

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR GILBERTO PECHOTO
DE MELO E APROVADA PELA
COMISSÃO JULGADORA EM 14/08/98.

ORIENTADOR

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

Detecção e Localização de Falhas via Observadores de Estado de Ordem Reduzida

Autor: **Gilberto Pechoto de Melo**

Orientador: **Prof. Dr. Robson Pederiva**

17/98

M491d

35368/BC

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE PROJETO MECÂNICO**

Detecção e Localização de Falhas via Observadores de Estado de Ordem Reduzida

Autor : **Gilberto Pechoto de Melo**

Orientador: **Prof. Dr. Robson Pederiva**

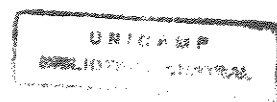
Curso: Engenharia Mecânica

Área de concentração: Mecânica dos Sólidos

Tese de Doutorado apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Campinas, 1998

S.P. - Brasil



UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	UNICAMP
V.	EX
TOMBO BC	35368
PROC.	395198
C	☐
D	☒
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	08/01/98
N.º CPD	

CM-00117916-9

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

M491d Melo, Gilberto Pechoto de
Detecção e localização de falhas via observadores de estado de ordem reduzida. / Gilberto Pechoto de Melo.-- Campinas, SP: [s.n.], 1998.

Orientador: Robson Pederiva.
Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Falha de sistema (Engenharia). 2. Identificação de sistemas. 3. Estimativa de parâmetro. I. Pederiva, Robson. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE PROJETO MECÂNICO**

Tese de Doutorado

**Detecção e Localização de Falhas via
Observadores de Estado de Ordem Reduzida**

Autor : **Gilberto Pechoto de Melo**

Orientador: **Prof. Dr. Robson Pederiva**



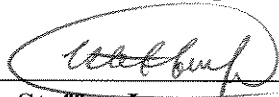
**Prof. Dr. Robson Pederiva, Presidente
Universidade Estadual de Campinas**



**Prof. Dr. Douglas Eduardo Zampieri
Universidade Estadual de Campinas**



**Prof. Dr. José Maria Campos dos Santos
Universidade Estadual de Campinas**



**Prof. Dr. Valder Steffen Jr.
Universidade Federal de Uberlândia**



**Prof. Dr. Vicente Lopes Jr.
Universidade Estadual Paulista**

Campinas, 14 agosto de 1998

Dedicatória:

Dedico este trabalho à Mariamélia e Laís

Agradecimentos

Ao Prof. Robson, pela orientação e amizade durante todo o período.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, que ajudaram de forma direta e indireta na conclusão deste trabalho.

A Capes, pelo apoio financeiro.

Índice

Capítulo 1 Introdução e Revisão da Literatura	01
1.1 Introdução	01
1.2 Revisão da Literatura	04
1.3 Proposta do Trabalho	13
1.4 Divisão do Trabalho	14
1.5 Publicações Geradas	16
 Capítulo 2 Modelagem Teórica	 17
2.1 Método dos Observadores de Estado	17
2.1.1 Controlabilidade e Observabilidade	17
2.1.2 Observador Trivial	18
2.1.3 Observador Identidade	19
2.1.4 Observador de Ordem Reduzida	21
2.1.5 Observador Robusto a um Determinado Parâmetro	24
2.2 Índices de Performance e Condicionamento dos Observadores	27
2.2.1 Performance Transiente dos Observadores de Estado	27
2.2.2 Performance do Regime Permanente dos Observadores de Estado	30
2.2.3 Índice Principal para os Observadores de Estado	31

2.2.4 Projeto de Observadores de Estado Bem Condicionados para o Monitoramento de Sistemas	32
2.3 Método das Séries de Fourier para Identificação dos Parâmetros	38
2.4 Detecção e Localização de Falhas - Metodologia Desenvolvida	44
Capítulo 3 Simulação Computacional - Resultados e Discussões	49
3.1 Programas Computacionais	49
3.2 Exemplos Simulados	57
3.2.1 Sistema Massa - Mola - Amortecedor - 3 Graus de Liberdade	57
3.2.1.1 Sistema Massa - Mola - Amortecedor - Análise Transiente	59
3.2.1.2 Sistema Massa - Mola - Amortecedor - Análise Transiente	
Influência de Perturbação Aleatória na Resposta	62
3.2.1.3 Sistema Massa - Mola - Amortecedor - Regime Permanente	65
3.2.1.4 Sistema Massa - Mola - Amortecedor - Regime Permanente	
Influência de Perturbação Aleatória na Excitação	78
3.2.2 Selo Dinâmico	79
Capítulo 4 Análise Experimental - Resultados e Discussões	83
4.1 Montagem da Bancada de Testes	83
4.2 Sistema para Aquisição de Dados	84
4.3 Modelo Matemático do Sistema com Mesas Vibratórias	86
4.4 Frequências Naturais do Sistema Completo	87
4.5 Determinação dos Parâmetros Físicos: Mesa Inferior	88
4.6 Determinação dos Parâmetros Físicos: Mesa Intermediária	90
4.7 Determinação dos Parâmetros Físicos: Mesa Superior	91
4.8 Excitação Harmônica na Mesa Inferior	93

4.9 Excitação Harmônica na Mesa Inferior e Ruído Aleatório na Mesa Intermediária	103
4.10 Excitação com Ruído Aleatório na Mesa Inferior	108
Capítulo 5 Conclusões e Sugestões para Próximos Trabalhos	112
5.1 Conclusões	112
5.2 Sugestões para Próximos Trabalhos	115
Capítulo 6 Referências Bibliográficas	116

Resumo

MELO, Gilberto Pechoto, *Deteção e Localização de Falhas via Observadores de Estado de Ordem Reduzida*, Campinas,: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1998. 125 p. Tese (Doutorado)

Um dos fatores do grande interesse no desenvolvimento de novas técnicas de detecção de falhas é devido ao aumento da demanda da indústria em relação a segurança de seus sistemas, sendo eles supervisionados e monitorados para que as falhas sejam sanadas o mais rápido possível e que os distúrbios em operação normal não causem uma deterioração da performance dos mesmos. Neste trabalho, desenvolveu-se uma metodologia para detecção e localização de falhas em sistemas mecânicos utilizando observadores de estado de ordem reduzida. O método pode reconstruir os estados não medidos ou os valores provenientes de pontos de difícil acesso no sistema. Os parâmetros de interesse sujeitos a falhas são escolhidos, projetando-se um observador global otimizado para análise de todo o sistema considerando possíveis perturbações aleatórias na excitação, na resposta e falhas nos sensores. Projeta-se também observadores robustos a estes parâmetros de interesse, que localizam possíveis falhas ou irregularidades no sistema. Para os componentes que necessitem de um acompanhamento periódico devido às suas grandes solicitações ou falhas constantes, montam-se observadores com um sistema de alarmes que gera uma curva de tendências em um sistema automático para detecção e localização de falhas desenvolvido neste trabalho. Para os sistemas simulados e experimental, fez-se análises da performance transiente e em regime permanente, excitando-se os sistemas com força impulsiva, força senoidal, ruído aleatório, combinações dos mesmos, etc. Os resultados foram bons quando comparados com outros métodos e pôde-se também verificar os resultados através de uma bancada de testes.

Palavras-Chave

- Observadores de estado, falhas, identificação de parâmetros, observação robusta

Abstract

MELO, Gilberto Pechoto, *Faults Detection and Isolation using Reduced-Order State Observers*, Campinas,: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1998. 125 p. Tese (Doutorado)

The development of new faults detection techniques is necessary because of increasing demands from industries on reliability and safety in mechanical systems. They must be supervised such that occurrence of failures can be accommodated as quickly as possible because they can cause an unacceptable deterioration of the systems performance. In this work, we have developed a methodology to Detect and Isolate Faults in mechanical systems using reduced order state observers. We can monitor unmeasurable variables and the method selects the parameters from components that may fault during the process and constructs an optimized global observer to analyze all the system considering random noises in the excitation, in the response and sensor faults. To isolate component failures via robust observation, an automatic system with a bank of detection observers is constructed, where each observer is only sensitive to one specified component failure while robust to all other component failures. We have analyzed the transient and steady-state performance by exciting the system with impulsive force, sinusoidal force, random noise etc. The results were good when we compare them with other methods and we have verified the results through a testing rig.

Key Words

- State observers, faults, parameters identification, robust observation

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Sistema de Dois Graus de Liberdade	24
Figura 2.2 - Sistema de Observação Robusta	47
Figura 3.1 - Fluxograma para Identificação dos Parâmetros e Cálculo dos Observadores de Estado	54
Figura 3.2 - Fluxograma para Otimização dos Observadores de Estado	55
Figura 3.3 - Banco de Observadores para Detecção e Localização de Falhas	56
Figura 3.4 - Sistema Simulado Massa - Mola - Amortecedor com 3 Graus de Liberdade	
Gráficos do Sistema Massa - Mola - Amortecedor - Análise Transiente	57
Figura 3.5 - Sistema Real Global x Observador Global - Sem Falhas	59
Figura 3.6 - Sistema Real Global (0% k_2) x Observador Global	59
Figura 3.7 - Sistema Real Global (0% k_2) x Observador Robusto k_1	59
Figura 3.8 - Sistema Real Global (0% k_2) x Observador Robusto k_2	59
Figura 3.9 - Sistema Real Global (0% k_2) x Observador Robusto k_B	60
Figura 3.10 - Sistema Real Global (0% k_2) x Observador Robusto k_C	60
Figura 3.11 - Sistema Real Global (0% k_2) x Observador Robusto c_1	60
Figura 3.12 - Sistema Real Global (0% k_2) x Observador Robusto c_2	60
Gráficos do Sistema Massa - Mola - Amortecedor - Regime Permanente	
Figura 3.13 - Sistema Real Global x Observador Global - Sem Falhas	65
Figura 3.14 - Sistema Real Global (0% k_2) x Observador Global	65
Figura 3.15 - Sistema Real Global (0% k_2) x Observador Robusto k_1	65
Figura 3.16 - Sistema Real Global (0% k_2) x Observador Robusto k_2	65
Figura 3.17 - Sistema Real Global (0% k_2) x Observador Robusto k_B	66

Figura 3.18 - Sistema Real Global ($0\%k_2$) x Observador Robusto k_C	66
Figura 3.19 - Sistema Real Global ($0\%k_2$) x Observador Robusto c_1	66
Figura 3.20 - Sistema Real Global ($0\%k_2$) x Observador Robusto c_2	66
Figura 3.21 - Selo Dinâmico	80
Figura 4.1 - Montagem Experimental: Mesa Vibratória	83
Figura 4.2 - Fluxograma para Análise de Frequências (Entrada Impulsiva)	85
Figura 4.3 - Fluxograma para Aquisição de Sinais	85
Figura 4.4 - Sistema com Mesas Vibratórias Discretizado	86
Figura 4.5 - a-Espectro de Frequências do Sistema Completo	87
b-Espectro de Frequências do Sistema Completo	88
Figura 4.6 - Mesa Vibratória Inferior	89
Figura 4.7 - Frequência Natural da Mesa Vibratória Inferior	89
Figura 4.8 - Mesa Vibratória Intermediária	90
Figura 4.9 - Frequência Natural da Mesa Vibratória Intermediária	91
Figura 4.10 - Mesa Vibratória Superior	92
Figura 4.11 - Frequência Natural da Mesa Vibratória superior	92
Figura 4.12 - Sistema Excitado Harmonicamente - Mesas Vibratórias	94
Gráficos do Sistema de Mesas Vibratórias Excitado Harmonicamente	
Figura 4.13 - Força de Excitação - Harmônica	94
Figura 4.14 - Sistema Real Global x Observador Global - Sem Falhas	94
Figura 4.15 - Sistema Real Global ($0\%k_2$) x Observador Global	95
Figura 4.16 - Sistema Real Global ($0\%k_2$) x Observador Robusto k_1	95
Figura 4.17 - Sistema Real Global ($0\%k_2$) x Observador Robusto k_2	95
Figura 4.18 - Sistema Real Global ($0\%k_2$) x Observador Robusto k_3	95
Figura 4.19 - Sistema Real Global ($0\%k_2$) x Observador Robusto k_4	95
Figura 4.20 - Sistema Real Global ($0\%k_2$) x Observador Robusto k_5	95
Figura 4.21 - Sistema Real Global ($0\%k_2$) x Observador Robusto k_6	96
Figura 4.22 - Sistema Real Global ($0\%k_2$) x Observador Robusto k_7	96

Figura 4.23 - Sistema Real Global (0% k_2) x Observador Robusto k_8	96
Figura 4.24 - Sistema Real Global (0% k_2) x Observador Robusto k_9	96
Figura 4.25 - Sistema Real Global (0% k_2) x Observador Robusto c_1	96
Figura 4.26 - Sistema Real Global (0% k_2) x Observador Robusto c_2	96
Figura 4.27 - Sistema Real Global (0% k_2) x Observador Robusto c_3	97
Figura 4.28 - Sistema Excitado com Força Harmônica e Ruído Aleatório	
- Mesas Vibratórias	103

Gráficos do Sistema de Mesas Vibratórias Excitado com Força Harmônica e
Ruído Aleatório

Figura 4.29 - Sistema Real Global - Sem Ruído	104
Figura 4.30 - Sistema Real Global - Com Ruído	104
Figura 4.31 - Sistema Real Global x Observador Global - Sem Falhas	104
Figura 4.32 - Sistema Real Global (0% k_9) x Observador Global	104
Figura 4.33 - Sistema Real Global (0% k_9) x Observador Robusto k_1	104
Figura 4.34 - Sistema Real Global (0% k_9) x Observador Robusto k_2	104
Figura 4.35 - Sistema Real Global (0% k_9) x Observador Robusto k_3	105
Figura 4.36 - Sistema Real Global (0% k_9) x Observador Robusto k_4	105
Figura 4.37 - Sistema Real Global (0% k_9) x Observador Robusto k_5	105
Figura 4.38 - Sistema Real Global (0% k_9) x Observador Robusto k_6	105
Figura 4.39 - Sistema Real Global (0% k_9) x Observador Robusto k_7	105
Figura 4.40 - Sistema Real Global (0% k_9) x Observador Robusto k_8	105
Figura 4.41 - Sistema Real Global (0% k_9) x Observador Robusto k_9	106
Figura 4.42 - Sistema Real Global (0% k_9) x Observador Robusto c_1	106
Figura 4.43 - Sistema Real Global (0% k_9) x Observador Robusto c_2	106
Figura 4.44 - Sistema Real Global (0% k_9) x Observador Robusto c_3	106

Gráficos do Sistema de Mesas Vibratórias Excitado com Ruído Aleatório

Figura 4.45 - Força de Excitação - Ruído Aleatório	108
Figura 4.46 - Sistema Real Global x Observador Global - Sem Falhas	108

Figura 4.47 - Sistema Real Global (0% k_3) x Observador Global	108
Figura 4.48 - Sistema Real Global (0% k_3) x Observador Robusto k_1	108
Figura 4.49 - Sistema Real Global (0% k_3) x Observador Robusto k_2	109
Figura 4.50 - Sistema Real Global (0% k_3) x Observador Robusto k_3	109
Figura 4.51 - Sistema Real Global (0% k_3) x Observador Robusto k_4	109
Figura 4.52 - Sistema Real Global (0% k_3) x Observador Robusto k_5	109
Figura 4.53 - Sistema Real Global (0% k_3) x Observador Robusto k_6	109
Figura 4.54 - Sistema Real Global (0% k_3) x Observador Robusto k_7	109
Figura 4.55 - Sistema Real Global (0% k_3) x Observador Robusto k_8	110
Figura 4.56 - Sistema Real Global (0% k_3) x Observador Robusto k_9	110
Figura 4.57 - Sistema Real Global (0% k_3) x Observador Robusto c_1	110
Figura 4.58 - Sistema Real Global (0% k_3) x Observador Robusto c_2	110
Figura 4.59 - Sistema Real Global (0% k_3) x Observador Robusto c_3	110

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 - Valores dos Parâmetros Identificados e Teóricos Sistema Massa - Mola - Amortecedor	18
Tabela 3.2 - Diferença dos Valores RMS de $x_3(t)$ - Falhas em k_1 , k_2 e k_B Análise Transiente	61
Tabela 3.3 - Diferença dos Valores RMS de $x_3(t)$ - Falhas em k_C , c_1 e c_2 Análise Transiente	61
Tabela 3.4 - Diferença dos Valores RMS de $x_3(t)$ - Falhas em k_1 , k_2 e k_B - Análise Transiente com Influência de Perturbação Aleatória	63
Tabela 3.5 - Diferença dos Valores RMS de $x_3(t)$ - Falhas em k_C , c_1 e c_2 - Análise Transiente com Influência de Perturbação Aleatória	63
Tabela 3.6 - Diferença dos Valores RMS de $x_3(t)$ - Falhas em k_1 , k_2 e k_B Regime Permanente	67
Tabela 3.7 - Diferença dos Valores RMS de $x_3(t)$ - Falhas em k_C , c_1 e c_2 Regime Permanente	67
Tabela 3.8 - Diferença dos Valores RMS de $x_3(t)$ - Rigidez de 100 a 85% k_1	69
Tabela 3.9 - Diferença dos Valores RMS de $x_3(t)$ - Rigidez de 80 a 65% k_1	71
Tabela 3.10 - Diferença dos Valores RMS de $x_3(t)$ - Rigidez de 60 a 45% k_1	72
Tabela 3.11 - Diferença dos Valores RMS de $x_3(t)$ - Rigidez de 40 a 25% k_1	73
Tabela 3.12 - Diferença dos Valores RMS de $x_3(t)$ - Rigidez de 20 a 5% k_1	74

Tabela 3.13 - Diferença dos Valores RMS de $x_3(t)$ - Rigidez de 0% k_1	75
Tabela 3.14 - Variações das Frequências Naturais do Sistema	76
Tabela 3.15 - Variação da Frequência Natural f_1 e Variação da Diferença dos Valores RMS da Amplitude para o Observador Global	77
Tabela 3.16 - Diferença dos Valores RMS de $x_3(t)$ - Falhas em k_1 , k_2 e k_B - Regime Permanente - Influência de Perturbação Aleatória	78
Tabela 3.17 - Diferença dos Valores RMS de $x_3(t)$ - Falhas em k_C , c_1 e c_2 - Regime Permanente - Influência de Perturbação Aleatória	79
Tabela 3.18 - Valores dos Parâmetros Identificados e Experimentais do Selo Dinâmico	81
Tabela 3.19 - Diferença dos Valores RMS de $y_2(t)$ - Selo Dinâmico	81
Tabela 4.1 - Valores dos Parâmetros Identificados e Experimentais	93
Tabela 4.2 - Diferença dos Valores RMS de $x_1(t)$ - Falha em k_2	98
Tabela 4.3 - Diferença dos Valores RMS de $x_1(t)$ - Redução de k_2 para 75%, 50% e 25%	99
Tabela 4.4 - Diferença dos Valores RMS de $x_1(t)$ - Observadores Robustos de k_2	101
Tabela 4.5 - Diferença dos Valores RMS de $x_1(t)$ - Falha em k_3 e k_8	101
Tabela 4.6 - Diferença dos Valores RMS de $x_1(t)$ - Falha em k_3 e k_8 - Análise	102
Tabela 4.7 - Diferença dos Valores RMS de $x_1(t)$ - Falha em k_9	107
Tabela 4.8 - Diferença dos Valores RMS de $x_1(t)$ - Falha em k_3	111

Nomenclatura

$\{x(t)\}$	Vetor Deslocamento do Sistema Real
$\{\bar{x}(t)\}$	Vetor Deslocamento do Observador de Estado
$[A]$	Matriz Dinâmica do Sistema
$[C_{me}]$	Matriz de Medidas
$[K]$	Matriz de Rigidez
$[M]$	Matriz de Massa
$[C]$	Matriz de Amortecimento
$\{u(t)\}$	Vetor de Excitações
$\{y(t)\}$	Vetor das saídas medidas
$\{\bar{y}(t)\}$	Vetor das saídas medidas do Observador de Estado
$[L]$	Matriz do Observador de Estado
$\{e(t)\}$	Vetor Erro de Estimção na Entrada
$\{\varepsilon(t)\}$	Vetor de Resíduos
p	número de entradas
k	número de saídas
$\ P\ $	Norma L_1 da Matriz dos Autovetores (Condição da Matriz)
ω	Frequência de Excitação
ω_n	Frequência Natural
ξ	Amortecimento Modal

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO E REVISÃO DA LITERATURA

1.1 Introdução

O desenvolvimento de novas técnicas de detecção e localização de falhas em sistemas mecânicos submetidos a carregamentos dinâmicos tem evoluído muito nos últimos anos em função da necessidade cada vez maior das indústrias em manter os equipamentos em funcionamento sem paradas abruptas. Para garantir este funcionamento com segurança os sistemas mecânicos têm que ser supervisionados, pois os distúrbios em operação normal causam uma deterioração da performance do sistema ou até mesmo levam a situações perigosas.

Embora as ferramentas para análise teórica dos sistemas dinâmicos atuais sejam sofisticadas ao ponto de modelos complexos poderem ser simulados nos modernos computadores, existem grandes dificuldades na predição do comportamento dinâmico de certos componentes estruturais e diagnose de falhas, seja pela inexatidão do modelo teórico ou mesmo pela dificuldade de medição de algumas variáveis do sistema.

Após revisão bibliográfica sobre metodologias de detecção e localização de falhas, verificou-se que os observadores de estado poderiam reconstruir os estados não medidos ou os valores provenientes de pontos de difícil acesso no sistema. Neste caso, poderia detectar-se falhas nestes pontos, podendo monitorá-los através das reconstruções de seus estados. As metodologias utilizando observadores de estado existentes são na sua maioria destinadas a resolver problemas de controle e detecção de possíveis falhas em sensores e instrumentos.

Há aproximadamente duas décadas que o problema de detecção de falhas tem sido estudado extensivamente na literatura, basicamente utilizando técnicas através de observadores de estado em sistemas de controle, e/ou métodos de estimação de parâmetros [68]. Quanto a utilização destas metodologias utilizando modelos, em sistemas de controle ou para detecção de falhas em sensores e instrumentos, pode-se mencionar algumas mais utilizadas: observadores de Luenberger [3],[49], [50], [51] e [52], observadores dedicados [13], [20] e [22], detecção através de filtros [65] e [80], consistência de espaço [21] e [22], observadores robustos para entradas desconhecidas [8], [75], [77] e [78].

A técnica dos observadores dedicados consiste em desenvolver um modelo para o sistema em análise e comparar a saída estimada com a saída medida. A diferença entre os dois sinais apresenta um resíduo, que é analisado posteriormente. A idéia é montar um banco de observadores para supervisionar o processo, onde cada observador é dedicado somente a um instrumento. Neste caso, portanto, a metodologia só pode ser utilizada para localizar falhas em sensores e não no sistema mecânico

Na técnica de detecção através de filtros também são considerados os resíduos entre saída medida e saída estimada, onde estes resíduos são apresentados e projetados em diferentes direções. Com certas condições, pode-se desacoplar completamente as falhas, isto é, os resíduos específicos a diferentes falhas aparecem mutuamente ortogonais. Um grande problema desta metodologia é que qualquer perturbação no sistema ou pequenas distorções no modelo, provocam alterações significantes nos valores dos resíduos encontrados.

Na metodologia utilizando-se consistência de espaço, a idéia básica é avaliar a consistência do modelo através da entrada real do sistema e a saída medida. As equações de paridade são desenvolvidas a partir do modelo matemático definido e os resíduos gerados são diferentes de zero quando ocorre algum tipo de falha no sistema. Neste caso são analisados os efeitos da falha e entradas desconhecidas sobre o resíduo através do desenvolvimento de um índice que tenta separar estes efeitos. Como resultado final, consegue-se localizar possíveis regiões de falhas.

Desde que a teoria de observadores de estado foi introduzida para casos determinísticos por Luenberger e para casos estocásticos por Kalman, muitas metodologias têm sido propostas

para o monitoramento de máquinas, principalmente em sistemas de controle. Embora estes sistemas de monitoramento baseados na teoria dos observadores de estado tenham se mostrado muito promissores no laboratório, eles não têm sido largamente aplicados no desenvolvimento industrial. O monitoramento de Sistemas baseado em observadores de estado são raramente adotados devido ao fato dos mesmos freqüentemente produzirem transientes muito longos ou erros de regime permanente que ocasionam falsos alarmes ou até mesmo desligamento de todo o Sistema [34]. Deve-se acrescentar também a necessidade de construir um modelo matemático relativamente preciso, que nem sempre é fácil de se obter na prática.

As técnicas convencionais utilizadas para desenvolvimento de observadores de estado começam *a priori* com a seleção dos pólos do observador baseada na estimação da especificação da velocidade, isto é, quão rápido o erro de estimação deveria ir para zero, e na estabilidade do sistema. Os pólos são geralmente arbitrados e podem resultar em um observador mal condicionado [34] e [46]. Isto significa que o desempenho do transiente e regime permanente do observador pode tornar-se muito sensível a fatores como aparecimento de ruídos, alterações de alguns parâmetros físicos devido a possíveis falhas na máquina monitorada, erros de medidas e falhas em sensores.

Este desempenho inconsistente do observador pode tornar toda a metodologia de projeto inadequada, resultando em um observador que pode comprometer toda a performance do sistema de monitoramento, pois um observador de estado mal condicionado trabalha bem quando as condições são exatamente como as assumidas inicialmente (sem ruídos, modelo adequado, entradas conhecidas, etc.), mas trabalha muito precariamente quando isso não ocorre. Deve-se, portanto, analisar uma nova metodologia de projeto para corrigir esta inconsistência e projetar um observador com bom condicionamento e desempenho.

1.2 Revisão da Literatura

Sobre a temática de observadores de estado foi feita uma vasta revisão de trabalhos publicados nos últimos anos. A seguir, procura-se apresentar em uma ordem cronológica, o desenvolvimento das idéias mais significativas nesta área de conhecimento, iniciando-se com os trabalhos de Luenberger (1964 e 1966) e terminando com Minamide (1997).

Luenberger (1964). Demonstra neste trabalho que um vetor de estado de um sistema linear pode ser construído através de observadores na entrada e na saída. Ele demonstra também, que o observador de estado reconstrói o vetor de estado e pode ser incorporado no controle do sistema.

Luenberger (1966). Demonstra que se um sistema é linear, seu vetor de estado pode ser reconstruído por um observador. O vetor de estado de ordem “ n ” com “ m ” saídas independentes pode ser reconstruído com um observador de ordem “ $n - m$ ”. Mostra que o projeto de um observador para um sistema com “ m ” saídas pode ser reduzido a um projeto de “ m ” Observadores, como se fossem subsistemas com saída simples, reduzindo sua complexidade.

Basilo e Marro (1969). Consideram um observador linear e invariante no tempo de sistemas dinâmicos em casos gerais, onde as funções de entrada são desconhecidas. Trabalha com propriedades de controlabilidade e invariância condicionada e utiliza subespaços chamados subespaços de observabilidade.

Tse e Athans (1970). Este trabalho generaliza e unifica os conceitos desenvolvidos por Kalman e Luenberger no que diz respeito ao projeto de sistemas lineares e discretos no qual estima o estado da planta linear livre de ruídos e ruídos de medidas. Trabalha com observador de ordem mínima.

Luenberger (1971). Apresenta uma metodologia para a reconstrução de estados através de observadores. Apresenta ainda tópicos a respeito de observadores tipo identidade, observadores de ordem reduzida e propriedades de estabilidade dos mesmos.

Leondes e Novak (1972). Observador de ordem mínima de Luenberger é considerado como uma alternativa para o filtro de Kalman para obtenção dos estados estimados em sistemas lineares discretos no tempo.

Hostetter e Medich (1973). Resultados conhecidos sobre controladores para sistemas de retroalimentação lineares com distúrbios desconhecidos são estendidos para casos onde o estado não é determinado diretamente por medidas e são apresentados, também, testes para existência do controlador.

Wang et al (1975). Apresenta um observador de ordem mínima para distúrbios não mensuráveis.

Willsky (1976). Examina técnicas estatísticas para a detecção de falhas em sistemas dinâmicos utilizando conceitos chaves, similaridades e diferenças em problemas de formulação, estrutura dos sistemas e performance. Cita que o problema de detecção de falha é extremamente complexo e a escolha de um projeto apropriado depende de sua aplicação particular.

Bhattacharayya (1976). Ressalta a utilização da estrutura dos observadores de estado robustos em sistemas de controle e detecção de falhas em sensores.

Sundareswaran et al (1977). Este trabalho mostra como a escolha dos parâmetros do observador e seus erros de estimação são independentes dos distúrbios arbitrários do sistema.

Clark (1978). Utiliza um esquema de observadores dedicados para detecção de falhas em instrumentação por redundância funcional. O sistema é robusto à variação de parâmetros físicos significantes. Como exemplo, utiliza um barco e provoca uma redução de massa e no anteparo de profundidade, tendo o observador acusado esta variação.

Emre e Silverman (1980). Definem o conceito de k -observabilidade com entrada desconhecida e k -observabilidade para sistemas lineares, unificando a solução para uma classe de problemas de síntese, onde as entradas são desconhecidas.

Kudva et al (1980). Apresentam uma solução construtiva para o problema de projetos de observadores de Luenberger de ordem reduzida para sistemas lineares sujeitos a entradas desconhecidas. Esta estrutura analisa também a estabilidade do sistema, preocupando-se com autovalores que devem conter parte real negativa.

Clark e Setzer (1980). Apresentam um sistema para detecção de falhas em sensores em um sistema automático, utilizando um esquema de observadores dedicados.

Brunovsky e Komornik (1981). Apresentam uma solução para a equação de Riccati de problemas lineares e restrições, representando o mínimo custo do sistema em retroalimentação. Examinam também a convergência da solução e o efeito da estabilidade para o observador.

Watanabe e Himmelblau (1982). Demonstram como detectar falhas em instrumentos em processos não lineares que incluem incertezas como erros de modelo, ambigüidade de parâmetros e entradas e saídas ruidosas. Pela separação dos efeitos das incertezas, ruídos e ruídos provenientes de falhas, uma estratégia foi a utilização de filtros para identificação.

Isermann (1984). Faz uma revisão sobre detecção e diagnóstico ilustrando que o processo de falhas pode ser analisado baseando-se na estimação de parâmetros e variáveis de estado não mensuráveis. Apresenta a metodologia dos observadores de estado e utiliza o método dos mínimos quadrados e variável instrumental para a estimação dos parâmetros através de modelos discretizados no tempo.

Chow e Willsky (1984). Trabalham com redundância analítica em termos de espaço consistente. Descrevem três métodos utilizando relações consistentes para gerar resíduos para detecção e isolamento de falhas.

Ge e Fang (1988). Descrevem uma nova concepção para detecção de componentes sujeitos a falhas via observação robusta. Dado um modelo matemático consistindo de “n” componentes no qual podem ser acoplados pelos estados não estimados, determinam o projeto de sistemas para monitorar a operação destes “n” componentes e detecção de falhas. Para um sistema observável, alguns componentes de primeira ordem ou ordem superior podem ser

monitorados para diagnose sem informação sobre possíveis modos de falhas. Devido a robustez dos observadores analisam alguns fatores como : erros de linearização, erros de medida, ruídos, erros numéricos, etc.

Stein e Park (1988). Analisam que um observador pode simultaneamente identificar variáveis de estados e entradas desconhecidas de um sistema linear invariante no tempo se as condições para a existência deste observador são deriváveis. A técnica é empregada verificando-se que o efeito do ruído diminui no resultado estimado.

Gertler (1988). Este trabalho faz uma revisão de modelos baseados na detecção e isolamento de falhas em sistemas complexos como: vazamentos, deterioração de equipamentos, erros de calibração, etc. Os métodos são baseados em redundância analítica, reforçados pelos modelos matemáticos dos sistemas. Utilizam geração de resíduos e geração de sinal através de testes estatísticos, não apresentando aplicações.

Sotelo Jr e Lopes (1988). Apresentam resultados do refinamento aplicado à solução da equação algébrica de Riccati a partir do método de decomposição espectral. Os resultados mostram que o resíduo na solução é consideravelmente menor e recupera a simetria nas matrizes de covariância.

Park e Stein (1989). Desenvolvem um observador otimizado para regime permanente, minimizando o seu erro. Utilizam um modelo discreto, linear, invariante no tempo com entradas desconhecidas. Esta técnica garante erro mínimo de covariância para observadores lineares sujeitos a entradas ruidosas, trabalhando com melhores posicionamentos dos sensores nos sistemas em monitoramento.

Misawa e Hedrick (1989). Apresentam um estudo da arte sobre observadores não lineares. A utilização destes observadores em tempo real é avaliada em termos de suas necessidades computacionais “on-line”. Eles concluem que todos os métodos tem seus aspectos positivos e negativos, mesmo em relação às técnicas utilizadas em sistemas lineares. Alguns necessitam de conhecimento de modelos ditos “perfeitos”, computadores com grande capacidade de memória e alguns métodos não garantem a estabilidade do Sistema.

Frank (1990). Apresenta uma revisão sobre diferentes conceitos de modelos baseados na detecção e isolamento de falhas em processos dinâmicos através de redundância analítica. Frisa os efeitos que podem levar a alarmes ou falsos alarmes: a) Falhas nos atuadores ou em componentes da planta dinâmica ou em sensores. b) Erros de modelo entre Sistema real e modelo matemático. c) Perturbações nas medidas.

Frank e Seliger (1991). Apresentam aproximação por redundância analítica para detecção e isolamento de falhas em processos automáticos. Descrevem brevemente várias técnicas utilizadas. Mostram que o desenvolvimento destas técnicas chegou a um estágio onde aplicações práticas têm que ser realizadas para resultar um aceite na indústria.

Jabbari e Schmitendorf (1991). Investigam a possibilidade de determinação de uma lei de controle linear robusta quando o estado completo não pode ser medido e Observadores são implementados para estimá-lo. Os observadores são projetados utilizando-se duas equações de Riccati.

Priel et al (1991). Analisam um Observador de ordem mínima de tal forma que o sistema mantenha sua observabilidade. Utilizam erro de estimação mínimo na variância e a estrutura deste observador depende fortemente da geometria do Sistema.

Isermann e Freyermuth (1991). Apresentam um processo de diagnose de falhas baseado no conhecimento do modelo do Sistema. Utilizam princípios para diagnose de falhas com estimação de parâmetros. A solução do problema analítico utiliza um processo de estimação de parâmetro e a detecção de mudanças nos coeficientes do processo, que são indícios de falhas.

Isermann e Freyermuth (1991). Estudam experimentalmente uma bomba centrífuga com motor d.c. e um robô industrial, apresentando resultados práticos, através da utilização de método de estimação de parâmetros. A solução do problema analítico começa com a estimação do processo dinâmico, cálculo dos coeficientes do processo e utilizam um critério de decisão através de testes estatísticos.

Jalfon e Halevi (1992). Trabalham com problemas de observadores para sistemas lineares com entradas determinísticas e ruídos coloridos no processo. A estimação otimizada do estado resulta em um aumento da dimensão do sistema, acarretando em um observador de dimensão maior. A solução consiste na resolução das equações de Riccati e Lyapunov modificadas.

Park et al (1994). Descrevem uma metodologia de detecção de falhas utilizando filtros, equivalente à combinação de dois observadores de estado desacoplados, utilizando as teorias já desenvolvidas para observadores convencionais como ferramentas auxiliares. O problema de detecção de falhas utilizando filtros é reformulado e reinterpretado através de técnica utilizando-se autovalores e autovetores.

Park et al (1994). Também desenvolvem expressões para detecção de falhas utilizando filtros definindo um direcionamento para a possível falha. Uma importante consequência destes resultados é que eles permitem a formação de um sistema ótimo para detecção com filtros, no que diz respeito ao processo e medidas de ruídos. A formulação é estendida, incluindo perturbações nos modelos resultando em uma formulação que descreve com mais realismo o sistema em estudo.

Huh e Stein (1994). Descrevem uma metodologia para a verificação do ruim ou bom condicionamento dos observadores utilizados para monitoramento de sistemas. Os autores mostram que a performance de um observador pode ser caracterizada quantitativamente por índices e que o índice de performance pode ser representado por um único índice: a condição de um número da matriz do observador de estado. Demonstram que os efeitos destes fatores na performance do observador são governados por três índices: 1) A condição de um número da matriz do observador em termos da norma L_2 . 2) A condição de um número da matriz modal do observador em termos da norma L_1 . 3) O produto interno dos autovetores da esquerda e direita correspondentes aos pólos dominantes do observador. Finalmente mostram que a condição de um número da matriz modal do observador em termos da norma L_2 é o índice principal de performance dos observadores de estado.

Howell (1994). Descreve uma nova metodologia para diagnose de falhas em plantas com poucas informações, seja quanto ao modelo, seja pela quantidade de sensores possíveis

de se analisar. A aproximação é baseada em dois princípios: redistribuição e número mínimo de informações. Partindo-se do princípio de que o modelo impreciso manifesta-se como uma distribuição errônea de massa e energia. Diferentes tipos de falhas e modelos imprecisos resultarão em diferentes redistribuições.

Ding et al (1994). Trabalham com parametrização de observadores lineares e estimação de erros dinâmicos. Com o desenvolvimento da parametrização de observadores, problemas relacionados com a construção dos mesmos têm sido estudados resultando em um esquema de projeto de um observador global. A parametrização do erro de estimação é importante ferramenta para resolver problemas de estimação robusta tal como observadores com entradas desconhecidas.

Cho et al (1994). Desenvolve um algoritmo recursivo para identificação de modelos na forma de estado.

Aldeen e Trinh (1994). Apresentam um método de projeto de observador de estado simples e sistemático. O sistema completo é particionado em subsistemas, contendo subconjuntos do vetor de estado. A dinâmica do observador é derivada do modelo do subconjunto a ser estimado. É mostrado que a única condição para este projeto é que o modelo derivado tem que ser observável. Trabalha com observadores de estado de ordem reduzida e mostra que estes podem apresentar a mesma performance dos observadores de ordem completa.

Frank e Ding (1994). Apresentam métodos para geração de resíduos e avaliação para modelos baseados em diagnose de falhas em sistemas dinâmicos lineares no domínio da frequência.

Lyashenko e Ryashko (1995). Investigam um observador de estado de ordem reduzida, adicionando ruído aleatório com intensidade conhecida. Verificam a variação mínima na estimação de estado em um sistema linear discreto, invariante no tempo. Mostram a estabilidade do modelo reduzido na presença do ruído.

Shouse (1995). Utiliza de um observador discreto baseado na inversão do estado para mapear as medidas, constrói um observador de ordem reduzida e compara com um Observador de ordem completa. A comparação mostra que embora o observador de ordem reduzida apresente alguns erros de aproximação, ele também consegue uma redução no tempo computacional.

Sheikholeslam (1995). Propõe uma família de novos identificadores que exploram, *a priori*, as dependências dos parâmetros conhecidos. A maior contribuição é que esta família de observadores exibe melhor performance transiente do que os identificadores convencionais.

