



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**

**Pós-Graduação em Engenharia Mecânica**

**LOCALIZAÇÃO DE FALHAS VIA  
OBSERVADORES DE ESTADO EM  
SISTEMAS COM VARIAÇÕES DE  
PARÂMETROS**

**JORGE HENRIQUE MARANO**

**Ilha Solteira - SP**







UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

P/ Pós-Colorida

**LOCALIZAÇÃO DE FALHAS VIA  
OBSERVADORES DE ESTADO EM SISTEMAS  
COM VARIAÇÕES DE PARÂMETROS**

Ilha Solteira



# LOCALIZAÇÃO DE FALHAS VIA OBSERVADORES DE ESTADO EM SISTEMAS COM VARIAÇÕES DE PARÂMETROS

1210001317



**Jorge Henrique Marano**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Mecânica**

**Orientador: PROF. DR. GILBERTO PECHOTO DE MELO**

Ilha Solteira, Maio de 2002.



Marano, Jorge Henrique  
M311L      Localização de falhas via observadores de estado em sistemas com variações de  
parâmetros / Jorge Henrique Marano. -- Ilha Solteira, 2002  
xvii, 130 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2002

Orientador: Gilberto Pechoto de Melo  
Inclui bibliografia

1. Engenharia de sistemas    2. Localização de falhas (Engenharia)    3. Máquinas-  
Manutenção e reparos    4. Máquinas-Monitoração ✓



**“Localização de Falhas Via Observadores de Estado em  
Sistemas com Variações de Parâmetros”**

**Jorge Henrique Marano**

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO  
DO TÍTULO DE

**MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**

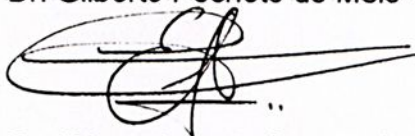
NA ÁREA DE CONCENTRAÇÃO MECÂNICA DOS SÓLIDOS E  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**Prof. Dr. João Antonio Pereira – Coordenador**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

*Gilberto Pechoto de Melo*

Prof. Dr. Gilberto Pechoto de Melo - Orientador



Prof. Dr. Edson Antonio Capello Sousa



Prof. Dr. Adyles Arato Júnior

Ilha Solteira – SP, maio de 2002

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Gilberto Augusto de Melo, por sua ajuda, orientação, paciência e pelo  
profissionalismo.

Ao Prof. Dr. Alexandre Tadeu, por sua orientação.

A Maria Rita Marques da Silva, pelo grande apoio emocional.

A todos os amigos, familiares e colegas.

E, por fim, aos meus pais, Mauro e Neila.

A todos os que me apoiaram e incentivaram durante este processo.

A todos os que me ajudaram a superar as dificuldades e a alcançar os meus objetivos.

A todos os que me incentivaram a continuar estudando e a buscar a excelência.

A todos os que me ajudaram a superar as dificuldades e a alcançar os meus objetivos.

**Á Deus, aos meus pais Mauro Antônio Marano  
e Neile Maria Nunes Marano, e minha irmã Ana  
Paula Marano.**



## AGRADECIMENTOS

---

Ao Prof. Dr. Gilberto Pechoto de Melo, pelo apoio, incentivo, amizade e pela indispensável orientação;

Ao Prof. Dr. Amarildo Tabone, pelas idéias construtivas;

A Marimilia Marques da Silva, pelo grande apoio e incentivo;

Ao meu cunhado Valmir Júnior, pela amizade;

Aos meus avós, Henrique, Ostelina e Almira;

A Família Silva, em especial ao Sr. José João e a Sra. Maria Amélia;

Ao amigo de tantas jornadas, Engenheiro Davi Silveira de Abreu;

Aos técnicos e secretárias do departamento de engenharia mecânica (DEM/FEIS);

Aos colegas de pós-graduação, a instituição UNESP/FEIS e ao programa de pós-graduação em engenharia mecânica PPGEM;

E em especial a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo apoio financeiro.



## SUMÁRIO

---

|                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. INTRODUÇÃO E REVISÃO DA LITERATURA.....                                                      | 01 |
| 1.1. Introdução.....                                                                            | 01 |
| 1.2. Revisão da literatura.....                                                                 | 02 |
| 1.3. Justificativa do trabalho.....                                                             | 11 |
| 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....                                                                    | 13 |
| 2.1. Sistemas de controle.....                                                                  | 15 |
| 2.2. Conceito de estado.....                                                                    | 17 |
| 2.3. Observadores de estado.....                                                                | 17 |
| 2.3.1. <i>Introdução aos observadores de estado</i> .....                                       | 17 |
| 2.3.2. <i>Método dos observadores de estado</i> .....                                           | 20 |
| 2.4. Estrutura geral dos observadores de estado para sistemas com variações de estado.....      | 23 |
| 2.5. Projeto dos observadores de estado.....                                                    | 25 |
| 3. METODOLOGIA DESENVOLVIDA.....                                                                | 29 |
| 3.1. Sistema Físico (Sistema Real).....                                                         | 30 |
| 3.1.1. <i>Modelagem matemática</i> .....                                                        | 30 |
| 3.1.2. <i>Obtenção das matrizes <math>[M]</math>, <math>[K]</math> e <math>[C]</math></i> ..... | 31 |
| 3.1.3. <i>Determinação da matriz dinâmica <math>[A]</math></i> .....                            | 31 |
| 3.1.4. <i>Solução da equação do sistema real</i> .....                                          | 32 |
| 3.1.5. <i>Determinação dos autovalores de <math>[A]</math></i> .....                            | 32 |
| 3.2. Cálculo dos observadores de estado.....                                                    | 33 |





|                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.2.1. Seleção dos autovalores do observador.....                                                           | 33 |
| 3.2.2. Determinação da matriz de medidas [ $C_{me}$ ].....                                                  | 34 |
| 3.2.3. Cálculo da matriz de observabilidade.....                                                            | 34 |
| 3.2.4. Cálculo da matriz do observador.....                                                                 | 36 |
| 3.2.5. Solução da equação do observador de estado.....                                                      | 36 |
| 3.2.6. Unidade de decisão lógica.....                                                                       | 37 |
| 4. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E RESULTADOS.....                                                                | 39 |
| 4.1. Análise para uma excitação impulsiva.....                                                              | 39 |
| 4.1.1. Desenvolvimento Matemático.....                                                                      | 39 |
| 4.1.2. Sistema Massa-Mola-Amoortecedor Com Perturbação Aleatória.....                                       | 46 |
| 4.1.2.1. Sistema real global simulado sem falhas.....                                                       | 48 |
| 4.1.2.2. Sistema real global simulado com perda de 10% de $k_1$ .....                                       | 53 |
| 4.1.3. Tabela de tendência para um parâmetro específico sujeito a falha –<br>Sem perturbação aleatória..... | 60 |
| 4.2. Análise para uma excitação harmônica.....                                                              | 75 |
| 4.2.1. Desenvolvimento matemático.....                                                                      | 75 |
| 4.2.2. Sistema massa-mola-amortecedor sem perturbação aleatória.....                                        | 78 |
| 4.2.3. Tabela de tendência para um parâmetro específico sujeito a falha.....                                | 84 |
| 5. ANÁLISE EXPERIMENTAL E RESULTADOS.....                                                                   | 89 |
| 5.1. Sistema de aquisição de sinais.....                                                                    | 90 |
| 5.1.1. Materiais utilizados.....                                                                            | 90 |
| 5.1.2. Equipamentos utilizados.....                                                                         | 91 |
| 5.2. Modelo matemático do sistema mecânico montado.....                                                     | 93 |
| 5.3. Determinação dos parâmetros físicos do sistema mecânico.....                                           | 95 |



|                                                                              |     |
|------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.3.1. Mesa inferior.....                                                    | 95  |
| 5.3.2. Mesa intermediária.....                                               | 97  |
| 5.3.3. Mesa Superior.....                                                    | 100 |
| 5.4. Determinação das frequências naturais do sistema completo.....          | 102 |
| 5.5. Análise experimental para uma excitação impulsiva.....                  | 105 |
| 5.5.1. Resultados experimentais.....                                         | 105 |
| 5.5.2. Tabela de tendência para um parâmetro específico sujeito a falha..... | 110 |
| 5.6. Análise experimental para uma excitação harmônica.....                  | 114 |
| 5.6.1. Tabela de tendência para um parâmetro específico sujeito a falha..... | 115 |
| 6. DISCUSSÃO E CONCLUSÃO.....                                                | 119 |
| Propostas para futuros trabalhos.....                                        | 124 |
| 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....                                           | 125 |



## LISTA DE FIGURAS E TABELAS

---

|                                                                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Esquema de um controle a malha fechada.....                                                                | 15 |
| Figura 2 – Esquema de um controle a malha aberta.....                                                                 | 16 |
| Figura 3 – Um observador simples.....                                                                                 | 19 |
| Figura 4 – Quatro divisões possíveis de um sistema.....                                                               | 22 |
| Figura 5 – Sistema de observação.....                                                                                 | 27 |
| Figura 6 – Fluxograma da metodologia desenvolvida para a detecção e localização<br>de falhas.....                     | 29 |
| Figura 7 – Sistema massa-mola-amortecedor de 3 GDL.....                                                               | 40 |
| Figura 8 – Esquema do sistema de observação.....                                                                      | 46 |
| Figura 9 – Sistema Real Global Simulado Sem Falhas e Sem Perturbação<br>Aleatória.....                                | 48 |
| Figura 10 – Sistema Real Global Simulado Sem Falhas e Com Perturbação<br>Aleatória.....                               | 49 |
| Figura 11 – Sistema Real Global Simulado (Sem Falhas) com Perturbação<br>Aleatória x Observador Global.....           | 49 |
| Figura 12 – Sistema Real Global Simulado (Sem Falhas) com Perturbação<br>Aleatória x Observador Robusto a $k_1$ ..... | 50 |
| Figura 13 – Sistema Real Global Simulado (Sem Falhas) com Perturbação<br>Aleatória x Observador Robusto a $k_2$ ..... | 51 |
| Figura 14 – Sistema Real Global Simulado (Sem Falhas) com Perturbação<br>Aleatória x Observador Robusto a $k_3$ ..... | 51 |





|                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 15 – Sistema Real Global Simulado (Sem Falhas) com Perturbação         |    |
| Aleatória x Observador Robusto a $c_1$ .....                                  | 52 |
| Figura 16 – Sistema Real Global Simulado (Sem Falhas) com Perturbação         |    |
| Aleatória x Observador Robusto a $c_2$ .....                                  | 52 |
| Figura 17 – Sistema Real Global Simulado (Sem Falhas) com Perturbação         |    |
| Aleatória x Observador Robusto a 10% de perda de $k_1$ .....                  | 53 |
| Figura 18 – Sistema Real Simulado com 10% de perda de $k_1$ - com Perturbação |    |
| Aleatória x Observador Global.....                                            | 54 |
| Figura 19 – Sistema Real Simulado com 10% de perda de $k_1$ - com Perturbação |    |
| Aleatória x Observador Robusto a $k_1$ .....                                  | 55 |
| Figura 20 – Sistema Real Simulado com 10% de perda de $k_1$ - com Perturbação |    |
| Aleatória x Observador Robusto a $k_2$ .....                                  | 55 |
| Figura 21 – Sistema Real Simulado com 10% de perda de $k_1$ - com Perturbação |    |
| Aleatória x Observador Robusto a $k_3$ .....                                  | 56 |
| Figura 22 – Sistema Real Simulado com 10% de perda de $k_1$ - com Perturbação |    |
| Aleatória x Observador Robusto a $c_1$ .....                                  | 56 |
| Figura 23 – Sistema Real Simulado com 10% de perda de $k_1$ - com Perturbação |    |
| Aleatória x Observador Robusto a $c_2$ .....                                  | 57 |
| Figura 24 – Sistema Real Simulado com 10% de perda de $k_1$ - com Perturbação |    |
| Aleatória x Observador Robusto a 10% de perda de $k_1$ .....                  | 58 |
| Figura 25 – Sistema Massa-Mola-Amortecedor de 3 GDL.....                      | 76 |
| Figura 26 – Sistema Real Global Simulado (Sem Falhas) x Observador            |    |
| Global.....                                                                   | 79 |



|                                                                                                                       |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 27 – Sistema Real Global Simulado com 50% de perda de $k_1$ x Observador Global.....                           | 80  |
| Figura 28 – Sistema Real Global Simulado com 50% de perda de $k_1$ x Observador Robusto a 50% de perda de $k_2$ ..... | 81  |
| Figura 29 – Sistema Real Global Simulado com 50% de perda de $k_1$ x Observador Robusto a 50% de perda de $k_3$ ..... | 81  |
| Figura 30 – Sistema Real Global Simulado com 50% de perda de $k_1$ x Observador Robusto a 50% de perda de $c_1$ ..... | 82  |
| Figura 31 – Sistema Real Global Simulado com 50% de perda de $k_1$ x Observador Robusto a 50% de perda de $c_2$ ..... | 82  |
| Figura 32 – Sistema Real Global Simulado com 50% de perda de $k_1$ x Observador Robusto a 50% de perda de $c_3$ ..... | 83  |
| Figura 33 – Sistema Real Global Simulado com 50% de perda de $k_1$ x Observador Robusto a 50% de perda de $k_1$ ..... | 83  |
| Figura 34 – Bancada de Testes.....                                                                                    | 89  |
| Figura 35 – Fluxograma para a aquisição de sinais e análise de frequência.....                                        | 93  |
| Figura 36 – Esquema do sistema mecânico montado.....                                                                  | 94  |
| Figura 37 – Mesa Inferior (Mesa $m_1$ ).....                                                                          | 95  |
| Figura 38 – Força Impulsiva aplicada a Mesa Inferior.....                                                             | 97  |
| Figura 39 – Mesa Intermediária (Mesa $m_2$ ).....                                                                     | 98  |
| Figura 40 – Força Impulsiva aplicada a Mesa Intermediária.....                                                        | 99  |
| Figura 41 – Mesa Superior (Mesa $m_3$ ).....                                                                          | 100 |
| Figura 42 – Força Impulsiva aplicada a Mesa Superior.....                                                             | 102 |
| Figura 43 – Sistema Massa-Mola-Amortecedor Completo.....                                                              | 103 |





|                                                                                                                             |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 44 – Espectro de frequências do sistema completo.....                                                                | 103 |
| Figura 45 – Sistema Mecânico Completo com acelerômetros instalados nas 3<br>mesas vibratórias.....                          | 105 |
| Figura 46 – Sistema Real Global (Sem Falhas) x Observador Global.....                                                       | 106 |
| Figura 47 – Sistema Real Global com perda de 4 lâminas de $k_2$ x Observador<br>Global.....                                 | 107 |
| Figura 48 – Sistema Real Global com perda de 4 lâminas de $k_2$ x Observador<br>Robusto a perda de 1 lâmina de $k_2$ .....  | 108 |
| Figura 49 – Sistema Real Global com perda de 4 lâminas de $k_2$ x Observador<br>Robusto a perda de 2 lâminas de $k_2$ ..... | 109 |
| Figura 50 – Sistema Real Global com perda de 4 lâminas de $k_2$ x Observador<br>Robusto a perda de 3 lâminas de $k_2$ ..... | 109 |
| Figura 51 – Sistema Real Global com perda de 4 lâminas de $k_2$ x Observador<br>Robusto a perda de 4 lâminas de $k_2$ ..... | 110 |
| Figura 52 – Sistema Completo excitado harmonicamente.....                                                                   | 114 |
| Tabela 1 – Valores adotados para a simulação da Fig. 7.....                                                                 | 40  |
| Tabela 2 – Resultados numéricos obtidos com perturbação aleatória.....                                                      | 59  |
| Tabela 3 – Tabela de Tendências – Perda de 0 a 4% da rigidez $k_1$ .....                                                    | 62  |
| Tabela 4 – Tabela de Tendências – Perda de 6 a 10% da rigidez $k_1$ .....                                                   | 62  |
| Tabela 5 – Tabela de Tendências – Perda de 12 a 16% da rigidez $k_1$ .....                                                  | 63  |
| Tabela 6 – Tabela de Tendências – Perda de 18 a 20% da rigidez $k_1$ .....                                                  | 63  |
| Tabela 7 – Tabela de Tendências – Perda de 0 a 4% da rigidez $k_2$ .....                                                    | 66  |
| Tabela 8 – Tabela de Tendências – Perda de 6 a 10% da rigidez $k_2$ .....                                                   | 67  |
| Tabela 9 – Tabela de Tendências – Perda de 12 a 16% da rigidez $k_2$ .....                                                  | 67  |





|                                                                                         |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 10 – Tabela de Tendências – Perda de 18 a 20% da rigidez $k_2$ .....             | 68  |
| Tabela 11 – Tabela de Tendências – Perda de 0 a 8% do amortecimento $c_2$ .....         | 71  |
| Tabela 12 – Tabela de Tendências – Perda de 12 a 20 % do amortecimento $c_2$ .....      | 71  |
| Tabela 13 – Tabela de Tendências – Perda das rigidezes $k_2$ e $k_3$ simultaneamente... | 73  |
| Tabela 14 – Valores adotados para o sistema da Fig. 25.....                             | 78  |
| Tabela 15 – Tabela de Tendências – Perda de 0 a 4% da rigidez $k_1$ .....               | 85  |
| Tabela 16 – Tabela de Tendências – Perda de 6 a 10% da rigidez $k_1$ .....              | 85  |
| Tabela 17 – Tabela de Tendências – Perda de 12 a 16% da rigidez $k_1$ .....             | 86  |
| Tabela 18 – Tabela de Tendências – Perda de 18 a 20% da rigidez $k_1$ .....             | 86  |
| Tabela 19 – Diferença dos valores das frequências naturais do sistema completo.....     | 88  |
| Tabela 20 – Tabela de Tendências – Perda de 0 a 12.50% da rigidez $k_2$ .....           | 111 |
| Tabela 21 – Tabela de Tendências – Perda de 18.75 a 25% da rigidez $k_2$ .....          | 112 |
| Tabela 22 – Tabela de Tendências – Perda de 0 a 12.50% da rigidez $k_2$ .....           | 116 |
| Tabela 23 – Tabela de Tendências – Perda de 18.75 a 25% da rigidez $k_2$ .....          | 116 |



## LISTA DE SÍMBOLOS

---

[A] *Matriz dinâmica do sistema ( $n \times n$ )*

[B] *Matriz de entradas ( $n \times p$ )*

[M] *Matriz de massa ( $n \times n$ )*

[K] *Matriz de rigidez ( $n \times n$ )*

[C] *Matriz de amortecimento*

[I] *Matriz identidade ( $n \times n$ )*

[D] *Matriz de observabilidade ( $n \times n$ )*

[M<sub>c</sub>] *Matriz de controlabilidade ( $n \times n$ )*

[M<sub>o</sub>] *Matriz de observabilidade ( $n \times n$ )*

[C<sub>me</sub>] *Matriz de medidas ( $k \times n$ )*

[L] *Matriz do observador ( $1 \times n$ )*





|                     |                                                                                         |
|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| $[A+\Delta A]$      | <i>Matriz dinâmica do sistema com variações de parâmetros (<math>n \times n</math>)</i> |
| $n$                 | <i>Ordem do sistema</i>                                                                 |
| $p$                 | <i>Número de entradas</i>                                                               |
| $k$                 | <i>Número de saídas</i>                                                                 |
| $\{x(t)\}$          | <i>Vetor de estado do sistema (<math>n \times 1</math>)</i>                             |
| $\{y(t)\}$          | <i>Vetor de saída (<math>k \times 1</math>)</i>                                         |
| $\{u(t)\}$          | <i>Vetor de entrada (<math>p \times 1</math>)</i>                                       |
| $\{\hat{x}(t)\}$    | <i>Vetor de estado do observador de estado (<math>n \times 1</math>)</i>                |
| $\{\hat{y}(t)\}$    | <i>Vetor de saída do observador (<math>k \times 1</math>)</i>                           |
| $\{f(t)\}$          | <i>Vetor força de excitação (<math>n \times 1</math>)</i>                               |
| $(\neq \text{RMS})$ | <i>Diferença dos valores RMS</i>                                                        |
| $\omega$            | <i>Frequência de excitação (rad/s)</i>                                                  |

$\omega_a$       *Frequência amortecida (rad/s)*

$\omega_n$       *Frequência natural (rad/s)*

$f_a$       *Frequência natural amortecida (Hz)*

$\xi$       *Decremento logarítmico*



**Marano, J.H., 2002,** *“Localização de Falhas via Observadores de Estado em Sistemas com Variações de Parâmetros”*, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (FEIS/UNESP/DEM), Ilha Solteira, São Paulo, Brasil.

## RESUMO

Nos últimos anos, devido a grande preocupação das indústrias com a segurança de seus sistemas, novas metodologias de detecção e localização de falhas foram desenvolvidas a fim de evitar falsos alarmes e paradas desnecessárias destes sistemas em operação. Verifica-se que na prática, certos parâmetros dos sistemas podem variar durante o processo devido a características específicas de alguns materiais ou ao próprio desgaste natural de seus componentes. Neste trabalho é apresentada uma metodologia para a detecção e localização de falhas em sistemas mecânicos com variações de parâmetros utilizando a técnica dos observadores de estado. A técnica dos observadores de estado pode reconstruir estados não medidos ou valores provenientes de pontos de difícil acesso em um sistema, podendo assim detectar falhas nestes pontos sem o conhecimento de suas medidas, monitorando-os através das reconstruções de seus estados. A fim de supervisionar um processo, monta-se um banco de observadores, onde cada observador é dedicado somente a um instrumento ou parâmetro físico deste sistema. Os resultados obtidos através de simulações computacionais e análises experimentais realizadas em sistemas massa-mola-amortecedor de 3 graus de liberdade foram bastante satisfatórios, podendo assim validar a metodologia desenvolvida.

---

**PALAVRAS-CHAVE:** Observadores de estado, variações de parâmetros, detecção e localização de falhas.





**Marano, J.H., 2002, "Faults Location via States Observers in Systems with Parameters Variation",** Master Dissertation, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (FEIS/UNESP/DEM), Ilha Solteira, São Paulo, Brazil.

## ABSTRACT

In the last years, due to great concern of the industries with the safety of its systems, new methodologies of faults detection and location were developed in order to avoid false alarms and unnecessary stops of these systems in operation. It is verified that in the practice, certain parameters of the systems can vary during the process due to the specific characteristics of some materials or to the own natural waste of the your components. In this work, a methodology is presented for the faults detection and location in mechanical systems with variations of parameters using the state observers' technique. The state observers' technique can reconstruct non measured states or value coming of points of difficult access in a system, could detect faults in these points without the knowledge of its measures, monitoring them through the reconstructions of its states. In order to supervise a process, a bank of observers is set up, where each observer is only dedicated to an instrument or physical parameter of this system. The results obtained through computers simulations and experimental analyses accomplished in systems mass-spring-damping of 3 degrees of freedom they were quite satisfactory, could validate like this the developed methodology.

---

**KEYWORDS:** State observers, parameters variations, faults detection and location.



## PUBLICAÇÕES GERADAS

---

Apresenta-se a seguir os artigos provenientes deste trabalho publicados em congressos:

- “*Deteccão de falhas usando observadores de estado em sistemas com variações de parâmetro*”, V Congresso Iberoamericano de Ingenieria Mecânica – CIDIM 2001;
- “*Fault Detection using Reduced-Order Observers for Systems with Parameters Variation*”, 5th Interamerican Congress on Computers Applied to the Process Industry - CAIP’2001 (participação);
- “*Influência da variação de parâmetros e entradas desconhecidas na localização de falhas via observadores de estado*”, II Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM 2002.





# CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO E REVISÃO DA LITERATURA

### 1.1. INTRODUÇÃO

Atualmente uma das maiores preocupações da indústria é a de manter seus equipamentos em funcionamento sem que ocorram paradas repentinas. Devido a essa preocupação constante, observa-se nos últimos tempos o desenvolvimento de novas técnicas de detecção e localização de falhas em sistemas mecânicos submetidos a carregamentos dinâmicos. Com a finalidade de garantir o funcionamento dos sistemas mecânicos com segurança, estes devem ser supervisionados e monitorados para que as falhas sejam sanadas o mais rápido possível, pois distúrbios inerentes à operação destes sistemas podem levar a uma deterioração do desempenho do sistema ou até mesmo a situações perigosas.

As ferramentas para análise teórica dos sistemas dinâmicos atuais são bastante sofisticadas, podendo simular modelos complexos em computadores. Entretanto, existe uma grande dificuldade na predição do comportamento dinâmico de certos componentes estruturais e na diagnose de falhas, seja pela inexatidão do modelo teórico ou mesmo pela dificuldade de medição de algumas variáveis de estado.

A técnica dos observadores de estado pode reconstruir os estados não medidos ou os valores provenientes de pontos de difícil acesso no sistema. Sendo assim, pode-se detectar falhas





nestes pontos sem o conhecimento de suas medidas, podendo monitorá-los através das reconstruções de seus estados. Esta técnica consiste em desenvolver um modelo para o sistema em análise e comparar a saída estimada pelo observador com a saída do sistema.

Os modelos matemáticos que na prática representam o comportamento dos sistemas, não estão livres de perturbações desconhecidas e de variações nos próprios parâmetros. Na maioria dos projetos de observadores de estado, os parâmetros do sistema são conhecidos ou podem ser identificados através de alguns métodos específicos encontrados na literatura. Em casos onde os parâmetros não são conhecidos com exatidão ou estão sujeitos a mudanças durante o funcionamento do sistema, a resposta do observador pode fornecer uma estimativa incorreta dos estados reconstruídos provocando erros de regime permanente que levam a falsos alarmes na detecção e localização de falhas. Por isso, no projeto de observadores de estado esta variação de parâmetros deve ser levada em consideração a fim de evitar falsos alarmes e paradas desnecessárias de sistemas mecânicos.

## 1.2. REVISÃO DA LITERATURA

Foi realizado um levantamento bibliográfico sobre metodologias utilizadas para a detecção e localização de falhas em sistemas mecânicos, principalmente as teorias que envolveram o uso dos observadores de estado. A revisão é apresentada em ordem cronológica, relatando-se os trabalhos mais significativos sobre o assunto.

Luenberger (1964) propôs inicialmente o uso de observadores de estado no projeto de sistemas de controle de retroalimentação. O autor afirma que a maior parte da teoria de projetos



de controle moderno está baseada na suposição de que o vetor de estado do sistema a ser controlado está disponível por medição direta. Mas em muitas situações práticas, somente poucas quantidades de saída estão disponíveis. O autor demonstra como as entradas e saídas disponíveis de um sistema podem ser usadas para construir uma estimativa do vetor de estado do sistema, no qual o dispositivo responsável por essa reconstrução do vetor de estado é chamado de *observador de Luenberger*, ou somente, *observador*. O vetor de estado contém informação suficiente para resumir completamente o comportamento passado do sistema, sendo que o comportamento futuro do sistema é determinado por uma equação diferencial de primeira ordem. Este trabalho deu início a teoria dos observadores de estado e mostrou como o vetor de estado de um sistema linear pode ser reconstruído a partir de observadores nas entradas e saídas do sistema, e como o observador pode ser incorporado no projeto de controle de um sistema que não tem seu vetor de estado completo disponível por medição direta.

Luenberger (1966) demonstrou que se um sistema é linear, seu vetor de estado pode ser aproximadamente reconstruído através do projeto de um observador, no qual ele próprio é um sistema linear governado por entradas e saídas disponíveis do sistema original. E que o vetor de estado de um sistema de ordem  $n$  com  $m$  saídas independentes pode ser reconstruído com um observador de ordem  $(n-m)$ . Este trabalho demonstra como o projeto de observador para um sistema com  $m$  saídas pode ser reduzido ao projeto de  $m$  observadores separados para subsistemas de única saída, sendo este resultado uma consequência de uma forma canônica especial desenvolvida para sistemas de múltiplas saídas. E por último, a aplicação de observadores para projeto de controle foi investigada, mostrando que um vetor de estado de um sistema estimado pelo observador pode ser usado no lugar do vetor de estado atual em projetos de controle de retroalimentação lineares e não-lineares, sem perda de estabilidade.





Luenberger (1971) discutiu os elementos básicos do projeto de observador e apresentou de forma introdutória uma metodologia desenvolvida para a reconstrução de estados através de observadores. Este trabalho traz ainda tópicos a respeito do observador identidade, observador de ordem reduzida e das propriedades de estabilidade. Como nos trabalhos anteriores, Luenberger concentra o estudo em sistemas lineares, determinísticos, contínuos e invariantes no tempo, mas ele observa que a teoria do observador desenvolvida inicialmente por ele têm sido estendida para situações mais gerais, incluindo sistemas variando no tempo, sistemas discretos e sistemas estocásticos.

Wang et al (1975) apresentaram um algoritmo simples e útil para a construção de observadores de estado de Luenberger de ordem mínima para sistemas com perturbações imensuráveis. Os autores assumem uma entrada  $u_1$  como uma entrada não mensurável e através do método apresentado no trabalho eles encontraram uma matriz de transformação linear  $T$  para sistemas simples de ordem baixa, construindo assim um tipo de observador de estado de Luenberger com uma entrada não mensurável  $u_1$ . De forma que a matriz de transformação linear  $T$  seja escolhida pelo projetista de modo a fazer o erro entre o estado do sistema e o estado estimado aproxime-se de zero.

Clark (1978) introduziu o esquema de observadores dedicados para a detecção de falhas em instrumentos por redundância funcional aplicando-o na simulação de um sistema de controle de eixos laterais de um barco hidrofólio. O termo redundância funcional, redundância interna e redundância analítica são usados para descrever os métodos de detecção de avaria de instrumento que usam técnicas de processamento de dados *on-line* para gerar sinais redundantes a partir de um único conjunto de instrumentos. Estes esquemas são pretendidos a ser superior aos métodos



redundantes convencionais (*hardware*), que requerem múltiplos conjuntos de instrumentos para gerar sinais redundantes.

Watanabe e Himmelblau (1982) apresentaram um método para detectar falhas de instrumentos em processos não lineares variando no tempo, incluindo incertezas tais como erro de modelagem, ambigüidade de parâmetros e ruídos na entrada e saída. O principal objetivo do trabalho foi o desenvolvimento de filtros de estimação de estado com sensibilidade mínima para as incertezas e sensibilidade máxima para falhas do instrumento, como aquelas correspondentes a deteriorações leves ou alterações graduais, ao invés de falhas catastróficas ou abruptas. Os autores utilizaram o conceito de *observador robusto*, apresentado inicialmente por Clark (1978), ao projetar filtros estimadores de estado para a detecção de falhas de instrumentos, tal que sejam robustos às incertezas do sistema. A estratégia usada para o projeto destes filtros foi baseada na separação dos efeitos ocasionados por falhas de instrumentos e dos efeitos de incertezas do sistema. O filtro projetado é um filtro linear e invariante no tempo, mas que pode, de acordo com o autor, ser aplicado em sistemas não-lineares e variáveis no tempo. Com a finalidade de ilustrar e comprovar a estratégia de projeto do filtro estimador de estado, aplicou-se o método em um reator químico com troca de calor, na qual as condições de operação e as falhas de instrumentos foram simuladas e os resultados apresentados se mostraram satisfatórios para a detecção de falhas de instrumentos. Apesar da atenção ter sido voltada para o problema de detecção de falhas de instrumentos e não para o problema de detecção de falhas do sistema de um modo geral, os autores afirmam que o filtro discutido neste trabalho está inerentemente relacionado com a estrutura do sistema e, portanto, pode ser aplicado efetivamente na detecção de falhas de sistemas.



Wang, Kuo e Hsu (1987) apresentam uma técnica de projeto para a síntese de observadores robustos para sistemas dinâmicos lineares com parâmetros incertos. Uma aproximação foi desenvolvida para formular o problema do projeto de um observador ótimo, onde as condições necessárias e suficientes para este projeto ótimo foram apresentadas a fim de estabelecer a estabilidade do observador, sendo que o critério ótimo introduzido neste trabalho é a minimização do tamanho do erro de estimação. Um algoritmo de busca do gradiente foi proposto a fim de se encontrar uma solução ótima para o caso, quando um parâmetro livre é incluído no procedimento de otimização. Apesar dos resultados mostrados serem para um caso particular, os autores presumem que o observador ótimo irá também se comportar melhor do que o observador não-ótimo quando os parâmetros do sistema observado estiverem sujeitos a pequenas variações.

Ge e Fang (1987) propuseram uma nova idéia de isolamento de defeito via observação robusta, por meio do qual uma lei de diagnose de defeito é encontrada de forma a monitorar os componentes de um sistema e um sistema de diagnose é projetado por um procedimento sistemático. O problema considerado neste trabalho é o seguinte: dado o modelo matemático de um sistema (identificado ou teoricamente deduzido) consistindo de  $n$  componentes, os quais podem ser acoplados por estados não disponíveis, projeta-se um sistema de diagnose para monitorar o funcionamento desses componentes e detectar componentes defeituosos, enquanto nenhum conhecimento anterior em possíveis defeitos está disponível. Sendo assim, os autores encontraram uma estrutura geral de observadores de detecção a partir de uma estrutura do observador de Luenberger, e em seguida propuseram a idéia de isolamento de defeitos via observação robusta, seguida por lógica de diagnose de falhas de defeito. Os resultados das aplicações desta técnica em uma planta piloto, mostraram que o uso da aproximação robusta para



componentes defeituosos, os quais estão acoplados por estados não disponíveis, podem ser detectadas efetivamente.

Frank e Seliger (1991) apresentaram duas aproximações para detecção e isolamento de falhas em processos mecânicos:

- a) aproximação por redundância física (ou *Hardware*) que fornece informação sobre o tempo de ocorrência, na qual a localização de falhas de instrumentos é dada por meio de sensores redundantes;
- b) aproximação por redundância analítica (ou *Software*) usada para descrever métodos de detecção de avaria de instrumento usando técnicas de processamento de dados *on-line* para gerar sinais redundantes a partir de um único conjunto de instrumentos. Aqui, as capacidades da tecnologia moderna de computação não são somente utilizadas para controlar um processo, mas também para diagnose de falhas.

Porém, o trabalho dá maior ênfase na aproximação por redundância analítica para a detecção e isolamento de falhas em processos automáticos, onde os autores descrevem brevemente várias técnicas utilizadas e realizam algumas simulações, mostrando que o desenvolvimento destas técnicas atingiram um estágio na qual aplicações práticas devem ser realizadas a fim de que sejam aceitas na indústria.

Aldeen e Trinh (1994) apresentaram um método de projeto de observador de estado seletivo para a estimação de subconjuntos escolhidos arbitrariamente do vetor de estado de sistemas dinâmicos de multivariáveis, linear e invariante no tempo, sendo que as dinâmicas do



observador são derivadas a partir de um modelo do estado a ser estimado. Os autores afirmam que a única condição para a localização do subconjunto é que o modelo derivado seja observável. Além disso, é demonstrado que as dinâmicas arbitrariamente escolhidas podem ser atribuídas ao observador, e que embora o desempenho transiente do observador de estado seletivo é dependente da precisão do modelo derivado, o observador sempre localizará os estados correspondentes do sistema governado. São apresentados exemplos numéricos para ilustrar as propriedades do novo observador e seus métodos de projeto, trabalhando-se com observadores de ordem reduzida que apresentam a mesma performance dos observadores de ordem completa.

Huh e Stein (1994) investigaram quantitativamente as limitações do observador de estado determinístico, a partir do ponto de vista de monitoramento de máquinas. As limitações no desempenho do transiente e no desempenho do regime permanente do observador são quantificadas baseando-se nos limites do erro de estimação, e a partir destes limites de erro, são selecionados índices de desempenho. Sendo assim, baseado nas relações entre os índices, um índice principal é determinado a fim de representar o desempenho global do observador. E mostrado que o condicionamento do desempenho do observador de estado é caracterizada por 3 índices de performance: (1) o número de condição da matriz do observador em termos da norma  $L_2$ ; (2) o número de condição da matriz modal do observador em termos da norma  $L_1$ ; (3) o produto interno dos autovetores da direita e da esquerda, correspondentes aos pólos dominantes do observador. Os autores determinaram como principal índice de desempenho dos observadores de estado o número de condição da matriz modal do observador em termos da norma  $L_2$ . Além disso, os autores chegaram a duas conclusões com este trabalho:

1. Uma condição de qualidade foi desenvolvida para observador de sistemas, isto é, o índice de desempenho pode ser usado para avaliar, a priori, a qualidade de qualquer



observador linear proposto independente de como ele foi projetado. Esta condição de qualidade suplementa a condição de existência de observabilidade (Luenberger, 1966), a qual somente testa se um observador particular existe ou não e quão bem ele poderia funcionar.

2. A existência deste índice de desempenho providencia a base para metodologias de projeto que podem produzir sistemas de monitoramento de observadores com um garantido nível de performance.

Huh e Stein (1995) demonstraram que o desempenho do observador pode ser representado por um único índice de desempenho e que existe um limite superior, e que esse limite pode ser determinado pela estrutura e pelos autovalores da matriz do observador. Este trabalho apresenta uma metodologia de projeto para observadores bem-condicionados baseada no limite superior do índice de desempenho. A metodologia é baseada no fato que um limite superior garante pequenos valores do índice de desempenho, ou seja, 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 desempenho. Uma forma de matriz bem condicionada é definida e uma estratégia de projeto bloco a bloco para produzir uma matriz bem-condicionada do observador é apresentada. A estratégia de projeto é ilustrada com um exemplo que mostra que o desempenho do observador bem-condicionado proposto é melhor do que a de um observador projetado com técnicas tradicionais de alocação de pólos.

Elmas e De La Parra (1996) desenvolveram um algoritmo baseado na teoria do observador estendido de Luenberger de ordem completa, que estima todos os estados eletromagnéticos e eletromecânicos. Estes incluem não-linearidades de planta que naturalmente





conduzem a um estimador com desempenho melhor do que a de outros esquemas de estimador existentes. Este trabalho investiga o uso da teoria do observador para eliminar os problemas de ter que medir a posição do rotor de um motor elétrico. Para este propósito, foram desenvolvidos algoritmos de observador baseados sobre a teoria do observador estendido de Luenberger. Para verificar a eficácia do algoritmo proposto, tanto um estudo teórico quanto uma implementação prática foram realizadas, e os resultados obtidos foram satisfatórios. Os autores demonstraram que a performance do observador de Luenberger de ordem completa exibe melhor desempenho do que o de ordem reduzida, pois o primeiro cobre todos os estados do sistema.

