

# UTILIZAÇÃO DE OBSERVADORES DE ESTADO E ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS NA LOCALIZAÇÃO DE FALHAS

**Gilberto Pechoto de Melo**

**Gilson Ferreira de Lemos**

**Guilherme Fabiano Mendonça dos Santos**

UNESP/Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Departamento de Engenharia Mecânica.  
Av. Brasil Centro 56, CEP 15385-000. Ilha Solteira, S.P. E-mail: gilberto@dem.feis.unesp.br

## Resumo

Em alguns sistemas mecânicos, há a necessidade de um monitoramento constante, devido às suas particularidades e probabilidades de falhas maiores. Com o auxílio de modelos teóricos bem definidos, alguns métodos de identificação de parâmetros, observadores de estado e auxílio à decisão é possível monitorar os parâmetros dos sistemas, fazendo-se assim uma supervisão periódica evitando possíveis falhas ou sanando-as o mais rápido possível. Neste trabalho, desenvolve-se uma metodologia para detecção e localização de falhas utilizando uma combinação das propostas feitas por Ibrahim, Fourier e Luenberger, através da resposta transiente de sistemas. Ibrahim e Fourier apresentam técnicas de identificação de parâmetros no domínio do tempo e Luenberger apresenta os observadores de estado, que podem reconstruir os estados não medidos ou os valores provenientes de pontos de difícil acesso no sistema. Neste caso, pode-se detectar falhas nestes pontos sem fazer suas medidas, podendo monitorá-las através das reconstruções dos estados

**Palavras-chave:** Identificação de Parâmetros, Detecção de Falhas, Observadores de Estado, Séries de Fourier

## 1. INTRODUÇÃO

A ciência tem dedicado especial atenção nos últimos anos à construção de modelos matemáticos capazes de representar o comportamento dinâmico dos mais variados tipos de sistemas. Particularmente, no caso dos sistemas mecânicos vibratórios, tem-se que descrever matematicamente seu comportamento dinâmico, partindo de modelos físicos preestabelecidos. Desta forma, escreve-se as chamadas equações do movimento, com base nas leis básicas que regem os fenômenos envolvidos. A análise dinâmica, feita em seguida, depende da integração de tais equações, o que pode ser feito tanto por métodos analíticos como numéricos. Assim, passa-se a conhecer a resposta do sistema a diferentes tipos de excitação, sendo possível, daquilo que se aprendeu na análise, elaborar recomendações de projeto, penetrando-se dentro da engenharia propriamente dita. Entretanto, é comum, nas equações diferenciais representativas dos Sistemas dinâmicos, alguns ou vários parâmetros serem desconhecidos, geralmente pela impossibilidade ou inviabilidade de obtenção de seus valores através de medidas diretas das grandezas físicas que eles representam dentro do modelo. É dentro do contexto acima que recorre-se a técnicas de identificação de parâmetros como visto em Ibrahim (1973 e 1977) e (Melo & Steffen, 1994), onde procura-se determinar os valores desconhecidos, pela manipulação dos sinais de excitação e de resposta e das variáveis de estado do sistema. Em anos recentes, tem-se desenvolvido vários métodos para a

identificação de parâmetros de sistemas dinâmicos utilizando funções ortogonais. Os processos de identificação a partir destes tipos de funções começam com a construção de uma matriz operacional para a integração de vetores de bases ortogonais, o que permite a conversão de um conjunto de equações diferenciais em um conjunto de equações algébricas que é então resolvido para se obter os parâmetros desconhecidos, sendo que o método utilizado neste trabalho via funções ortogonais emprega funções de Fourier e opera no domínio do tempo.