Huh e Stein (1995). Verificam os índices de performance das matrizes dos observadores de estado e projetam um observador bem condicionado para um sistema com saída simples. A metodologia é baseada no fato de que uma pequena variação nos autovalores, trabalhando-se com seus distanciamentos, pode levar a pequenos valores nos índices de performance.

Isermann (1995). Apresenta diferentes métodos e técnicas de detecção de falhas que podem ser aplicadas baseados na informação extraída da medida direta dos sinais. Apresenta as vantagens e desvantagens de cada metodologia aplicada. Como exemplo de aplicação dos métodos por ele descritos, utiliza-se estimação de estado e de parâmetros e aplicação de lógica fuzzy em uma máquina ferramenta, obtendo bons resultados em ambas metodologias.

Hou e Muller (1995). Apresenta uma nova aproximação para o projeto de observadores de Luenberger. As condições requeridas neste projeto são dadas em termos do sistema original de matrizes. Este projeto avalia casos mais gerais do que os descritos anteriormente.

Kinnaert e Hanus (1995). Apresenta uma metodologia para detecção de falhas em sistemas instáveis. Mostra que é muito difícil projetar um gerador de resíduos para sistemas instáveis devido a discrepância entre os valores estimados e medidos.

Ciccarella et al (1995). Estende resultados desenvolvidos anteriormente e apresenta um observador robusto para sistemas não lineares discretos no tempo. Combina estimação de parâmetro e de estado.

Elmas e La Parra (1996). Neste artigo, é desenvolvido um algoritmo para observadores robustos baseado na teoria estendida de observadores de Luenberger, no qual estima todos os estados eletromagnéticos e eletromecânicos de um sistema.

Chen e Patton (1996). Estuda um filtro otimizado e robusto para problemas de diagnose de falhas em sistemas estocásticos com distúrbios desconhecidos. É estudado um observador que pode produzir variância mínima em sistemas com ruídos e distúrbios desconhecidos. Um teste estatístico é aplicado para examinar o resíduo e na diagnose de falhas.

Kovacevic et al (1996). Trabalham com o problema de observação simultânea. Dado um conjunto de plantas com funções de transferência distintas, desenvolvem um observador comum que possa observar os estados de cada uma destas plantas. Alguns problemas podem ocorrer devido a estabilização simultânea necessária no processo.

Cooper e Desforges (1996). Métodos de autocorrelação são estendidos para identificar parâmetros físicos do sistema utilizando entradas aleatórias desconhecidas. Mostram como esta aproximação pode ser utilizada para identificar parâmetros em modelos não lineares.

Yao et all (1996). Apresentam um projeto de observadores para sistemas com atraso no tempo. A fatorização aproximada é utilizada para parametrizar todos os observadores e erros dinâmicos do sistema.

Weston e Norton (1997). Apresentam uma metodologia considerando-se distúrbios os quais podem ser representados por mudanças do tipo degrau em um estado de um sistema linear, discreto no tempo. Esta técnica oferece uma simples e flexível maneira de descobrir mudanças bruscas em estado, entradas ou parâmetros de um sistema linear discreto no tempo.

Corless e Tu (1997). Utilizando somente a medida na saída, eles apresentam um observador simples que pode estimar para uma determinada acuracidade desejada, o estado do sistema e o distúrbio na entrada.

Yao et al (1997). Apresentam um projeto para observadores de estado em sistema de retroalimentação com entradas em atraso no tempo utilizando fatorização aproximada no domínio da frequência.

Minamide et al (1997). Este trabalho caracteriza todas as funções dos observadores para descrição do sistema. Com a função do observador formulada no domínio da frequência, soluciona-se o problema utilizando propriedades de estabilidade linear das equações matriciais.

As referências mais utilizadas neste trabalho foram: [4], [11], [12], [15], [16], [20], [22], [25], [27], [31], [33], [34], [36], [37], [45], [49], [50], [51], [52], [63], [64], [68], [72] e [74].

1.3 Proposta do Trabalho

Diante desta revisão da literatura pode-se notar que os observadores de estado têm sido muito utilizados nos últimos anos, principalmente para monitoramento em sistemas de controle. Verifica-se a existência de muitos trabalhos teóricos sem comprovação experimental das metodologias desenvolvidas e a grande maioria utiliza observadores de estado para controle de sistemas ou somente para detecção de falhas em instrumentos e sensores.

Propõe-se projetar observadores de estado que apresentem bom desempenho transiente e em regime permanente e que possam monitorar todos os parâmetros do sistema sujeitos a falhas. Outro problema existente nestas técnicas de diagnose de falhas utilizando-se observadores de estado é a localização exata do componente em processo de falha, que também é desenvolvido e analisado neste trabalho. Propõe-se também reconstruir os estados não medidos, seja em pontos de difícil acesso ou economicamente inviáveis. Desta forma, pode-se monitorar setores do sistema sem a medida específica de alguns estados.

Escolhem-se parâmetros de interesse sujeitos a falhas, projetando um observador Global otimizado para análise de todo o sistema, considerando possíveis perturbações aleatórias na excitação, na resposta e falhas nos sensores. Projeta-se também observadores robustos a estes parâmetros de interesse, que localizam possíveis falhas ou irregularidades no sistema, onde cada observador robusto é representado por um conjunto de equações diferenciais ordinárias.

O termo “falha” utilizado neste trabalho é definido com sendo a alteração de parâmetros físicos existentes nos sistemas mecânicos, como por exemplo: diminuição de rigidez, amortecimento, etc.

Para componentes que necessitem de um acompanhamento constante por suas grandes solicitações ou falhas constantes, montam-se observadores com um sistema de alarmes que acompanham o processo em um sistema automático para detecção e localização de falhas desenvolvido neste trabalho. Para os sistemas simulados e experimental, faz-se análises da performance transiente e em regime permanente, excitando-se os sistemas com força impulsiva, força senoidal, ruído aleatório, combinações dos mesmos, etc. Os parâmetros do sistema são inicialmente identificados pelo método das séries de Fourier, no domínio do tempo [54]. Os resultados foram bons quando comparados com outros métodos e pôde-se também verificar os resultados através de uma bancada de testes.

1.4 Divisão do Trabalho

A seguir apresenta-se um resumo dos capítulos apresentados neste trabalho:

Capítulo 1

Introdução e Revisão da Literatura: Apresenta uma introdução quanto a relevância do tema proposto e uma revisão cronológica da literatura, de 1964 (observadores de Luenberger) até 1997.

Capítulo 2

Modelagem Teórica: Apresenta o método dos observadores de estado, o sistema de otimização através dos índices de performance e condicionamento das matrizes dos

observadores, o método das séries de Fourier para identificação de parâmetros e o item metodologia, que apresenta as técnicas utilizadas para o desenvolvimento do banco de observadores robustos e otimizados.

Capítulo 3

Simulação Computacional e Discussões: Apresenta inicialmente 3 fluxogramas completos de todas as etapas realizadas do início até a finalização deste trabalho, desde a identificação dos parâmetros para o ajuste de modelos, otimização dos observadores e criação de um banco de observadores em uma unidade de decisão lógica. São apresentados também vários exemplos simulados analisando-se os transientes e o regimes permanentes com e sem influência de ruído aleatório na entradas dos sistemas.

Capítulo 4

Análise Experimental e Discussões: Apresenta a bancada experimental construída em todas as suas etapas de análise. Foi construído um sistema de mesas vibratórias constituídas de lâminas metálicas para simulação de possíveis falhas com retirada de algumas destas lâminas. Foram feitos ensaios com o sistema excitado harmonicamente na mesa inferior e excitado com ruído na mesa intermediária e sistema excitado somente com ruído na mesa inferior.

Capítulo 5

Conclusões e Sugestões para próximos trabalhos: Apresenta as conclusões a respeito do trabalho desenvolvido com sugestão de prosseguimento do mesmo.

Capítulo 6

Referências Bibliográficas: Apresenta as referências utilizadas neste trabalho em ordem alfabética.

1.5 Publicações Geradas

A seguir são apresentados os artigos publicados, provenientes deste trabalho:

MELO, G. P. & PEDERIVA, R., Fault Detection and Isolation via Robust Observation for Systems with Random Noises, *3^{er} Congresso Interamericano de Computacion Aplicada a La Industria de Procesos - CAIP 96*, Cordoba, Argentina, pp 59-62, 1996.

MELO, G. P. & PEDERIVA, R., Detection of Faulty Components via Well-Conditioned Robust Observer for Systems with Random Noises, *Proceedings of 7th International Conference on Dynamic Problems*, Angra dos Reis, Rio de Janeiro, pp 205-207, 1997.

MELO, G. P. & PEDERIVA, R., Well - Conditioned Robust Observer for Detection of Faulty Systems Components, *Proceedings of the 15th International Modal Analysis Conference (IMAC)*, Orlando, Florida, Vol.II, pp 1899-1903, 1997.

MELO, G. P. & PEDERIVA, R., Diagnose de Falhas Através de Observadores de Estado em Sistemas com Parâmetros Desconhecidos, *Proceedings of the XIV Brazilian Congress of Mechanical Engineering, Bauru, São Paulo*, 1997.

CAPÍTULO 2

MODELAGEM TEÓRICA

2.1 Método dos Observadores de Estado

Em muitos sistemas de controle é física ou economicamente inviável a instalação de todos os transdutores necessários à medida de todas as variáveis de estado. Quando a metodologia dos observadores de estado é analisada, verifica-se que os mesmos têm a capacidade de reconstrução dos estados não acessíveis ou inviáveis. A condição necessária para estas reconstruções é que todos os estados sejam observáveis [49],[51].

2.1.1 Controlabilidade e Observabilidade

Controlabilidade

Segundo (D'Azzo e Houpis, 1988) um sistema é dito completamente controlável se, qualquer que seja o instante inicial t_0 , é possível transferir todo estado inicial $\{x(t_0)\}$ para qualquer estado final $\{x(t_f)\}$ num tempo finito $t_f > t_0$ por intermédio de um vetor de excitação $\{u(t)\}$ não sujeito a restrições. Um vetor de excitação de controle é dito não restrito quando não há limitações quanto à amplitude dos valores de $\{u(t)\}$. Esta definição implica que $\{u(t)\}$ é capaz de influenciar cada uma das variáveis de estado na expressão:

$$\{x(t)\} = [\Phi(t - t_0)] \{x(t_0)\} + \int_{t_0}^t [\Phi(t - \tau)][B]\{u(\tau)\}d\tau \quad (2.1)$$

Isto requer que:

$$\text{Posto } [M_c] = \text{Posto de } \begin{bmatrix} [B] & [A][B] & \dots & [A]^{n-1}[B] \end{bmatrix} = n \quad (2.2)$$

Onde n é a ordem do sistema, $[A]$ é a matriz dinâmica e $[B]$ a matriz de entradas.

Observabilidade

Um sistema é dito completamente observável se todo estado inicial $\{x(t_0)\}$ pode ser determinado exatamente a partir de medidas da resposta $\{y(t)\}$ durante um intervalo de tempo finito $t_0 \leq t \leq t_f$. Esta definição indica que todas as variáveis de $\{x(t)\}$ influenciam a resposta $\{y(t)\}$:

$$\{y(t)\} = [C_{me}] \{x(t)\} = [C_{me}] [\Phi(t-t_0)] \{x(t_0)\} + [C_{me}] \int_{t_0}^t [\Phi(t-\tau)] [B] \{u(\tau)\} d\tau \quad (2.3)$$

Onde $[C_{me}]$ é a matriz de medidas e o estado inicial $\{x(t)\}$ é o resultante das excitações de controle aplicadas antes de t_0 .

Pode-se mostrar que o sistema é completamente observável se a matriz de observabilidade apresenta a seguinte propriedade:

$$\text{Posto } [M_0] = \text{Posto de } \begin{bmatrix} [C_{me}]^T & [A]^T [C_{me}]^T & [A^T]^2 [C_{me}]^T & \dots & [A^T]^{n-1} [C_{me}]^T \end{bmatrix} = n \quad (2.4)$$

A seguir, descrevem-se alguns tipos mais comuns de Observadores: Observador Trivial, Observador Identidade e Observador de Ordem Reduzida.

2.1.2 Observador Trivial

Uma solução trivial para o problema de estimação de estado de um sistema é construir uma cópia do sistema original. Se, por exemplo, o sistema original é:

$$\{\dot{x}(t)\} = [A] \{x(t)\} + [B] \{u(t)\} \quad (2.5)$$

O observador deveria ser:

$$\{\bar{\dot{x}}(t)\} = [A] \{\bar{x}(t)\} + [B] \{u(t)\} \quad (2.6)$$

Se $\{x(0) = \bar{x}(0)\}$, o modelo seguirá exatamente o sistema original. O problema com esta técnica é que o erro não reduz rapidamente. Pode-se verificar que:

$$[\{\bar{\dot{x}}(t)\} - \{\dot{x}(t)\}] = [A][\{\bar{x}(t)\} - \{x(t)\}] \quad (2.7)$$

Através da equação (2.7), verifica-se que o erro somente tende a zero se o sistema original é assintoticamente estável e na velocidade determinada pelos autovalores do sistema original, limitando seriamente a metodologia empregada.

2.1.3 Observador Identidade

Para descrição do observador identidade, considera-se o seguinte sistema linear e invariante no tempo apresentado pela equação (2.5):

$$\{\dot{x}(t)\} = [A] \{x(t)\} + [B] \{u(t)\}$$

e

$$\{y(t)\} = [C_{me}] \{x(t)\} + [D] \{u(t)\} \quad (2.8)$$

Onde $[A] \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $[B] \in \mathbb{R}^{n \times p}$, $[C_{me}] \in \mathbb{R}^{k \times n}$, $[D] \in \mathbb{R}^{k \times p}$, sendo n a ordem do sistema, p o número de entradas $\{u(t)\}$, e k o número de saídas $\{y(t)\}$. O sistema é assumido como totalmente observável.

Um observador para este sistema é dado por:

$$\{\bar{\dot{x}}(t)\} = [A] \{\bar{x}(t)\} + [B] \{u(t)\} + [L] (\{y(t)\} - \{\bar{y}(t)\}) \quad (2.9)$$

$$\{\bar{y}(t)\} = [C_{me}] \{\bar{x}(t)\} \quad (2.10)$$

onde $[L]$ é a matriz do observador de estado.

O erro de estimação de estado fica:

$$\{e(t)\} = \{\bar{x}(t)\} - \{x(t)\} \quad (2.11)$$

e o erro de estimação na saída (resíduo):

$$\{\epsilon(t)\} = \{\bar{y}(t)\} - \{y(t)\} \quad (2.12)$$

Substituindo as equações (2.5), (2.8), (2.9) e (2.10) em (2.11) e (2.12) tem-se:

$$\{\dot{e}(t)\} = ([A] - [L][C_{me}]) \{e(t)\} + [L] [D] \{u(t)\} \quad (2.13)$$

$$\{\epsilon(t)\} = [C_{me}] \{e(t)\} - [D] \{u(t)\} \quad (2.14)$$

onde $\{\dot{e}(t)\} = d\{e(t)\}/dt$ representa a evolução do erro do observador.

Na equação (2.13) verifica-se que se $[D] = [0]$, o erro do observador não fica dependente da excitação do sistema. Os autovalores da matriz do observador $[[A] - [L][C_{me}]$ são usualmente escolhidos à esquerda dos autovalores da matriz dinâmica $[A]$, no plano complexo, para garantir a estabilidade do sistema e rápida convergência.

2.1.4 Observador de Ordem Reduzida

Pode-se verificar que o observador identidade descrito anteriormente apresenta um certo grau de redundância. Ele reconstrói todas as n variáveis do sistema original, mesmo que algumas delas já sejam conhecidas. O objetivo é construir um observador que tenha $(n - k)$ variáveis de estado, onde k é o número de medidas.

Considera-se novamente o sistema totalmente observável apresentado pelas equações (2.5) e (2.8):

$$\{\dot{x}(t)\} = [A] \{x(t)\} + [B] \{u(t)\}$$

e

$$\{y(t)\} = [C_{me}] \{x(t)\} + [D] \{u(t)\}$$

Assume-se agora que a matriz de medidas $[C_{me}]$ de ordem $(k \times n)$ tem posto k , correspondendo à condição de que k medidas são linearmente independentes.

Seja $[V]$ uma matriz de ordem $\{(n - k) \times (n)\}$, onde k é a dimensão de $\{y(t)\}$ e

$$[PT] = \begin{bmatrix} [V] \\ [C_{me}] \end{bmatrix} \text{ é não singular.}$$

Introduzindo uma mudança de variáveis, tem-se:

$$\{\alpha(t)\} = [PT] \{x(t)\} \tag{2.15}$$

Este novo vetor de estado $\{\alpha(t)\}$ pode ser subdividido como:

$$\{\alpha(t)\} = \begin{bmatrix} \{w(t)\} \\ \{y(t)\} \end{bmatrix} \tag{2.16}$$

Onde $\{w(t)\}$ é de dimensão $(n - k)$ e $\{y(t)\}$ é o vetor de saída com dimensão (k) .

Após a transformação de variável, o sistema de matrizes pode ser reescrito como:

$$\begin{bmatrix} \{\dot{w}(t)\} \\ \{\dot{y}(t)\} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [A_{11}] & [A_{12}] \\ [A_{21}] & [A_{22}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \{w(t)\} \\ \{y(t)\} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [B]_1 \\ [B]_2 \end{bmatrix} \{u(t)\} \quad (2.17)$$

Pode-se extrair deste sistema, um subsistema de ordem $(n - k)$ que tem como entradas as quantidades conhecidas $\{u(t)\}$ e $\{y(t)\}$. Neste caso, um subsistema com características polinomiais arbitradas pode ser selecionado, multiplicando-se a parte inferior da equação (2.17) por uma matriz arbitrária $[E]$ de ordem $[(n - k) \times k]$ e subtraindo da parte superior:

$$\begin{aligned} \{w(t)\} - [E] \{\dot{y}(t)\} &= ([A_{11}] - [E] [A_{21}]) \{w(t)\} \\ &+ ([A_{12}] - [E] [A_{22}]) \{y(t)\} + ([B_1] - [E] [B_2]) \{u(t)\} \end{aligned} \quad (2.18)$$

A equação (2.18) pode ser reescrita como:

$$\begin{aligned} \{w(t)\} - [E] \{\dot{y}(t)\} &= ([A_{11}] - [E] [A_{21}]) (\{w(t)\} - [E] \{y(t)\}) \\ &+ ([A_{11}] [E] - [E] [A_{21}] [E] + [A_{12}] - [E] [A_{22}]) \{y(t)\} \\ &+ ([B_1] - [E] [B_2]) \{u(t)\} \end{aligned} \quad (2.19)$$

Chamando $\{g(t)\} = \{w(t)\} - [E] \{y(t)\}$, tem-se:

$$\begin{aligned} \{\dot{g}(t)\} &= ([A_{11}] - [E] [A_{21}]) \{g(t)\} \\ &+ ([A_{11}] [E] - [E] [A_{21}] [E] + [A_{12}] - [E] [A_{22}]) \{y(t)\} \\ &+ ([B_1] - [E] [B_2]) \{u(t)\} \end{aligned} \quad (2.20)$$

Nesta equação $\{g(t)\}$ é desconhecido, enquanto $\{y(t)\}$ e $\{u(t)\}$ caracterizam as entradas conhecidas. O observador de estado de dimensão $(n - k)$ para a equação (2.17) é formado através da equação (2.20). Tem-se, portanto:

$$\begin{aligned} \{\bar{\dot{x}}(t)\} &= ([A_{11}] - [E] [A_{21}]) \{\bar{x}(t)\} \\ &+ ([A_{11}] [E] - [E] [A_{21}] [E] + [A_{12}] - [E] [A_{22}]) \{y(t)\} \\ &+ ([B_1] - [E] [B_2]) \{u(t)\} \end{aligned} \quad (2.21)$$

Subtraindo a equação (2.20) de (2.21), tem-se:

$$\{\bar{\dot{x}}(t)\} - \{\dot{g}(t)\} = ([A_{11}] - [E] [A_{21}]) (\{\bar{x}(t)\} - \{g(t)\}) \quad (2.22)$$

O estado $\{\bar{x}(t)\}$ do Observador tende a $\{g(t)\}$ na velocidade determinada pelos autovalores da matriz $[[A_{11}] - [E] [A_{21}]]$.

A partir do vetor de estado $\{\bar{x}(t)\}$ do observador, o estado original da equação (2.17) é estimado por $\{\bar{w}(t)\}$ e $\{\bar{y}(t)\}$, determinados por:

$$\{\bar{w}(t)\} = \{\bar{x}(t)\} + [E] \{y(t)\} \quad (2.23)$$

$$\{\bar{y}(t)\} = \{y(t)\} \quad (2.24)$$

O vetor de estado $\{\bar{x}(t)\}$, juntamente com as medidas originais de $\{y(t)\}$ fornecem informações suficientes para construção de uma aproximação para o estado do sistema original.

2.1.5 Observador Robusto a um Determinado Parâmetro

Tanto o observador global, que analisa todo o sistema e consegue somente detectar algum tipo de irregularidade, quanto o observador robusto a um determinado parâmetro sujeito a falhas, que consegue localizar estas irregularidades, são determinados através das rotinas computacionais desenvolvidas neste trabalho, apresentadas em fluxogramas no Capítulo 3.

Será apresentada uma sequência preliminar de etapas através de um exemplo, utilizando-se o sistema mecânico de 2 graus de liberdade apresentado na Figura 2.1, somente para visualização da montagem do observador robusto.

O sistema possui as seguintes matrizes de massa $[M]$, rigidez $[K]$ e amortecimento $[C]$:

$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix}, [C] = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 + c_3 \end{bmatrix}, \text{ e } [K] = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 + k_3 \end{bmatrix}$$

O deslocamento $x_1(t)$ relaciona-se com o movimento da massa m_1 e $x_2(t)$ com a massa m_2 .

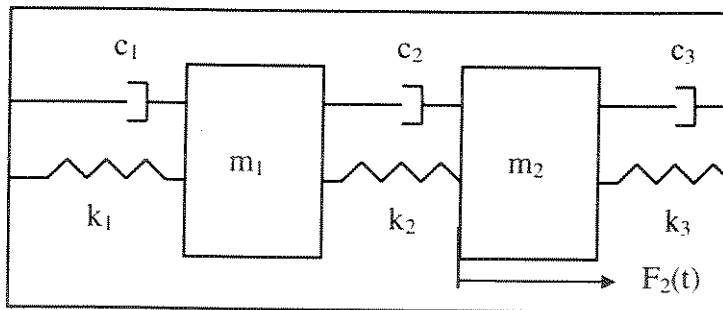


Figura 2.1 - Sistema de Dois Graus de Liberdade

A matriz dinâmica do sistema fica:

$$[A]_{2n \times 2n} = \begin{bmatrix} [0]_{n \times n} & \vdots & [I]_{n \times n} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ -([M]^{-1}[K])_{n \times n} & \vdots & -([M]^{-1}[C])_{n \times n} \end{bmatrix} \text{ e } [B]_{2n \times n} = \begin{bmatrix} [0]_{n \times n} \\ [M]^{-1}_{n \times n} \end{bmatrix}.$$

$$\text{Tem-se, portanto: } [A] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -(k_1 + k_2)/m_1 & k_2/m_1 & -(c_1 + c_2)/m_1 & c_2/m_1 \\ k_2/m_2 & -(k_2 + k_3)/m_2 & c_2/m_2 & -(c_2 + c_3)/m_2 \end{bmatrix}$$

Esta matriz dinâmica $[A]$ é utilizada no projeto do observador de estado global, que somente detecta possíveis falhas no sistema a ser analisado, sendo que no projeto dos observadores de estado robustos, exclui-se estes parâmetros sujeitos a falhas da matriz dinâmica. Supondo-se que a rigidez k_1 possa falhar durante o processo, a matriz dinâmica utilizada para o projeto do observador robusto não conterá o parâmetro k_1 . Desta forma, tem-se:

$$[A_1] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -(k_2)/m_1 & k_2/m_1 & -(c_1 + c_2)/m_1 & c_2/m_1 \\ k_2/m_2 & -(k_2 + k_3)/m_2 & c_2/m_2 & -(c_2 + c_3)/m_2 \end{bmatrix}$$

Verifica-se que o parâmetro k_1 já não faz parte da matriz dinâmica $[A_1]$

O observador de estado robusto a k_1 é projetado e otimizado através da matriz dinâmica $[A_1]$ e a matriz de medidas é $[C_{me}] = [1 \ 0 \ 0 \ 0]$, medindo-se somente $x_1(t)$ e reconstruindo $x_2(t)$.

Isto deve ser confirmado através do “rank” da matriz de observabilidade, que deve resultar em um valor igual a ordem do sistema. Se o observador de estado é de ordem reduzida, o “rank” deve resultar em um valor igual a ordem do sistema menos os valores medidos.

A seguir são calculados os autovalores da matriz dinâmica $[A_1]$, pois os autovalores impostos no projeto dos observadores de estado devem estar a esquerda dos autovalores de $[A_1]$ para garantir estabilidade e rápida convergência. Deve-se analisar o autovalor de maior parte real negativa, em módulo, e utilizar autovalores a partir deste valor, pois se os autovalores são impostos aleatoriamente e com valores elevados, podem resultar em problemas de ordem numérica na resolução do sistema de equações diferenciais.

Pelas equações (2.9) e (2.10), verifica-se a necessidade do cálculo da matriz $[L]$ do observador robusto ao parâmetro k_1 .

O resultado final é um conjunto de equações diferenciais ordinárias:

$$\{\ddot{\bar{x}}(t)\} = [A] \{\bar{x}(t)\} + [B] \{u(t)\} + [L] (\{\bar{y}(t)\} - \{\bar{y}(t)\})$$

$$\{\bar{y}(t)\} = [C_{me}] \{\bar{x}(t)\}$$

Neste momento calcula-se o índice de performance, que analisa de forma quantitativa o condicionamento da matriz do observador $[[A] - [L][C_{me}]]$ para verificação da necessidade ou não da realização de um novo projeto. Este tópico é descrito e analisado a seguir e toda a sequência de análise para o projeto dos observadores de estado robustos para localização de falhas é descrita através dos fluxogramas 3.1, 3.2 e 3.3 no Capítulo 3.

2.2 Índices de Performance e Condicionamento das Matrizes dos Observadores

Pode-se verificar na literatura, que os projetos de observadores de estado para sistemas com respostas permanentes são mais desenvolvidos que em sistemas com respostas transientes. Mesmo assim, alguns projetos ainda continuam inadequados, pois na prática os parâmetros do sistema real podem mudar durante a operação, existem falhas nos instrumentos, sensores, ruídos de medidas, etc. Os efeitos destes fatores foram verificados por Howell [32], que mostrou que pequenos erros relativos no modelo podem causar erros de regime permanente desproporcionais na estimação do estado.

O objetivo é analisar índices de performance, obtidos através da teoria de norma de matrizes, que avaliem os efeitos que levam um observador de estado a se tornar mal condicionado e determinar um índice principal que seja utilizado como referência. Os índices de performance são índices obtidos através da análise da norma da matriz dos autovetores do sistema analisado. Se o valor deste Índice é próximo da unidade, o Sistema é dito bem condicionado, caso contrário é dito mal condicionado [33]. Este mal condicionamento das matrizes acarreta em uma sensibilidade elevada em relação a perturbações e erros de ordem numérica na resolução do sistema de equações diferenciais.

A seguir é analisada a performance transiente e em regime permanente dos observadores, bem como uma proposta para projeto otimizado de um observador de estado bem condicionado.

2.2.1 Performance Transiente dos Observadores de Estado

No trabalho proposto é muito importante analisar a transiente dos sistemas e suas performances, pois em alguns casos é muito difícil ou até impossível conseguir medir as forças de excitação atuantes. Desta forma, no transiente pode-se detectar e localizar as falhas utilizando uma força impulsiva através de um martelo de impacto, obtendo total controle da força de excitação atuante.

Sabe-se que a forma do erro na resposta transiente é dependente da amplitude inicial do erro de estimação da resposta do sistema ($de(t)/dt_{(t=0)}$). Se a magnitude inicial do erro varia

significativamente com condições iniciais desconhecidas, então a forma do transiente também varia e o sistema fica sensível a pequenas alterações, seja com pequenos ruídos, variações de parâmetros, etc [34]. Este efeito é representado por uma equação de estimação de erro, a qual é derivada da equação para um sistema linear sem perturbações, invariante no tempo:

$$\{\dot{x}(t)\} = [A] \{x(t)\} + [B]\{u(t)\} \quad (2.28)$$

$$\{y(t)\} = [C_{me}] \{x(t)\} \quad (2.29)$$

Onde $[A] \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $[B] \in \mathbb{R}^{n \times p}$, $[C_{me}] \in \mathbb{R}^{k \times n}$, sendo n a ordem do sistema, p o número de entradas $\{u(t)\}$ e k o número de saídas $\{y(t)\}$.

Um Observador para este sistema é dado por:

$$\{\bar{\dot{x}}(t)\} = [A] \{\bar{x}(t)\} + [B]\{u(t)\} + [L] (\{y(t)\} - \{\bar{y}(t)\}) \quad (2.30)$$

$$\{\bar{y}(t)\} = [C_{me}] \{\bar{x}(t)\} \quad (2.31)$$

onde $[L]$ é a matriz do observador [11].

O erro de estimação de estado fica:

$$\{e(t)\} = \{\bar{x}(t)\} - \{x(t)\} \quad (2.32)$$

e o erro de estimação na saída (resíduo):

$$\{\varepsilon(t)\} = \{\bar{y}(t)\} - \{y(t)\} \quad (2.33)$$

Substituindo as equações (2.28), (2.29), (2.30) e (2.31) em (2.32) e (2.33) tem-se:

$$\{\dot{e}(t)\} = ([A] - [L][C_{me}]) \{e(t)\} = [A_2] \{e(t)\} \quad (2.34)$$

onde

$[A_2] = [A] - [L][C_{me}]$ e $\{\dot{e}(t)\}$ representa a evolução do erro do observador.

Para caracterizar o modo transiente do observador para o erro de estimação inicial desconhecido $e(0) = x(0) - \bar{x}(0)$, a matriz do observador $[A_2]$ pode ser decomposta utilizando o método de decomposição de valores singulares [62]:

$$[A_2] = [U_{A2}] [\Sigma_{A2}] [V_{A2}]^T \quad (2.35)$$

Onde $[U_{A2}]$ e $[V_{A2}]$ são as matrizes singulares esquerda e direita respectivamente, que são definidas como:

$$[U_{A2}] = [\{u_1\} \{u_2\} \{u_3\} \dots \{u_n\}]_{A2}$$

$$[V_{A2}] = [\{v_1\} \{v_2\} \{v_3\} \dots \{v_n\}]_{A2}$$

e

$$[\Sigma_{A2}] = \text{Diag}[\{\sigma_1\} \{\sigma_2\} \{\sigma_3\} \dots \{\sigma_n\}]_{A2}$$

Utilizando as equações (2.34) e (2.35), pode-se descrever o índice $k_2[A_2]$, que é a condição da matriz do observador $[[A] - [L][C_{me}]]$ em termos da norma L_2 [7]:

$$k_2[A_2] = \{\sigma_1\}[A_2] / \{\sigma_n\}[A_2] \quad (2.36)$$

A condição da matriz do observador é o principal índice que descreve a sensibilidade do deslocamento inicial para a direção da estimação inicial. Se a condição do observador de estado é próxima da unidade, a amplitude inicial do erro transiente será proporcional a escolha da estimação inicial [33]. Caso contrário, a direcionalidade da estimação inicial afeta o modo transiente mais severamente deixando o sistema com mal condicionamento. O efeito da estimação inicial desconhecida sobre o tamanho do transiente é muito importante para o monitoramento de máquinas, podendo ser representado pelo máximo erro do transiente e é medido utilizando-se as propriedades da norma de uma matriz.

Supondo que a matriz do observador tenha autovalores distintos, o sistema pode ser representado por:

$$[[A]-[L][C_{me}]] [R] = [R] [M_0] \quad (2.37)$$

Onde:

$$[M_0] = \text{Diag}[\mu_1, \mu_2, \mu_3, \dots, \mu_n]$$

onde $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \dots, \mu_n$ são os autovalores da matriz $[[A]-[L][C_{me}]]$

e

$[R] = [\{r_1\}, \{r_2\}, \{r_3\}, \dots, \{r_n\}]$ são os autovetores

De acordo com Huh & Stein (1995), a condição de um número baseada na norma L_1 é representada por:

$$k_1[R] = \|R\|_1 \|R^{-1}\|_1 \quad (2.38)$$

2.2.2 Performance do Regime Permanente dos Observadores de Estado

Na análise do regime permanente de observadores de estado, verificam-se fatores de mal condicionamento como perturbações arbitrárias no sistema e erros sistemáticos nas medidas dos sensores.

A estabilidade do regime permanente do observador de estado é outro fator importante para o monitoramento de máquinas, porque o erro sistemático poderia ser interpretado como condição de falha. Os efeitos do fator de mal condicionamento sobre a magnitude do erro são expressos matematicamente para determinar um índice dominante para a performance do

observador. Mais especificamente, os efeitos são medidos pela magnitude do erro de estimação relativa e utilizando-se teorias de normalização de matrizes. O erro de estimação relativo é definido como a relação do erro do observador em função do modelo do sistema e os valores de estado do sistema real.

Supondo-se que a equação abaixo represente o sistema real e que a equação (2.28) represente o modelo do sistema com algumas incertezas na matriz $[A]$, tem-se:

$$\{\dot{x}(t)\} = [\hat{A}]\{x(t)\} + [B]\{u(t)\} \quad (2.39)$$

Utilizando as equações (2.35), (2.37) e (2.39) e aplicando-se as teorias de normalização de matrizes tem-se que o índice de performance quanto a perturbações arbitrárias no sistema e erros sistemáticos nas medidas dos sensores para o regime permanente pode ser descrito como a condição de um número da matriz do observador $[[A] - [L][C_{me}]]$ em termos da norma L_2 [7].

2.2.3 Índice Principal para o Bom Condicionamento dos Observadores de Estado

Para quantificar o condicionamento dos observadores de uma maneira simples, há a necessidade de um índice que represente todos os índices verificados anteriormente. Isto é necessário porque para um dado observador e um conjunto fixo de autovalores deste mesmo observador, não é simples selecionar a matriz $[L]$ minimizando-se todos os índices simultaneamente [7].

Existe um índice que domina a performance de todos os índices apresentados, que é a condição de um número dos autovetores da matriz $[R]$ em termos da definição da norma L_2 .

Ele é dado por:

$$k_2[R] = \|R\|_2 \|R^{-1}\|_2 \quad (2.40)$$

2.2.4 Projeto de Observadores de Estado Bem Condicionados para o Monitoramento de Sistemas

A seguir apresenta-se uma metodologia de projeto para transformar a matriz dinâmica dos observadores de estado em sub-matrizes bem condicionadas:

Através da equação (2.29), tem-se:

$$[C_{me}] = [I_k : 0] \quad (2.41)$$

Onde k é o número de saídas medidas.

Com a matriz $[C_{me}]$ definida, é conveniente separar a matriz $[A]$ em quatro blocos:

$$[A] = \begin{bmatrix} a_{1,1} & \cdots & a_{1,k} & \vdots & a_{1,k+1} & \cdots & a_{1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{k,1} & \cdots & a_{kk} & \vdots & a_{k,k+1} & \cdots & a_{k,n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \vdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{k+1,1} & \cdots & a_{k+1,k} & \vdots & a_{k+1,k+1} & \cdots & a_{k+1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n,1} & \cdots & a_{n,k} & \vdots & a_{n,k+1} & \cdots & a_{n,n} \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} [A_{kk}] & \vdots & [A_{kn}] \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ [A_{nk}] & \vdots & [A_{nn}] \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

Apresenta-se a seguir duas etapas para a seleção da matriz $[L]$ de tal forma que se obtenha um observador de estado bem condicionado: Minimização da norma da matriz $[A]$ e separação dos autovalores do observador.

Analisando-se o processo de minimização da norma da matriz $[A]$ e utilizando a norma de Frobenius [7], verifica-se que um bom caminho a ser seguido é transformar todos os elementos fora da diagonal em anti-simétricos. A análise é feita utilizando-se cada bloco da matriz dinâmica $[A]$ separadamente, o que contém os elementos de rigidez e o que contém os elementos de amortecimento.

Trabalha-se separadamente com cada um dos blocos da equação (2.42), $[A_{kk}]$, $[A_{nn}]$, $[A_{kn}]$ e $[A_{nk}]$.

Os blocos $[A_{nn}]$ e $[A_{qk}]$ são projetados por técnica de escalonamento. Pode-se definir, de acordo com Forsythe e Moler (1967), o escalonamento de uma matriz quadrada ($n \times n$) como:

$$[F'] = [D_1]^{-1} \cdot [F] \cdot [D_2] \quad (2.43)$$

Onde:

$$[D_1] = \text{Diag}[d_1^{(1)}, d_2^{(1)}, \dots, d_n^{(1)}]$$

e

$$[D_2] = \text{Diag}[d_1^{(2)}, d_2^{(2)}, \dots, d_n^{(2)}].$$

Portanto, utilizando a equação (2.28) tem-se:

$$[A'] = [S]^{-1} \cdot [A] \cdot [S] \quad (2.44)$$

Onde

$$[S] = \text{Diag}[s_1, s_2, \dots, s_n] \text{ e } s_i \neq 0 \text{ para } i = 1, \dots, n.$$

As equações (2.28) e (2.29), são então transformadas em:

$$\{\dot{x}'(t)\} = [A']\{x'(t)\} + [B']\{u(t)\} \quad (2.45)$$

e

$$\{y(t)\} = [C'_{me}]\{x'(t)\} \quad (2.46)$$

Onde

$$\{x'(t)\} = [S^{-1}]\{x(t)\},$$

$$[B'] = [S^{-1}][B],$$

$$[C'_{me}] = [C_{me}] [S],$$

e

$$[A'] = \begin{bmatrix} a_{1,1} & \cdots & a'_{1,k} & \vdots & a'_{1,k+1} & \cdots & a'_{1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a'_{k,1} & \cdots & a_{kk} & \vdots & a'_{k,k+1} & \cdots & a'_{k,n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \vdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a'_{k+1,1} & \cdots & a'_{k+1,k} & \vdots & a_{k+1,k+1} & \cdots & a'_{k+1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a'_{n,1} & \cdots & a'_{n,k} & \vdots & a'_{n,k+1} & \cdots & a_{n,n} \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} [A'_{kk}] & \vdots & [A'_{kn}] \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ [A'_{nk}] & \vdots & [A'_{nn}] \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

Verifica-se neste caso que os elementos da diagonal não são alterados pelo escalonamento e comprova-se que os autovalores da matriz $[A]$ permanecem os mesmos. A observabilidade do par $([A],[C_{me}])$ é preservada, entretanto a matriz dos autovetores $[R]$ é modificada para $[S]^{-1}[R]$.

