

# LOCALIZAÇÃO DE FALHAS EM SISTEMAS ROTATIVOS UTILIZANDO A METODOLOGIA DOS OBSERVADORES DE ESTADO-ANÁLISE EXPERIMENTAL

**Gilson Ferreira de Lemos**

[lemos@dem.feis.unesp.br](mailto:lemos@dem.feis.unesp.br)

**Gilberto Pechoto de Melo**

[gilberto@dem.feis.unesp.br](mailto:gilberto@dem.feis.unesp.br)

Departamento de Engenharia Mecânica – UNESP – Ilha Solteira, Av. Brasil Centro, n.º 56, Ilha Solteira, São Paulo, Cep.: 15385-000, Brasil.

**Resumo** *As máquinas rotativas são equipamentos utilizados em diversos tipos de indústrias (aeronáutica, de geração de energia etc.). Uma quebra repentina de um equipamento deste tipo decorre em perdas econômicas, inconvenientes aos usuários de serviços ou até mesmo a perdas de vidas humanas, dependendo do equipamento em questão. Para evitar tais problemas é necessário que se possua um aparato que possa informar sobre a existência de falhas nestes equipamentos, bem como sobre a evolução destas ao longo do tempo de funcionamento, monitorando-as. Os principais tipos de danos em eixos rotativos são os defeitos localizados (alterações de rigidez dos mancais) e as falhas transversais (Cracks). Este trabalho apresenta uma análise experimental de um sistema de rotores com presença de falha localizadas no sistema. Para a caracterização da presença das falhas, a metodologia utilizada consiste em avaliar a alteração de rigidez gerada pela presença da mesma. A modelagem do sistema é feita utilizando-se a metodologia dos elementos finitos juntamente com a técnica das impedâncias mecânicas. Como estratégia de identificação e localização da falha, é utilizada a metodologia dos observadores de estado. A técnica utilizada tem a capacidade de reconstruir os estados não medidos do sistema, ou as medidas de pontos de difícil acesso no sistema, podendo desta forma localizar defeitos em pontos do sistema sem a necessidade de sua medição direta. Os parâmetros de interesse sujeitos a falhas no sistema são escolhidos, projetando-se um observador de estado global para detectar a irregularidade e um conjunto de observadores de estado robustos para a localização da irregularidade.*

**Palavras-chave:** Observadores de estado, Rotor, elementos finitos, Localização de Falhas.

## 1. INTRODUÇÃO

Um dos fatores de interesse das indústrias no desenvolvimento de novas técnicas de detecção e localização de falhas é a preocupação com a segurança de seus sistemas, assim, novas técnicas de detecção e localização de falhas tem surgido para garantir a segurança dos sistemas, evitando paradas repentinas durante operação.

A metodologia dos observadores de estado tem a capacidade de reconstruir os estados não medidos ou os pontos de difícil acesso do sistema (Luemberger, 1971), desta forma, pode-se detectar e localizar falhas nestes pontos, sem o conhecimento de suas medidas, podendo monitorá-las através da reconstrução de seus estados. Esta técnica consiste em desenvolver um modelo para o sistema em análise e comparar a saída estimada com a saída medida, a diferença entre os dois sinais

apresenta um resíduo que é utilizado posteriormente para análise. A idéia é montar um banco de observadores para supervisionar o processo, onde cada observador é dedicado a um parâmetro físico do sistema (Melo, 1998).

Para a detecção da falha no sistema rotor-suporte-estrutura, primeiramente projeta-se um observador de estado global que detecta possíveis irregularidades, mas sem a capacidade de indicar qual é o parâmetro falho. Para a localização da falha, projetam-se observadores de estado robustos a cada parâmetro físico do sistema sujeito a falha.