Há aproximadamente duas décadas que o problema de detecção de falhas tem sido estudado extensivamente na literatura, basicamente utilizando técnicas através de observadores de estado e/ou métodos de estimação de parâmetros verificados em Luenberger (1971 e 1979) e Isermann (1995). Quanto a utilização destas metodologias utilizando modelos em sistemas de controle ou para detecção de falhas em sensores e instrumentos, pode-se mencionar algumas mais utilizadas: observadores de Luenberger, observadores dedicados, detecção através de filtros, consistência de espaço, observadores robustos para entradas desconhecidas citados em Minamide *et al* (1997) e em Huh & Stein (1994 e 1995). Neste trabalho a detecção de falhas é verificada em sistemas transientes utilizando as técnicas de Ibrahim, Fourier e Observadores de Estado.

## 2. MÉTODOS UTILIZADOS PARA DETECÇÃO DE FALHAS

### 2.1 Método dos Observadores de Estado

Para um sistema linear, invariante no tempo tem-se:

$$\{\dot{x}(t)\} = [A]\{x(t)\} + [B]\{u(t)\} + [G]\{w(t)\} \quad (2.1)$$

$$\{y(t)\} = [C_{me}]\{x(t)\} + [D]\{u(t)\} + \{v(t)\} \quad (2.2)$$

Onde  $[A] \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ,  $[B] \in \mathbb{R}^{n \times p}$ ,  $[C_{me}] \in \mathbb{R}^{k \times n}$ ,  $[D] \in \mathbb{R}^{k \times p}$ ,  $[G] \in \mathbb{R}^{n \times i}$ ;  $n$  a ordem do sistema,  $p$  o número de entradas ( $u$ ),  $k$  o número de saídas ( $y$ ) e  $i$  o número de entradas ruidosas ( $w$ ).  $w$  e  $v$  têm a seguinte matriz de covariância:  $E(w) = E(v) = [0]$ ;  $E(ww') = [Q]$ ;  $E(vv') = [R]$  e  $E(wv') = [0]$ , onde  $[Q] \in \mathbb{R}^{i \times i}$  e  $[R] \in \mathbb{R}^{k \times k}$

Um Observador de Estado para este sistema é dado por:

$$\{\bar{\dot{x}}(t)\} = [A]\{\bar{x}(t)\} + [B]\{u(t)\} + [L] (\{y(t)\} - \{\bar{y}(t)\}) \quad (2.3)$$

$$\{\bar{y}(t)\} = [C_{me}]\{\bar{x}(t)\} \quad (2.4)$$

onde  $[L]$  é a matriz do observador (Bhattacharayya, 1995). O erro de estimação de estado fica:

$$\{e(t)\} = \{\bar{x}(t)\} - \{x(t)\} \quad (2.5)$$

e o erro de estimação na saída (resíduo):

$$\{\varepsilon(t)\} = \{\bar{y}(t)\} - \{y(t)\} \quad (2.6)$$

Substituindo as equações (2.1), (2.2), (2.3) e (2.4) em (2.5) e (2.6) tem-se:

$$\{\dot{e}(t)\} = ([A] - [L][C_{me}])\{e(t)\} + [L][D]\{u(t)\} + [L]\{v(t)\} - [G]\{w(t)\} \quad (2.7)$$

### 2.1.1 Índices de Performance e Condicionamento das Matrizes dos Observadores

O objetivo é analisar índices de performance, obtidos através da teoria de norma de matrizes, que avaliem os efeitos que levam um observador de estado a se tornar mal condicionado e determinar um índice principal que seja utilizado como referência. Os índices de performance são índices obtidos através da análise da norma da matriz dos autovetores do sistema analisado. Se o valor deste Índice é próximo da unidade, o Sistema é dito bem condicionado, caso contrário é dito mal condicionado. Este mal condicionamento das matrizes acarreta em uma sensibilidade elevada em relação a perturbações e erros de ordem numérica na resolução do sistema de equações diferenciais (Ge & Fang, 1988).