As condições suficientes para o escalonamento do bloco da matriz $[A]_{n \times n}$ são as seguintes:

- Os zeros fora da diagonal principal são simétricos se ($a_{ij}=0$, então $a_{ji}=0$) e o número de par de zeros na matriz $[A]_{n \times n}$ é denotado por " r_1 ".

- Os sinais dos pares fora da diagonal e diferentes de zero são opostos.

Portanto, se o número de pares de zero fora da diagonal é menor do que $(n - k)$, isto é:

$$(n - k) (n - k - 1) / 2 - r_1 < (n - k), \quad (2.48)$$

onde n é o número de graus de liberdade do sistema e k é o número de medidas, existe pelo menos uma solução para cada s_i , $i = k + 1, \dots, n$, para o escalonamento da matriz da equação (2.47).

A proposta de escalonamento da matriz $[A]_{nn}$ é a seguinte:

$$[A]_{nn} \rightarrow [[S^{-1}][A][S]] \rightarrow [A']_{nn} =$$

$$= \begin{bmatrix} a_{k+1,k+1} & (S_{k+2}/S_{k+1})a_{k+1,k+2} & \cdots & (S_n/S_{k+1})a_{k+1,n} \\ (S_{k+1}/S_{k+2})a_{k+2,k+1} & a_{k+2,k+2} & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (S_{k+1}/S_n)a_{n,k+1} & \cdots & \cdots & a_{n,n} \end{bmatrix} \quad (2.49)$$

Verifica-se que os elementos da diagonal principal não são modificados e para os elementos fora da diagonal, a seguinte relação tem que ser satisfeita:

$$(s_i/s_j)^2 = -a_{ij}/a_{ji}, \quad i, j = k+1, \dots, n \quad \text{e} \quad i \neq j \quad (2.50)$$

Portanto, a matriz diagonal $[S]$ tem a seguinte forma:

$$[S] = \text{Diag} [1, 1, \dots, 1, S_{k+1}, S_{k+2}, \dots, S_n], \quad \text{e} \quad S_i \neq 0 \quad (2.51)$$

Para a determinação do bloco da matriz $[A']_{nk}$ utiliza-se a matriz do ganho do observador $[L]$. Se a matriz de saída $[C_{me}]$ é da forma da equação (2.41), somente as primeiras k colunas da matriz do observador $([A]-[L][C_{me}])$ podem ser modificadas pela matriz de ganho do observador de estado. Portanto, o observador é dividido em dois blocos:

$$[L] = \begin{bmatrix} l_{1,1} & \cdots & l_{1,k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{k,1} & \cdots & l_{k,k} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ l_{k+1,1} & \cdots & l_{k+1,k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{n,1} & \cdots & l_{n,k} \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} L_k \\ \cdots \\ L_{n-k} \end{bmatrix} \quad (2.52)$$

A matriz do observador tem a seguinte forma:

$$[A''] = [A'] - [L] [C_{me}] =$$

$$\begin{bmatrix} a''_{1,1} & \cdots & a''_{1,k} & \vdots & a'_{1,k+1} & \cdots & a'_{1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a''_{k,1} & \cdots & a''_{k,k} & \vdots & a'_{k,k+1} & \cdots & a'_{k,n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \vdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a''_{k+1,1} & \cdots & a''_{k+1,k} & \vdots & a'_{k+1,k+1} & \cdots & a'_{k+1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a''_{n,1} & \cdots & a''_{n,k} & \vdots & a'_{n,k+1} & \cdots & a'_{n,n} \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} A''_{kk} & \vdots & A'_{kn} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ A''_{nk} & \vdots & A'_{nn} \end{bmatrix} \quad (2.53)$$

Verifica-se que as últimas $(n - k)$ colunas não são alteradas pela subtração do produto das matrizes $[[L][C_{me}]]$ da matriz $[A']$.

Para seguir o caminho de transformar todos os elementos fora da diagonal em anti-simétricos, tem-se a seguinte relação:

$$a''_{ij} = a'_{ij} - l_{ij} = -a'_{ji} \quad (2.54)$$

Para o desenvolvimento dos elementos do bloco $[A'']_{kk}$ da matriz $[A'']$, o valor de $[L]$ da equação (2.52) deve ser seleccionado tal que os autovalores do observador de estado sejam bem separados na região requerida para a convergência da velocidade. É utilizado para o cálculo de $[L]$, o método do posicionamento das raízes [25], avaliando-se o valor da magnitude da menor parte real dos autovalores do observador para satisfazer as especificações de convergência. Desta forma, considera-se as seguintes relações:

$$a''_{ij} = -a''_{ji} \Rightarrow a'_{ij} - l_{ij} = -(a'_{ji} - l_{ji}) \quad (2.55)$$

De outra forma, para deixar a matriz do observador simétrica, as seguintes alterações devem ser feitas: Primeiro, no bloco $[A']_{nn}$, os sinais de todos os elementos diferentes de zero fora da diagonal devem ser os mesmos e os blocos $[A'']_{nk}$ e $[A'']_{kk}$ devem seguir as seguintes relações:

$$a''_{ij} = a'_{ij} - l_{ij} = a'_{ji} \quad (2.56)$$

e

$$a''_{ij} = a'_{ji} \Rightarrow a'_{ij} - l_{ij} = a'_{ji} - l_{ji} \quad (2.57)$$

Com esta metodologia verifica-se uma melhora significativa na performance dos observadores de estado. Se o projeto do novo observador de estado é desenvolvido utilizando-se a matriz dinâmica $[A]$ em sua forma original, teoricamente pode-se chegar a índices de performance muito próximos da unidade. Para os casos analisados neste trabalho, utilizou-se separadamente os blocos relativos aos elementos da rigidez e amortecimento, sendo que os Índices ficaram em torno de 30 a 40, melhorando também a sua performance, pois antes do novo projeto, os observadores de estado apresentaram índices de performance da ordem de 10^4 a 10^6 .

Esta alteração significativa nos índices de performance, deixando as matrizes dos observadores de estado com bom condicionamento, diminui o efeito de perturbações nos observadores, deixando-os menos sensíveis e consegue evitar que ocorram erros de ordem numérica na resolução do sistema de equações diferenciais.

Nos sistemas mecânicos, tem-se geralmente as matrizes de massa, rigidez e amortecimento. Neste caso, há a necessidade de duplicação da ordem do sistema para a construção da matriz dinâmica $[A]$, sendo que nesta matriz tem-se quatro blocos de submatrizes: matriz nula de ordem $(n \times n)$, matriz identidade $(n \times n)$, matriz de rigidez $[[M]^{-1}[K]]$ $(n \times n)$ e matriz de amortecimento $[[M]^{-1}[C]]$ $(n \times n)$. Neste caso, o processo de transformar a matriz $[A]$ em anti-simétrica fica prejudicado, sendo necessário utilizar separadamente cada bloco desta matriz (de rigidez e de amortecimento).

2.3 Método das Séries de Fourier para Identificação de Parâmetros

A ciência tem dedicado especial atenção nos últimos anos à construção de modelos matemáticos capazes de representar o comportamento dinâmico dos mais variados tipos de sistemas. Paralelamente, constata-se o grande interesse científico que tem despertado a obtenção de dados associados aos fenômenos em observação, que sejam capazes de levar a um maior conhecimento dos próprios fenômenos, permitindo a identificação de características que os representem convenientemente dentro dos modelos estabelecidos.

Particularmente, no caso dos sistemas mecânicos vibratórios, tem-se que descrever matematicamente seu comportamento dinâmico, partindo de modelos físicos preestabelecidos. Desta forma, escreve-se as chamadas equações do movimento, com base nas leis básicas que regem os fenômenos envolvidos. A análise dinâmica, feita em seguida, depende da integração de tais equações, o que pode ser feito tanto por métodos analíticos como numéricos. Assim, passa-se a conhecer a resposta do sistema a diferentes tipos de excitação, sendo possível, daquilo que se aprendeu na análise, elaborar recomendações de projeto, penetrando-se dentro da engenharia propriamente dita. Entretanto, comumente, nas equações diferenciais representativas dos Sistemas dinâmicos, alguns ou vários parâmetros são desconhecidos, geralmente pela impossibilidade ou inviabilidade de obtenção de seus valores através de medidas diretas das grandezas físicas que eles representam dentro do modelo. É dentro do contexto acima que recorre-se a técnicas de identificação de parâmetros [24], [27], [48] e [55], onde procura-se determinar os valores desconhecidos, pela manipulação dos sinais de excitação e de resposta e das variáveis de estado do sistema. Em anos recentes, tem-se desenvolvido vários métodos para a identificação de parâmetros de sistemas dinâmicos utilizando funções ortogonais. Os processos de identificação a partir destes tipos de funções começam com a construção de uma matriz operacional para a integração de vetores de bases ortogonais, o que permite a conversão de um conjunto de equações diferenciais em um conjunto de equações algébricas que é então resolvido para se obter os parâmetros desconhecidos. Desta forma, funções de Walsh, Block Pulse, Fourier e polinomiais de Chebyshev, Jacobi, Legendre, Laguerre e Hermite [54], [55] têm sido utilizados para identificar parâmetros de sistemas. O método utilizado neste trabalho utiliza funções de Fourier e opera no domínio do tempo. Ele se baseia na expansão das funções de excitação e de resposta do sistema em termos de séries de Fourier, que podem ser

integradas facilmente usando propriedades de integração de funções ortogonais [54], [55]. É utilizado o método dos mínimos quadrados para a identificação dos parâmetros. Durante os últimos anos, vários métodos têm sido propostos para resolver problemas de identificação, embora nenhum deles possa ser considerado como sendo universalmente adequado a todas as situações. Deve-se também ressaltar que a identificação dos parâmetros estruturais dos sistemas mecânicos (massa, rigidez e amortecimento) é considerada tarefa bastante complexa [35], razão pela qual tem-se dado preferência aos métodos voltados para a identificação de parâmetros modais, seja no domínio do tempo, seja no domínio da frequência.

O método de identificação utilizado neste trabalho pode ser resumido em três etapas fundamentais:

- 1) Expansão da excitação e da resposta em séries de Fourier.
- 2) Integração das equações do movimento e emprego de uma matriz operacional para integração das séries de Fourier.
- 3) Estimativa dos parâmetros pelo método dos mínimos quadrados.

Para sistemas mecânicos com vários graus de liberdade, o movimento pode ser representado pela equação matricial abaixo:

$$[M] \{ \ddot{x}(t) \} + [C] \{ \dot{x}(t) \} + [K] \{ x(t) \} = \{ f(t) \} \quad (2.58)$$

onde $[M]$, $[C]$ e $[K]$ são respectivamente as matrizes de inércia, de amortecimento e de rigidez;

$\{x(t)\}^T = \{ \{x_1(t)\} \quad \{x_2(t)\} \quad \{x_3(t)\} \dots \{x_n(t)\} \}$ é o vetor dos deslocamentos;

$\{f(t)\}^T = \{ \{f_1(t)\} \quad \{f_2(t)\} \quad \{f_3(t)\} \dots \{f_n(t)\} \}$ é o vetor das forças de excitação e

n é o número de graus de liberdade do Sistema.

A equação de movimento (2.58) pode ser rearranjada utilizando-se formulação de estado, como segue:

$$\begin{Bmatrix} \{\dot{x}(t)\} \\ \{\ddot{x}(t)\} \end{Bmatrix}_{2nx1} + [A]_{2nx2n} \begin{Bmatrix} \{x(t)\} \\ \{\dot{x}(t)\} \end{Bmatrix}_{2nx1} = [B]_{2nxn} \{f(t)\}_{2nx1} \quad (2.59)$$

onde

$$[A]_{2nx2n} = \begin{bmatrix} [0]_{n \times n} & \vdots & [I]_{n \times n} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ ([M]^{-1}[K])_{n \times n} & \vdots & ([M]^{-1}[C])_{n \times n} \end{bmatrix} \text{ e } [B]_{2nxn} = \begin{bmatrix} [0]_{n \times n} \\ [M]_{n \times n}^{-1} \end{bmatrix}$$

Integrando-se duas vezes a equação (2.59) tem-se:

$$\begin{bmatrix} \int_0^t \{x(\tau)\} d\tau \\ \{x(t)\} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \{0\} \\ \{x(0)\} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \{x(0)\} \\ \{\dot{x}(0)\} \end{bmatrix} t + [A] \begin{bmatrix} \int_0^t \int_0^\tau \{x(\tau)\} d\tau^2 \\ \int_0^t \{x(\tau)\} d\tau \end{bmatrix} - [A] \begin{bmatrix} \{0\} \\ \{x(0)\} \end{bmatrix} t = [B] \left\{ \int_0^t \int_0^\tau \{f(\tau)\} d\tau^2 \right\} \quad (2.60)$$

Expandindo $\{x_i(t)\}$ e $\{f_i(t)\}$, $i=1,n$ em séries de Fourier tem-se:

$$\{x_i(t)\} = \{X_i\} \{\Phi(t)\}$$

$$\{f_i(t)\} = \{F_i\} \{\Phi(t)\}, i = 1, n \quad (2.61)$$

Onde $\Phi(t)$ é formada por funções linearmente independentes e ortogonais em um intervalo $(0,T)$:

$$\{\Phi(t)\} = \{\Phi_0(t), \Phi_1(t), \dots, \Phi_r(t), \Phi_1^*(t), \dots, \Phi_r^*(t)\}$$

onde:

$$\Phi_n(t) = \cos(2z\pi/T), z=0,1,2,3,\dots,r,$$

$$\Phi_n^*(t) = \sin(2z\pi/T), z=0,1,2,3,\dots,r$$

e r o número de termos em seno e coseno retidos na série de Fourier

Desta forma é possível escrever:

$$\{x(t)\}_{nx1} = [X]_{n \times r2}^T \{\Phi(t)\}_{r2 \times 1} \text{ e}$$

$$\{f(t)\}_{nx1} = [F]_{n \times r2}^T \{\Phi(t)\}_{r2 \times 1} \quad (2.62)$$

sendo $r_2 = 2r+1$

onde:

$$[X] = [\{X_1\} \quad \{X_2\} \quad \dots \{X_n\}] \text{ e}$$

$$[F] = [\{F_1\} \quad \{F_2\} \quad \dots \{F_n\}]$$

Substituindo-se as equações (2.62) na equação (2.60) tem-se:

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} \int_0^t [X]^T \{\Phi(\tau)\} d\tau \\ [X]^T \{\Phi(t)\} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \{x(0)\}t \\ \{x(0)\} + \{\dot{x}(0)\}t \end{bmatrix} + [A] \begin{bmatrix} \int_0^t \int_0^t [X]^T \{\Phi(\tau)\} d\tau^2 \\ \int_0^t [X]^T \{\Phi(\tau)\} d\tau \end{bmatrix} - [A] \begin{bmatrix} \{0\} \\ \{x(0)\} \end{bmatrix} t = \\ & [B] \left\{ \int_0^t \int_0^t [F]^T \{\Phi(\tau)\} d\tau^2 \right\} \end{aligned} \quad (2.63)$$

A seguir, a propriedade integral do vetor $\{\Phi(t)\}$ das séries ortogonais [54] é aplicada à equação (2.63).

$$\int_0^t \dots \int_0^t \{\Phi(\tau)\} (d\tau)^n = [P]^n \{\Phi(t)\} \quad (2.64)$$

onde [P] é uma matriz operacional de integração [53]:

$$[P]_{r2 \times r2} = \begin{bmatrix} T/2 & | & [0]_{1 \times r} & | & -T/(\pi \{\hat{e}\})_{1 \times r}^T \\ \hline [0]_{r \times 1} & | & [0]_{r \times r} & | & T/(2\pi [\hat{I}])_{r \times r} \\ \hline T/(2\pi \{\hat{e}\})_{r \times 1} & | & -T/(2\pi [\hat{I}])_{r \times r} & | & [0]_{r \times r} \end{bmatrix}$$

onde

$$\{\hat{e}\}_{r \times 1} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1/2 \\ 1/3 \\ \vdots \\ 1/r \end{bmatrix}, \quad [\hat{I}]_{r \times r} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1/2 & 0 & 0 & \vdots \\ 0 & 0 & 1/3 & 0 & 0 \\ \vdots & 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 1/r \end{bmatrix}$$

Tem-se, portanto:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} [X]^T & [P] \\ [X]^T \end{bmatrix}_{2 \times r2} - \begin{bmatrix} \{x(0)\} \{j_1\}^T [P] \\ \{x(0)\} \{j_1\}^T + \{\dot{x}(0)\} \{j_1\}^T [P] \end{bmatrix}_{2 \times r2} + [A] \begin{bmatrix} [X]^T [P]^2 \\ [X]^T [P] \end{bmatrix}_{2 \times r2} \\ - [A] \begin{bmatrix} \{0\} \\ \{x(0)\} \end{bmatrix}_{2 \times r2} \{j_1\}^T [P] = [B] [F]^T [P]^2_{n \times r2} \end{aligned} \quad (2.65)$$

onde $\{j_1\}_{r2}^T = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \dots 0]$

Da equação (2.65) tem-se:

$$[A] [D] - [B] [G] = [E] \quad (2.66)$$

onde:

$$[D] = \begin{bmatrix} [X]^T [P]^2 \\ [X]^T [P] - \{x(0)\} \{j_1\}^T [P] \end{bmatrix}_{2n \times 2}, \quad [G] = [F]^T [P]^2_{n \times 2} \quad \text{e}$$

$$[E] = \begin{bmatrix} (\{x(0)\} \{j_1\}^T - [X]^T) [P] \\ \{x(0)\} \{j_1\}^T + \{\dot{x}(0)\} \{j_1\}^T [P] - [X]^T \end{bmatrix}_{2n \times 2}$$

Tem-se, portanto:

$$[J]^T [H]^T = [E]^T \quad (2.67)$$

onde

$$[H] = \begin{bmatrix} [A] & \vdots & -[B] \end{bmatrix}_{2n \times 3n} \quad \text{e} \quad [J] = \begin{bmatrix} [D] \\ [G] \end{bmatrix}_{3n \times 2}$$

Utilizando uma estimativa através do método dos mínimos quadrados para a matriz $[H]^T$ tem-se os parâmetros do sistema:

$$[H]^T = ([J][J]^T)^{-1} [J][E]^T \quad (2.68)$$

Para a identificação da excitação do sistema, basta determinar a matriz $[J]$, da equação (3.68). Portanto, fazendo-se também uma estimativa pelo método dos mínimos quadrados para a matriz $[J]^T$ tem-se:

$$[J]^T = ([H][H]^T)^{-1} [H][E]^T \quad (2.69)$$

2.4 Detecção e Localização de Falhas - Metodologia Desenvolvida

A primeira etapa é conseguir um modelo teórico do sistema a ser analisado o mais próximo possível do sistema real. Além do modelo representativo, há também a necessidade de análise do modelo diagnóstico, que utiliza o conhecimento das propriedades físicas do processo em termos de sua funcionalidade estrutural. Ele descreve o comportamento dinâmico analítico em diferentes condições de trabalho com todas as interações entre diferentes partes do sistema.

1 - Identificação dos Parâmetros e Ajuste do Modelo

Os parâmetros do sistema são identificados através do método das séries de Fourier domínio do tempo, descrito anteriormente. O modelo é ajustado utilizando os parâmetros identificados em conjunto com uma análise modal experimental, na qual são obtidas as frequências naturais e os modos de vibrar. Em seguida comparam-se os valores obtidos com uma simulação utilizando-se o modelo desenvolvido.

2 - Matriz de Observabilidade

A capacidade de se constituírem os estados do processo a controlar exige que todos os estados sejam observáveis. O Posto ("rank") da matriz de observabilidade do sistema foi apresentado anteriormente pela equação (2.4). Se o sistema não for totalmente observável, deve-se utilizar de uma outra medida ou substituir alguma já existente, fazendo-se o teste novamente. A análise é feita através do par $([A], [C_{me}])$, verificando se o "rank" da matriz de observabilidade é igual a ordem do sistema, lembrando que se o observador de estado é de ordem reduzida, o "rank" deve ser igual a ordem do sistema menos o número de medidas.

3 - Autovalores da Matriz Dinâmica $[A]$

Verificam-se os autovalores da matriz dinâmica do sistema, pois no desenvolvimento dos observadores de estado, os autovalores são impostos e a parte real tem que ser negativa e à esquerda dos autovalores de $[A]$, no plano complexo, para garantir a estabilidade e rápida convergência.

4 - Observador de Estado Global

Se o sistema é observável, calcula-se inicialmente um observador global para a detecção de possíveis falhas ou irregularidades no Sistema. Este observador será utilizado também para a verificação de possíveis falhas em sensores, após haver descartado a existência de falhas nos parâmetros físicos do sistema através dos observadores robustos.

Quando o sistema está funcionando adequadamente sem indícios de falhas, o observador de estado global responde exatamente como o sistema real, sendo que este observador é um conjunto de equações diferenciais ordinárias.

5 - Observadores de Estado Robustos aos Parâmetros Sujeitos a Falhas

Estes observadores de estado são utilizados para localização das falhas. Neste caso, projetam-se os observadores robustos para os elementos (parâmetros) sujeitos a falhas ou para uma variação percentual numérica dos mesmos. Por exemplo, pode-se construir um observador de estado para uma redução de 10% do parâmetro de rigidez k_1 e quando este parâmetro atingir este percentual, um sistema de alarmes é acionado.

6 - Matrizes dos Observadores

Faz-se uma análise completa das matrizes dos observadores de estado global e robustos aos parâmetros do sistema sujeitos a falhas. Os autovalores da matriz dinâmica dos observadores $[[A] - [L] [C_{me}]]$ tem que ser exatamente iguais aos autovalores impostos no projeto dos mesmos.

Cada observador de estado robusto aos parâmetros sujeitos a falhas também é apresentado como um conjunto de equações diferenciais ordinárias.

7 - Índices de Performance

São calculados os índices de performance para o observador global do sistema e para os observadores robustos aos parâmetros sujeitos a falhas. Estes índices de performance são índices obtidos através da análise da norma da matriz dos autovetores do sistema analisado.

Se os índices estão próximos da unidade, os observadores de estado estão bem condicionados e são agrupados em um banco de observadores para montagem de um sistema automático de detecção e localização de falhas. Caso estes Índices estejam distantes da unidade, eles são ditos mal condicionados e projetam-se os novos observadores de estado.

Este mal condicionamento das matrizes acarreta em uma sensibilidade elevada em relação a perturbações e erros de ordem numérica na resolução do sistema de equações diferenciais.

8 - Projeto de Observadores de Estado bem condicionados

Para o projeto de observadores de estado bem condicionados utiliza-se a metodologia apresentada no item 2.2.4, mas a modificação da matriz dinâmica original é feita por partes, analisando-se separadamente os termos de rigidez e de amortecimento. Isto acarreta em índices de performance não tão próximos da unidade, mas elimina algumas restrições impostas na metodologia, como por exemplo, a necessidade de trabalhar com matrizes simétricas. Quando a matriz é mal condicionada, os índices de performance apresentam valores na ordem de 10^6 , sendo que estes valores caem para 30 ou 40 quando a matriz dinâmica original é analisada por partes, como descrito anteriormente. Mesmo com estes valores, os observadores de estado apresentam uma boa performance tanto no transitório quanto em regime permanente.

9 - Projeto do Observador de Estado Robusto

Quando determinado componente de um sistema mecânico começa a falhar, a influência deste processo é rapidamente verificada pelo observador de estado global, pois o mesmo apresenta a mesma resposta do sistema real, desde que este esteja funcionando adequadamente, sendo bastante sensível a quaisquer irregularidades que comecem a ocorrer com o sistema.

O objetivo é utilizar este efeito sentido pelo observador de estado global para localizar a falha no sistema mecânico. O observador de estado robusto a um determinado parâmetro não contém o parâmetro falho em sua matriz dinâmica.

Existe possibilidade de um ou mais parâmetros falharem ao mesmo tempo. Neste caso, projetam-se observadores de estado robustos a todos os parâmetros sujeitos a falhas.

Existe também a possibilidade dos parâmetros sujeitos a falhas estarem localizados na mesma posição da matriz dinâmica $[A]$ e possuírem o mesmo valor numérico. Neste caso, trabalha-se com uma combinação dos vários componentes do Sistema sujeitos a falhas, como por exemplo: Tem-se 2 parâmetros sujeitos a falhas (p_1, p_2) na mesma posição da matriz dinâmica sendo que possuem o mesmo valor numérico. Se na matriz dinâmica existem 3 parâmetros (p_1, p_2 e p_3), são projetados Observadores de Estado para cada parâmetro sujeito a falhas e também para a combinação dos mesmos utilizando o terceiro componente: p_1, p_2, p_1p_3 , e p_2p_3 .

A figura 2.1 apresenta um esquema simplificado de um sistema funcionando com observadores de estado robustos, onde verifica-se a força de excitação $\{f(t)\}$, a resposta $\{y(t)\}$, os observadores robustos aos parâmetros sujeitos a falhas $z_1..z_n$ e uma unidade de decisão lógica.

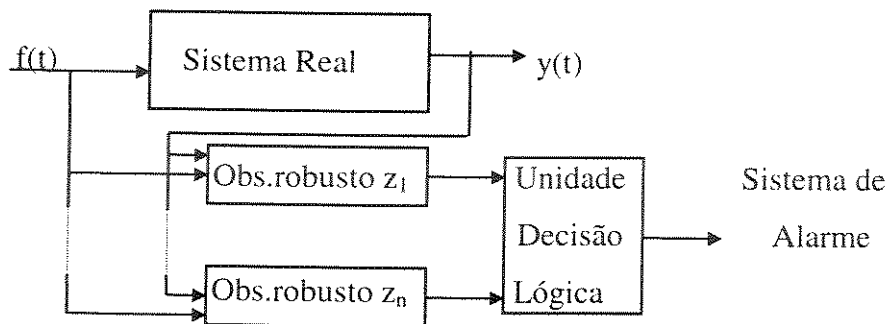


Figura 2.1 - Sistema de Observação Robusta

10 - Banco de Observadores e Unidade de Decisão Lógica

Os observadores de estado global e robustos aos parâmetros sujeitos a falhas são colocados em um banco de observadores e as diferenças dos valores RMS entre o sistema real e estes observadores são analisadas em uma unidade de decisão lógica que analisa a tendência da progressão da falha e aciona, quando necessário, um sistema de alarme.

Pode-se deixar o sistema de alarme pronto para ser acionado quando ocorrer variação percentual em um determinado parâmetro, mas estes critérios devem ser avaliados individualmente dependendo do sistema a ser analisado.

Toda a metodologia desenvolvida é resumida em três fluxogramas apresentados a seguir no capítulo 3, onde é desenvolvido um sistema automático para detecção e localização de falhas utilizando observadores de estado.

CAPÍTULO 3

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL - RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Programas Computacionais

Neste trabalho foram desenvolvidas rotinas computacionais para o cálculo dos observadores de estado, otimização dos mesmos e um programa para detecção e localização de falhas de sistemas mecânicos. As rotinas foram desenvolvidas em linguagem Fortran (1.0/1993 para Windows) e a seguir são descritos os fluxogramas utilizados para seus desenvolvimentos.

No fluxograma da figura 3.1 são mostradas as etapas da identificação dos parâmetros até o cálculo dos observadores de estado global e observadores de estado robustos aos parâmetros do sistema sujeitos a falhas. Seguem-se as seguintes etapas:

- 1) - Inicialmente faz-se a aquisição de sinais na entrada (força de excitação) e na saída (deslocamento) no domínio do tempo.
- 2) - As matrizes de massa $[M]$, rigidez $[K]$ e amortecimento $[C]$ são identificadas através do método das séries de Fourier
- 3) - O modelo matemático é ajustado através da análise dos parâmetros identificados em conjunto com uma análise modal experimental e simulações, comparando-se os resultados do modelo com os valores medidos.

- 4) - Este bloco analisa se as respostas do modelo ajustado estão de acordo com as respostas obtidas experimentalmente.
- 5) - Os observadores global e robustos aos parâmetros sujeitos a falhas são projetados com a utilização dos parâmetros identificados.
- 6) - Inicia-se o processo de aquisição de sinais.
- 7) - Com a primeira medida obtida, verifica-se se o posto da matriz de observabilidade tem a ordem do sistema reduzido, isto é, a ordem do sistema menos o número de medidas efetuadas.
- 8) - Se o sistema não for observável com o número de medidas efetuadas, deve-se utilizar de uma outra medida ou substituir alguma já existente.
- 9) - Cálculo dos autovalores da matriz dinâmica $[A]$ do modelo do sistema.
- 10) - Para o cálculo dos observadores de estado global e robustos aos parâmetros sujeitos a falhas, são impostos autovalores com parte real negativa e à esquerda dos autovalores de $[A]$ para garantir estabilidade e critérios de convergência. Para verificação dos autovalores a serem impostos, a análise foi feita utilizando-se como referência o autovalor de menor parte real negativa na matriz dinâmica $[A]$, selecionando os autovalores mais próximos à sua esquerda.
- 11) - O programa começa a construção dos observadores de estado utilizando-se as equações de Riccati.
- 12) - Inicialmente é construído o observador global que consegue detectar possíveis irregularidades ou falhas no sistema, mas não consegue localizá-las.
- 13) - Para a construção dos observadores robustos, são retirados da matriz dinâmica $[A]$, os parâmetros sujeitos a falhas ou percentual dos mesmos

- 14) - Nesta fase, o programa monta os observadores robustos aos parâmetros sujeitos a falhas.
- 15) - São montadas as matrizes dos observadores $[[A] - [L][C_{me}]]$.
- 16) - É feito um teste de estabilidade para os observadores de estado utilizando-se o método do posicionamento de raízes. Se ocorrer uma instabilidade, novos autovalores deverão ser impostos.
- 17) - Após a conclusão do teste de estabilidade, o programa fornece os observadores de estado global e robustos aos parâmetros sujeitos a falhas.
- 18) - Cada observador de estado é apresentado como um conjunto de equações diferenciais, que utiliza os valores medidos e é resolvido simultaneamente através do método de Runge-Kutta.

No fluxograma da figura 3.2 são calculados os índices de performance dos observadores de estado global e dos observadores robustos aos parâmetros do sistema sujeitos a falhas. Caso seja necessário, projetam-se novos observadores de estado até que estes índices de performance se aproximem da unidade. Seguem-se as seguintes etapas:

- 1) - O fluxograma inicia-se com o conjunto de equações diferenciais que representa o observador de estado global e com os conjuntos de equações que representam os observadores robustos.
- 2) - São calculados os índices de performance para os observadores global e robustos aos parâmetros sujeitos a falhas.
- 3) - Caso os índices de performance sejam menores que a unidade ou relativamente próximos dela (< 40) os observadores são armazenados em um banco de observadores, o ideal para

um ótimo condicionamento das matrizes seria a unidade, mas verificou-se com os exemplos descritos na capítulo 3 que observadores com índices de performance até 40 apresentaram bons resultados quanto a perturbações e erros de ordem numérica.

- 4) - Caso os índices seja muito distantes da unidade (> 40), projetam-se novos observadores de estado.
- 5) - Neste novo projeto, inicialmente a matriz dinâmica do sistema é dividida em quatro setores, como verificado no capítulo 2.
- 6) - São feitas algumas transformações, tanto na matriz dinâmica $[A]$, quanto na matriz de medidas $[C_{me}]$.
- 7) - É calculada uma nova matriz dinâmica $[A']$, que possui os mesmos autovalores da matriz dinâmica $[A]$.
- 8) - Desenvolvimento das matrizes dos observadores.
- 9) - Cálculo da matriz $[L]$ do observador utilizando o método do posicionamento das raízes para manter a estabilidade e convergência.
- 10) - Verificação dos novos índices de performance.
- 11) - Caso os índices estejam próximos da unidade, todos os observadores ficam armazenados em um banco de observadores.

No fluxograma da figura 3.3 é apresentado um banco de observadores para detecção e localização de falhas. É montado um banco de observadores, constituído de observador global que somente analisa se o sistema possui algum indício de falha ou não e de observadores de estado robustos aos parâmetros sujeitos a falhas, que são utilizados para localizar a(s) falha(s) do sistema. Todos os valores obtidos são analisados em uma unidade de decisão lógica para o possível acionamento de um sistema de alarme ou acompanhamento de uma curva de tendências.

- 1) - São analisados os valores medidos através do sistema real, sendo que estes valores são encaminhados para uma unidade de decisão lógica para análise e também são utilizados para a análise do observador global e dos observadores robustos aos parâmetros.
- 2) - O observador de estado global recebe os valores da excitação e da resposta do sistema real. Após a resolução do conjunto de equações diferenciais, os resultados são enviados para a unidade de decisão lógica.
- 3) - Os observadores de estado robustos também recebem os valores da excitação e da resposta do sistema real, encaminhando também a resposta do conjunto de equações diferenciais para a unidade de decisão lógica
- 4) - A unidade de decisão lógica verifica inicialmente a diferença dos valores RMS do sistema real e do observador global, detectando alguma irregularidade no sistema. Logo em seguida começa a analisar as diferenças entre os valores do sistema real e dos observadores robustos aos parâmetros sujeitos a falhas, onde se consegue a localização de possíveis falhas.
- 5) - A análise é feita de forma automática apresentando curvas de tendências, de modo a acionar um sistema de alarmes.

