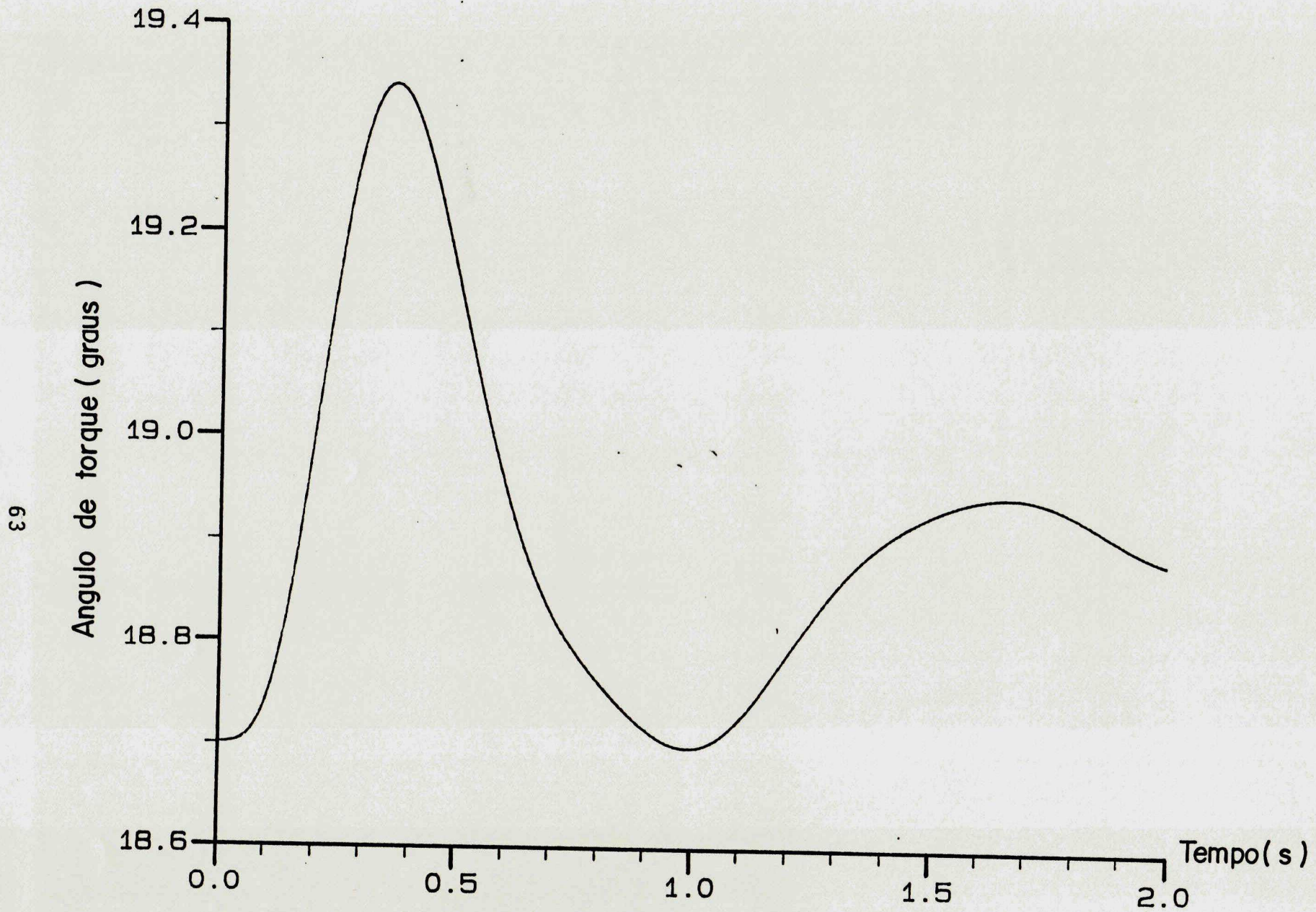


Fig. 4.5 - Variação de 5% na tensão terminal da máquina 13,
modelo de 5ª ordem, sistema não linear...

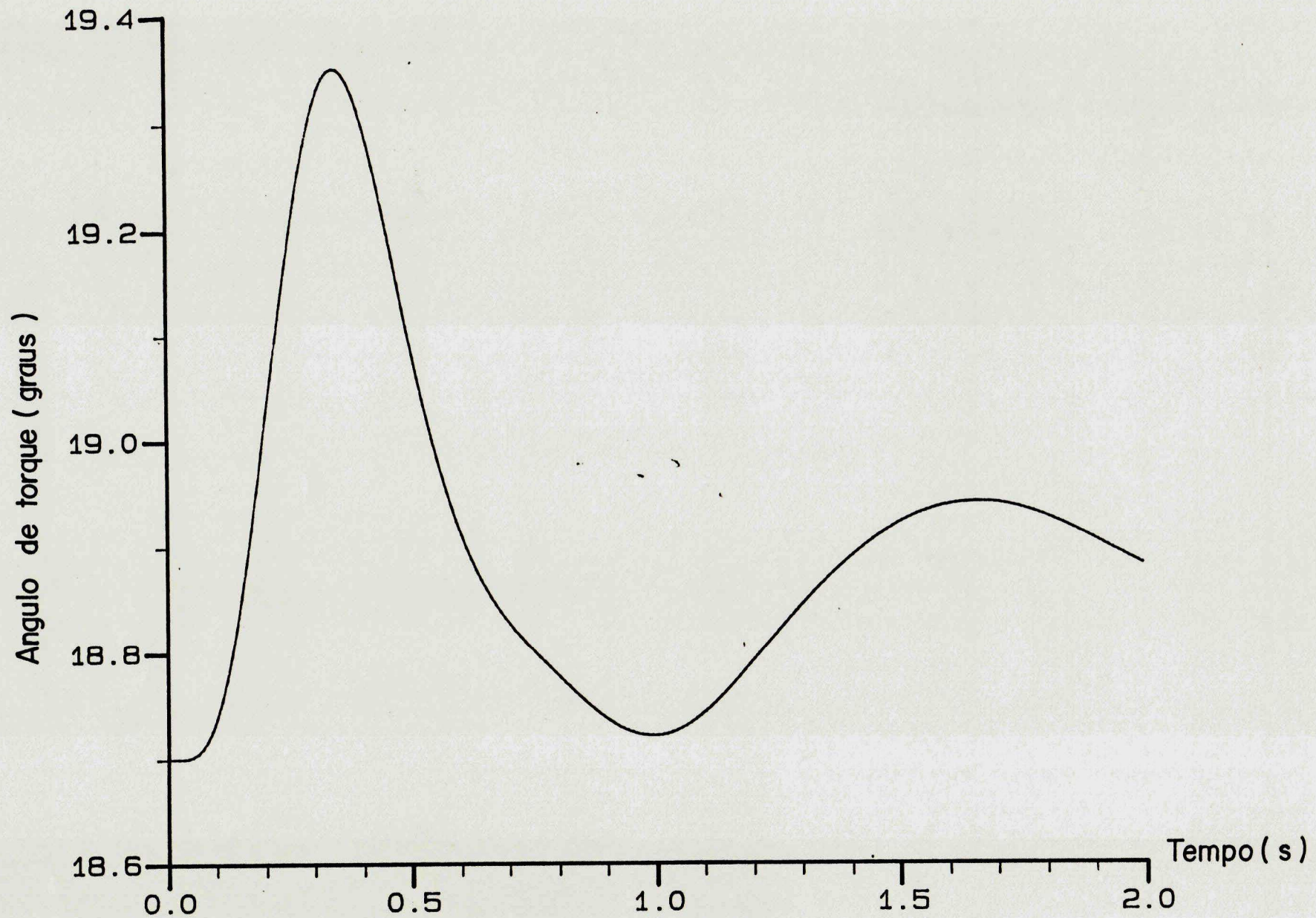


Fig. 4.6 - Variação de 5% na tensão terminal da máquina 13, modelagem não linear de 5ª ordem/equivalente dinâmico do sistema

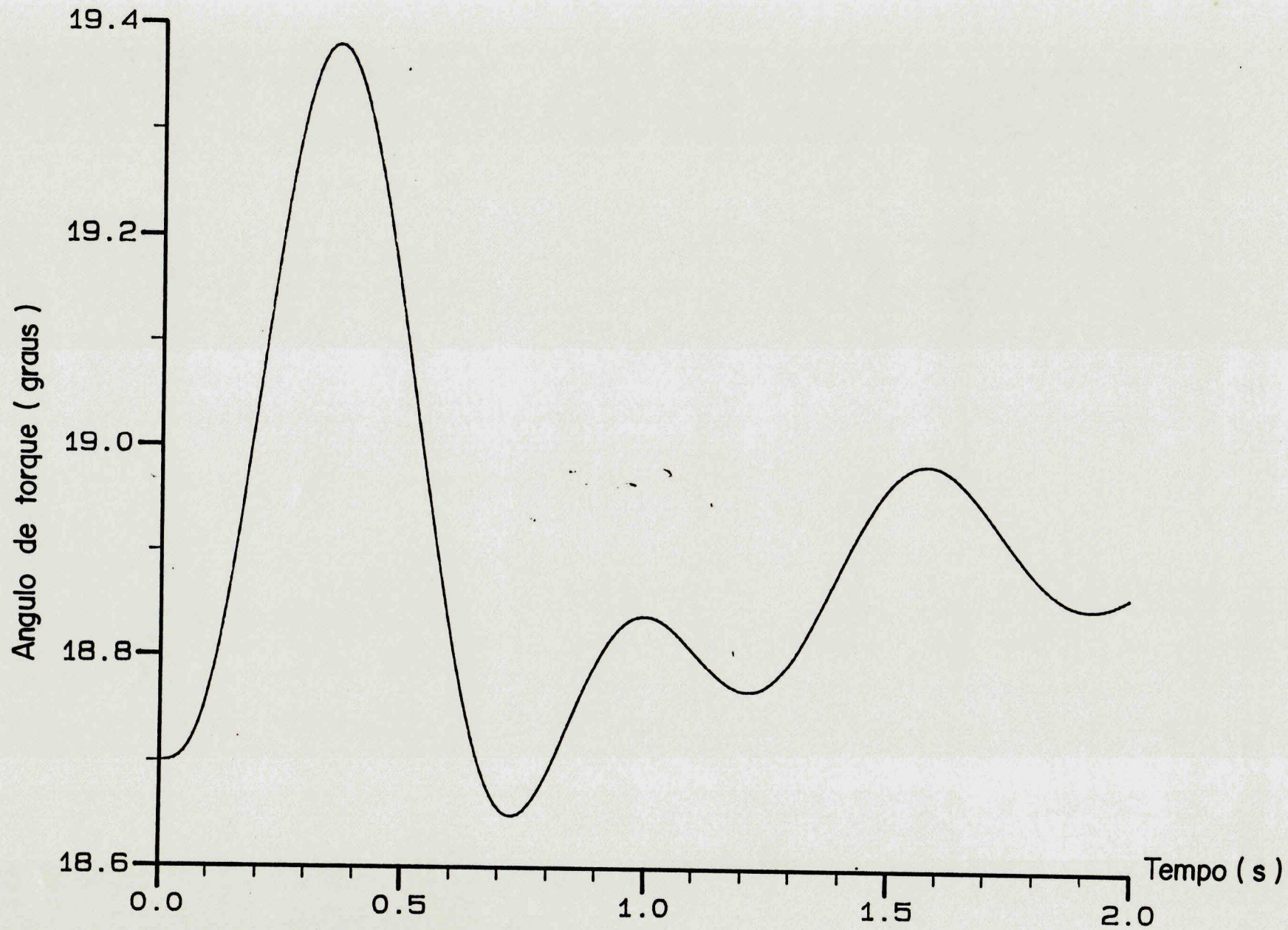


Fig. 4.7 - Variação de 5% na tensão terminal da máquina 13, modelo de 3ª ordem, sistema não linear ...