Trinh e Aldeen (1998) desenvolveram um novo observador de ordem reduzida para a estimação de um vetor de estado completo de sistemas dinâmicos lineares de multivariáveis invariante no tempo. Diferente dos métodos tratados na literatura, na qual a ordem dos observadores de ordem reduzida é fixa e igual a  $(n-m)$ , a ordem do observador de estado é igual somente ao número dos autovalores instáveis e/ou dos pobremente amortecidos do sistema. Isto faz do observador proposto muito atrativo para aplicações de sistemas com alta dimensionalidade. Um exemplo numérico é mostrado para ilustrar as propriedades do novo observador e seu método de projeto. Esse sistema é um sistema instável que compreende 10 estados, considerando uma saída e uma entrada. Para este sistema, um observador de estado de 1ª ordem é proposto. É mostrado que, apesar do fato do observador de estado ser somente de 1ª ordem, ele sempre conduz a uma estimação adequada dos estados do sistema, indiferentemente das condições iniciais do sistema e do observador. Os autores demonstraram por simulações computacionais que o desempenho do observador de estado de ordem reduzida proposto é comparável ao observador de Luenberger de ordem completa.



Park, Shin e Chung (2001) desenvolveram uma estrutura alternativa de estimador de estado para sistemas lineares invariante no tempo chamado de observador dinâmico, para distinguir do observador clássico e que pode ser visto como uma extensão do próprio em sua configuração. Assim como um possível método de projeto para observador dinâmico, um eficiente e plausível algoritmo é também desenvolvido e apresentado. Os autores mostraram os resultados obtidos para um caso específico, no qual os resultados encontrados foram satisfatórios, mas reconheceram a necessidade de se fazer investigações mais rigorosas a fim de averiguar a eficácia do observador dinâmico para várias situações distintas.

### 1.3. JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

Desde que a teoria do observador de estado foi introduzida por Luenberger (1964), observa-se a partir da revisão levantada neste trabalho que muitas metodologias foram propostas para o monitoramento de máquinas utilizando a técnica dos observadores de estado (Ge e Fang, 1987; Elmas e De La Parra, 1996). Porém, a maioria das metodologias utilizando observadores de estado é destinada a resolver problemas de controle e detecção de possíveis falhas em sensores e instrumentos (Clark, 1978; Watanabe e Himmelblau, 1982). Além disso, muitos trabalhos são teóricos, sem nenhuma comprovação experimental das metodologias desenvolvidas (Park, Shin e Chung, 2001; Trinh e Aldeen, 1998; Frank e Seliger, 1991).

Por isso, é proposto neste trabalho o desenvolvimento de uma metodologia para a detecção e localização de falhas em sistemas mecânicos com relação à estrutura do sistema





mecânico, ou seja, com relação à variação dos parâmetros do sistema como rigidez e amortecimento, utilizando a técnica dos observadores de estado.

A idéia principal é montar um banco de observadores para supervisionar o processo, onde cada observador é dedicado somente a um parâmetro físico e/ou a uma variação percentual de um parâmetro físico deste sistema.

Portanto, a fim de verificar a eficácia e a validade da metodologia desenvolvida, são realizadas simulações computacionais e análises experimentais em sistemas massa-mola-amortecedor de 3 graus de liberdade.



## CAPÍTULO 2

### FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Atualmente, a utilização de sistemas de controle automático se encontra bastante difundida, desempenhando um papel vital no avanço da engenharia e da ciência. Com uma grande importância no desenvolvimento de veículos espaciais, sistemas de guiamento de mísseis, sistemas robóticos e similares, os sistemas de controle tornaram-se uma parte importante e integrante de processos industriais e de manufatura modernos.

Segundo Ogata (1998), os sistemas de controle constituem um componente integrante de toda a sociedade industrial e são necessários para a produção dos bens requeridos por uma população mundial em expansão. Por exemplo, o sistema de controle é essencial no comando numérico de máquinas-ferramentas das indústrias manufatureiras, no projeto de sistemas de pilotagem automática da indústria aeroespacial, e no projeto de automóveis e caminhões da indústria automobilística. É ainda essencial nas operações industriais tais como: controle de pressão, temperatura, umidade, viscosidade e vazão nas indústrias de processo.

E de acordo com a literatura (D'Azzo e Houpis, 1988 e Ogata, 1998), foi de James Watt o primeiro trabalho significativo utilizando sistema de controle. Watt construiu no século XVIII, um controlador centrífugo para o controle de velocidade de uma máquina a vapor. Outros trabalhos importantes nos primeiros estágios de desenvolvimento da teoria do controle se devem a Minorsky, Hazen e Nyquist, dentre outros. Em 1922, Minorsky trabalhou em controladores





automáticos para pilotar navios e mostrou como poderia determinar sua estabilidade a partir da representação do sistema através de equações diferenciais.

A teoria de controle desenvolvida até o final dos anos 50 era classificada como teoria de controle convencional ou clássica, e tratava somente de sistemas com única entrada e uma única saída. Esta teoria tornou-se insuficiente para lidar com sistemas de entradas e saídas múltiplas.

Portanto, a partir de 1960, com a disponibilidade dos computadores digitais, tornou-se possível a análise de sistemas complexos e de multivariáveis, começando o desenvolvimento da moderna teoria de controle baseada nas técnicas de análise e síntese através de variáveis de estado. Esta teoria foi desenvolvida com o objetivo de tratar com a complexidade crescente dos sistemas modernos e atender às rigorosas exigências quanto a peso, exatidão e custos de projetos relativos às aplicações militares, espaciais e industriais.

De acordo com Meirovitch (1990), controle moderno é essencialmente uma aproximação no domínio do tempo, baseada na descrição de espaço de estados do comportamento dos sistemas dinâmicos.

A teoria de controle moderno difere da teoria convencional no sentido de que a primeira é aplicável a sistemas com entradas e saídas múltiplas, lineares ou não lineares, variantes ou invariantes no tempo, enquanto a última é aplicável apenas aos sistemas monovariáveis (uma única entrada e uma única saída), lineares e invariantes no tempo.

## 2.1. SISTEMAS DE CONTROLE

De acordo com Schwarzenbach e Gill (1978), o alvo do estudo do comportamento de um sistema dinâmico é geralmente o de ganhar uma compreensão sobre o sistema, com a visão de controlá-lo, dando valores específicos de certas variáveis importantes para satisfazer uma especificação requerida.

Um sistema que mantém uma relação preestabelecida entre a grandeza de saída e a grandeza de referência, comparando-as e utilizando a diferença como meio de controle, é dito de sistema de controle de retroação ou sistema de controle a malha fechada.

No sistema de controle a malha fechada da Fig.1, o sinal atuante de erro, que é a diferença entre o sinal de entrada e o sinal de retroação, excita o controlador/comparador de modo a reduzir o erro e trazer o valor do sinal de saída para o valor desejado. Segundo Ogata (1998), a expressão controle a malha fechada acarreta sempre o uso da retroação a fim de reduzir o erro do sistema.

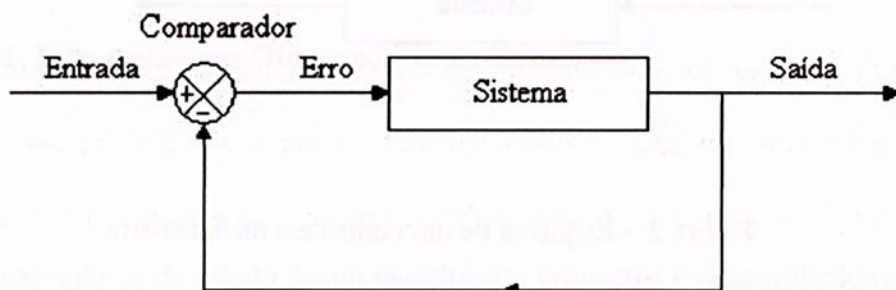


Figura 1 – Esquema de um controle a malha fechada.



Alguns exemplos familiares deste tipo de sistema são os controles termostáticos de fornos domésticos e/ou industriais, controles de nível em cisternas de água e os reguladores de velocidade.

Os sistemas nos quais o sinal de saída não afeta a ação de controle são chamados de sistemas de controle a malha aberta. Neste tipo de sistema de controle não se mede o sinal de saída, nem tampouco, este sinal é enviado de volta para comparação com o sinal de entrada. Todos os sistemas em que as ações de controle são diretamente uma função do tempo constituem um sistema a malha aberta. O controle de tráfego por meio de sinais operados com base no tempo é um exemplo de controle a malha aberta. Outros exemplos familiares são os torradores termostáticos e as máquinas de lavar programáveis.

O sistema de controle a malha aberta, Fig. 2, não é muito satisfatório no sentido de controle, pois qualquer perturbação não esperada no sistema pode causar uma divergência na saída do valor desejado. Mas essa característica é essencial na detecção e localização de falhas em sistemas mecânicos, como será visto mais adiante.

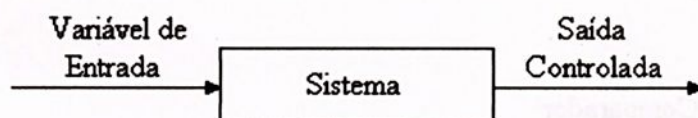


Figura 2 – Esquema de um controle a malha aberta.

Do ponto de vista da estabilidade, é mais fácil construir sistemas de controle a malha aberta porque a estabilidade destes sistemas é menos problemática.

## 2.2. CONCEITO DE ESTADO

O *estado* de um sistema é uma estrutura matemática constituída por um conjunto de  $n$  variáveis  $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$ , chamadas *variáveis de estado*, tal que os valores iniciais  $x_i(t_0)$  deste conjunto e as excitações do sistema  $u_i(t)$  sejam suficientes para descrever univocamente a resposta do sistema para todo  $t \geq t_0$ .

Para sistemas de grande porte, com muitas entradas e saídas, a abordagem através de variáveis de estado pode ser nitidamente mais vantajosa que a dos métodos convencionais, que utilizam-se da função transferência, principalmente com o uso dos computadores na obtenção das soluções. A abordagem através de variáveis de estado é aplicável tanto para sistemas lineares e invariantes no tempo, quanto para sistemas não lineares e variantes no tempo.

## 2.3. OBSERVADORES DE ESTADO

### 2.3.1. Introdução aos Observadores de Estado

Os observadores de estado foram inicialmente propostos e desenvolvidos por Luenberger (1964), que continuou no decorrer dos anos aperfeiçoando a metodologia (Luenberger, 1971). A teoria dos observadores de estado encontra-se dentro da teoria de *Controle Moderno* e tem sido





estendida por vários campos de pesquisas para incluir sistemas variando no tempo, sistemas discretos e sistemas aleatórios.

Desde de 1964 os observadores têm sido apresentados em numerosos projetos de sistemas de controle dos quais uma pequena porcentagem tem sido informada de forma explícita. A simplicidade de seu projeto e de sua resolução faz do observador um componente atrativo do projeto geral, principalmente pelo fato de reconstruir estados não medidos.

Devido à sua utilidade prática, os observadores oferecem uma fascinação teórica bastante interessante. Sua teoria está intimamente relacionada a conceitos fundamentais de controlabilidade, observabilidade e estabilidade, os quais se interagem mutuamente.

De acordo com Luenberger (1966), o projeto de um sistema que produz uma aproximação para o vetor de estado é chamado de *observador* ou *observador de Luenberger*.

O observador é um sistema dinâmico cujas características são determinadas pelo projetista, tendo como entradas, entradas e saídas do sistema real disponíveis, cujo estado aproximado tem um vetor de estado que é linearmente relacionado com a aproximação desejada.

Segundo Luenberger (1964), quase todo sistema é um observador. Diante disto, considera-se inicialmente, por exemplo, o problema de observar um sistema livre, isto é, um sistema  $S_1$  sem nenhuma entrada, conforme mostra a Fig. 3. Caso as saídas do sistema  $S_1$  sejam usadas como entradas para monitorar outro sistema,  $S_2$ , este segundo sistema irá quase sempre servir como um observador do primeiro através de uma transformação linear que relaciona o estado do observador com o estado do sistema original.

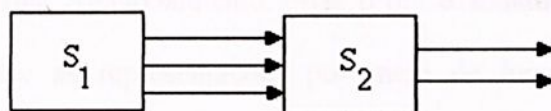


Figura 3 - Um Observador Simples.

Este resultado forma a base da teoria do observador e explica porque existe muita liberdade no projeto de um observador.

Em resumo, a estimação de variáveis de estado não-mensuráveis é comumente chamada de *observação*. Um dispositivo ou um programa de computador que estima ou observa as variáveis de estado é designado um *observador de estado* ou simplesmente um *observador*. Se o observador de estado observa todas as variáveis de estado do sistema, a despeito de algumas delas estarem disponíveis para serem medidas diretamente, é chamado um *observador de estado de ordem plena*. Existem situações onde isto não é necessário, ou seja, o caso quando se necessita observar apenas as variáveis de estado não-mensuráveis, mas não as que estão disponíveis diretamente para medição. Por exemplo, uma vez que com as variáveis de saída disponíveis, o sistema é observável e estas medidas estão linearmente relacionadas com as variáveis de estado, é preciso observar apenas  $(n-m)$  variáveis de estado, na qual  $n$  é a dimensão do vetor de estado e  $m$  a dimensão do vetor de saída.

Um observador que estima um número de variáveis de estado inferior a  $n$ , na qual  $n$  é a dimensão do vetor de estado, é chamado um *observador de estado de ordem reduzida* ou, simplesmente um *observador de ordem reduzida*. Se a ordem do observador de estado de ordem



reduzida é a menor possível, o observador é chamado de *observador de estado de ordem mínima* ou *observador de ordem mínima*.

### 2.3.2. Método dos Observadores de Estado

A maior parte dos projetos de sistemas de controle está baseada na suposição de que o vetor de estado completo está disponível por medição direta, mas na prática, nem todas as variáveis de estado estão disponíveis, necessitando assim estimar as variáveis que não são disponíveis por medição direta. Se caso o sistema for linear, seu vetor de estado pode ser aproximadamente reconstruído, construindo um observador, onde este observador é um sistema linear governado por saídas disponíveis e entradas do sistema original.

Em vários sistemas de controle, é fisicamente e economicamente inviável a instalação de todos os acelerômetros que serão necessários para medir todas as variáveis de estado. Contudo, o projeto de sistemas de controle usando os observadores de estado pode reconstruir os estados não medidos ou os valores provenientes de pontos de difícil acesso no sistema, no entanto, a condição necessária para esta reconstrução é que todos os estados sejam observáveis (Luenberger, 1964; D'Azzo e Houpis, 1988).

### *Controlabilidade e Observabilidade*

Um importante objetivo da teoria de controle moderno, de acordo com D'Azzo e Houpis (1988), é o projeto de sistemas que apresentam um desempenho ótimo. A obtenção de sistemas



de controle linear com desempenho ótimo está subordinada às propriedades de *controlabilidade* e *observabilidade* do sistema. Adicionalmente, estas propriedades estabelecem as condições de equivalência completa entre as representações por meio de funções de transferência e de variáveis de estado.

### **Controlabilidade**

Um sistema é dito completamente controlável se, qualquer que seja o instante inicial  $t_0$ , seja possível transferir todo estado inicial  $\{x(t_0)\}$  para qualquer estado final  $\{x(t)\}$  num tempo finito  $t_F > t_0$  por intermédio de um vetor de excitação  $\{u(t)\}$  não sujeito a restrições (D'Azzo e Houpis, 1988).

Isto requer que:

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

na qual  $[M_c]$  é a matriz de controlabilidade,  $[A]$  é a matriz dinâmica do sistema,  $[B]$  é a matriz de entradas (matriz de distribuição) e  $n$  é a ordem do sistema.

### **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  $t_0 \leq t \leq t_f$  (D'Azzo e Houpis, 1988).



Sendo assim, o sistema é completamente observável se a matriz de observabilidade  $[M_o]$  apresenta a seguinte propriedade:

$$\text{Posto } [M_o] = \text{Posto } \begin{bmatrix} [C_{me}]^T [A]^T [C_{me}]^T [A^T]^2 [C_{me}]^T \dots [A^T]^{n-p} [C_{me}]^T \end{bmatrix} = n \quad (2)$$

na qual  $[M_o]$  é a matriz de observabilidade e  $[C_{me}]$  é a matriz de medidas.

Os conceitos de controlabilidade e observabilidade podem ser ilustrados de acordo com a

Fig. 4.

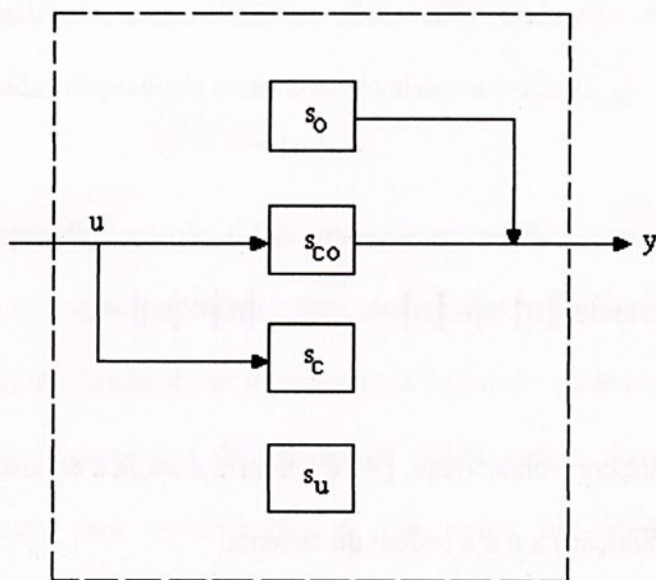


Figura 4 - Quatro divisões possíveis de um sistema.

na qual:  $S_{co}$  = subsistema completamente controlável e completamente observável;

$S_o$  = subsistema completamente observável e não-controlável;

$S_c$  = subsistema completamente controlável e não-observável;

$S_u$  = subsistema não-controlável e não-observável.

## 2.4. ESTRUTURA GERAL DOS OBSERVADORES DE ESTADO PARA SISTEMAS COM VARIAÇÕES DE PARÂMETROS

A partir de Luenberger (1964), o observador de estado foi incorporado no controle de um sistema que não tinha seu vetor de estado completo disponível por medição direta, ou seja, o observador de estado seria o responsável em abastecer o vetor de estado do sistema controlado.

Sendo assim, para um sistema linear e invariante no tempo, considera-se a seguinte representação da variável de estado do sistema para descrição do observador de estado:

$$\{\dot{x}(t)\} = [A]\{x(t)\} + [B]\{u(t)\} \quad (3)$$

e

$$\{y(t)\} = [C_{me}]\{x(t)\} + [D]\{u(t)\} \quad (4)$$

onde  $\{x(t)\}$  é o vetor de estado  $n \times 1$ ,  $\{u(t)\}$  é o vetor de entrada  $p \times 1$  (vetor de excitação),  $\{y(t)\}$  é o vetor de saída  $k \times 1$ ,  $[A]$  é a matriz dinâmica do sistema  $n \times n$ ,  $[B]$  é a matriz de distribuição  $n \times p$ ,  $[C_{me}]$  é a matriz de medidas  $\in R^{k \times n}$ ,  $[D]$  é uma matriz constante  $\in R^{k \times p}$ , sendo  $n$  a ordem do sistema,  $p$  o número de entradas  $\{u(t)\}$ , e  $k$  o número de saídas  $\{y(t)\}$ .

Uma das vantagens desse tipo de representação é que o vetor de estado  $\{x(t)\}$  contém informações suficientes para resumir completamente o comportamento passado do sistema, e o comportamento futuro é governado por uma simples equação diferencial de 1ª ordem.



De acordo com Meirovitch (1990), um observador de estado para o sistema da Eq.(3) é dado da seguinte forma:

$$\dot{\hat{x}}(t) = [A]\{\hat{x}(t)\} + [B]\{u(t)\} + [L](\{y(t)\} - \{\hat{y}(t)\}) \quad (5)$$

e

$$\{\hat{y}(t)\} = [C_{me}]\{\hat{x}(t)\} \quad (6)$$

onde  $[L]$  é a matriz do observador de estado, e de acordo com Wang, Kuo e Hsu (1987), a matriz  $[C_{me}]$  é assumida ser de posto completo, ou seja, o posto dela deve ser igual à ordem do sistema.

Trabalhando com sistemas onde são observadas variações dos parâmetros, têm-se:

$$\dot{\hat{x}}(t) = [A + \Delta A]\{x(t)\} + [B]\{u(t)\} \quad (7)$$

e

$$\{y(t)\} = [C_{me}]\{x(t)\} + [D]\{u(t)\} \quad (8)$$

onde  $[A + \Delta A]$  é a matriz dinâmica do sistema com variação de parâmetros.

Logo, um observador de estado para o sistema da Eq.(7) é dado por:

$$\dot{\hat{x}}(t) = [A + \Delta A]\{\hat{x}(t)\} + [B]\{u(t)\} + [L](\{y(t)\} - \{\hat{y}(t)\}) \quad (9)$$

e

$$\{\hat{y}(t)\} = [C_{me}] \{\hat{x}(t)\} \quad (10)$$

onde  $\{\dot{\hat{x}}(t)\}$  é o vetor de estado estimado pelo observador e  $\{\hat{y}(t)\}$  denota o vetor de saída do observador de estado.

## 2.5. PROJETO DOS OBSERVADORES DE ESTADO

Em um sistema mecânico, quando um determinado componente começa a falhar, um observador de estado montado para este sistema é capaz de sentir a influência desta falha de forma bastante rápida, pois o observador é bastante sensível a qualquer irregularidade que começar a surgir no sistema. O observador de estado é um conjunto de equações diferenciais ordinárias de 1ª ordem que apresenta a mesma resposta do sistema real, partindo do princípio de que este esteja funcionando de maneira adequada.

A idéia é utilizar este efeito sentido pelo observador de estado para detectar e localizar uma possível falha em um sistema mecânico com variações de parâmetros.

A partir desta idéia, o projeto dos observadores de estado é dividido em duas partes:

1. Montagem do Observador Global;
2. Montagem dos observadores robustos aos possíveis parâmetros sujeitos a falhas.



Na primeira etapa, na montagem do observador global utiliza-se a mesma matriz dinâmica do sistema mecânico em questão. Sendo assim, quando o sistema está funcionando adequadamente sem indícios de falhas, o observador global responderá exatamente como o sistema real. Caso contrário, a resposta do observador não será igual, podendo assim detectar uma possível falha ou irregularidade no sistema.

De acordo com Clark (1978) e Melo (1998), este observador também pode ser utilizado para a verificação de possíveis falhas em sensores, após haver descartado a existência de falhas nos parâmetros físicos do sistema através dos observadores robustos.

Na segunda etapa, antes da montagem dos observadores robustos aos possíveis parâmetros do sistema sujeitos a falhas, são retirados de cada observador robusto o parâmetro sujeito à falha ou uma variação percentual de perda deste parâmetro. Desta forma, a resposta do observador robusto que se aproximar da resposta do sistema com indício de falha será o observador responsável pela localização desta possível falha do sistema.

Existe ainda a possibilidade de um ou mais parâmetros falharem ao mesmo tempo. Neste caso, a solução de acordo com Melo (1998) seria a de projetar observadores de estado robustos a todos os parâmetros sujeitos a falhas.

Logo, na Fig. 5, apresenta-se o esquema montado para a detecção e localização de falhas em sistemas mecânicos com variações de parâmetros utilizando a técnica dos observadores de estado. Este sistema de observação é composto por um sistema real, por um vetor força de excitação  $\{u(t)\}$ , por um vetor resposta do sistema  $\{y(t)\}$ , por um banco de observadores, por uma unidade de decisão lógica e um sistema de alarme.



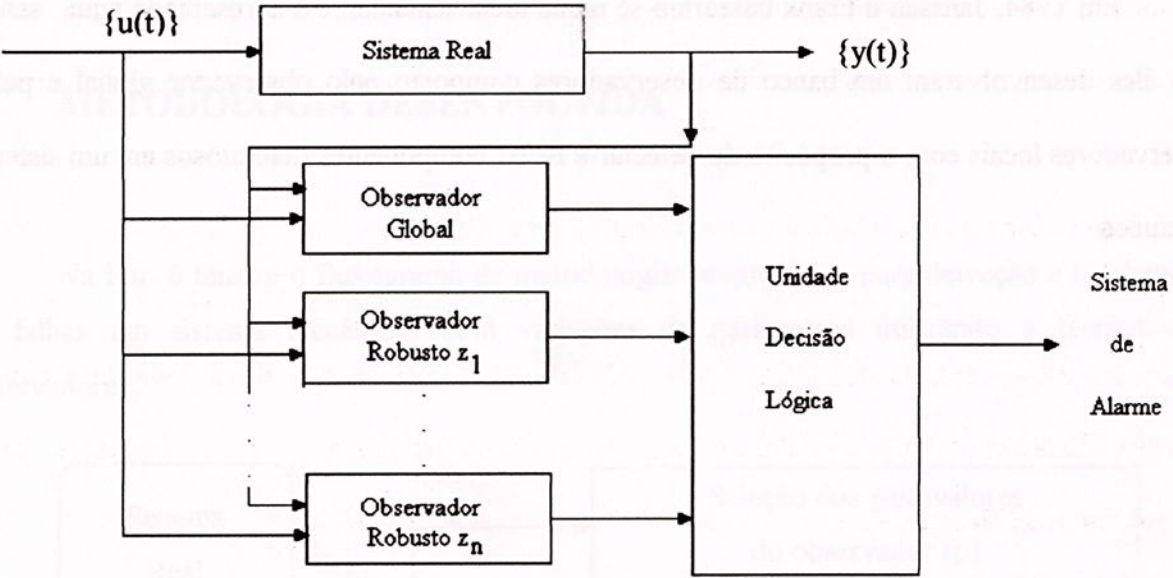


Figura 5 – Sistema de Observação.

Nota-se neste esquema que o banco de observadores é composto pelo observador global e pelos observadores robustos aos possíveis parâmetros sujeitos a falhas  $z_1, \dots, z_n$ , e que tanto o observador global quanto os observadores robustos recebem os valores da excitação e da resposta do sistema real.

Neste mesmo esquema tem-se a unidade de decisão lógica que coleta e analisa a diferença entre a resposta do sistema real e dos observadores de estado montados, a fim de detectar e localizar falhas ou irregularidades no sistema. Esta unidade analisa também a tendência da progressão de possíveis falhas do sistema, e aciona, quando for necessário, um sistema de alarme. Este sistema de alarme pode estar pronto para ser acionado quando ocorrer uma variação percentual em um determinado parâmetro.



Em 1984, Janssen e Frank basearam-se numa idéia semelhante à apresentada aqui, sendo que eles desenvolveram um banco de observadores composto pelo observador global e pelos observadores locais com o propósito de detectar e isolar componentes defeituosos em um sistema mecânico.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA DESENVOLVIDA

Na Fig. 6 tem-se o fluxograma da metodologia desenvolvida para detecção e localização de falhas em sistema mecânicos com variações de parâmetros utilizando a técnica dos observadores.

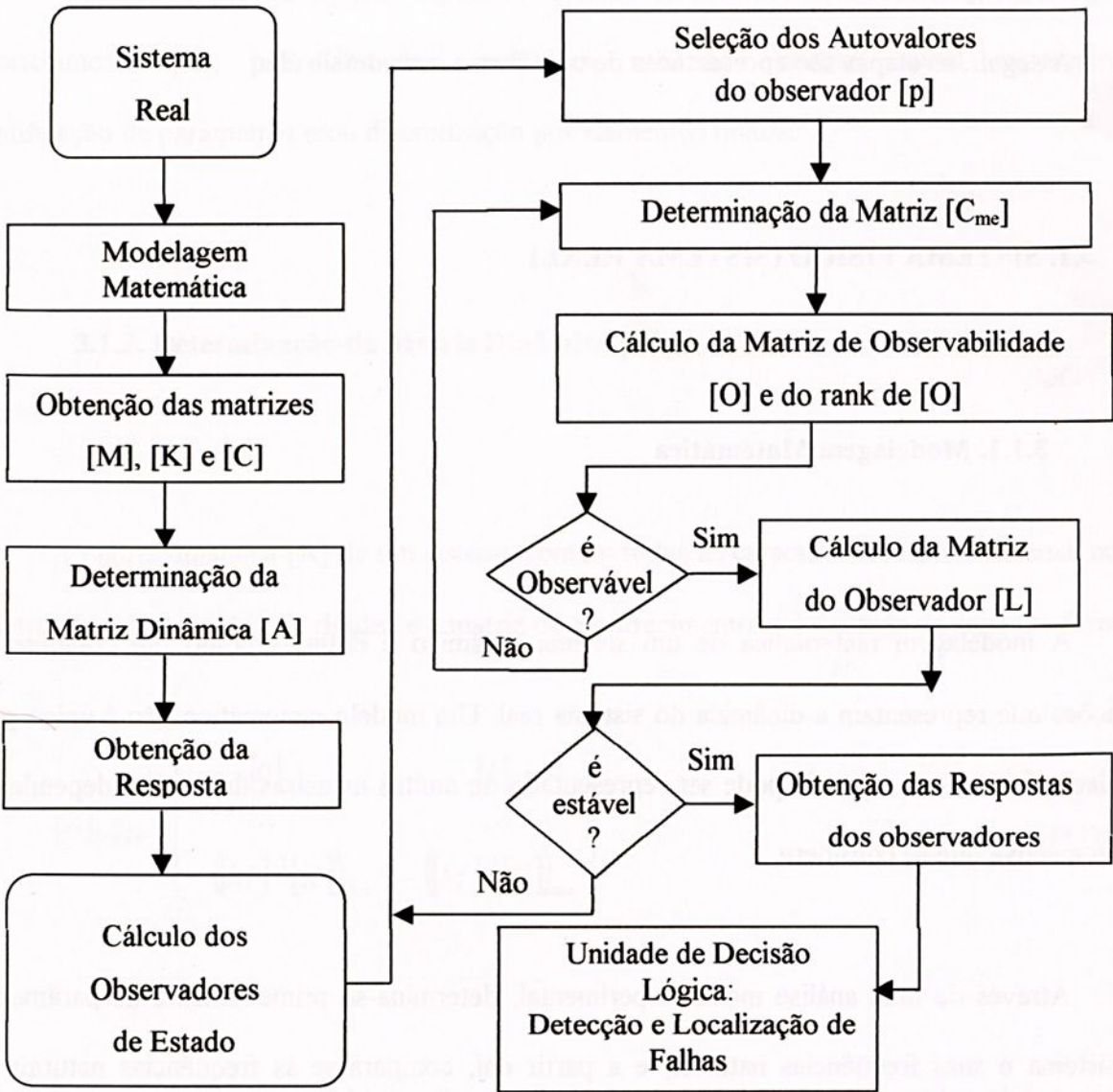


Figura 6 – Fluxograma da metodologia desenvolvida para detecção e localização de falhas.



As etapas deste fluxograma vão desde a modelagem matemática de um sistema mecânico até o cálculo dos observadores de estado utilizados para a detecção e localização de falhas em sistemas mecânicos.

As rotinas computacionais empregadas no desenvolvimento da metodologia apresentada na Fig. 6 foram desenvolvidas utilizando os softwares *Matlab 5.2 for Windows* [20] e *Fortran Powerstation 4.0 for Windows* [21].

A seguir, as etapas são apresentadas de uma forma mais detalhada.

### 3.1. SISTEMA FÍSICO (SISTEMA REAL)

#### 3.1.1. Modelagem Matemática

A modelagem matemática de um sistema dinâmico é definida como um conjunto de equações que representam a dinâmica do sistema real. Um modelo matemático não é único para um dado sistema, ou seja, ele pode ser representado de muitas maneiras diferentes, dependendo da perspectiva que se considere.

Através de uma análise modal experimental, determina-se primeiramente os parâmetros do sistema e suas frequências naturais, e a partir daí, compara-se às frequências naturais do sistema obtidas através dessa análise modal com os valores das frequências obtidas teoricamente a partir dos parâmetros encontrados através da mesma análise modal.

Sendo assim, a primeira etapa é desenvolver um modelo matemático para o sistema a ser analisado que seja o mais próximo possível do sistema real.

### 3.1.2. Obtenção das matrizes [M], [K] e [C]

A partir do sistema original é possível deduzir as matrizes de massa [M], rigidez [K] e amortecimento [C], por vibrações mecânicas, utilizando análise modal experimental, identificação de parâmetros e/ou discretização por elementos finitos.

### 3.1.3. Determinação da Matriz Dinâmica [A]

A matriz dinâmica [A] de um sistema contém todas as características deste sistema, como a matriz de massa, matriz de rigidez e a matriz de amortecimento, e é definida da seguinte forma:

$$[A]_{2nx2n} = \begin{bmatrix} [0]_{nxn} & \vdots & [I]_{nxn} \\ \dots & \dots & \dots \\ -([M]^{-1}[K])_{nxn} & \vdots & -([M]^{-1}[C])_{nxn} \end{bmatrix} \quad (11)$$

Esta matriz dinâmica [A] é utilizada tanto para o cálculo do observador global quanto para o cálculo do observador robusto a um determinado parâmetro sujeito a falha.



### 3.1.4. Solução da Equação do Sistema Real

Através de uma rotina computacional desenvolvida utilizando o método numérico de Runge-Kutta de 4ª ordem, é possível realizar simulações dinâmicas de um sistema real resolvendo suas equações de equilíbrio dinâmico, obtendo como resultado a sua resposta no tempo, ou seja, os valores dos deslocamentos  $x_1(t)$ ,  $x_2(t)$ , ...,  $x_n(t)$ .

Nesta etapa, entra-se com os valores nominais das matrizes de massa, rigidez e amortecimento, com o intervalo de tempo de amostragem, com o número de pontos amostrados utilizados para a simulação do sistema, com as condições iniciais as quais o sistema está restrito e com as forças de excitação externas impostas ao sistema.

*Equação do sistema na forma de estado:*

$$\{\dot{x}(t)\} = [A + \Delta A] \{x(t)\} + [B] \{u(t)\} \quad (12)$$

### 3.1.5. Determinação dos autovalores de [A]

Nesta etapa, obtém-se os autovalores da matriz dinâmica [A] do sistema em questão. Todos os autovalores devem ter sua parte real negativa, pois no desenvolvimento dos observadores de estado, os autovalores são adotados de maneira que apresentem a parte real negativa e à esquerda dos autovalores de [A] para garantir a estabilidade e a rápida convergência do processo.



### 3.2. CÁLCULO DOS OBSERVADORES DE ESTADO

A partir desta etapa, aborda-se os cálculos dos observadores de estado global e robustos aos parâmetros sujeitos a falhas.

#### 3.2.1. Seleção dos autovalores do Observador

Segundo Luenberger (1971), os autovalores do observador são selecionados para serem negativos, de modo que o estado do observador convergirá para o estado do sistema observado. Os autovalores do observador são escolhidos um pouco mais negativos do que os autovalores do sistema observado de modo que a convergência seja mais rápida do que outros efeitos do sistema, pois se os autovalores fossem escolhidos aleatoriamente e com valores elevados, isto poderia resultar em problemas de ordem numérica na resolução do sistema de equações diferenciais.

O problema geral de selecionar bons autovalores ainda não está completamente resolvido, mas esse tipo de prática adotada apresenta bons resultados (Luenberger, 1971; Melo, 1998).

$$p = [\text{autovalores do observador}]$$





### 3.2.2. Definição da Matriz de Medidas $[C_{me}]$

Considerando, por exemplo, o caso de um sistema massa-mola-amortecedor de 3 graus de liberdade, e medindo somente em  $x_1(t)$ , a matriz de medidas para este caso seria da seguinte forma:

$$[C_{me}] = [ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 ] \quad (13)$$

onde  $x_2(t)$  e  $x_3(t)$  não são mensuráveis.

Neste caso, se o sistema for observável medindo somente em  $x_1(t)$ , não existe a necessidade de realizar outras medidas. Mas caso o sistema não seja observável medindo o sistema somente em  $x_1(t)$ , existe a necessidade de se fazer quantas medidas forem necessárias até que o sistema seja observável.

### 3.2.3. Cálculo da Matriz de Observabilidade

Adotada a matriz de medidas  $[C_{me}]$  no item anterior (4.2.2), calcula-se nesta etapa a matriz de observabilidade dos observadores de estado construídos.

Nesta metodologia desenvolvida, o cálculo desta matriz é feito utilizando a função “obsv” do toolbox de sistemas de controle do software Matlab de acordo com a Eq.(14). E é

através desta função que se pode analisar se o observador de estado construído será observável ou não usando a matriz de medidas adotada.

$$[O] = \text{obsv}([A], [C_{me}]) \quad (14)$$

Obtida a matriz de observabilidade  $[O]$ , calcula-se o *rank* ou *posto* desta matriz. Caso o valor encontrado seja o mesmo valor da ordem da matriz dinâmica  $[A]$ , quer dizer que o sistema é observável utilizando a matriz de medida adotada anteriormente. Sendo assim, pode-se passar para próxima etapa.

Agora, caso o sistema não seja observável usando a matriz de medidas escolhida, volta-se a etapa 4.2.2 e determina-se uma outra matriz de medidas. Considerando o caso de um sistema massa-mola-amortecedor de 3 graus de liberdade, caso o sistema não seja observável medindo somente em  $x_1(t)$ , a solução seria usar a segunda medida  $x_2(t)$ . Sendo assim, a nova matriz de medidas seria da seguinte forma:

$$[C_{me}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

Sendo assim, se o sistema for observável para esta nova matriz de medidas escolhida, Eq.(15), pode-se seguir para a próxima etapa. Caso contrário, volta-se novamente a etapa 4.2.2 e realizam-se os mesmos cálculos até que o sistema seja observável utilizando a matriz de medida adotada. Portanto, verifica-se novamente a existência da necessidade de se usar quantas medidas forem necessárias até que o sistema seja observável.



### 3.2.4. Cálculo da Matriz do Observador [L]

O cálculo da matriz do observador [L] trata da aplicação do método do posicionamento dos autovalores do observador construído no plano complexo a fim de manter a estabilidade e a rápida convergência do processo.

Nesta metodologia, o cálculo desta matriz é feito utilizando a função “place” do toolbox de sistemas de controle do software Matlab de acordo com a Eq.(16).

$$L = \text{place}(A', C_{me}', p') \quad (16)$$

Este comando foi introduzido por Ackermann (Ogata, 1998 e Elmas e De La Parra, 1996) e checa a qualidade da alocação dos autovalores de [L]. Caso essa alocação seja ruim, haverá uma instabilidade no processo, sendo assim, novos autovalores deveriam ser adotados, ou seja, deve-se voltar ao passo 4.2.1 e adotar novos valores para os autovalores do observador e assim continuar novamente os cálculos seguintes. Caso a alocação seja boa, pode-se seguir para a próxima etapa.

### 3.2.5. Solução da Equação do Observador de Estado

Sendo todas as etapas anteriores realizadas, a partir de uma outra rotina computacional desenvolvida utilizando o método numérico de Runge-Kutta de 4ª ordem, pode-se resolver a equação do observador:



$$\{\dot{\hat{x}}(t)\} = [A + \Delta A]\{\hat{x}(t)\} + [B]\{u(t)\} + [L](\{y(t)\} - \{\hat{y}(t)\}) \quad (17)$$

A solução desta equação fornece como resultado a resposta do observador tanto global quanto robusto no tempo, ou seja, os valores dos deslocamentos  $\hat{x}_1(t)$ ,  $\hat{x}_2(t)$ , ...,  $\hat{x}_n(t)$  dos observadores montados.