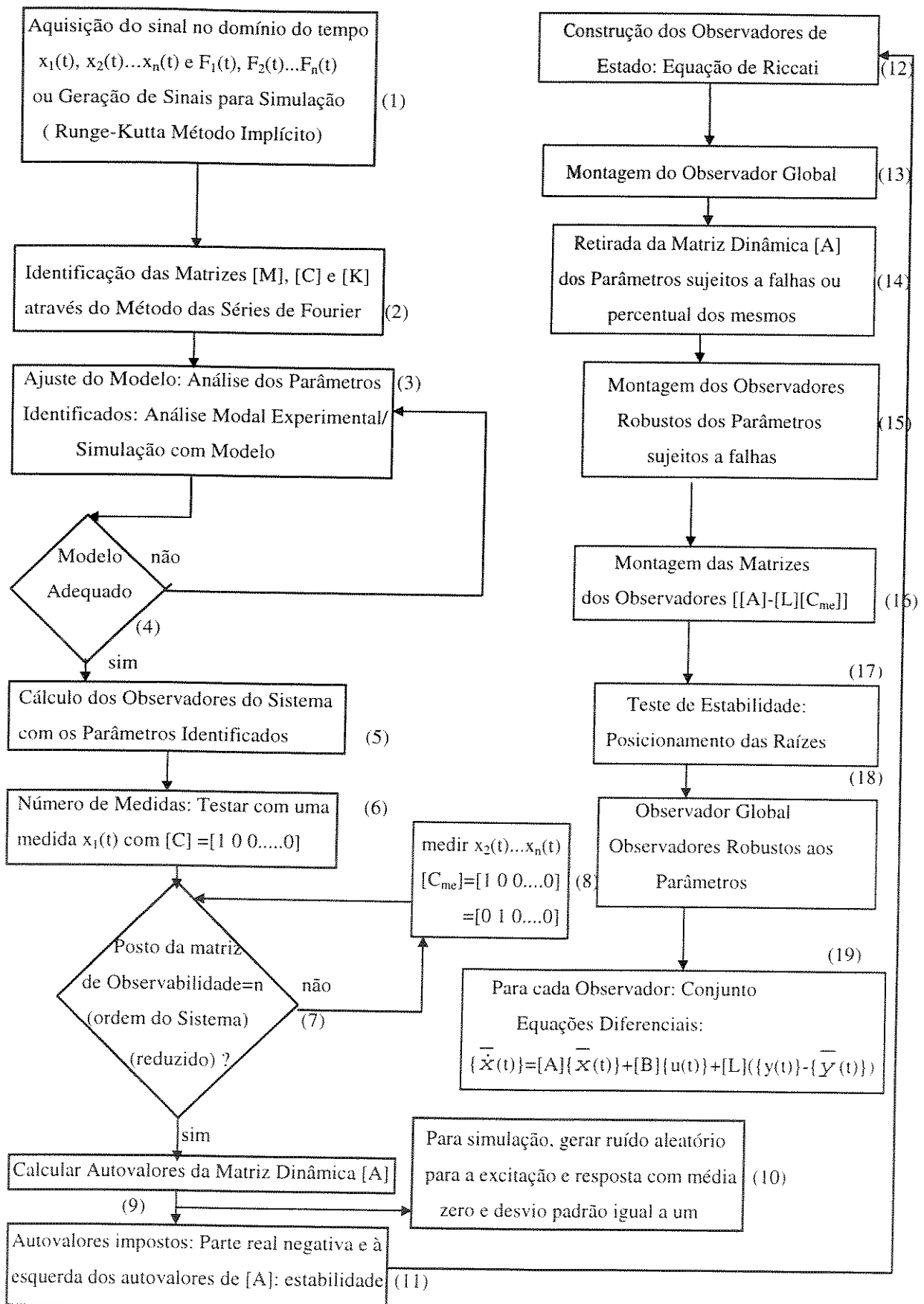


Figura 3.1 - Fluxograma para Identificação dos Parâmetros e Cálculo dos Observ. de Estado

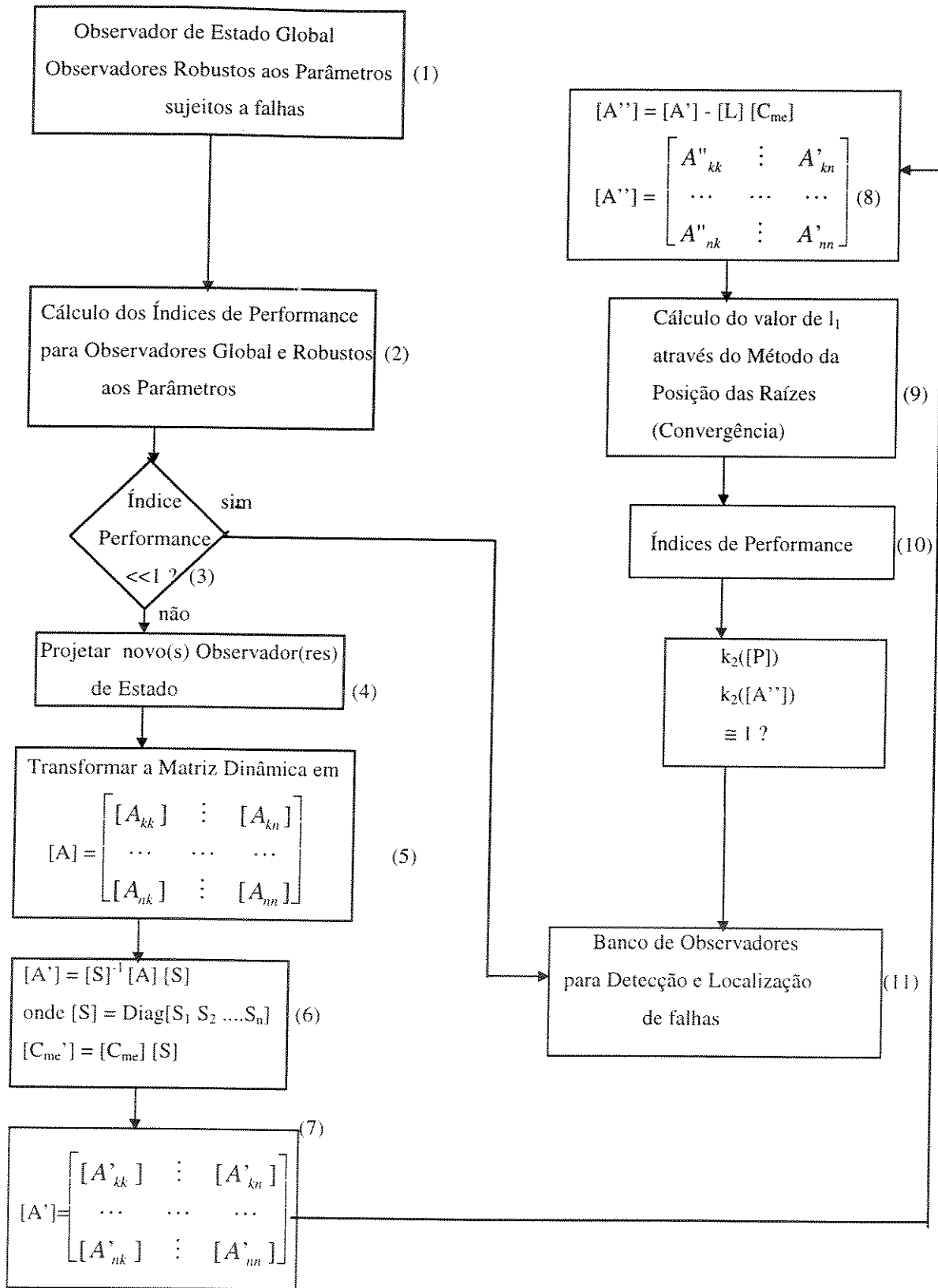


Figura 3.2 - Fluxograma para Otimização dos Observadores de Estado

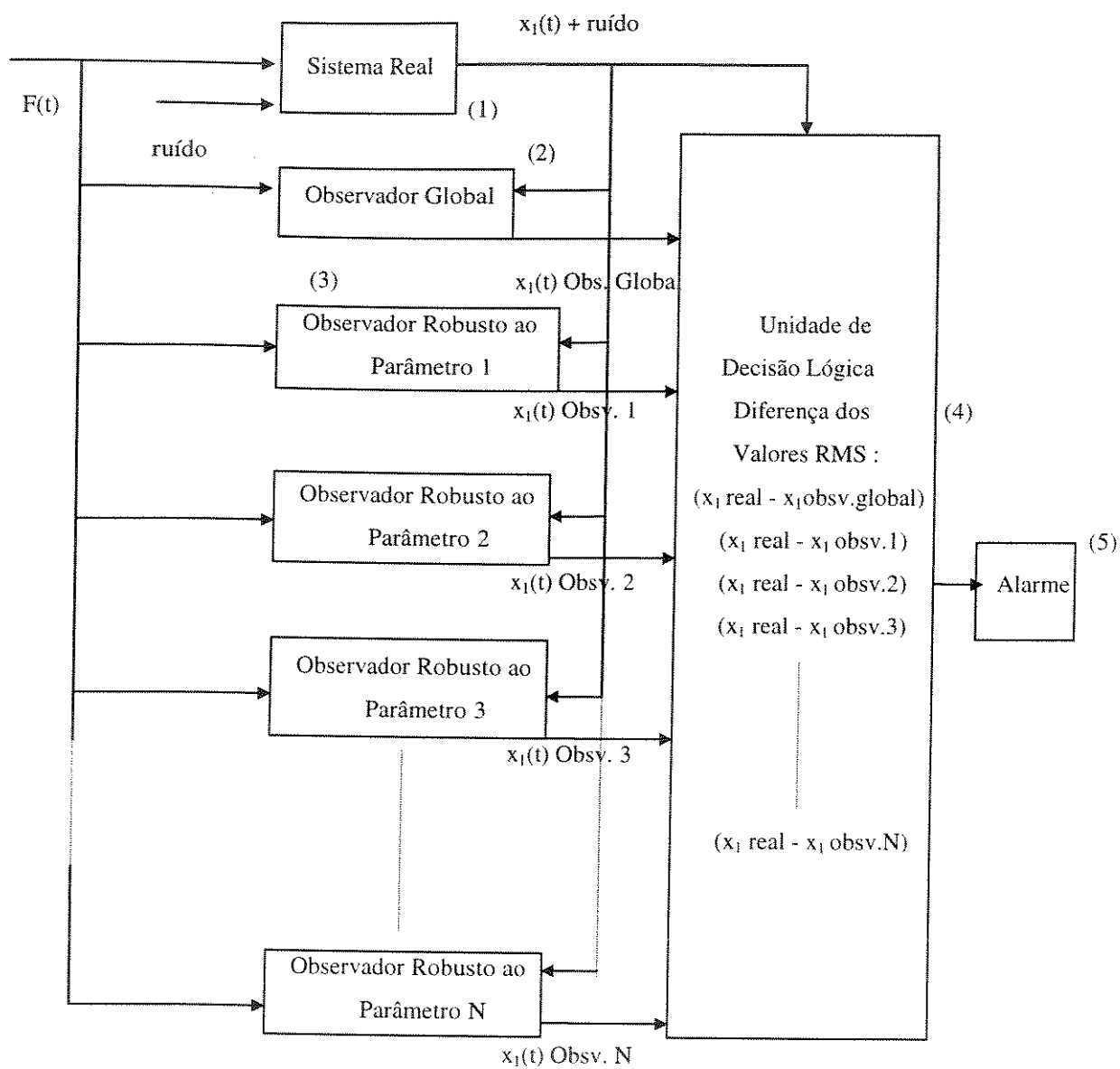


Figura 3.3 - Banco de Observadores para Detecção e Localização de Falhas

3.2 Exemplos Simulados

3.2.1 Sistema Massa - Mola - Amortecedor - 3 Graus de Liberdade

Na Figura 3.4 é apresentado um Sistema massa - mola - amortecedor com 3 graus de liberdade.

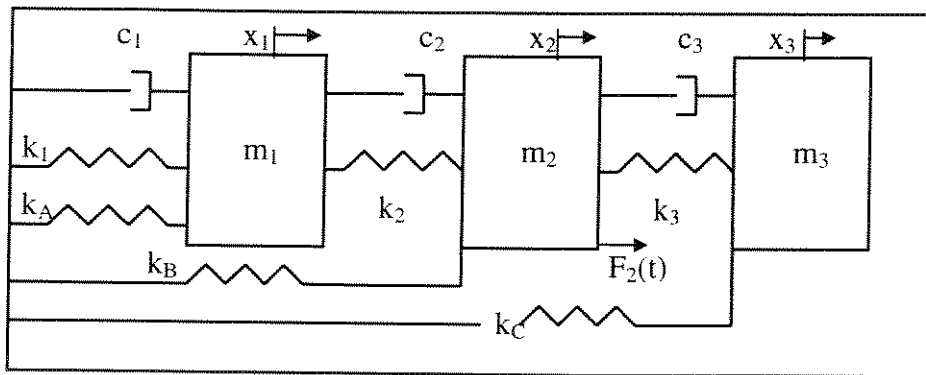


Figura 3.4 - Sistema Simulado Massa - Mola - Amortecedor com 3 Graus de Liberdade

As equações de movimento são:

$$\begin{aligned}
 m_1 \ddot{x}_1(t) + c_2 \dot{x}_2(t) + (c_1 + c_2) \dot{x}_1(t) + (k_A + k_1 + k_2) x_1(t) - k_2 x_2(t) &= 0 \\
 m_2 \ddot{x}_2(t) - c_2 \dot{x}_1(t) + (c_2 + c_3) \dot{x}_2(t) - c_3 \dot{x}_3(t) + (k_B + k_2 + k_3) x_2(t) - k_2 x_1(t) - k_3 x_3(t) &= F_2(t) \\
 m_3 \ddot{x}_3(t) - k_3 x_2(t) - c_3 \dot{x}_2(t) + c_3 \dot{x}_3(t) + k_3 x_3(t) + k_C x_3(t) &= 0
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

A equação de medidas é $[C_{me}] = [1 \ 0 \ 0]$ com x_2 , x_3 não mensuráveis

Para este sistema, tem-se as seguintes matrizes de massa $[M]$, rigidez $[K]$ e amortecimento $[C]$:

$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix}, \quad [K] = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 + k_A & -k_2 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 + k_B & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3 + k_C \end{bmatrix} \text{ e}$$

$$[C] = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 \\ 0 & -c_3 & c_3 \end{bmatrix}$$

Os valores numéricos para o sistema analisado são:

$k_1=35877\text{N/m}$; $k_A=12000\text{N/m}$; $c_1=40\text{Ns/m}$; $m_1=3\text{Kg}$

$k_2=49711\text{N/m}$; $k_B=10000\text{N/m}$; $c_2=70\text{Ns/m}$; $m_2=2\text{Kg}$

$k_3=56628\text{N/m}$; $k_C=5000\text{N/m}$; $c_3=30\text{Ns/m}$; $m_3=1\text{Kg}$

Para a simulação do sistema, foram também calculados os valores dos parâmetros através do método das séries de Fourier descrito no capítulo 2., onde os valores de entrada são os sinais do deslocamento e força de excitação.

Os valores dos deslocamentos $x_1(t)$, $x_2(t)$, e $x_3(t)$ foram gerados através do método numérico de Runge-Kutta (método implícito).

Os valores dos parâmetros físicos do sistema e consequentemente as frequências naturais são apresentados na tabela 3.1 em comparação com os valores obtidos através do método das séries de Fourier.

	Teórico	Identificado	Diferença Relativa%
Freq. Natural f_1 (Hz)	50.91	51.11	0.39
Freq. Natural f_2 (Hz)	31.89	31.92	0.93
Freq. Natural f_3 (Hz)	15.52	15.48	0.25
K_1 (N/m)	35877.00	35422.21	1.26
K_2 (N/m)	49711.00	50016.54	0.61
K_3 (N/m)	56628.00	57137.88	0.89
C_1 (Ns/m)	40.00	38.43	3.92
C_2 (Ns/m)	70.00	68.26	2.48
C_3 (Ns/m)	30.00	29.68	1.06

Tabela 3.1 - Valores dos Parâmetros Identificados e Teóricos: Sistema - Massa - Mola - Amortecedor

3.2.1.1 Sistema Massa - Mola - Amortecedor - Análise Transiente

O sistema mecânico apresentado na figura 3.4 é inicialmente excitado apenas com condições iniciais de deslocamento e velocidade para uma análise transiente do comportamento do observador de estado utilizado na detecção e localização de falhas.

Foram utilizados 512 pontos amostrados, em um intervalo de tempo total de 0.7 segundos. Os valores das condições iniciais foram: $x_1(0) = 0.025\text{m}$, $x_2(0) = 0.000$, $x_3(0) = 0.000$, $\dot{x}_1(t) = 3.000\text{ m/s}$, $\dot{x}_2(t) = 0.000\text{ m/s}$ e $\dot{x}_3(t) = 0.000\text{ m/s}$.

Utiliza-se somente os valores de $x_3(t)$, considerando-se $x_1(t)$ o único valor existente e $x_2(t)$ e $x_3(t)$ reconstruídos através dos observadores de estado. Neste caso são considerados elementos sujeitos a falhas: k_1 , k_2 , k_B , k_C , c_1 e c_2 . Provocando uma falha no sistema através da diminuição de rigidez do parâmetro k_2 obtém-se os resultados apresentados nas figuras de 3.5 a 3.12. Nas ordenadas das curvas são apresentados os valores de $x_3(t)$.

Tem-se na cor azul o sistema real e na cor vermelha os observadores global e robustos.

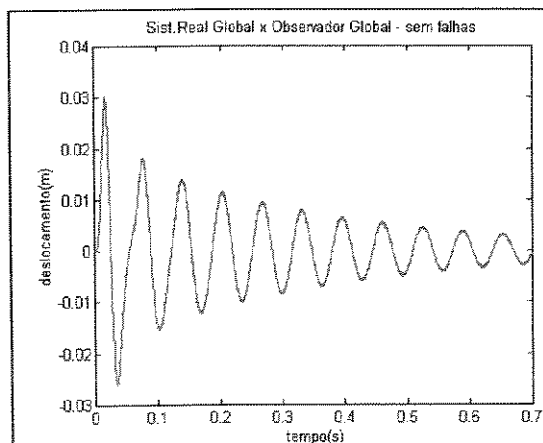


Figura 3.5

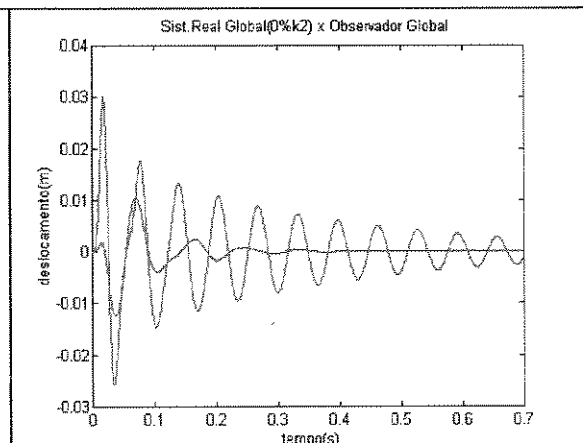


Figura 3.6

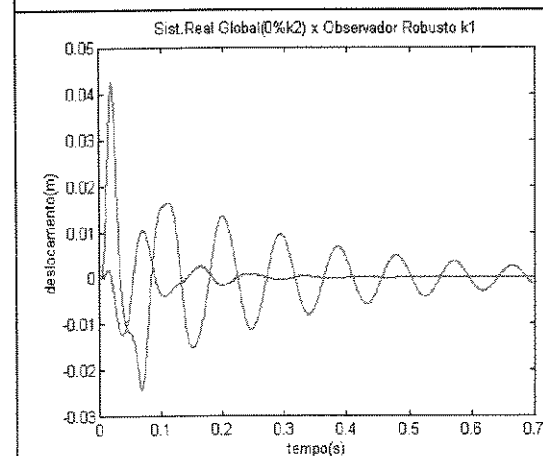


Figura 3.7

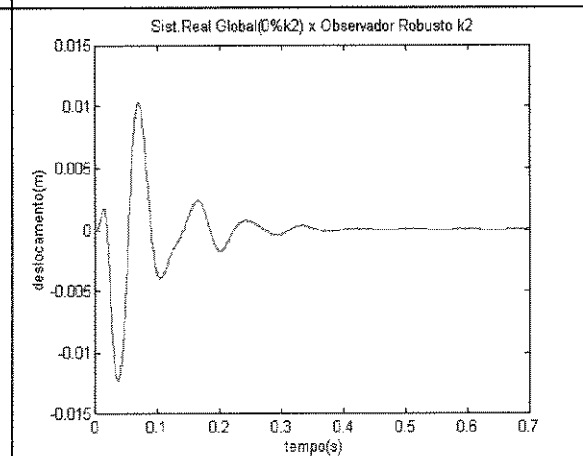


Figura 3.8

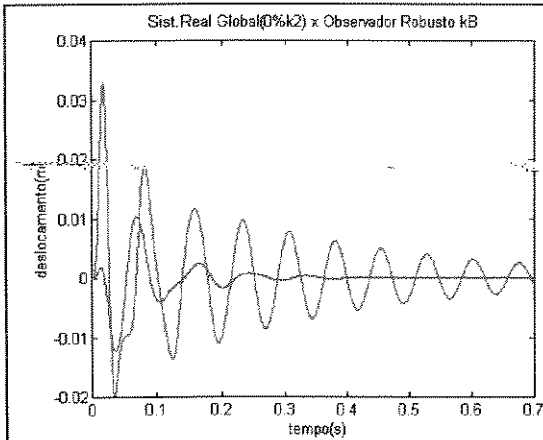


Figura 3.9

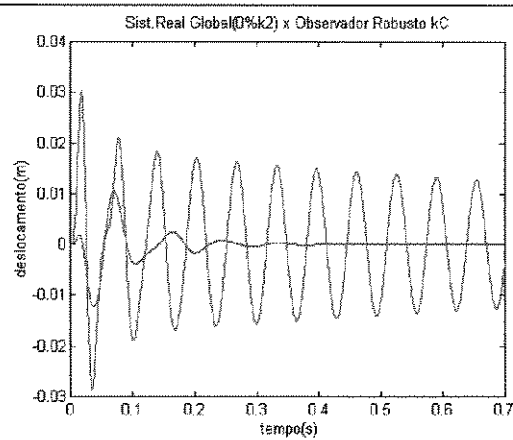


Figura 3.10

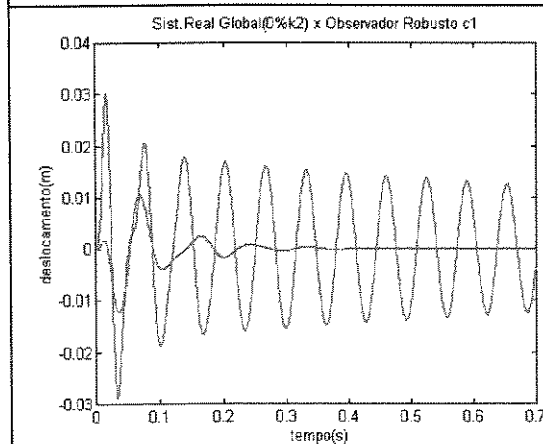


Figura 3.11

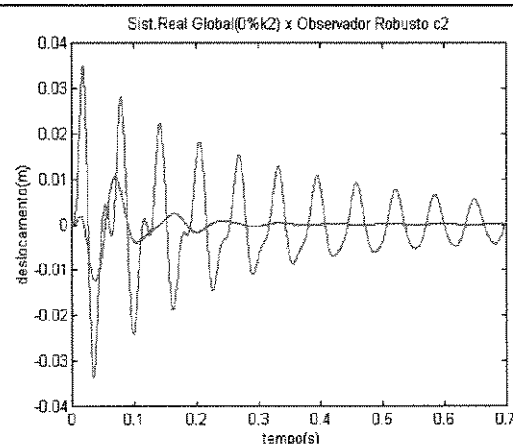


Figura 3.12

Na figura 3.5 tem-se a curva da resposta do sistema real sem falhas e a curva de resposta do observador global. Neste caso ambas são coincidentes, comprovando o fato de não haver nenhuma irregularidade com o sistema.

Na figura 3.6 apresentam-se as curvas de resposta do sistema real global quando a rigidez k_2 é retirada do sistema para simular uma possível falha e a curva de resposta do observador global. Como as curvas se distanciaram, pode-se detectar uma possível falha no sistema, mas sem condições de localizar a mesma.

Para localizar a falha, a análise é feita através das figuras 3.7 a 3.12. Sabe-se que quando existem indícios de falhas no sistema, a curva do observador robusto ao parâmetro do sistema com possível falha começa a se aproximar da curva do sistema real, pois na montagem do observador robusto a um parâmetro específico, este mesmo parâmetro é retirado da matriz dinâmica do sistema antes da montagem do observador.

Diante disso, pode-se verificar que a figura onde houve coincidência de valores nas curvas foi a 3.8, com observador robusto ao parâmetro k_2 , localizando-se portanto, a falha. Entretanto, neste caso, foi feita somente uma análise visual do processo, havendo a necessidade de uma análise mais concreta através de valores numéricos.

Utiliza-se o programa detecção e localização de falhas desenvolvido neste trabalho, onde os valores de entrada são a força de excitação e a resposta do sistema.

Provocando sequencialmente falhas nestes elementos, obtém-se os valores das tabelas 3.2 e 3.3 que são as diferenças das curvas do sistema real e dos observadores global e robustos aos parâmetros específicos.

	Real sem falhas	Real 0 % k_1	Real 0 % k_2	Real 0 % k_B
Obsv.Global	.3805020E-07	.3640743E-03	.2682850E-03	.1161720E-03
Obs.Robusto k_1	.3399298E-03	.3831519E-06	.6046666E-03	.2177382E-03
Obs.Robusto k_2	.2587215E-03	.6341717E-03	.3703317E-06	.3799741E-03
Obs.Robusto k_B	.1246093E-03	.2444452E-03	.3854984E-03	.2410918E-06
Obs.Robusto k_C	.3890649E-04	.3366428E-03	.3002737E-03	.9093835E-04
Obs.Robusto c_1	.1997163E-03	.5262373E-03	.1096731E-03	.2800923E-03
Obs.Robusto c_2	.5394031E-04	.3645390E-03	.2597082E-03	.1215772E-03

Tabela 3.2 - Diferença dos Valores RMS de $x_3(t)$ - Falhas em k_1 , k_2 e k_B - Análise Transiente

	Real sem falhas	Real 0 % k_C	Real 0 % c_1	Real 0 % c_2
Obsv.Global	.3805020E-07	.4083727E-04	.1627917E-03	.2070148E-04
Obs.Robusto k_1	.3399298E-03	.2915579E-03	.5002141E-03	.3357120E-03
Obs.Robusto k_2	.2587215E-03	.3066538E-03	.1012586E-03	.2629552E-03
Obs.Robusto k_B	.1246093E-03	.7402859E-03	.2791439E-03	.1197689E-03
Obs.Robusto k_C	.3890649E-04	.2892863E-07	.1880544E-03	.3339367E-04
Obs.Robusto c_1	.1997163E-03	.2084948E-03	.8815186E-07	.1668357E-03
Obs.Robusto c_2	.5394031E-04	.4855206E-04	.1576080E-03	.4222326E-06

Tabela 3.3 - Diferença dos Valores RMS de $x_3(t)$ - Falhas em k_C , c_1 e c_2 - Análise Transiente

As 1^{as}. colunas das tabelas 3.2 e 3.3 apresentam as diferenças dos valores RMS do deslocamento do sistema real sem falhas e dos observadores global e robustos aos parâmetros.

Inicialmente a análise é feita com o parâmetro k_1 em falha (2^a. coluna da tabela 3.2 - sistema real com 0% de k_1). Na 1^a.coluna e 1^a. linha da tabela 3.2, verifica-se que a diferença dos valores RMS de $x_3(t)$ entre o observador global e o sistema real sem falhas é da ordem de 10^{-7} , aumentando para 10^{-3} quando provocada falha no parâmetro k_1 . Neste caso, há um distanciamento das curvas e consegue-se somente detectar que existe alguma falha no sistema, mas não se consegue localizar a mesma.

Na 2^a.linha da tabela 3.2 (1^a. e 2^a. colunas), a diferença dos valores RMS de $x_3(t)$ entre o observador robusto a k_1 e o sistema real sem falhas é da ordem de 10^{-3} , caindo para 10^{-6} com falha em k_1 . Quando é analisado o observador robusto a k_2 , verifica-se que a ordem de grandeza permaneceu a mesma (10^{-3}). A análise continua da mesma forma até a verificação de todos os parâmetros sujeitos a falhas (k_B , k_C , c_1 e c_2). No caso específico, foi encontrado somente o parâmetro k_1 com aproximação tão significativa de curvas, pois nos outros parâmetros as diferenças dos valores RMS entre os observadores robustos a k_2 , k_B , k_C , c_1 e c_2 e o sistema real sem falhas permaneceram praticamente inalteradas, quando comparados com os valores obtidos com o sistema real com falha em k_1 . No caso dos observadores robustos a k_C e c_2 aconteceu um afastamento das curvas (da ordem de 10^{-3} para 10^{-4}).

Continuando a análise do sistema, quando provocada uma falha no parâmetro k_2 (3^a. coluna da tabela 3.2), verifica-se que houve uma aproximação das curvas somente no observador robusto ao parâmetro k_2 . Quando provocadas falhas nos parâmetros k_B , k_C , c_1 e c_2 , as falhas conseguem ser localizadas, como pode-se verificar nas Tabelas 3.2 e 3.3.

3.2.1.2 Sistema Massa - Mola - Amortecedor - Análise Transiente: Influência de Perturbação Aleatória na Resposta

A perturbação aleatória introduzida na resposta foi obtida calculando-se 10% do valor RMS dos valores amostrados do sinal $x(t)$, multiplicando este valor por números randômicos gerados com média igual a zero e desvio padrão igual a um e acrescentando estes valores na

resposta final, realimentando as equações dos observadores. Provocando novamente falhas nos elementos k_1 , k_2 , k_B , k_C , c_1 e c_2 , obtém-se os valores das tabelas 3.4 e 3.5 que são as diferenças dos valores das curvas do sistema real e dos observadores global e robustos aos parâmetros específicos.

	Real sem falhas	Real 0 % k_1	Real 0 % k_2	Real 0 % k_B
Obsv.Global	.1465151E-07	.3532279E-03	.2791316E-03	.1053255E-03
Obs.Robusto k_1	.3507758E-03	.7014809E-06	.6155132E-03	.2285847E-03
Obs.Robusto k_2	.2478753E-03	.6233254E-03	.1121692E-06	.3691276E-03
Obs.Robusto k_B	.1354562E-03	.2335989E-03	.3963450E-03	.8435585E-06
Obs.Robusto k_C	.4975295E-04	.3257965E-03	.3111203E-03	.8009185E-04
Obs.Robusto c_1	.1488701E-03	.5153909E-03	.1205197E-03	.2692458E-03
Obs.Robusto c_2	.1030709E-04	.3536927E-03	.2705548E-03	.1107307E-03

Tabela 3.4 - Diferença dos Valores RMS de $x_3(t)$ - Falhas em k_1 , k_2 e k_B - Análise Transiente com Influência de Perturbação Aleatória

	Real sem falhas	Real 0 % k_C	Real 0 % c_1	Real 0 % c_2
Obsv.Global	.1465151E-07	.2999045E-04	.1736377E-03	.7855843E-04
Obs.Robusto k_1	.3507758E-03	.3024047E-03	.5110601E-03	.2569229E-03
Obs.Robusto k_2	.2478753E-03	.2958070E-03	.9041262E-03	.3420100E-03
Obs.Robusto k_B	.1354562E-03	.8487541E-03	.2899899E-03	.4184998E-03
Obs.Robusto k_C	.4975295E-04	.1373969E-07	.1989004E-03	.4147951E-04
Obs.Robusto c_1	.1488701E-03	.1976480E-03	.1093416E-07	.2427820E-03
Obs.Robusto c_2	.1030709E-04	.3770524E-04	.1684540E-03	.8342307E-06

Tabela 3.5 - Diferença dos Valores RMS de $x_3(t)$ - Falhas em k_C , c_1 e c_2 - Análise Transiente com Influência de Perturbação Aleatória

Verificando as tabelas 3.4 e 3.5, da análise transiente com influência de 10% de perturbação aleatória na resposta do sistema, pode-se observar que este percentual de perturbação não afetou de maneira significativa a detecção e localização de falhas. Os valores das diferenças entre observadores global e robustos e sistema real não foram alterados em suas ordens de grandezas, não deixando dúvidas na localização dos parâmetros com possíveis falhas.

3.2.1.3 Sistema Massa - Mola - Amortecedor - Regime Permanente

O sistema é agora excitado harmonicamente com uma força de $F = F_2 \sin(\omega(t))$, com amplitude de $F_2 = 5 \text{ N}$ e frequência $\omega = 100 \text{ rad/s}$. Foram utilizados 512 pontos amostrados de $x_3(t)$ e $F(t)$ em um tempo total de 2 segundos. Os parâmetros sujeitos a falhas continuam sendo k_1 , k_2 , k_B , k_C , c_1 e c_2 .

Provocando uma falha no sistema através da diminuição de rigidez do parâmetro k_2 obtém-se as figuras de 3.13 a 3.20.

Os valores das ordenadas das curvas a seguir são de $x_3(t)$, sendo $x_1(t)$ medido e x_2 e $x_3(t)$ reconstruídos através dos observadores.

A cor azul analisa o sistema real e a cor vermelha os observadores global e robustos.

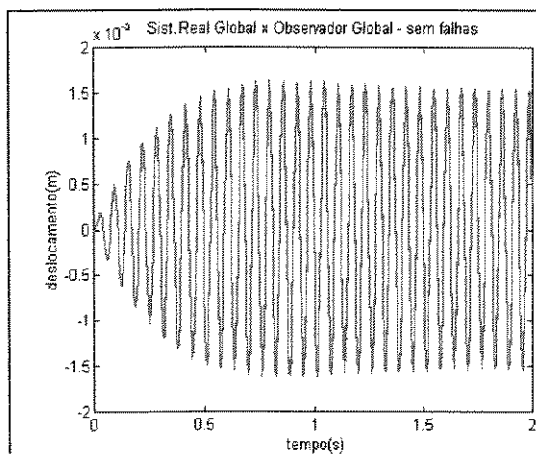


Figura 3.13

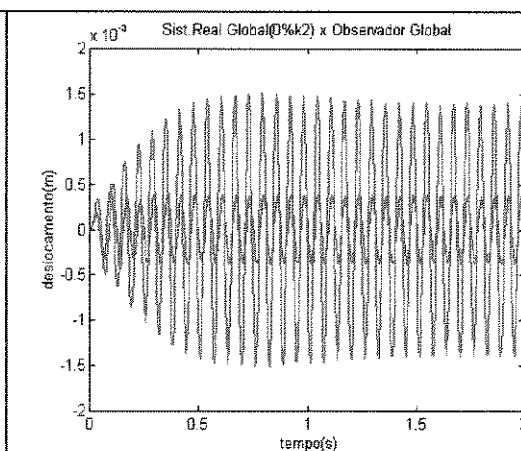


Figura 3.14

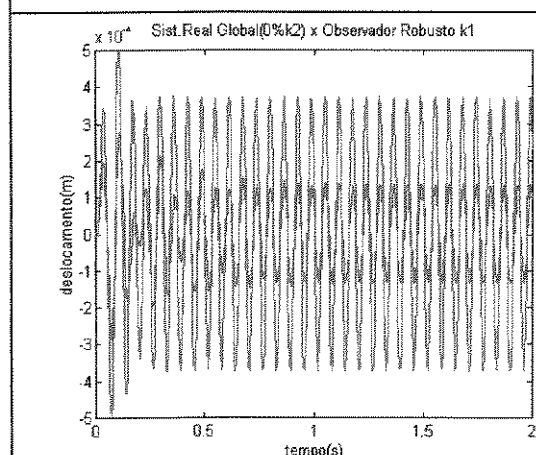


Figura 3.15

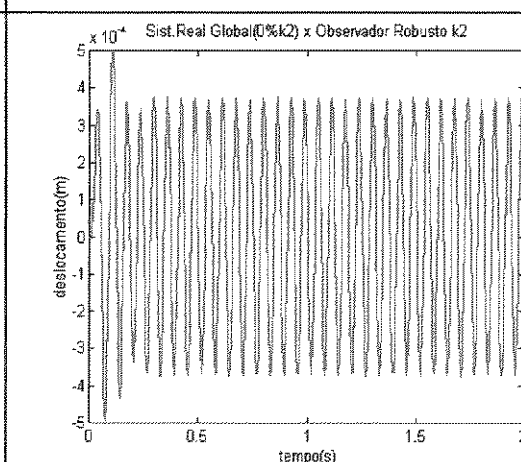


Figura 3.16

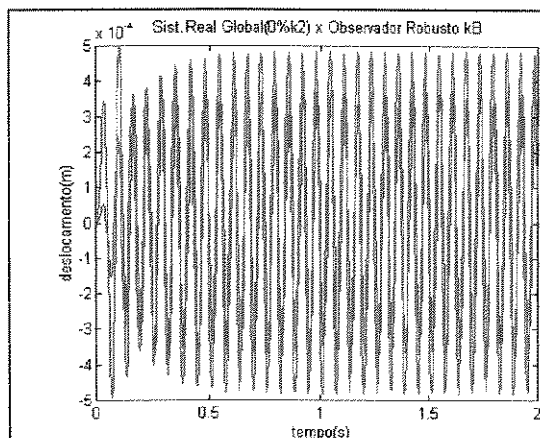


Figura 3.17

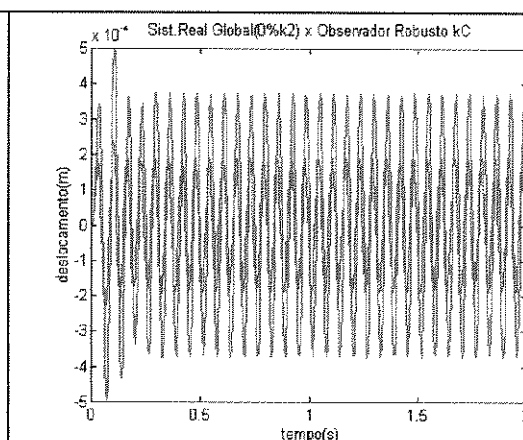


Figura 3.18

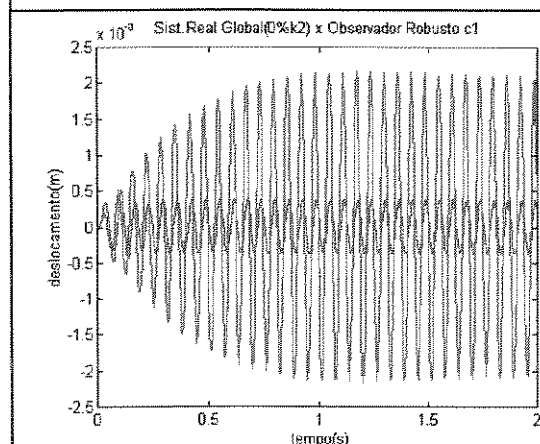


Figura 3.19

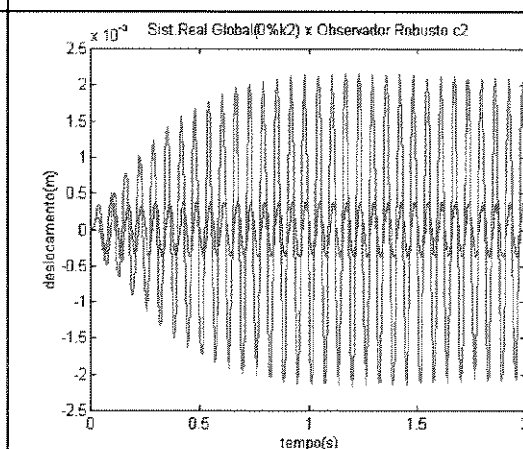


Figura 3.20

Na figura 3.13 tem-se a curva da resposta do sistema real sem falhas e a curva de resposta do observador global. Neste caso ambas são coincidentes, comprovando o fato de não haver nenhuma irregularidade com o sistema.

Na figura 3.14 apresentam-se as curvas de resposta do sistema real global quando a rigidez k_2 é retirada do sistema e do observador global. Como as curvas se distanciaram, pode-se detectar uma possível falha no sistema. Para localizar a falha, a análise é feita através das figuras 3.15 a 3.20.

Pode-se verificar que a única figura onde houve coincidência de valores nas curvas foi a 3.16, com observador robusto ao parâmetro k_2 , localizando-se portanto, a falha. A figura 3.17, que apresenta o observador robusto a k_B apresentou uma aproximação relativa das curvas, podendo deixar dúvidas sobre a ocorrência de um princípio de falha neste parâmetro. A análise através dos valores numéricos é mais efetiva e é feita com a utilização do programa

automático de detecção e localização de falhas desenvolvido neste trabalho, onde os valores de entrada são a força de excitação e a resposta do sistema.

Provocando sequencialmente falhas nos parâmetros k_1 , k_2 , k_B , k_C , c_1 e c_2 , obtém-se os valores descritos nas tabelas 3.6 e 3.7.

	Real sem falhas	Real 0 % k_1	Real 0 % k_2	Real 0 % k_B
Obsv.Global	.2255547E-08	.7177798E-04	.1098268E-04	.2872242E-04
Obs.Robusto k_1	.2090350E-03	.3997411E-07	.2344383E-03	.2179657E-03
Obs.Robusto k_2	.2926159E-04	.1767631E-03	.12700453E-09	.2694405E-05
Obs.Robusto k_B	.8441733E-05	.3273860E-03	.1567256E-05	.1455192E-08
Obs.Robusto k_C	.2092908E-04	.2051090E-04	.1704495E-04	.2130839E-04
Obs.Robusto c_1	.3738517E-04	.1009901E-04	.5591981E-04	.5951973E-04
Obs.Robusto c_2	.2780340E-05	.3406529E-03	.7511040E-05	.4767244E-04

Tabela 3.6 - Diferença dos Valores RMS de $x_3(t)$ - Falhas em k_1 , k_2 e k_B - Regime Permanente

	Real sem falhas	Real 0 % k_C	Real 0 % c_1	Real 0 % c_2
Obsv.Global	.2255547E-08	.5056041E-04	.4333776E-04	.4816211E-05
Obs.Robusto k_1	.2090350E-03	.1961128E-03	.1842376E-03	.2002775E-03
Obs.Robusto k_2	.2926159E-04	.4822215E-04	.3756210E-04	.2162115E-04
Obs.Robusto k_B	.8441733E-05	.4704194E-03	.1139280E-03	.3546179E-03
Obs.Robusto k_C	.2092908E-04	.2046546E-08	.2026747E-04	.2136038E-04
Obs.Robusto c_1	.3738517E-04	.3432399E-04	.7650911E-08	.2994914E-05
Obs.Robusto c_2	.2780340E-05	.2278255E-04	.4500408E-06	.6560711E-07

Tabela 3.7 - Diferença dos Valores RMS de $x_3(t)$ - Falhas em k_C , c_1 e c_2 - Regime Permanente

A análise é feita com o parâmetro k_2 em falha (3ª. coluna da tabela 3.6 - sistema real com 0% de k_2). Na 1ª. coluna e 1ª. linha da tabela 3.6, verifica-se que a diferença dos valores RMS de $x_3(t)$ entre o observador global e o sistema real sem falhas é da ordem de 10^{-8} , aumentando para 10^{-4} quando provocada falha no parâmetro k_2 . Na 2ª. linha da tabela,

verifica-se que a diferença dos valores RMS de $x_3(t)$ entre o observador robusto a k_1 e o sistema real sem falhas é da ordem de 10^{-3} , permanecendo na mesma ordem de grandeza quando comparado com o sistema real com falha em k_2 . Na 3ª. linha da tabela 3.6, a diferença dos valores RMS de $x_3(t)$ entre o observador robusto a k_2 e o sistema real sem falhas é da ordem de 10^{-4} , caindo para 10^{-9} quando comparado com o sistema real com falha em k_2 .

A análise continua da mesma forma até a verificação de todos os parâmetros sujeitos a falhas. No caso específico, foi encontrado o parâmetro k_2 com aproximação mais significativa de curvas, mas o parâmetro k_B também deve ser analisado por apresentar uma aproximação razoável das curvas. Nos outros parâmetros as diferenças dos valores RMS entre os observadores robustos a k_1 , k_C , c_1 e c_2 e o sistema real sem falhas permaneceram praticamente inalteradas quando comparados com os valores obtidos no sistema real com falha em k_2 . Desta forma, com a análise numérica restou ainda a dúvida quanto ao parâmetro k_B estar ou não em um processo de falha.