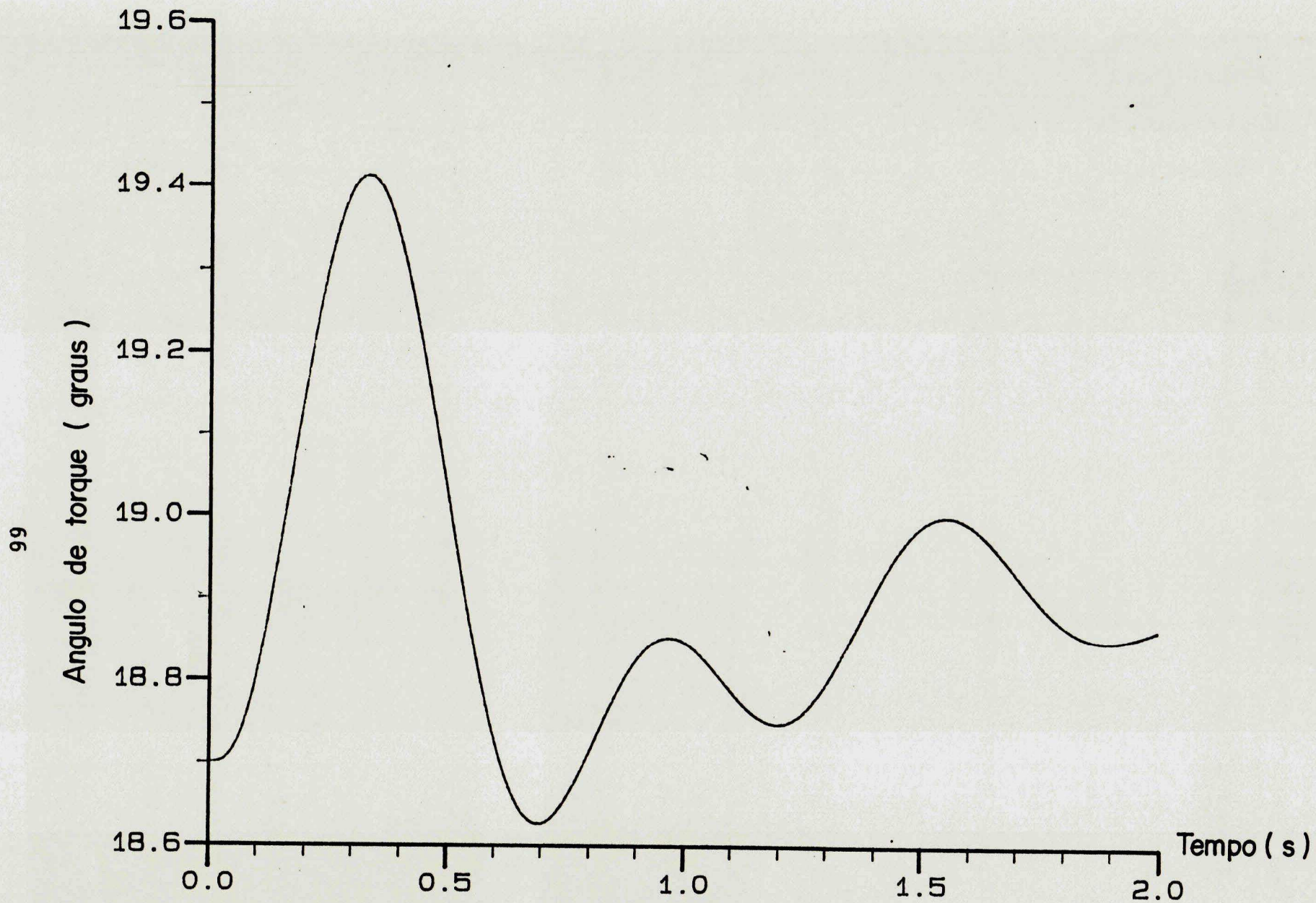


Fig. 4.8 - Variação de 5% na tensão terminal da máquina 13, modelagem não linear de 3ª ordem/equivalente dinâmico do sistema...

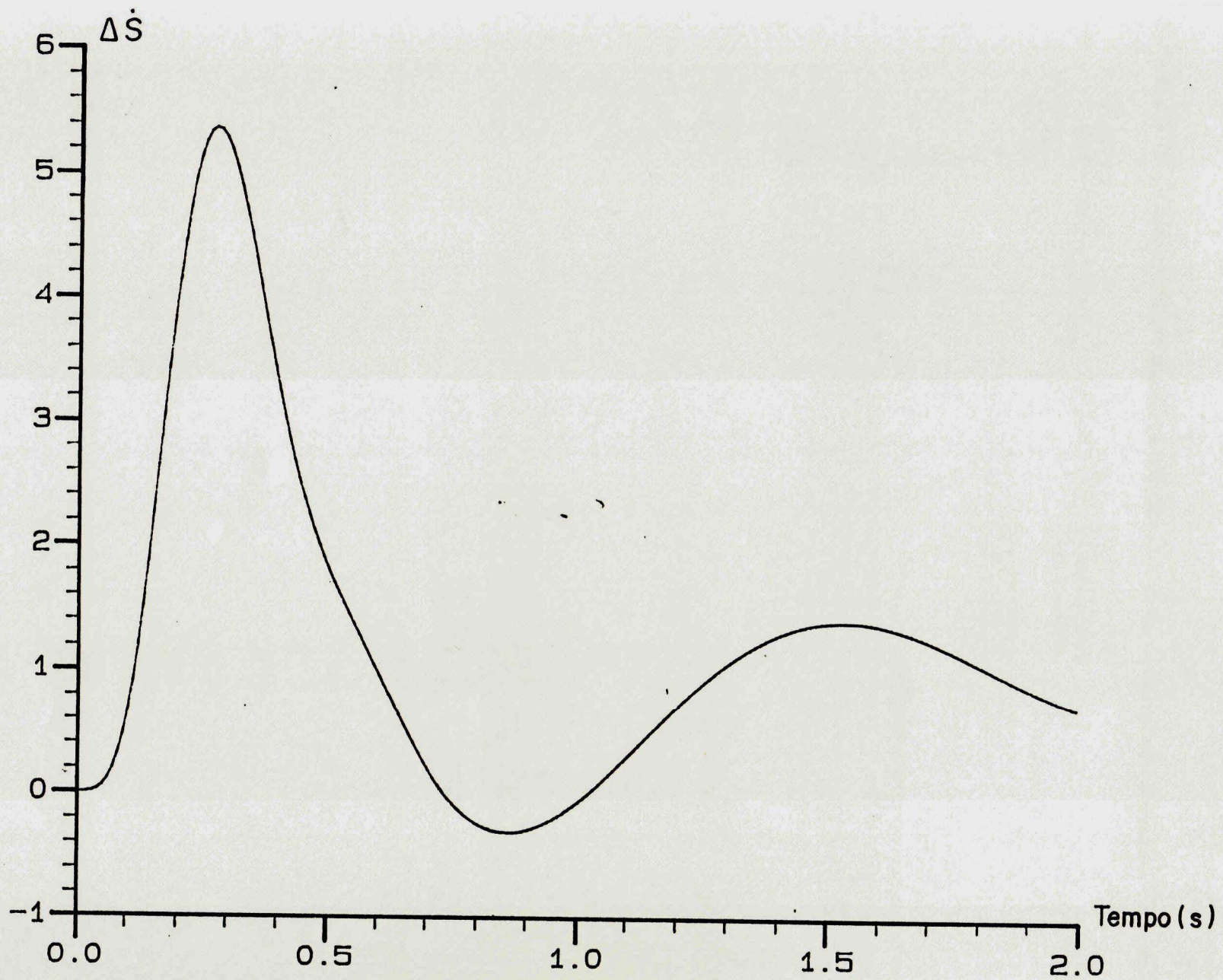


Fig. 4.9 - Variação de 5% na tensão terminal da máquina 13, modelo linearizado de 5ª ordem/equivalente dinâmico do sistema ...

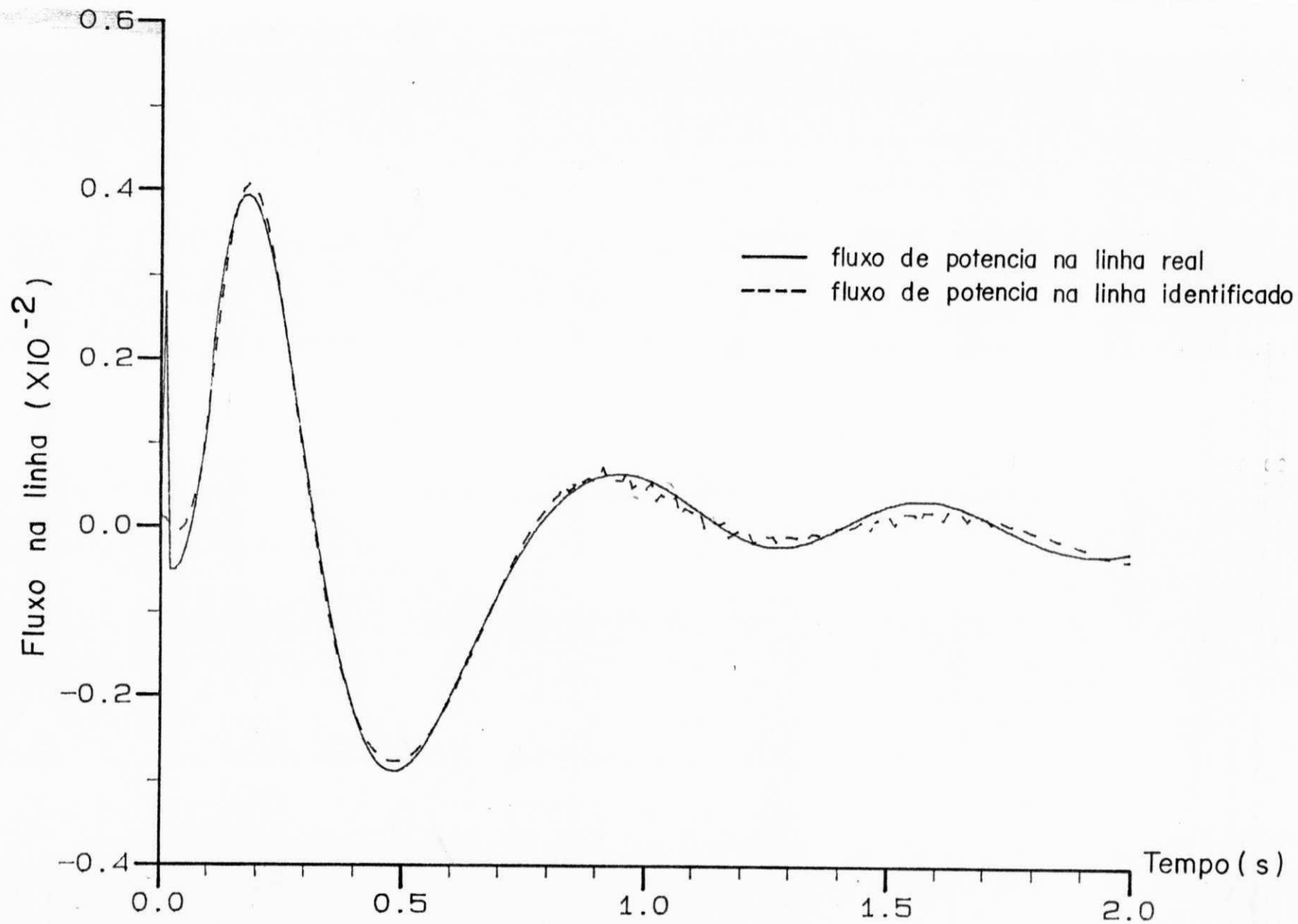


Fig. 4.10 - Identificação do desvio do fluxo de potência ativa na linha 19-20, do sistema de ordem 18 ...

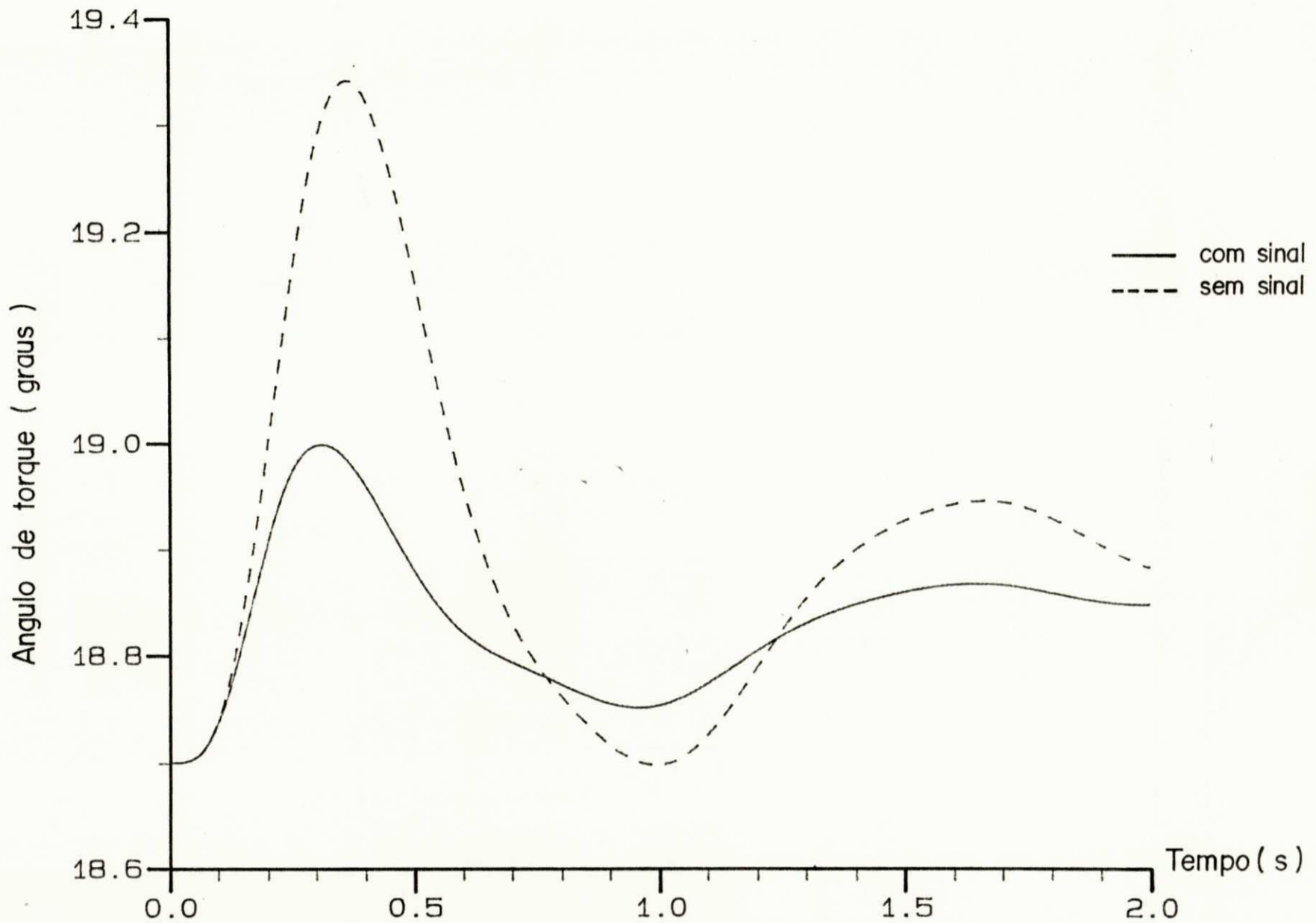


Fig. 4.11 - Variação de 5% na tensão terminal da barra 13, modelo de 5ª ordem do compensador, controlador derivado de V_t , sistema não linear ...