Simplificando-se a equação (2.7) para análise transiente quanto aos ruídos presentes tem-se:

$$\{\dot{e}(t)\} = ([A] - [L][C_{me}]) \{e(t)\} = [A_2] \{e(t)\} \quad (2.8)$$

onde  $[A_2] = [A] - [L][C_{me}]$ . Para caracterizar o modo transiente do observador para o erro de estimação inicial desconhecido  $e(0) = x(0) - \bar{x}(0)$ , a matriz do observador  $[A_2]$  pode ser decomposta utilizando o método de decomposição de valores singulares, (Huh & Stein, 1994):

$$[A_2] = [U_{A2}] [\Sigma_{A2}] [V_{A2}]^T \quad (2.9)$$

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

$$[U_{A2}] = [\{u_1\} \{u_2\} \{u_3\} \dots \{u_n\}]_{A2} \quad [V_{A2}] = [\{v_1\} \{v_2\} \{v_3\} \dots \{v_n\}]_{A2}$$

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

Utilizando as equações (2.8) e (2.9) e Huh & Stein, 1995, pode-se descrever o índice  $k_2[A_2]$ , que é a condição da matriz do observador  $[[A] - [L][C_{me}]$  em termos da norma  $L_1$ :

$$k_1[R] = \|R\|_1 \|R^{-1}\|_1 \quad (2.10)$$

## 2.2 MÉTODO DE IBRAHIM

Esse método de identificação é desenvolvido no domínio do tempo e são utilizadas as seguintes equações de movimento:

$$[M]\{\ddot{X}(t)\} + [C]\{\dot{X}(t)\} + [K]\{X(t)\} = \{F(t)\} \quad (2.11)$$

onde  $[M]$  é a matriz massa,  $[C]$  amortecimento e  $[K]$  rigidez. Em equações de estado tem-se:

$$\{\dot{x}(t)\} = [A]\{x(t)\} + [B]\{F(t)\} \quad (2.12)$$

$$\{x(t)\} = \begin{bmatrix} \{X(t)\} \\ \{\dot{X}(t)\} \end{bmatrix}; \quad [A] = \begin{bmatrix} [0] & [I] \\ -[M]^{-1}[K] & -[M]^{-1}[C] \end{bmatrix}; \quad [B] = \begin{bmatrix} [0] \\ [M]^{-1} \end{bmatrix}. \text{Na resposta livre tem-se:}$$

$$\{\dot{x}(t)\} = [A]\{x(t)\} \quad (2.13)$$

Os parâmetros desconhecidos em [A], são determinados notando que em qualquer instante de tempo, a equação (2.13) é satisfeita. Assim tomando as velocidades, acelerações e deslocamentos em dois instantes de tempo a equação resultará em um sistema de equações diferenciais de coeficientes constantes. Pós multiplicando-a por  $\{x(t)\}^{-1}$ , tem-se:

$$[A] = \{\dot{x}(t)\}\{x(t)\}^{-1} \quad (2.14)$$

### 2.3 MÉTODO DAS SÉRIES DE FOURIER

O método de identificação utilizando as Séries de Fourier pode ser resumido em três etapas fundamentais:

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

Para sistemas mecânicos com vários (n) graus de liberdade, o movimento pode ser representado pela equação matricial (2.13), onde

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

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

A equação de movimento (2.11) pode ser rearranjada utilizando-se formulação de estado, e integrando duas vezes segue:

$$\begin{bmatrix} \int_0^t \{x(\tau)\} d\tau \\ 0 \\ \{x(t)\} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \{0\} \\ \{x(0)\} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \{x(0)\} \\ \{\dot{x}(0)\} \end{bmatrix} t + [A] \begin{bmatrix} \int_0^t \int_0^\tau \{x(\tau)\} d\tau^2 \\ 0 \\ \int_0^t \{x(\tau)\} d\tau \end{bmatrix} - [A] \begin{bmatrix} \{0\} \\ \{x(0)\} \end{bmatrix} t = [B] \left\{ \int_0^t \int_0^\tau \{f(\tau)\} d\tau^2 \right\} \quad (2.15)$$