Quando provocada uma falha em k_B , verificou-se também uma aproximação das curvas entre o observador robusto a k_2 e o sistema real com falha em k_B . O mesmo processo aconteceu quando foram provocadas falhas nos amortecimentos c_1 e c_2 . Deve-se ressaltar que estes parâmetros estão na mesma posição da matriz dinâmica $[A]$ e o sistema está sendo analisado em seu regime permanente.

Curva de Tendência para um Parâmetro Específico Sujeito a Falha

Algumas partes do sistema mecânico são mais solicitadas que outras, devendo ter um acompanhamento mais rigoroso de seus componentes em relação a possíveis falhas. Desta forma, tem-se grande interesse no acompanhamento destes parâmetros para analisar a progressão de possíveis falhas ou mesmo na determinação de um percentual de variação dos mesmos, para que um sistema de alarme possa ser acionado durante a operação normal do sistema.

A seguir são construídos observadores de estado robustos a determinados valores de redução de rigidez no parâmetro k_1 , podendo-se acompanhar a evolução da falha e construir uma curva de tendências. As tabelas 3.8, 3.9, 3.10, 3.11, 3.12 e 3.13 mostram estes valores:

	Real 100 % k_1	Real 95 % k_1	Real 90 % k_1	Real 85 % k_1
Obsv.Global	.2255547E-08	.4508620E-06	.3406458E-06	.3422392E-06
Obsv.95 % k_1	.9354480E-06	.2059096E-08	.3502646E-06	.9021460E-07
Obsv.90 % k_1	.2428242E-05	.8928473E-06	.2051820E-08	.2491797E-06
Obsv.85 % k_1	.4705485E-05	.2423541E-05	.8530624E-06	.2022716E-08
Obsv.80 % k_1	.8123563E-05	.4875328E-05	.2443194E-05	.8275965E-06
Obsv.75 % k_1	.1266373E-04	.8638810E-05	.5120157E-05	.2509383E-05
Obsv.70 % k_1	.1817600E-04	.1356073E-04	.9243893E-05	.5492599E-05
Obsv.65 % k_1	.2461069E-04	.1957654E-04	.1462417E-04	.9989148E-05
Obsv.60 % k_1	.3190983E-04	.2661039E-04	.2122755E-04	.1591522E-04
Obsv.55 % k_1	.4003906E-04	.3459903E-04	.2896403E-04	.2321847E-04
Obsv.50 % k_1	.4901312E-04	.4353140E-04	.3777464E-04	.3178619E-04
Obsv.45 % k_1	.5888105E-04	.5343342E-04	.4766208E-04	.4158274E-04
Obsv.40 % k_1	.6974602E-04	.6439895E-04	.5870323E-04	.5264740E-04
Obsv.35 % k_1	.8177427E-04	.7658545E-04	.7102919E-04	.6509516E-04
Obsv.30 % k_1	.9520692E-04	.9021880E-04	.8486710E-04	.7912496E-04
Obsv.25 % k_1	.1099593E-03	.1052143E-03	.1001166E-03	.9463439E-04
Obsv.20 % k_1	.1257824E-03	.1213269E-03	.1165405E-03	.1113896E-03
Obsv.15 % k_1	.1428417E-03	.1387016E-03	.1342660E-03	.1295106E-03
Obsv.10 % k_1	.1615900E-03	.1577668E-03	.1537003E-03	.1493558E-03
Obsv.5 % k_1	.1830172E-03	.1794992E-03	.1757753E-03	.1718327E-03
Obsv.0 % k_1	.2089873E-03	.2057713E-03	.2023793E-03	.1988073E-03

Tabela 3.8 - Diferença dos Valores RMS de $x_3(t)$ - Rigidez de 100 a 85% k_1

Na tabela 3.8 verifica-se que a falha no sistema seria a diminuição da rigidez k_1 , variando de 100 a 85%. Para 100% de k_1 (quando não existe falhas no sistema), a diferença dos valores RMS do sistema real e observador global é da ordem de 10^{-8} (1ª.linha e 1ª. coluna).. Quando a coluna do sistema real com 95% de k_1 é analisada, pode-se verificar que

a diferença dos valores RMS do sistema real com 95% de rigidez em k_1 e observador global se modifica de 10^{-8} para 10^{-6} , podendo concluir que existe alguma irregularidade no sistema

Considerando-se ainda a coluna do sistema real com 95% de k_1 , quando a análise é feita entre os observadores robustos do sistema para localização da falha, verifica-se que a diferença dos valores RMS do sistema real sem falhas e o observador robusto a 95% de k_1 era da ordem de 10^{-6} caindo para 10^{-8} , havendo grandes possibilidades da falha estar em 95% de k_1 (perda de 5% de rigidez k_1). Entretanto, quando os observadores robustos a 90% k_1 , 85%, 80% e 75%, são analisados verifica-se também que houve uma diminuição da diferença entre os valores RMS. Embora estas diferenças tenham sido bem menos sensíveis do que a diferença do observador robusto a 95% de k_1 , pode-se afirmar através do programa de detecção e localização de falhas que esta redução poderá estar entre 95 e 75 % de k_1 (ou seja, perda de 5 e 20%), com grandes possibilidades de ser em torno de 95%.

Para a simulação de outros percentuais de perda de rigidez no parâmetro k_1 , a análise é feita de forma análoga, verificando-se um escalonamento nas tabelas apresentadas com as faixas de rigidez que o programa apresenta como possíveis falhas. Com isto, pode-se acompanhar a evolução de perda de rigidez no parâmetro k_1 ou mesmo criar um sistema de alarme que fosse acionado quando a perda chegar a 50%, por exemplo.

A seguir são apresentadas as tabelas 3.9, 3.10, 3.11, 3.12 e 3.13, que apresentam a simulação de 80 % k_1 a 0% k_1 , quando há uma perda total de rigidez.

	Real 80 % k_1	Real 75 % k_1	Real 70 % k_1	Real 65 % k_1
Obsv.Global	.1623484E-05	.3493195E-05	.5956310E-05	.8983654E-05
Obsv.95 % k_1	.7963463E-06	.2308370E-05	.4449059E-05	.7200608E-05
Obsv.90 % k_1	.1728622E-06	.1257853E-05	.3010588E-05	.5427020E-05
Obsv.85 % k_1	.1423032E-06	.4292015E-06	.1722423E-05	.3726120E-05
Obsv.80 % k_1	.2073648E-08	.4527101E-07	.6858318E-06	.2185225E-05
Obsv.75 % k_1	.8170537E-06	.1804437E-08	.3996684E-07	.9289870E-06
Obsv.70 % k_1	.2631707E-05	.8231291E-06	.2306479E-08	.1160224E-06
Obsv.65 % k_1	.5961985E-05	.2832116E-05	.8629431E-06	.2408342E-08
Obsv.60 % k_1	.1089423E-04	.6521877E-05	.3124500E-05	.9317446E-06
Obsv.55 % k_1	.1748480E-04	.1201334E-04	.7193921E-05	.3462199E-05
Obsv.50 % k_1	.2563006E-04	.1942218E-04	.1340658E-04	.8010589E-05
Obsv.45 % k_1	.3520946E-04	.2859269E-04	.2183989E-04	.1517693E-04
Obsv.40 % k_1	.4621877E-04	.3941971E-04	.3228141E-04	.2489480E-04
Obsv.35 % k_1	.5873874E-04	.5193724E-04	.4467085E-04	.3694505E-04
Obsv.30 % k_1	.7294844E-04	.6628086E-04	.5907704E-04	.5129205E-04
Obsv.25 % k_1	.8871021E-04	.8228536E-04	.7528574E-04	.6763517E-04
Obsv.20 % k_1	.1058195E-03	.9975675E-04	.9311505E-04	.8579893E-04
Obsv.15 % k_1	.1243656E-03	.1187693E-03	.1126228E-03	.1058184E-03
Obsv.10 % k_1	.1446885E-03	.1396227E-03	.1340694E-03	.1279236E-03
Obsv.5 % k_1	.1676301E-03	.1631100E-03	.1581918E-03	.1527758E-03
Obsv.0 % k_1	.1950264E-03	.1909963E-03	.1866641E-03	.1819521E-03

Tabela 3.9 - Diferença dos Valores RMS de $x_3(t)$ - Rigidez de 80 a 65% k_1

	Real 60 % k_1	Real 55 % k_1	Real 50 % k_1	Real 45 % k_1
Obsv.Global	.1255766E-04	.1660014E-04	.2116518E-04	.2640604E-04
Obsv.95 % k_1	.1053929E-04	.1440977E-04	.1885864E-04	.2407258E-04
Obsv.90 % k_1	.8478244E-05	.1212279E-04	.1642363E-04	.2155011E-04
Obsv.85 % k_1	.6425471E-05	.9780437E-05	.1386857E-04	.1888057E-04
Obsv.80 % k_1	.4449277E-05	.7442359E-05	.1124977E-04	.1607172E-04
Obsv.75 % k_1	.2653775E-05	.5189671E-05	.8623305E-05	.1317654E-04
Obsv.70 % k_1	.1165950E-05	.3119756E-05	.6072551E-05	.1025795E-04
Obsv.65 % k_1	.1880326E-06	.1400098E-05	.3725138E-05	.7409544E-05
Obsv.60 % k_1	.2466550E-08	.2461675E-06	.1756547E-05	.4760535E-05
Obsv.55 % k_1	.1045017E-05	.2728484E-08	.4096801E-06	.2501380E-05
Obsv.50 % k_1	.3798719E-05	.1076231E-05	.2750312E-08	.7709896E-06
Obsv.45 % k_1	.9049501E-05	.4133799E-05	.1016750E-05	.2895831E-08
Obsv.40 % k_1	.1746429E-04	.1040001E-04	.4619447E-05	.1079068E-05
Obsv.35 % k_1	.2882371E-04	.2046027E-04	.1234887E-04	.5600130E-05
Obsv.30 % k_1	.4290222E-04	.3391334E-04	.2456126E-04	.1540412E-04
Obsv.25 % k_1	.5926320E-04	.5009341E-04	.4022513E-04	.2998652E-04
Obsv.20 % k_1	.7770439E-04	.6869723E-04	.5878415E-04	.4814556E-04
Obsv.15 % k_1	.9823000E-04	.8968983E-04	.8014259E-04	.6966482E-04
Obsv.10 % k_1	.1210385E-03	.1132296E-03	.1044061E-03	.9458174E-04
Obsv.5 % k_1	.1467243E-03	.1398497E-03	.1320430E-03	.1232869E-03
Obsv.0 % k_1	.1767492E-03	.1708887E-03	.1642719E-03	.1568831E-03

Tabela 3.10 - Diferença dos Valores RMS de $x_3(t)$ - Rigidez de 60 a 45% k_1

	Real 40 % k_1	Real 35 % k_1	Real 30 % k_1	Real 25 % k_1
Obsv.Global	.3234990E-04	.3898419E-04	.4620910E-04	.5382895E-04
Obsv.95 % k_1	.3006562E-04	.3685098E-04	.4434018E-04	.5232755E-04
Obsv.90 % k_1	.2757472E-04	.3447745E-04	.4220978E-04	.5055990E-04
Obsv.85 % k_1	.2486989E-04	.3187153E-04	.3981538E-04	.4852811E-04
Obsv.80 % k_1	.2198545E-04	.2902019E-04	.3715468E-04	.4618958E-04
Obsv.75 % k_1	.1894084E-04	.2595586E-04	.3421312E-04	.4342347E-04
Obsv.70 % k_1	.1577571E-04	.2269438E-04	.3100638E-04	.4014258E-04
Obsv.65 % k_1	.1256946E-04	.1927867E-04	.2739747E-04	.3631810E-04
Obsv.60 % k_1	.9397038E-05	.1568053E-04	.2332797E-04	.3192236E-04
Obsv.55 % k_1	.6329654E-05	.1184019E-04	.1885631E-04	.2697826E-04
Obsv.50 % k_1	.3432775E-05	.7927098E-05	.1408589E-04	.2155664E-04
Obsv.45 % k_1	.1093191E-05	.4235641E-05	.9254189E-05	.1580817E-04
Obsv.40 % k_1	.3121386E-08	.1283479E-05	.4742280E-05	.1002553E-04
Obsv.35 % k_1	.1376313E-05	.3361492E-08	.1241060E-05	.4727743E-05
Obsv.30 % k_1	.7398710E-05	.2060522E-05	.4438334E-08	.8271309E-06
Obsv.25 % k_1	.1980653E-04	.1043644E-04	.3359237E-05	.6737537E-08
Obsv.20 % k_1	.3693887E-04	.2550884E-04	.1461625E-04	.5566195E-05
Obsv.15 % k_1	.5824187E-04	.4591625E-04	.3290761E-04	.1984727E-04
Obsv.10 % k_1	.8362917E-04	.7140309E-04	.5778139E-04	.4274075E-04
Obsv.5 % k_1	.1133982E-03	.1021167E-03	.8912482E-04	.7403245E-04
Obsv.0 % k_1	.1485158E-03	.1388710E-03	.1275394E-03	.1139492E-03

Tabela 3.11 - Diferença dos Valores RMS de $x_3(t)$ - Rigidez de 40 a 25% k_1

	Real 20 % k_1	Real 15 % k_1	Real 10 % k_1	Real 5 % k_1
Obsv.Global	.6142001E-04	.6781300E-04	.7237356E-04	.7434230E-04
Obsv.95 % k_1	.6039516E-04	.6709881E-04	.7208294E-04	.7460132E-04
Obsv.90 % k_1	.5904784E-04	.6605446E-04	.7148198E-04	.7458386E-04
Obsv.85 % k_1	.5731291E-04	.6461154E-04	.7049403E-04	.7422094E-04
Obsv.80 % k_1	.5512794E-04	.6271266E-04	.6904763E-04	.7343908E-04
Obsv.75 % k_1	.5244804E-04	.6027200E-04	.6707740E-04	.7215563E-04
Obsv.70 % k_1	.4919815E-04	.5724210E-04	.6448926E-04	.7028655E-04
Obsv.65 % k_1	.4532447E-04	.5353322E-04	.6121414E-04	.6773871E-04
Obsv.60 % k_1	.4078948E-04	.4909527E-04	.5716675E-04	.6443172E-04
Obsv.55 % k_1	.3558781E-04	.4389074E-04	.5228643E-04	.6027399E-04
Obsv.50 % k_1	.2973623E-04	.3791001E-04	.4654461E-04	.5520464E-04
Obsv.45 % k_1	.2334281E-04	.3120805E-04	.3993459E-04	.4918440E-04
Obsv.40 % k_1	.1660919E-04	.2390907E-04	.3252996E-04	.4221873E-04
Obsv.35 % k_1	.9929645E-05	.1628121E-04	.2448721E-04	.3437451E-04
Obsv.30 % k_1	.3952693E-05	.8802293E-05	.1611377E-04	.2582524E-04
Obsv.25 % k_1	.1243170E-06	.2305940E-05	.7986397E-05	.1689520E-04
Obsv.20 % k_1	.9778887E-08	.1659311E-05	.1106804E-05	.8175615E-05
Obsv.15 % k_1	.8199640E-05	.1321314E-07	.2533357E-05	.7106282E-06
Obsv.10 % k_1	.2663882E-04	.1097561E-04	.1640001E-07	.4126516E-05
Obsv.5 % k_1	.5645625E-04	.3637841E-04	.1617377E-04	.2361776E-07
Obsv.0 % k_1	.9736269E-04	.7698576E-04	.5337702E-04	.2697020E-04

Tabela 3.12 - Diferença dos Valores RMS de $x_3(t)$ - Rigidez de 20 a 5% k_1

	Real 0 % k_1
Obsv.Global	.7177798E-04
Obsv.95 % k_1	.7262749E-04
Obsv.90 % k_1	.7327842E-04
Obsv.85 % k_1	.7366376E-04
Obsv.80 % k_1	.7370541E-04
Obsv.75 % k_1	.7333273E-04
Obsv.70 % k_1	.7244451E-04
Obsv.65 % k_1	.7093874E-04
Obsv.60 % k_1	.6873398E-04
Obsv.55 % k_1	.6572269E-04
Obsv.50 % k_1	.6181934E-04
Obsv.45 % k_1	.5695088E-04
Obsv.40 % k_1	.5105816E-04
Obsv.35 % k_1	.4414294E-04
Obsv.30 % k_1	.3623255E-04
Obsv.25 % k_1	.2743257E-04
Obsv.20 % k_1	.1786911E-04
Obsv.15 % k_1	.7154114E-05
Obsv.10 % k_1	.3457229E-05
Obsv.5 % k_1	.9802228E-05
Obsv.0 % k_1	.3997411E-07

Tabela 3.13 - Diferença dos Valores RMS de $x_3(t)$ - Rigidez de 0% k_1

Após análise das tabelas mostradas anteriormente, pode-se concluir a partir de 5% de perda de rigidez (95% de k_1) o programa consegue detectar o início da falha, mas pode afirmar somente que esta perda está entre 5 e 25% de k_1 . Continuado a análise, verifica-se que com 10% de perda de rigidez a faixa será de 5 a 30%, com 15% será de 5 a 35%, com 20% será de 10 a 35%, com 25% será de 15 a 40%, com 30% será de 20 a 45% e assim por diante.

A seguir é feita uma análise do mesmo parâmetro k_1 , verificando-se as variações das frequências naturais do sistema. Através da tabela 3.4 são apresentados os valores das frequências naturais do sistema sem falhas e os valores destas frequências quando inicia-se o processo de perda de rigidez no parâmetro k_1 . Os valores das frequências naturais do sistema sem falhas (100% de k_1) são descritos por f_1 , f_2 e f_3

100 % k_1	$f_1 = 7.72$ Hz	$f_2 = 15.293$ Hz	$f_3 = 15.448$ Hz
	f_1 (Hz) - dif (%)	f_2 (Hz) - dif (%)	f_3 (Hz) - dif (%)
95 % k_1	7.626 - (1.21)	15.156 - (0.89)	15.459 - (0.07)
90 % k_1	7.526 - (2.52)	15.019 - (1.79)	15.473 - (0.16)
85 % k_1	7.420 - (3.88)	14.881 - (2.69)	15.487 - (0.25)
80 % k_1	7.308 - (5.36)	14.744 - (3.59)	15.502 - (0.35)
75 % k_1	7.189 - (6.90)	14.605 - (4.49)	15.520 - (0.46)
70 % k_1	7.064 - (8.52)	14.467 - (5.40)	15.539 - (0.58)
65 % k_1	6.931 - (10.24)	14.327 - (6.31)	15.559 - (0.71)
60 % k_1	6.790 - (13.23)	14.186 - (7.24)	15.581 - (0.85)
55 % k_1	6.641 - (13.99)	14.045 - (8.16)	15.604 - (0.99)
50 % k_1	6.482 - (16.05)	13.902 - (9.09)	15.629 - (1.16)
45 % k_1	6.314 - (18.23)	13.759 - (10.03)	15.655 - (1.32)
40 % k_1	6.134 - (20.56)	13.615 - (10.97)	15.681 - (1.48)
35 % k_1	5.942 - (23.05)	13.471 - (11.91)	15.708 - (1.65)
30 % k_1	5.735 - (25.73)	13.326 - (12.86)	15.734 - (1.82)
25 % k_1	5.513 - (28.61)	13.182 - (13.80)	15.761 - (1.99)
20 % k_1	5.272 - (31.73)	13.037 - (14.75)	15.787 - (2.15)
15 % k_1	5.009 - (35.13)	12.893 - (15.69)	15.812 - (2.30)
10 % k_1	4.721 - (38.87)	12.749 - (16.63)	15.835 - (2.44)
05 % k_1	4.401 - (43.01)	12.607 - (17.56)	15.857 - (2.58)
00 % k_1	4.042 - (47.65)	12.466 - (18.48)	15.878 - (2.71)

Tabela 3.14 - Variações das Frequências Naturais do Sistema

Esta análise no domínio da frequência é útil somente para a detecção de falhas no sistema e não para a localização da mesma. Para comparação, através da tabela 3.5, são utilizados os observadores globais que também só detectam as possíveis falhas.

	variação % f_1	variação % Obs.
Obsv.95 % k_1	(1.21)	(99.50)
Obsv.90 % k_1	(2.52)	(99.36)
Obsv.85 % k_1	(3.88)	(99.35)
Obsv.80 % k_1	(5.36)	(99.86)
Obsv.75 % k_1	(6.90)	(99.93)
Obsv.70 % k_1	(8.52)	(99.94)
Obsv.65 % k_1	(10.24)	(99.98)
Obsv.60 % k_1	(13.23)	(99.98)
Obsv.55 % k_1	(13.99)	(99.98)
Obsv.50 % k_1	(16.05)	(99.99)
Obsv.45 % k_1	(18.23)	(99.99)
Obsv.40 % k_1	(20.56)	(99.99)
Obsv.35 % k_1	(23.05)	(99.99)
Obsv.30 % k_1	(25.73)	(99.99)
Obsv.25 % k_1	(28.61)	(99.99)
Obsv.20 % k_1	(31.73)	(99.99)
Obsv.15 % k_1	(35.13)	(99.99)
Obsv.10 % k_1	(38.87)	(99.99)
Obsv.5 % k_1	(43.01)	(99.99)
Obsv.0 % k_1	(47.65)	(99.99)

Tabela 3.15 - Variação da Frequência Natural f_1 e Variação na Diferença dos Valores RMS da Amplitude para o Observador Global

Verifica-se na tabela 3.15 que com uma pequena diminuição na rigidez do parâmetro k_1 (5%), a variação na frequência natural que mais oscilou (f_1) foi bem menor que a variação das amplitudes das curvas do sistema real e observador global.

Continuando a análise, verifica-se que para qualquer percentual na variação do parâmetro k_1 , a variação percentual dos observadores é bem maior que a variação das frequências, demonstrando assim, a forma eficaz com que o programa computacional desenvolvido utilizando observadores de estado consegue detectar falhas em sistemas dinâmicos.

3.2.1.4 Sistema Massa - Mola - Amortecedor - Regime Permanente : Influência de Perturbação Aleatória na Excitação

A perturbação aleatória também é obtida calculando-se 10% do valor RMS dos valores amostrados do sinal $F(t)$, multiplicando estes valores por números randômicos gerados com média igual a zero e desvio padrão igual a um e acrescentando estes valores na excitação do sistema. Provocando novamente falhas nos elementos k_1 , k_2 , k_B , k_C , c_1 e c_2 , obtém-se os valores das tabelas 3.16 e 3.17 que são as diferenças dos valores RMS das curvas do sistema real e dos observadores global e robustos aos parâmetros específicos.

	Real sem falhas	Real 0 % k_1	Real 0 % k_2	Real 0 % k_B
Obsv.Global	.5847302E-08	.5902311E-04	.3629604E-04	.5529012E-04
Obs.Robusto k_1	.3589230E-03	.4985660E-07	.5436554E-03	.4379054E-03
Obs.Robusto k_2	.4547382E-04	.2376594E-03	.43209551E-07	.5438022E-05
Obs.Robusto k_B	.6012237E-05	.5782013E-03	.3765003E-06	.3602867E-07
Obs.Robusto k_C	.4320938E-04	.4502317E-04	.3745498E-04	.4432076E-04
Obs.Robusto c_1	.2780231E-04	.3698091E-04	.6839023E-04	.5564989E-04
Obs.Robusto c_2	.5049382E-05	.7429410E-03	.9765022E-05	.6512286E-04

Tabela 3.16 - Diferença dos Valores RMS de $x_3(t)$ - Falhas em k_1 , k_2 e k_B - Regime Permanente - Influência de Perturbação Aleatória

	Real sem falhas	Real 0 % k_C	Real 0 % c_1	Real 0 % c_2
Obsv.Global	.5847302E-08	.7603928E-04	.7290342E-04	.7629734E-05
Obs.Robusto k_1	.3589230E-03	.4402287E-03	.4320215E-03	.4916674E-03
Obs.Robusto k_2	.4547382E-04	.6922316E-04	.5650233E-04	.4403205E-04
Obs.Robusto k_B	.6012237E-05	.7592116E-03	.3087324E-03	.6730212E-03
Obs.Robusto k_C	.4320938E-04	.4768296E-07	.4817344E-04	.5642178E-04
Obs.Robusto c_1	.2780231E-04	.7509126E-04	.9544101E-07	.4116459E-05
Obs.Robusto c_2	.5049382E-05	.4201262E-04	.7724318E-06	.7932022E-07

Tabela 3.17 - Diferença dos Valores RMS de $x_3(t)$ - Falhas em k_C , c_1 e c_2 -Regime Permanente
Influência de Perturbação Aleatória

Analisando as tabelas 3.16 e 3.17, conclui-se que é evidente a localização das falhas através dos observadores de estado robustos aos parâmetros, embora tenhamos que analisar também os outros parâmetros que tiveram uma aproximação considerável das curvas dos sistemas real e observadores robustos. No caso, quando provocada falha em k_2 , o parâmetro k_B , também deve ser analisado e quando provocada falha no amortecimento c_1 , c_2 deve ser analisado. Comparando estes valores com os das tabelas 3.6 e 3.7, verifica-se que as curvas aproximam-se menos devido a influência da perturbação aleatória introduzida na excitação, mas nada que comprometa a detecção e a localização da falha no sistema analisado.

A seguir será apresentada uma aplicação dos observadores de estado em um selo dinâmico, simulando um sistema muito utilizado nas indústrias.

3.2.2 - Selo Dinâmico

O sistema da figura 3.21 pode ser representado pela seguinte equação diferencial:

$$[M] \{ \ddot{x}(t) \} + [C] \{ \dot{x}(t) \} + [K] \{ x(t) \} = \{ f(t) \} \quad (3.1)$$

onde $[M] = \begin{bmatrix} M_{yy} & 0 \\ 0 & M_{zz} \end{bmatrix}$, $[C] = \begin{bmatrix} C_{yy} & -C_{yz} \\ C_{zy} & C_{zz} \end{bmatrix}$, e $[K] = \begin{bmatrix} K_{yy} & -K_{yz} \\ K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix}$

$$\{x(t)\} = \begin{Bmatrix} y(t) \\ z(t) \end{Bmatrix} \quad e \quad \{f(t)\} = \begin{Bmatrix} f_y(t) \\ f_z(t) \end{Bmatrix}$$

Sendo que o eixo $y(t)$ é representado na vertical da Figura 3.21 e $z(t)$ perpendicular a ele.

Abaixo são apresentados os valores dos parâmetros e das condições iniciais:

$$M_{yy} = 26.200 \text{ Kg}, M_{zz} = 26.200 \text{ Kg}$$

$$C_{yy} = 1124.000 \text{ Ns/m}, C_{yz} = 720.000 \text{ Ns/m}, C_{zy} = 720.000 \text{ Ns/m}, C_{zz} = 1124.000 \text{ Ns/m}$$

$$K_{yy} = 468430.000 \text{ N/m}, K_{yz} = 42811.000 \text{ N/m}, K_{zy} = 42811.000 \text{ N/m},$$

$$K_{zz} = 468430.000 \text{ N/m}, f_y(t) = 0.000, f_z(t) = 0.000, 0.00 \leq t \leq 0.50 \text{ segundos},$$

$$y(0) = 0.000, z(0) = 0.000, \dot{y}(t) = 1.000 \text{ m/s}, \dot{z}(t) = 0.000$$

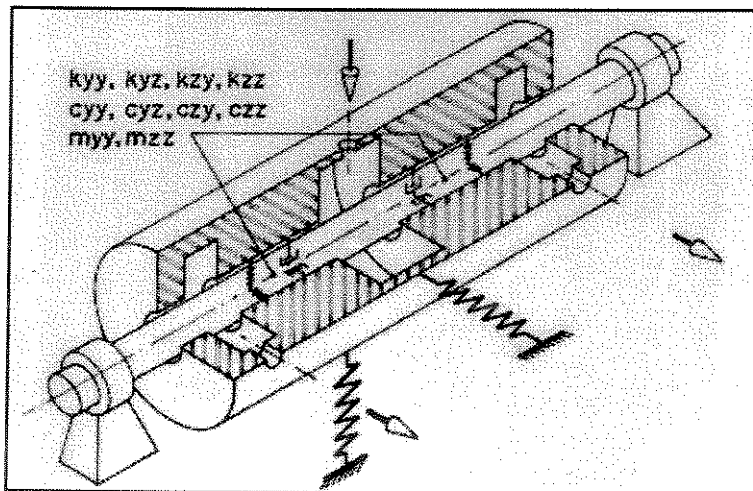


Figura 3.21 - Selo Dinâmico

Os valores dos parâmetros físicos do sistema e consequentemente as frequências naturais foram também obtidos pelo método de identificação de parâmetros através das séries de Fourier, considerando-se 10% de perturbação aleatória na resposta. Estes valores são apresentados na tabela 3.18 em comparação com os valores teóricos apresentados anteriormente.

	Teórico	Identificado	Diferença Relativa%
Freq. Natural f_1 (Hz)	19.367	19.165	2.00
Freq. Natural f_2 (Hz)	23.315	18.782	0.61
K_{yy} (N/m)	468430.000	468864.980	0.93
K_{yz} (N/m)	42811.000	40849.730	4.58
K_{zy} (N/m)	42811.000	40527.752	5.33
K_{zz} (N/m)	468430.000	460740.620	1.64
C_{yy} (Ns/m)	1124.000	1056.960	5.96
C_{yz} (Ns/m)	720.000	700.273	2.73
C_{zy} (Ns/m)	720.000	750.497	4.06
C_{zz} (Ns/m)	1124.000	1099.273	2.20

Tabela 3.18 - Valores dos Parâmetros Identificados e Experimentais do Selo Dinâmico

Provocando falhas nos elementos k_{yy} e k_{yz} , obtêm-se os valores da tabela 3.19 que são as diferenças dos valores RMS das curvas do sistema real e dos observadores global e robustos aos parâmetros específicos.

	Real sem falhas	Real 0 % k_{yy}	Real 0 % k_{yz}
Obsv.Global	.4697358E-05	.1179963E-01	.1074065E-02
Obs.Robusto k_{yy}	.1163359E-01	.3309948E-04	.1163839E-01
Obs.Robusto k_{yz}	.1089828E-03	.1179107E-02	.1695962E-06
Obs.Robusto k_{zy}	.2556306E-04	.1180813E-03	.3478082E-04
Obs.Robusto k_{zz}	.3972787E-03	.1220882E-03	.3912935E-03
Obs.Robusto c_{yy}	.4920766E-03	.1231552E-03	.4861254E-03
Obs.Robusto c_{yz}	.1105342E-03	.1191226E-03	.1044833E-03
Obs.Robusto c_{zy}	.9149185E-04	.1189774E-04	.8546101E-04
Obs.Robusto c_{zz}	.7280899E-04	.1173243E-03	.7884670E-04

Tabela 3.19 - Diferença dos Valores RMS de $y_2(t)$ - Selo Dinâmico

A análise é feita com o parâmetro k_{yy} em falha (2ª. coluna da tabela 3.19 - sistema real com 0% de k_{yy}). Na 1ª. coluna e 1ª. linha da tabela 3.19, verifica-se que a diferença dos valores RMS de $z(t)$ entre o observador global e o sistema real sem falhas é da ordem de 10^{-5} , aumentando para 10^{-1} quando provocada falha no parâmetro k_{yy} . Na 2ª. linha da tabela, verifica-se que a diferença dos valores RMS de $z(t)$ entre o observador robusto a k_{yy} e o sistema real sem falhas é da ordem de 10^{-1} caindo para 10^{-4} , havendo fortes indícios de haver falha no parâmetro k_{yy} . Entretanto, todos os outros parâmetros sujeitos a falhas devem ser analisados. Na 3ª. linha da tabela, a diferença dos valores RMS de $z(t)$ entre o observador robusto a k_{yz} e o sistema real sem falhas é da ordem de 10^{-3} , aumentando para 10^{-2} quando comparado com o sistema real com falha em k_{yy} . Neste caso o parâmetro k_{yy} já fica descartado de qualquer possibilidade de falha. A análise continua e pode-se verificar que somente o componente k_{yy} pode estar com algum problema.

CAPÍTULO 4

ANÁLISE EXPERIMENTAL - RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Montagem da Bancada de Testes

Foi montado um sistema dinâmico de mesas vibratórias constituído de lâminas metálicas de aço inoxidável que fornecem a rigidez ao sistema; de placas de alumínio para construção das mesas e borracha para simular amortecimento viscoso. Cada coluna de sustentação das mesas é composta por um conjunto de lâminas metálicas, para que se tenha condições de simular uma falha retirando do sistema uma ou mais lâminas. As borrachas são fixadas entre as lâminas, como pode-se observar na figura 4.1.

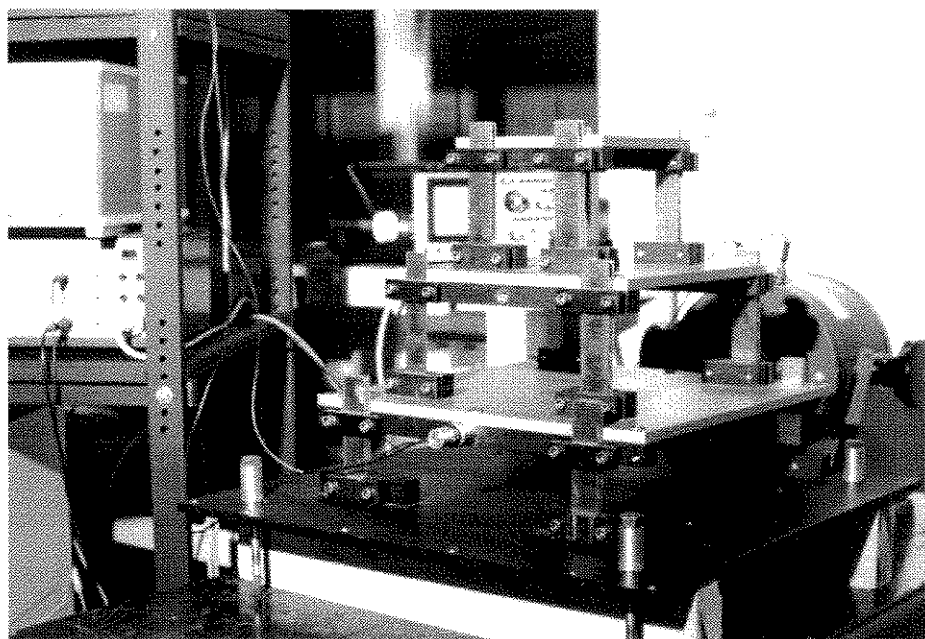


Figura 4.1 - Montagem Experimental: Mesa Vibratória

Para o sistema acima, foram utilizados os seguintes materiais e equipamentos:

MATERIAIS:

- 3 chapas de alumínio com dimensões de (0.350x 0.350x 0.010m, (0.255 x 0.255 x 0.010)m e (0.158 x 0.158 x 0.010)m
- 28 lâminas metálicas de aço inoxidável
 - Mesa inferior: 8 lâminas de (0.420 x 0.250 x 0.001)m
 - Mesa intermediária: 10 lâminas de (0.678 x 0.250 x 0.001)m
 - Mesa superior: 10 lâminas de (0.682 x 0.250 x 0.001)m
- 10 tabletes de borracha de 0.006m de espessura nas dimensões das lâminas
- Parafusos para fixação, chapas de aço para o suporte lateral e a base.

EQUIPAMENTOS:

- Transdutor de força B & K tipo 8200 (3.83 pc/N)
- Acelerômetros tipo KD 35 (5.04 mv/ms⁻²)
- Amplificador de potência Robotron LV 103 (100 W)
- Gerador de sinais Robotron 03006 (0.2 Hz a 200 KHz)
- Gerador de ruído Robotron 03004 (ruído branco e rosa: 2 Hz a 200 KHz)
- Gerador de funções Elektronik 1264/D (0.02 Hz a 2 MHz)
- Medidor de Vibrações Robotron 036 (1 Hz a 15 KHz)
- Osciloscópio Tektronix 2230 (2 canais)
- Sistema de Aquisição de Dados DaqBook/DaqBoard (16 canais) com Software DasyLab
- Sensor de deslocamento tipo LVDT (0.5mm a 3.0mm; 1 a 14V)

4.2 SISTEMA PARA AQUISIÇÃO DE DADOS

Para a análise da estrutura descrita acima, utilizou-se o sistema de aquisição de dados *DaqBook/DaqBoard* (16 canais) com o *software DasyLab*. As figuras 4.2 e 4.3 mostram os fluxogramas montados para a análise de frequências e para aquisição dos valores de deslocamentos utilizados nos observadores de estado.