### 3.2.6. Unidade de decisão lógica

Nesta última etapa, através de uma outra rotina computacional desenvolvida, verifica-se a diferença entre os valores RMS do deslocamento do sistema (simulado) e dos observadores (global e robustos a parâmetros sujeitos a falhas), a fim de detectar e localizar a(s) falha(s) do sistema mecânico em questão.

Portanto, foram descritas aqui as etapas utilizadas na metodologia desenvolvida para detecção e localização de falhas em sistemas mecânicos com variações de parâmetros utilizando a técnica dos observadores de estado.





## CAPÍTULO 4

### **SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E RESULTADOS**

Devido ao grande avanço tecnológico, a simulação computacional vem sendo bastante utilizada para prever o comportamento dinâmico de máquinas em operação. Em projetos de sistemas mecânicos é importante realizar uma detalhada análise estabelecendo um modelo matemático e realizando um estudo do seu comportamento dinâmico.

Neste capítulo, são apresentadas simulações computacionais realizadas em sistemas massa-mola-amortecedor de 3 graus de liberdade, onde os comportamentos destes sistemas são analisados com e sem perturbações aleatórias. Além disso, é introduzido o conceito dos valores RMS utilizados para analisar a tendência da progressão de possíveis falhas em sistemas mecânicos.

#### **4.1. ANÁLISE PARA UMA EXCITAÇÃO IMPULSIVA**

##### **4.1.1. Desenvolvimento Matemático**

Considera-se o sistema massa-mola-amortecedor de 3 graus de liberdade (3 GDL) da Fig.7 a ser simulado.



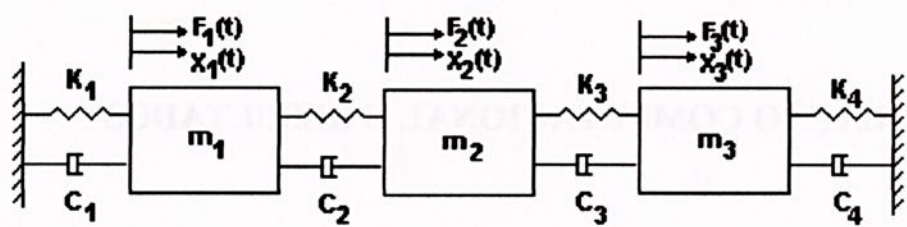


Figura 7 – Sistema massa-mola-amortecedor de 3 GDL.

A tabela 1 fornece os valores numéricos adotados para o sistema analisado.

Tabela 1 - Valores adotados para a simulação do sistema da Fig.(7).

| Rigidez     | Amortecimento | Massa     |
|-------------|---------------|-----------|
| (N/m)       | (N.s/m)       | (Kg)      |
| $k_1 = 600$ | $c_1 = 20$    | $m_1 = 5$ |
| $k_2 = 500$ | $c_2 = 30$    | $m_2 = 5$ |
| $k_3 = 400$ | $c_3 = 40$    | $m_3 = 5$ |
| $k_4 = 400$ | $c_4 = 50$    | -         |

As condições iniciais adotadas de deslocamento e velocidade são as seguintes:

$$\begin{aligned} x_1(0) &= 0,025 \text{ m}, \quad x_2(0) = -0,075 \text{ m}, \quad x_3(0) = 0,000 \text{ m}; \\ \dot{x}_1(0) &= 2,00 \text{ m/s}, \quad \dot{x}_2(0) = -2,00 \text{ m/s}, \quad \dot{x}_3(0) = 0,00 \text{ m/s} \end{aligned}$$

(18)

O intervalo de tempo utilizado para a simulação do sistema foi de 0 a 1 segundo, utilizando-se 1024 pontos amostrados.



Neste caso, os elementos escolhidos com possibilidade de variações ou falhas são os seguintes:  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ,  $c_1$  e  $c_2$ .

As equações de movimento do sistema da Fig. 7 são dadas pela Eq.(19):

$$m_1 \ddot{x}_1(t) + (c_1 + c_2) \dot{x}_1(t) - c_2 \dot{x}_2(t) + (k_1 + k_2)x_1(t) - k_2 x_2(t) = F_1(t)$$

$$m_2 \ddot{x}_2(t) - c_2 \dot{x}_1(t) + (c_2 + c_3) \dot{x}_2(t) - c_3 \dot{x}_3(t) - k_2 x_1(t) + (k_2 + k_3) x_2(t) - k_3 x_3(t) = F_2(t) \quad (19)$$

$$m_3 \ddot{x}_3(t) - c_3 \dot{x}_2(t) + (c_3 + c_4) \dot{x}_3(t) - k_3 x_2(t) + (k_3 + k_4) x_3(t) = F_3(t)$$

As equações de movimento da Eq.(19) assumem a seguinte forma matricial:

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \ddot{x}_1(t) \\ \ddot{x}_2(t) \\ \ddot{x}_3(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (c_1 + c_2) & -c_2 & 0 \\ -c_2 & (c_2 + c_3) & -c_3 \\ 0 & -c_3 & (c_3 + c_4) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{x}_3(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (k_1 + k_2) & -k_2 & 0 \\ -k_2 & (k_2 + k_3) & -k_3 \\ 0 & -k_3 & (k_3 + k_4) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1(t) \\ F_2(t) \\ F_3(t) \end{bmatrix} \quad (20)$$

Qualquer sistema de equações diferenciais de ordem superior pode ser substituído por um sistema de equações diferenciais de primeira ordem equivalente. Sendo assim, da forma matricial anterior, têm-se que:

(21)

na qual têm-se  $N$  sistemas de segunda ordem.

Transformando a Eq.(21) em  $2N$  sistemas de primeira ordem, têm-se para o sistema a seguinte equação em termos de estado:

(22)

na qual:

$[A]$  é a matriz dinâmica do sistema;

$[B]$  é a matriz de entradas:

$\{u(t)\}$  é o vetor de excitação;

$$\{x(t)\} = \{x_1(t), x_2(t), x_3(t), \dot{x}_1(t), \dot{x}_2(t), \dot{x}_3(t)\}^T;$$

$$\{\dot{\mathbf{x}}(t)\} = \{\dot{\mathbf{x}}_1(t), \dot{\mathbf{x}}_2(t), \dot{\mathbf{x}}_3(t), \ddot{\mathbf{x}}_1(t), \ddot{\mathbf{x}}_2(t), \ddot{\mathbf{x}}_3(t)\}^T.$$

A matriz dinâmica do sistema em questão é dada por:

(23)



Para o caso do sistema da Fig. 7, a matriz dinâmica assume a seguinte forma:

$$[A] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \vdots & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \vdots & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \vdots & 0 & 0 & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{-(k_1 + k_2)}{m_1} & \frac{-(-k_2)}{m_1} & \frac{0}{m_1} & \vdots & \frac{-(c_1 + c_2)}{m_1} & \frac{-(-c_2)}{m_1} & \frac{0}{m_1} \\ \frac{-(-k_2)}{m_2} & \frac{-(k_2 + k_3)}{m_2} & \frac{-(-k_3)}{m_2} & \vdots & \frac{-(-c_2)}{m_2} & \frac{-(c_2 + c_3)}{m_2} & \frac{-(-c_3)}{m_2} \\ \frac{0}{m_3} & \frac{-(-k_3)}{m_3} & \frac{-(k_3 + k_4)}{m_3} & \vdots & \frac{0}{m_3} & \frac{-(-c_3)}{m_3} & \frac{-(c_3 + c_4)}{m_3} \end{bmatrix} \quad (24)$$

Neste caso, o vetor de excitação  $\{u(t)\}$  é dado por:

$$\{u(t)\} = \begin{bmatrix} F_1(t) \\ F_2(t) \\ F_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (25)$$

Substituindo os valores numéricos adotados para o sistema em questão na matriz dinâmica (24), e usando-a juntamente com a Eq.(25) na Eq.(22), têm-se que:

$$\begin{Bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{x}_3(t) \\ \ddot{x}_1(t) \\ \ddot{x}_2(t) \\ \ddot{x}_3(t) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \vdots & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \vdots & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \vdots & 0 & 0 & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -220 & 100 & 0 & \vdots & -10 & 6 & 0 \\ 100 & -180 & 80 & \vdots & 6 & -14 & 8 \\ 0 & 80 & -160 & \vdots & 0 & 8 & -180 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{x}_3(t) \end{Bmatrix} \quad (26)$$

Logo, da Eq.(26), têm-se que:

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1(t) &= \dot{x}_1(t) ; \\
 \dot{x}_2(t) &= \dot{x}_2(t) ; \\
 \dot{x}_3(t) &= \dot{x}_3(t) ; \\
 \ddot{x}_1(t) &= -220 x_1(t) + 100 x_2(t) - 10 x_1(t) + 6 x_2(t) ; \\
 \ddot{x}_2(t) &= 100 x_1(t) - 180 x_2(t) + 80 x_3(t) + 6 \dot{x}_1(t) - 14 \dot{x}_2(t) + 18 \dot{x}_3(t) ; \\
 \ddot{x}_3(t) &= 80 x_2(t) - 160 x_3(t) + 8 \dot{x}_2(t) - 18 \dot{x}_3(t) .
 \end{aligned} \tag{27}$$

O sistema de equações da Eq.(27) mostra que foi possível substituir um sistema de equações diferenciais de 2ª ordem por um sistema de equações de 1ª ordem equivalente.

Sendo assim, o observador de estado para o sistema em questão é dado por:

$$\{\dot{\hat{x}}(t)\} = [A] \cdot \{\hat{x}(t)\} + [L] \cdot [\{y(t)\} - [C_{me}] \cdot \{\hat{x}(t)\}] + [B] \cdot \{u(t)\} \tag{28}$$

Devido às condições de excitação externa as quais o sistema (simulado) está sujeito, a Eq.(28) assume a seguinte forma:

$$\{\dot{\hat{x}}(t)\} = [A] \cdot \{\hat{x}(t)\} + [L] \cdot [\{y(t)\} - [C_{me}] \cdot \{\hat{x}(t)\}] \tag{29}$$

Sendo que o vetor de saída  $\{y(t)\}$  do sistema é dado por:

$$\{y(t)\} = [C_{me}] \cdot \{x(t)\} \tag{30}$$



Substituindo (30) em (29) e rearranjando (29), têm-se:

$$\{\dot{\hat{x}}(t)\} = ([A] - [L].[C_{me}]) \cdot \{\hat{x}(t)\} + [L].[C_{me}] \cdot \{x(t)\} \quad (31)$$

na qual  $[A]$  é a matriz dinâmica do sistema,  $[L]$  é a matriz do observador,  $[C_{me}]$  é a matriz de medidas e  $\{x(t)\}$  é o vetor de estado do sistema, sendo

$$\{\dot{\hat{x}}(t)\} = \begin{Bmatrix} \dot{\hat{x}}_1(t) \\ \dot{\hat{x}}_2(t) \\ \dot{\hat{x}}_3(t) \\ \ddot{\hat{x}}_1(t) \\ \ddot{\hat{x}}_2(t) \\ \ddot{\hat{x}}_3(t) \end{Bmatrix}, \quad \{\hat{x}(t)\} = \begin{Bmatrix} \hat{x}_1(t) \\ \hat{x}_2(t) \\ \hat{x}_3(t) \\ \dot{\hat{x}}_1(t) \\ \dot{\hat{x}}_2(t) \\ \dot{\hat{x}}_3(t) \end{Bmatrix} \text{ e } \{x(t)\} = \begin{Bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{x}_3(t) \end{Bmatrix}.$$

Na Fig. 7, considerado medido somente  $x_1(t)$ , a matriz de medidas  $[C_{me}]$  é dada por:

$$[C_{me}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (32)$$

com  $x_2(t)$  e  $x_3(t)$  não mensuráveis.

Portanto, a partir deste desenvolvimento matemático descrito, aplica-se os procedimentos descritos na metodologia desenvolvida com o objetivo de construir um banco de observadores para a detecção e localização de falhas, onde verifica-se que o sistema (simulado) em questão é observável usando a matriz de medidas adotada na Eq.(32).

#### 4.1.2. Sistema Massa-Mola-Amortecedor com Perturbação Aleatória -

##### Resultados da Simulação

Na Fig. 8 apresenta-se o esquema do sistema de observação montado para a detecção e localização de falhas com perturbação aleatória na resposta do sistema real (simulado).

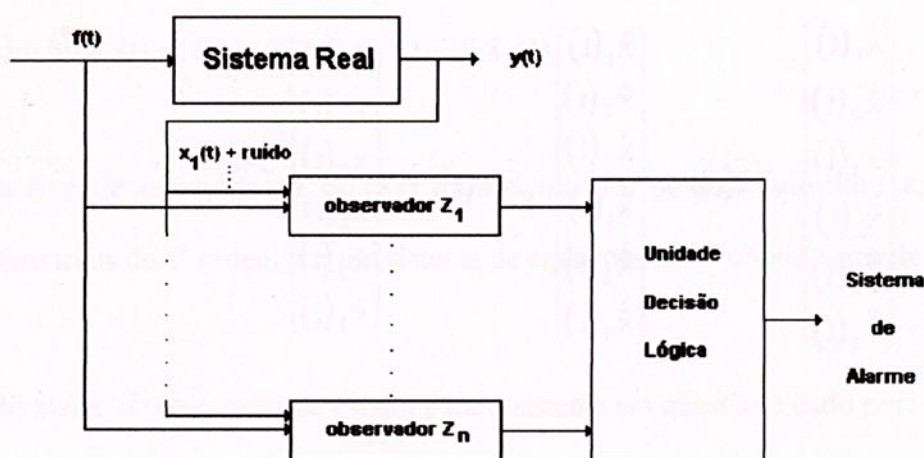


Figura 8 - Esquema do Sistema de Observação .

Considera-se o sistema massa-mola-amortecedor de 3 graus de liberdade da Fig. 7 excitado com condições iniciais de deslocamento e velocidade da Eq.(18), e com uma perturbação aleatória introduzida na resposta do sistema (simulado).

Esta perturbação aleatória foi introduzida na resposta  $x_1(t)$  do sistema, onde primeiramente calculou-se 5% do valor RMS dos valores amostrados (simulados) de  $x_1(t)$ , e posteriormente, multiplicou-se este valor por números randômicos gerados com média igual a



zero e desvio padrão igual a um. Por último, acrescentou-se estes valores obtidos aos valores de  $x_1(t)$  amostrados inicialmente, obtendo assim novos valores de  $x_1(t)$ .

Partindo para os resultados, como já foi comentado anteriormente, a principal função do observador de estado é estimar variáveis de estado não medidas por medição direta, onde neste caso são  $x_2(t)$  e  $x_3(t)$ . Contudo, o observador de estado reconstrói também o estado medido  $x_1(t)$ .

Sendo assim, nesta primeira parte, a qual trata com o caso do sistema da Fig. 7, o intuito é verificar os resultados obtidos com os valores do deslocamento  $x_1(t)$  do sistema e com os valores do deslocamento  $\hat{x}_1(t)$  reconstruídos pelos observadores.

Portanto, na ordenada dos gráficos estão apresentados os valores dos deslocamentos, tanto do sistema (simulado) quanto dos observadores de estado, e nas abscissas o tempo em segundos.

Então, utilizando-se da metodologia desenvolvida, e introduzindo apenas uma perturbação aleatória na resposta  $x_1(t)$  do sistema da Fig. 8, apresenta-se a seguir, na forma de gráficos, os resultados obtidos nas simulações realizadas.

Os resultados foram divididos em duas partes. Na primeira parte, apresenta-se o sistema simulado sem nenhuma falha no sistema, introduzindo apenas uma perturbação aleatória na resposta  $x_1(t)$ . Na segunda parte, introduzindo a mesma perturbação aleatória na resposta  $x_1(t)$  da primeira parte, apresenta-se o sistema (simulado) com uma perda (falha) de 10% do parâmetro  $k_1$ .

#### 4.1.2.1. Sistema real global simulado sem falhas

Nesta primeira parte, antes de apresentar os resultados obtidos, vale a seguinte ressalva: quando se trata de observador robusto a  $k_1$ , entende-se que na montagem desse observador retirou-se 100% do seu valor real da matriz dinâmica do observador. O mesmo ocorre para os outros parâmetros  $k_2$ ,  $k_3$ ,  $c_1$ , e  $c_2$ , sendo que para o caso de perda de 10% de  $k_1$ , quer dizer que na montagem deste observador, retirou-se 10% do valor deste parâmetro na matriz dinâmica do observador. Desta forma, mostra-se na Fig. 9 a resposta do sistema real (simulado) sem nenhuma falha e sem nenhuma perturbação aleatória. E Introduzindo-se uma perturbação aleatória neste sistema, obteve-se a curva da Fig. 10.

A partir da Fig. 11, apresenta-se as curvas do sistema real (simulado) sem falhas e dos observadores de estado montados para a detecção e localização de falhas.

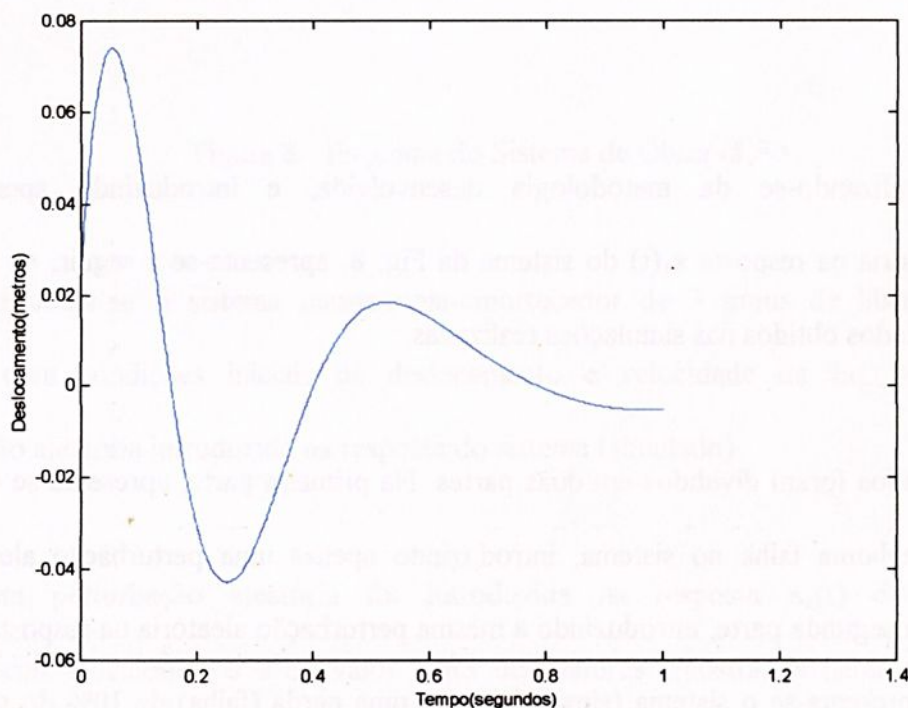


Figura 9 – Sistema Real Global Simulado Sem Falhas e Sem Perturbação Aleatória .



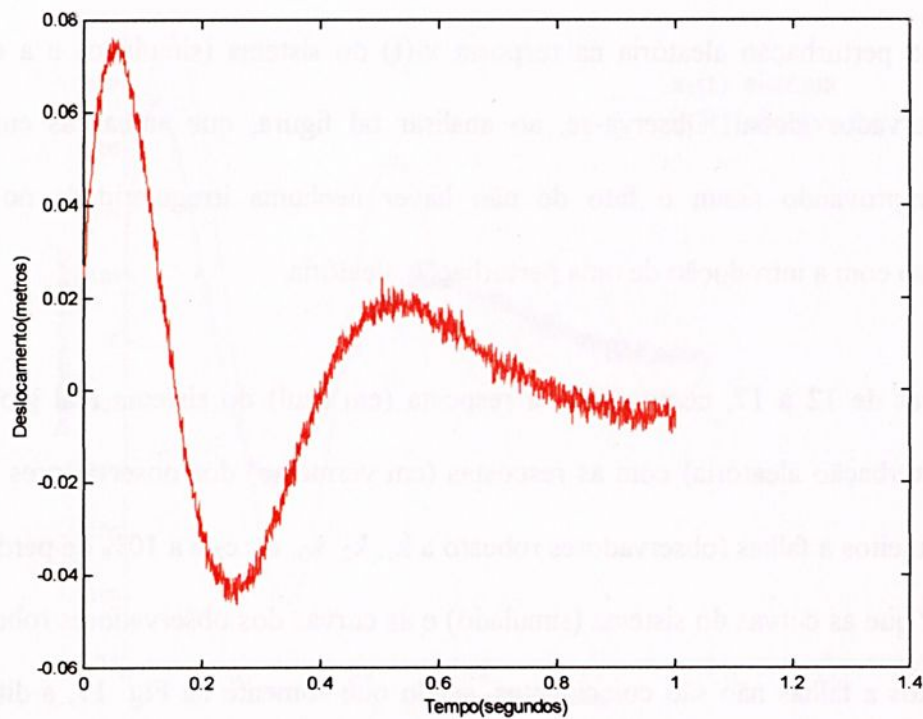


Figura 10 – Sistema Real Global Simulado Sem Falhas e Com Perturbação Aleatória.

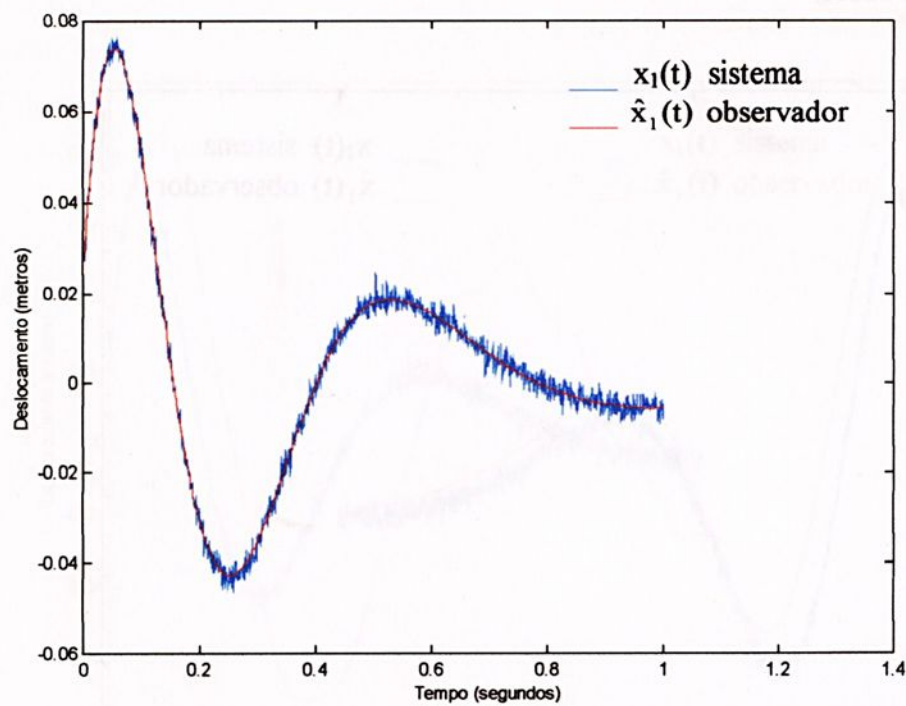


Figura 11 – Sistema Real Global Simulado (Sem Falhas) com Perturbação Aleatória x Observador Global .

Na Fig. 11, mostra-se a curva da resposta do sistema simulado sem falhas quando introduziu-se uma perturbação aleatória na resposta  $x_1(t)$  do sistema (simulado) e a curva da resposta do observador global. Observa-se, ao analisar tal figura, que ambas as curvas são coincidentes, comprovando assim o fato de não haver nenhuma irregularidade no sistema (simulado), mesmo com a introdução de uma perturbação aleatória.

Nas figuras de 12 a 17, comparando a resposta (em azul) do sistema real global (sem falhas e com perturbação aleatória) com as respostas (em vermelho) dos observadores robustos aos parâmetros sujeitos a falhas (observadores robusto a  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ,  $c_1$ ,  $c_2$  e a 10% de perda de  $k_1$ ), pode-se observar que as curvas do sistema (simulado) e as curvas dos observadores robustos aos parâmetros sujeitos a falhas não são coincidentes, sendo que somente na Fig. 17, a diferença é bastante pequena devido ao fato da perda de  $k_1$  ser menor do que na do observador robusto a  $k_1$ , onde a perda é de 100%.

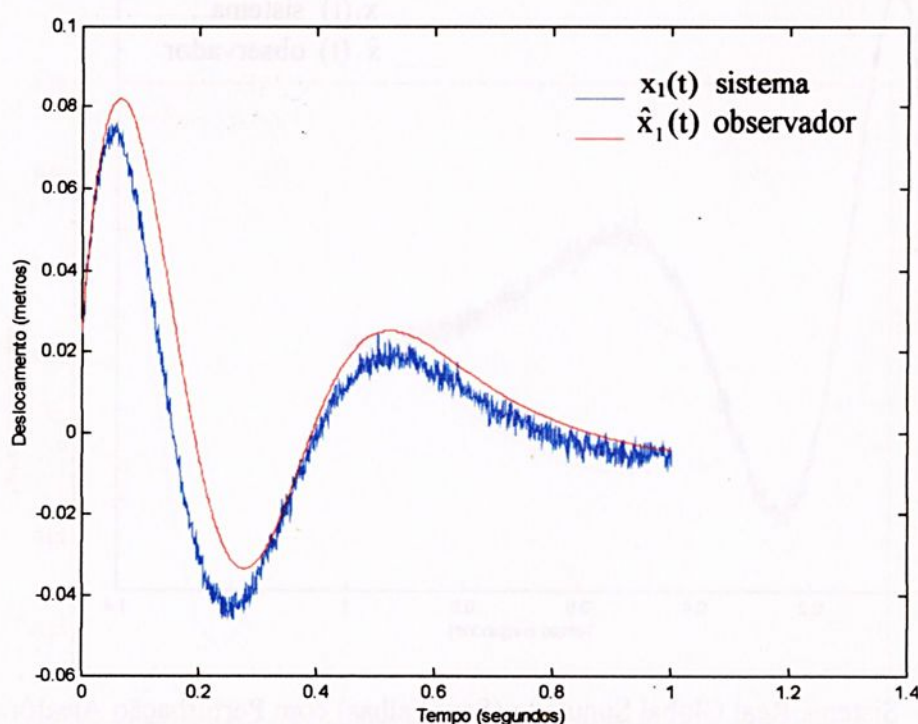


Figura 12 – Sistema Real Global Simulado (Sem Falhas) com Perturbação Aleatória x Observador Robusto a  $k_1$ .



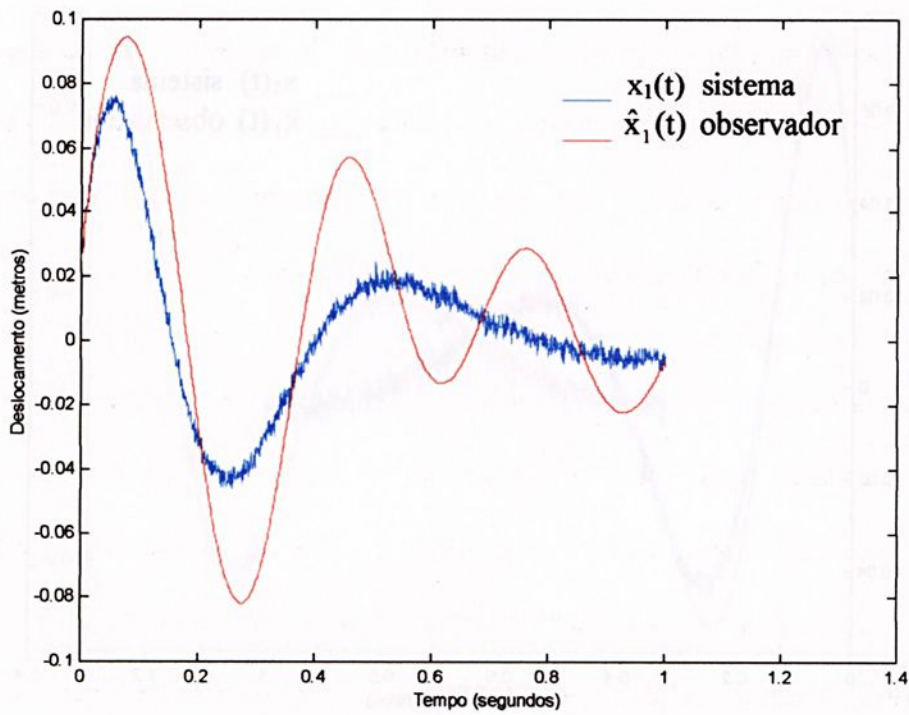


Figura 13 – Sistema Real Global Simulado (Sem Falhas) com Perturbação Aleatória x  
Observador Robusto a  $k_2$ .

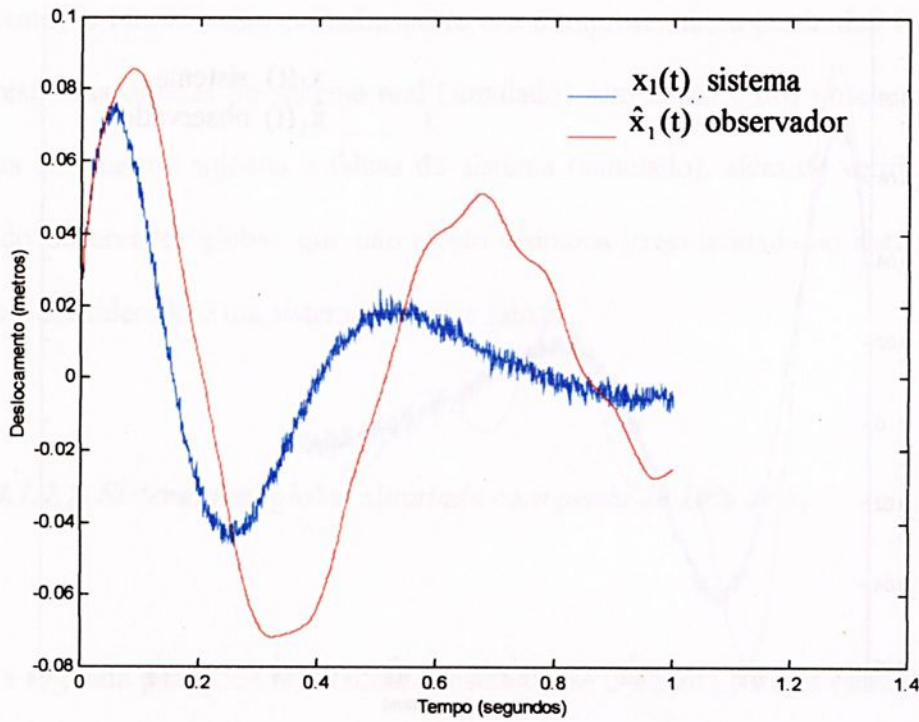


Figura 14 – Sistema Real Global Simulado (Sem Falhas) com Perturbação Aleatória x  
Observador Robusto a  $k_3$ .

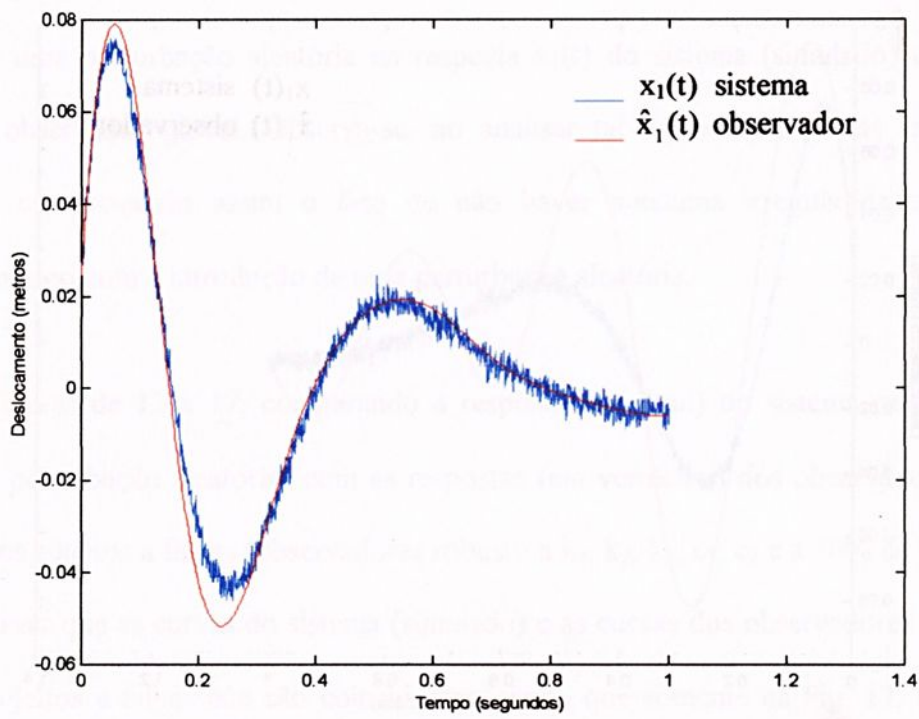


Figura 15 – Sistema Real Global Simulado (Sem Falhas) com Perturbação Aleatória x Observador Robusto a  $c_1$ .

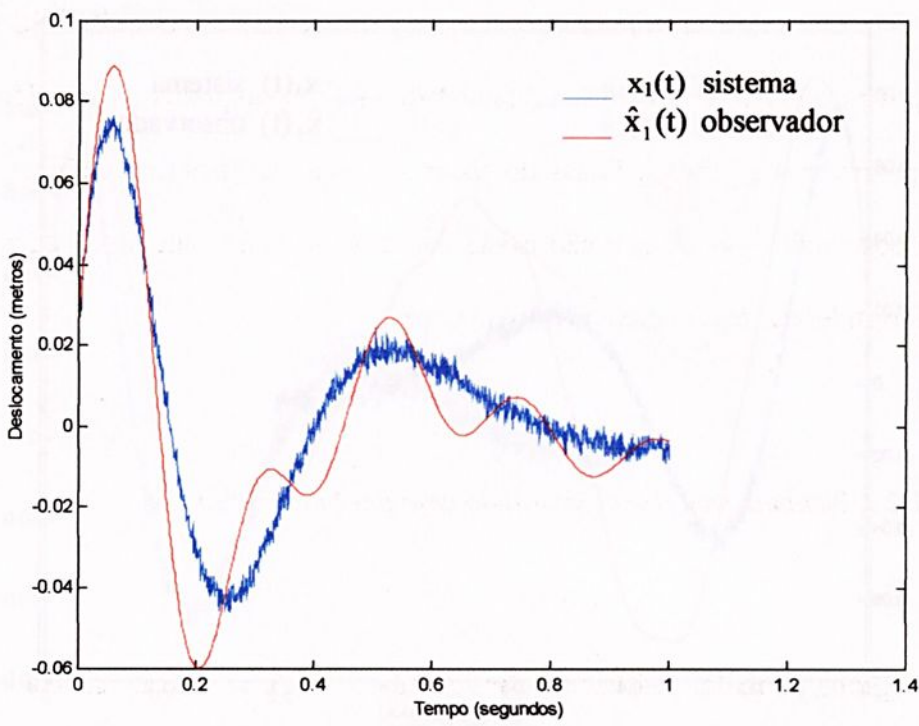


Figura 16 – Sistema Real Global Simulado (Sem Falhas) com Perturbação Aleatória x Observador Robusto a  $c_2$ .



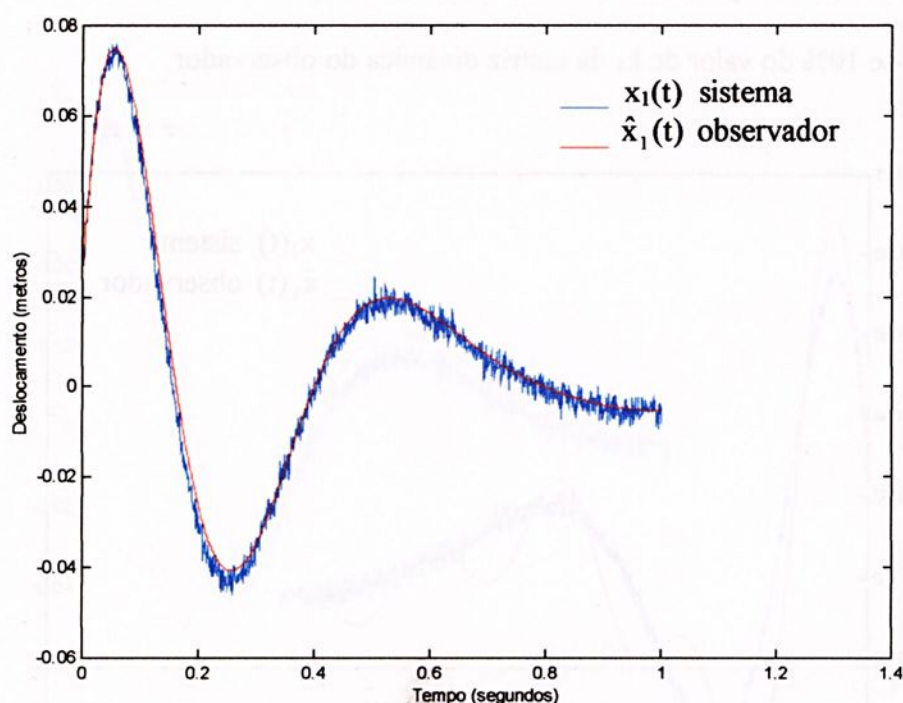


Figura 17 – Sistema Real Global Simulado (Sem Falhas) com Perturbação Aleatória x Observador Robusto a 10% de perda de  $k_1$ .

Portanto, o intuito nesta primeira parte era de apresentar, a partir das Figs. 12 a 17, a forma das respostas obtidas do sistema real (simulado) sem falhas e dos observadores robustos aos possíveis parâmetros sujeitos a falhas do sistema (simulado), além de verificar na Fig. 11, com o uso do observador global, que não existe nenhuma irregularidade no sistema (simulado), pois o sistema considerado é um sistema real sem falhas.

#### 4.1.2.2. Sistema real global simulado com perda de 10% de $k_1$

Nesta segunda parte dos resultados, considerou-se o mesmo sistema (simulado) anterior e o mesmo tipo de perturbação aleatória. Sendo assim, a fim de simular uma possível falha no

sistema, introduziu-se uma perda de 10% do valor real do parâmetro  $k_1$  no sistema (simulado), ou seja, retirou-se 10% do valor de  $k_1$  da matriz dinâmica do observador.