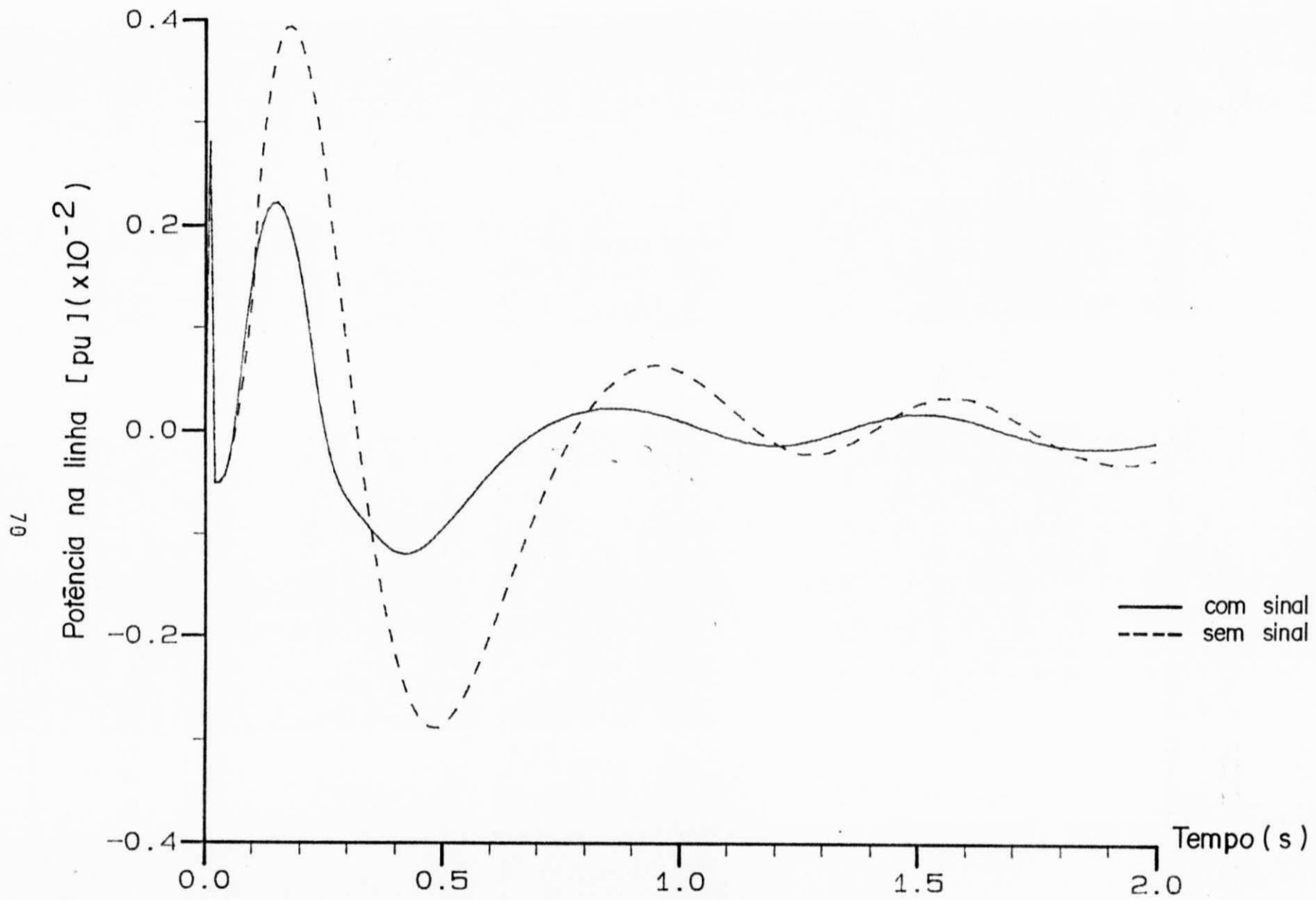


Fig. 4.12 - Variação de 5% na tensão terminal da barra 13, modelo de 5ª ordem do compensador, controlador derivado de V_t , sistema não linear ...

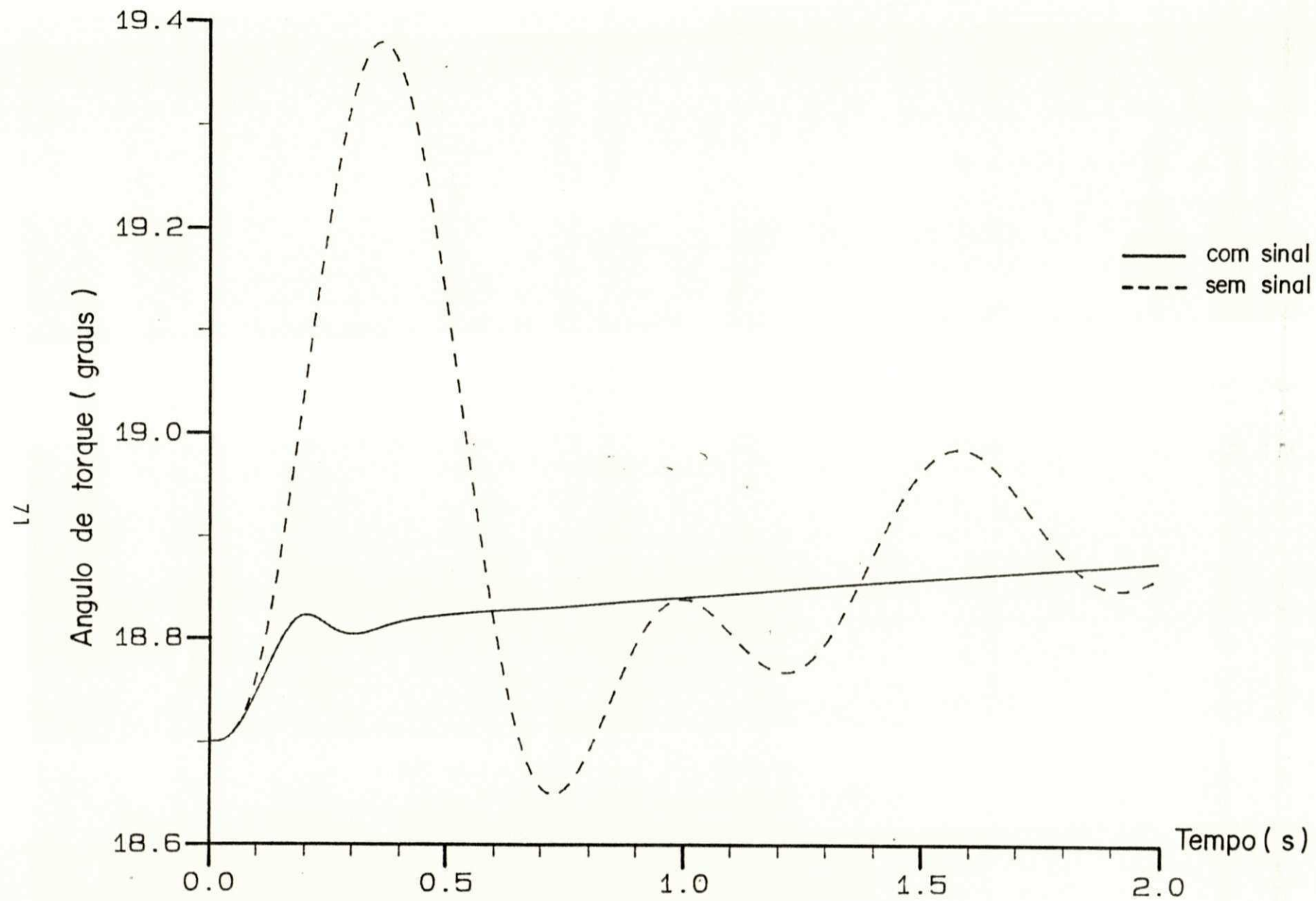


Fig. 4.13 - Variação de 5% na tensão terminal da barra 13, modelo de 3ª ordem do compensador, controlador derivado de P_l , sistema não linear...

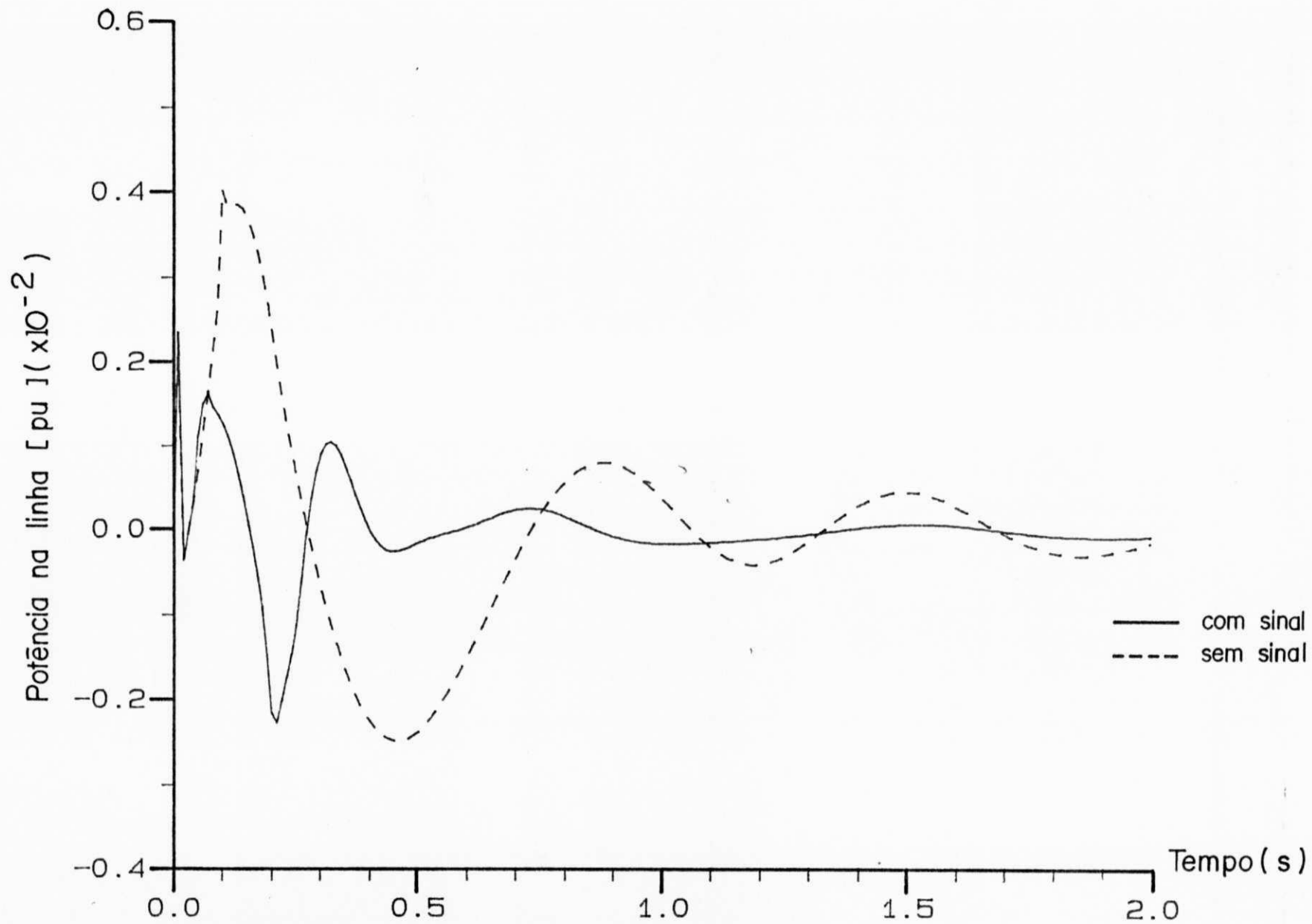


Fig. 4.14 -Variação de 5% na tensão terminal da barra 13 modelo de 3ª ordem do compensador, controlador derivado de P_l , sistema não linear...