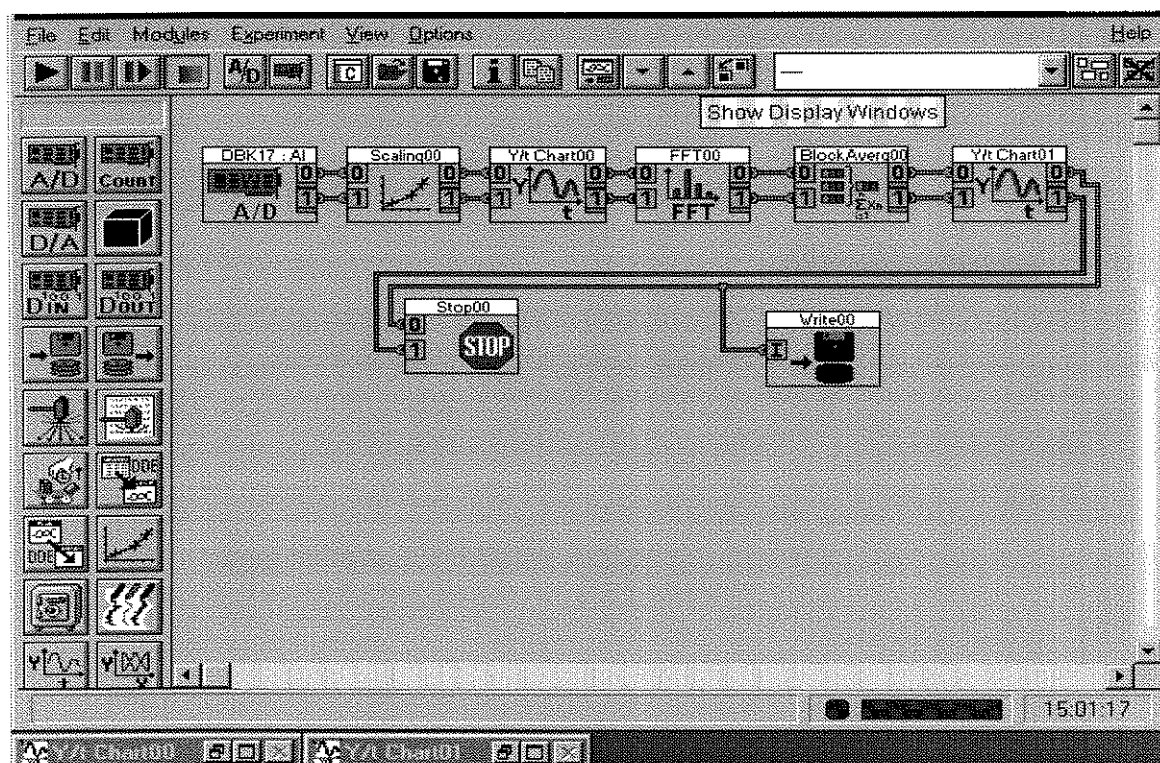


Figura 4.2 - Fluxograma para Análise de Frequências (Entrada Impulsiva)

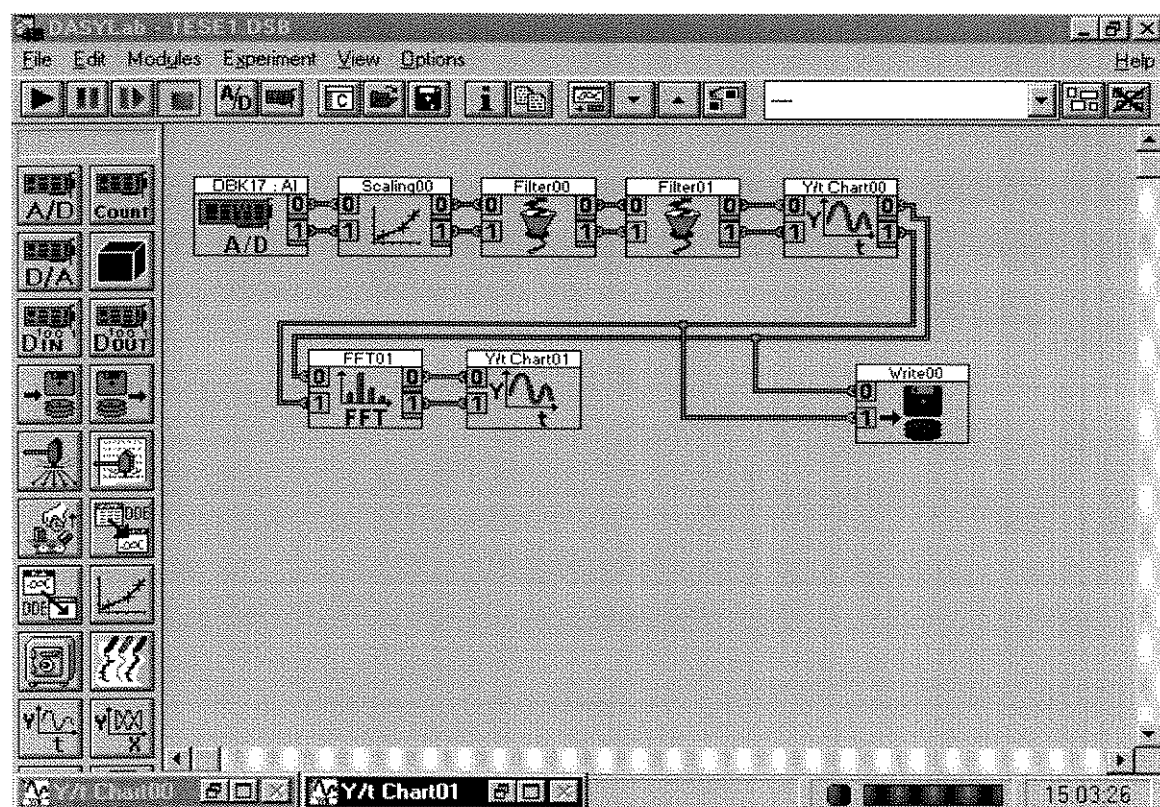


Figura 4.3 - Fluxograma para Aquisição de Sinais

4.3 Modelo Matemático do Sistema com Mesas Vibratórias

Considerando-se a montagem experimental da Fig. 4.1 como um sistema de 3 graus de liberdade, o primeiro bloco com a massa m_1 representa a mesa vibratória inferior, o segundo bloco com a massa m_2 representa a mesa intermediária e o terceiro bloco com a massa m_3 a mesa superior.

Na figura 4.4 é apresentado um esquema do modelo discretizado do sistema de mesas vibratórias:

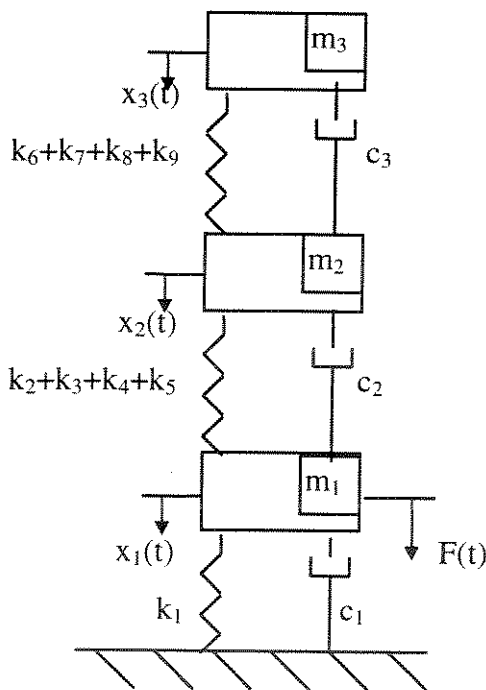


Figura 4.4 - Sistema com Mesas Vibratórias Discretizado

O sistema de equações diferenciais que descreve este sistema é apresentado na equação 4.1:

$$\begin{aligned}
 m_1 \ddot{x}_1(t) + c_2 \dot{x}_2(t) + (c_1 + c_2) \dot{x}_1(t) + (k_1 + k_2 + k_3 + k_4 + k_5)x_1(t) - (k_2 + k_3 + k_4 + k_5)x_2(t) &= F(t) \\
 m_2 \ddot{x}_2(t) - c_2 \dot{x}_1(t) + (c_2 + c_3) \dot{x}_2(t) - c_3 \dot{x}_3(t) + (k_2 + k_3 + k_4 + k_5 + k_6 + k_7 + k_8 + k_9)x_2(t) - & \\
 (k_2 + k_3 + k_4 + k_5)x_1(t) - (k_6 + k_7 + k_8 + k_9)x_3(t) &= 0 \\
 m_3 \ddot{x}_3(t) - (k_6 + k_7 + k_8 + k_9)x_2(t) - c_3 \dot{x}_2(t) + c_3 \dot{x}_3(t) + (k_6 + k_7 + k_8 + k_9)x_3(t) + k_C x_3(t) &= 0
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

Na forma matricial tem-se a equação:

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (c_1 + c_2) & -c_2 & 0 \\ -c_2 & (c_2 + c_3) & -c_3 \\ 0 & -c_3 & c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (k_1 + k_2 + k_3 + k_4 + k_5) & -(k_2 + k_3 + k_4 + k_5) & 0 \\ -(k_2 + k_3 + k_4 + k_5) & k_2 + k_3 + k_4 + k_5 + k_6 + k_7 + k_8 + k_9 & -(k_6 + k_7 + k_8 + k_9) \\ 0 & -(k_6 + k_7 + k_8 + k_9) & (k_6 + k_7 + k_8 + k_9) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F(t) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

4.4 Frequências Naturais do Sistema Completo

Através de uma força impulsiva no sistema composto de mesas vibratórias, colocando-se acelerômetros nas mesas inferior e intermediária obteve-se as frequências naturais, como se pode verificar nas curvas das figuras 4.5a e 4.5b.

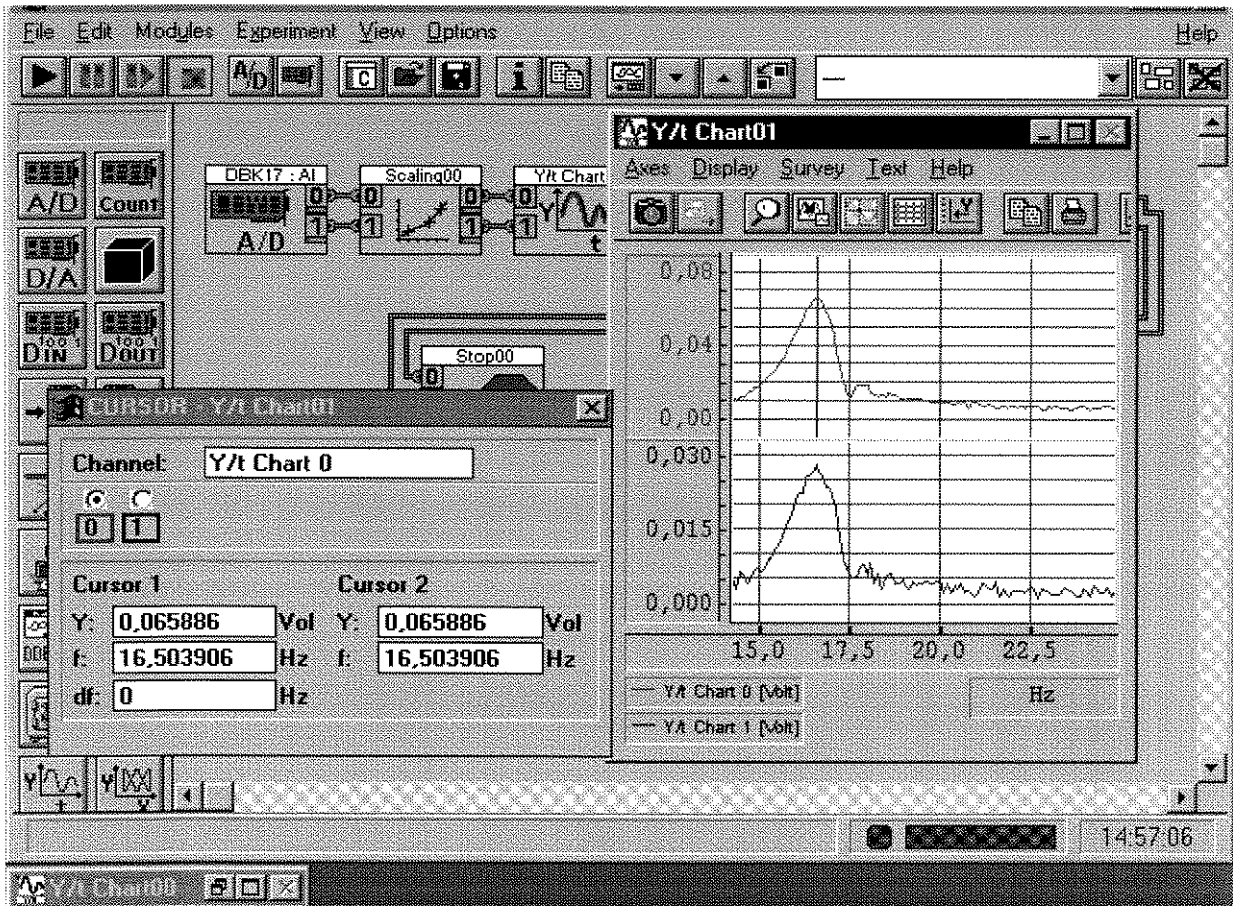


Figura 4.5a - Espectro de Frequências do Sistema Completo

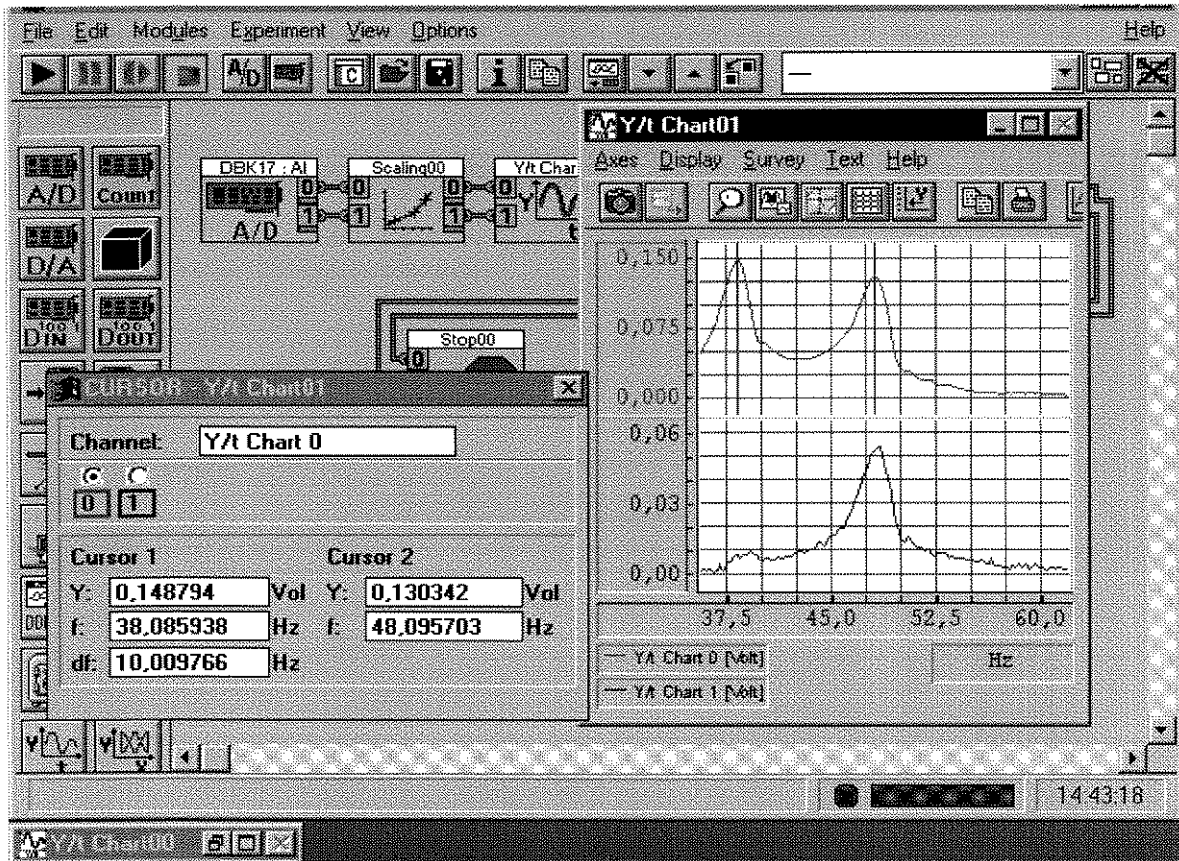


Figura 4.5b - Espectro de Frequências do Sistema Completo

Verifica-se, portanto, as seguintes frequências naturais do sistema: $f_1 = 16.50$ Hz,

$f_2 = 38.08$ Hz e $f_3 = 48.09$ Hz

4.5 Determinação dos Parâmetros Físicos: Mesa Inferior

Foi considerada somente a mesa inferior, modelando o sistema para um grau de liberdade, conforme mostra a figura 4.6.

Na figura 4.7, pode-se verificar que através de uma força impulsiva foi obtida a frequência natural do sistema. Este sistema é composto de 8 lâminas metálicas, sendo fixadas 2 em cada extremidade e borrachas para simular amortecimento viscoso.

Obteve-se os seguintes resultados:

Frequência natural da mesa inferior - $f_{inf} = 32.37$ Hz

Massa da mesa inferior - $m_{l\ total} = 6.6445$ Kg (balança digital - média de 10 valores)

Rigidez total $k = (2\pi f_{inf})^2 m_{l\ total} = 274857.40$ N/m (34357.18 N/m por lâmina)

$c_1 = 100.042 \text{ N s/m}$ (Decremento logarítmico); $\xi = c_1/c_c = 0.037$ ($c_c = 4 m_1 \text{ total } \pi f_{inf}$)

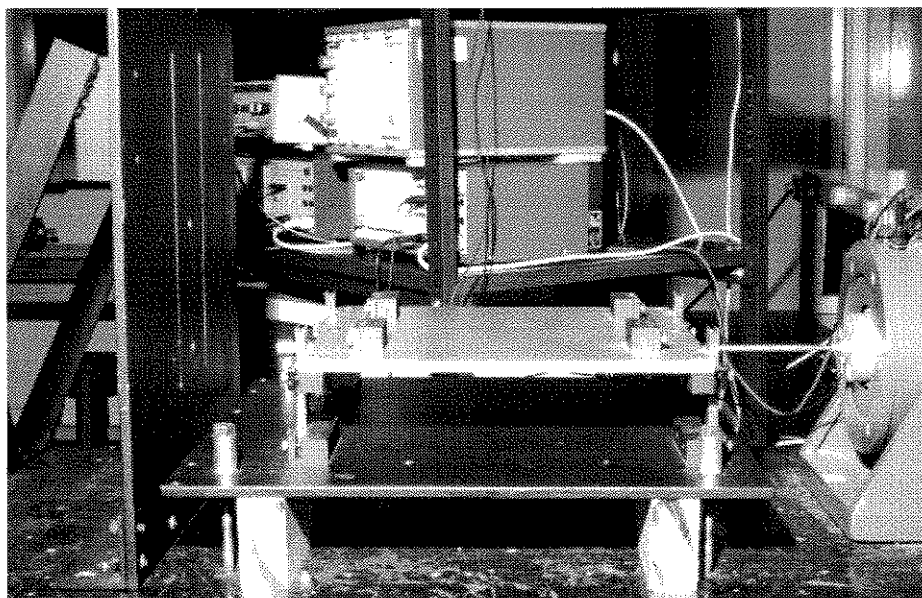


Figura 4.6 - Mesa Vibratória Inferior

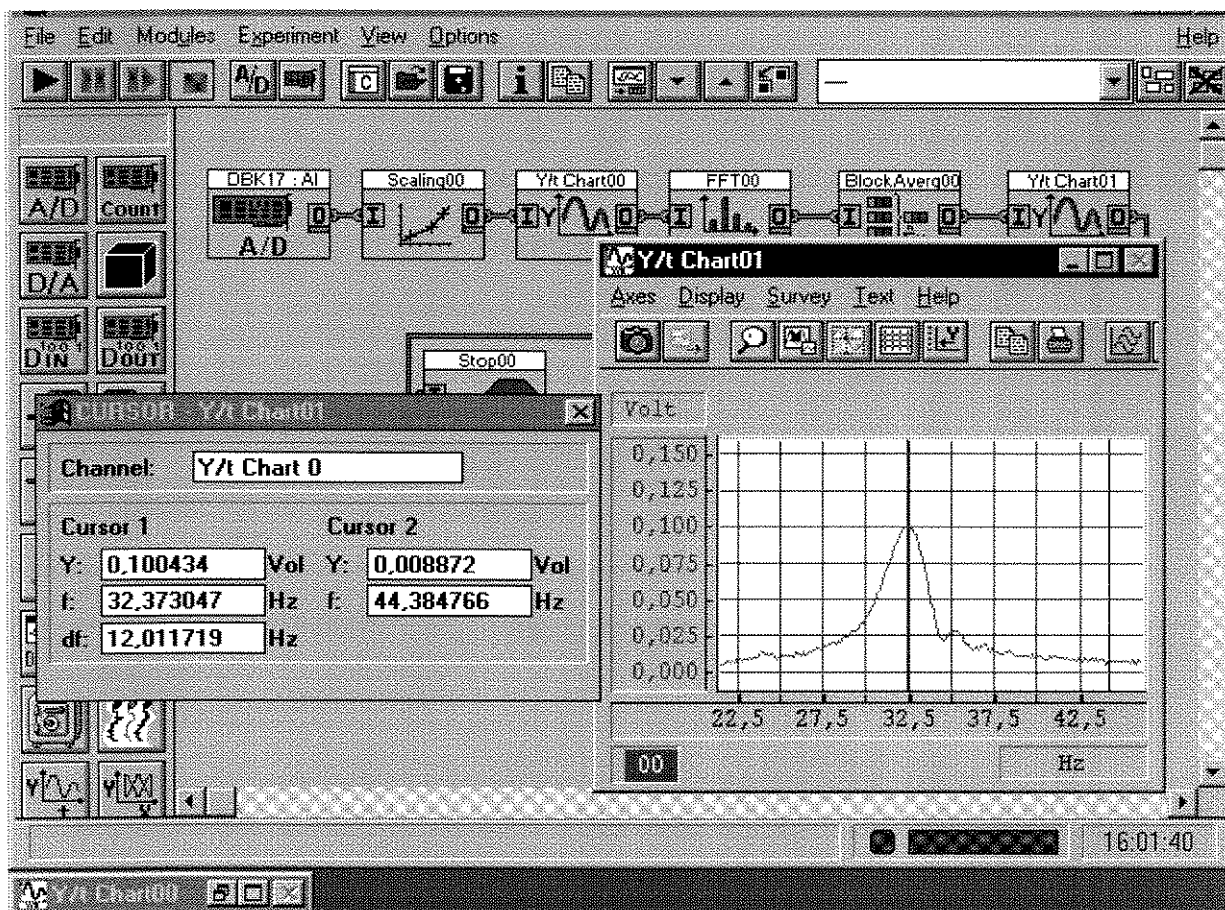


Figura 4.7 - Frequência Natural da Mesa Vibratória Inferior

4.6 Determinação dos Parâmetros Físicos: Mesa Intermediária

Foi considerada somente a mesa intermediária, fixando-se a mesa inferior e retirando a superior, sendo que o sistema foi modelado para um grau de liberdade conforme mostra a figura 4.8.

Na figura 4.9 pode-se também, verificar a frequência natural do sistema, obtida através da curva de espectro de frequência. Este sistema é composto de 10 lâminas metálicas, sendo fixadas em número de 4, 3, 2 e 1 nas extremidades e borrachas para simular amortecimento viscoso.

Obteve-se os seguintes resultados:

Frequência natural da mesa intermediária - $f_{int} = 25.049 \text{ Hz}$

Massa da mesa intermediária - $m_{2 \text{ total}} = 4.619 \text{ Kg}$ (balança digital - média de 10 valores)

Rigidez total - $k = (2\pi f_{int})^2 m_{2 \text{ total}} = 114416.45 \text{ N/m}$ (11441.645 N/m por lâmina)

$k_2 = 45766.582 \text{ N/m}$ (4 lâminas)

$k_3 = 34324.936 \text{ N/m}$ (3 lâminas)

$k_4 = 22883.291 \text{ N/m}$ (2 lâminas)

$k_5 = 11441.645 \text{ N/m}$ (1 lâmina)

$c_2 = 59.978 \text{ N s/m}$ (Obtido por Decremento logarítmico)

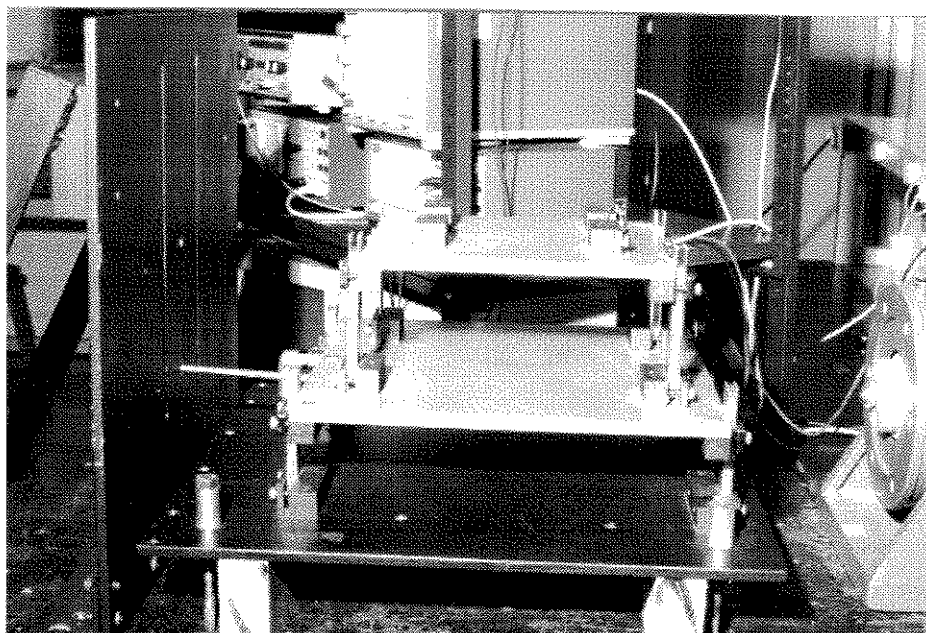


Figura 4.8 - Mesa Vibratória Intermediária

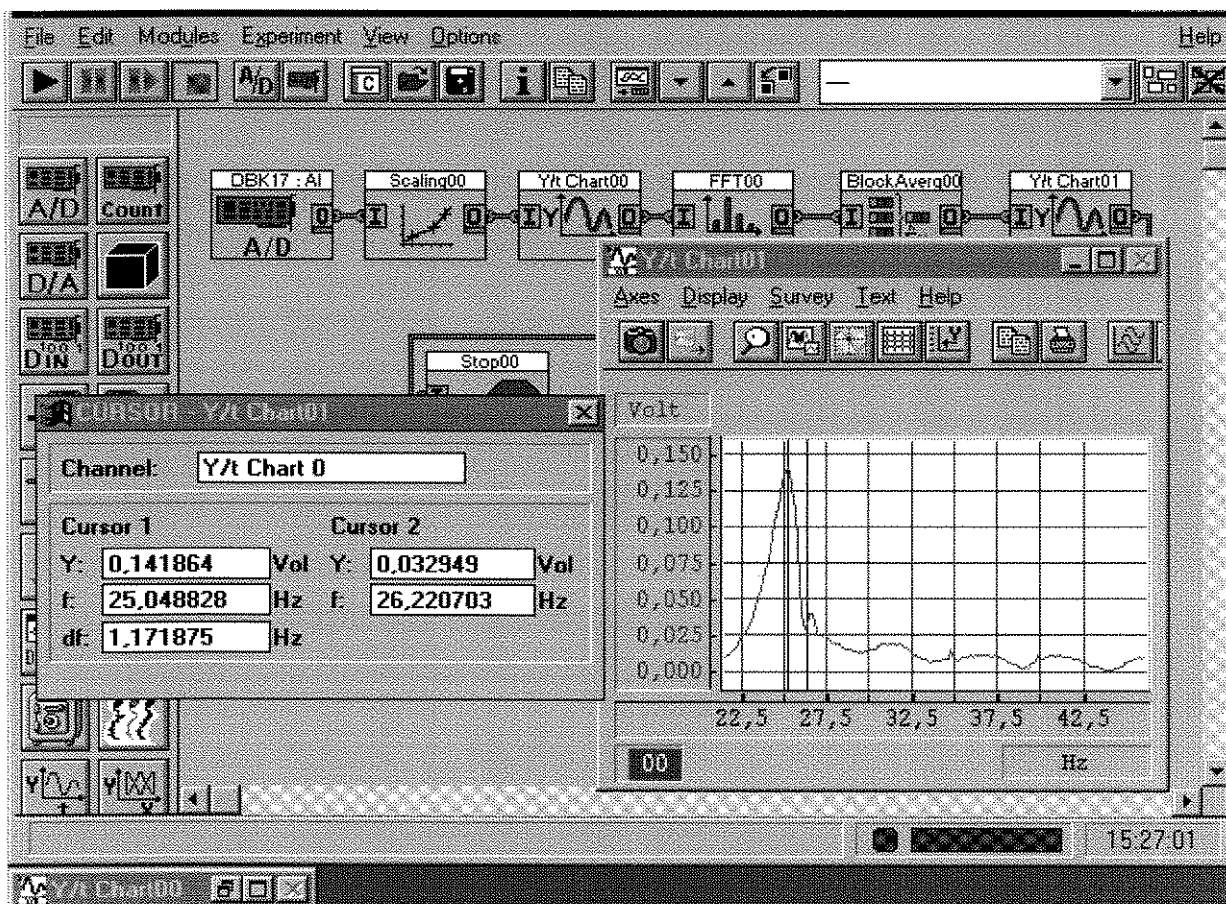


Figura 4.9 - Frequência Natural da Mesa Vibratória Intermediária

4.7 Determinação dos Parâmetros Físicos: Mesa Superior

Foi considerada somente a mesa superior, fixando-se a mesa inferior e intermediária, sendo que o sistema foi modelado para um grau de liberdade conforme mostra a figura 4.10.

Na figura 4.11 pode-se também, verificar a frequência natural do sistema. Este sistema também é composto de 10 lâminas metálicas, sendo fixadas da mesma forma que o sistema intermediário. Obteve-se os seguintes resultados: Massa da mesa superior - $m_{3 \text{ total}} = 1.889 \text{ Kg}$

Frequência natural da mesa superior $f_{\text{sup}} = 37.501 \text{ Hz}$

Rigidez total - $k = (2\pi f_{\text{sup}})^2 m_{3 \text{ total}} = 104870.72 \text{ N/m}$ (10487.072 N/m por lâmina)

$k_6 = 10487.072 \text{ N/m}$ (1 lâmina)

$k_7 = 20974.144 \text{ N/m}$ (2 lâminas)

$k_8 = 31461.216 \text{ N/m}$ (3 lâminas)

$k_9 = 41948.288 \text{ N/m}$ (4 lâmina)

$c_3 = 69.88 \text{ N s/m}$

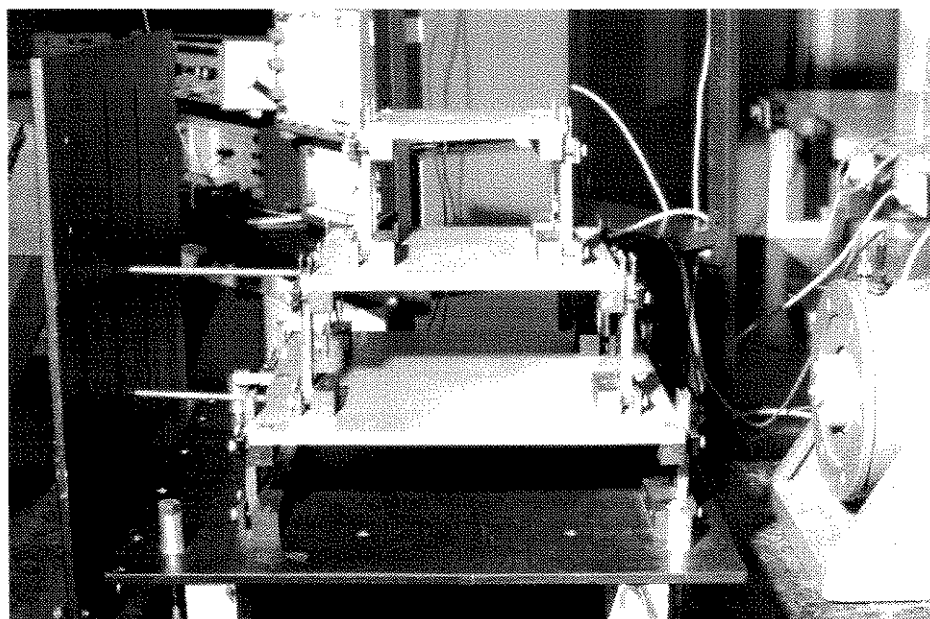


Figura 4.10 - Mesa Vibratória Superior

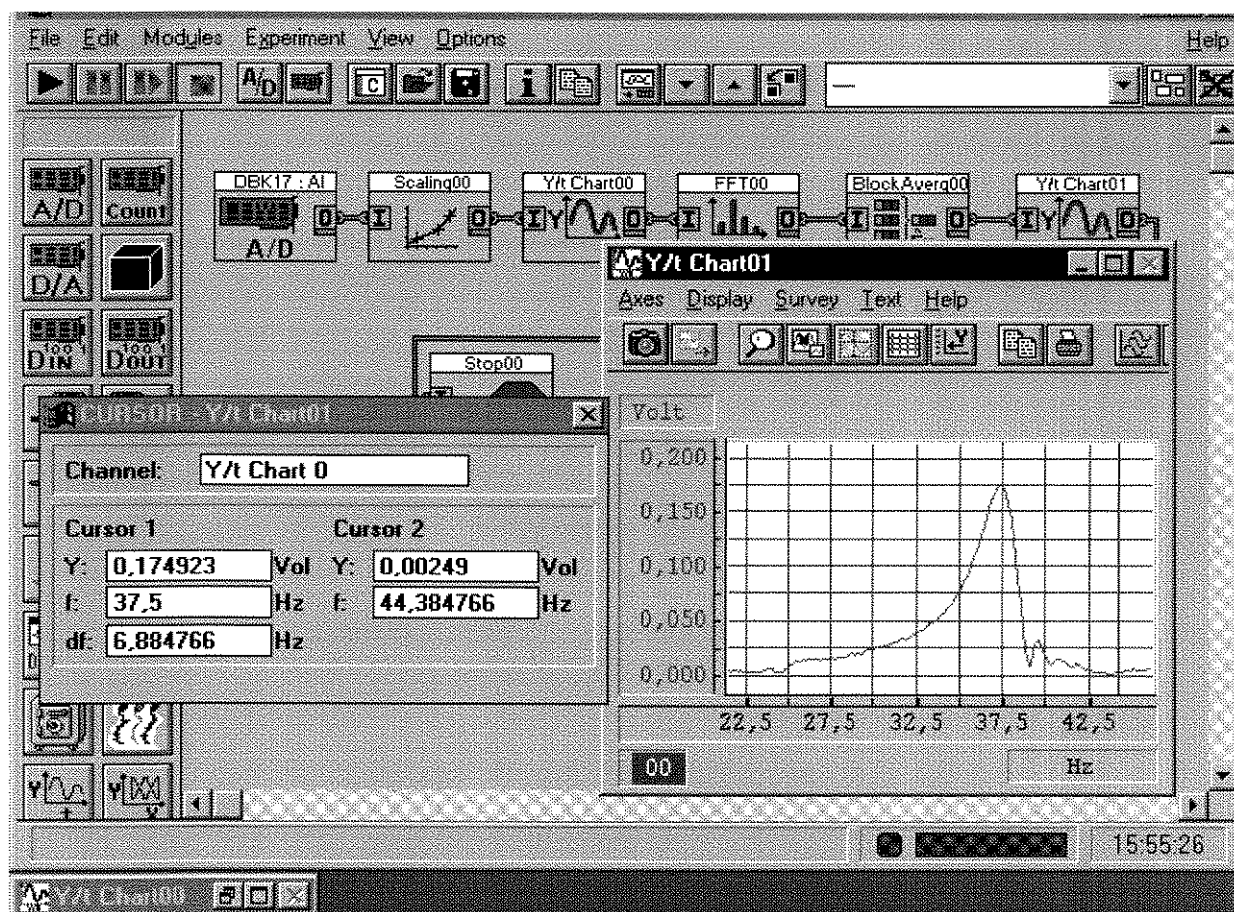


Figura 4.11 - Frequência Natural da Mesa Vibratória Superior

Os valores dos parâmetros físicos do sistema e consequentemente as frequências naturais foram também obtidos pelo método de identificação de parâmetros através das séries de Fourier. Este valores são apresentados na tabela 4.1 em comparação com os valores obtidos experimentalmente.

	Experimental	Identificado	Diferença Relativa%
Freq. Natural f_1 (Hz)	16.50	16.17	2.00
Freq. Natural f_2 (Hz)	38.08	37.85	0.61
Freq. Natural f_3 (Hz)	48.09	47.90	0.39
Kequ. mesa inf.(N/m)	274857.40	270756.32	1.49
Kequ. mesa int.(N/m)	114416.45	111389.58	2.65
Kequ.mesa sup.(N/m)	104870.72	101662.03	3.06
Cequ.mesa Inf.(Ns/m)	100.04	94.56	5.47
Cequ.mesa Inf.(Ns/m)	59.98	57.91	3.45
Cequ.mesa Inf.(Ns/m)	69.88	66.06	5.46

Tabela 4.1 - Valores dos Parâmetros Identificados e Experimentais

Verifica-se um desvio relativamente pequeno entre os valores obtidos através de técnicas experimentais e os valores identificados através do método das séries de Fourier. Neste caso, os valores utilizados para a construção dos observadores de estado foram os obtidos experimentalmente, acreditando que os mesmos sejam mais exatos, tendo em vista que no processo de identificação podem ocorrer alguns erros de ordem numérica.

4.8 Excitação Harmônica na Mesa Inferior

O sistema foi excitado harmonicamente na mesa inferior com um excitador eletrodinâmico na frequência de 40 Hz. Foram adquiridos 1024 pontos para o sinal do deslocamento em um intervalo de tempo de 2 segundos.

A figura 4.12 mostra o sistema completo sendo excitado harmonicamente. Os pontos adquiridos são provenientes da mesa inferior através da medida de deslocamento $x_1(t)$, pois os valores de $x_2(t)$ e $x_3(t)$ são reconstruídos através dos observadores de estado.

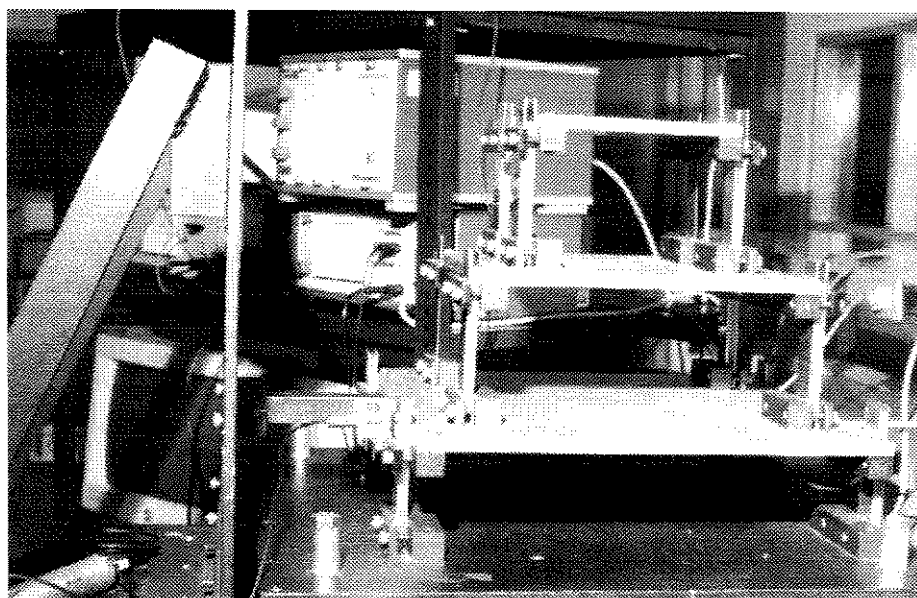


Figura 4.12 - Sistema Excitado Harmonicamente - Mesas Vibratórias

A lâmina que continha a rigidez k_2 , conforme descrito no modelo, foi retirada do sistema para simular uma possível falha. As figuras de 4.13 a 4.27 apresentam as curvas obtidas no ensaio, sendo que nas ordenadas tem-se o deslocamento $x_1(t)$, com exceção da Figura 4.13 que apresenta a força de excitação, e nas abcissas o tempo em segundos.