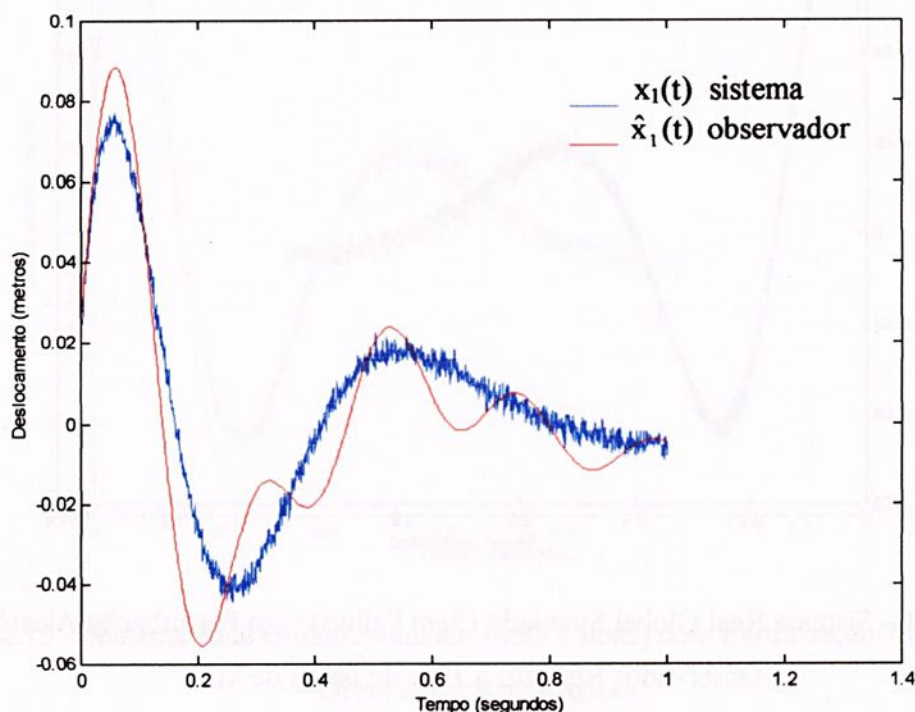


Figura 18 – Sistema Real Simulado com 10% de perda de  $k_1$  - com Perturbação Aleatória x Observador Global.

A Fig.18, mostra a curva da resposta do sistema real global simulado quando retirou-se 10% do valor real do parâmetro  $k_1$  do sistema (curva azul) e a curva da resposta do observador global (curva vermelha). Analisando tal figura, nota-se que as curvas não são mais coincidentes, como na Fig. 11, sendo assim, pode-se dizer que foi possível detectar uma possível falha no sistema, que neste caso foi a perda de 10% do valor de  $k_1$ . E a partir da Fig.19, o objetivo é o de localizar a falha construindo um banco de observadores de estado robustos aos possíveis parâmetros sujeitos a falhas do sistema. Nota-se que nas Figs. 19 a 23 as curvas não foram coincidentes, ou seja, os observadores robustos montados não conseguiram localizar a falha no sistema.



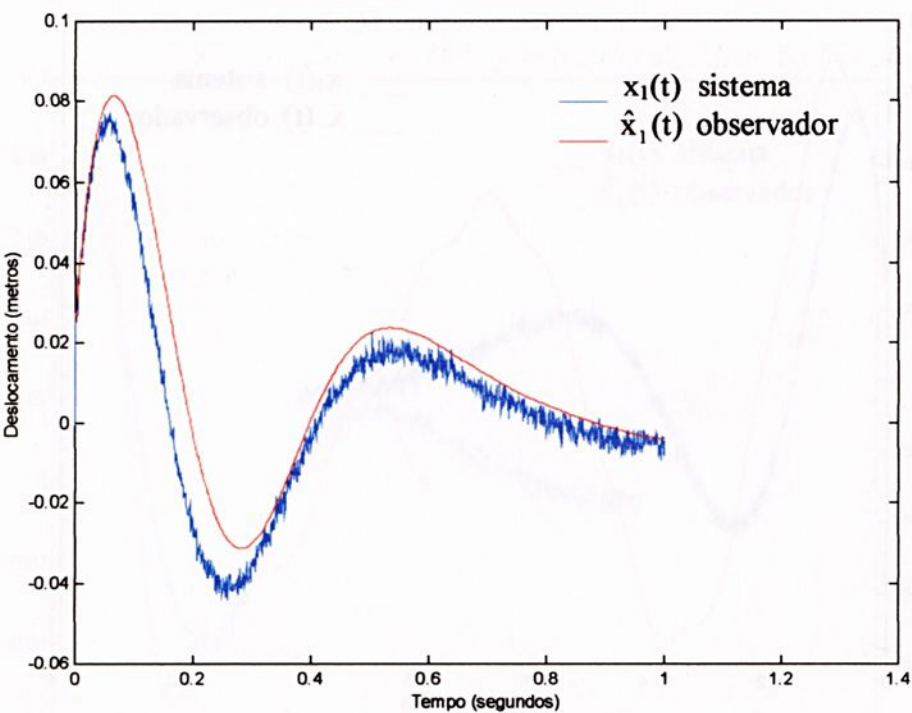


Figura 19 – Sistema Real Simulado com 10% de perda de  $k_1$  - com Perturbação Aleatória x Observador Robusto a  $k_1$ .

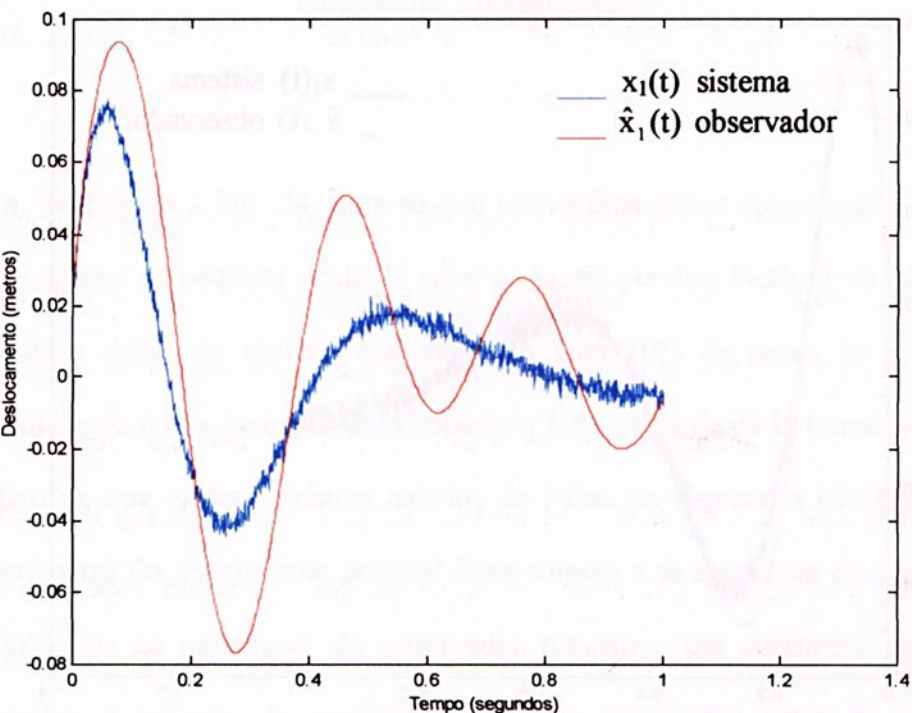


Figura 20 – Sistema Real Simulado com 10% de perda de  $k_1$  - com Perturbação Aleatória x Observador Robusto a  $k_2$ .

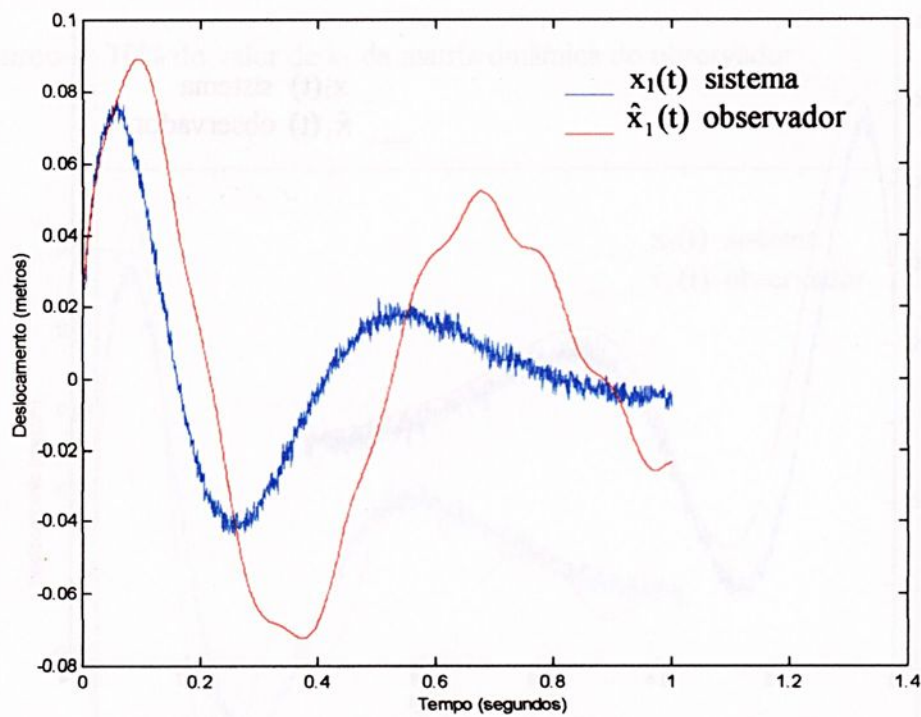


Figura 21 – Sistema Real Simulado com 10% de perda de  $k_1$  - com Perturbação Aleatória x Observador Robusto a  $k_3$ .

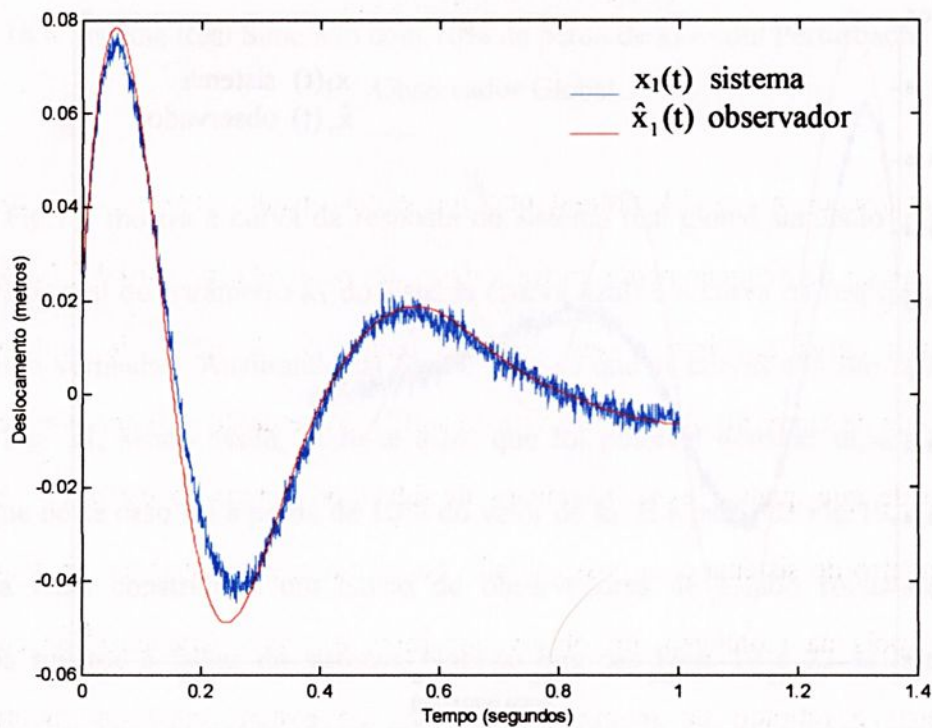


Figura 22 – Sistema Real Simulado com 10% de perda de  $k_1$  - com Perturbação Aleatória x Observador Robusto a  $c_1$ .



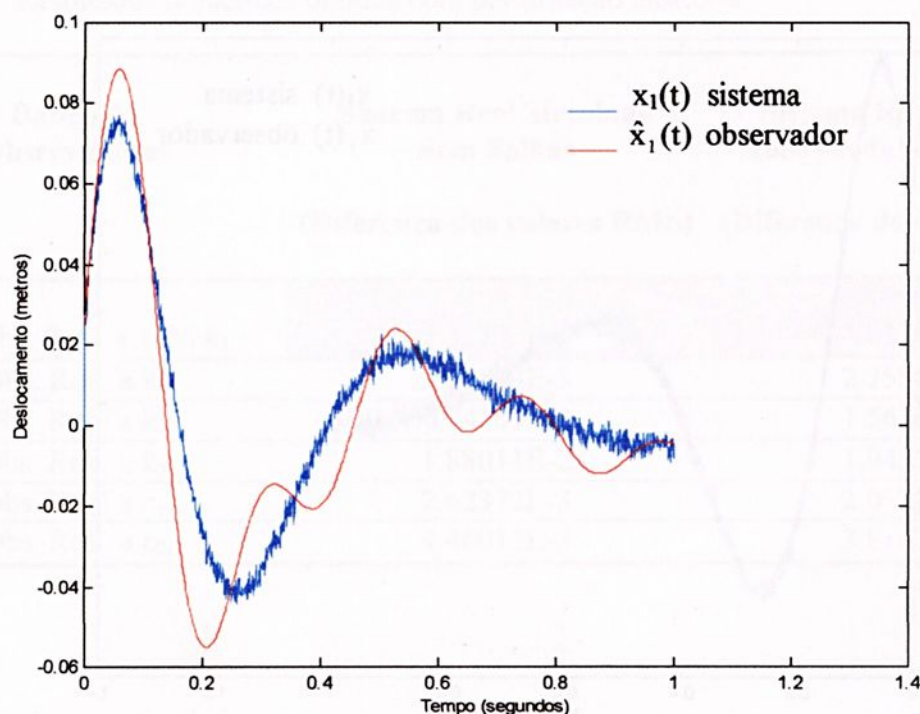


Figura 23 – Sistema Real Simulado com 10% de perda de  $k_1$  - com Perturbação Aleatória x Observador Robusto a  $c_2$  .

Porém, analisando a Fig. 24, nota-se que houve uma maior aproximação entre as duas curvas, ou seja, apesar da pequena perda do valor de  $k_1$ , foi possível localizar tal falha no sistema (simulado), pois a curva do sistema real simulado com 10% de perda de  $k_1$  (curva azul) aproximou bastante da curva do observador robusto a 10% de perda de  $k_1$  (curva vermelha). Isto se deve ao fato de 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 (simulado), pois na montagem do observador robusto a um parâmetro específico, este mesmo parâmetro é retirado da matriz dinâmica do observador antes da montagem do observador.

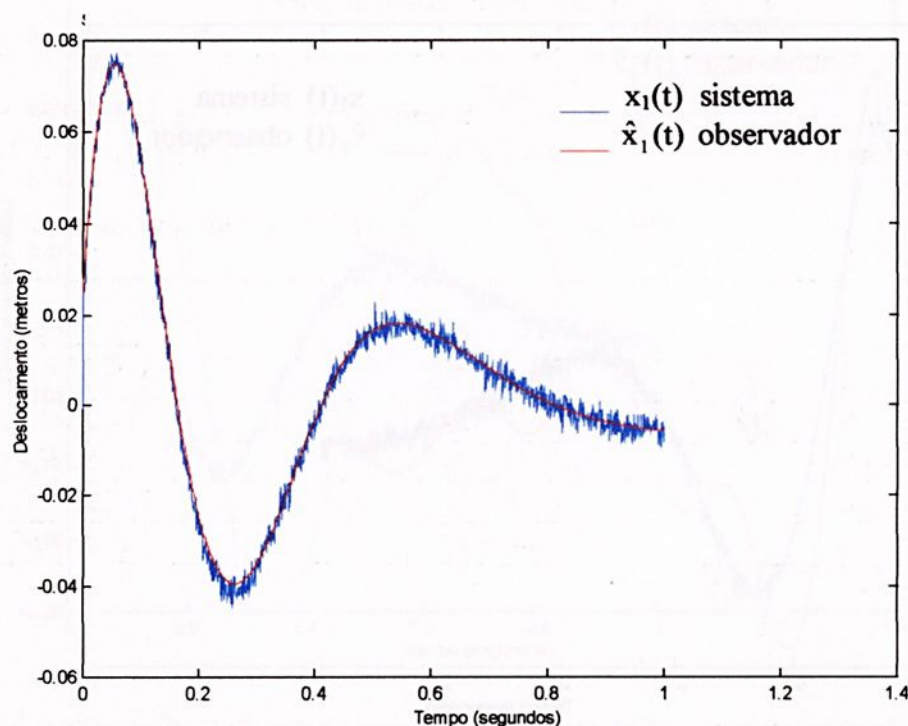


Figura 24 – Sistema Real Simulado com 10% de perda de  $k_1$  - com Perturbação Aleatória  $x$   
Observador Robusto a 10% de perda de  $k_1$ .

Portanto, mesmo introduzindo uma perturbação aleatória na resposta  $x_1(t)$  do sistema simulado, a metodologia desenvolvida conseguiu, através de uma análise “visual”, detectar e localizar uma possível falha no sistema (simulado).

Pode-se dizer que esta análise “visual” obteve bons resultados, mas a fim de realizar uma análise mais concreta, apresenta-se a seguir os resultados numéricos obtidos através de uma análise numérica, onde se calculou o valor RMS da resposta do sistema (simulado), tanto sem falhas quanto com falhas, e da resposta dos observadores robustos construídos, calculando por fim a diferença entre esses valores RMS, que são apresentados na tabela 2.



Tabela 2 – Resultados numéricos obtidos com perturbação aleatória.

| Banco de Observadores | Sistema Real Simulado Sem Falhas | Sistema Real Simulado com perda de 10% de $k_1$ |
|-----------------------|----------------------------------|-------------------------------------------------|
|                       | (Diferença dos valores RMS)      | (Diferença dos valores RMS)                     |
| Obs. Rob. a 10% $k_1$ | 2.33122E-4                       | 4.21165E-5                                      |
| Obs. Rob. a $k_1$     | 3.08704E-3                       | 2.75867E-3                                      |
| Obs. Rob. a $k_2$     | 1.74561E-2                       | 1.56263E-2                                      |
| Obs. Rob. a $k_3$     | 1.88011E-2                       | 1.94572E-2                                      |
| Obs. Rob. a $c_1$     | 2.62372E-3                       | 2.05728E-3                                      |
| Obs. Rob. a $c_2$     | 4.46011E-3                       | 3.81677E-3                                      |

Na 2ª coluna da tabela 2, têm-se a diferença dos valores RMS entre o sistema simulado sem falhas e os observadores robustos aos parâmetros sujeitos a falhas. Nota-se que a diferença é menor (na ordem de  $10^{-4}$ ) para o observador robusto a 10% de perda de  $k_1$  do que para os outros observadores robustos (que estão na ordem de  $10^{-3}$  e  $10^{-2}$ ). Isto se deve ao fato da perda ser menor (10%  $k_1$ ), pois nos outros a perda é de 100% do valor real do parâmetro ( $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ,  $c_1$  e  $c_2$ ).

Considerando a 3ª coluna, a análise é feita com o parâmetro  $k_1$  em falha (10% de perda do valor real do parâmetro  $k_1$ ). Verifica-se, na 1ª linha das colunas da tabela 2, que a diferença dos valores RMS caiu da ordem de  $10^{-4}$  para  $10^{-5}$  (em cinza). Comparando a 2,3,4,5 e 6ª linha da 2ª coluna com a 2,3,4,5 e 6ª linha da 3ª coluna, nota-se que a ordem de grandeza permanece na mesma ordem, sofrendo pequenas alterações, ou seja, somente comparando a 1ª linha da 2ª coluna com a 1ª linha da 3ª é que se nota uma considerável alteração nos valores (da ordem de  $10^{-4}$  para  $10^{-5}$ ).

Sendo assim, pôde-se localizar a falha de 10% de perda de  $k_1$  na 1ª linha da 3ª coluna da tabela 2, ou seja, a falha acarretada pela perda de 10% de  $k_1$  foi localizada na linha do observador construído com 10% de perda do valor real de  $k_1$ . Portanto, através desta análise numérica, pôde-se localizar uma possível falha no sistema utilizando a metodologia desenvolvida.

#### **4.1.3. Tabela de Tendência para um Parâmetro Específico Sujeito à Falha – Sem Perturbação Aleatória**

Existem certas partes de um sistema mecânico que podem ser mais solicitadas do que outras em um processo mecânico, havendo assim a necessidade de haver um acompanhamento muito rigoroso destes componentes em relação a possíveis falhas.

Existem também certos parâmetros do sistema que podem variar durante um processo mecânico devido a características específicas de alguns materiais ou devido ao próprio desgaste natural dos componentes.

Por isso, existe um grande interesse no acompanhamento destes parâmetros, analisando uma possível progressão de falhas ou mesmo a determinação de um percentual de variação dos mesmos, para que um determinado sistema de alarme possa ser acionado durante a operação do sistema.





Conforme já foi visto no esquema do sistema de observação robusta, Fig. 8, os observadores de estado global e robustos aos parâmetros sujeitos a falhas são colocados em um banco de observadores e na unidade de decisão lógica são calculadas as diferenças dos valores RMS entre o sistema real (simulado) e estes observadores. E é nesta unidade de decisão lógica que se analisa a tendência da progressão de uma falha e é ela que aciona, se preciso, um sistema de alarme. Este sistema de alarme pode ser programado para ser acionado quando, por exemplo, ocorrer uma determinada variação percentual em um determinado parâmetro do sistema.

#### *A - Variação do parâmetro $k_1$*

Considerando o sistema da Fig. 7 sujeito às condições iniciais da Eq.(18) impostas sobre ele, supõe-se que o parâmetro  $k_1$  seja mais solicitado do que os outros parâmetros neste processo mecânico. Sendo assim, o objetivo é construir um banco de observadores de estado robustos a determinados valores de perdas de rigidez do parâmetro  $k_1$ , na tentativa de acompanhar a evolução de possíveis falhas construindo tabelas de tendências para este parâmetro específico sujeito a falhas. Neste caso, o sistema de alarme foi programado para ser acionado quando a perda do parâmetro  $k_1$  atingisse 20% de perda de seu valor real.

Nas tabelas de 3 a 6, apresenta-se a diferença obtida entre os valores RMS do sistema (simulado) e dos observadores de estado, considerando o sistema da Fig. 7 sem nenhuma perturbação aleatória na resposta do sistema em questão.





Tabela 3 – Tabela de Tendências – Perda de 0 a 4% da rigidez  $k_1$ .

| Banco de Observadores | Sistema Real Simulado Sem falhas ( $\neq$ RMS ) * | Sistema Real Simulado 2% $k_1$ ( $\neq$ RMS ) | Sistema Real Simulado 4% $k_1$ ( $\neq$ RMS ) |
|-----------------------|---------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Obs.Global            | 4.36942E-5                                        | 7.61694E-5                                    | 1.07637E-4                                    |
| Obs.Rob. 2% $k_1$     | 1.00426E-5                                        | 4.41401E-5                                    | 7.72962E-5                                    |
| Obs.Rob. 4% $k_1$     | 2.58502E-5                                        | 9.80682E-6                                    | 4.45851E-5                                    |
| Obs.Rob. 6% $k_1$     | 6.39650E-5                                        | 2.36727E-5                                    | 1.25353E-5                                    |
| Obs.Rob. 8% $k_1$     | 1.04278E-4                                        | 6.56913E-5                                    | 2.78659E-5                                    |
| Obs.Rob. 10% $k_1$    | 1.46769E-4                                        | 1.06812E-4                                    | 6.75633E-5                                    |
| Obs.Rob. 12% $k_1$    | 1.91414E-4                                        | 1.50151E-4                                    | 1.09545E-4                                    |
| Obs.Rob. 14% $k_1$    | 2.38187E-4                                        | 1.95682E-4                                    | 1.53786E-4                                    |
| Obs.Rob. 16% $k_1$    | 2.87063E-4                                        | 2.43381E-4                                    | 2.00261E-4                                    |
| Obs.Rob. 18% $k_1$    | 3.38017E-4                                        | 2.93220E-4                                    | 2.48945E-4                                    |
| Obs.Rob. 20% $k_1$    | 3.91019E-4                                        | 3.45172E-4                                    | 2.99807E-4                                    |

\* (  $\neq$  RMS ) = diferença dos valores RMS

Tabela 4 – Tabela de Tendências – Perda de 6 a 10% da rigidez  $k_1$ .

| Banco de Observadores | Sistema Real Simulado 6% $k_1$ ( $\neq$ RMS ) | Sistema Real Simulado 8% $k_1$ ( $\neq$ RMS ) | Sistema Real Simulado 10% $k_1$ ( $\neq$ RMS ) |
|-----------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------------|
| Obs.Global            | 1.38073E-4                                    | 1.67449E-4                                    | 1.95735E-4                                     |
| Obs.Rob. 2% $k_1$     | 1.09490E-4                                    | 1.40700E-4                                    | 1.70903E-4                                     |
| Obs.Rob. 4% $k_1$     | 7.84696E-5                                    | 1.11443E-4                                    | 1.43487E-4                                     |
| Obs.Rob. 6% $k_1$     | 4.50299E-5                                    | 8.24346E-5                                    | 1.16101E-4                                     |
| Obs.Rob. 8% $k_1$     | 9.19166E-6                                    | 4.54743E-5                                    | 8.09752E-5                                     |
| Obs.Rob. 10% $k_1$    | 2.90023E-5                                    | 8.80410E-6                                    | 4.59183E-5                                     |
| Obs.Rob. 12% $k_1$    | 6.95931E-5                                    | 3.02934E-5                                    | 8.35719E-6                                     |
| Obs.Rob. 14% $k_1$    | 1.12492E-4                                    | 7.17947E-5                                    | 3.16851E-5                                     |
| Obs.Rob. 16% $k_1$    | 1.57696E-4                                    | 1.15674E-4                                    | 7.41826E-5                                     |
| Obs.Rob. 18% $k_1$    | 2.05178E-4                                    | 1.61905E-4                                    | 1.19110E-4                                     |
| Obs.Rob. 20% $k_1$    | 2.54909E-4                                    | 2.10460E-4                                    | 1.66438E-4                                     |



Tabela 5 – Tabela de Tendências – Perda de 12 a 16% da rigidez  $k_1$ .

| Banco de Observadores | Sistema Real Simulado<br>6% $k_1$<br>( $\neq$ RMS) | Sistema Real Simulado<br>8% $k_1$<br>( $\neq$ RMS) | Sistema Real Simulado<br>10% $k_1$<br>( $\neq$ RMS) |
|-----------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Obs.Global            | 2.22898E-4                                         | 2.48902E-4                                         | 2.73707E-4                                          |
| Obs.Rob. 2% $k_1$     | 2.000729E-4                                        | 2.28177E-4                                         | 2.55187E-4                                          |
| Obs.Rob. 4% $k_1$     | 1.74583E-4                                         | 2.04707E-4                                         | 2.33836E-4                                          |
| Obs.Rob. 6% $k_1$     | 1.46448E-4                                         | 1.78508E-4                                         | 2.09669E-4                                          |
| Obs.Rob. 8% $k_1$     | 1.15686E-4                                         | 1.49599E-4                                         | 1.82703E-4                                          |
| Obs.Rob. 10% $k_1$    | 8.23169E-5                                         | 1.17997E-4                                         | 1.52956E-4                                          |
| Obs.Rob. 12% $k_1$    | 4.63623E-5                                         | 8.37254E-5                                         | 1.20450E-4                                          |
| Obs.Rob. 14% $k_1$    | 7.84544E-6                                         | 4.68055E-5                                         | 8.52064E-5                                          |
| Obs.Rob. 16% $k_1$    | 3.32088E-5                                         | 7.26286E-6                                         | 4.72486E-5                                          |
| Obs.Rob. 18% $k_1$    | 7.67739E-5                                         | 3.48771E-5                                         | 6.60296E-6                                          |
| Obs.Rob. 20% $k_1$    | 1.22822E-4                                         | 7.95865E-5                                         | 3.67028E-5                                          |

Tabela 6 – Tabela de Tendências – Perda de 18 a 20% da rigidez  $k_1$ .

| Banco de Observadores | Sistema Real Simulado<br>18% $k_1$<br>( $\neq$ RMS) | Sistema Real Simulado<br>20% $k_1$<br>( $\neq$ RMS) |
|-----------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Obs.Global            | 2.97267E-4                                          | 3.19531E-4                                          |
| Obs.Rob. 2% $k_1$     | 2.81065E-4                                          | 3.05771E-4                                          |
| Obs.Rob. 4% $k_1$     | 2.61942E-4                                          | 2.88994E-4                                          |
| Obs.Rob. 6% $k_1$     | 2.39911E-4                                          | 2.69213E-4                                          |
| Obs.Rob. 8% $k_1$     | 2.14989E-4                                          | 2.46443E-4                                          |
| Obs.Rob. 10% $k_1$    | 1.87192E-4                                          | 2.20700E-4                                          |
| Obs.Rob. 12% $k_1$    | 1.56542E-4                                          | 1.92004E-4                                          |
| Obs.Rob. 14% $k_1$    | 1.23059E-4                                          | 1.60375E-4                                          |
| Obs.Rob. 16% $k_1$    | 8.67665E-5                                          | 1.25836E-4                                          |
| Obs.Rob. 18% $k_1$    | 4.76908E-5                                          | 8.84132E-5                                          |
| Obs.Rob. 20% $k_1$    | 5.85862E-6                                          | 4.81324E-5                                          |



Nas tabelas de 3 a 6, observa-se que à medida que a porcentagem de perda de  $k_1$  aumenta, a diferença dos valores RMS entre o sistema (simulado) e o observador global também aumenta (1ª linha de todas as colunas das tabelas de 3 a 6 – em cinza escuro). Isto mostra que o observador global é capaz perceber a existência de irregularidades no sistema (simulado), e que medida que a perda de  $k_1$  aumenta, o valor encontrado na linha do observador global também aumenta.

Analisando a tabela 3, verifica-se que a falha no sistema (simulado) é a diminuição percentual da rigidez  $k_1$  de 2 a 4%. Nota-se na 1ª linha da 2ª coluna, que a diferença dos valores RMS é de aproximadamente  $4.36942E-5$ . Considerando a 3ª coluna (sistema real simulado com perda de 2%  $k_1$ ) da tabela 3, percebe-se inicialmente na 1ª linha que o observador global detecta uma irregularidade no sistema (perda de 2% de  $k_1$ ), pois o valor muda de  $4.36942E-5$  para aproximadamente  $7.61695E-5$ . Prosseguindo a análise a partir da 2ª linha da 3ª coluna em busca da localização da falha, observa-se agora os observadores robustos. Numa primeira análise, nota-se que aparece uma região destacada na cor cinza (3 valores em cinza claro e 1 valor em cinza médio), onde existe uma grande possibilidade de estar localizada a falha. Analisando a linha do observador robusto a perda de 2%  $k_1$  (Obs.Rob. 2%  $k_1$ ), observa-se que o valor encontrado é um dos menores (na ordem de  $10^{-5}$ ) da 3ª coluna, indicando que a diferença entre o sistema (simulado) e o observador robusto em questão é muito pequena, existindo assim uma grande possibilidade da falha estar aí. Mas ao analisarmos os observadores robustos a 4, 6 e 8% de  $k_1$ , percebe-se que a mesma coisa acontece, ou seja, a diferença também é pequena, o que não ocorre nos outros observadores (não destacados) onde a ordem de grandeza é da ordem de  $10^{-4}$ .





Então, em uma primeira análise, para o caso da variação de  $k_1$ , não se pode localizar a falha com certeza, mas pode-se encontrar uma região onde provavelmente poderá estar localizada a falha.

Levando em consideração uma segunda forma de análise, pode-se localizar tal falha, ou seja, considerando a 3ª coluna da tabela 3 (sistema real simulado com perda de 2%  $k_1$ ), a análise é feita comparando o valor da 1ª linha da 2ª coluna da tabela 3 (aproximadamente 4.36942E-5) com os valores da 3ª coluna. Verifica-se que o valor que mais se aproximou foi o valor da linha do observador robusto a perda de 2% de  $k_1$  (obs.Rob. 2%  $k_1$  – em cinza médio), sendo este valor um pouco maior, que pode ser explicado pelo fato do sistema (simulado) em questão ter tido uma perda de 2% do valor do parâmetro  $k_1$ .

Portanto, considerando a 3ª coluna da tabela 3 e utilizando-se das duas formas de análise apresentadas, pode-se detectar uma possível falha com o observador global e localizar tal falha com o observador robusto a perda de 2% de  $k_1$  (Obs.Rob. 2%  $k_1$ ).

Analisando o restante das colunas até a tabela 6 e considerando as duas formas de análise, verificou-se que o mesmo fato aconteceu em todas as colunas, ou seja, realizando uma primeira análise, foi possível encontrar uma região onde provavelmente poderia estar localizada a falha, e realizando uma segunda forma de análise, pode-se localizar tal falha, que foi sempre localizada na linha do observador robusto equivalente a perda de  $k_1$  do sistema (simulado) em questão. Por exemplo, na coluna do sistema real simulado com 10% de perda de  $k_1$ , a falha foi localizada na linha do observador robusto a 10% de perda de  $k_1$  (Obs.Rob. 10%  $k_1$ ).



*B - Variação do parâmetro  $k_2$*

Seguindo a mesma linha de raciocínio, considera-se agora que o parâmetro  $k_2$  seja o parâmetro mais solicitado neste mesmo processo mecânico, lembrando-se que o parâmetro  $k_2$  é o parâmetro que se apresenta em maior número na matriz dinâmica do sistema que está sendo simulado. Sendo assim, construiu-se um banco de observadores de estado robustos a determinados valores de perdas de rigidez do parâmetro  $k_2$  na tentativa de acompanhar a evolução de possíveis falhas construindo tabelas de tendências para este parâmetro específico sujeito a falhas.

Nas tabelas 7 a 10, apresenta-se a diferença obtida entre os valores RMS do sistema (simulado) e dos observadores de estado montados, considerando o sistema da Fig. 7 sem nenhuma perturbação aleatória na resposta do sistema em questão.

Tabela 7 – Tabela de Tendências – Perda de 0 a 4% da rigidez  $k_2$ .

| Banco de Observadores | Sistema Real Simulado Sem falhas ( $\neq$ RMS ) | Sistema Real Simulado 2% $k_2$ ( $\neq$ RMS ) | Sistema Real Simulado 4% $k_2$ ( $\neq$ RMS ) |
|-----------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Obs.Global            | 4.36942E-5                                      | 1.90647E-4                                    | 3.36513E-4                                    |
| Obs.Rob. 2% $k_2$     | 1.05036E-4                                      | 4.38180E-5                                    | 1.91786E-4                                    |
| Obs.Rob. 4% $k_2$     | 2.56502E-4                                      | 1.05916E-4                                    | 4.39634E-5                                    |
| Obs.Rob. 6% $k_2$     | 4.10708E-4                                      | 2.58522E-4                                    | 1.06880E-4                                    |
| Obs.Rob. 8% $k_2$     | 5.67745E-4                                      | 4.14054E-4                                    | 2.60761E-4                                    |
| Obs.Rob. 10% $k_2$    | 7.27780E-4                                      | 5.72644E-4                                    | 4.17777E-4                                    |
| Obs.Rob. 12% $k_2$    | 8.91055E-4                                      | 7.32507E-4                                    | 5.78110E-4                                    |
| Obs.Rob. 14% $k_2$    | 1.05788E-3                                      | 8.99924E-4                                    | 7.42012E-4                                    |
| Obs.Rob. 16% $k_2$    | 1.22863E-3                                      | 1.06924E-3                                    | 9.09809E-4                                    |
| Obs.Rob. 18% $k_2$    | 1.49086E-3                                      | 1.31785E-3                                    | 1.14487E-3                                    |
| Obs.Rob. 20% $k_2$    | 1.67825E-3                                      | 1.50375E-3                                    | 1.32928E-3                                    |



Tabela 8 – Tabela de Tendências – Perda de 6 a 10% da rigidez  $k_2$ .

| Banco de Observadores | Sistema Real Simulado<br>6% $k_2$<br>( $\neq$ RMS ) | Sistema Real Simulado<br>8% $k_2$<br>( $\neq$ RMS ) | Sistema Real Simulado<br>10% $k_2$<br>( $\neq$ RMS ) |
|-----------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Obs.Global            | 4.81170E-4                                          | 6.24892E-4                                          | 7.66336E-4                                           |
| Obs.Rob. 2% $k_2$     | 3.38761E-4                                          | 4.84630E-4                                          | 6.29274E-4                                           |
| Obs.Rob. 4% $k_2$     | 1.93043E-4                                          | 3.41224E-4                                          | 4.88402E-4                                           |
| Obs.Rob. 6% $k_2$     | 4.41347E-5                                          | 1.94436E-4                                          | 3.43934E-4                                           |
| Obs.Rob. 8% $k_2$     | 1.07939E-4                                          | 4.43343E-5                                          | 1.95983E-4                                           |
| Obs.Rob. 10% $k_2$    | 2.63324E-4                                          | 1.09105E-4                                          | 4.45654E-5                                           |
| Obs.Rob. 12% $k_2$    | 4.21919E-4                                          | 2.65993E-4                                          | 1.10389E-4                                           |
| Obs.Rob. 14% $k_2$    | 5.84194E-4                                          | 4.26520E-4                                          | 2.69039E-4                                           |
| Obs.Rob. 16% $k_2$    | 7.50363E-4                                          | 5.90952E-4                                          | 4.31619E-4                                           |
| Obs.Rob. 18% $k_2$    | 9.71965E-4                                          | 7.99119E-4                                          | 6.26354E-4                                           |
| Obs.Rob. 20% $k_2$    | 1.15487E-3                                          | 9.80526E-4                                          | 8.06254E-4                                           |

Tabela 9 – Tabela de Tendências – Perda de 12 a 16% da rigidez  $k_2$ .

| Banco de Observadores | Sistema Real Simulado<br>12% $k_2$<br>( $\neq$ RMS ) | Sistema Real Simulado<br>14% $k_2$<br>( $\neq$ RMS ) | Sistema Real Simulado<br>16% $k_2$<br>( $\neq$ RMS ) |
|-----------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Obs.Global            | 9.06572E-4                                           | 1.04504E-3                                           | 1.18160E-3                                           |
| Obs.Rob. 2% $k_2$     | 7.72572E-4                                           | 9.14395E-4                                           | 1.05460E-3                                           |
| Obs.Rob. 4% $k_2$     | 6.34473E-4                                           | 7.79322E-4                                           | 9.22836E-4                                           |
| Obs.Rob. 6% $k_2$     | 4.92537E-4                                           | 6.40147E-4                                           | 7.86667E-4                                           |
| Obs.Rob. 8% $k_2$     | 3.46926E-4                                           | 4.97082E-4                                           | 6.46365E-4                                           |
| Obs.Rob. 10% $k_2$    | 1.97701E-4                                           | 3.50232E-4                                           | 5.02086E-4                                           |
| Obs.Rob. 12% $k_2$    | 4.48316E-5                                           | 1.99611E-4                                           | 3.53888E-4                                           |
| Obs.Rob. 14% $k_2$    | 1.11804E-4                                           | 4.51351E-5                                           | 2.01729E-4                                           |
| Obs.Rob. 16% $k_2$    | 2.72408E-4                                           | 1.13361E-4                                           | 4.54791E-5                                           |
| Obs.Rob. 18% $k_2$    | 4.53676E-4                                           | 2.81094E-4                                           | 1.08608E-4                                           |
| Obs.Rob. 20% $k_2$    | 6.32069E-4                                           | 4.57979E-4                                           | 2.83987E-4                                           |



Tabela 10 – Tabela de Tendências – Perda de 18 a 20% da rigidez  $k_2$ .

| Banco de Observadores | Sistema Real Simulado<br>18% $k_2$<br>( $\neq$ RMS ) | Sistema Real Simulado<br>20% $k_2$<br>( $\neq$ RMS ) |
|-----------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Obs.Global            | 1.31609E-3                                           | 1.44833E-3                                           |
| Obs.Rob. 2% $k_2$     | 1.19307E-3                                           | 1.32963E-3                                           |
| Obs.Rob. 4% $k_2$     | 1.06489E-3                                           | 1.20536E-3                                           |
| Obs.Rob. 6% $k_2$     | 9.31992E-4                                           | 1.07601E-3                                           |
| Obs.Rob. 8% $k_2$     | 7.94688E-4                                           | 9.41963E-4                                           |
| Obs.Rob. 10% $k_2$    | 6.53191E-4                                           | 8.03471E-4                                           |
| Obs.Rob. 12% $k_2$    | 5.07602E-4                                           | 6.60693E-4                                           |
| Obs.Rob. 14% $k_2$    | 3.57927E-4                                           | 5.13679E-4                                           |
| Obs.Rob. 16% $k_2$    | 2.04073E-4                                           | 3.62381E-4                                           |
| Obs.Rob. 18% $k_2$    | 6.37787E-5                                           | 2.36073E-4                                           |
| Obs.Rob. 20% $k_2$    | 1.10096E-4                                           | 6.36959E-5                                           |

Nas tabelas de 7 a 10, nota-se na 1ª linha de suas colunas que a diferença dos valores RMS entre o sistema (simulado) e o observador global (em cinza escuro) vai aumentando à medida que a porcentagem de perda de  $k_2$  vai aumentando. Isto revela que o observador global percebe a existência de irregularidades no sistema (simulado), que neste caso são causadas pelas perdas percentuais do parâmetro  $k_2$ .