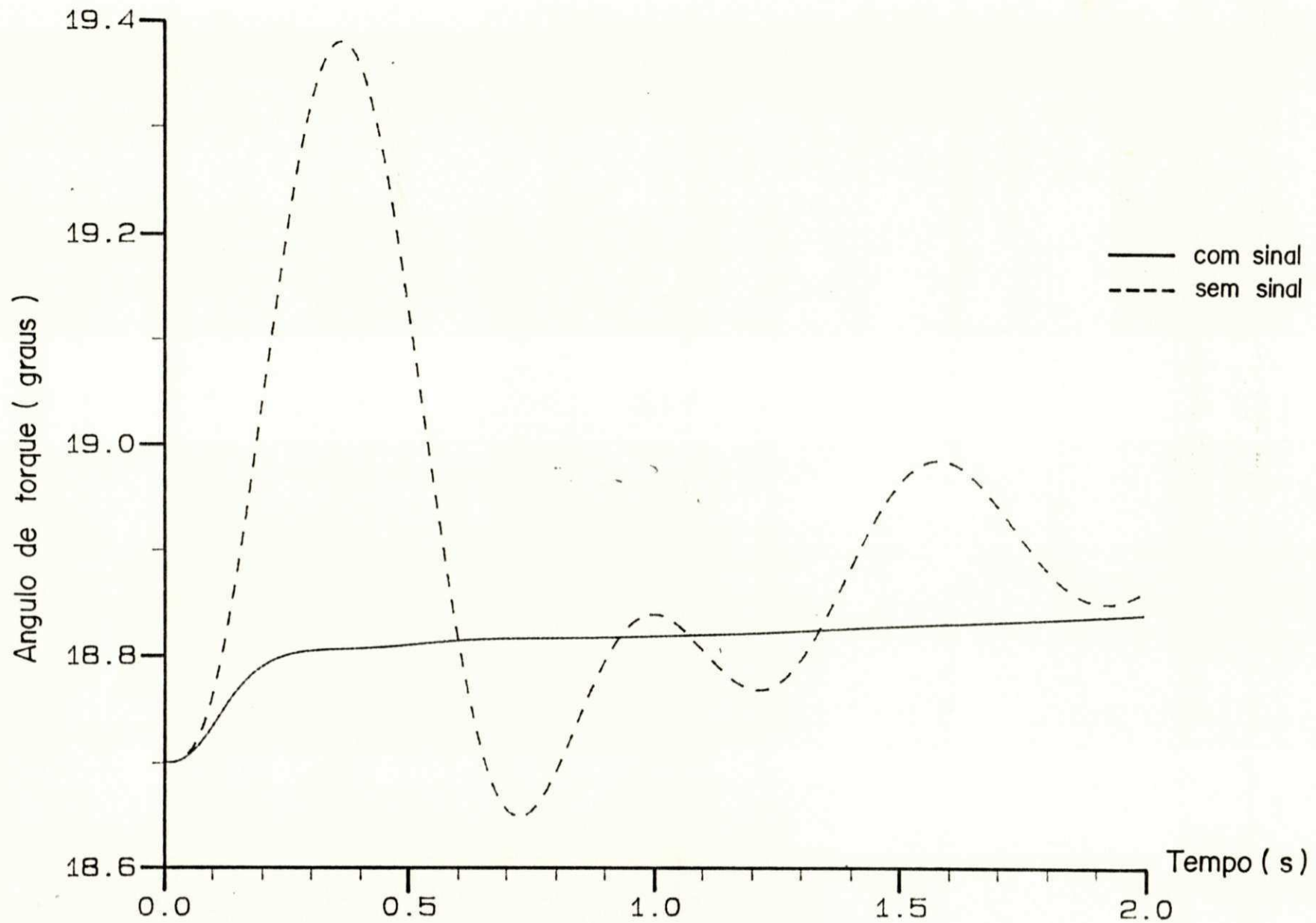


Fig. 4.15 - Variação de 5% na tensão terminal da barra 13, modelo de 3ª ordem do compensador, controlador derivado de $\dot{\delta}$, sistema não linear...

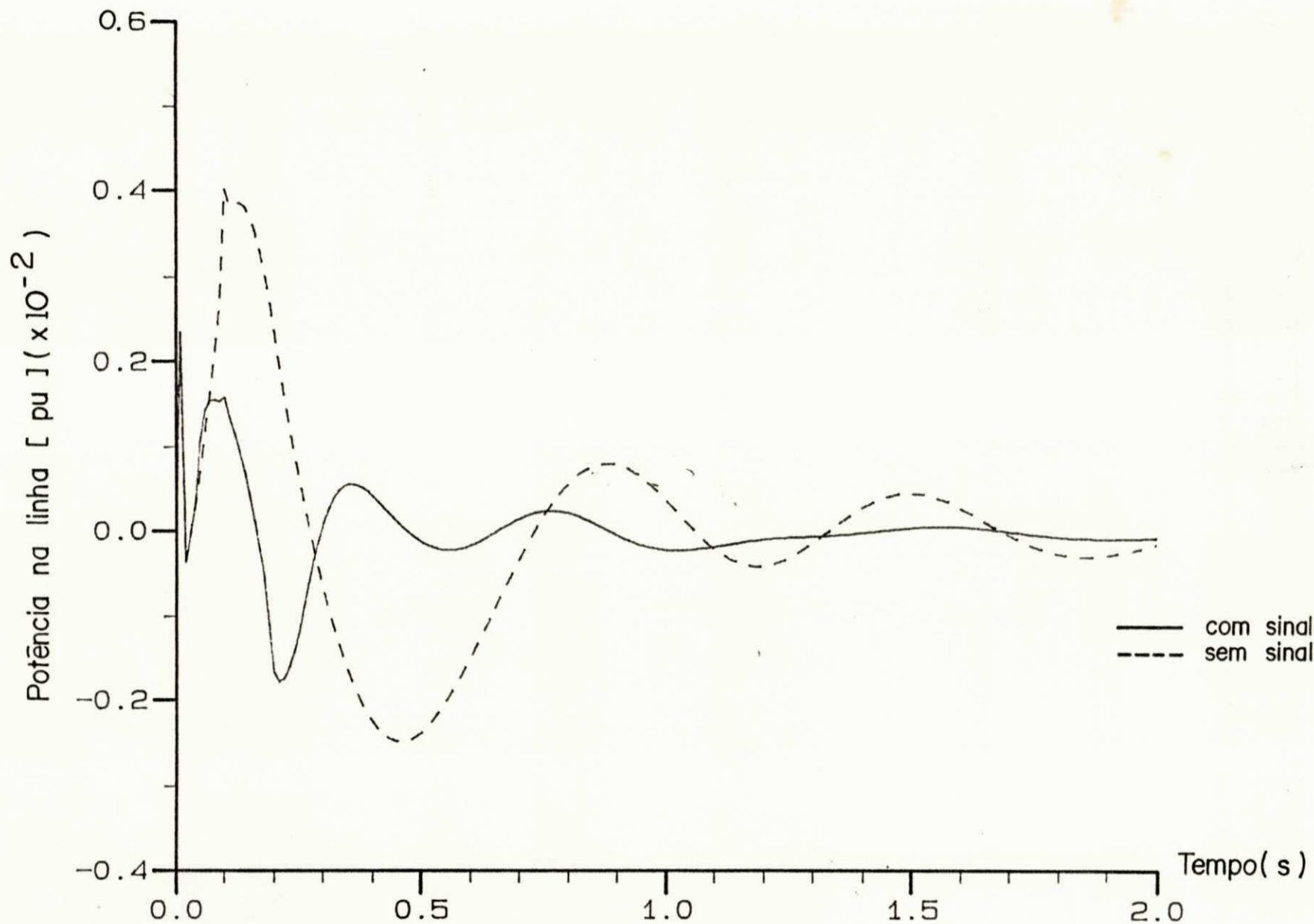


Fig. 4.16 - Variação de 5% na tensão terminal da barra 13, modelo de 3ª ordem do compensador, controlador derivado de δ , sistema não linear...

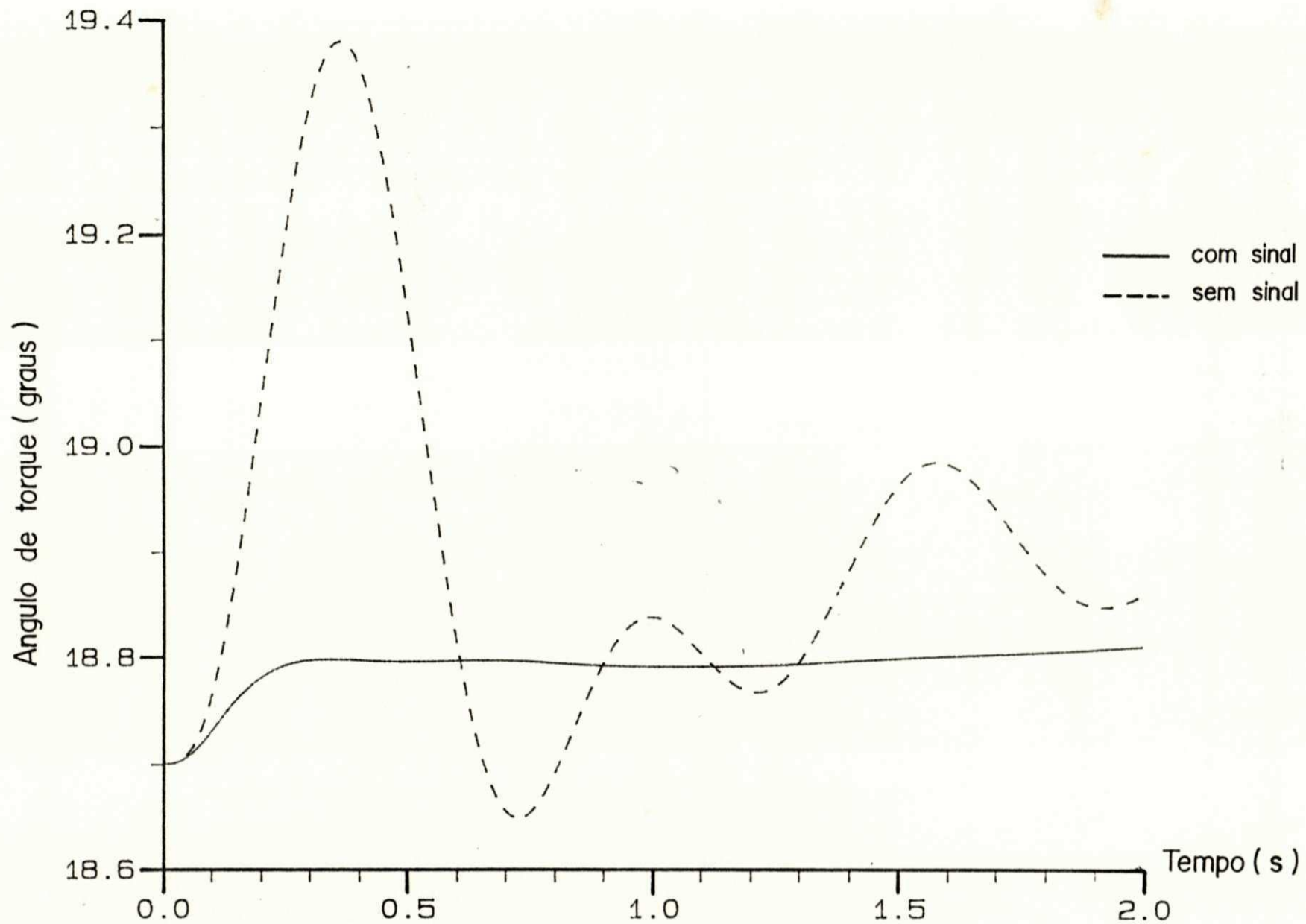


Fig. 4.17 - Variação de 5% na tensão terminal da barra 13, modelo de 3ª ordem do compensador, controlador derivado de V_t , sistema não linear ...