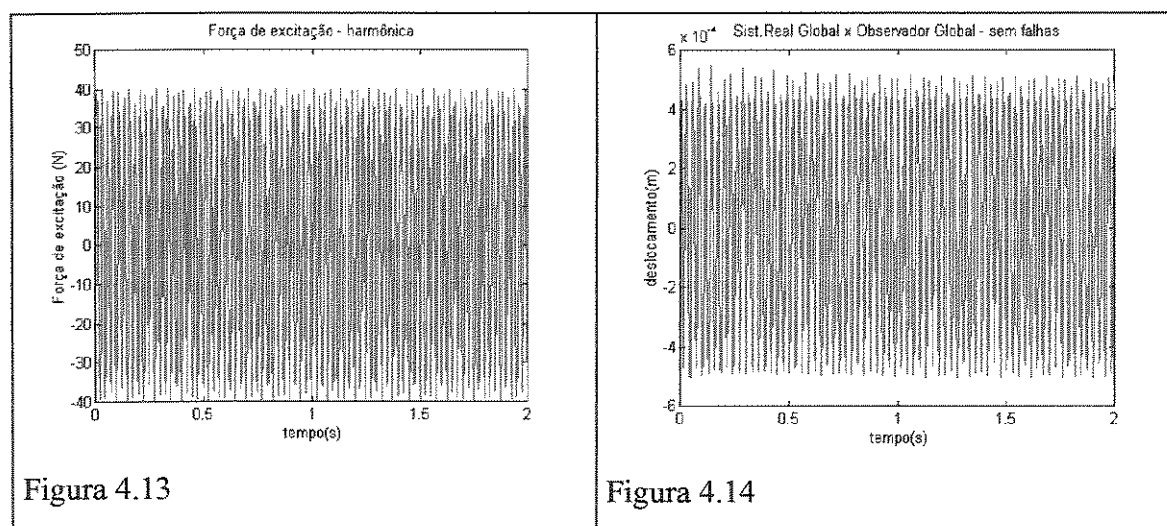


Figura 4.13

Figura 4.14

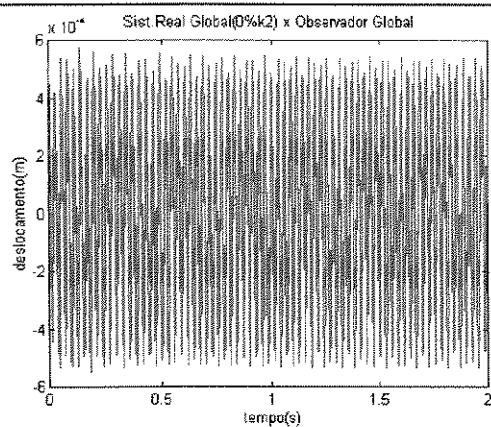


Figura 4.15

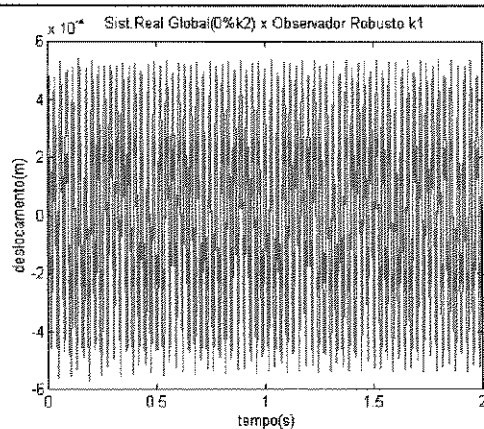


Figura 4.16

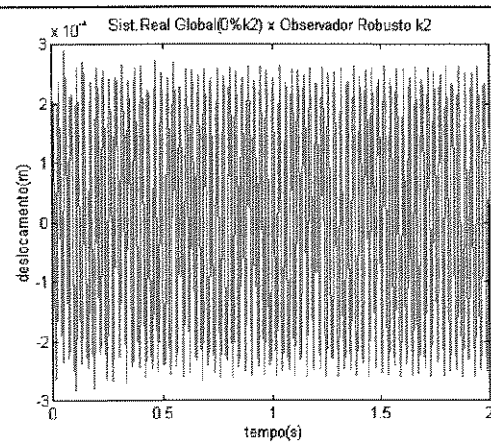


Figura 4.17

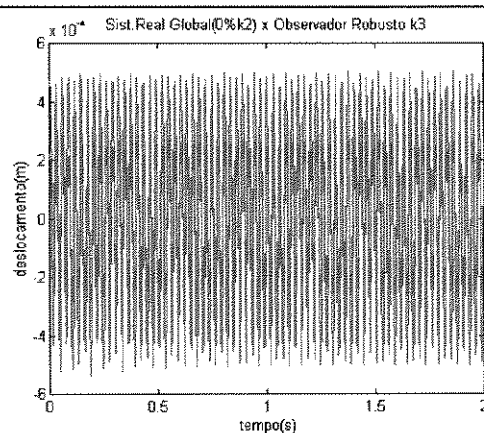


Figura 4.18

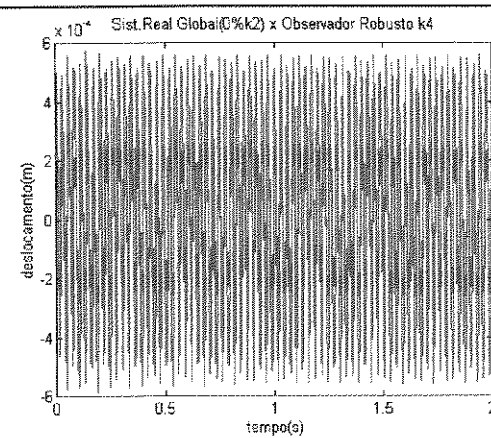


Figura 4.19

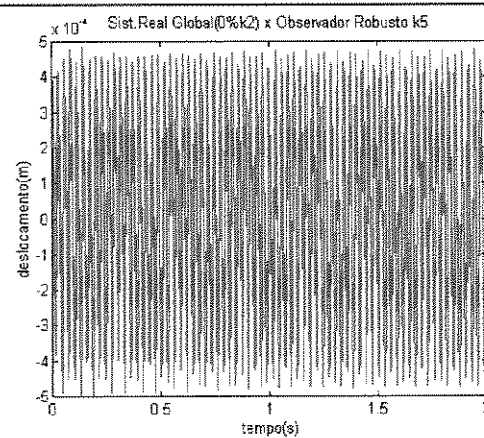


Figura 4.20

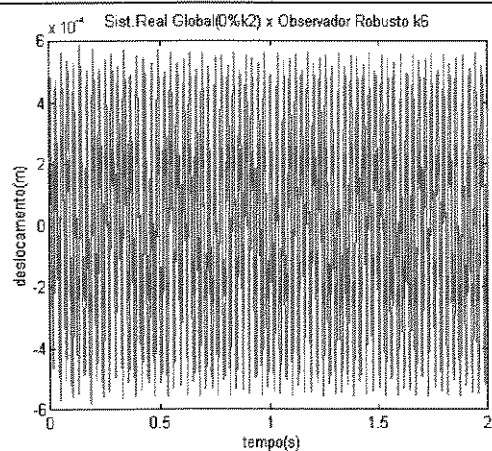


Figura 4.21

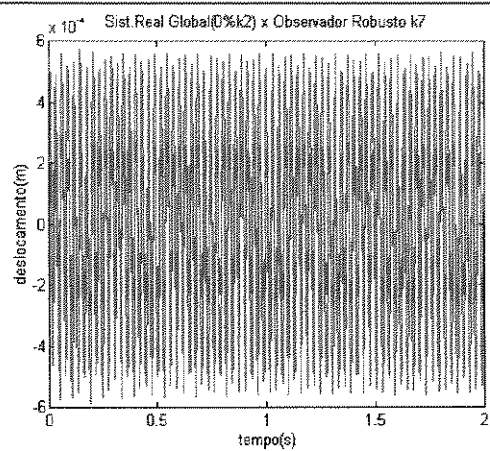


Figura 4.22

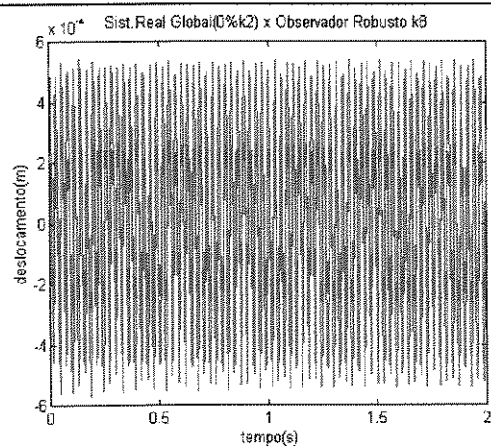


Figura 4.23

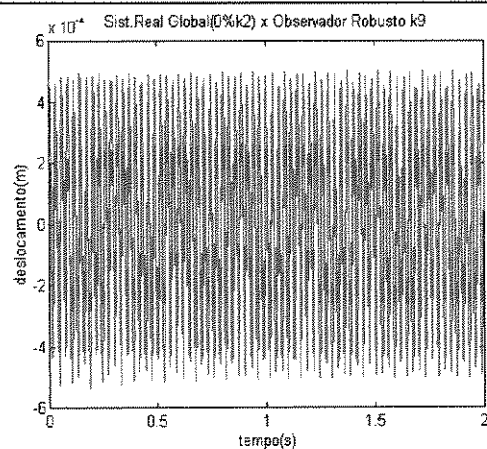


Figura 4.24

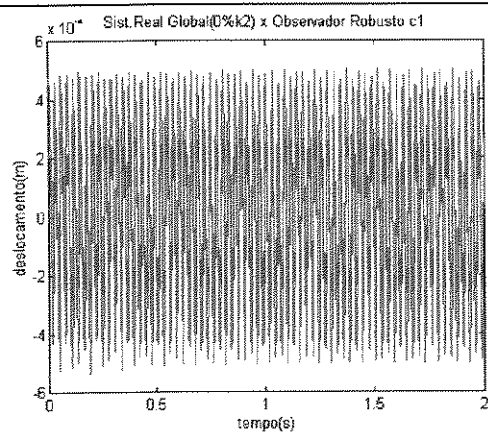


Figura 4.25

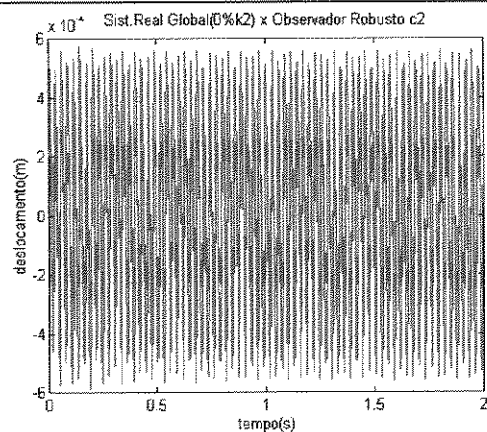
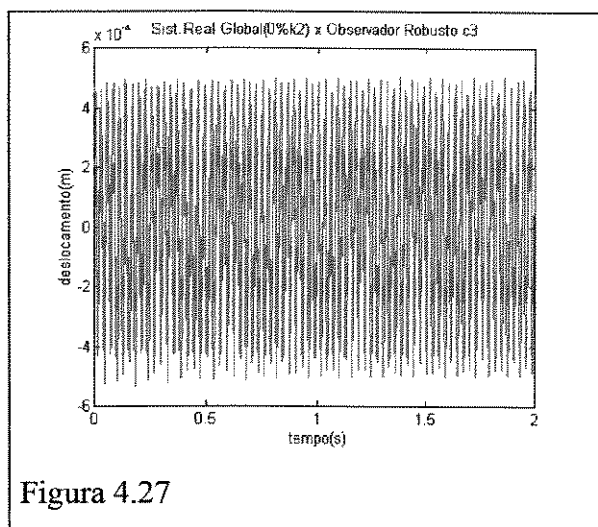


Figura 4.26



Na figura 4.13 observa-se a força de excitação harmônica com amplitude de 40 N. Na figura 4.14 tem-se a curva da resposta do sistema real sem falhas, cujos pontos foram obtidos através da aquisição de sinais e a curva de resposta do observador global. Neste caso ambas são coincidentes, comprovando o fato de não haver nenhuma irregularidade com o sistema.

Na figura 4.15 apresenta-se a curva de resposta do sistema real global quando a lâmina de rigidez k_2 é retirada do sistema para simular uma possível falha e a curva de resposta do observador global. Como as curvas se distanciaram, pode-se detectar uma possível falha, mas sem condições de localizar a mesma.

Para localizar a falha, a análise é feita através das figuras de 4.16 a 4.27. Como foi descrito no Capítulo 3, quando existe indícios de falhas no sistema, a curva do observador robusto ao parâmetro do sistema com possível falha começa a se aproximar da curva do sistema real, pois na montagem do observador robusto a um parâmetro específico, este mesmo parâmetro é retirado da matriz dinâmica do sistema antes da montagem do observador.

Diante disso, pode-se verificar que a figura onde houve coincidência de valores nas curvas foi a 4.17, com observador robusto ao parâmetro k_2 , localizando-se portanto, a falha. Entretanto, neste caso, foi feita somente uma análise visual do processo, havendo a necessidade de uma análise mais concreta através dos valores numéricos.

Utiliza-se o programa automático de detecção e localização de falhas desenvolvido neste trabalho, onde os valores de entrada são a força de excitação e a resposta do sistema, neste caso $x_1(t)$, o único valor medido.

Os valores obtidos estão na tabela 4.2 e são da diferença dos valores RMS das curvas do sistema real e dos observadores global e robustos aos parâmetros específicos.

	Real Sem Falhas	Real 0% de k_2
Observ.Global	.2910383E-09	.2190111E-03
Ob.Robusto a k_1	.3533785E-04	.6657710E-04
Ob.Robusto a k_2	.2809548E-03	.1746230E-09
Ob.Robusto a k_3	.2019266E-04	.6228294E-04
Ob.Robusto a k_4	.1285574E-03	.1183966E-03
Ob.Robusto a k_5	.6169471E-04	.1698421E-03
Ob.Robusto a k_6	.8342613E-04	.2345669E-03
Ob.Robusto a k_7	.9841548E-04	.2347751E-03
Ob.Robusto a k_8	.3143566E-04	.2193386E-03
Ob.Robusto a k_9	.6336189E-04	.1884221E-03
Ob.Robusto a c_1	.6083321E-03	.4502345E-03
Ob.Robusto a c_2	.7813076E-03	.9734002E-03
Ob.Robusto a c_3	.9196923E-04	.2192233E-03

Tabela 4.2 - Diferença dos Valores RMS de $x_1(t)$ - Falha em k_2

Na primeira linha com valores numéricos da tabela 4.1, verifica-se que a diferença dos valores RMS de $x_1(t)$ entre o observador global e o sistema real sem falhas é da ordem de 10^{-9} , caindo para 10^{-3} quando retirada a lâmina com rigidez k_2 (primeira região em negrito). Neste caso, consegue-se somente detectar que existe alguma falha no sistema, mas não se consegue localizar a mesma.

Na segunda linha com valores numéricos, a diferença dos valores RMS de $x_1(t)$ entre o observador robusto a k_1 e o sistema real sem falhas é da ordem de 10^{-4} , permanecendo na mesma ordem de grandeza quando retirada a lâmina com rigidez k_2 (sistema real 0% k_2).

A análise continua da mesma forma até a verificação de todos os parâmetros sujeitos a falhas. No caso específico, foi encontrado o parâmetro k_2 , onde a diferença dos valores RMS entre o observador robusto a k_2 e o sistema real sem falhas saiu da ordem de 10^{-3} para 10^{-9} .

quando retirada a lâmina k_2 . Como não houve outro parâmetro com aproximação tão significativa das curvas, pode-se concluir que a possível falha do sistema está no parâmetro k_2 .

Para se fazer uma análise de variação percentual de algum parâmetro, há a necessidade de projetar observadores de estado robustos a estes percentuais. Inicialmente é feita uma análise preliminar utilizando os observadores robustos aos parâmetros completos (Por exemplo, observadores robustos a 100% de perda de rigidez), sendo que neste caso, na montagem dos observadores o parâmetro completo é excluído da matriz dinâmica [A]. Posteriormente é feita uma análise utilizando observadores robustos a estes percentuais (Por exemplo, 25% de perda de rigidez), excluindo este percentual no parâmetro específico da matriz dinâmica [A] antes do projeto do observador de estado.

A seguir apresenta-se na tabela 4.3 os resultados quando a rigidez k_2 foi reduzida para 75%, 50% e 25%, sendo que neste caso os observadores são robustos a 100% de perda do parâmetro.

Considera-se que os parâmetros sujeitos a falhas são k_1 , k_2 , k_5 , k_6 , k_9 , c_1 e c_3

	Real sem falhas	Real 75 % k_2	Real 50 % k_2	Real 25 % k_2
Observ.Global	.2910383E-09	.5986070E-05	.1181440E-04	.10918012E-03
Ob.Robusto a k_1	.3533785E-04	.3847509E-04	.7558640E-04	.1238893E-03
Ob.Robusto a k_2	.2809548E-03	.1849902E-05	.4584702E-06	.9943124E-07
Ob.Robusto a k_5	.6169471E-04	.2732850E-09	.6082180E-05	.1186648E-03
Ob.Robusto a k_6	.8342613E-04	.6454217E-04	.1267672E-04	.1842807E-03
Ob.Robusto a k_9	.6336189E-04	.7665686E-04	.7043363E-04	.1329293E-03
Ob.Robusto a c_1	.6083321E-03	.8490334E-03	.9432341E-03	.6834003E-03
Ob.Robusto a c_3	.9196923E-04	.7719380E-03	.7120399E-03	.4283401E-03

Tabela 4.3 - Diferença dos Valores RMS de $x_1(t)$ - Redução de k_2 para 75%, 50% e 25%.

Na primeira linha da tabela 4.3, verifica-se que a diferença dos valores RMS de $x_1(t)$ entre o observador global e o sistema real sem falhas é da ordem de 10^{-9} , aumentando para 10^{-5}

quando a rigidez de k_2 foi diminuída para 75% de seu valor, aumentando para 10^{-4} quando diminuída para 50% e para 10^{-3} quando diminuída para 25%. Neste caso, em todos os percentuais de redução de rigidez consegue-se detectar que existe alguma falha no sistema, mas não se consegue localizar a mesma.

Quando o programa computacional analisa o observador robusto a k_1 (2ª. linha da tabela 4.3), pode-se verificar que as diferenças de amplitudes permaneceram inalteradas, descartando o mesmo de estar provocando uma possível falha no sistema.

Quando o observador robusto a k_2 é analisado, verifica-se que a diferença dos valores RMS entre o observador robusto a k_2 e o sistema real sem falhas saiu da ordem de 10^{-3} para 10^{-5} , 10^{-6} e 10^{-7} , conforme a rigidez do sistema foi diminuindo para 75%, 50% e 25%.

Neste caso não foram construídos, ainda, observadores robustos a um determinado percentual de perda de rigidez do elemento k_2 . A análise está sendo feita utilizando-se o observador robusto a 100% de perda de k_2 . Fazendo a análise gradativa de redução de rigidez de um parâmetro específico com o observador robusto a 100% de perda, isto é, sem a construção do observador robusto ao percentual específico de rigidez, corre-se o risco de que este valor de rigidez reduzida seja igual ao valor de uma outra rigidez do sistema localizada exatamente na mesma posição da matriz dinâmica.

Pode-se verificar este tipo de problema quando o observador de estado robusto a k_5 é analisado. Pela tabela 4.3, haveria necessidade de investigação deste parâmetro, e na realidade isto aconteceu pela coincidências de valores, devido a simetria do sistema e o fato das lâminas, individualmente, possuírem o mesmo valor de rigidez.

Verifica-se, portanto, a necessidade de observadores de estado robustos aos respectivos percentuais de redução de rigidez:

	Real sem falhas	Real 75 % k_2	Real 50 % k_2	Real 25 % k_2
Observ.Global	.2910383E-09	.5986070E-05	.1181440E-04	.8918012E-03
Ob.Rob. 75% k_2	.5674738E-03	.3201421E-09	.45980323E-7	.9220123E-05
Ob.Rob. 50% k_2	.6574738E-04	.7730024E-06	.4495847E-09	.8430293E-05
Ob.Rob. 25% k_2	.1645343E-04	.3485903E-06	.9048311E-07	.5436758E-09

Tabela 4.4 - Diferença dos Valores RMS de $x_1(t)$ - Observadores Robustos de k_2

Na tabela 4.4 pode-se verificar que uma idéia razoável seria a construção de observadores robustos a uma diminuição de 25% de rigidez para todos os elementos do sistema sujeitos a este problema. A possível falha pode ser detectada logo no princípio, fazendo-se um acompanhamento da tendência da mesma com observadores mais específicos, como por exemplo de 5 em 5% como apresentado no capítulo 3.

Na tabela 4.5, o sistema é analisado quando há a possibilidade de ocorrência de falha de dois parâmetros simultaneamente. Inicialmente será provocada uma falha nos valores de rigidez k_3 e k_8 sem a construção dos observadores robustos aos dois parâmetros simultaneamente. Neste caso, serão considerados parâmetros sujeitos a falhas: k_1 , k_2 , k_3 , k_4 , k_5 , k_6 , k_7 , k_8 e k_9 .

	Real Sem Falhas	Real 0% k_3 e k_8
Observ.Global	.2910383E-09	.1097001E-03
Ob.Robusto a k_1	.3533785E-04	.1176312E-04
Ob.Robusto a k_2	.2809548E-03	.8052564E-03
Ob.Robusto a k_3	.2019266E-04	.3291361E-05
Ob.Robusto a k_4	.1285574E-03	.1626346E-04
Ob.Robusto a k_5	.6169471E-04	.6369521E-04
Ob.Robusto a k_6	.8342613E-04	.1157357E-03
Ob.Robusto a k_7	.9841548E-04	.1107659E-03
Ob.Robusto a k_8	.3143566E-04	.9473221E-05
Ob.Robusto a k_9	.6336189E-04	.6786994E-04

Tabela 4.5 - Diferença dos Valores RMS de $x_1(t)$ - Falha em k_3 e k_8

Pode-se verificar problemas em k_3 , k_4 e k_8 . Neste caso a análise também está sendo feita através dos observadores robustos a 100% de perda de rigidez dos parâmetros. Tem-se, neste caso, a seguinte combinação: k_3k_4 , k_3k_8 e k_4k_8 . Construindo-se observadores robustos, consegue-se localizar as possíveis falhas nos elementos k_3 e k_8 simultaneamente, como pode ser verificado na tabela 4.6:

	Real Sem Falhas	Real 0% k_3 e k_8
Observ.Global	2910383E-09	.1097001E-03
Obs.Rob. k_3 e k_4	.7045923E-04	.3441298E-04
Obs.Rob. k_3 e k_8	.9440276E-03	.5602654E-08
Obs.Rob. k_4 e k_8	.6877101E-04	.2297831E-04

Tabela 4.6 - Diferença dos Valores RMS de $x_1(t)$ - Falha em k_3 e k_8 - Análise

4.9 Excitação Harmônica na Mesa Inferior e Ruído Aleatório na Mesa Intermediária

O sistema foi excitado com ruído aleatório na mesa intermediária e com uma força harmônica na mesa inferior.

Foram também adquiridos 1024 pontos para o sinal do deslocamento em um intervalo de tempo de 2 segundos. A figura 4.28 mostra o sistema completo sendo excitado harmonicamente e com 10% de ruído aleatório. Os pontos adquiridos são novamente provenientes da mesa inferior $x_1(t)$. O ruído não foi medido, aparecendo sua influência somente na resposta do sistema.

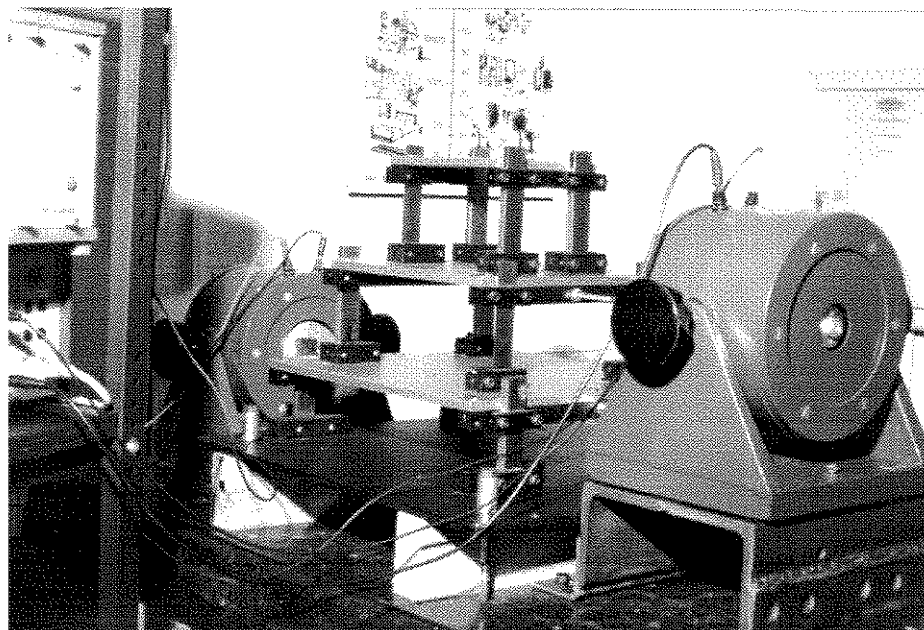


Figura 4.28 - Sistema Excitado com Força Harmônica e Ruído Aleatório - Mesas Vibratórias

A lâmina que continha a rigidez k_9 , conforme descrito no modelo, foi retirada do sistema para simular uma possível falha. A seguir, através das figuras 4.29 a 4.44 apresentam-se as curvas obtidas no ensaio.

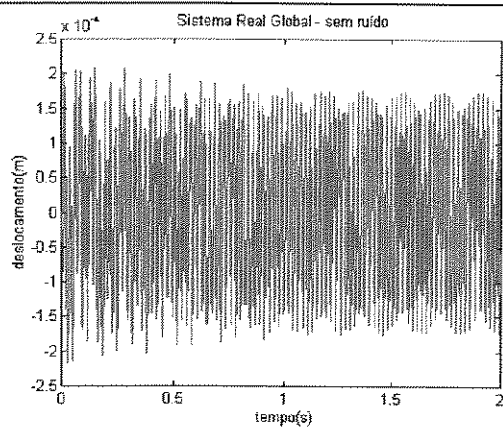


Figura 4.29

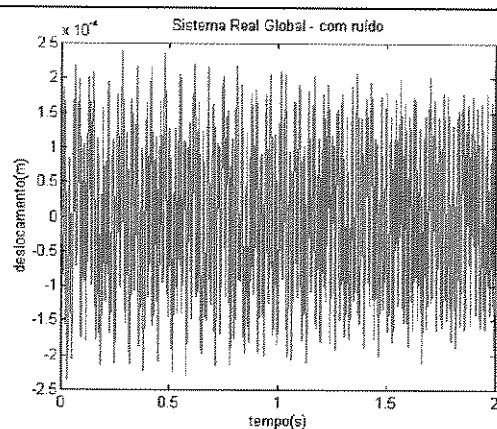


Figura 4.30

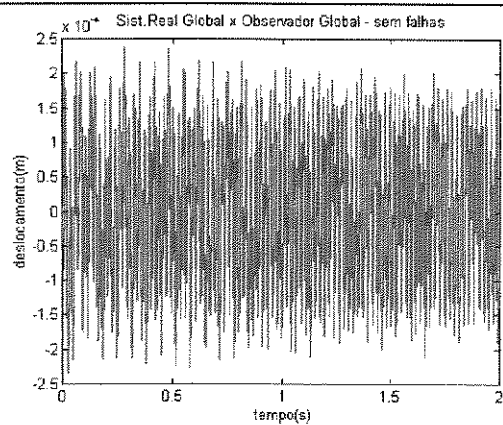


Figura 4.31

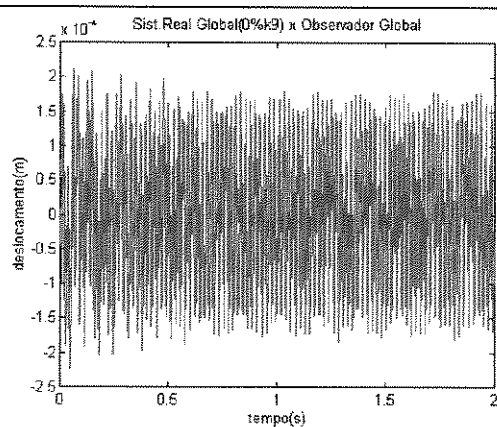


Figura 4.32

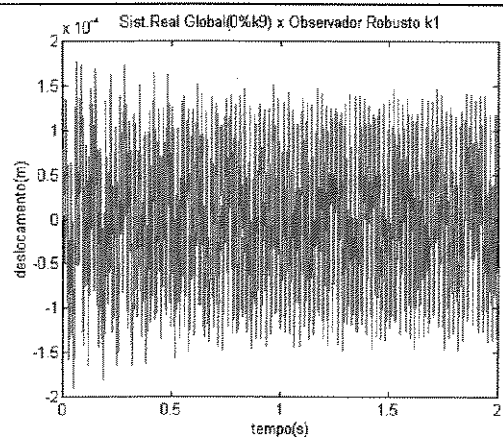


Figura 4.33

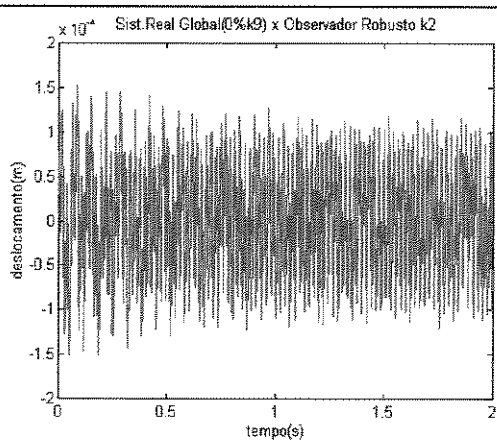


Figura 4.34

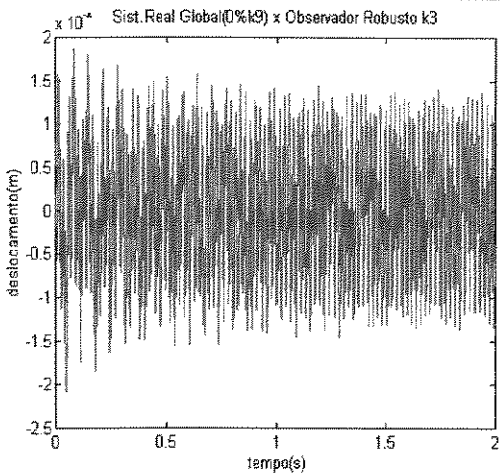


Figura 4.35

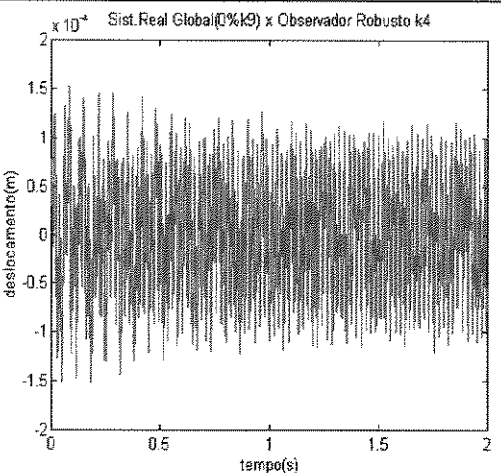


Figura 4.36

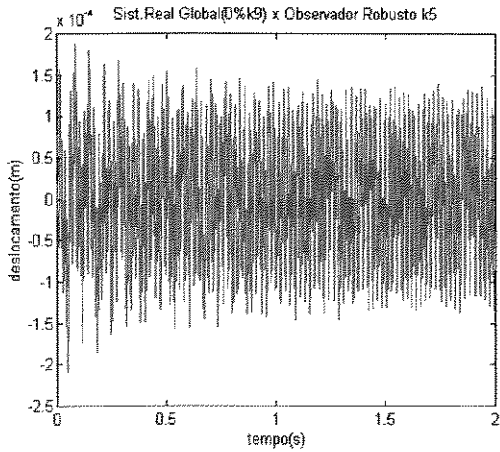


Figura 4.37

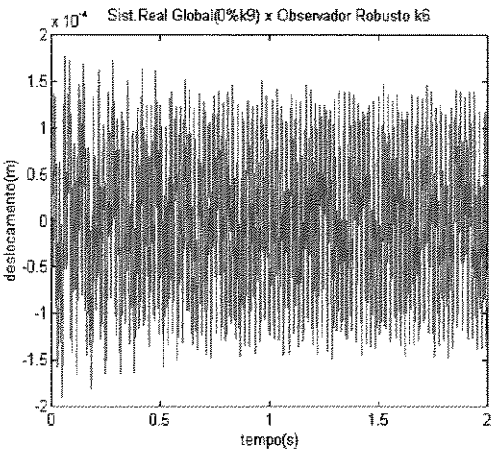


Figura 4.38

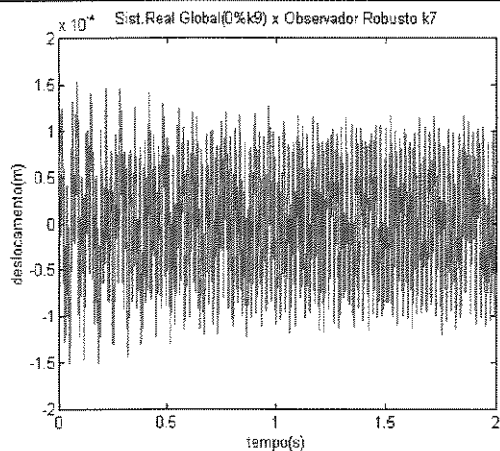


Figura 4.39

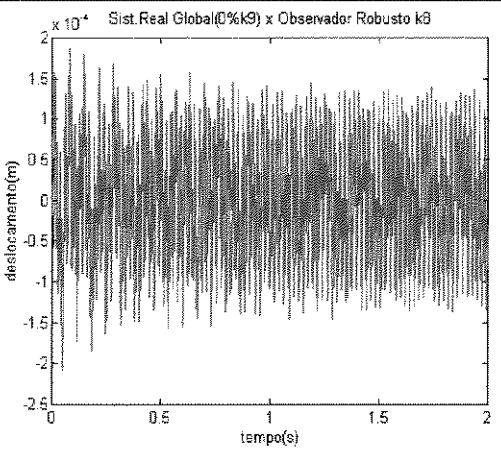


Figura 4.40

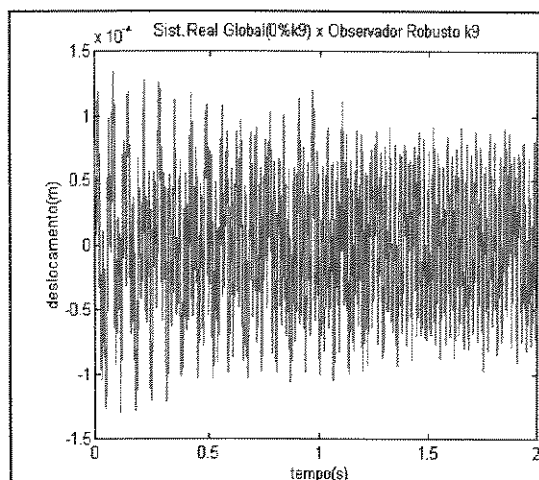


Figura 4.41

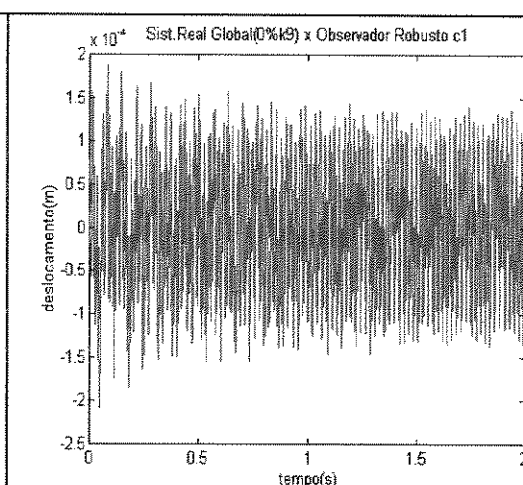


Figura 4.42

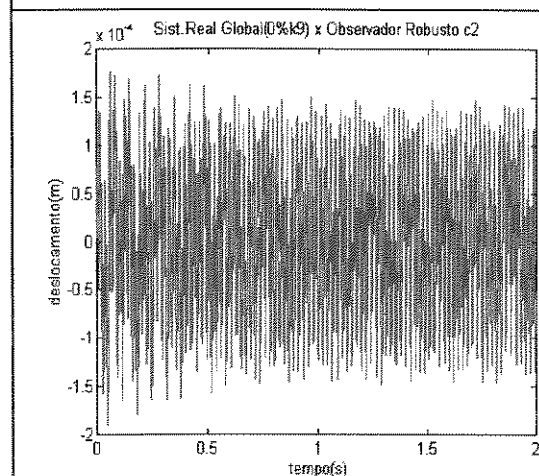


Figura 4.43

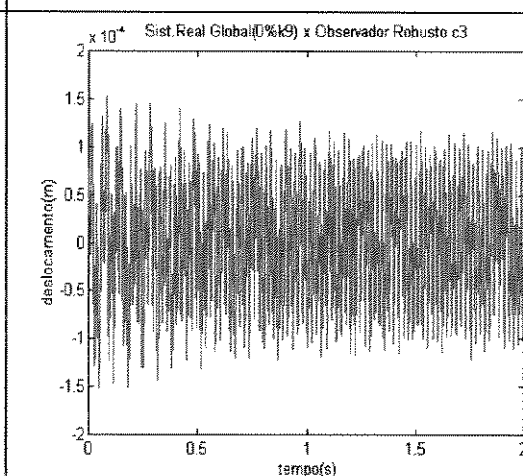


Figura 4.44

Nas figuras 4.29 e 4.30 apresentam-se as respostas do sistema real global com e sem ruído. Na figura 4.31 tem-se a curva da resposta do sistema real sem falhas, cujos pontos foram obtidos através da aquisição de sinais e a curva de resposta do observador global. Neste caso pode-se considerar que ambas são coincidentes, não havendo indícios de falhas no sistema.

Na figura 4.32 apresenta-se a curva de resposta do sistema real global quando a lâmina de rigidez k_9 é retirada do sistema para simular uma possível falha e a curva de resposta do observador global. Como houve um distanciamento das curvas, pode-se concluir que existe alguma irregularidade no sistema.

Para localizar a falha, a análise é feita através das figuras 4.33 a 4.44., verificando que a curva onde houve maior coincidência de valores foi a 4.41, com observador robusto ao

parâmetro k_9 , embora haja também uma relativa coincidência nas curvas das figuras 4.39 e 4.44, com observadores robustos aos parâmetros k_7 e c_3

Utiliza-se novamente o programa automático de detecção e localização de falhas desenvolvido neste trabalho, onde os valores de entrada são a força de excitação e a resposta do sistema, neste caso $x_1(t)$, o único valor medido.