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

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

$$\{f_i(t)\} = \{F_i\} \{\Phi(t)\}, i = 1, n \quad (2.16)$$

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

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

$$\Phi_n(t) = \cos(2z\pi/T), z=0, 1, 2, 3, \dots, r, \quad \text{e} \quad \Phi_n^*(t) = \sin(2z\pi/T), z=0, 1, 2, 3, \dots, r$$

e r o número de termos retidos na série de Fourier. Desta forma é possível escrever:

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

$$\{f(t)\}_{nx1} = [F]_{n \times r}^T \{\Phi(t)\}_{r \times 1} \quad (2.17)$$

sendo  $r_2 = 2r+1$  onde  $[X] = [ \{X_1\} \quad \{X_2\} \quad \dots \quad \{X_n\} ]$  e  $[F] = [ \{F_1\} \quad \{F_2\} \quad \dots \quad \{F_n\} ]$

Substituindo-se as equações (2.17) na equação (2.15) tem-se:

$$\begin{bmatrix} \int_0^t [X]^T \{\Phi(\tau)\} d\tau \\ [X]^T \{\Phi(t)\} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \{x(0)\}t \\ \{x(0)\} + \{\dot{x}(0)\}t \end{bmatrix} + [A] \begin{bmatrix} \int_0^t \int_0^t [X]^T \{\Phi(\tau)\} d\tau^2 \\ \int_0^t [X]^T \{\Phi(\tau)\} d\tau \end{bmatrix} - [A] \begin{bmatrix} \{0\} \\ \{x(0)\} \end{bmatrix} t = \\ [B] \left\{ \int_0^t \int_0^t [F]^T \{\Phi(\tau)\} d\tau^2 \right\} \quad (2.18)$$

A seguir, a propriedade integral do vetor  $\{\Phi(t)\}$  das séries ortogonais é aplicada à equação (2.18).

$$\int_0^t \dots \int_0^t \{\Phi(\tau)\} (d\tau)^n = [P]^n \{\Phi(t)\} \quad (2.19)$$

onde  $[P]$  é uma matriz operacional de integração (Melo & Steffen, 1994). Tem-se, portanto:

$$\begin{bmatrix} [X]^T [P] \\ [X]^T \end{bmatrix}_{2NXr_2} - \begin{bmatrix} \{x(0)\} \{j_1\}^T [P] \\ \{x(0)\} \{j_1\}^T + \{\dot{x}(0)\} \{j_1\}^T [P] \end{bmatrix}_{2nxr_2} + [A] \begin{bmatrix} [X]^T [P]^2 \\ [X]^T [P] \end{bmatrix}_{2nxr_2} \\ - [A] \begin{bmatrix} \{0\} \\ \{x(0)\} \end{bmatrix}_{2nxr_2} \{j_1\}^T [P] = [B] [F]^T [P]^2_{nxr_2} \quad (2.20)$$

onde  $\{j_1\}^T_{r_2} = [1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \dots 0]$  Da equação (2.20) tem-se:

$$[A] [D] - [B] [G] = [E] \quad (2.21)$$

onde  $[G] = [[F]^T [P]^2]_{nxr_2}$ ,  $[D] = \begin{bmatrix} [X]^T [P]^2 \\ [X]^T [P] - \{x(0)\} \{j_1\}^T [P] \end{bmatrix}_{2nxr_2}$  e

$[E] = \begin{bmatrix} (\{x(0)\} \{j_1\}^T - [X]^T) [P] \\ \{x(0)\} \{j_1\}^T + \{\dot{x}(0)\} \{j_1\}^T [P] - [X]^T \end{bmatrix}_{2nxr_2}$  Tem-se, portanto:

$$[J]^T [H]^T = [E]^T \quad (2.22)$$

onde  $[H] = [[A] \quad \vdots \quad -[B]]_{2nx3n}$  e  $[J] = \begin{bmatrix} [D] \\ [G] \end{bmatrix}_{3nxr_2}$

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

$$[H]^T = ([J][J]^T)^{-1}[J][E]^T \quad (2.23)$$

### 3. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

#### 3.1 Sistema Massa - Mola - Amortecedor - 3 Graus de Liberdade

Na figura abaixo é apresentado um Sistema massa - mola - amortecedor.