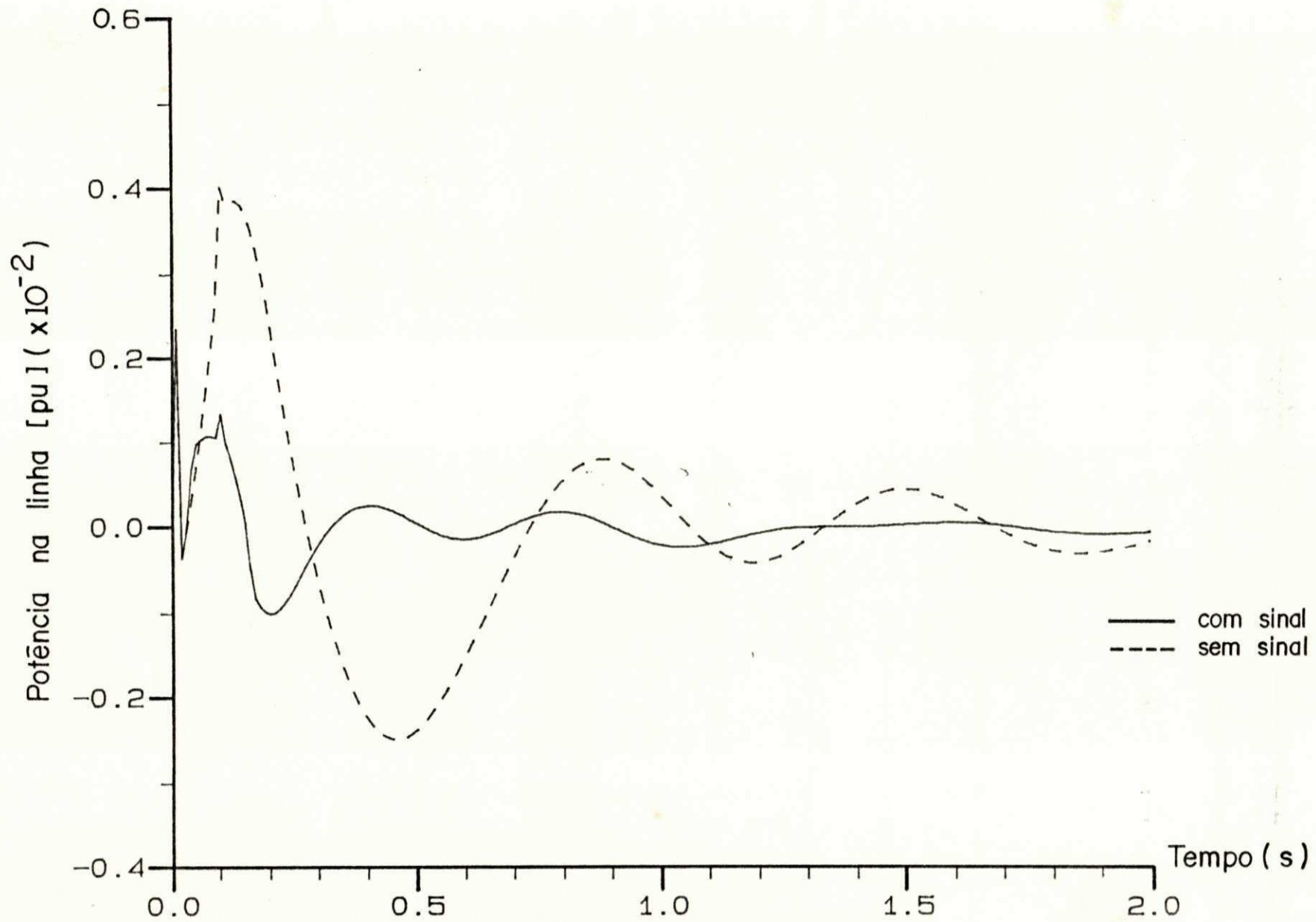


Fig. 4.18 -Variação de 5% na tensão terminal da barra 13, modelo de 3ª ordem do compensador, controlador derivado de V_t , sistema não linear...

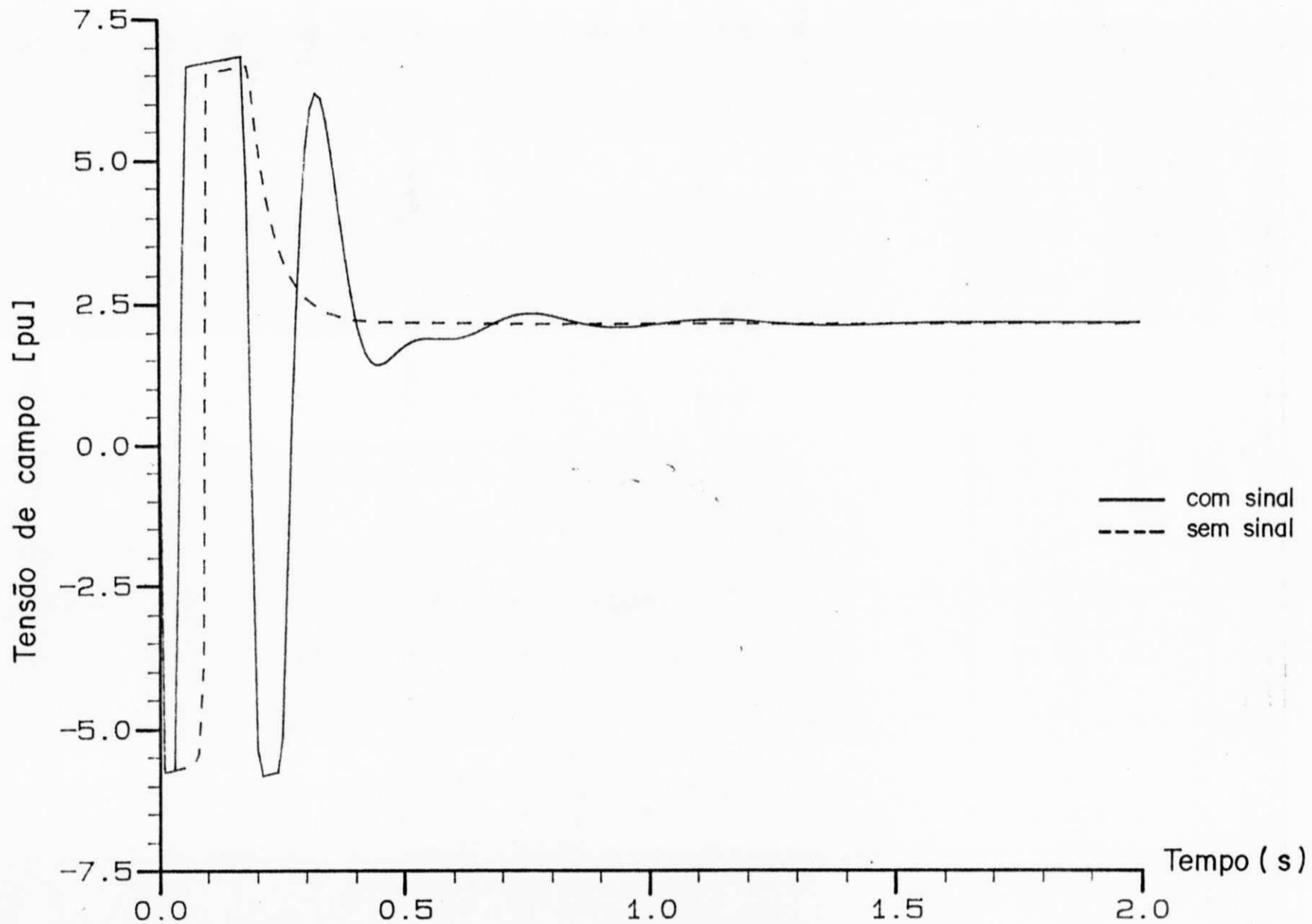


Fig. 4.19 -Variação de 5% na tensão terminal da barra 13, modelo de 3ª ordem do compensador, controlador derivado de P_e , sistema não linear...

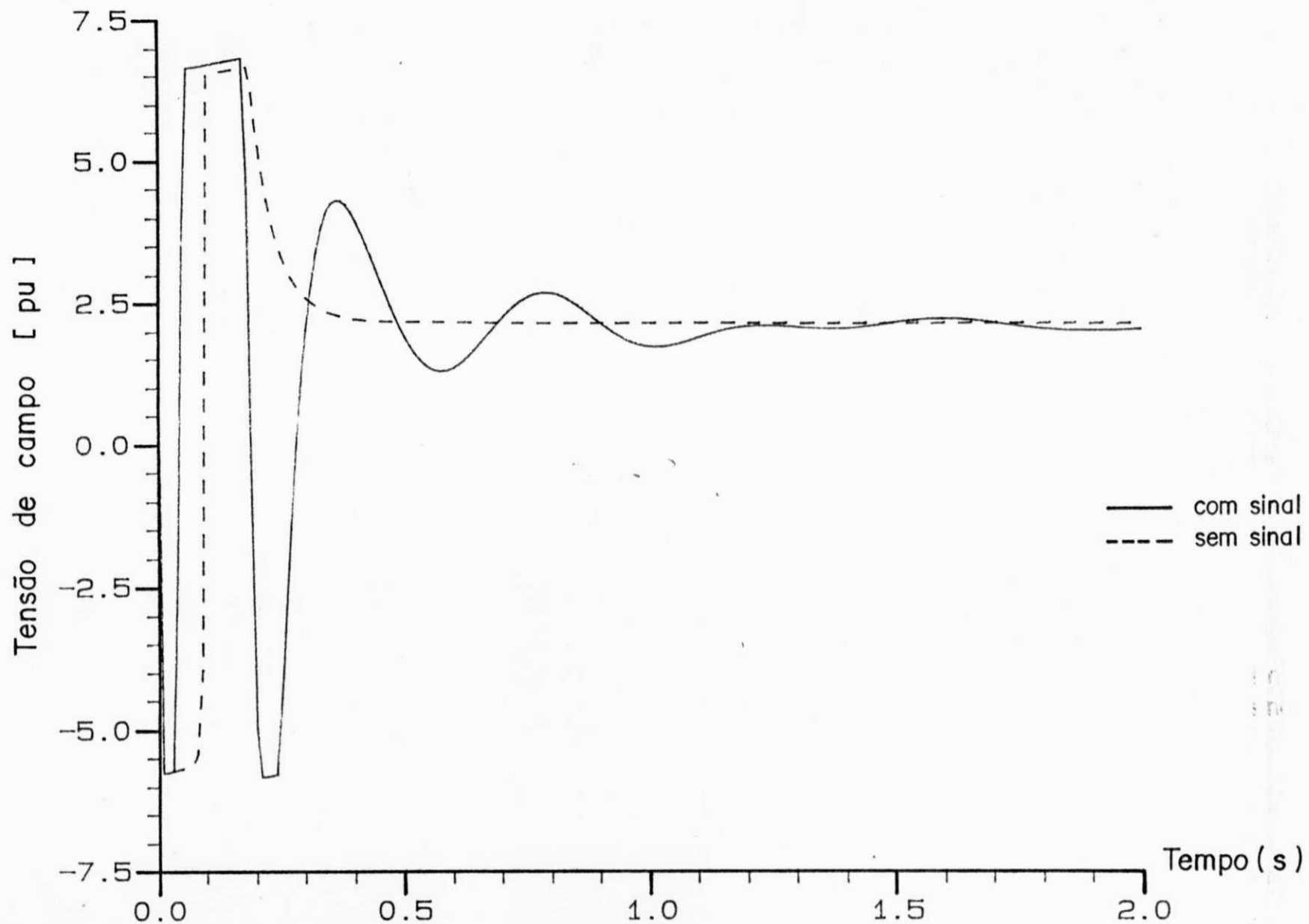


Fig. 4.20 - Variação de 5% na tensão terminal da barra 13, modelo de 3ª ordem do compensador, controlador derivado de $\dot{\delta}$, sistema não linear...

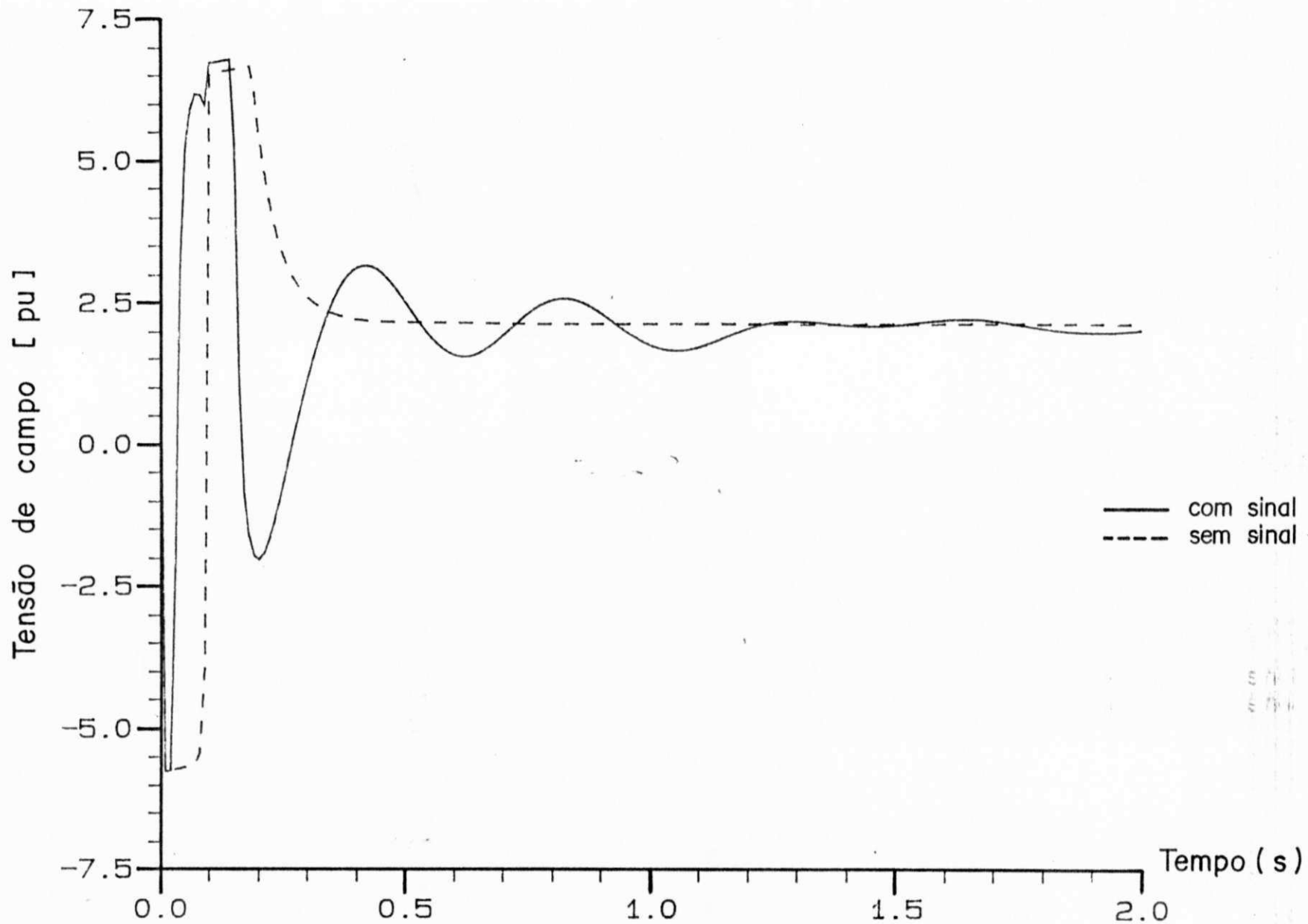


Fig. 4.21 - Variação de 5% na tensão terminal da barra 13, modelo de 3ª ordem do compensador, controlador derivado de V_t , sistema não linear....