Inicialmente, analisando a 3ª coluna da tabela 7 (sistema real simulado com 2% de perda de  $k_2$ ), percebe-se, comparando a 1ª linha da 2ª coluna com a 1ª linha da 3ª coluna, que a ordem aumenta de  $10^{-5}$  para  $10^{-4}$ . Sendo assim, pode-se concluir que o observador global da 3ª coluna foi capaz de detectar uma possível irregularidade no sistema (simulado), que neste caso seria a perda de 2% do parâmetro  $k_2$ .



Logo, detectada a falha, a próxima etapa será localizar tal falha. Para isto, construiu-se um banco de observadores robustos a perdas percentuais de  $k_2$ .

Sendo assim, em uma primeira análise, comparou-se os valores da 3ª coluna da tabela 7, linha por linha, a partir da 2ª linha. Ao contrário do ocorrido no caso da variação de  $k_1$ , aqui não se encontrou nenhuma região onde poderia estar localizada a falha, mas pode-se localizar de imediato a tal falha na linha do observador robusto a 2% de perda de  $k_2$  (obs.Rob. 2%  $k_2$ ), pois o valor encontrado nesta linha é o menor valor encontrado, enquanto que o resto dos valores estão na ordem de  $10^{-4}$  e  $10^{-3}$ .

Portanto, em uma primeira análise foi possível localizar a falha considerando a 3ª coluna da tabela 7. Analisando agora a 3ª coluna da tabela 7 considerando a segunda forma de análise, verificou-se que o valor 4.38180E-5 da linha do observador robusto a 2% de perda de  $k_2$  (Obs.Rob. 2%  $k_2$ ) da 3ª coluna é o valor que está mais próximo do valor da linha do observador global da 2ª coluna (4.36942E-5), onde a pequena variação encontrada entre eles pode ser explicada pelo fato do parâmetro  $k_2$  ter tido uma perda de 2% de seu valor real.

Sendo assim, pôde-se localizar a falha na 3ª coluna da tabela 7 utilizando tanto a primeira quanto a segunda forma de análise.

Analisando o restante das colunas da tabela 7 até a última coluna da tabela 10, pode-se, utilizando a primeira forma de análise, localizar a falha para todos os casos. E utilizando-se a segunda forma de análise, ou seja, comparando os valores destacados (em cinza claro) de cada coluna com o valor da 1ª linha da 2ª coluna da tabela 7 (em cinza escuro), pode-se verificar que a diferença entre eles aumentou de forma gradativa à medida que a perda de  $k_2$  aumentou,

observando ainda um salto maior nos últimos dois valores destacados da tabela 10 (em cinza claro), que pode ser explicado pelo fato de que as perdas de 18 e 20% de  $k_2$  alteraram de uma forma mais brusca os autovalores do sistema do que as outras perdas.

Portanto, pode-se verificar neste caso, que é possível localizar a falha utilizando tanto a primeira como a segunda forma de análise.

### *C - Variação do parâmetro $c_2$*

Nas tabelas de tendências apresentadas anteriormente, mostrou-se a influência da variação dos parâmetros de rigidez  $k_1$  e  $k_2$  na resposta do sistema (simulado). Considerando agora que o parâmetro mais solicitado seja o parâmetro  $c_2$ , que da mesma forma como o  $k_2$  se apresenta em maior número na matriz dinâmica do sistema que está sendo simulado, observa-se sua influência na resposta do sistema.

Sendo assim, construiu-se um banco de observadores de estado robustos a determinados valores do amortecimento  $c_2$ , na tentativa de acompanhar a evolução de possíveis falhas construindo tabelas de tendências para este parâmetro específico sujeito a falhas.

Nas tabelas 11 e 12, apresenta-se a diferença entre os valores RMS do sistema (simulado) e dos observadores de estado, considerando o sistema da Fig. 7 sem nenhuma perturbação aleatória na resposta do sistema em questão.





Tabela 11 – Tabela de Tendências – Perda de 0 a 8% do amortecimento  $c_2$ .

| Banco de Observadores | Sistema Real Simulado Sem falhas ( $\neq$ RMS ) | Sistema Real Simulado 4% $c_2$ ( $\neq$ RMS ) | Sistema Real Simulado 8% $c_2$ ( $\neq$ RMS ) |
|-----------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Obs.Global            | 4.36942E-5                                      | 2.91183E-4                                    | 5.37355E-4                                    |
| Obs.Rob. 4% $c_2$     | 1.96074E-4                                      | 4.55679E-5                                    | 2.85681E-4                                    |
| Obs.Rob. 8% $c_2$     | 4.23056E-4                                      | 1.86986E-4                                    | 4.73446E-5                                    |
| Obs.Rob. 12% $c_2$    | 6.37294E-4                                      | 4.06505E-4                                    | 1.77661E-4                                    |
| Obs.Rob. 16% $c_2$    | 8.38893E-4                                      | 6.13077E-4                                    | 3.89406E-4                                    |
| Obs.Rob. 20% $c_2$    | 1.02803E-3                                      | 8.068640E-4                                   | 5.88034E-4                                    |

Tabela 12 – Tabela de Tendências – Perda de 12 a 20 % do amortecimento  $c_2$ .

| Banco de Observadores | Sistema Real Simulado 12% $c_2$ ( $\neq$ RMS ) | Sistema Real Simulado 16% $c_2$ ( $\neq$ RMS ) | Sistema Real Simulado 20% $c_2$ ( $\neq$ RMS ) |
|-----------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| Obs.Global            | 7.81985E-4                                     | 1.02483E-3                                     | 1.26564E-3                                     |
| Obs.Rob. 4% $c_2$     | 5.24034E-4                                     | 7.60381E-4                                     | 9.94461E-4                                     |
| Obs.Rob. 8% $c_2$     | 2.79700E-4                                     | 5.09828E-4                                     | 7.37462E-4                                     |
| Obs.Rob. 12% $c_2$    | 4.89963E-5                                     | 2.73209E-4                                     | 4.94705E-4                                     |
| Obs.Rob. 16% $c_2$    | 1.68129E-4                                     | 5.04917E-5                                     | 2.66179E-4                                     |
| Obs.Rob. 20% $c_2$    | 3.71801E-4                                     | 1.58428E-4                                     | 5.18007E-5                                     |

Neste caso, como nos casos apresentados anteriormente, pode-se observar na 1ª linha das colunas das tabelas 11 e 12 (em cinza escuro), que a diferença dos valores RMS entre o sistema (simulado) e o observador global vai aumentando à medida que a porcentagem de perda de  $c_2$  também vai aumentando. E como já foi observado anteriormente, isto mostra que o observador global construído é capaz de perceber a existência de irregularidades no sistema (simulado),

realizando de maneira agradável seu papel para o qual foi construído, ou seja, detectar possíveis falhas no sistema (simulado). Lembrando que neste caso, as perdas percentuais do parâmetro  $c_2$  são as causas das falhas acusadas pelos observadores globais.

Da mesma forma como foi analisado nos itens anteriores, mostra-se nas tabelas 11 e 12, que tanto a primeira forma de análise quanto a segunda, foram capazes de detectarem e localizarem as falhas ocorridas. Isto mostra que tanto para a perda de rigidez quanto para a perda de amortecimento, a metodologia desenvolvida e empregada obteve resultados bastante satisfatórios.

#### ***D – Variação simultânea dos parâmetros $k_2$ e $k_3$***

Existe a possibilidade de um ou mais parâmetros falharem ao mesmo tempo. Neste caso, a solução seria projetar observadores de estado robustos a todos os parâmetros do sistema sujeitos a falhas.

Desta forma, considera-se que os parâmetros  $k_2$  e  $k_3$  da matriz dinâmica do sistema (simulado) variam ao mesmo tempo, e assim pode-se verificar sua influência na resposta do sistema.

Na tabela 13, mostra-se a diferença entre os valores RMS do sistema (simulado) e dos observadores de estado, considerando o sistema da Fig. 7 sem nenhuma perturbação aleatória na resposta do sistema em questão.





Tabela 13 –Tabela de Tendências – Perda das rigidezes  $k_2$  e  $k_3$  simultaneamente.

| Banco de Observadores         | Sistema Real Simulado Sem falhas ( $\neq$ RMS ) | Sistema Real Simulado 5% $k_2$ e 5% $k_3$ ( $\neq$ RMS ) | Sistema Real Simulado 10% $k_2$ e 10% $k_3$ ( $\neq$ RMS ) |
|-------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| Obs.Global                    | 4.36942E-5                                      | 4.58715E-4                                               | 8.54898E-4                                                 |
| Obs.Rob. 5% $k_2$             | 3.33259E-4                                      | 9.82608E-5                                               | 5.12686E-4                                                 |
| Obs.Rob. 10% $k_2$            | 7.27780E-4                                      | 2.79762E-4                                               | 1.52890E-4                                                 |
| Obs.Rob. 15% $k_2$            | 1.14274E-3                                      | 6.78007E-4                                               | 2.26947E-4                                                 |
| Obs.Rob. 5% $k_3$             | 1.41251E-5                                      | 4.10944E-4                                               | 8.17753E-4                                                 |
| Obs.Rob. 10% $k_3$            | 8.16449E-5                                      | 3.54672E-4                                               | 7.73362E-4                                                 |
| Obs.Rob. 15% $k_3$            | 1.58368E-4                                      | 2.90676E-4                                               | 7.22832E-4                                                 |
| Obs.Rob.5% $k_2$ e 5% $k_3$   | 3.94973E-4                                      | 4.64250E-5                                               | 4.71249E-4                                                 |
| Obs.Rob.10% $k_2$ e 10% $k_3$ | 8.73820E-4                                      | 4.05110E-4                                               | 4.92144E-5                                                 |
| Obs.Rob.15% $k_2$ e 15% $k_3$ | 1.40186E-3                                      | 9.04500E-4                                               | 4.19432E-4                                                 |

Na tabela 13, nota-se novamente na 1ª linha das colunas (em cinza escuro), que a diferença dos valores RMS entre o sistema (simulado) e o observador global vai aumentando à medida que a porcentagem de perda simultânea de  $k_2$  e  $k_3$  também vai aumentando, comprovando mais uma vez que o observador global construído é capaz de perceber a existência de irregularidades no sistema (simulado), realizando de maneira satisfatória seu papel para o qual foi construído, ou seja, detectar possíveis falhas no sistema (simulado).

Considerando a 1ª forma de análise e analisando a 3ª coluna da tabela 13, observa-se que apareceram dois valores destacados em cinza claro, um na linha do observador robusto a 5% de perda de  $k_2$  (Obs.Rob. 5%  $k_2$ ) e um na linha do observador robusto a 5% de  $k_2$  e 5% de  $k_3$  (Obs.Rob. 5%  $k_2$  e 5%  $k_3$ ). Isto revela, numa primeira observação, que a influência do parâmetro  $k_2$  é muito relevante neste caso, pois analisando a matriz dinâmica [A] do sistema (simulado), nota-se que o parâmetro  $k_2$  juntamente com o  $k_3$  aparecem em maior número na matriz [A] do que os outros parâmetros de rigidez.



Uma possível explicação para isto ter ocorrido pode ser o fato da medida está sendo realizada somente em  $x_1(t)$ , o que poderia acarretar em uma influência maior de  $k_2$  na resposta do sistema do que, por exemplo, a de  $k_3$ . Mas, examinando os dois números ( $9.82608E-5$  e  $4.64250E-5$ ), verifica-se que o valor da linha do observador robusto a 5%  $k_2$  e 5%  $k_3$  (Obs.Rob. 10%  $k_2$  e 10%  $k_3$ ) possui uma diferença menor do que o valor encontrado na linha do observador robusto a 5%  $k_2$  (Obs.Rob. 5%  $k_2$ ), sendo assim, pode-se dizer que a falha foi localizada na linha do observador robusto a 5%  $k_2$  e 5%  $k_3$ , o que era de se esperar.

Analisando agora a 3ª coluna da tabela 13 utilizando a 2ª forma de análise, pode-se verificar que o valor mais próximo seria o valor da linha do Obs.Rob. 5%  $k_2$  e 5%  $k_3$ , o que também era de se esperar.

Partindo para a última coluna da tabela 13, nota-se primeiramente que o problema ocorrido na 3ª coluna, utilizando a 1ª forma de análise, não ocorreu, levando a crer que para pequenas perdas de  $k_2$  e  $k_3$  (simultaneamente), a influência de  $k_2$  pode levar a algumas dúvidas. Logo, tanto para a 1ª quanto para a 2ª forma de análise, obteve-se êxito, pois ambas puderam detectar e localizar a falha, ou seja, o observador global detectou uma possível irregularidade no sistema (simulado) e o observador robusto a 10%  $k_2$  e 10%  $k_3$  (Obs.Rob. 10%  $k_2$  e 10%  $k_3$ ) localizou a falha.

Sendo assim, a metodologia empregada atingiu os objetivos desejados, e através das tabelas de tendências obtidas, pôde-se observar o comportamento da progressão de possíveis falhas no sistema (simulado).

Embora não seja este caso, existe também a possibilidade dos parâmetros sujeitos a falhas estarem localizados na mesma posição da matriz dinâmica  $[A]$  e ainda de possuírem o





mesmo valor numérico. De acordo com Melo [11], a solução seria trabalhar com uma combinação dos vários componentes do sistema sujeitos a falhas. Por exemplo, considerando que o sistema possui 2 parâmetros sujeitos a falhas ( $q_1$  e  $q_2$ ), e eles estão na mesma posição da matriz dinâmica possuindo o mesmo valor numérico, e na matriz dinâmica existem 3 parâmetros ( $q_1$ ,  $q_2$  e  $q_3$ ), projeta-se observadores de estado para cada parâmetro sujeito à falhas e também para a combinação dos mesmos utilizando o terceiro componente da seguinte forma:  $q_1$ ,  $q_2$ ,  $q_1q_3$  e  $q_2q_3$ .

## 4.2. ANÁLISE PARA UMA EXCITAÇÃO HARMÔNICA

### 4.2.1. Desenvolvimento Matemático

Considera-se o sistema massa-mola-amortecedor de 3 graus de liberdade da Fig. 25 excitado harmonicamente por uma força  $F_2(t)=A_2.\text{sen}(\omega(t))$  de amplitude igual a 5 N e frequência igual a 100 rad/s.

O intervalo de tempo utilizado para a simulação foi de 0 a 2.5 segundos, sendo 1024 o número de pontos amostrados.

Neste caso, os parâmetros considerados sujeitos a falhas são os seguintes:  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ,  $c_1$ ,  $c_2$  e  $c_3$ .



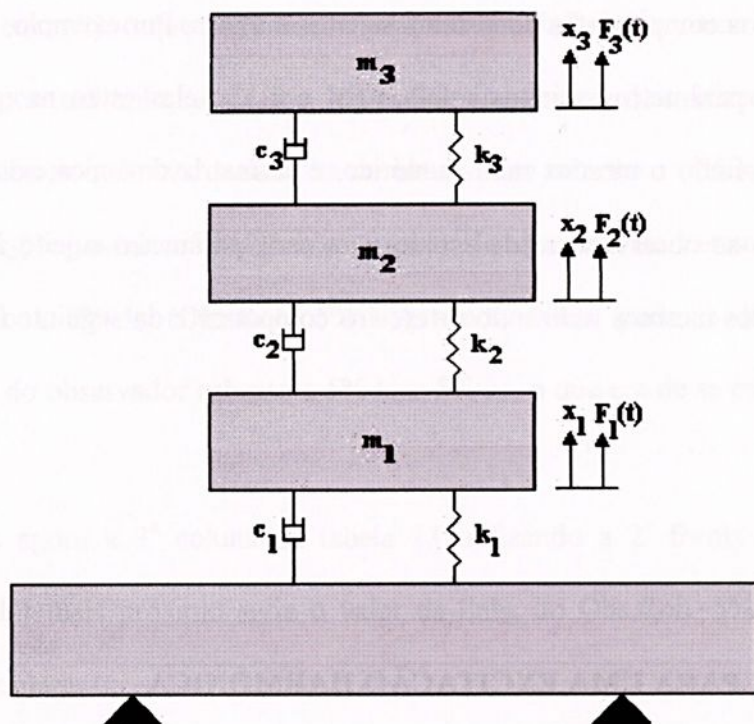


Figura 25 - Sistema Massa-Mola-Amortecedor de 3 GDL.

Nesta análise, o desenvolvimento matemático realizado foi o mesmo da análise anterior, sendo que na Eq.(22) a matriz de entradas  $[B]$  é dada da seguinte forma:

$$[B]_{2N \times N} = \begin{bmatrix} [0]_{N \times N} \\ \vdots \\ [M]_{N \times N}^{-1} \end{bmatrix} \quad (33)$$

Desta forma, a Eq.(22) fica da seguinte forma:

$$\begin{Bmatrix} \{\dot{x}(t)\} \\ \{\ddot{x}(t)\} \end{Bmatrix}_{2N \times 1} - [A]_{2N \times 2N} \cdot \begin{Bmatrix} \{x(t)\} \\ \{\dot{x}(t)\} \end{Bmatrix}_{2N \times 1} = [B]_{2N \times N} \cdot \{u(t)\}_{N \times 1} \quad (34)$$



Para o caso do sistema (simulado) de 3 graus de liberdade da Fig. 25, tem-se que:

$$\begin{Bmatrix} \{\dot{x}(t)\} \\ \{\ddot{x}(t)\} \end{Bmatrix}_{2N \times 1} = \{\dot{x}_1(t), \dot{x}_2(t), \dot{x}_3(t), \ddot{x}_1(t), \ddot{x}_2(t), \ddot{x}_3(t)\}_{6 \times 1}^T \quad (35)$$

e

$$\begin{Bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{Bmatrix}_{2N \times 1} = \{x_1(t), x_2(t), x_3(t), \dot{x}_1(t), \dot{x}_2(t), \dot{x}_3(t)\}_{6 \times 1}^T \quad (36)$$

Da Fig. 25, obtém-se as seguintes matrizes:

$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \quad (37)$$

$$[K] = \begin{bmatrix} (k_1 + k_2) & -k_2 & 0 \\ -k_2 & (k_2 + k_3) & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3 \end{bmatrix} \quad (38)$$

$$[C] = \begin{bmatrix} (c_1 + c_2) & -c_2 & 0 \\ -c_2 & (c_2 + c_3) & -c_3 \\ 0 & -c_3 & c_3 \end{bmatrix} \quad (39)$$

O observador de estado para este sistema em questão é dado também pela Eq.(31), onde considerando o sistema da Fig. 25, medindo somente em  $x_1(t)$ , a matriz de medidas  $[C_{me}]$  é dada pela Eq.(32).

Desta forma, a partir deste desenvolvimento matemático descrito para o sistema da Fig. 25 excitado harmonicamente, aplica-se os procedimentos descritos na metodologia desenvolvida com o objetivo de construir um banco de observadores para a detecção e localização de falhas em sistemas mecânicos com variações de parâmetros, onde verifica-se que o sistema (simulado) em questão é observável usando a matriz de medidas adotada na Eq.(32).

#### 4.2.2. Sistema Massa-Mola-Amortecedor – Sem Perturbação Aleatória

##### Resultados da Simulação

Considerando o desenvolvimento matemático apresentado no item anterior, considerou-se o sistema da Fig. 25 excitado harmonicamente e submetido às condições da tabela 14.

Tabela 14 - Valores adotados para o sistema da Fig. 25.

| <b>Rigidez</b><br><b>(N/m)</b> | <b>Amortecimento</b><br><b>(N.s/m)</b> | <b>Massa</b><br><b>(Kg)</b> | <b>Força</b><br><b>(N)</b> |
|--------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| $k_1 = 47877$                  | $c_1 = 40$                             | $m_1 = 6$                   | $F_1 = 0$                  |
| $k_2 = 54739$                  | $c_2 = 70$                             | $m_2 = 4$                   | $F_2 = 5 \sin(100)$        |
| $k_3 = 61628$                  | $c_3 = 30$                             | $m_3 = 2$                   | $F_3 = 0$                  |

Nos resultados apresentados anteriormente para excitação impulsiva, considerou-se os valores de  $x_1(t)$  tanto do sistema quanto os reconstruídos pelo observador. Para este caso,



considerou-se o sistema da Fig. 25 excitado harmonicamente medindo somente em  $x_1(t)$ , sendo os estados  $x_2(t)$  e  $x_3(t)$  reconstruídos através dos observadores de estado.

Portanto, neste caso, são apresentados na ordenada dos gráficos e nas tabelas os valores de  $x_2(t)$  do sistema (simulado) e os valores de  $\hat{x}_2(t)$  reconstruídos pelos observadores de estado.

Nos gráficos apresentados a seguir, as curvas em azul são as respostas do sistema real simulado com ou sem falhas, e as curvas em vermelho são as respostas dos observadores de estado construídos (global e robustos aos parâmetros sujeitos a falhas).

A Fig. 26 apresenta a resposta do sistema real simulado sem falhas (em azul) e a resposta do observador global (em vermelho). Nota-se que ambas as curvas são coincidentes, ou seja, o observador global não consegue detectar nenhuma falha no sistema (simulado).

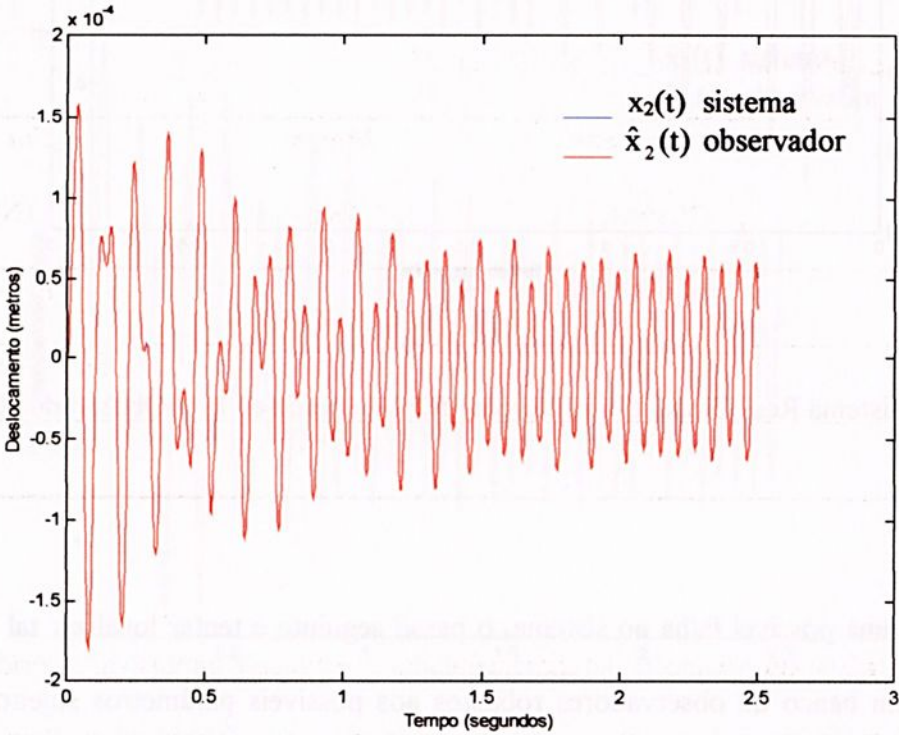


Figura 26 – Sistema Real Global Simulado (Sem Falhas) x Observador Global.

Ao retirar 50% do valor real do parâmetro  $k_1$  do sistema, nota-se na Fig. 27 que as curvas entre o sistema real simulado com 50% de perda de  $k_1$  (em azul) e o observador global (em vermelho) não são coincidentes, ou seja, o observador global consegue detectar uma possível falha no sistema, que nesse caso é conhecida (50% de perda de  $k_1$ ).

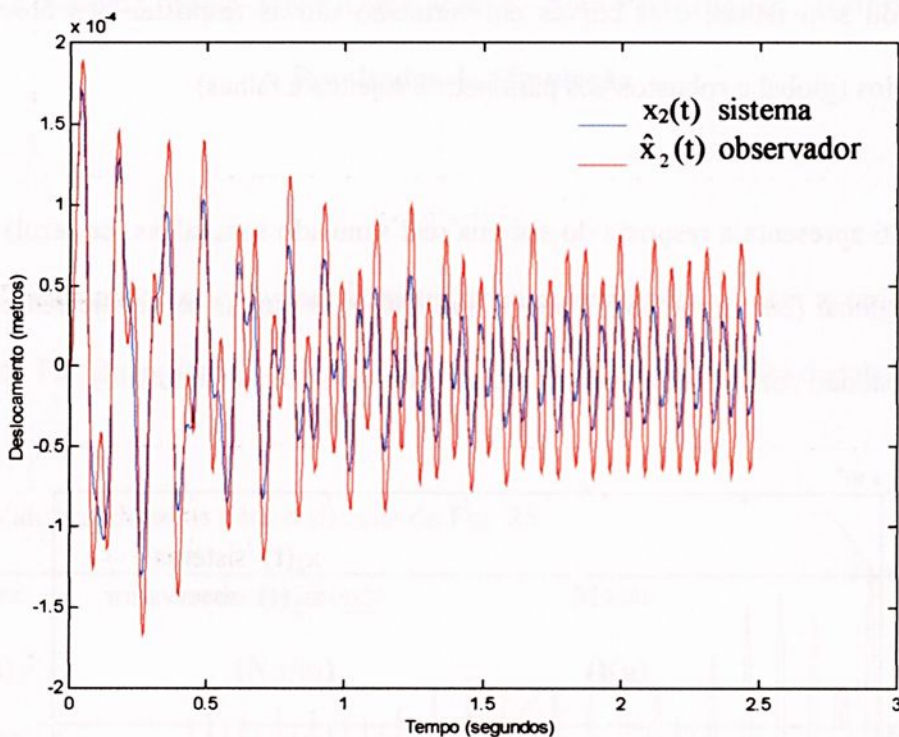


Figura 27 - Sistema Real Global Simulado com 50% de perda de  $k_1$  x Observador Global.

Detectada uma possível falha no sistema, o passo seguinte é tentar localizar tal falha. Para isto, monta-se um banco de observadores robustos aos possíveis parâmetros sujeitos a falhas, conforme mostrado nas Figs. 28 a 33.



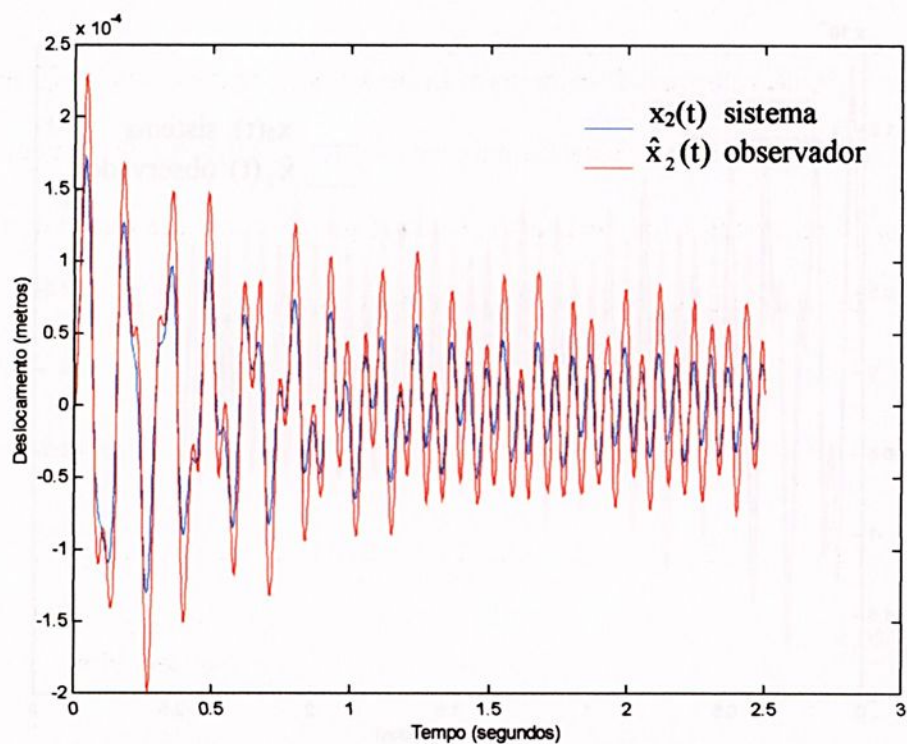


Figura 28 - Sistema Real Global Simulado com 50% de perda de  $k_1$  x Observador Robusto a 50% de perda de  $k_2$ .

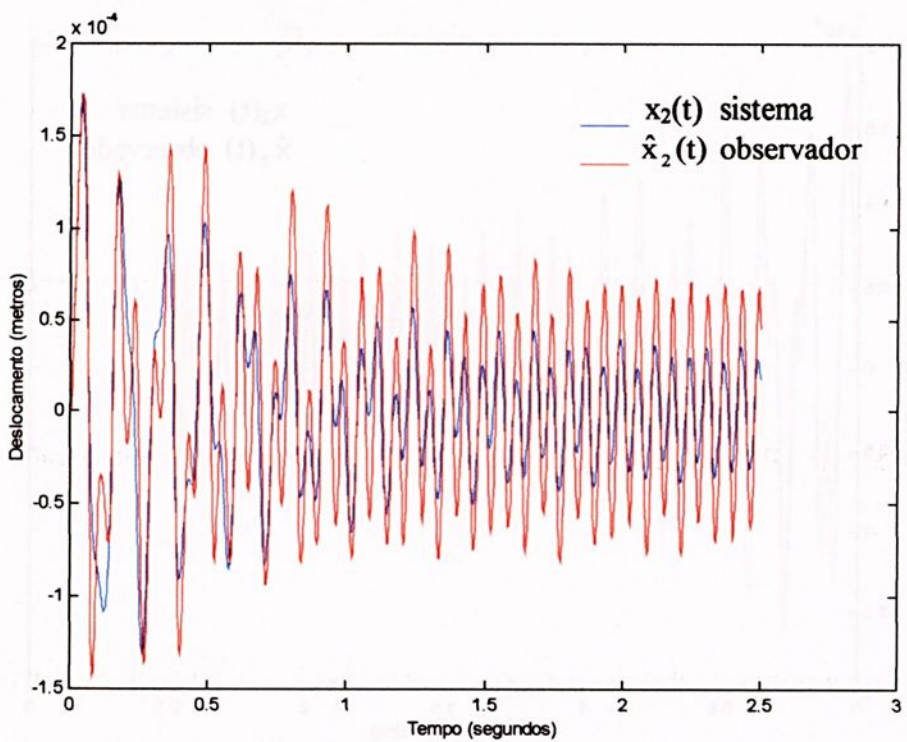


Figura 29 - Sistema Real Global Simulado com 50% de perda de  $k_1$  x Observador Robusto a 50% de perda de  $k_3$ .

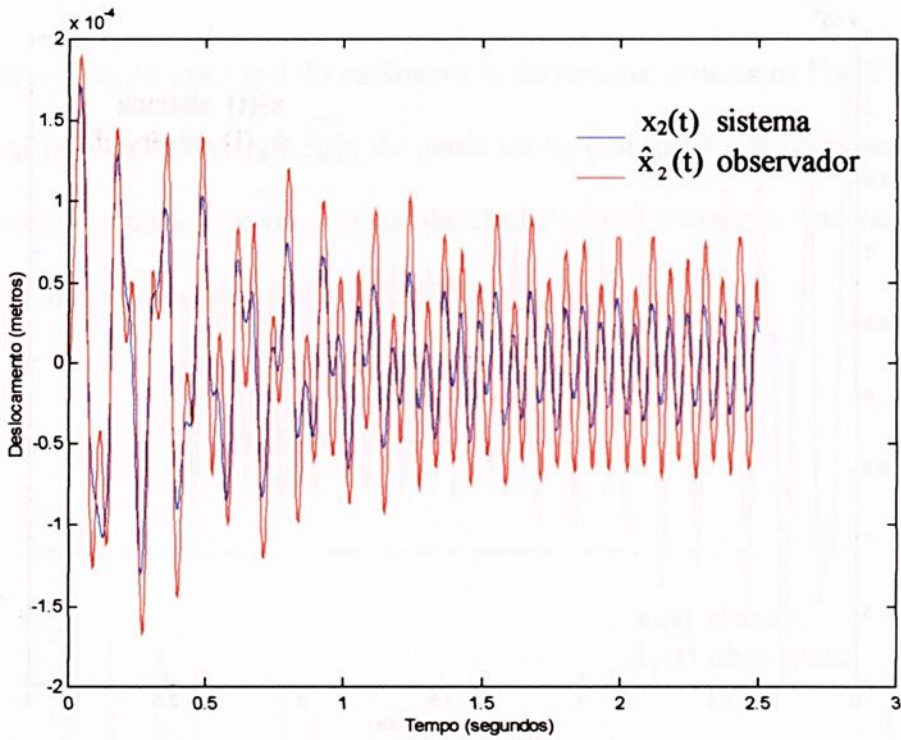


Figura 30 - Sistema Real Global Simulado com 50% de perda de  $k_1$  x Observador Robusto a 50% de perda de  $c_1$ .

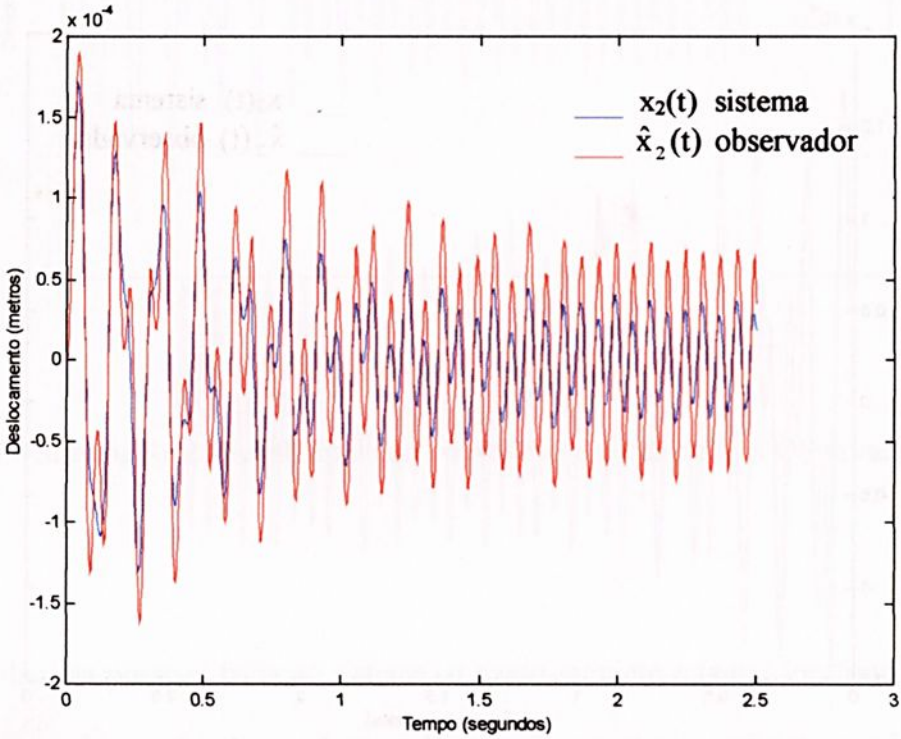


Figura 31 - Sistema Real Global Simulado com 50% de perda de  $k_1$  x Observador Robusto a 50% de perda de  $c_2$ .



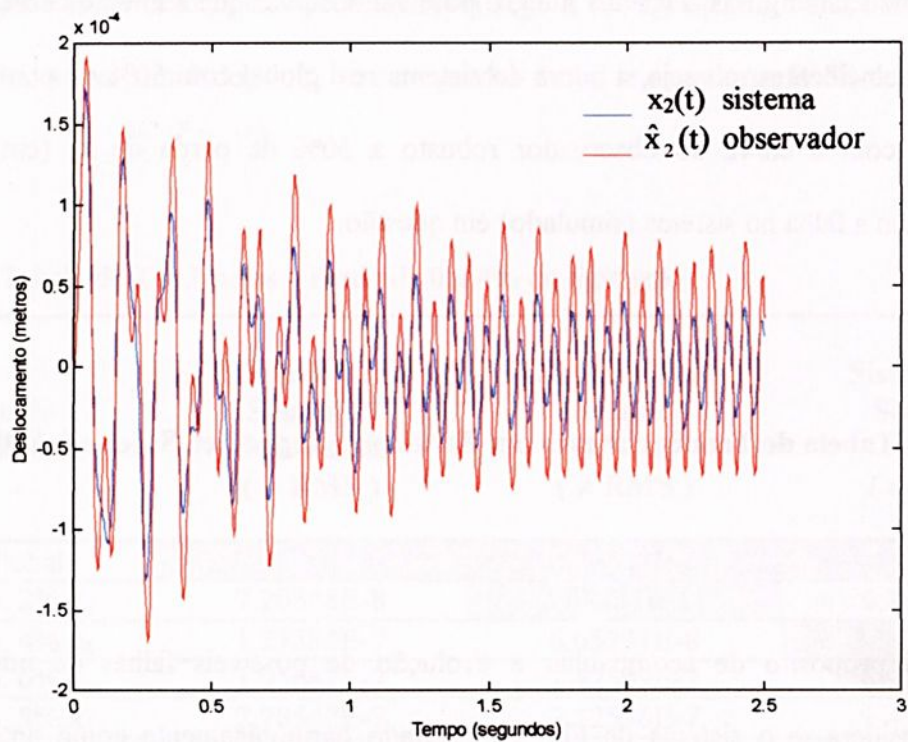


Figura 32 - Sistema Real Global Simulado com 50% de perda de  $k_1$  x Observador Robusto a 50% de perda de  $c_3$ .