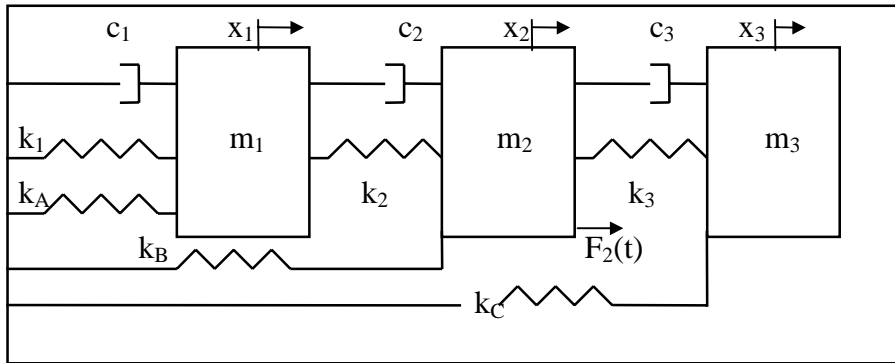


Figura 3.1 - Sistema Massa - Mola - Amortecedor com 3 Graus de Liberdade

As equações de movimento são:

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

Os valores numéricos para o sistema analisado são:

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

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

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

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

#### A – Método das Séries de Fourier

Os valores dos parâmetros físicos teóricos e identificados são apresentados na tabela 3.1, juntamente com os parâmetros identificados quando é simulada uma redução de 10% na rigidez  $K_2$ . A diferença relativa é referente aos valores teóricos e o método com falha na rigidez.

	Teórico	Fourier sem falha	Fourier 90% $K_2$	Dif. Relativa%
Freq.Nat. $f_1$ (Hz)	51.28	51.11	50.83	0.01
Freq.Nat. $f_2$ (Hz)	31.89	31.92	31.00	2.79
Freq.Nat. $f_3$ (Hz)	15.52	15.48	15.32	1.28
$K_1$ (N/m)	35877.00	35422.21	35678.44	0.05
<b><math>K_2</math> (N/m)</b>	<b>49711.00</b>	<b>50016.54</b>	<b>44877.32</b>	<b>9.72</b>
$K_3$ (N/m)	56628.00	57137.88	57117.97	0.08
$C_1$ (Ns/m)	40.00	38.95	39.01	2.47
$C_2$ (Ns/m)	70.00	68.26	69.03	1.38
$C_3$ (Ns/m)	30.00	29.68	29.59	1.37

Tabela 3.1 - Valores dos Parâmetros Identificados e Teóricos– Método das Séries de Fourier

## B – Método de Ibrahim

	Teórico	Ibrahim sem falha	Ibrahim 90% K <sub>2</sub>	Dif. Relativa%
Freq.Nat.f <sub>1</sub> (Hz)	51.28	51.18	50.42	0.01
Freq.Nat.f <sub>2</sub> (Hz)	31.89	31.87	31.09	2.44
Freq.Nat.f <sub>3</sub> (Hz)	15.52	15.50	15.34	1.03
K <sub>1</sub> (N/m)	35877.00	35755.73	35688.53	0.19
<b>K<sub>2</sub> (N/m)</b>	<b>49711.00</b>	<b>49815.32</b>	<b>43945.88</b>	<b>11.78</b>
K <sub>3</sub> (N/m)	56628.00	56784.91	57327.02	0.09
C <sub>1</sub> (Ns/m)	40.00	38.43	38.67	0.08
C <sub>2</sub> (Ns/m)	70.00	69.45	68.38	1.54
C <sub>3</sub> (Ns/m)	30.00	29.83	29.19	2.14