CAPÍTULO - 5

CONCLUSÃO E COMENTÁRIOS

Esta pesquisa apresentou um projeto de sinais estabilizadores para compensadores síncronos, com o objetivo de amortecer oscilações eletromecânicas do sistema de transmissão empregando técnicas de controle moderno na determinação dos ganhos adicionais.

Inicialmente, deu-se ao sistema elétrico de potência e ao compensador síncrono um tratamento adequado, onde obteve-se modelagens linearizadas em torno do ponto de operação, na forma de variáveis de estado contínuas.

As vantagens de se utilizar a técnica escolhida, para o projeto, foram: primeiro, a facilidade de selecionar funções de custo e reduzir o esforço do sistema de controle através de manipulação com as matrizes Q e R e; segundo, a facilidade de implementação das rotinas computacionais.

A identificação do fluxo de potência ativa na linha, utilizando o método dos mínimos quadráticos recursivo generalizado, já que esta variável não faz parte das modelagens lineares do sistema de potência e compensador, constitui uma grande vantagem para o projeto, pois esta é incorporada à modelagem linearizada do sistema 230/500KV para fins de projeto, sem que se precise deduzir outra modelagem para o sistema C.A. e/ou compensador. Para isto, é apenas necessário modificar o vetor de saída do modelo interligado. Desta forma, demonstra-se a flexibilidade da técnica de realimentação ótima de estados e do modelo equivalente dinâmico.

A fim de se obter sinais estabilizadores possíveis, de implementação em sistemas reais, empregando-se a técnica utilizada neste trabalho, fêz-se o cancelamento dos ganhos correspondentes às variáveis com significado meramente matemáticos, nas leis do controle ótimo. Estes sinais, chamados sinais sub-ótimos, mostraram-se eficientes no amortecimento das oscilações eletromecânicas da linha, nas proximidades do compensador.

As simulações no modelo linear e não linear mostram o sucesso no emprego da técnica de controle ótimo.

Pode-se afirmar que o projeto de sinais estabilizadores visando o amortecimento das oscilações

eletromecânicas do sistema funcionou efetivamente, para pequenas perturbações na tensão terminal do compensador, pois o compensador síncrono controla a tensão terminal. Como a carga do sistema é substancialmente de impedância constante, através do monitoramento da tensão na barra do C.S., consegue-se controlar o fluxo de ativos na linha e conseqüentemente um amortecimento das oscilações eletromecânicas da linha.

Sugere-se um controle adaptativo de forma a evitar que o sinal atue para perturbações que não sejam semelhantes às analisadas neste projeto e volte a atuar logo após que o distúrbio venha a cessar, pois o sinal estabilizador contribui para amortecer flutuações após pequenas perturbações.

Para finalizar, conclui-se que a técnica de estabilização mostrou-se eficiente no cumprimento de seu propósito, no projeto.

APÊNDICE - I

Este apêndice trata do método P.Q.R. para linearização de equação e sua aplicação na modelagem do compensador síncrono.

I.1 - Modelo Linearizado Máquina/Regulador de Tensão

A linearização das equações do compensador síncrono/regulador de tensão foi baseada no modelo linearizado de máquinas síncronas de (MDTA, 1981). A linearização das equações da máquina foi realizada em torno do ponto de operação inicial do sistema.

Então, o seguinte conjunto de equações é formado:

$$\dot{X} = A X + B u + C I \quad (1.1)$$

$$Y = D X + E u + F I \quad (1.2)$$

$$V = G X + H I \quad (1.3)$$

onde:

$$\begin{aligned}
 X &= (\delta, \dot{\delta}, U_{fd}, U_{Kd}, U_{Kq}, E_{fd})^T, \text{ para seis estados} \\
 X &= (\delta, \dot{\delta}, U_{fd})^T, \text{ para três estados} \\
 Y &= (V_t, \dot{\delta}, P_t)^T, \text{ vetor de saída} \\
 u &= V_s, \text{ vetor do sinal de entrada} \\
 V &= (V_d, V_q), \text{ vetor das tensões} \\
 I &= (i_d, i_q), \text{ vetor das correntes}
 \end{aligned}$$

Para obter-se as matrizes das equações (I.1) a (I.3), as equações linearizadas (3.17) a (3.31) são escritas em forma matricial, como segue::

$$P \begin{bmatrix} \dot{X} \\ Z \end{bmatrix} = Q X + R u + S I \quad (I.4)$$

$$Y = W_1 X + W_2 Z + W_3 I \quad (I.5)$$

onde:

$$\begin{aligned}
 Z &= (V_d, V_q, U_{fd}, U_{Kd}, U_{Kq}, i_{fd}, i_{Kd}, i_{Kq})^T, \\
 Z &= (V_d, V_q, U_{fd}, U_{Kd}, i_{fd})^T
 \end{aligned}$$

são os vetores correspondentes às equações algébricas para os modelos do compensador síncrono/regulador de tensão de 5^a e 3^a ordens, respectivamente.

As matrizes P , Q , R , S , W_1 , W_2 , e W_3 para o modelo do compensador síncrono/regulador de tensão de 5ª ordem são apresentados a seguir:

$$P = \begin{bmatrix} P_1 & P_2 \\ P_3 & P_4 \end{bmatrix}$$

onde:

$$P_1 = \begin{bmatrix} \delta & \delta & U_{fd} & U_{Kd} & U_{Kq} & E_{fd} \\ 1 & & & & & \\ & 2H/W_0 & & & & \\ & & 1/W_0 & & & \\ & & & 1/W_0 & & \\ & & & & 1/W_0 & \\ & & & & & T_A \end{bmatrix}$$

$$P_2 = \begin{bmatrix} V_d & V_q & U_d & U_q & i_{fd} & i_{Kd} & i_{Kq} \\ & & i_{q0} & -i_{d0} & & & \\ & & & & r_f & & \\ & & & & & r_{Kd} & \\ & & & & & & r_{Kq} \\ \frac{KA V_{d0}}{V_{t0}} & \frac{KA V_{q0}}{V_{t0}} & & & & & \end{bmatrix}$$

$$P_3 = \begin{bmatrix} \delta & \dot{\delta} & U_{fd} & U_{Kd} & U_{Kq} & E_{fd} \end{bmatrix}$$

Todos os elementos da matriz P_3 são nulos.

$$P_4 = \begin{bmatrix} V_d & V_q & U_d & U_q & i_{fd} & i_{KD} & i_{KD} \\ 1 & & & 1 & & & \\ & 1 & -1 & & & & \\ & & 1 & & -X_{ad} & -X_{ad} & \\ & & & 1 & X_{fd} & X_{ad} & -X_{aq} \\ & & & & X_{ad} & X_{Kd} & X_{Kq} \end{bmatrix}$$

$$W_1 = \begin{bmatrix} \delta & \dot{\delta} & U_{fd} & U_{Kd} & U_{Kq} & E_{fd} \\ V_t & \delta & & & & \\ P_t & & & & & \end{bmatrix}$$

$$W_2 = \begin{bmatrix} V_d & V_q & U_d & U_q & i_{fd} & i_{Kd} & i_{Kq} \\ V_t & V_{d0}/V_{t0} & V_{q0}/V_{t0} & & & & \\ P_t & i_{d0} & i_{q0} & & & & \end{bmatrix}$$

$$W_3 = \begin{bmatrix} i_d & i_q \\ V_t & \delta \\ P_t & V_{d0} & V_{q0} \end{bmatrix}$$

* Os elementos omissos nas matrizes acima são nulos.

Na modelagem de 3ª ordem do compensador síncrono, o ganho do regulador está incluído na equação do fluxo de campo, e despreza-se os fluxos nos enrolamento amortecedores (MOTA, 1982).

A equação (1.4) é escrita como:

$$\begin{bmatrix} X \\ \hline Z \end{bmatrix} = P^{-1} Q X + P^{-1} R u + P^{-1} S I \quad (I.6)$$

ou, particionando-se:

$$\begin{aligned} \dot{X} &= A X + B u + C I \\ Z &= M_1 X + M_2 u + M_3 I \end{aligned} \quad (I.7)$$

onde

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

Das equações (I.4) e (I.5), 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 da equação (I.7), através de particionamento.

I.2 - Representação Máquina/Equivalente Dinâmico

O modelo linearizado do compensador síncrono, representado pelas equações (I.1) a (I.3), o cálculo de V e I estão na referência do eixo do compensador. Para interconectar a máquina com o modelo equivalente dinâmico do sistema, V e I precisam estar no eixo de referência do sistema.

A transferência de sistema de eixo da máquina para o sistema é dada pela equação, para V .

$$\begin{bmatrix} V_D \\ V_Q \end{bmatrix} = T_0 \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} + T_{V0} L_X \quad (I.8)$$

onde:

$$T_0 = \begin{bmatrix} \text{Sen } \delta_0 & \text{Cos } \delta_0 \\ -\text{Cos } \delta_0 & \text{Sen } \delta_0 \end{bmatrix}, \quad T_{V0} = \begin{bmatrix} V_{d0} \text{ Cos } \delta_0 - V_{q0} \text{ Sen } \delta_0 \\ V_{d0} \text{ Sen } \delta_0 + V_{q0} \text{ Cos } \delta_0 \end{bmatrix}$$

Substituindo a equação (I.3) em (I.8), resulta:

$$\begin{bmatrix} v_D \\ v_Q \end{bmatrix} = (T_0 G + T_{V0} L) X + T_0 H \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (I.9)$$

Transformação similar inversa é efetuada para corrente I.

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = T_0^{-1} \begin{bmatrix} i_D \\ i_Q \end{bmatrix} + T'_{i0} L X \quad (I.10)$$

onde T'_{i0} é dada por:

$$\begin{bmatrix} (i_{D0} \cos \delta_0 + i_{Q0} \sin \delta_0) \\ (-i_{D0} \sin \delta_0 + i_{Q0} \cos \delta_0) \end{bmatrix}$$

Substituindo (I.10) em (I.9), tem-se

$$\begin{bmatrix} v_D \\ v_Q \end{bmatrix} = G_m X + H_m \begin{bmatrix} i_D \\ i_Q \end{bmatrix}$$

onde,

$$G_m = (T_0 G + T_{V0} L + T_0 H T'_{i0} L)$$

$$H_m = T_0 H T_0^{-1}$$

Substituindo (I.10) em (I.2), têm-se:

$$Y = D_m X + E_m u + F_m \begin{bmatrix} i_D \\ i_Q \end{bmatrix}$$

onde,

$$D_m = D + F T'_{i0} L$$

$$E_m = E$$

$$F_m = F T_0^{-1}$$

Substituindo (I.10) em (I.1), tem-se

$$X = A_m X + B_m u + C_m \begin{bmatrix} i_D \\ i_Q \end{bmatrix}$$

onde,

$$A_m = (A + CT'_{i0}L) ,$$

$$B_m = B ,$$

$$C_m = CT_0^{-1}$$

Então, o modelo linearizado da máquina no eixo de referência do sistema é:

$$\dot{X} = A_m X + B_m u + C_m I \quad (I.11)$$

$$Y = D_m X + E_m u + F_m I \quad (I.12)$$

$$V = G_m X + H_m I$$

O modelo equivalente dinâmico (Apêndice II), é da forma:

$$\dot{X}_e = A_e X_e + B_e V$$

$$I = C_e X_e + D_e V$$

Combinando as equações dinâmicas da máquina e sistema equivalente,

$$\begin{bmatrix} X_m \\ C_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_m & \emptyset \\ \emptyset & A_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_m \\ X_e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_m & \emptyset \\ \emptyset & C_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ V \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_m \\ \emptyset \end{bmatrix} u \quad (I.14)$$

Também, as equações algébricas,

$$\begin{bmatrix} I \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \emptyset & C_e \\ G_m & \emptyset \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_m \\ X_e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \emptyset & D_e \\ H_m & \emptyset \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ V \end{bmatrix} \quad (I.15)$$

Substituindo os valores de V e I da equação (I.15) em (I.14) e (I.12),

$$\begin{bmatrix} X_m \\ X_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_m + C_m D_e R G_m & C_m C_e + C_m D_e R H_m C_e \\ B_e R G_m & A_e + B_e R H_m C_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_m \\ X_e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_m \\ \emptyset \end{bmatrix} u$$

$$Y = [D_m + F_m D_e R G_m , F_m C_e + F_m D_e R H_m C_e] \begin{matrix} \text{---} & \text{---} \\ | X_m | \\ | \cdot | \\ | X_e | \\ \text{---} & \text{---} \end{matrix}$$

onde,

$$R = (I - H_m D_e)^{-1}$$

Então, o modelo linear compensador síncrono/equivalente dinâmico na forma de variáveis de estado é estabelecido:

$$X = A X + B u \quad (I.16)$$

$$Y = C X \quad (I.17)$$

onde,

$$X = (\delta, \dot{\delta}, U_{fd}, U_{Kd}, U_{Kq}, E_{fd}, X_1, X_2, \dots, X_{12})$$

$$Y = (U_t, \dot{\delta}, P_t)$$

$$u = V_s$$

I.3 - Resultados Práticos

Matrizes A, B, C, D, E, F, G e H da modelagem linear do compensador síncrono de 5ª ordem/regulador de tensão, da barra 13 da figura 2.3.1, na referência da máquina.