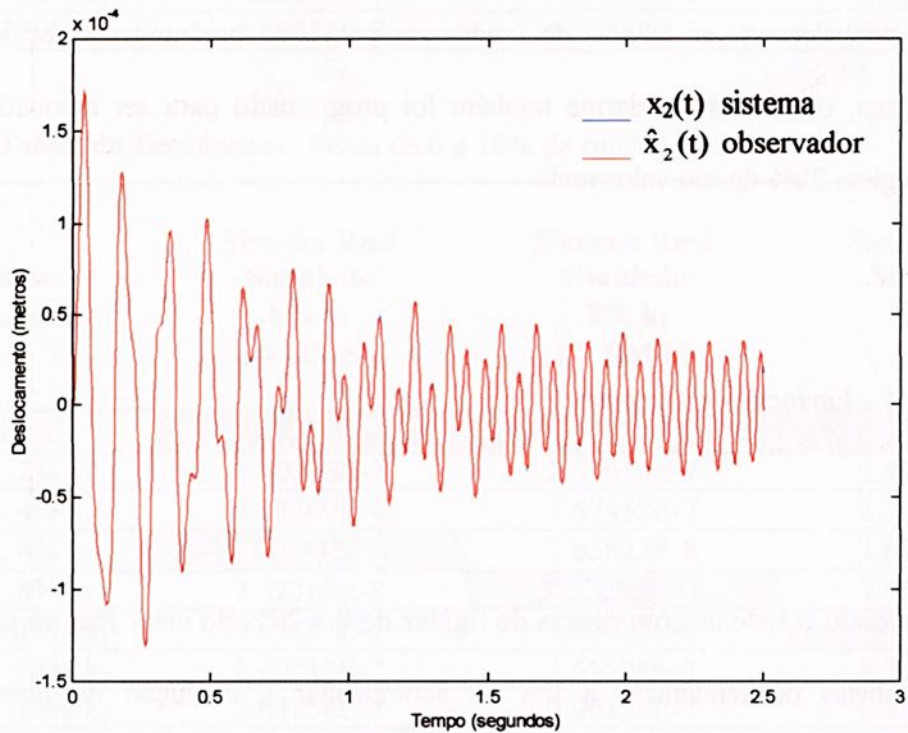


Figura 33 - Sistema Real Global Simulado com 50% de perda de  $k_1$  x Observador Robusto a 50% de perda de  $k_1$ .

Analisando tais figuras, Figs. 28 a 33, é possível observar que somente na Fig. 33 ambas as curvas são coincidentes, ou seja, a curva do sistema real global com 50% de perda de  $k_1$  (em azul) coincide com a curva do observador robusto a 50% de perda de  $k_1$  (em vermelho), localizando assim a falha no sistema (simulado) em questão.

#### 4.2.3. Tabela de Tendência para um Parâmetro Específico Sujeito à Falha

Com o propósito de acompanhar a evolução de possíveis falhas de um parâmetro específico, considera-se o sistema da Fig. 25 excitado harmonicamente como antes, sendo o parâmetro  $k_1$  o parâmetro mais solicitado nesta operação mecânica. Sendo assim, construiu-se um banco de observadores de estado robustos a determinados valores de perdas de rigidez do parâmetro  $k_1$ , estabelecendo-se tabelas de tendências para este parâmetro específico sujeito a falhas. Neste caso, o sistema de alarme também foi programado para ser acionado quando a perda de  $k_1$  atingisse 20% de seu valor real.

##### *A - Variação do parâmetro $k_1$*

Considerando o sistema com perdas de rigidez de 0 a 20% do valor real do parâmetro  $k_1$ , estabelece-se tabelas de tendências a fim de acompanhar a evolução de possíveis falhas provocadas por essas perdas. Para isto, são construídos observadores robustos para determinadas perdas do parâmetro  $k_1$ .





Nas tabelas de tendências apresentadas a seguir, mostra-se a diferença entre os valores RMS do sistema real simulado, com ou sem perdas de  $k_1$ , e os valores RMS dos observadores construídos.

Tabela 15 – Tabela de Tendências – Perda de 0 a 4% da rigidez  $k_1$ .

| Banco de Observadores | Sistema Real Simulado Sem Falhas ( $\neq$ RMS) | Sistema Real Simulado 2% $k_1$ ( $\neq$ RMS) | Sistema Real Simulado 4% $k_1$ ( $\neq$ RMS) |
|-----------------------|------------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|
| Obs.Global            | 7.58723E-14                                    | 6.36857E-8                                   | 1.42358E-7                                   |
| Obs.Rob. 2% $k_1$     | 7.20548E-8                                     | 3.48752E-11                                  | 6.78952E-8                                   |
| Obs.Rob. 4% $k_1$     | 1.27584E-7                                     | 6.65231E-8                                   | 3.54258E-11                                  |
| Obs.Rob. 6% $k_1$     | 1.95687E-7                                     | 1.42589E-7                                   | 6.91588E-8                                   |
| Obs.Rob. 8% $k_1$     | 2.78542E-7                                     | 2.12536E-7                                   | 1.43258E-7                                   |
| Obs.Rob. 10% $k_1$    | 3.41587E-7                                     | 2.95874E-7                                   | 2.23658E-7                                   |
| Obs.Rob. 12% $k_1$    | 4.26897E-7                                     | 3.75123E-7                                   | 3.01568E-7                                   |
| Obs.Rob. 14% $k_1$    | 5.42365E-7                                     | 4.84523E-7                                   | 4.23658E-7                                   |
| Obs.Rob. 16% $k_1$    | 5.95244E-7                                     | 5.32658E-7                                   | 4.78956E-7                                   |
| Obs.Rob. 18% $k_1$    | 5.25698E-7                                     | 4.84571E-7                                   | 4.42513E-7                                   |
| Obs.Rob. 20% $k_1$    | 5.83258E-7                                     | 5.52658E-7                                   | 5.92365E-7                                   |

Tabela 16 – Tabela de Tendências – Perda de 6 a 10% da rigidez  $k_1$ .

| Banco de Observadores | Sistema Real Simulado 6% $k_1$ ( $\neq$ RMS) | Sistema Real Simulado 8% $k_1$ ( $\neq$ RMS) | Sistema Real Simulado 10% $k_1$ ( $\neq$ RMS) |
|-----------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Obs.Global            | 2.15236E-7                                   | 2.96325E-7                                   | 3.75322E-7                                    |
| Obs.Rob. 2% $k_1$     | 1.40236E-7                                   | 2.23658E-7                                   | 2.99996E-7                                    |
| Obs.Rob. 4% $k_1$     | 7.12369E-8                                   | 1.57452E-7                                   | 2.30258E-7                                    |
| Obs.Rob. 6% $k_1$     | 3.61254E-11                                  | 7.65823E-8                                   | 1.60258E-7                                    |
| Obs.Rob. 8% $k_1$     | 7.52369E-8                                   | 3.67236E-11                                  | 7.96958E-8                                    |
| Obs.Rob. 10% $k_1$    | 1.63258E-7                                   | 7.95623E-8                                   | 3.70236E-11                                   |
| Obs.Rob. 12% $k_1$    | 2.40215E-7                                   | 1.61526E-7                                   | 8.32510E-8                                    |
| Obs.Rob. 14% $k_1$    | 3.63258E-7                                   | 2.96325E-7                                   | 2.12365E-7                                    |
| Obs.Rob. 16% $k_1$    | 4.1025E-7                                    | 3.44569E-7                                   | 2.62365E-7                                    |
| Obs.Rob. 18% $k_1$    | 3.95623E-7                                   | 3.46852E-7                                   | 2.85623E-7                                    |
| Obs.Rob. 20% $k_1$    | 4.63256E-7                                   | 4.12356E-7                                   | 3.62325E-7                                    |



Tabela 17 – Tabela de Tendências – Perda de 12 a 16% da rigidez  $k_1$ .

| Banco de Observadores | Sistema Real Simulado<br>12% $k_1$<br>( $\neq$ RMS) | Sistema Real Simulado<br>14% $k_1$<br>( $\neq$ RMS) | Sistema Real Simulado<br>84% $k_1$<br>( $\neq$ RMS) |
|-----------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Obs.Global            | 4.62589E-7                                          | 5.55524E-7                                          | 6.65874E-7                                          |
| Obs.Rob. 2% $k_1$     | 3.95862E-7                                          | 4.96235E-7                                          | 5.96663E-7                                          |
| Obs.Rob. 4% $k_1$     | 1.32658E-7                                          | 4.12545E-7                                          | 5.10232E-7                                          |
| Obs.Rob. 6% $k_1$     | 2.52365E-7                                          | 3.42132E-7                                          | 4.41232E-7                                          |
| Obs.Rob. 8% $k_1$     | 1.74512E-7                                          | 2.72125E-7                                          | 3.62325E-7                                          |
| Obs.Rob. 10% $k_1$    | 8.52125E-7                                          | 1.85236E-7                                          | 2.74512E-7                                          |
| Obs.Rob. 12% $k_1$    | 3.80023E-11                                         | 8.99523E-8                                          | 1.95235E-7                                          |
| Obs.Rob. 14% $k_1$    | 1.32659E-7                                          | 3.85123E-8                                          | 5.85232E-8                                          |
| Obs.Rob. 16% $k_1$    | 1.84521E-7                                          | 9.30250E-8                                          | 3.90523E-11                                         |
| Obs.Rob. 18% $k_1$    | 2.20326E-7                                          | 1.50232E-7                                          | 7.85232E-8                                          |
| Obs.Rob. 20% $k_1$    | 2.94523E-7                                          | 2.30255E-7                                          | 1.62532E-7                                          |

Tabela 18 – Tabela de Tendências – Perda de 18 a 20% da rigidez  $k_1$ .

| Banco de Observadores | Sistema Real Simulado<br>18% $k_1$<br>( $\neq$ RMS) | Sistema Real Simulado<br>20% $k_1$<br>( $\neq$ RMS) |
|-----------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Obs.Global            | 7.74512E-7                                          | 8.95236E-7                                          |
| Obs.Rob. 2% $k_1$     | 6.98512E-7                                          | 8.32025E-7                                          |
| Obs.Rob. 4% $k_1$     | 6.23215E-7                                          | 7.30256E-7                                          |
| Obs.Rob. 6% $k_1$     | 5.41251E-7                                          | 6.52023E-7                                          |
| Obs.Rob. 8% $k_1$     | 4.62325E-7                                          | 5.75412E-7                                          |
| Obs.Rob. 10% $k_1$    | 3.85232E-7                                          | 4.95623E-7                                          |
| Obs.Rob. 12% $k_1$    | 2.95236E-7                                          | 3.95120E-7                                          |
| Obs.Rob. 14% $k_1$    | 1.62587E-7                                          | 2.74512E-7                                          |
| Obs.Rob. 16% $k_1$    | 9.87895E-8                                          | 2.10253E-7                                          |
| Obs.Rob. 18% $k_1$    | 6.20312E-11                                         | 8.41202E-8                                          |
| Obs.Rob. 20% $k_1$    | 8.32584E-8                                          | 6.95623E-11                                         |



Nas tabelas 15, 16, 17 e 18, verifica-se novamente que a diferença dos valores RMS entre o sistema (simulado) e o observador global (em cinza escuro) vai aumentando gradativamente à medida que a porcentagem de perda do parâmetro  $k_1$  vai aumentando. Isto mostra que os observadores globais construídos para cada sistema (simulado) conseguiram detectar possíveis falhas nestes sistemas.

Analisando estas tabelas, verifica-se em todas as colunas que os observadores robustos conseguiram localizar as possíveis falhas dos sistemas utilizando-se as duas formas de análises apresentadas anteriormente.

Foram apresentados somente os resultados obtidos referentes ao parâmetro  $k_1$ , mas da mesma forma como foi apresentado na análise para uma resposta impulsiva, os resultados referentes aos outros parâmetros sujeitos a falhas também apresentaram resultados bastante satisfatórios.

Portanto, pôde-se verificar através desta análise que a metodologia empregada também conseguiu atingir seus objetivos, sendo as falhas simuladas detectadas e localizadas pelo banco de observadores de estado construído. E através das tabelas de tendências apresentadas, pôde-se observar e analisar as progressões das falhas simuladas para os casos apresentados.



## CAPÍTULO 5

## ANÁLISE EXPERIMENTAL E RESULTADOS

A fim de verificar a validade da metodologia desenvolvida, foi montado no Laboratório de Vibração e Instrumentação do Departamento de Engenharia Mecânica (LVI/DEM/FEIS) um sistema massa-mola-amortecedor de 3 mesas vibratórias, constituído de chapas de alumínio de massas diferentes, de lâminas metálicas de aço inoxidável que proporcionam a rigidez do sistema, e de borrachas de espessuras diferentes que proporcionam o amortecimento viscoso do sistema.

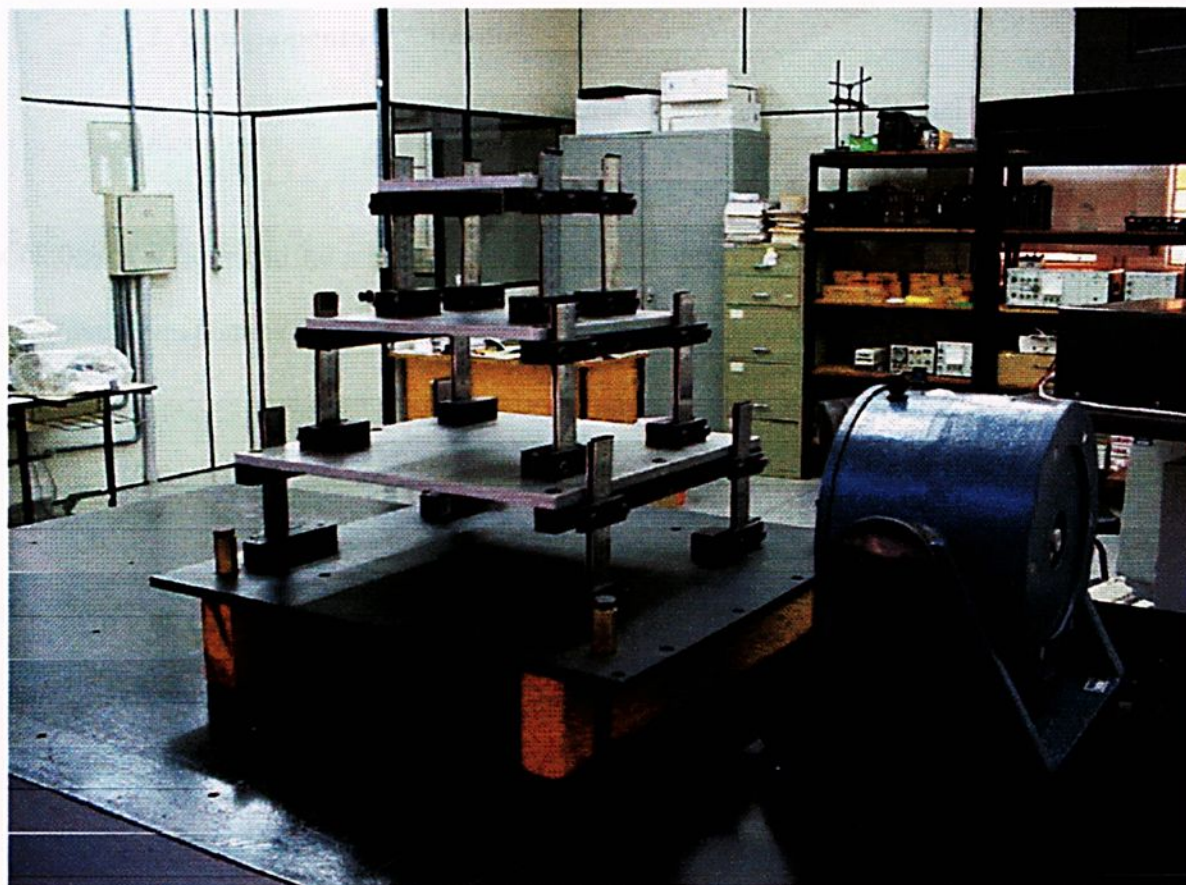


Figura 34 - Bancada de Testes.



A Fig. 34 mostra o sistema mecânico montado para a realização das análises experimentais, na qual pode-se observar as borrachas fixadas entre as lâminas de aço inoxidável.

## 5.1. SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE SINAIS

### 5.1.1. Materiais Utilizados

A bancada de testes montada é constituída dos seguintes materiais:

- Mesa inercial de sustentação da bancada de testes;
- 3 chapas de alumínio de dimensões: ( $m_1$ )  $0,35 \times 0,35 \times 0,01$  m; ( $m_2$ )  $0,25 \times 0,25 \times 0,01$  m; ( $m_3$ )  $0,16 \times 0,16 \times 0,16$  m;
- 32 lâminas metálicas de aço inoxidável de dimensões:  $0,14 \times 0,25 \times 0,01$  m;
- 12 tiras de borrachas de dimensões:  $0,14 \times 0,25 \times 0,15$  m;  $0,14 \times 0,25 \times 0,24$  m;  $0,14 \times 0,25 \times 0,48$  m;
- Parafusos para acoplagem das mesas, lâminas e borrachas;

A Composição das mesas vibratórias é dada da seguinte forma:

1. *Mesa Inferior ou Mesa 1*: 8 lâminas de aço, 4 borrachas de dimensão 0,14 x 0,25 x 0,48 m, 1 chapa de alumínio de massa 6,575 Kg;
2. *Mesa Intermediária ou Mesa 2*: 16 lâminas de aço, 4 borrachas de dimensão 0,14 x 0,25 x 0,24 m, 1 chapa de alumínio de massa 4,550 Kg;
3. *Mesa Superior ou Mesa 3*: 8 lâminas de aço, 4 borrachas de dimensão 0,14 x 0,25 x 0,15 m, 1 chapa de alumínio de massa 1,825 Kg;

### 5.1.2. Equipamentos Utilizados

Para a aquisição de sinais provenientes do sistema mecânico montado, foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Sistema de aquisição de dados *A/D Iotech DaqBook/112* de 12-bit (corrente: 360mA), placa DBK17 com 4 canais de entrada;
- Software de aquisição e análise de dados *DasyLab 4.0 for Windows*;
- Condicionador/Amplificador de sinais *Nexus Conditioning Amplifier Z6 0400* da Bruel & Kjaer com 4 canais de entrada e 4 de saída;





- Acelerômetros do tipo:
  1. *PCB Piezotronics 353B03 SN 75858* (sensibilidade: 9.59 mV/g, nível de bias: 8.8 V, range: 1-7000 Hz);
  2. *PCB Piezotronics 308C SN 34203 ICP* (sensibilidade: 99.0 mV/g, nível de bias: 8.7 V, range: 50  $\pm$ g, resolução: 0.002 g);
  3. *PCB Piezotronics 308C SN 34205 ICP* (sensibilidade: 97.8 mV/g, nível de bias: 8.6 V, range: 50  $\pm$ g, resolução: 0.002 g);
- Martelo de impacto para força impulsiva do tipo *PCB 086C04* (range de frequência: 8.0kHz, range do martelo (5V saída): 4400 N, Sensibilidade do martelo: 1.2 mV/N), conectado a um condicionador de sinais do tipo *480E09* ( 27 +V, 2( $\pm$ 0.6)mA);
- Transdutor de força da Bruel & Kjaer do tipo 8200 (sensibilidade: 3.93 pC/N, range de força: 1000N, tensão a compressão: 5000 N [ -1000N a +5000N]) ;
- Gerador de frequência *Politem PT-9300 ALL-IN-ONE Instrument* (sensibilidade: 1Hz ~ 100MHz e 70MHz ~ 1GHz, impedância: 1M $\Omega$ /100pF, range de frequência: 1Hz ~ 1000MHz, resolução: 0.1, 1, 10, 100 Hz) ;
- Amplificador de sinal MMF-LV103 (100 VA, 3 $\Omega$ , 3 Hz.....80kHz) .



A Fig.35 apresenta o diagrama de blocos para a aquisição de sinais e análise de frequências montado para as análises experimentais realizadas.

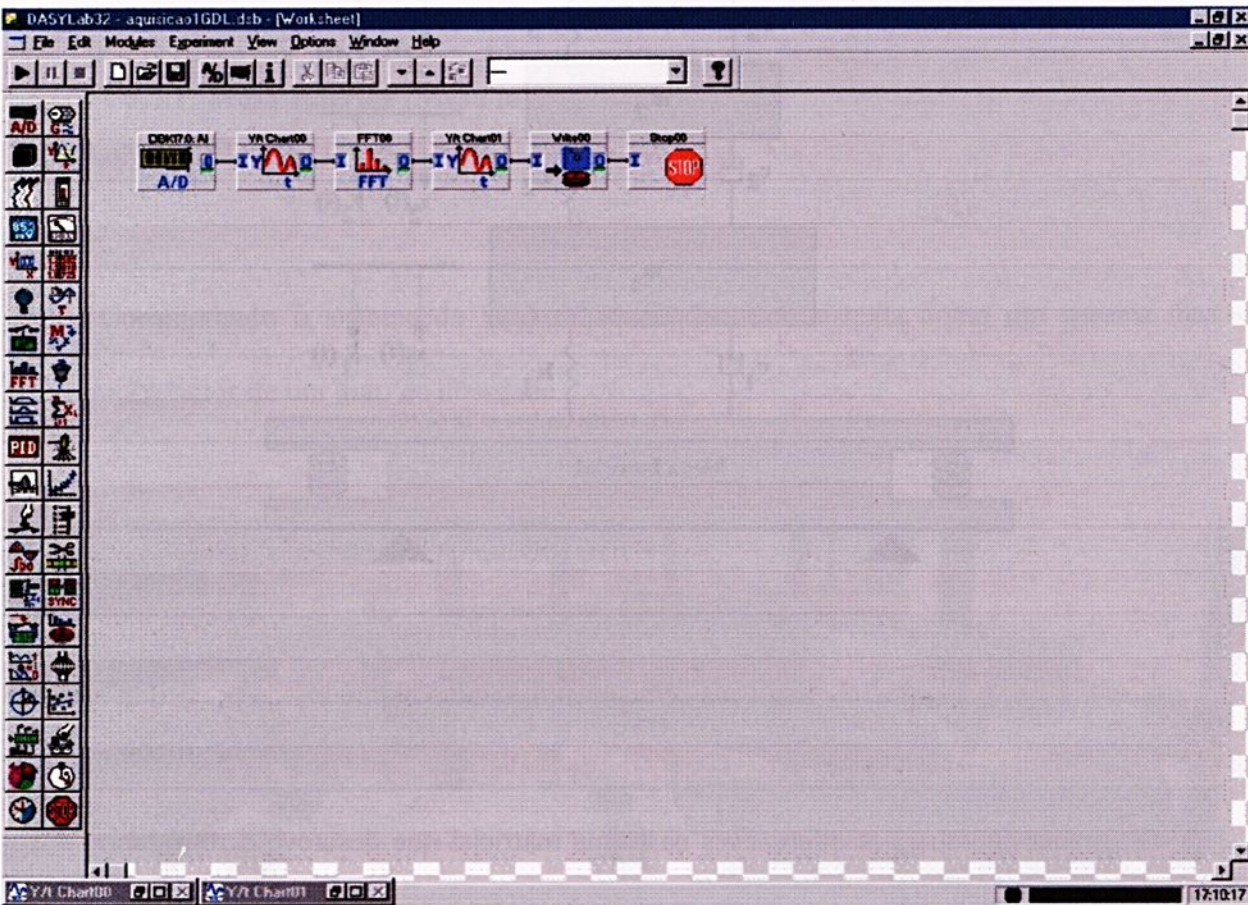


Figura 35 – Fluxograma para a aquisição de sinais e análise de frequência.

5.2. MODELO MATEMÁTICO DO SISTEMA MECÂNICO MONTADO

Na Fig. 36 é apresentado um esquema do sistema mecânico montado para a realização das análises experimentais.



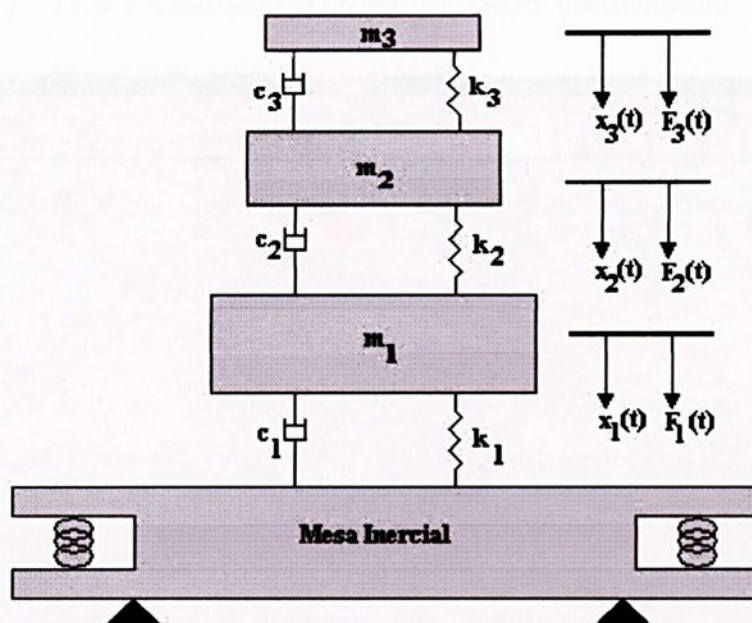


Figura 36 - Esquema do sistema mecânico montado.

O sistema de equações diferenciais na forma matricial que descreve o movimento deste sistema mecânico é dado pela seguinte equação:

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \ddot{x}_1(t) \\ \ddot{x}_2(t) \\ \ddot{x}_3(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (c_1 + c_2) & -c_2 & 0 \\ -c_2 & (c_2 + c_3) & -c_3 \\ 0 & -c_3 & c_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{x}_3(t) \end{bmatrix} + \\
 + \begin{bmatrix} (k_1 + k_2) & -k_2 & 0 \\ -k_2 & (k_2 + k_3) & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1(t) \\ F_2(t) \\ F_3(t) \end{bmatrix} \quad (40)$$

### 5.3. DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS FÍSICOS DO SISTEMA MECÂNICO

#### 5.3.1. Mesa Inferior (Mesa $m_1$ ):

Considerando o sistema da Fig. 37, modela-se este sistema como um sistema massa-mola-amortecedor de um grau de liberdade.

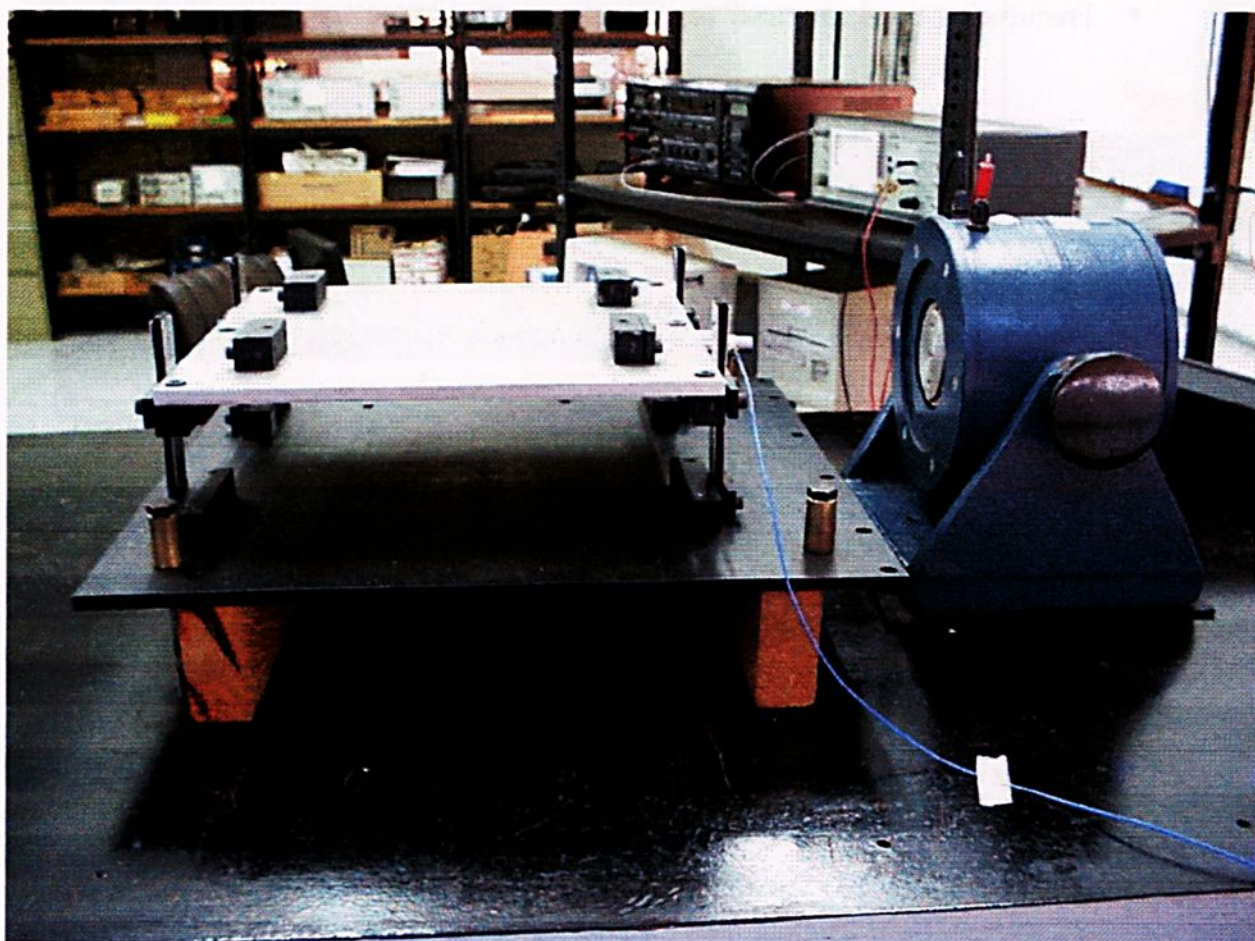


Figura 37 - Mesa Inferior (Mesa  $m_1$ ).



O sistema da Fig. 37 é composto de 8 lâminas metálicas, 4 borrachas e uma massa de alumínio de 6,575 Kg, sendo fixado em cada extremidade 2 lâminas de aço inoxidável e uma borracha de 4,8 cm de espessura.

Excitando o sistema com uma força impulsiva, obteve-se a frequência natural amortecida do sistema, conforme mostra a Fig. 38.

Sendo assim, usando as formulações para o amortecimento viscoso, obteve-se os seguintes resultados:

- Frequência natural amortecida:

$$f_a = 39,06 \text{ Hz}; \quad \omega_a = 245,42 \text{ rad/s};$$

- Decremento logarítmico ( $\xi$ ) = 0,02709;

- Frequência natural:

$$\omega_n = \omega_a / (1 - \xi^2)^{1/2} = 245,51 \text{ rad/s}; \quad f_n = 39,07 \text{ Hz};$$

- Rigidez equivalente (total) =  $\omega_n^2 * m_1 = 396313,37 \text{ N/m}$  (49539,17 N/m por lâmina);

- Amortecimento equivalente (total) =  $\xi * 2 * m_1 * \omega_n = 87,45 \text{ N.s/m}$  (21,86 N.s/m para cada borracha).

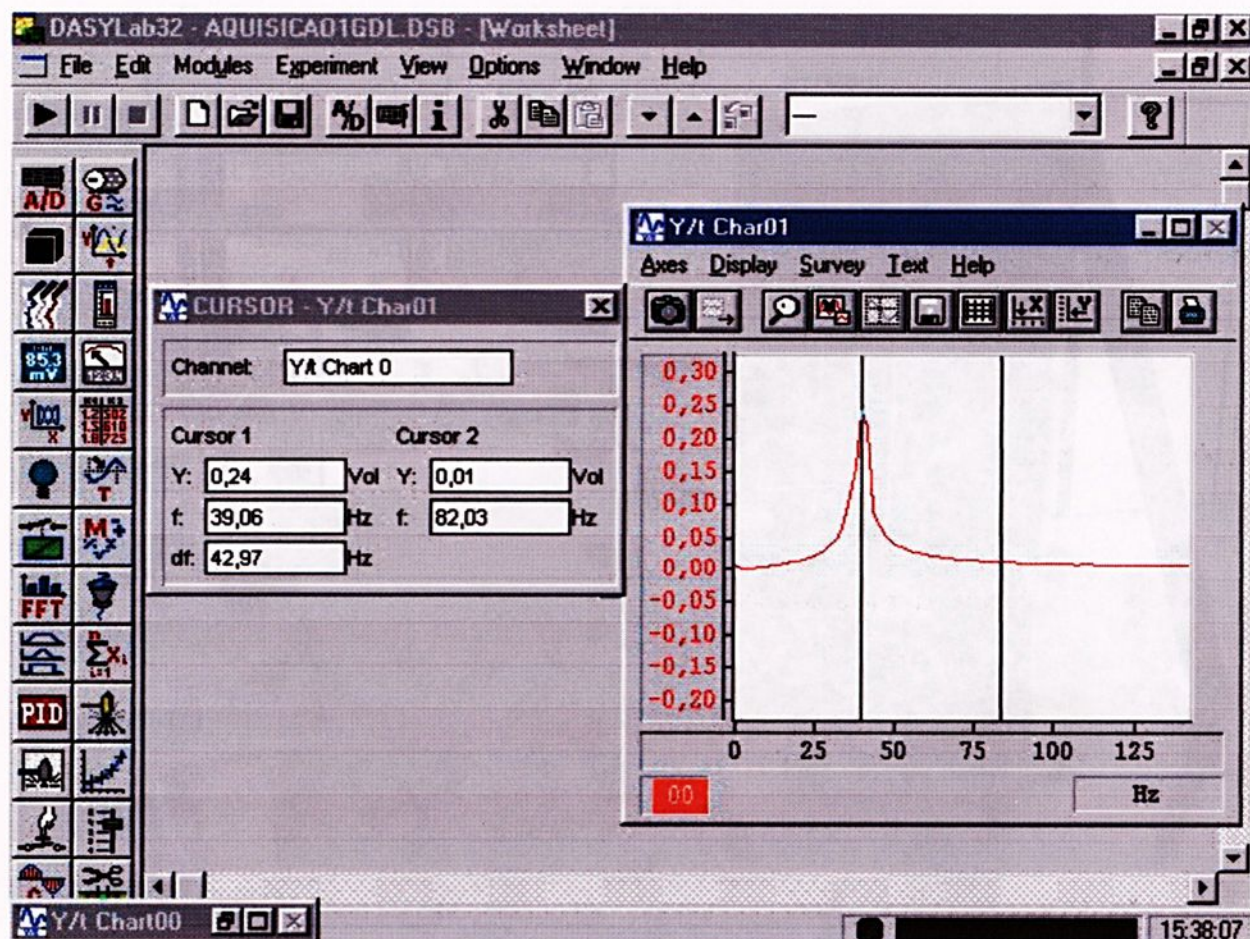


Figura 38 - Força Impulsiva aplicada a Mesa Inferior.

### 5.3.2. Mesa Intermediária (Mesa $m_2$ ):

Considerando o sistema da Fig. 39 com a mesa intermediária (Mesa  $m_2$ ) livre e a mesa inferior (Mesa  $m_1$ ) presa, modela-se o sistema como um sistema massa-mola-amortecedor de um grau de liberdade.



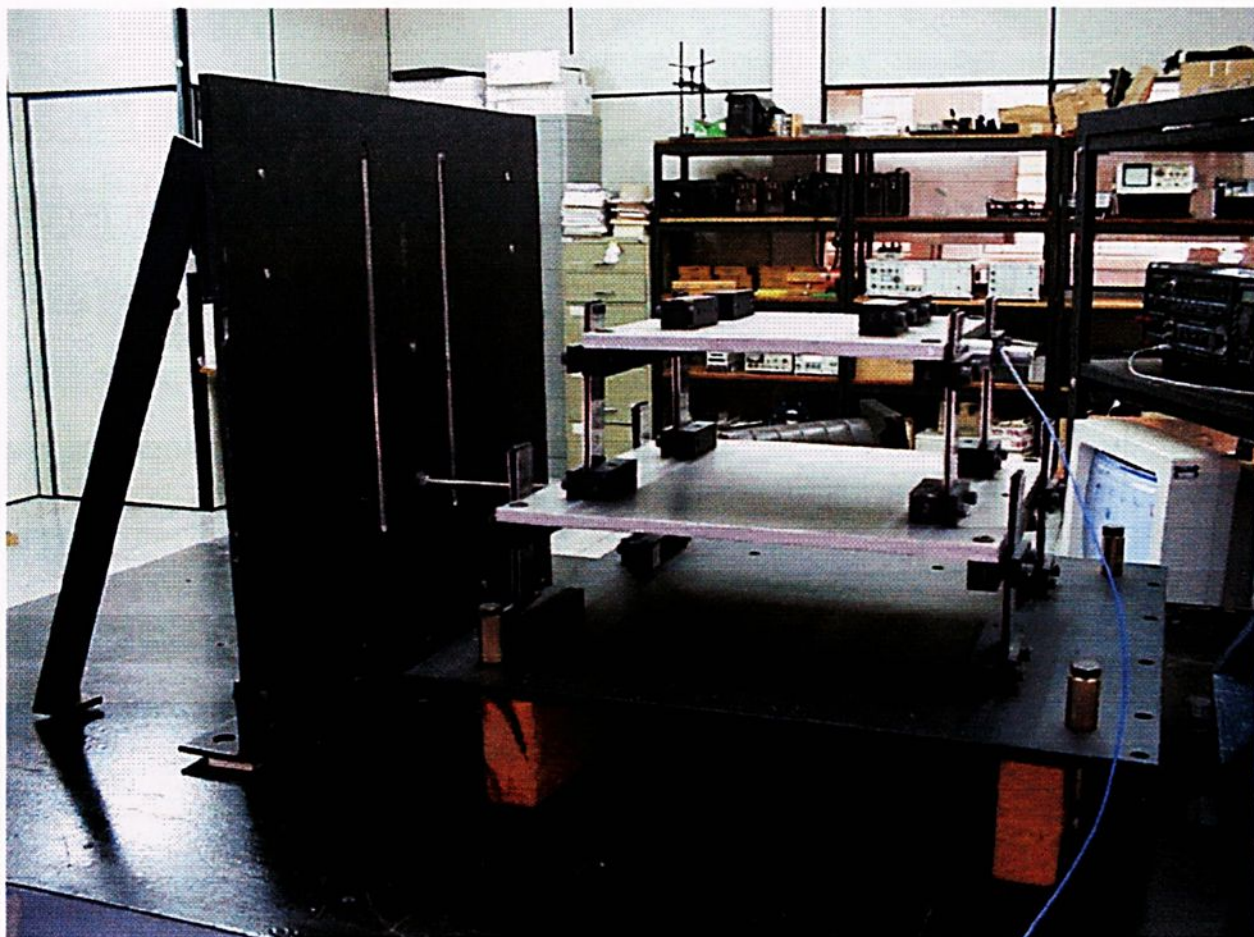


Figura 39 - Mesa Intermediária (Mesa  $m_2$ ).