Tabela 3.2 - Valores dos Parâmetros Identificados e Teóricos - Método de Ibrahim

O sistema mecânico apresentado na figura 3.1 é excitado apenas com condições iniciais de deslocamento e velocidade para uma análise transiente do comportamento do observador de estado utilizado na detecção e localização de falhas. Foram utilizados 512 pontos amostrados, em um intervalo de tempo total de 0.7 segundos. Os valores das condições iniciais foram:  $x_1(0) = 0.025\text{m}$ ,  $x_2(0) = 0.000$ ,  $x_3(0) = 0.000$ ,  $\dot{x}_1(t) = 3.000\text{ m/s}$ ,  $\dot{x}_2(t) = 0.000\text{ m/s}$  e  $\dot{x}_3(t) = 0.000\text{ m/s}$ .

## C – Método dos Observadores de Estado

A equação de medidas é  $[C_{me}] = [1\ 0\ 0]$  com  $x_2$ ,  $x_3$  não mensuráveis. Utiliza-se somente os valores de  $x_3(t)$ , considerando-se  $x_1(t)$  o único valor existente e  $x_2(t)$  e  $x_3(t)$  reconstruídos através dos observadores de estado. Neste caso são considerados elementos sujeitos a falhas:  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ,  $c_1$ ,  $c_2$  e  $c_3$ . Provocando uma falha em  $K_2$ , através de uma diminuição de 10% de sua rigidez, obtém-se os valores da tabela 3.3 que são as diferenças dos valores RMS sistema real e dos observadores global e robustos aos parâmetros sujeitos a falhas.

	Sistema Real sem falhas	Sistema Real com 90 % k <sub>2</sub>
Observador Global	.3805020E-07	.4352630E-03
Observador Robusto a k <sub>1</sub>	.3399298E-03	.4539927E-03
<b>Observador Robusto a k<sub>2</sub></b>	<b>.2587215E-03</b>	<b>.2875644E-05</b>
Observador Robusto a k <sub>3</sub>	.1324463E-03	.1687948E-03
Observador Robusto a c <sub>1</sub>	.1997163E-03	.1334900E-03
Observador Robusto a c <sub>2</sub>	.5394031E-04	.2891130E-03
Observador Robusto a c <sub>3</sub>	.4774402E-04	.2619044E-03

Tabela 3.3 - Diferença dos Valores RMS de  $x_3(t)$  - Falhas em  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_B$

A 1.<sup>a</sup> coluna da tabela 3.3 apresenta a diferença entre valores RMS do deslocamento do sistema real sem falhas e dos observadores global e robustos aos parâmetros. A análise é feita com o parâmetro  $k_2$  em falha (2.<sup>a</sup> coluna). Na 1.<sup>a</sup> coluna e 1.<sup>a</sup> linha da tabela 3.3, verifica-se que a diferença do valor RMS de  $x_3(t)$  entre o observador global e o sistema real sem falhas é da ordem de  $10^{-7}$ , aumentando para  $10^{-3}$  quando provocada falha no parâmetro  $k_2$ . Neste caso, há um distanciamento das curvas e consegue-se somente detectar que existe alguma falha no sistema, mas não se consegue localizar a mesma. Na 2.<sup>a</sup> linha da tabela 3.3 (1.<sup>a</sup> e 2.<sup>a</sup> colunas), a diferença dos valores RMS de  $x_3(t)$  entre o observador robusto a  $k_1$  e o sistema real sem falhas é da ordem de  $10^{-3}$ , permanecendo na mesma ordem de grandeza quando provocada uma redução de 10% no parâmetro  $K_2$ . Quando é analisado o observador robusto a  $k_2$ ,