MATRIZ - A

0.000	1.00	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.683	0.000
0.000	0.000	-1.19	1.19	0.000	0.162
0.000	0.000	14.7	-16.7	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	-4.76	0.000
0.000	0.000	0.000	20000.	0.000	-50.0

MATRIZ - B

0.000
0.000
0.000
0.000
0.000
20000.000

MATRIZ - C

0.000	0.000
0.000	-43.7
0.000	0.000
-1.25	0.000
0.000	-2.50
1500.	0.000

MATRIZ - D

0.000	0.000	0.000	1.00	0.000	0.000
0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.016	0.000

MATRIZ - E

0.000
0.000
0.000

MATRIZ - F

-0.075	0.000
0.000	0.000
0.000	1.021

MATRIZ - G

0.000	0.000	0.000	0.000	-1.000	0.000
0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000

MATRIZ - H

0.000	0.075
-0.075	0.000

MATRIZ - AM

0.000	1.00	0.000	0.000	0.000	0.000
0.697	0.000	0.000	0.000	0.683	0.000
0.000	0.000	-1.19	1.19	0.000	0.162
0.000	0.000	14.7	-16.7	0.000	0.000
0.040	0.000	0.000	0.000	-4.76	0.000
0.000	0.000	0.000	20000.	0.000	-50.0

MATRIZ - BM

0.000
0.000
0.000
0.000
0.000
20000.000

MATRIZ - CM

0.000	0.000
-41.4	-14.0
0.000	0.000
-0.401	1.18
-2.37	-0.802
481.0	-1420.0

MATRIZ - DM

0.000	0.000	0.000	1.00	0.000	0.000
0.000	1.00	0.000	0.000	0.000	0.000
-0.016	0.000	0.000	0.000	-0.016	0.162

MATRIZ - EM

0.000
0.000
0.000

MATRIZ - FM

-0.024	0.071
0.000	0.000
0.967	0.327

MATRIZ - GM

-0.327	0.000	0.000	0.947	-0.321	0.000
0.967	0.000	0.000	0.321	0.947	0.000

MATRIZ - HM

0.000	0.075
-0.075	0.000

MATRIZ A DO SISTEMA MÁQUINA/EQUIVALENTE DINÂMICO

MATRIZ - A

0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
-274.0	0.000	0.000	-13.5	-268	0.000
-22.0	0.000	0.000	-8.52	0.000	0.000
-22.0	0.000	0.000	-8.52	0.000	0.000
0.000	0.000	-1.19	1.19	0.000	0.162
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.367	0.000	14.7	-24.4	0.359	0.000
0.241	0.000	0.000	0.628	0.000	0.000
0.241	0.000	0.000	0.628	0.000	0.000
-15.7	0.000	0.000	-0.770	-20.1	0.000
-1.26	0.000	0.000	-0.487	0.000	0.000
-1.26	0.000	0.000	-0.487	0.000	0.000
-441.0	0.000	0.000	-10800.	-431.0	-50.0
289.0	0.000	0.000	-754.0	0.000	0.000
289.0	0.000	0.000	-754.0	0.000	0.000
-2.36	0.000	0.000	7.82	-2.31	0.000
-151.0	203.0	-51.6	0.611	0.000	0.000
0.037	0.026	-0.013	0.611	0.000	0.000
-2.42	0.000	0.000	8.05	-2.37	0.000
-49.3	-1.54	50.8	0.629	0.000	0.000
0.038	0.027	-0.013	0.629	0.000	0.000
-2.48	0.000	0.000	8.24	-2.43	0.000
48.5	-197.0	148.0	0.644	0.000	0.000
0.038	0.025	-0.012	0.644	0.000	0.000
0.275	0.000	0.000	0.912	-0.269	0.000
0.003	0.000	0.000	-151.0	203.0	-51.5
0.003	0.000	0.000	0.071	0.000	0.000
0.345	0.000	0.000	1.15	-0.338	0.000
0.004	0.000	0.000	-49.2	-1.47	50.8
0.004	0.000	0.000	0.089	0.000	0.000
0.412	0.000	0.000	1.37	-0.403	0.000
0.004	0.000	0.000	48.7	-197.0	148.0
0.004	0.000	0.000	0.107	0.000	0.000
-4.53	0.000	0.000	-1.29	-4.44	0.000
0.521	1.77	-0.902	0.015	0.000	0.000
-151.0	202.0	-51.2	0.015	0.000	0.000
-4.84	0.000	0.000	-1.38	-4.74	0.000
0.492	1.75	-0.896	0.016	0.000	0.000
-49.1	-1.14	50.6	0.016	0.000	0.000
-5.12	0.000	0.000	-1.46	-5.02	0.000
0.464	1.74	-0.890	0.017	0.000	0.000

MODELAGEM LINEAR DO COMPENSADOR S'INCRONO DE 3ª ORDEM.

MATRIZES A, B, C, D, E, F, G, E H NA REFERÊNCIA DA MAQ.

MATRIZ - A

0.000	1.00	0.000
0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	-54.3

MATRIZ - B

0.000
0.000
64.935

MATRIZ - C

0.000	0.000
0.000	-44.1
9.14	0.000

MATRIZ - D

0.000	0.000	0.880
0.000	1.00	0.000
0.000	0.000	0.000

MATRIZ - E

0.000

0.000

0.000

MATRIZ - F

-0.150	0.000
0.000	0.000
0.000	1.029

MATRIZ - G

0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.880

MATRIZ - H

0.000	0.600
-0.150	0.000

MATRIZES A, B, C, D, E, F, G E H NA REFERÊNCIA DO SIST.

MATRIZ - AM

0.000	1.00	0.000
0.703	0.000	0.000
0.000	0.000	-54.3

MATRIZ - BM

0.000
0.000
64.935

MATRIZ - CM

0.000	0.000
-41.8	-14.1
2.93	-8.65

MATRIZ - DM

0.000	0.000	0.880
0.000	1.00	0.000
-0.016	0.000	0.000

MATRIZ - EM

0.000
0.000
0.000

MATRIZ - FM

-0.048	0.142
0.000	0.000
0.975	0.330

MATRIZ - GM

-0.330	0.000	0.834
0.975	0.000	0.282

MATRIZ - HM

0.137 0.196
 -0.544 -0.137

MATRIZ A DO SISTEMA MÁQUINA/EQUIVALENTE DINÂMICO

0.000	1.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
-65.3	0.000	-1.93	-5.21	0.000	0.000	-2.11	0.000
0.000	-5.21	0.000	0.000	-2.11	0.000	0.000	0.000
-0.437	0.000	-20.3	1.32	0.000	0.000	-3.09	0.000
0.000	1.32	0.000	0.000	-3.09	0.000	0.000	0.000
-0.533	0.000	4.76	-151.	203.	-51.6	0.868	0.000
0.000	0.022	0.026	-0.013	0.868	0.000	0.000	0.000
-0.549	0.000	4.90	-49.2	-1.54	50.8	0.893	0.000
0.000	0.023	0.026	-0.013	0.893	0.000	0.000	0.000
-0.562	0.000	5.01	48.5	-197.	148.	0.914	0.000
0.000	0.023	0.025	-0.013	0.914	0.000	0.000	0.000
-0.062	0.000	0.555	0.004	0.000	0.000	-151	203.
-51.5	0.004	0.000	0.000	0.101	0.000	0.000	0.000
-0.078	0.000	0.697	0.005	0.000	0.000	-49.2	-1.47
50.8	0.005	0.000	0.000	0.127	0.000	0.000	0.000
0.093	0.000	0.832	0.006	0.000	0.000	48.7	-197.
148.	0.006	0.000	0.000	0.152	0.000	0.000	0.000
-1.08	0.000	-0.674	-0.232	1.77	-0.902	0.094	0.000
0.000	-150.	202.	-51.2	0.094	0.000	0.000	0.000
-1.16	0.000	-0.720	-0.183	1.75	-0.896	0.100	0.000
0.000	-48.8	-1.14	50.6	0.100	0.000	0.000	0.000
-1.23	0.000	-0.763	-0.137	1.74	-0.890	0.106	0.000
0.000	49.6	-198.	-149.	0.106	0.000	0.000	0.000
-0.825	0.000	-0.513	0.484	0.000	0.000	0.071	0.000
0.000	0.484	0.100	0.000	-151.	203.	-51.4	0.000
-0.838	0.000	-0.521	0.491	0.000	0.000	0.072	0.000
0.000	0.491	0.100	0.000	-49.3	-1.37	50.7	0.000
-0.848	0.000	0.527	0.497	0.000	0.000	0.073	0.000
0.000	0.497	0.100	0.000	48.7	-197.	149.	0.000

MATRIZ A DO SISTEMA MÁQUINA/EQUIVALENTE DINÂMICO

0.000
 0.000
 64.935
 0.000
 0.000
 0.000
 0.000
 0.000
 0.000
 0.000
 0.000
 0.000
 0.000
 0.000
 0.000
 0.000
 0.000
 0.000

MATRIZ C DO SISTEMA MÁQUINA/EQUIVALENTE DINÂMICO

0.072	0.000	0.323	-0.022	0.000	0.000	0.051	0.000
0.000	0.022	0.000	0.000	0.051	0.000	0.000	
0.000	1.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.000	0.000	0.000	0.000	0.051	0.000	0.000	
1.53	0.000	0.045	0.122	0.000	0.000	0.049	0.000
0.000	0.122	0.000	0.000	0.049	0.000	0.000	

APÊNDICE - II

Este apêndice apresenta uma teoria para determinação de modelos equivalentes dinâmicos para sistemas de potência e uma aplicação prática no sistema de 230/500KV da CHESF-ELETRONORTE.

II.1 - O Modelo Equivalente Dinâmico

A forma final do modelo equivalente dinâmico é:

$$X_e = A_e X_e + B_e V \quad (II.1)$$

$$I = C_e X_e + D_e V \quad (II.2)$$

onde:

$$V = \begin{bmatrix} V_D \\ V_Q \end{bmatrix}, \text{ vetor de entrada}$$

$$I = \begin{bmatrix} \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} \begin{matrix} I_D \\ I_Q \end{matrix} \begin{bmatrix} \vdots \\ \vdots \end{bmatrix}, \text{ vetor de saída}$$

$$V_D = V_D - V_{D0}$$

$$V_Q = V_Q - V_{Q0}$$

$$I_D = I_D - I_{D0}$$

$$I_Q = I_Q - I_{Q0}$$

O sub-índice 0 corresponde ao ponto de operação inicial do sistema.

Inicialmente são identificadas quatro funções de transferência discretas no ponto de interligação do modelo equivalente com o restante do sistema.

$$\frac{\Delta I_D}{\Delta V_D}, \quad \frac{\Delta I_Q}{\Delta V_D}, \quad \frac{\Delta I_D}{\Delta V_Q}, \quad \frac{\Delta I_Q}{\Delta V_Q}$$

As funções identificadas são escritas em termos do operador de retardo Z^{-1} .

$$\frac{Y(Z)}{U(Z)} = \frac{b_0 + b_1 Z^{-1} + \dots + b_{n-1} Z^{-(n-1)} + b_n Z^{-n}}{1 + a_1 Z^{-1} + \dots + a_{n-1} Z^{-(n-1)} + a_n Z^{-n}} \quad (II.3)$$

Os parâmetros das funções de transferência são estimados usando a formulação recursiva de kalman, processando uma medida de cada vês.

$$K = P_K U_{K+1}^T + (q_{K+1} + U_{K+1} P_K U_{K+1}^T)^{-1} \quad (II.4)$$

$$a_{K+1}^* = a_K^* + K (Y_{K+1} - U_{K+1} a_K^*) \quad (II.5)$$

$$P_{K+1} = (I - K U_{K+1}) P_K \quad (II.6)$$

A equação (II.3) no domínio do tempo:

$$Y_K + a_1 Y_{K-1} + \dots + a_n Y_{K-n} = b_0 U_K + b_1 U_{K-1} + \dots + b_n U_{K-n} \quad (II.7)$$

Em forma matricial

$$Y_K = [Y_{K-1}, \dots, Y_{K-n}, U_K, \dots, U_{K-n}] \begin{bmatrix} -a_1 \\ -a_2 \\ \vdots \\ -a_n \\ b_n \\ b_1 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} \quad (II.8)$$

ou, $Y = Ua$

onde Y e U são vetores de medição de saída e de entrada, respectivamente.