O sistema da Fig. 39 é composto de 16 lâminas metálicas, 4 borrachas e uma massa de alumínio de 4,550 Kg, sendo fixado em cada extremidade 4 lâminas de aço e uma borracha de 2,4 cm de espessura.

Excitando o sistema com uma força impulsiva, obteve-se a frequência natural amortecida do sistema, conforme mostra a Fig. 40. Sendo assim, usando as formulações para o amortecimento viscoso, obteve-se os seguintes resultados:



- Frequência natural amortecida:  $f_a = 41,02 \text{ Hz}$ ;  $\omega_a = 257,73 \text{ rad/s}$ ;
- Decremento logarítmico ( $\xi$ ) = 0,03504;
- Frequência natural:  $\omega_n = \omega_a / (1 - \xi^2)^{1/2} = 257,88 \text{ rad/s}$ ;  $f_n = 41,04 \text{ Hz}$ ;
- Rigidez equivalente (total) =  $\omega_n^2 * m_2 = 302584,52 \text{ N/m}$  (18911,53 N/m por lâmina);
- Amortecimento equivalente (total) =  $\xi * 2 * m_1 * \omega_n = 80,49 \text{ N.s/m}$  (20,12 N.s/m para cada borracha).

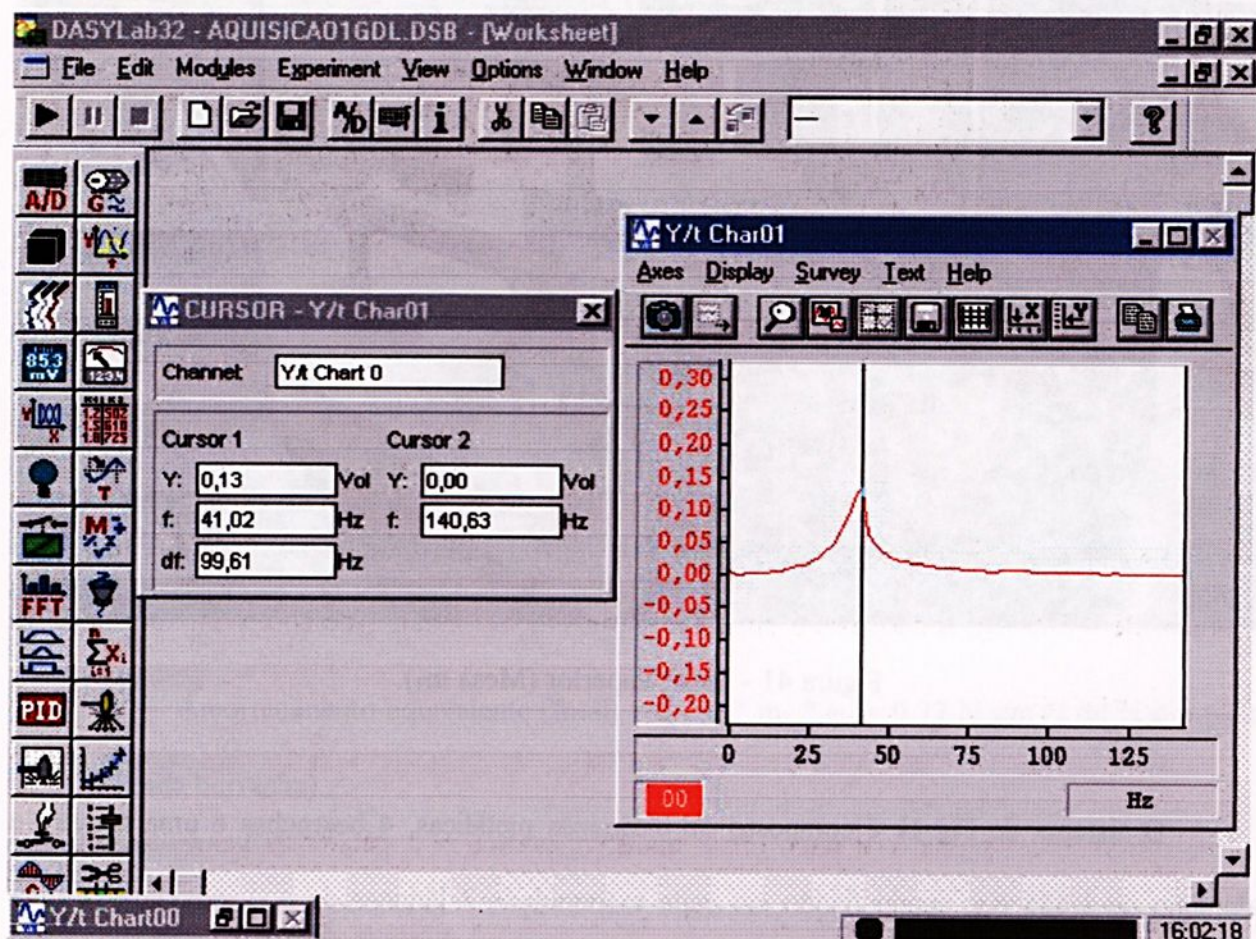


Figura 40 - Força Impulsiva aplicada a Mesa Intermediária.



### 5.3.3. Mesa Superior (Mesa $m_3$ ):

Considerando o sistema da Fig. 41 com a mesa superior (Mesa  $m_3$ ) livre e as mesas  $m_1$  e  $m_2$  presas, modela-se o sistema como um sistema massa-mola-amortecedor de um grau de liberdade.

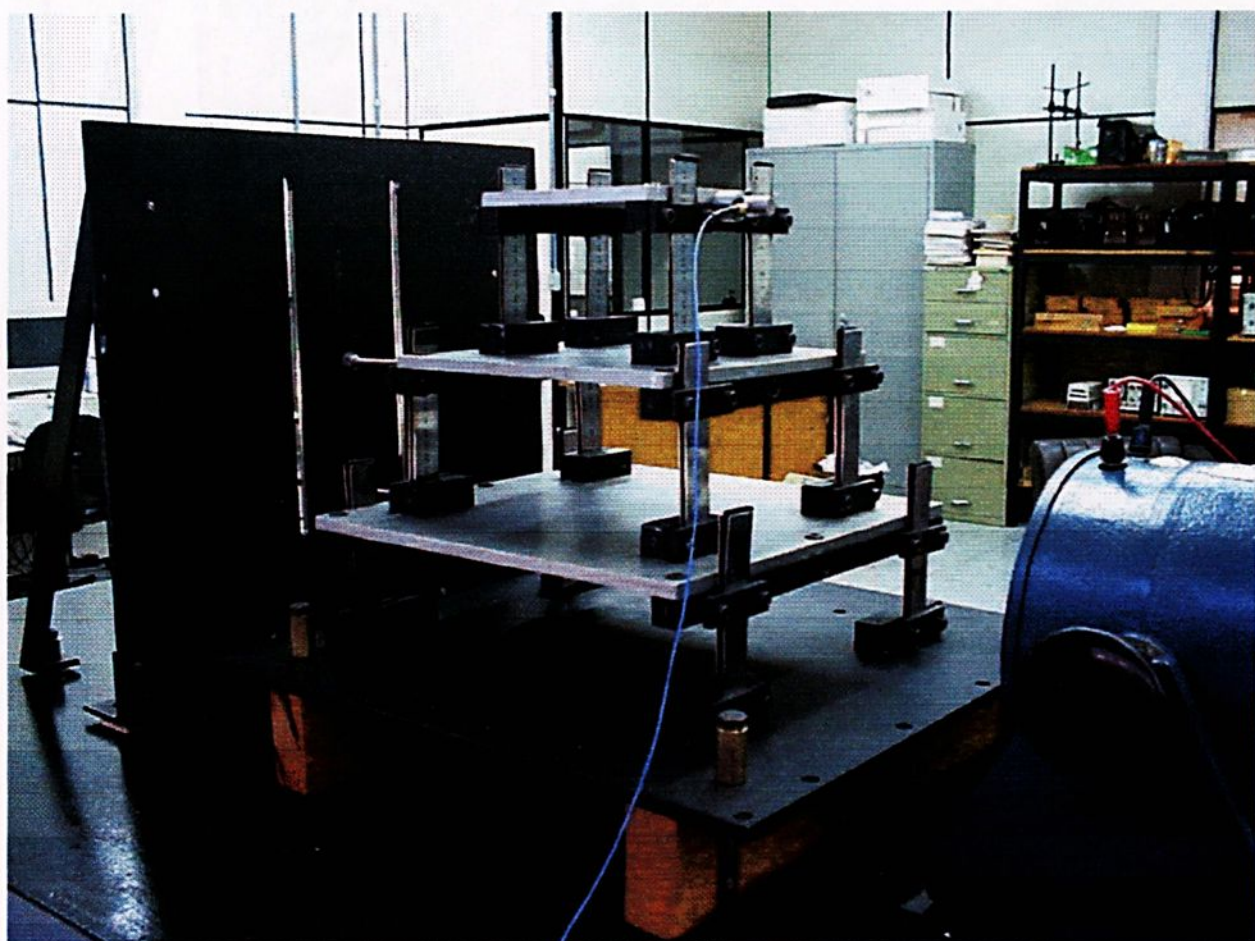


Figura 41 - Mesa Superior (Mesa  $m_3$ ).

O sistema da Fig.41 é composto de 8 lâminas metálicas, 4 borrachas e uma massa de alumínio de 1,825 Kg, sendo fixado em cada extremidade 2 lâminas de aço inoxidável e uma borracha de 1,5 cm de espessura.

Excitando o sistema com uma força impulsiva, obteve-se a frequência natural amortecida do sistema, conforme mostra a Fig. 42.

Sendo assim, usando as formulações para o amortecimento viscoso, obteve-se os seguintes resultados:

- Frequência natural amortecida:

$$f_a = 39,06 \text{ Hz}; \quad \omega_a = 245,42 \text{ rad/s};$$

- Decremento logarítmico ( $\xi$ ) = 0,01055;

- Frequência natural:

$$\omega_n = \omega_a / (1 - \xi^2)^{1/2} = 245,43 \text{ rad/s}; \quad f_n = 39,06 \text{ Hz};$$

- Rigidez equivalente (total) =  $\omega_n^2 * m_3 = 109930,48 \text{ N/m}$  (13741,31 N/m por lâmina);

- Amortecimento equivalente (total) =  $\xi * 2 * m_1 * \omega_n = 9,77 \text{ N.s/m}$  (2,44 N.s/m para cada borracha).





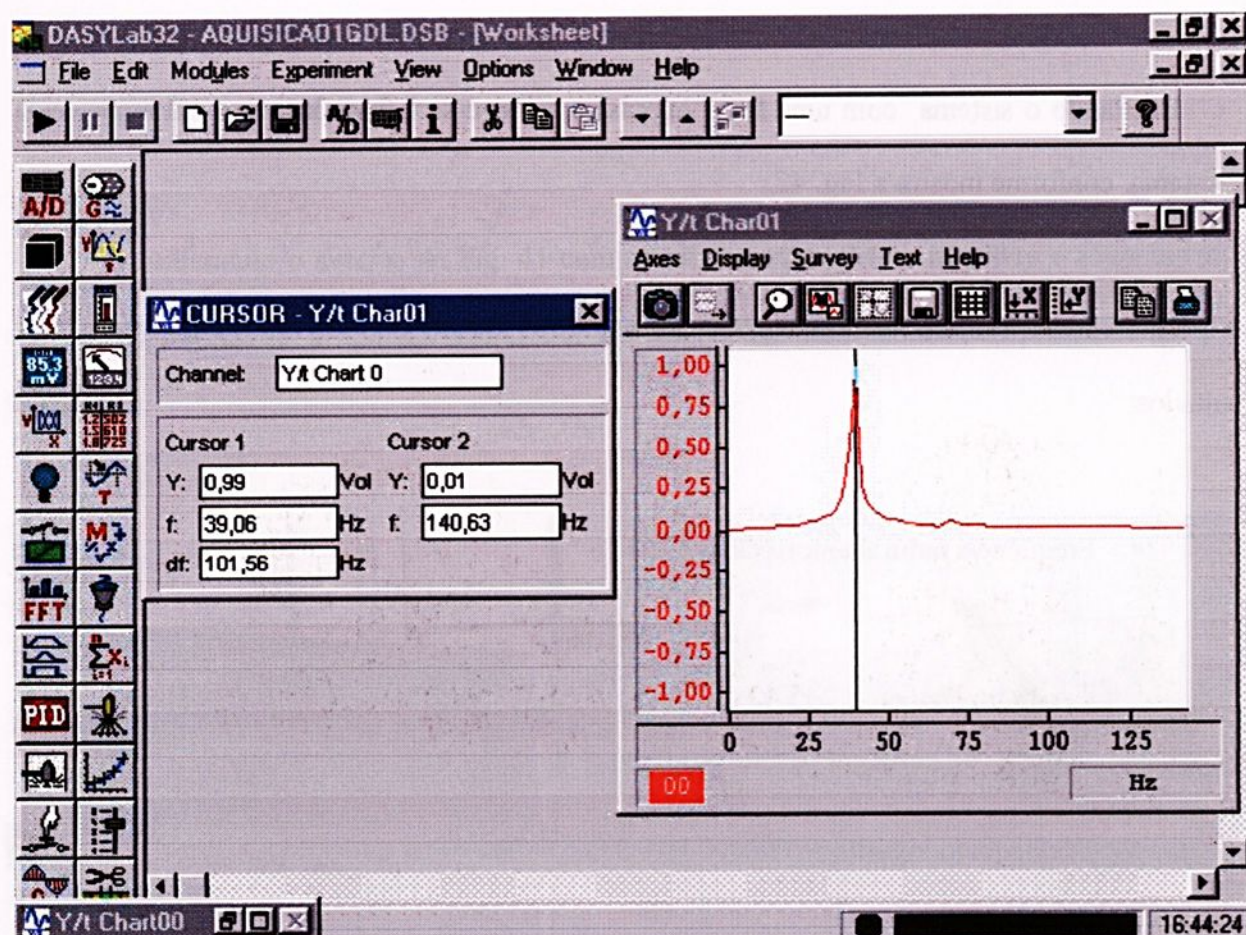


Figura 42 - Força Impulsiva aplicada a Mesa Superior.

#### 5.4. DETERMINAÇÃO DAS FREQUÊNCIAS NATURAIS DO SISTEMA COMPLETO

Considerando o sistema massa-mola-amortecedor com as 3 mesas vibratórias livres conforme mostra a Fig. 43, através de uma força impulsiva aplicada na mesa intermediária (Mesa  $m_2$ ), pôde-se obter as 3 frequências naturais do sistema conforme mostra a Fig. 44, sendo o acelerômetro colocado na mesa inferior (Mesa  $m_1$ ).



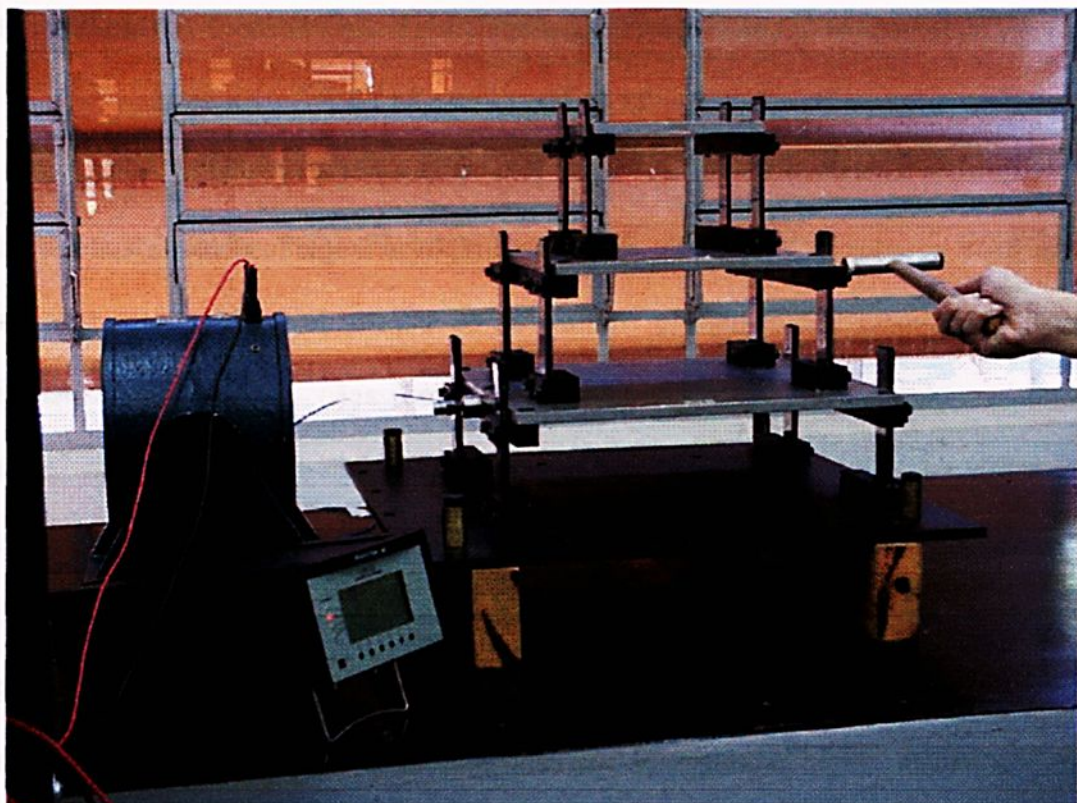


Figura 43 - Sistema Massa-Mola-Amortecedor Completo.

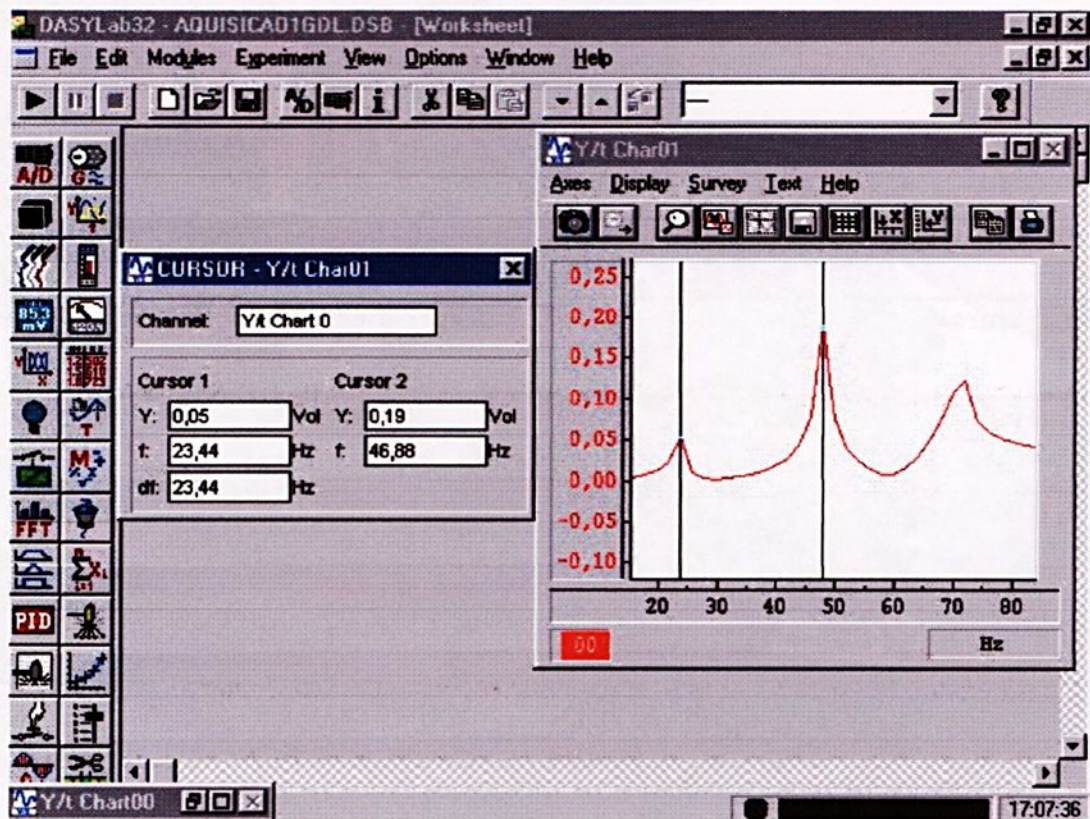


Figura 44 - Espectro de frequências do sistema completo.



Da Fig. 44, obtém-se as seguintes frequências naturais experimentais do sistema completo com o auxílio do software DasyLab:  $f_1 = 23,44$  Hz,  $f_2 = 46,88$  Hz e  $f_3 = 68,36$  Hz.

No item anterior 5.3, a partir da determinação dos parâmetros físicos do sistema considerando cada mesa separadamente, obteve-se os valores de rigidez e amortecimento do sistema massa-mola-amortecedor construído para a realização das análises experimentais. Portanto, obtida a matriz dinâmica [A] deste sistema, obtém-se as seguintes frequências naturais teóricas do sistema:  $f_1' = 22,28$  Hz,  $f_2' = 44,08$  Hz e  $f_3' = 63,88$  Hz.

Com o propósito de verificar a qualidade dos resultados experimentais obtidos, mostra-se na tabela 19, a diferença percentual relativa entre as frequências naturais experimentais do sistema completo encontradas com o auxílio do software DasyLab e as frequências naturais teóricas do sistema completo encontradas através da matriz dinâmica.

Tabela 19 – Diferença dos valores das frequências naturais do sistema completo.

| Freq. Natural | Teóricas | Experimentais | Diferença Percentual |
|---------------|----------|---------------|----------------------|
| $f_1$ (Hz)    | 22,28    | 23,44         | 4,95 %               |
| $f_2$ (Hz)    | 44,08    | 46,88         | 5,97 %               |
| $f_3$ (Hz)    | 63,88    | 68,36         | 6,55 %               |

Analisando a tabela 19 e considerando as diferenças obtidas como aceitáveis, pode-se dizer que a coerência entre os valores é bastante satisfatória.

## 5.5. ANÁLISE EXPERIMENTAL PARA UMA EXCITAÇÃO IMPULSIVA

### 5.5.1. Resultados Experimentais

Considera-se que o sistema da Fig. 45 foi excitado por uma força impulsiva de velocidade inicial de 0,65 m/s aplicada a mesa intermediária (Mesa  $m_2$ ), sendo o valor desta velocidade determinado através de uma conversão de unidades, considerando a sensibilidade do martelo de impedância e a duração do impacto.

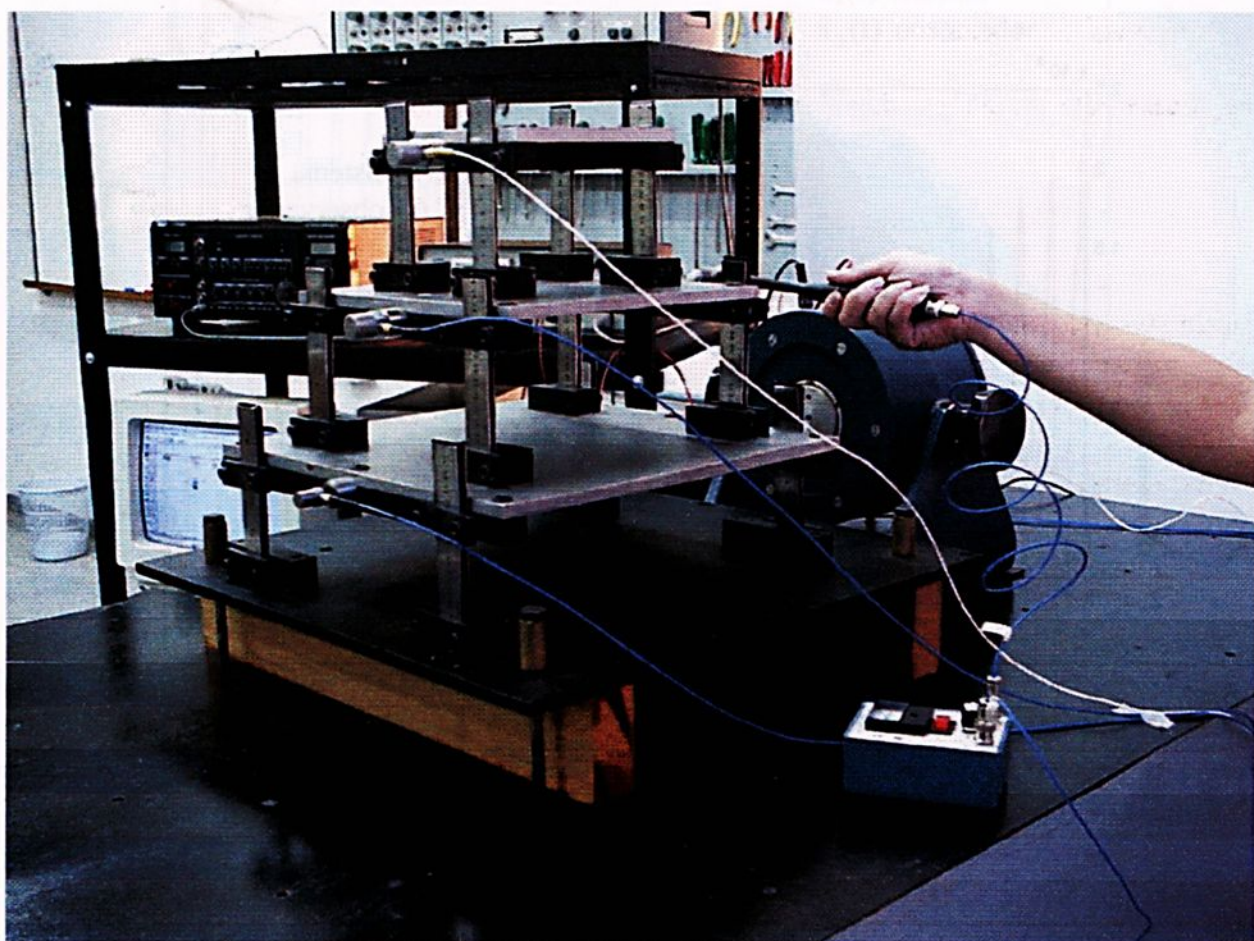


Figura 45 – Sistema Mecânico Completo com acelerômetros instalados nas 3 mesas vibratórias.



A partir da Fig. 45, foram adquiridos 1024 pontos para os sinais experimentais de deslocamento  $x_1(t)$ ,  $x_2(t)$  e  $x_3(t)$ , em um intervalo de tempo de 1 segundo.

Contudo, na construção dos observadores de estado, considerou-se medido somente os pontos provenientes da mesa inferior (Mesa  $m_1$ ), ou seja, o vetor deslocamento  $x_1(t)$ , sendo os valores de  $x_2(t)$  e  $x_3(t)$  reconstruídos pelos observadores de estado.

Nas figuras de 46 a 51, apresenta-se na ordenada dos gráficos os valores do vetor deslocamento  $x_2(t)$  obtidos experimentalmente através da aquisição de sinais e os valores do vetor deslocamento  $\hat{x}_2(t)$  reconstruído pelos observadores de estado, e nas abscissas o tempo em segundos.

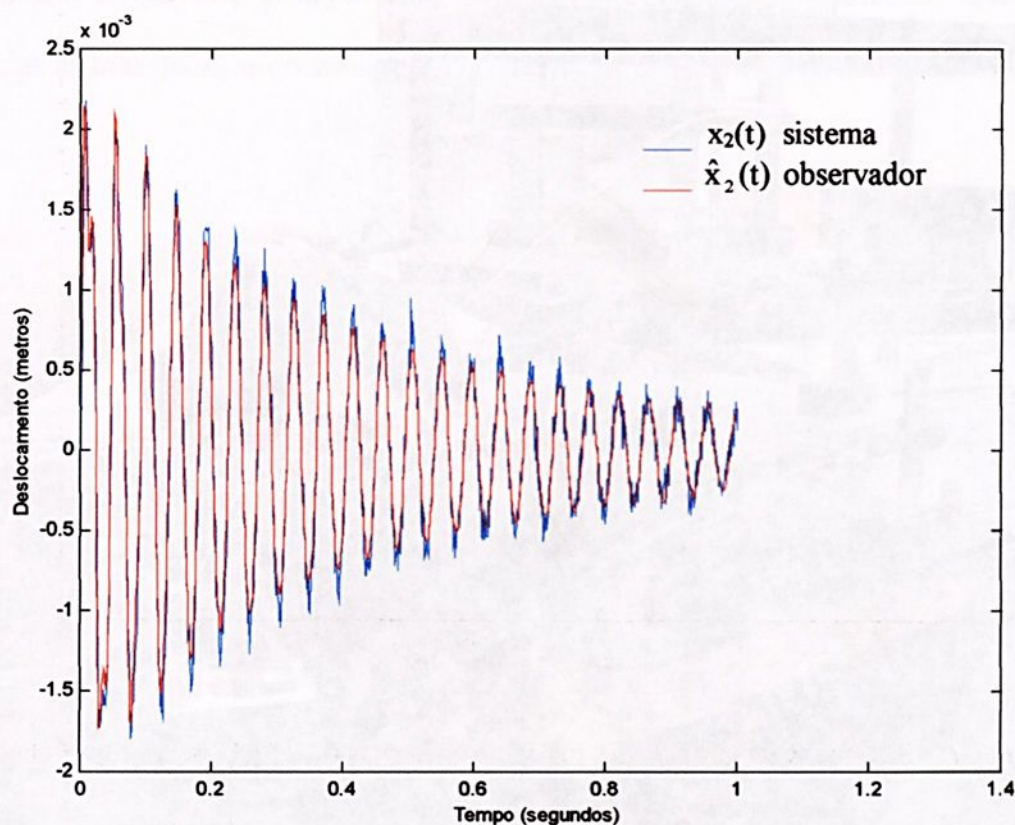


Figura 46 – Sistema Real Global (Sem Falhas) x Observador Global.

A Fig. 46 apresenta a curva da resposta do sistema real global sem falhas, cujos pontos foram adquiridos através de uma aquisição de sinais, e a curva da resposta do observador global montado a fim de detectar uma possível irregularidade no sistema. Nota-se que ambas as curvas são praticamente coincidentes, comprovando assim o fato de não haver nenhuma irregularidade com o sistema.

A fim de simular uma possível falha no sistema, retirou-se uma lâmina de cada suporte da mesa vibratória intermediária (Mesa  $m_2$ ), ou seja, retirou-se 4 lâminas desta mesa com o intuito de simular uma possível falha no parâmetro  $k_2$  do sistema.

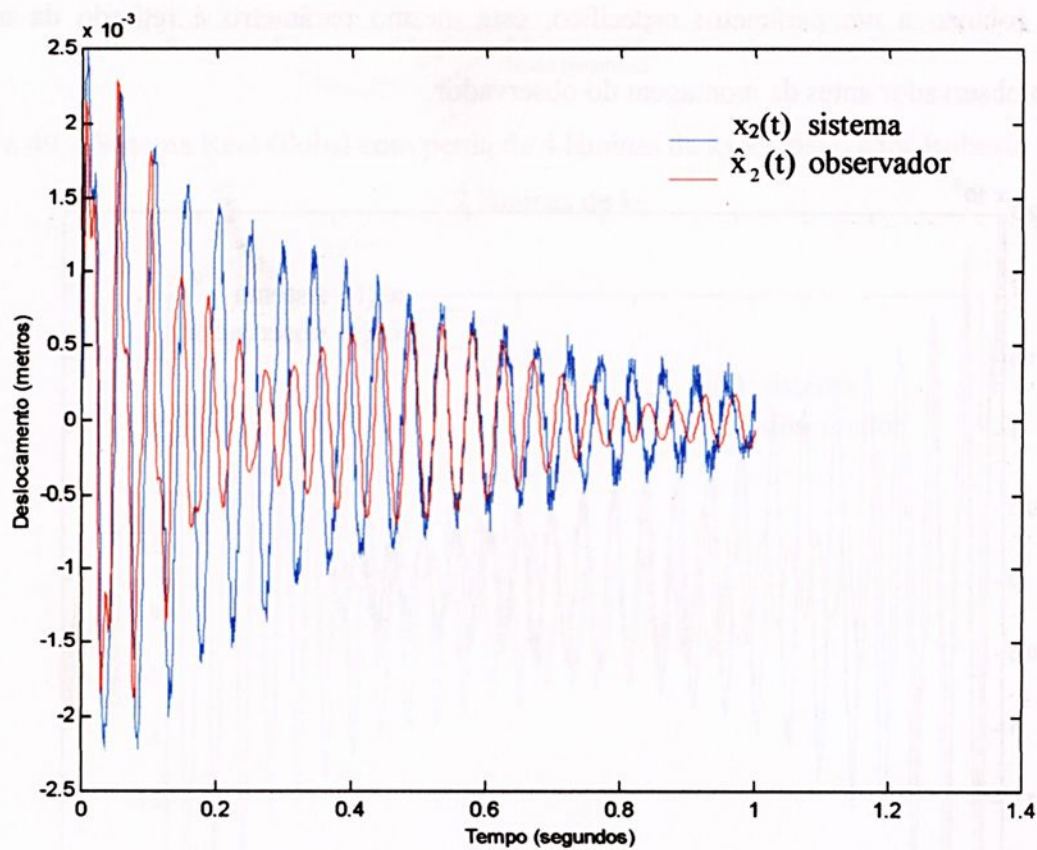


Figura 47 – Sistema Real Global com perda de 4 lâminas de  $k_2$  x Observador Global.

A Fig. 47 mostra a curva da resposta do sistema real global quando foram retiradas as 4 lâminas (simulando uma perda de 25% do parâmetro  $k_2$ ) e a resposta do observador global



montado a fim de detectar uma possível irregularidade no sistema. Nota-se que ambas as curvas não são mais coincidentes, ou seja, o observador global conseguiu detectar uma possível falha no sistema.

Com o objetivo de localizar tal falha, a análise é realizada através das figuras 48 a 51. Estas figuras apresentam as respostas dos observadores robustos a perdas de 1, 2, 3 e 4 lâminas da mesa vibratória intermediária (Mesa  $m_2$ ), respectivamente. Lembrando-se que quando existem indícios de falhas no sistema, a curva do observador robusto ao parâmetro do sistema com possíveis falhas 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 observador antes da montagem do observador.

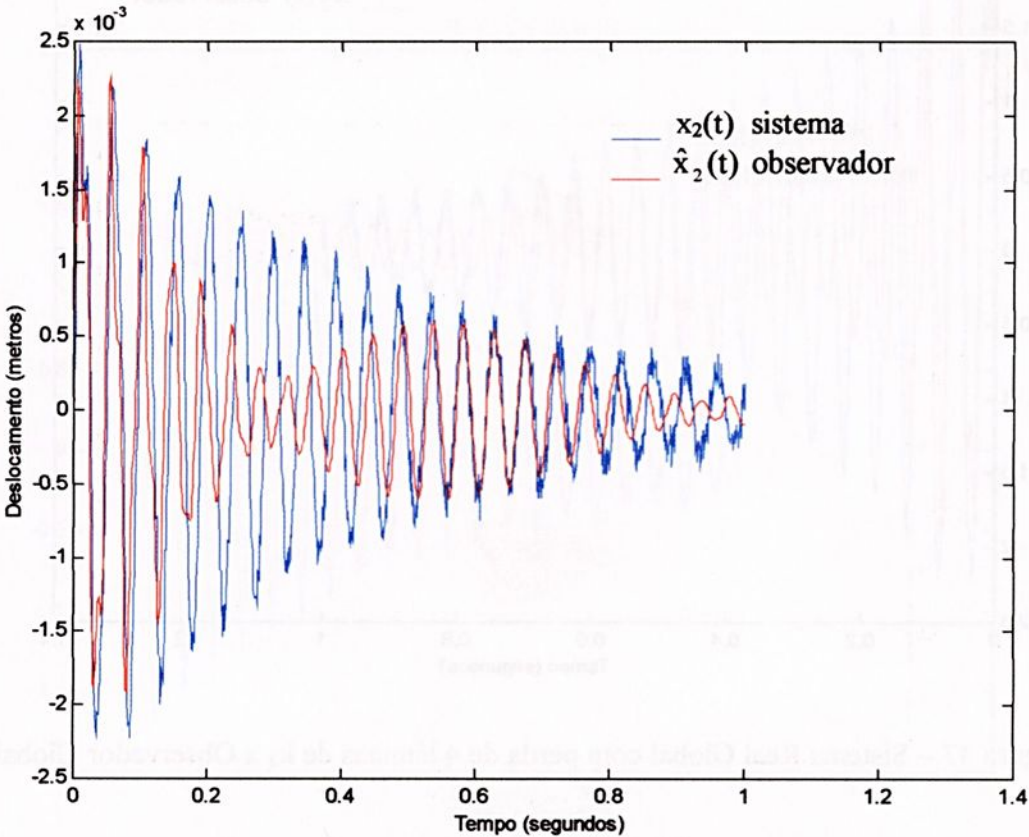


Figura 48 – Sistema Real Global com perda de 4 lâminas de  $k_2$  x Observador Robusto a perda de 1 lâmina de  $k_2$ .