Através da tabela 4.7 pode-se comprovar a análise feita anteriormente através dos gráficos, onde há uma coincidência de valores justamente no observador robusto ao parâmetro k_9 , mas havendo necessidade também de se fazer uma análise dos parâmetros k_7 e c_3 , devido as aproximações das curvas do sistema real com falha e observadores robustos a estes parâmetros.

DIFERENÇA DOS VALORES RMS DE $x_1(t)$

	Real Sem Falhas	Real 0% de k_9
Observ.Global	.1309671E-08	.6777910E-04
Ob.Robusto a k_1	.5869234E-04	.8870123E-04
Ob.Robusto a k_2	.8696724E-04	.2934035E-04
Ob.Robusto a k_3	.7212172E-04	.1144792E-04
Ob.Robusto a k_4	.4816538E-04	.1614793E-04
Ob.Robusto a k_5	.2375283E-04	.4243565E-04
Ob.Robusto a k_6	.1827394E-04	.4705715E-04
Ob.Robusto a k_7	.3519352E-04	.2816495E-06
Ob.Robusto a k_8	.4923445E-04	.1222976E-04
Ob.Robusto a k_9	.6865443E-04	.2182787E-07
Ob.Robusto a c_1	.6580345E-03	.5690112E-03
Ob.Robusto a c_2	.5542067E-03	.7603476E-03
Ob.Robusto a c_3	.9934023E-04	.7522810E-05

Tabela 4.7 - Diferença dos Valores RMS de $x_1(t)$ - Falha em k_9

4.10 Excitação com Ruído Aleatório na Mesa Inferior

Neste caso, o sistema foi excitado somente com ruído aleatório na mesa inferior.

Foram também adquiridos 1024 pontos para o sinal do deslocamento em um intervalo de tempo de 2 segundos. Os pontos adquiridos são novamente provenientes da mesa inferior $x_1(t)$.

A lâmina que continha a rigidez k_3 , conforme descrito no modelo, foi retirada do sistema para simular uma possível falha. A seguir, através das figuras 4.45 a 4.59 apresentam-se as curvas obtidas no ensaio.

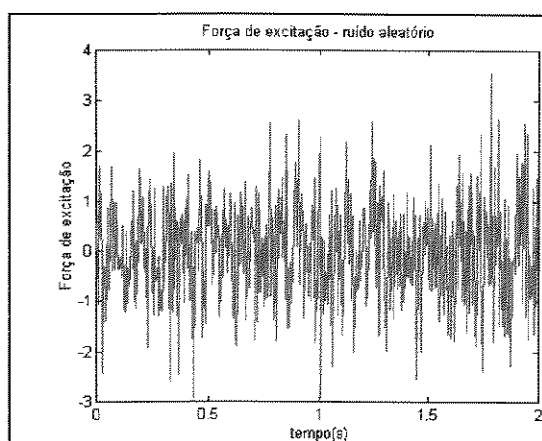


Figura 4.45

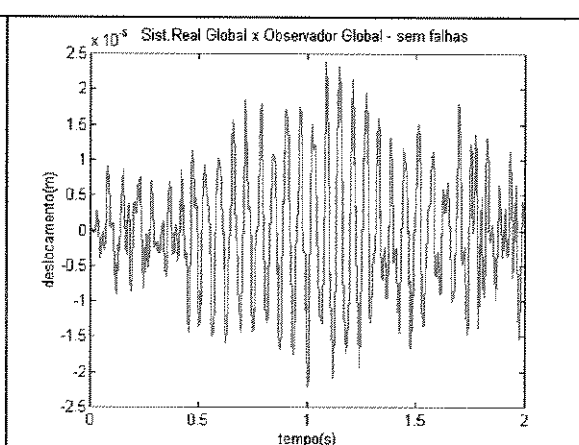


Figura 4.46

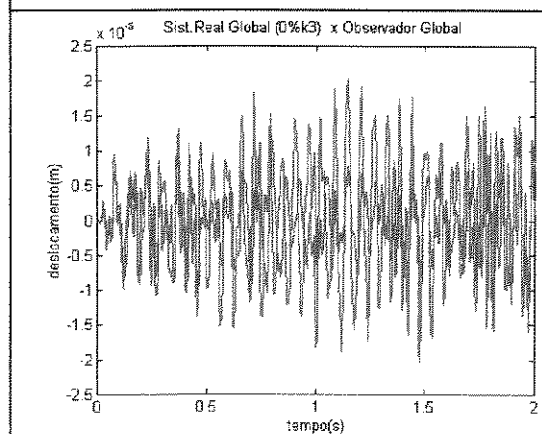


Figura 4.47

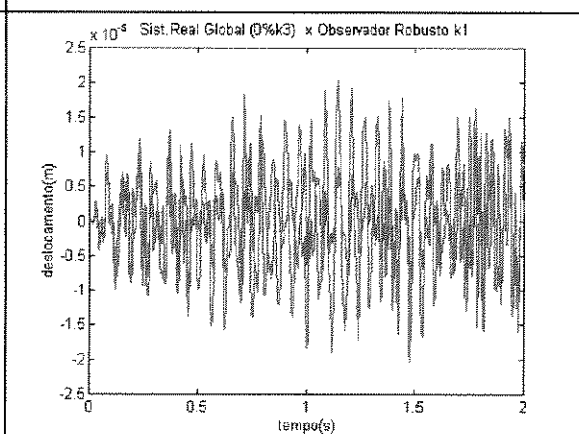


Figura 4.48

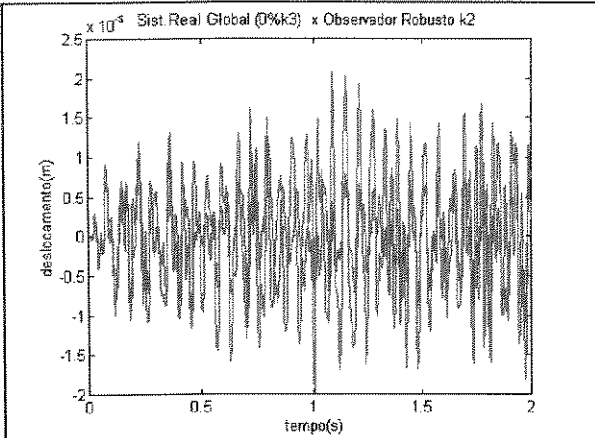


Figura 4.49

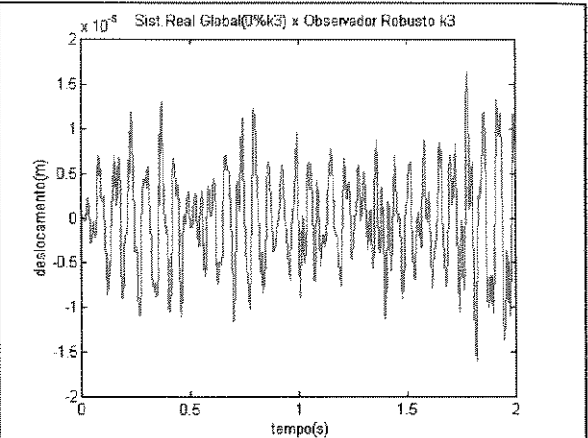


Figura 4.50

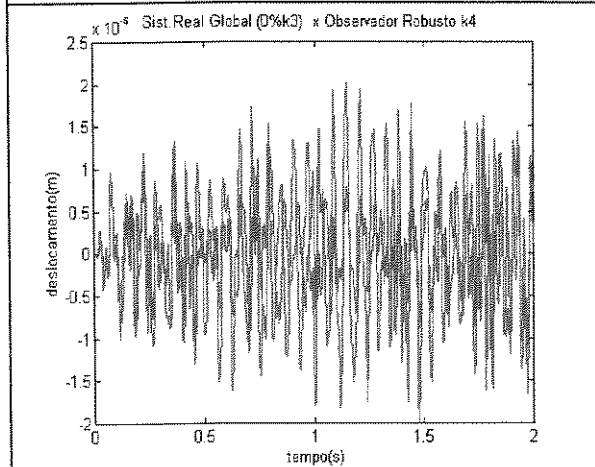


Figura 4.51

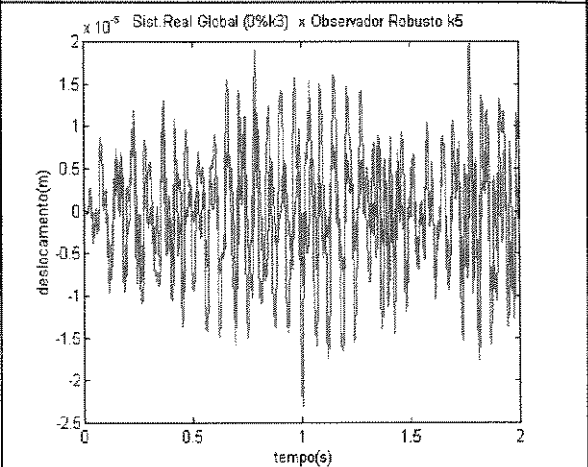


Figura 4.52

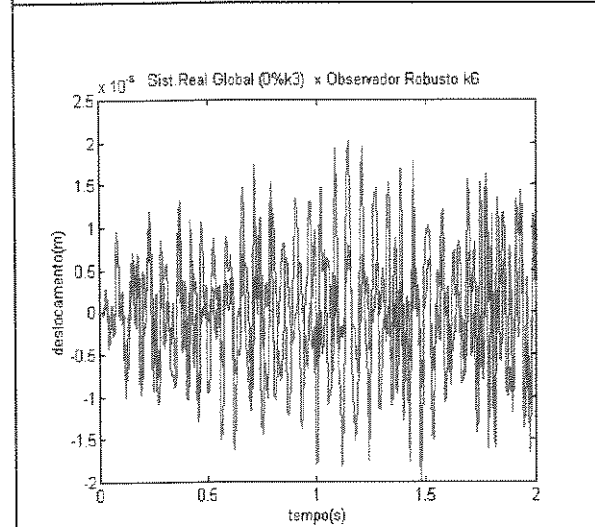


Figura 4.53

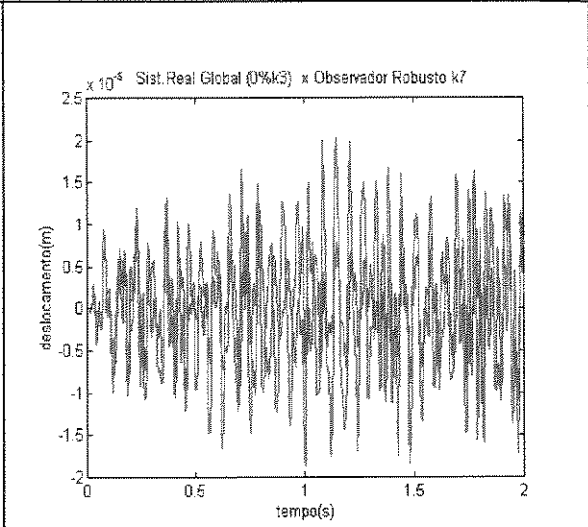


Figura 4.54

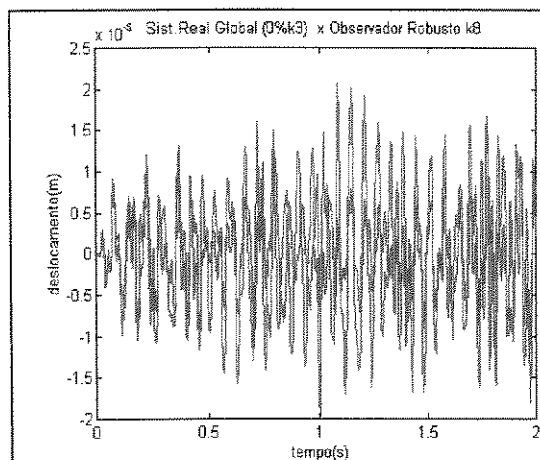


Figura 4.55

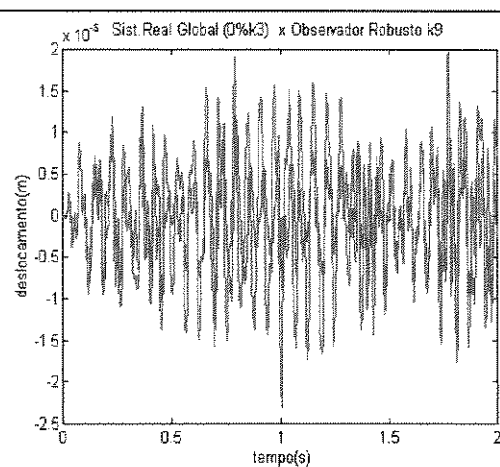


Figura 4.56

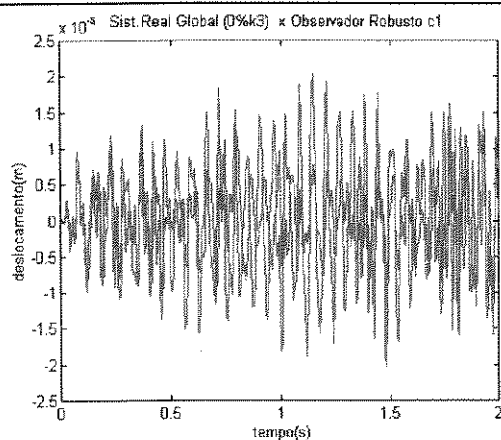


Figura 4.57

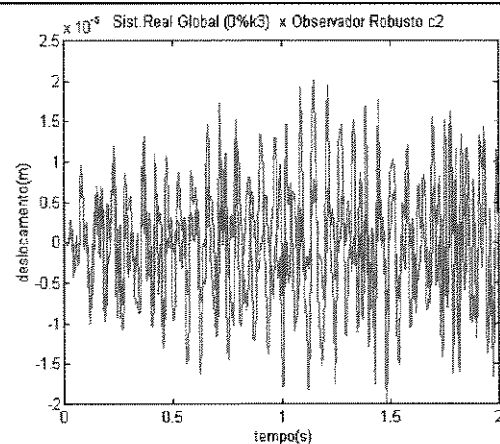


Figura 4.58

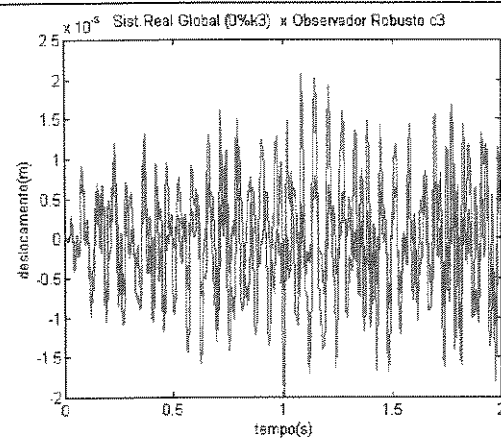


Figura 4.59

Na figura 4.45 observa-se a excitação do sistema com ruído aleatório. Na figura 4.46 tem-se a coincidência das curvas da resposta do sistema real sem falhas e da resposta do observador global, não havendo indícios de falhas.

Na figura 4.47 pode-se visualizar o distanciamento das curvas de resposta do sistema real global quando a lâmina de rigidez k_3 é retirada e da resposta do observador global, verificando uma possível falha ou irregularidade no sistema.

Para localizar a falha, a análise é feita através das figuras 4.48 a 4.59. Pode-se verificar que a maior coincidência de valores foi na figura 4.60, com observador robusto ao parâmetro k_3 , localizando-se portanto, a falha.

Através do programa automático de detecção e localização de falhas tem-se os valores da tabela 4.8, confirmando uma possível falha no parâmetro k_3 .

DIFERENÇA DOS VALORES RMS DE $x_1(t)$

	Real com falhas	Real 0% de k_3
Observ.Global	.4047251E-10	.2236477E-05
Ob.Robusto k_1	.5490023E-04	.4298223E-04
Ob.Robusto k_2	.2570034E-05	.6922164E-05
Ob.Robusto k_3	.2686380E-05	.4092726E-11
Ob.Robusto k_4	.1927166E-05	.6158930E-05
Ob.Robusto k_5	.2077245E-06	.1852046E-05
Ob.Robusto k_6	.1956719E-06	.2143865E-05
Ob.Robusto k_7	.3957630E-06	.2020251E-05
Ob.Robusto k_8	.6578284E-04	.1850370E-05
Ob.Robusto k_9	.8305678E-06	.1697164E-05
Ob.Robusto c_1	.7482971E-05	.7893141E-05
Ob.Robusto c_2	.8411296E-06	.7128020E-06
Ob.Robusto c_3	.7682983E-05	.6529204E-05

Tabela 4.8 - Diferença dos Valores RMS de $x_1(t)$ - Falha em k_3

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS

5.1 Conclusões

Neste trabalho, desenvolveu-se uma metodologia para detecção e localização de falhas em sistemas mecânicos utilizando observadores de estado de ordem reduzida. O método pode reconstruir os estados não medidos ou os valores provenientes de pontos de difícil acesso no sistema. Escolhem-se os parâmetros de interesse sujeitos a falhas, projetando-se um observador global otimizado para análise de todo o sistema considerando possíveis ruídos aleatórios na excitação e na resposta. Projetam-se também observadores robustos a estes parâmetros de interesse, que localizam possíveis falhas ou irregularidades no sistema. Para os componentes que necessitem de um acompanhamento constante devido suas grandes solicitações ou falhas constantes, montam-se observadores com um sistema de alarmes que gera uma curva de tendências em um sistema automático para detecção e localização de falhas desenvolvido neste trabalho.

Para os sistemas simulados e experimental, fez-se análises da performance transiente e em regime permanente, excitando-se os sistemas com força impulsiva, força senoidal, Ruído aleatório, combinações dos mesmos, etc. Para a análise experimental, foi construído um sistema dinâmico constituído de mesas vibratórias suportadas por lâminas metálicas.

Verificou-se que há a necessidade de escolha dos elementos (parâmetros) sujeitos a falhas para a construção dos observadores robustos a estes parâmetros. Para componentes que necessitem de um acompanhamento constante devido suas grandes solicitações ou falhas

constantes, montam-se observadores específicos (por exemplo, observadores com perda de 5 em 5% de rigidez ou amortecimento) com um sistema de alarmes que gera uma curva de tendências.

Uma restrição existente na metodologia desenvolvida é o fato do sistema ser observável com o número de medidas realizadas. Caso isto não ocorra, deve-se fazer outras medidas até que o mesmo se torne observável. Outra restrição encontrada foi a dificuldade de localização da falha quando os parâmetros sujeitos às mesmas estão localizados na mesma posição da matriz dinâmica do sistema e possuem a mesma magnitude. Neste caso, a falha é detectada e é verificado mais de um local possível de encontrar a mesma.

A seguir são feitas análises dos resultados da simulação (transiente e regime permanente) e dos resultados obtidos experimentalmente:

Na simulação, quando analisado o transiente do sistema, pôde-se verificar através das tabelas 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5, que os 10% de perturbação aleatória inserida na resposta não influenciaram na localização da falha. É importante verificar a boa performance obtida na análise transiente, tendo em vista que não houve dúvidas a respeito de qual elemento poderia estar falhando.

Na simulação, quando analisado o regime permanente do mesmo sistema anterior, através das tabelas 3.6, 3.7, 3.16 e 3.17, pôde-se verificar que os 10% de perturbação aleatória também não influenciaram significativamente nos resultados, embora as curvas se aproximassem menos.

Quando comparados os resultados da análise transiente e do regime permanente, foram verificados resultados sensivelmente melhores no transiente, pois como pôde ser verificado nas tabelas citadas anteriormente, no regime permanente não se conseguiu localizar somente os elementos em processo de falha, sendo necessário analisar os outros elementos que estavam localizados na mesma posição da matriz dinâmica [A]. Isto não ocorreu quando a análise foi feita no transiente.

No acompanhamento de um parâmetro específico sujeito a falhas, descrito pelas tabelas de 3.8 a 3.13, verificou-se que neste caso específico, com redução de 5 em 5% do parâmetro k_1 , o método desenvolvido pode determinar um sistema de alarmes e garantir que o mesmo

fosse acionado quando a perda de rigidez estivesse em torno de 30%. Isto pode ser feito para todos os parâmetros do sistema sujeitos a falhas.

Comparando-se esta análise com a variação das frequências naturais (tabelas 3.14 e 3.15), verifica-se que o método desenvolvido apresentou melhores resultados.

Obteve-se bons resultados também, quando foi analisado o selo dinâmico (figura 3.21), significando que o método tem bom desempenho em sistemas com matrizes de rigidez e amortecimento não simétricas.

Na análise experimental, quando o sistema foi excitado harmonicamente na mesa inferior, conseguiu-se bons resultados, conforme pôde-se analisar as curvas das figuras 4.13 a 4.20 e confirmação numérica através da tabela 4.2.

Com excitação harmônica na mesa inferior e ruído na mesa intermediária, através da análise da tabela 4.7, conseguiu-se localizar a falha no elemento k_9 , embora o elemento que representa a rigidez k_7 deva ser analisado também. Se compararmos estes resultados com os da tabela 4.8, onde o sistema foi excitado somente com ruído, verifica-se melhores resultados neste caso. Isto já era esperado, tendo em vista que no primeiro caso, o ruído não foi medido, sendo utilizado como uma perturbação aleatória e influenciando na resposta do sistema, que é utilizada nos observadores de estado.

Obteve-se bons resultados tanto na simulação computacional quanto na análise experimental, conseguindo validar a metodologia de detecção e localização de falhas via observadores de estado de ordem reduzida.

5.2 Sugestões para próximos trabalhos

Como sugestão para próximos trabalhos, pode-se analisar os seguintes tópicos:

- Análise de sensibilidade para a variação dos parâmetros na progressão da falha através de uma curva de tendências e criar critérios para avaliação desta curva.
- Estudo de observadores de estado quando as forças de excitação são totalmente desconhecidas.
- Aplicação da metodologia desenvolvida em sistemas rotativos de grande porte, como por exemplo as turbinas de usinas hidrelétricas.
- Aplicação de lógica *Fuzzy* na metodologia desenvolvida.

CAPÍTULO 6

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ALDEEN, M. & TRINH, H., Observing a Subset of the States of Linear Systems, *IEE Proc. Control Theory Appl.*, vol.141, n.3, pp. 137-144, 1994.
- [2] BARMISH, B. R. & GALIMIDI, A. R., Robustness of Luenberger Observers: Linear Systems Stabilized via Non-linear Control, *Automatica*, vol.22, n.4, pp. 413-423, 1986.
- [3] BASILO, G. & MARRO, G., On the Observability of Linear, Time-Invariant Systems with Unknown Inputs, *Journal of Optimization Theory and Applications*, vol.3, n.6, pp. 410-415, 1969.
- [4] BHATTACHARAYYA, S. P., The Structure of Robust Observers, *IEEE Transactions of Automatic Control*, vol.AC-21, pp. 581-588, 1976.
- [5] BRUNI, C.; GANDOLFI, A. & GERMANI, A., Observability of Linear-in-the-State Systems: A Functional Approach, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol.AC-25, n.3, pp.566-567, 1980.

- [6] **BRUNOVSKY, P. & KOMORNIK, J.**, The Riccati Equation Solution of the Linear-Quadratic Problem with Constrained Terminal State, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol.AC-26, n.2, pp.399-403, 1981.
- [7] **CHEN, J. & PATTON, R. J.**, Optimal Filtering and Robust Fault Diagnosis of Stochastic Systems with Unknown Disturbances, *International Journal of Control*, vol.143, n.1, pp. 31-36, 1996.
- [8] **CHO, Y.M.; XU, G. & KAILATH T.**, Fast Recursive Identification of State Space Models via Exploitation of Displacement Structure, *Automatica*, vol.30, n.1, pp. 45-59, 1994.
- [9] **CHOW, E. Y. & WILLSKY, A. S.**, Analytical Redundancy and the Design of Robust Failure Detection Systems, *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol.29, n.7, pp. 603-614, 1984.
- [10] **CICCARELLA, G.; MORA, D. M. & GERMANI, A.**, A Robust Observer for Discrete Time Nonlinear Systems, *Systems & Control Letters*, n.24, pp. 291-300, 1995.
- [11] **CLARK, R. N. & SETZER, W.**, Sensor Fault Detection in a System with Random Disturbances, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol.16, n°4, pp.468-473, 1980.
- [12] **CLARK, R. N.**, Instrument Fault Detection, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol.AES-14, n°3, pp.456-465, 1978.
- [13] **COOPER, J. E. & DESFORGES, M. J.**, Physical Parameter Identification using an Unknown Random Input, *ISMA19 - Tools for Noise and Vibration Analysis*, pp.1123-1128, 1996.

- [14] CORLESS, M. & TU, J., A Simple State/Uncertainty Estimator for a Class of Uncertain Systems, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences*, Vol.XIX, n^o.2, pp.176-191, 1997.
- [15] D'AZZO, J. J. & HOUPIIS, C. H., *Linear Control System Analysis and Design*, São Paulo, McGraw-Hill, Inc, 660p., 1988.
- [16] DING, X.; GUO, L. & FRANK P. M., Parameterization of Linear Observers and its Application to Observer Design, *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol.39, n.8, pp. 1648-1652, 1994.
- [17] EWINS, D. J., *Modal Testing*, Letchworth England, Research Studies Press, 267p., 1985.
- [18] ELMAS, C. & LA PARRA, H., Application of a Full-Order Extended Luenberger Observer for a Position Sensorless Operation of a Switched Reluctance Motor Drive, *IEE Proc. Control Theory Appl.*, Vol.143, n.5, pp.401-409, 1996.
- [19] EMRE, E. & SILVERMAN, L. M., K-Observers for Linear Systems with Unknown Inputs, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol.AC-25, n.4, pp.779-783, 1980.
- [20] FRANK, P. M., Fault Diagnosis in Dynamic Systems Using Analytical and Knowledge-based Redundancy - A Survey and Some New Results, *Automatica*, vol 26, n.3, pp. 459-474, 1990.
- [21] FRANK, P. M. & DING, X., Frequency Domain Approach to Optimally Robust Residual Generation and Evaluation for Model-based Fault Diagnosis, *Automatica*, vol.30, n.5, pp. 789-804, 1994.
- [22] FRANK, P. M & SELIGER, R., Fault Detection and Isolation in Automatic Processes, *Control and Dynamics Systems*, vol.49, pp. 241-287, 1991.

- [23] **FRANKLIN, G. F.; POWELL, J. D. & WORKMAN, M. L.**, *Digital Control of Dynamic Systems*, California, New York, Ontario, England, Addison-Wesley Publishing Company, 820p., 1990.
- [24] **GAUTIER, P. E.; GONTIER, C. & SMAIL, M.**, Robustness of an Arma Identification Method for Modal Analysis of Mechanical Systems in the Presence of Noise, *Journal of Sound and Vibration*, vol.179, n.2, pp. 227-242, 1995.
- [25] **GE, W. & FANG, C. Z.**, Detection of faulty components via robust observation, *International Journal of Control*, vol.47, n.2, pp. 581-599, 1988.
- [26] **GERTLER, J. J.**, Survey of Model-Based Failure Detection and Isolation in Complex Plants, *IEEE Control Systems Magazine*, vol.8, pp. 3-11, 1988.
- [27] **HAC, A. & SPANOS, P. D.**, Time Domain Method for Parameter System Identification, *Journal of Vibration and Acoustics*, Vol 112, pp. 281-287, 1990.
- [28] **HALEVI, Y.**, Optimal Observers for Systems with Colored Noises, *IEEE Transactions on Automatic Control*, n.35, pp. 1075-1078, 1990.
- [29] **HEMERLY, E. M.**, *Controle por Computador de Sistemas Dinâmicos*, São Paulo, Brasil, Editora Edgard Blucher LtdaWesley Publishing Company, 250p., 1996.
- [30] **HOSTETTER, G. & MEDICH, J. S.**, Observing Systems with Unmeasurable Inputs, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol.AC-18, pp 307-308, 1973.
- [31] **HOU, M. & MULLER, P. C.**, Design of a Class of Luenberger Observers for Descriptor Systems , *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol.40, n°.1, pp 133-135, 1995.
- [32] **HOWELL, J.**, Model-based Fault Detection in Information Poor Plants, *Automatica*, vol.30, n.6 pp 929-943, 1994.

- [33] HUH, K. & STEIN, J. L., Well-Conditioned Observer Design for Observer-Based Monitoring Systems, *Transactions of the ASME*, Vol. 117, pp 592-599, 1995.
- [34] HUH, K. & STEIN, J. L., A Quantitative Performance Index for Observer-Based Monitoring Systems, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 116, pp 487-497, 1994.
- [35] INOUE, Y. & SUGA, Y., Identification of Linear Systems with Noisy Input Using Input-Output Cumulants, *International Journal of Control*, Vol.59, n°5, pp.1231-1253, 1994.
- [36] ISERMANN, R., Process Fault Detection Based on Modeling and Estimation Methods - A Survey, *Automatica*, Vol. 20, n°20, pp 387-404, 1984.
- [37] ISERMANN, R., Fault Detection and Diagnosis - Methods and Applications, *Proceedings of 2nd International Symposium of Acustical and Vibratory Surveillance Methods and Diagnostic Techniques, Senlis (France)*, Vol. 2, pp 777-792/5, 1995.
- [38] ISERMANN, R. & FREYERMUTH, B., Process Fault Diagnosis Based on Process Model Knowledge - Part I: Principles for Fault Diagnosis With Parameter Estimation, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 113, pp 620-626, 1991.
- [39] ISERMANN, R. & FREYERMUTH, B., Process Fault Diagnosis Based on Process Model Knowledge - Part II: Case Study Experiments, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 113, pp 627-633, 1991.
- [40] JABBARI, F. & SCHMITENDORF, W. E., Robust Linear Controllers Using Observers, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol.36, n.12, pp.1509-1514, 1991.
- [41] JALFON, A. C. & HALEVI, Y., On Partially Augmented Observers for Systems with Coloured Noises, *International Journal of Control*, Vol. 57, n.2, pp 335-349, 1993.

- [42] **KINNAERT, M. & HANUS, R.**, Fault Detection and Isolation for Unstable Linear Systems, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 40, n.4, pp. 740-747, 1995.
- [43] **KOVACEVIC, R; YAO, Y. X. & ZHANG, Y. M.**, Observer Parameterization for Simultaneous Observation, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 41, n^o.2, pp.255-259, 1996.
- [44] **KRASOVSKII, A. A.**, An Adaptive Optimal Controller Wherein the Order of an Observer and the Time of Extrapolation are Both Variable, *Automation and Remote Control*, Vol. 55, n.11, pp 1631-1643, 1995.
- [45] **KUDVA, P.; VISWANADHAM, N. & RAMAKRISHNA, A.**, Observers for Linear Systems with Unknown Inputs, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol.AC-25, n.1, pp.113-115, 1980.
- [46] **KWON, B. H. & YOUN, M. J.**, Optimal Observers Using Time-Weighted Performance Index With Prespecified Eigenvalues, *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, vol.108, pp. 366-371, 1986.
- [47] **LEONDES, C. T. & NOVAK, L. M.**, Optimal Minimal-Order Observers for Discrete-Time Systems - A Unified Theory, *Automatica*, Vol.8, pp.379-387, 1972.
- [48] **LIN, R. M. & EWINS, D. J.**, Identification of Mathematical Models of Structures with Localized Nonlinearity, *International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis*, Vol.10, n.1, pp. 35-52, 1995.
- [49] **LUENBERGER, D. G.**, Observing the State of a Linear System, *IEEE Transactions on Military Electronics*, Vol MIL-8, pp. 74-80, 1964.
- [50] **LUENBERGER, D. G.**, Observers for Multivariable Systems, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol AC11, pp. 190-197, 1966.

- [51] LUENBERGER, D. G., An Introduction to Observers, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol AC16, n°.6, pp. 596-602, 1971.
- [52] LUENBERGER, D. G., *Introduction to Dynamic Systems. Theory, Models, & Applications*, New York, Chichester, Toronto, John Wiley & Sons, 445p., 1979.
- [53] LYASHENKO, E. A. & RYASHKO, L. B., Discrete-Time Observers with Random Noises in Dinamic Block, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 40, N°.1, pp 165-169, 1995.
- [54] MELO, G. P. & STEFFEN JR., V., Mechanical Systems Identification Through Fourier Series Time-Domain Technique, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences*, Vol.XV, n°.2, pp.124-135, 1993.
- [55] MELO, G. P.; TURRA, A. E. & STEFFEN JR., V., Utilização de Método de Identificação de Parâmetros do Domínio do Tempo para Detecção de Falhas em Sistemas Mecânicos, *Jornadas Internacionales de Mecanica Computacional y Cad/Cam* Concepcion, Chile, pp 169-175, 1995.
- [56] MELO, G. P. & PEDERIVA, R., Fault Detection and Isolation via Robust Observation for Systems with Random Noises, *3^{er} Congresso Interamericano de Computacion Aplicada a La Industria de Procesos - CAIP 96*, Cordoba, Argentina, pp 59-62, 1996.
- [57] MELO, G. P. & PEDERIVA, R., Detection of Faulty Components via Well-Conditioned Robust Observer for Systems with Random Noises, *Proceedings of 7th International Conference on Dynamic Problems*, Angra dos Reis, Rio de Janeiro, pp 205-207, 1997.
- [58] MELO, G. P. & PEDERIVA, R., Well-Conditioned Robust Observer for Detection of Faulty Systems Components, *Proceedings of the 15th International Modal Analysis Conference*, Orlando, Florida, Vol.II, pp 1899-1903, 1997.

- [59] **MELO, G. P. & PEDERIVA, R.**, Diagnose de Falhas Através de Observadores de Estado em Sistemas com Parâmetros Desconhecidos, *Proceedings of the XIV Brazilian Congress of Mechanical Engineering, Bauru, São Paulo*, Vol.II, pp 1234-1243, 1997.
- [60] **MINAMIDE, N.; FUJISAKI, Y. & SHIMIZU, A.**, A Parametrization of all Observers for Descriptor Systems, *International Journal of Control*, Vol. 66, n.5, pp 767-777, 1997.
- [61] **MISAWA, E. A. & HEDRICK, J. K.**, Nonlinear Observers - A State-of-the-Art Survey, *Transactions of the ASME*, Vol.111, pp.344-352, 1989.
- [62] **NEWLAND, D. E.**, *Mechanical Vibration Analysis and Computation*, New York, Longman Scientific & technical, 583p., 1989.
- [63] **OGATA, K.**, *Designing Linear Control Systems with Matlab*, Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice Hall, 225p., 1993.
- [64] **OLBROT, A. W.**, Observability and Observers for a Class of Linear Systems with Delays, *IEEE Transactons on Automatic Control*, Vol.AC-26, n.2, pp.513-517, 1981.
- [65] **PARK, J.; HALEVI, Y & RIZZONI, G.**, A New Interpretation of the Fault-Detection Filter. Part 1. Cosed-Form Algorithm, *International Journal of Control*, vol.60, n.5, pp. 767-787, 1994.
- [66] **PARK, J.; HALEVI, Y & RIZZONI, G.**, A New Interpretation of the Fault-Detection Filter. Part 2. The Optimal detection filter, *International Journal of Control*, vol.60, n.6, pp. 1339-1351, 1994.
- [67] **PARK, Y. & STEIN, J. L.**, Steady-State Optimal State and Input Observer for Discrete Stochastic Systems, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol.111, pp.121-127, 1989.

- [68] **PATTON, R. J.; FRANK, P. M. & CLARK, R. N.**, *Fault Diagnosis in Dynamic Systems, Theory and Applications*, Prentice Hall, 1989.
- [69] **PRIEL, B.; SOROKA, E. & SHAKED, U.**, The Design of Optimal Reduced-Order Stochastic Observers for Discrete-Time Linear Systems, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol.36, n.12, pp.1502-1508, 1991.
- [70] **SHEIKHOESLAM, S.**, Observer-Based Parameter Identifiers for Nonlinear Systems with Parameter Dependencies, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 40, n.2, pp. 382-387, 1995.
- [71] **SHOUSE, K. R.**, Discrete-Time Observers for Singularly Perturbed Continuous-Time Systems, *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol.40, n.2, pp. 224-235, 1995.
- [72] **SOTELO JR., J. & LOPES, L. A.**, Refinamento da Solução Algébrica da Matriz de Riccati - Utilização no Programa Linquad (LQG), *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences*, Vol.X, nº.3, pp.272-285, 1988.
- [73] **STASZEWSKJ, W. J. & TOMLINSON, G. R.**, Fault Detection Procedures Employing the Wavelet Transform, *ISMA19 - Tools for Noise and Vibration Analysis*, pp. 371-385, 1996.
- [74] **STEIN, J. L. & PARK, Y.**, Measurement Signal Selection and a Simultaneous State and Input Observer, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol.110, pp. 151-159, 1988.
- [75] **SUNDARESWARAN, K. K.; MCLANE, P. J. & BAYOUMI, M. M.**, Observers for Linear Systems with Arbitrary Plant Disturbances, *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol.AC-22, pp. 870-871, 1977.

- [76] TSE, E. & ATHANS, M., Optimal Minimal-Order Observer-Estimators for Discrete Linear Time-Varying Systems, *IEEE - Transactions on Automatic Control*, vol.AC-15, pp. 416-426, 1970.
- [77] WATANABE K. & HIMMELBLAU D. M., Instrument Fault Detection in Systems with Uncertainties, *International Journal of Systems Science*, vol.13, n.2, pp.137-158, 1982.
- [78] WANG, S. H.; DAVISON, E. J. & DORATO, P., Observing the States of Systems with Unmeasurable Disturbances, *IEEE Transactions of Automatic Control*, vol.AC-20, pp.716-717, 1975.
- [79] WESTON, P. F. & NORTON, J. P., Detection and Estimation of Abrupt Changes in Input or State, *Int. J. Control*, Vol.67, n.5, pp.699-711, 1997.
- [80] WILLSKY, A. S., A Survey of Design Methods for Failure Detection Systems, *Automatica*, Vol.12, pp.601-611, 1976.
- [81] YAO, Y. X.; ZHANG, Y. M. & KOVACEVIC, R., Parameterisation of Observers for Time Delay Systems and its application in Observer Design, *IEE Proc. Control Theory Appl.*, Vol. 143, n.3, pp 225-232, 1996.
- [82] YAO, Y. X.; ZHANG, Y. M. & KOVACEVIC, R., Functional Observer and State Feedback for Input Time-Delay Systems, *International Journal of Control*, Vol. 66, n.4, pp 603-617, 1997.
- [83] YOON, T. W. & CLARKE, D. W., Observer Design in Receding-Horizon Predictive Control, *International Journal of Control*, Vol. 61, n.1, pp 171-191, 1995.
- [84] ZHANG, Y. H.; FRISWELL, M. I. & MOTTERSHEAD, J. E., A Comparison of Methods to Locate Damage in Structures, *ISMA19 - Tools for Noise and Vibration Analysis*, pp. 683-695, 1996.