Usando o método dos mínimos quadráticos, o estimador será:

$$\hat{a}^* = (U^T U)^{-1} U^T Y \quad (\text{II.9})$$

Quando existir ruídos nas medições do sistema, o modelo será:

$$Y = Ua + W \quad (\text{II.10})$$

Então, a nova função de transferência passa a ser:

$$Y(Z) = X(Z) + W(Z) \quad (\text{II.11})$$

onde,

$$X(Z) = \frac{B(Z)}{A(Z)}$$

$$A(Z) Y(Z) = B(Z) U(Z) + A(Z) W(Z) \quad (\text{II.12})$$

no domínio do tempo,

$$Y_K = [Y_{K-1}, \dots, Y_{K-n}, U_K, \dots, U_{K-n}] \begin{bmatrix} -a_1 \\ -a_2 \\ \vdots \\ -a_n \\ b_0 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} + W_K + a_1 W_{K-1} + \dots + a_n W_{K-n}$$

O valor de Y_K depende do ruído nos instantes anteriores a K (ruídos correlacionados com a saída). Para se ter um estimador não tendencioso, não correlacionado com a saída, usa-se um artifício matemático, multiplica-se (II.12) por $1/A(Z)$.

$$A(Z) \bar{Y}(Z) = B(Z) \bar{U}(Z) + W(Z) \quad (\text{II.14})$$

no domínio do tempo:

$$Y_K = [\bar{Y}_{K-1}, \dots, \bar{Y}_{K-n}, \bar{U}_K, \dots, \bar{U}_{K-n}] \begin{bmatrix} -a_1 \\ -a_2 \\ \vdots \\ -a_n \\ b_0 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} + W_K$$

Este cálculo é um processo iterativo, onde o vetor "a" é estimado inicialmente pela forma de Kalman recursiva. Define-se $\bar{Y}(Z)$ e $\bar{U}(Z)$ e o vetor "a" é reestimado. Continua o processo iterativo até que um critério de convergência seja satisfeito, este método chama-se "método dos mínimos quadráticos recursivo generalizado".

O modelo equivalente discreto é

$$Y_{K+1} = \Phi_K + U_K \quad (\text{II.16})$$

$$Y_K = C X_K + D U_K \quad (\text{II.17})$$

onde:

$$\Phi = \exp(AT)$$

$$\Gamma = A^{-1} [\Phi - I] B$$

Diagonalizando-se o sistema pela transformação

$$X_K = M V_K$$

onde M é a matriz modal, então:

$$V_{K+1} = M^{-1} \Phi M V_K + M^{-1} U_K$$

$$Y_K = C M V_K + D U_K$$

$$Y_{K+1} = \bar{\Phi}_K + \bar{\Gamma} U_K$$

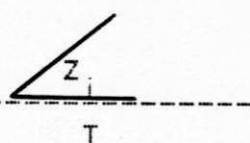
$$Y_K = \bar{C} V_K + D U_K$$

$$Z_i = e^{S_i T} = e^{(\tau_i + j \omega_i) T} = e^{\tau_i T} \cdot e^{j \omega_i T}$$

como,

$$|Z_i| = e^{\tau_i T}, \quad \angle Z_i = \omega_i T$$

e,

$$\omega_i = \frac{\angle Z_i}{T}$$


A matriz \bar{A} é formada com:

$$S = T + j \omega, \text{ então:}$$

$$\dot{V} = \bar{A} V + \bar{B} U, \quad (\text{II.18})$$

$$Y = \bar{C} V + D U \quad (\text{II.19})$$

O modelo contínuo na forma de variáveis de estado iniciais pode ser encontrado através da transformação inversa.

$$V = M^{-1} X$$

com:

$$A = M \bar{A} M^{-1}$$

$$B = M \bar{B}$$

$$C = \bar{C} M^{-1}$$

II.2 - Aplicação do Modelo para o Sistema de 230/500KV da CHESF-ELETRONORTE.

O sistema da figura 2.3.1 é usado para o levantamento do seu modelo equivalente dinâmico na barra 13.

Inicialmente, as quatro funções de transferências de terceira ordem são identificadas pelo método dos mínimos quadráticos recursivo generalizado.

Os coeficientes das funções de transferências:

- Para $\Delta I_D / \Delta V_D$, onde a variação foi de 5% na parte real da tensão terminal do compensador durante 0,2 segundos, com V_Q constante.

$$a^T = [2,95, -2,90, 0,95, 0,15, -0,29, 0,14]^T$$

- Para $\Delta I_Q / \Delta V_D$, mesmas condições da simulação anterior.

$$a^T = [2,95, -2,91, 0,96, 0,02, -0,03, 0,01]^T$$

- Para $\Delta I_D / \Delta V_Q$, onde a variação foi de 5% na parte imaginária da tensão terminal do compensador, durante 0,2 segundos, com V_D constante.

$$a^T = [2,96, -2,93, 0,97, -0,09, 0,17, -0,08]^T$$

- Para $\Delta I_Q / \Delta V_Q$, mesmas condições da simulação anterior.

$$a^T = [2,96, -2,91, 0,96, -0,07, 0,13, -0,06]^T$$

Os parâmetros das quatro funções de transferência identificadas geram quatro modelos de terceira ordem na forma de variáveis de estado discreto. Cada modelo possui a seguinte forma literal. Para o caso $\Delta I_D / \Delta V_D$.

$$\begin{bmatrix} X_1(K+1) \\ X_2(K+1) \\ X_3(K+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -a_3 & -a_2 & -a_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1(K) \\ X_2(K) \\ X_3(K) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \end{bmatrix} V_D \quad (II.20)$$

Θ_{ei} Γ_{ei}

$$\Delta I_D = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} \text{---} \\ | \\ X_1 \\ | \\ X_2 \\ | \\ X_3 \\ \text{---} \end{matrix} \begin{matrix} (K) \\ (K) \\ (K) \end{matrix} \begin{matrix} \text{---} \\ | \\ | \\ | \\ \text{---} \end{matrix} + h_{01} \Delta V_D \quad (\text{II.21})$$

C_{e1}

onde:

$$\begin{aligned} h_0 &= b_0 \\ h_1 &= b_1 - a_1 h_0 \\ h_2 &= b_2 - b_1 h_1 - a_2 h_0 \\ h_3 &= b_3 - b_2 h_1 - b_1 h_2 - a_3 h_0 \end{aligned}$$

A combinação dos quatros modelos discretos formam o modelo equivalente dinâmico discreto total na forma de variáveis de estado. O modelo possui a seguinte forma:

$$X(K+1) = \Phi X_e(K) + \Gamma e V \quad (\text{II.22})$$

$$I = C_e X_e(K) + D_e V \quad (\text{II.23})$$

onde,

$$X_e = [X_1(K), \dots, X_{12}(K)]^T$$

$$I = \begin{matrix} \text{---} & \text{---} \\ | & | \\ I_D & | \\ | & | \\ I_Q & | \\ \text{---} & \text{---} \end{matrix} e \quad V = \begin{matrix} \text{---} & \text{---} \\ | & | \\ V_D & | \\ | & | \\ V_Q & | \\ \text{---} & \text{---} \end{matrix}$$

A matriz \emptyset formada por blocos diagonais das \emptyset_{ei} ,
 montadas a partir dos parâmetros das funções identificadas:

$$\emptyset = \begin{bmatrix} \emptyset_1 & & & \\ & \emptyset_2 & & \\ & & \emptyset_3 & \\ & & & \emptyset_4 \end{bmatrix}$$

A matriz Γ_e forma-se da seguinte maneira:

$$\Gamma_e = \begin{bmatrix} \Gamma_{e1} & & & \\ \Gamma_{e2} & & & \\ & & & \\ & & & \end{bmatrix}$$

e,

$$C_e = \begin{bmatrix} C_{e1} & & & \\ & C_{e2} & & \\ & & C_{e3} & \\ & & & C_{e4} \end{bmatrix}$$

A matriz D_e é formada pelos componentes de regime
 permanente de cada função de transferência:

$$D_e = \begin{bmatrix} h_{01} & & & \\ & h_{03} & & \\ & & h_{02} & \\ & & & h_{04} \end{bmatrix}$$

O modelo na forma de variáveis de estado contínuas obtido após manipulações com a matriz modal, descrito em II.1:

$$\dot{X}_e = A_e X_e + B_e V \quad (II.24)$$

$$I = C_e X_e + D_e V \quad (II.25)$$

A matriz A_e é formada de matrizes bloco diagonais A_{e_i} . Então após os Cálculos realizados em computador digital, obtém-se:

$$A_{e_1} = \begin{bmatrix} -151.456 & 203.055 & -51.600 \\ -49.267 & -1.536 & 50.803 \\ 48.507 & -196.874 & 148.366 \end{bmatrix}$$

$$A_{e_2} = \begin{bmatrix} -151.349 & 202.881 & -51.533 \\ -49.310 & -1.470 & 50.781 \\ 48.591 & -197.002 & 148.411 \end{bmatrix}$$

$$Ae_3 = \begin{bmatrix} -151.032 & 202.202 & -51.171 \\ -49.466 & -1.137 & 50.603 \\ 48.917 & -197.697 & 148.779 \end{bmatrix}$$

$$Ae_2 = \begin{bmatrix} -151.289 & 202.702 & -51.414 \\ -49.347 & -1.368 & 50.715 \\ 48.676 & -197.230 & 148.553 \end{bmatrix}$$

A matriz Be:

$$Be = \begin{bmatrix} 15.142 & 0.000 \\ 15.576 & 0.000 \\ 15.944 & 0.000 \\ 1.764 & 0.000 \\ 2.218 & 0.000 \\ 2.647 & 0.000 \\ 0.000 & -8.573 \\ 0.000 & -9.156 \\ 0.000 & -9.700 \\ 0.000 & 76.527 \\ 0.000 & -6.624 \\ 0.000 & -6.705 \end{bmatrix}$$

As matrizes Ce e De:

$$Ce = \begin{bmatrix} 1.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 1.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 \\ 0.000 & 0.000 & 0.000 & 1.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 1.000 & 0.000 & 0.000 \end{bmatrix}$$

$$De = \begin{bmatrix} 1.069 & 11.394 \\ -11.392 & 0.982 \end{bmatrix}$$

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bibliografia -

BUSBY, E. L.; HURLEY, J. D. ; KEAY, F. W. E RACZKOWSKI, C.(1979).

``Dynamic Stability Improvement at Monticello Station Analytical Study and Field Tests'', IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-98, N^o 3 May/June.

CAVALCANTI, L. F. (1988). ``Técnica de Análise de Interações

Modais em Sistemas de Potência de Múltiplas Máquinas'',
Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba.

CASTRO, J. C. (1984). ``Uma Técnica Computacional para Determinação dos Parâmetros Ajustáveis do Controlador de uma Máquina

Síncrona'', 5^o Congresso Brasileiro de Automática/1^o Congresso Latino - Americano de Automática - Campina Grande - Pb, pp 667-672.

DAWSON, G. E. (1969). ``A Dynamic Test Model for Power System Stability and Control Studies'', Ph.D Thesis, University of British Columbia, Vancouver B. C.

ELMETWALLY, M. M. J.; RAO, N. D. E MALIK, D. P. (1975). ``Experimental Results on the Implementation of an Optimal Control for Synchronous Machines'', IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-94, n^o 4 July/August

GUERRA, M. F. A. (1987). ``Modelos de Máquinas Síncronas para Projeto de Sinais Estabilizadores usando-se Teoria de Controle Ótimo'', Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba.

KWAKERNAAK, R. e SIVAN, R. (1972). ``Linear Optimal Control Systems'', Wiley Interscience, New York, livro.

MILLER, T. J. E (1982). ``Reactive Power Control in Electric Systems'', Willey Interscience Publication, New York, livro: 1-279.

MOTA, W. S. (1981). ``Optimal Control Techniques in the Design of Power System Stabilizers'', Ph. D Thesis, University of Waterloo - Canada.

MOTA, W. S. (1984). ``Estabilização de Sistemas de Potência através de Controle Ótimo'', Anais de Minicursos do 1^o Congresso Latino - Americano de Automática/5^o Congresso Brasileiro de Automática - Campina Grande - Pb, pp. 26-34.

SCHWITALLA, R. (1987). ``Presidente Dutra Synchronous Condenser Installation in Brazil Compensates Reactive Power'', Energy and Automation IX, N^o 4.

SILVEIRA, A. M. (1984). ``Ajuste dos Parâmetros de um Compensador estático usando Técnicas de Controle Moderno e Otimização'', Dissertação de Mestrado, Universidade federal da Paraíba.

VIANA DA FONSECA, J. (1986). ``Projeto de Sinais Estabilizadores em Compensadores Estáticos de Reativos baseado em Técnicas de Controle Moderno e Teoria da Identificação'', Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba.

YU, Y. N; VONGSURIYA K. & WEDMAN, L. N. (1970). ``Application of
an Optimal Control Theory to a Power System''. IEEE
Transactions on Power Apparatus , Vol. Pas-89, pp. 55-62.