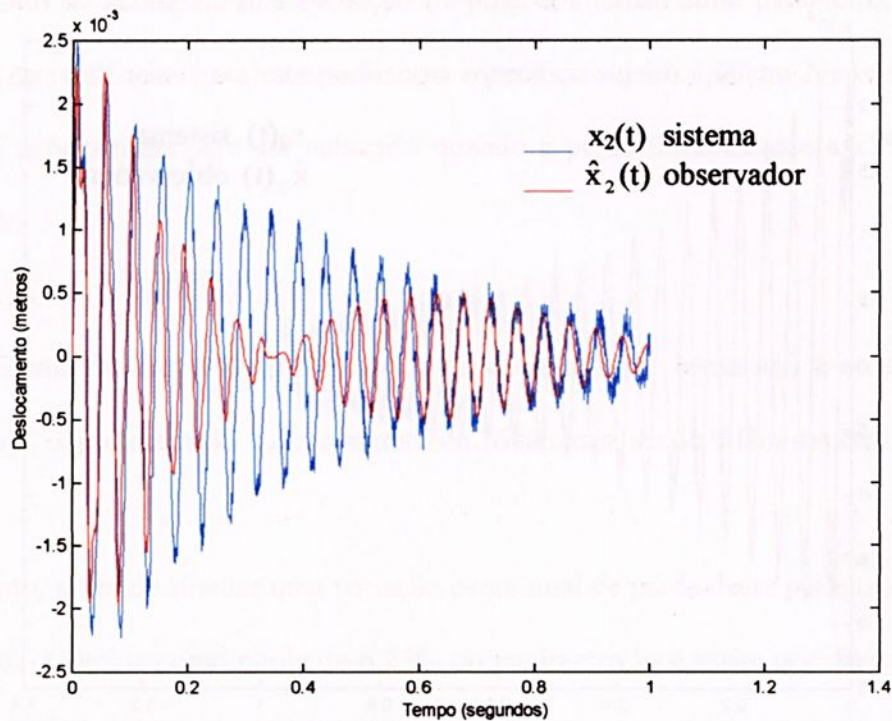


Figura 49 – Sistema Real Global com perda de 4 lâminas de  $k_2$  x Observador Robusto a perda de 2 lâminas de  $k_2$ .

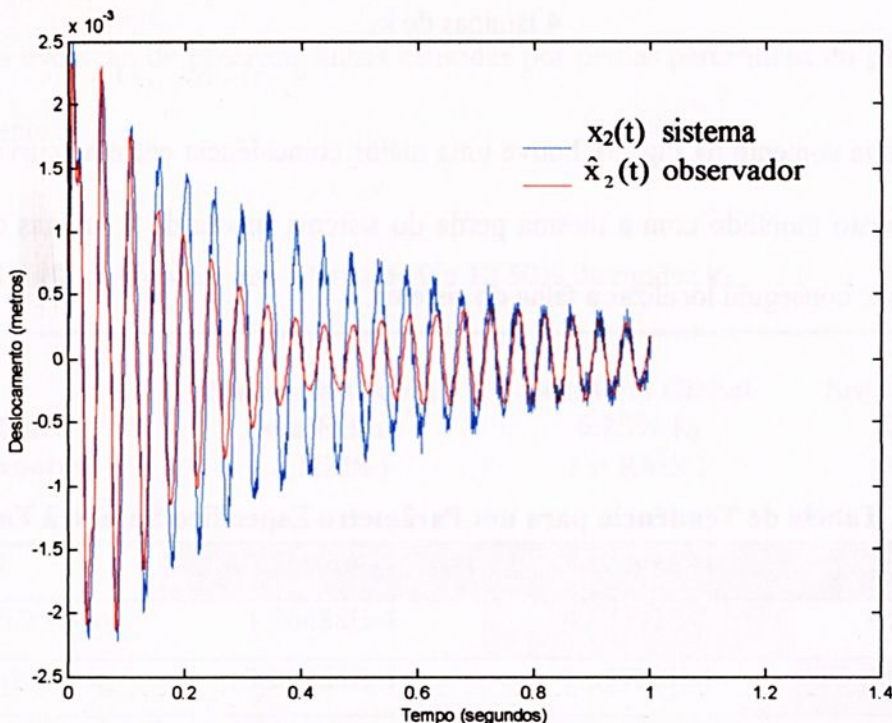


Figura 50 – Sistema Real Global com perda de 4 lâminas de  $k_2$  x Observador Robusto a perda de 3 lâminas de  $k_2$ .



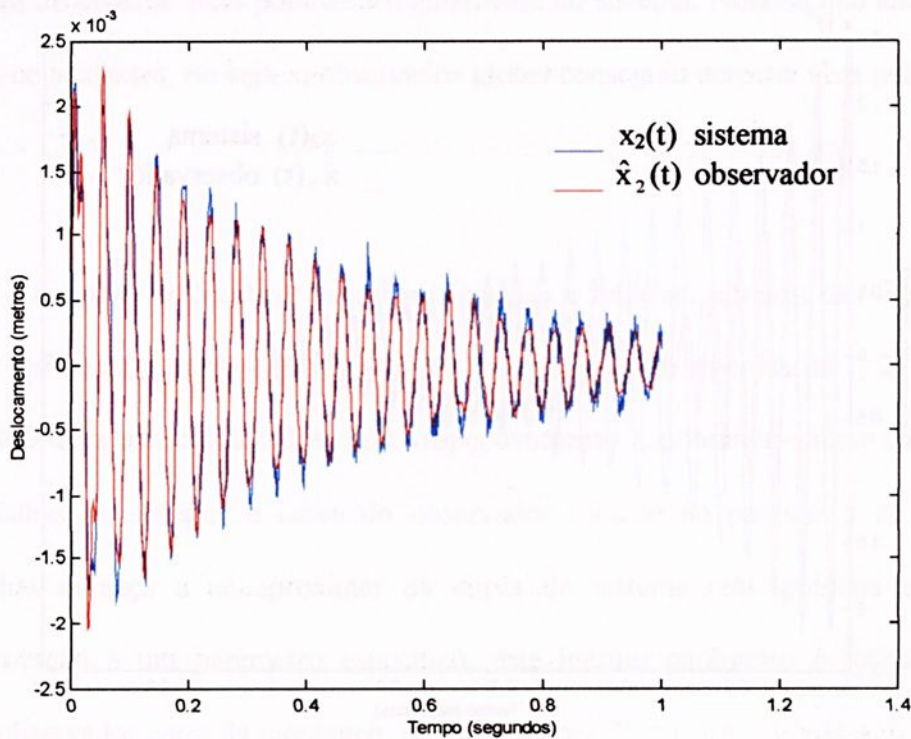


Figura 51 – Sistema Real Global com perda de 4 lâminas de  $k_2$  x Observador Robusto a perda de 4 lâminas de  $k_2$ .

Nota-se que somente na Fig. 51 houve uma maior coincidência entre as curvas, ou seja, o observador robusto montado com a mesma perda do sistema (perda de 4 lâminas do parâmetro  $k_2$ ) foi aquele que conseguiu localizar a falha do sistema.

5.5.2. Tabela de Tendência para um Parâmetro Específico Sujeito à Falha

Considerando no sistema mecânico excitado por uma força impulsiva da Fig. 45 que o parâmetro  $k_2$  seja o parâmetro mais solicitado nesta operação mecânica, montou-se um banco de observadores de estado robustos a determinados valores de perdas de rigidez do parâmetro  $k_2$

com o propósito de acompanhar a evolução de possíveis falhas deste parâmetro, estabelecendo assim tabelas de tendências para este parâmetro específico sujeito à falhas. Neste caso, o sistema de alarme foi programado para ser acionado quando a perda ultrapassasse a 25% de perda do valor real de  $k_2$ .

No sistema da Fig. 34 a mesa vibratória intermediária (Mesa  $m_2$ ) é constituída por 16 lâminas, ou seja, o parâmetro  $k_2$  é um conjunto de 16 lâminas, sendo 4 lâminas em cada suporte.

Portanto, a fim de simular uma variação percentual de perda deste parâmetro, considerou-se a retirada de 1 lâmina como perda de 6.25% do parâmetro  $k_2$  e assim por diante até a retirada de 4 lâminas, considerada perda de 25% de  $k_2$ .

Nas tabelas 20 e 21, são apresentadas as tabelas de tendências obtidas a fim de acompanhar a evolução de possíveis falhas causadas por perdas percentuais do parâmetro  $k_2$  em regime transiente.

Tabela 20 – Tabela de Tendências – Perda de 0 a 12.50% da rigidez  $k_2$ .

| Banco de Observadores | Sist. Real Global Sem Falhas ( $\neq$ RMS ) | Sist. Real Global 6.25% $k_2$ ( $\neq$ RMS ) | Sist. Real Global 12.50% $k_2$ ( $\neq$ RMS ) |
|-----------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Obs.Global            | 4.58390E-5                                  | 1.42101E-4                                   | 1.93384E-4                                    |
| Obs.Rob. 6.25% $k_2$  | 1.06488E-4                                  | 4.82791E-5                                   | 1.54519E-4                                    |
| Obs.Rob. 12.5% $k_2$  | 3.26364E-4                                  | 1.33722E-4                                   | 4.96003E-5                                    |
| Obs.Rob. 18.75% $k_2$ | 5.31032E-4                                  | 3.76468E-4                                   | 1.60489E-4                                    |
| Obs.Rob. 25% $k_2$    | 8.72478E-4                                  | 8.54579E-4                                   | 8.36011E-4                                    |



Tabela 21 – Tabela de Tendências – Perda de 18.75 a 25% da rigidez  $k_2$ .

| Banco de Observadores | Sist. Real Global<br>18.75% $k_2$<br>( $\neq$ RMS) | Sist. Real Global<br>25% $k_2$<br>( $\neq$ RMS) |
|-----------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| Obs.Global            | 2.18975E-4                                         | 3.34596E-4                                      |
| Obs.Rob. 6.25% $k_2$  | 2.05447E-4                                         | 2.30038E-4                                      |
| Obs.Rob. 12.5% $k_2$  | 1.66313E-4                                         | 2.17832E-4                                      |
| Obs.Rob. 18.75% $k_2$ | 4.84576E-5                                         | 1.74771E-4                                      |
| Obs.Rob. 25% $k_2$    | 8.17472E-4                                         | 4.95478E-5                                      |

Nas tabelas 20 e 21, verifica-se primeiramente que a diferença dos valores RMS entre o sistema e o observador global (1ª linha das colunas – em cinza escuro) vai aumentando gradativamente à medida que porcentagem de perda do parâmetro  $k_2$  vai aumentando. Isto mostra que os observadores de estado globais montados para cada sistema estão conseguindo detectar possíveis falhas nestes sistemas.

Analisando a 3ª coluna da tabela 20, verifica-se, comparando o valor da linha do observador global da 2ª coluna (4.58390E-5) com o valor da 3ª coluna (1.42101E-4), que a ordem aumenta de  $10^{-5}$  para  $10^{-4}$ . Este aumento da diferença entre os valores RMS mostra que o observador global montado para o sistema com perda de 6.25% de  $k_2$  conseguiu detectar uma possível falha no sistema, que neste caso foi a retirada de 1 lâmina do parâmetro  $k_2$ .

Analisando ainda a 3ª coluna da tabela 20, a fim de localizar esta possível falha, montou-se um banco de observadores robustos a perdas percentuais do parâmetro  $k_2$  (1ª coluna das tabelas 20 e 21). Sendo assim, analisando a partir da 2ª linha da 3ª coluna, observa-se que o menor valor encontrado (4.82791E-5) se encontra na linha do observador de estado robusto a

perda de 6.25% do parâmetro  $k_2$  (em cinza claro). Portanto, pôde-se localizar a falha causada no sistema pela retirada de 1 lâmina do parâmetro  $k_2$  (perda de 6.25%  $k_2$ ) na linha do observador de estado montado com perda de 6.25% de  $k_2$ .

Da mesma forma como ocorreu nas simulações computacionais, pôde-se localizar esta mesma falha levando em consideração a outra forma de análise, ou seja, comparando a 2ª coluna com a 3ª coluna da tabela 20, observa-se que o valor encontrado na linha do observador robusto a perda de 6.25% de  $k_2$  (Obs. Rob. 6.25%  $k_2$ ) da 3ª coluna é o valor mais próximo do valor da 1ª linha da 2ª coluna, sendo um pouco maior devido ao fato de haver tido uma perda de 6.25% de  $k_2$ . Observando as outras colunas das tabelas, pode-se notar que os valores marcados em cinza claro estão próximos um do outro, apesar de que a diferença entre eles vai aumentando gradativamente. Esta diferença se deve ao fato de que a perda de rigidez do parâmetro  $k_2$  também vai aumentando de uma coluna para outra. Sendo assim é possível localizar as falhas comparando os valores de uma coluna com os valores da próxima coluna, conforme mostrado nas tabelas 20 e 21.

Logo, analisando o restante das colunas das tabelas 20 e 21 e considerando as duas formas de análise, pode-se detectar e localizar as possíveis falhas para todos os casos. Sendo assim, considerando o sistema real excitado por uma força impulsiva, pôde-se, neste caso, comprovar experimentalmente a metodologia desenvolvida e empregada para a detecção e localização de falhas em sistemas mecânicos com variações de parâmetros utilizando observadores de estado.

Portanto, nesta análise, foram apresentados somente os resultados referentes ao parâmetro  $k_2$ . Contudo os resultados referentes aos outros parâmetros sujeitos a falhas apresentaram também resultados satisfatórios.





## 5.6. ANÁLISE EXPERIMENTAL PARA UMA EXCITAÇÃO HARMÔNICA

O sistema da Fig.52 foi excitado harmonicamente na mesa inferior (Mesa  $m_1$ ) por uma força harmônica de amplitude igual a 5 N e frequência  $\omega(t)$  igual a 60 Hz.

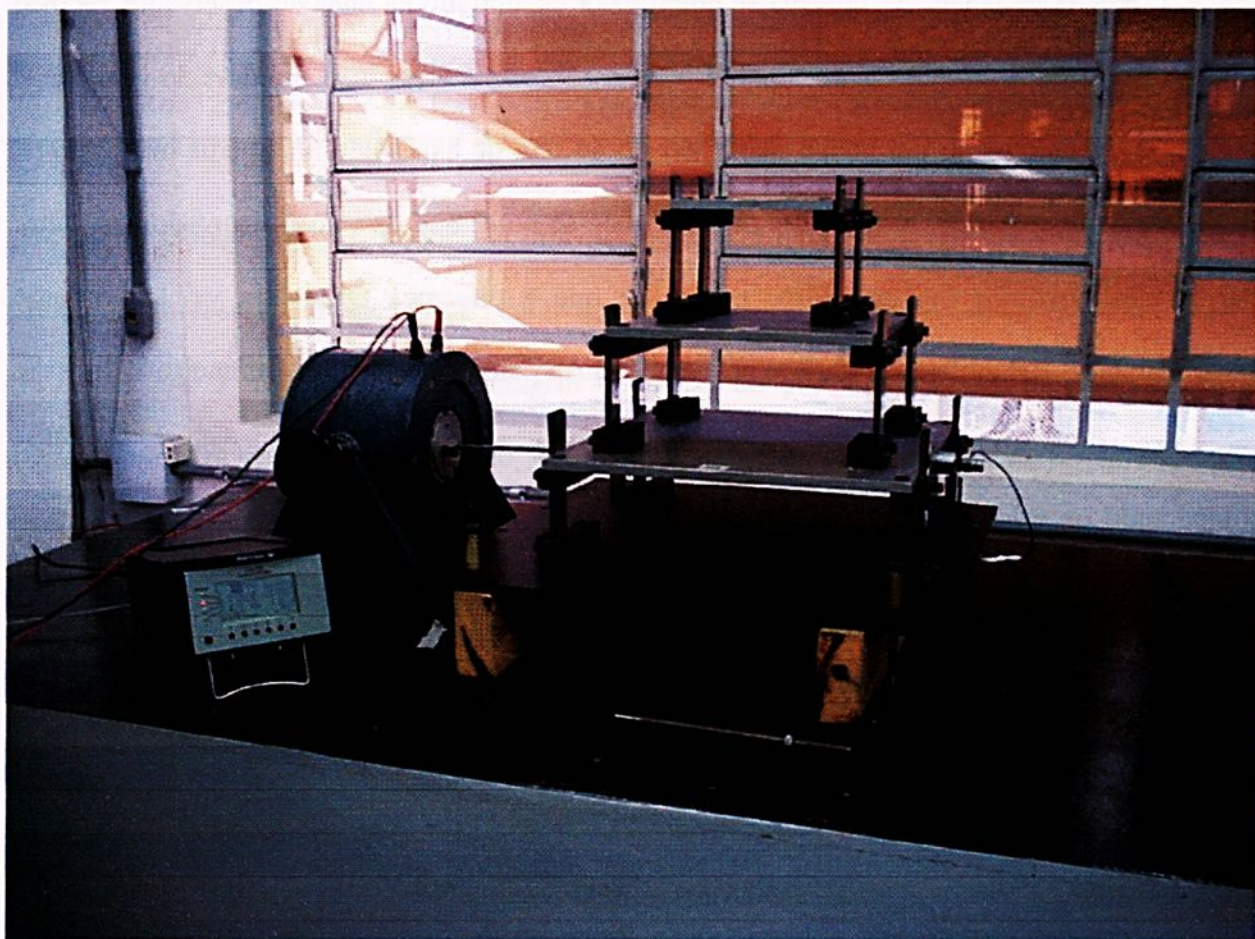


Figura 52 – Sistema Completo excitado harmonicamente.

Foram adquiridos 1024 pontos para os sinais experimentais de deslocamento  $x_1(t)$ ,  $x_2(t)$  e  $x_3(t)$ , em um intervalo de tempo de 2 segundos.

Na construção dos observadores de estado, considerou-se medido somente os pontos provenientes da mesa inferior (Mesa  $m_1$ ) conforme mostra a Fig. 52, ou seja, os valores do deslocamento  $x_1(t)$ , sendo os valores de  $x_2(t)$  e  $x_3(t)$  reconstruídos pelos observadores de estado.

Nesta análise, os resultados obtidos são provenientes do vetor deslocamento  $x_3(t)$  obtidos experimentalmente através da aquisição de sinais e do vetor deslocamento  $\hat{x}_3(t)$  reconstruído pelos observadores de estado, considerando somente  $x_1(t)$  medido por medição direta.

#### 5.6.1. Tabela de Tendência para um Parâmetro Específico Sujeito à Falha

Considerando que o parâmetro  $k_2$  do sistema excitado harmonicamente da Fig. 52 seja o parâmetro mais solicitado nesta operação mecânica, montou-se um banco de observadores de estado robustos a determinados valores de perdas de rigidez do parâmetro  $k_2$  com o propósito de acompanhar a evolução de possíveis falhas, estabelecendo assim tabelas de tendências para este parâmetro específico sujeito à falhas. Neste caso, o sistema de alarme foi programado para ser acionado quando a perda ultrapassasse a 25% de perda do valor real de  $k_2$ .

O parâmetro  $k_2$  da mesa vibratória intermediária (Mesa  $m_2$ ) é um conjunto de 16 lâminas, sendo 4 lâminas em cada suporte. Portanto, a fim de simular uma possível variação percentual de perda de rigidez, considerou-se a retirada de 1 lâmina do conjunto  $k_2$  como uma perda de 6.25% do valor real do parâmetro  $k_2$  até a retirada de 4 lâminas, considerada perda de 25%.





Nas tabelas 22 e 23, são apresentadas as tabelas de tendências obtidas a fim de acompanhar a evolução de possíveis falhas causadas por perdas percentuais do parâmetro  $k_2$ .

Tabela 22 – Tabela de Tendências – Perda de 0 a 12.50% da rigidez  $k_2$ .

| Banco de Observadores | Sist. Real Global Sem Falhas ( $\neq$ RMS) | Sist. Real Global 6.25% $k_2$ ( $\neq$ RMS) | Sist. Real Global 12.50% $k_2$ ( $\neq$ RMS) |
|-----------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------|
| Obs.Global            | 3.32587E-7                                 | 3.34333E-6                                  | 2.67453E-6                                   |
| Obs.Rob. 6.25% $k_2$  | 7.88583E-7                                 | 3.56595E-7                                  | 1.62164E-6                                   |
| Obs.Rob. 12.5% $k_2$  | 2.15309E-6                                 | 9.62675E-7                                  | 3.72978E-7                                   |
| Obs.Rob. 18.75% $k_2$ | 3.73859E-6                                 | 6.41683E-7                                  | 1.15453E-6                                   |
| Obs.Rob. 25% $k_2$    | 1.69472E-4                                 | 1.66532E-4                                  | 1.67260E-4                                   |

Tabela 23 – Tabela de Tendências – Perda de 18.75 a 25% da rigidez  $k_2$ .

| Banco de Observadores | Sist. Real Global 18.75% $k_2$ ( $\neq$ RMS) | Sist. Real Global 25% $k_2$ ( $\neq$ RMS) |
|-----------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Obs.Global            | 4.12309E-6                                   | 5.82642E-6                                |
| Obs.Rob. 6.25% $k_2$  | 3.08080E-6                                   | 4.78892E-6                                |
| Obs.Rob. 12.5% $k_2$  | 1.85966E-6                                   | 3.57997E-6                                |
| Obs.Rob. 18.75% $k_2$ | 3.97092E-7                                   | 2.14807E-6                                |
| Obs.Rob. 25% $k_2$    | 1.65865E-4                                   | 4.10987E-7                                |

Nas tabelas 22 e 23, verifica-se primeiramente que a diferença dos valores RMS entre o sistema e o observador global (1ª linha das colunas – em cinza escuro) vai aumentando

gradativamente à medida que porcentagem de perda do parâmetro  $k_2$  vai aumentando. Isto mostra que os observadores de estado globais montados para cada sistema estão conseguindo detectar possíveis falhas nestes sistemas.

Analisando a 3ª coluna da tabela 22, verifica-se, comparando o valor da linha do observador global da 2ª coluna ( $3.32587E-7$ ) com o valor da 3ª coluna ( $3.34339E-6$ ), que a ordem aumenta de  $10^{-7}$  para  $10^{-6}$ . Este aumento da diferença entre os valores RMS mostra que o observador global montado para o sistema com perda de 6.25% de  $k_2$  conseguiu detectar uma possível falha no sistema, que neste caso foi a retirada de 1 lâmina do parâmetro  $k_2$ .

Analisando ainda a 3ª coluna da tabela 22, a fim de localizar esta possível falha, montou-se um banco de observadores robustos a perdas percentuais do parâmetro  $k_2$  (1ª coluna das tabelas 22 e 23). Sendo assim, analisando a partir da 2ª linha da 3ª coluna, observa-se que o menor valor encontrado ( $3.5695E-7$ ) se encontra na linha do observador de estado robusto a perda de 6.25% do parâmetro  $k_2$  (em cinza claro). Portanto, pôde-se localizar a falha causada no sistema pela retirada de 1 lâmina do parâmetro  $k_2$  (perda de 6.25%  $k_2$ ) na linha do observador de estado montado com perda de 6.25% de  $k_2$ .

Da mesma forma como ocorreu nas simulações computacionais realizadas e nos resultados experimentais obtidos para uma excitação impulsiva, pôde-se localizar esta mesma falha levando em consideração a outra forma de análise, ou seja, comparando a 2ª coluna com a 3ª coluna da tabela 22, observa-se que o valor encontrado na linha do observador robusto a perda de 6.25% de  $k_2$  (Obs.Rob. 6.25%  $k_2$ ) da 3ª coluna é o valor mais próximo do valor da 1ª linha da 2ª coluna, sendo um pouco maior devido ao fato de haver tido uma perda de 6.25% de  $k_2$ . Observando as outras colunas das tabelas, pode-se notar que os valores marcados em cinza claro





estão próximos um do outro, apesar de que a diferença entre eles vai aumentando gradativamente. Esta diferença se deve ao fato de que a perda de rigidez do parâmetro  $k_2$  também vai aumentando de uma coluna para outra. Sendo assim é possível localizar as falhas comparando os valores de uma coluna com os valores da próxima coluna, conforme mostrado nas tabelas 22 e 23.

Logo, analisando o restante das colunas das tabelas 22 e 23 e considerando as duas formas de análise, pode-se detectar e localizar as possíveis falhas para todos os casos.

Sendo assim, considerando o sistema real excitado harmonicamente, pode-se comprovar experimentalmente a metodologia desenvolvida e empregada para a detecção e localização de falhas em sistemas mecânicos com variações de parâmetros utilizando observadores de estado.

Nesta análise foram apresentados somente os resultados referentes ao parâmetro  $k_2$ , contudo os resultados referentes aos outros parâmetros sujeitos a falhas apresentaram também resultados satisfatórios.



## CAPÍTULO 6

### DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

Este trabalho de pesquisa foi dividido em 5 etapas, sendo que na primeira etapa realizou-se um levantamento bibliográfico inicial, seguido de um estudo de metodologias de detecção e localização de falhas em sistemas mecânicos envolvendo a teoria dos observadores de estado. As etapas seguintes trataram da implementação de rotinas computacionais, seguida de simulações computacionais e de análises experimentais.

Através da literatura pesquisada, observou-se que a técnica dos observadores de estado e suas aplicações vêm sendo bastante utilizadas para resolver problemas de controle e detecção de possíveis falhas em sensores e instrumentos durante as duas últimas décadas. Além disso, notou-se também que muitos trabalhos são teóricos, sem nenhuma comprovação experimental das metodologias desenvolvidas. Por isso, a proposta deste trabalho foi o desenvolvimento de uma metodologia para a detecção e localização de falhas em sistemas mecânicos utilizando a técnica dos observadores de estado relacionada a estrutura do sistema, ou seja, relacionada a variação dos parâmetros do sistema.

Na metodologia desenvolvida, nota-se que ela só é satisfeita se o sistema analisado é observável com o número de medias realizadas, tornando-se assim uma das poucas restrições da desta metodologia.





Uma grande vantagem desta metodologia é que ao invés dos autovalores do observador serem arbitrários como em outras metodologias, eles são selecionados à esquerda do plano complexo dos autovalores de parte real negativa do sistema observado, dando uma maior estabilidade e uma rápida convergência ao processo. Isto faz com que a chance dos observadores serem mal condicionados seja menor, pois o desempenho do regime transiente e do regime permanente pode se tornar muito sensível a fatores como aparecimento de ruídos, erros de medida, falhas em sensores, etc.

No capítulo 4, analisando as simulações computacionais realizadas, verificou-se primeiramente a necessidade de se escolher os parâmetros sujeitos a falhas para a construção de observadores robustos a estes parâmetros, pois existem certos componentes que necessitam de um acompanhamento constante devido suas grandes solicitações ou constantes falhas, então, para estes parâmetros são montados observadores específicos, como por exemplo, observadores com perda de 2 em 2% de rigidez.

Na análise para uma excitação impulsiva da simulação computacional, pôde-se verificar que mesmo com uma perturbação aleatória introduzida na resposta do sistema (simulado) foi possível detectar e localizar uma possível falha.

Na primeira parte dos resultados do capítulo 4, considerando os valores de  $x_1(t)$ , mostrou-se à forma das respostas obtidas de um sistema real sem falhas (simulado) e dos observadores robustos aos possíveis parâmetros sujeitos a falhas deste sistema, e através do observador global pode-se comprovar que realmente não existia nenhuma irregularidade no sistema (simulado), pois as curvas do sistema (simulado) e do observador global foram idênticas. Portanto, na segunda parte dos resultados do capítulo 4, a fim de simular uma possível falha, retirou-se da



matriz dinâmica do sistema (simulado) 10% do valor real do parâmetro  $k_1$ , e através das figuras 18 a 24 pôde-se detectar e localizar esta possível falha.

Nas tabelas de tendências de 3 a 12 do capítulo 4, considerou-se que um sistema de alarme seria acionado quando a perda de um parâmetro atingisse a 20% de perda de seu valor real. Através de reduções de 2 em 2% para os parâmetros  $k_1$  e  $k_2$ , e de 4 em 4% para o  $c_2$ , pôde-se observar como cada um desses parâmetros se comportam, podendo assim analisar a evolução de possíveis falhas destes parâmetros até um limite determinado. Destes parâmetros, o parâmetro  $k_1$  foi o que apresentou algumas regiões onde provavelmente poderia estar localizada possíveis falhas, contudo através das análises realizadas pôde-se localizar com clareza tal falha. E por último, considerou-se o caso onde dois parâmetros do sistema variavam simultaneamente, e através da tabela 13 foi possível observar e localizar tais parâmetros com suas falhas.

Nas figuras 26 a 33 da análise para uma excitação periódica da simulação computacional, considerando os valores de  $x_2(t)$  reconstruídos pelo observador de estado, mostrou-se como foi possível detectar e localizar uma possível falha em um sistema excitado harmonicamente.

Considerando ainda nesta análise que o sistema de alarme seria acionado quando o parâmetro  $k_1$  sofresse uma perda de 20% de seu valor real, foram levantadas tabelas de tendência para perdas de 2 em 2% do parâmetro  $k_1$ , onde se pôde observar a evolução de possíveis falhas deste parâmetro específico. Além disso, verificou-se que perda superior a 25% do valor real do parâmetro  $k_1$  levaria a resultados ruins, o que levou a escolha de 20% de perda como um bom limite para o acionamento de um possível sistema de alarme.





Portanto, considerando os resultados obtidos nas simulações computacionais, pode-se dizer que a metodologia desenvolvida para a detecção e localização de falhas em sistemas mecânicos com variações de parâmetros utilizando observadores de estado apresentou resultados bastante satisfatórios, dando uma motivação muito grande para a realização de análises experimentais. Além disso, pôde-se verificar o desempenho dos valores estimados/reconstruídos pelo observador de estado, pois no caso para uma excitação impulsiva, o  $x_1(t)$  era medido por medição direta, mas foi estimado pelos observadores de estado e seus valores utilizados nas simulações, enquanto que no caso para uma excitação harmônica, o  $x_2(t)$  não era medido por medição direta, sendo reconstruído pelos observadores de estado e seus valores utilizados também nas simulações.

No capítulo 5, a fim de verificar a validade da metodologia desenvolvida através de análises experimentais, montou-se um sistema massa-mola-amortecedor composto por 3 mesas vibratórias.

Neste capítulo, primeiramente determinou-se os parâmetros físicos do sistema mecânico montado, obtendo de acordo com a tabela 19, resultados satisfatórios para os valores de rigidez e amortecimento encontrados.

Partindo-se para a análise experimental para uma excitação impulsiva, as perdas eram dadas pela retirada de lâminas do parâmetro  $k_2$ . Analisando as figuras 46 a 51 e as tabelas 20 e 21, pode-se verificar que os observadores de estado montados detectaram e localizaram as falhas ocasionadas pela retirada destas lâminas a partir do vetor deslocamento  $x_2(t)$  obtido experimentalmente através da aquisição de sinais e do vetor deslocamento  $\hat{x}_2(t)$  reconstruído



pelos observadores de estado considerando medido somente  $x_1(t)$  por medição direta, comprovando assim a validade da metodologia desenvolvida e empregada para este caso.

Considerando a análise experimental para uma excitação harmônica, pode-se também, através das tabelas 22 e 23, verificar que os observadores montados também conseguiram detectar e localizar possíveis falhas no sistema mecânico construído a partir do vetor deslocamento  $x_3(t)$  obtido experimentalmente e do vetor  $\hat{x}_3(t)$  reconstruído pelos observadores considerando medido somente  $x_1(t)$  por medição direta, comprovando para este caso também a validade da metodologia desenvolvida e empregada.

Portanto, analisando os resultados obtidos tanto através de simulações computacionais quanto através de análises experimentais, pode-se dizer que a metodologia desenvolvida para a detecção e localização de falhas em sistemas mecânicos com variações de parâmetros via observadores de estado obteve resultados bastante satisfatórios e pode ser utilizada na maior parte de sistemas mecânicos com variações de parâmetros.





## PROPOSTAS PARA FUTUROS TRABALHOS

- Modelar uma máquina real em funcionamento, como por exemplo, um rotor e/ou uma turbina (onde a matriz de massa não é diagonal), utilizando a metodologia desenvolvida neste trabalho;
- Desenvolver uma metodologia utilizando a técnica dos observadores de estado focalizando sistemas mecânicos não-lineares com variações de parâmetros;
- Desenvolver uma metodologia para detecção e localização de falhas em sistemas mecânicos utilizando observadores de estado de ordem reduzida. Utilizar os mesmos exemplos apresentados neste trabalho e realizar uma comparação com os resultados apresentados neste trabalho a fim de verificar a eficácia das duas metodologias.
- Desenvolver uma metodologia, incluindo no modelo matemático uma trinca, a fim de verificar a evolução da mesma, detectando e localizando as possíveis falhas acarretadas por ela;



## CAPÍTULO 7

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Luenberger, D.G., 1964, "Observing the state of a Linear System", IEEE Transactions on Military Eletronics, Vol MIL-8, pp. 74-80.

Luenberger, D.G., 1966, "Observers for Multivariable Systems", IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. AC-II, nº. 2, pp. 190-197.

Luenberger, D.G., 1971, "An Introduction to Observers", IEEE Transactions on Automatic Control, Vol Ac 16, nº. 6, pp. 596-602.

Wang, S-H, Davison, E.J., Dorato, P., 1975, "Observing the states of systems with unmeasurable disturbances", IEEE Transactions on Automatic Control, pp.716-717.

Clark, R. N., 1978, "Instrument fault detection", IEEE Transactions on Aerospace and Eletronic Systems, Vol.AES-14, nº3, pp.456-465.

Schwarzenbach, J., Gill, K. F., 1978, "System Modelling and Control", Mechanical Engineering Department University of Leeds.





Watanabe, K., Himmelblau D. M., 1982, "Instrument Fault Detection in Systems with Uncertainties", *International Journal of Systems Science*, vol.13, n.2, pp.137-158.

Janssen, K., Frank, P. M., 1984, "Component Failure Detection Via State Estimator", *Preprints of IFAC 9 th World Congress*, vol.1, pp.147-152.

Wang, S.D., Kuo, T. S., Hsu, C. F., 1987, "Optimal-observer design for linear dynamical systems with uncertain parameters", *INT.J.CONTROL*, Vol.45, nº.2, pp. 701-711.

Ge, W., Fang, C. Z., 1987, "Detection of faulty components via robust observation", *Department of Automation, Tsinghua University, Beijing, China*, pp.582-599.

D'azzo, J. J., Houpis, C. H., 1988, "Linear Control System Analysis and Design", São Paulo, McGraw-Hill, Inc, 660p.

Meirovitch, L., 1990, " Dynamics and Control of Structures", Department of Engineering Science and Mechanics Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.

Frank, P.M., Seliger, R., 1991, "Fault Detection and Isolation in Automatic Processes", *Control and Dynamics Systems*, Vol.49, pp. 241-287.

Aldeen, M., Trinh, H., 1994, "Observing a subset of the states of linear systems", *IEE Proc. Control Theory Appl.*, Vol. 141, Nº3, pp.137-144.



Franklin, G.F., Powell, J.D., 1994, "Feedback control of dynamic systems", Third Edition, Abba Enami-Naeini.

Huh, K., Stein, J.L., 1994, "A quatitative performance index for observer-based monitoring systems", Journal of Dinamic Systems, Measurement, and Control, Vol.116, pp.487-497.

Huh, K., Stein, J.L., 1995, "Well-Conditioned observer design for observer-based monitoring systems", Journal of Dinamic Systems, Measurement, and Control, Vol.117, pp.592-599.

Elmas, C., De La Parra H. Z., 1996, "Application of a full-order extended Luenberger Observer for a position sensorless operation of a switched reluctance motor drive", IEE Proceedings Control Theory and Applications, vol.143, n.5, pp.401-480.

Pederiva, R., Melo, G., 1997, "Diagnose de falhas através de observadores de estado em sistemas com parâmetros desconhecidos", XIV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica-COBEM 97.

MATLAB, The language of technical computing, Version 5.2, Copyright 1984-1998, The MathWorks Inc. All rights reseved.

FORTTRAN, Microsoft Fortran PowerStation 4.0, Copyright 1994-1995.





Trinh, H., Aldeen, M., 1998, "A reduced-order state observer for large-scale discrete-time systems", Pergamon, Computers Electric. Engng, pp.301-309.

Melo, G.P., 1998, "Detecção e Localização de Falhas via Observadores de Estado de Ordem Reduzida", Campinas,; Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1998. 125p. Tese (Doutorado).

Ogata, K., 1998, "Engenharia de Controle Moderno", Universidade de Minnesota, Editora Prentice-Hall do Brasil LTDA.

Park, J.K., Shin, D.R., Chung, T.M., 2001, "Dynamic observers for linear time-invariant systems", Automatica, pp.1-5.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS COMPLEMENTAR

Willsky, A. S., 1976, "A Survey of Design Methods for Failure Detection Systems", Automatica, vol.12, pp.601-611.

Basilo, G., Marro, G., 1969, "On the Observability of Linear, Time-Invariant Systems with Unknown Inputs", Journal of Optimization Theory and Applications, vol.3, n.6, pp.410-415.



Clark, R.N., Setzer, W., 1980, "Sensor Fault Detection in a System with random disturbances", IEEE Transactions on Aerospace and Electronics systems, Vol.AES-16, N°. 14, pp. 468-473.

Howell, J., 1994, "Model-based Fault Detection in Information Poor Plants", Automatica, vol.30, n°.6, pp 929-943.

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.

Inouye, Y., Suga, Y., 1994, "Identification of Linear Systems with Noisy Input Using Input-Output Cumulants", International Journal of Control, Vol.59, n°.5. pp.1231-1253.

Park, J., Rizzoni, G., 1994, "A new interpretation of fault detection filter- Part 1. The Optimal detection filter", Int. J. Control, Vol.60, N°5, pp767-787.

Park, J., Rizzoni, G., 1994, "A new interpretation of fault detection filter- Part 2. Closed-form algorithm", Int. J. Control, Vol.60, N°5, pp767-787.

Liu, B., Si, J., 1994, "Fault isolation filter design for linear time invariant systems", IEEE Transactions on Automatic Control, Vol.42, N°5, pp.704-707.

Chen, J.; Patton, R. J., 1996, "Optimal Filtering and Robust Fault Diagnosis of Stochastic Systems with Unknown Disturbances", International Journal of Control, Vol. 143, n°.1, pp.31-36.





Yu, D., Shields, D.N., 1996, "A bilinear fault detection observer", Pergamon, Vol. 32, N° 11, pp.1597-1602.

Wang, H., Daley, S., 1996, "Actuator fault diagnosis: An Adaptative Observer-based technique", IEEE Transactions on automatic control, Vol.41, N°7, pp. 1073-1078.

Lalanne, M., Berthier, P., Der Hagopian, J., "Mechanical Vibrations for Engineers", Wiley-Interscience Publication, pp. 146-179.

Isermann, R., 1997, "Supervision, Fault-Detection and Fault-Diagnosis Methods, An Introduction", Control Eng. Practice, Vol. 5, N° 5, pp. 639-652.

Shen, L.C., Hsu, P.L., 1998, "Robust design of fault isolation observers", Pergamon, Automatica, Vol. 34, N° 11, pp. 1421-1429.

Tu, J.F., Stein, J.L., 1998, "Model error compensatin for observer design", Int. J. Control, Vol. 69, N° 2, pp. 329-345.

Linker, R., Gutman, P.O., Seginer, I., 2001, "Observer-based robust failure detection and isolation in greenhouses", Control Engineering Practice, Pergamon, pp.1-13.

Choi, H.H., 2001, "Variable struture output feedback control design for a class of uncertain dynamic systems", Automatica, Vol. 38, pp.335-341.

Mahmound, M.S., Khalil, H.K., 2001, "Robustness of high-gain observer-based non-linear controllers to unmodeled actuators and sensors", Automatica, 38, pp. 361-369.







**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"**

**Câmpus de Ilha Solteira  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica  
Av. Brasil Centro, 56  
15385-000 Ilha Solteira - SP  
[www.dem.feis.unesp.br](http://www.dem.feis.unesp.br)**