verifica-se que a ordem de grandeza caiu de  $10^{-3}$  para  $10^{-5}$ , havendo grande probabilidade da falha estar no parâmetro  $K_2$ , mas todos os elementos sujeitos a falhas devem ser analisados. A análise continua da mesma forma até a verificação de todos os parâmetros sujeitos a falhas ( $k_3$ ,  $c_1$ ,  $c_2$  e  $c_3$ ). No caso específico, foi encontrado somente o parâmetro  $k_2$  com aproximação tão significativa de curvas, pois nos outros parâmetros as diferenças dos valores RMS entre os observadores robustos a  $k_1$ ,  $k_3$ ,  $c_1$ ,  $c_2$  e  $c_3$  e o sistema real sem falhas permaneceram praticamente inalteradas, quando comparados com os valores obtidos com o sistema real com falha em  $k_2$ . No caso dos observadores robustos a  $k_C$  e  $c_2$  aconteceu um afastamento das curvas ( da ordem de  $10^{-4}$  para  $10^{-3}$ ).

#### 4. CONCLUSÕES

Foram analisadas duas metodologias de identificação de parâmetros no domínio do tempo e uma de observadores de estado para detecção e localização de falhas em sistemas mecânicos. As três metodologias apresentaram resultados bastante satisfatórios. Através dos resultados obtidos, pode-se concluir que o método dos observadores de estado apresenta maior rapidez na análise e acompanhamento da curva de tendências de falhas, tendo em vista que uma pequena diminuição da rigidez provoca uma alteração significativa na amplitude do movimento. Uma análise interessante a ser feita em trabalhos futuros seria verificar, em um sistema experimental, qual das metodologias responderia mais rapidamente a alterações gradativas de rigidez.

#### 5. REFERÊNCIAS

- Bhattacharaya S. P., 1995, "The Structure of Robust Observers", IEEE Transactions of Automatic Control, vol.AC-21, pp. 581-588.
- Ge, W. & Fang, C. Z., 1988, "Detection of Faulty Components via Robust Observation", International Journal of Control, vol.47, n.2, pp. 581-599.
- Hou, M. & Muller, P. C., 1995, "Design of a Class of Luenberger Observers for Descriptor Systems", IEEE Transactions on Automatic Control, vol.40, n.º.1, pp 133-135.
- Huh, K. & Stein, J. L.,1995, "Well-conditioned Observer Design for Observer-Based Monitoring Systems", Transactions of the Asme, vol. 117, pp 592-599.
- Huh, K. & Stein, J. L., 1994, "A Quantitative Performance Index for Observer-Based Monitoring Systems", Journal of Dynamic Systems, and Control, vol. 116, pp 487-497.
- Ibrahim, S. R. and Mikulcik, E. C.,1973; "A Time Domain Modal Vibration Test Technique", The Shock and Vibration Bulletin,47: pp 21-37.
- Ibrahim, S. R. and Milkulcik, E. C.;1977, "A Method for the Direct Identification of Vibration Parameters from Free Response", The Shock and Vibration Bulletin, 47: 183-198.
- Isermann, R., 1995, "Fault Detection and Diagnosis - Methods and Applications", Proceedings of 2<sup>nd</sup> International Symposium of Acustical and Vibratory Surveillance Methods and Diagnostic Techniques, Senlis (France), vol. 2, pp 777-792/5.
- Luenberger, d. G., 1971, "An Introduction to Observers", IEEE Transactions on Automatic Control, vol ac16, n.º.6, pp. 596-602.
- Luenberger, d. G., 1979, "Introduction to Dynamic Systems". Theory, Models, & Applications, New York, Chichester, Toronto, John Wiley & Sons, 445p.
- Melo, G. P. & Steffen JR., V.,1994, "Mechanical Systems Identification Through Fourier Series Time-Domain Technique", RBCM, Vol. XV, n.º. 2, pp. 124-135.
- Minamide, N.; Fujisaki, Y. & Shimizu, A., 1997, "A Parametrization of All Observers for Descriptor Systems", International Journal of Control, vol. 66, n.5, pp 767-777.

**Agradecimentos: FAPESP, CNPq e FUNDUNESP**