Neste trabalho, realiza-se uma verificação experimental de um sistema rotativo (Fig. 1), aplicando a metodologia dos observadores de estado para detecção e localização de falhas

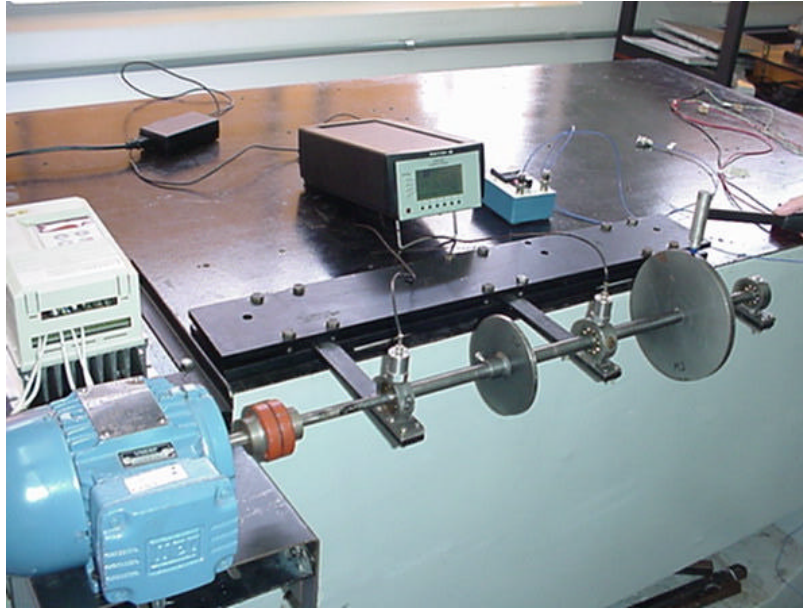


Figura 1. Bancada de testes utilizada.

## 2. METODOLOGIA PARA DETECÇÃO DE FALHAS

### 2.1 Formulação Matemática

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.

$$\{\dot{x}(t)\} = [A]\{x(t)\} + [B]\{u(t)\} \quad (1a)$$

$$\{y(t)\} = [C_{me}]\{x(t)\} + [D]\{u(t)\} \quad (1b)$$

Na qual,  $\{x(t)\}$  é o vetor de estado  $nx1$ ,  $\{u(t)\}$  é o vetor de entrada  $px1$  (vetor de excitação),  $\{y(t)\}$  é o vetor de saída  $kx1$ ,  $[A]$  é a matriz dinâmica do sistema  $nxn$ ,  $[B]$  é a matriz de entradas  $n \times p$ ,  $[C_{me}]$  é a matriz de medidas  $\in \mathbb{R}^{k \times n}$ ,  $[D]$  é matriz de entrada direta  $\in \mathbb{R}^{k \times p}$ , sendo  $n$  a ordem do sistema,  $p$  o número de entradas  $\{u(t)\}$ , e  $k$  o número de saídas  $\{y(t)\}$ .

Um observador para este sistema é dado como:

$$\{\hat{\dot{x}}(t)\} = [A]\{\hat{x}(t)\} + [B]\{u(t)\} + [L]\{\{y(t)\} - \hat{y}(t)\} \quad (2.a)$$

$$\{\hat{y}(t)\} = [C_{me}]\{\hat{x}(t)\} \quad (2.b)$$

Na qual:

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

$\{\hat{y}(t)\}$  é o vetor de saída do observador de estado;

$\{\hat{x}(t)\}$  é o vetor de estado do observador;

## 2.2. Metodologia dos Observadores de Estado.

Muitos sistemas de controle são baseados na suposição de que todo o vetor de estado está disponível para medição direta, mas na prática, nem todas as variáveis de estado estão disponíveis diretamente, necessitando assim estimar as variáveis não medidas.

Em vários sistemas de controle é inviável física e economicamente a instalação de todos os transdutores necessários para a medição de todas as variáveis de estado. No entanto, o projeto de sistemas de controle utilizando observadores de estado pode reconstruir os estados não medidos ou os valores provenientes de pontos de difícil acesso no sistema, contudo, a exigência para esta reconstrução é que todos os estados sejam observáveis (Luemberger, 1971).

A figura 2 apresenta um esquema para detecção e localização de falhas em sistemas mecânicos utilizando a técnica dos observadores de estado, na qual se pode observar a força de excitação  $\{F(t)\}$ , a resposta  $\{y(t)\}$ , o observador de estado global e os observadores robustos aos parâmetros sujeitos a falhas  $S_n$  e a unidade de decisão lógica.

Quando um determinado componente do sistema começa a falhar, o observador de estado global, que é uma cópia do sistema original sente a influencia deste processo rapidamente, pois o mesmo apresenta a mesma resposta do sistema real, desde que este esteja funcionando corretamente. A idéia é utilizar este efeito para detectar a falha no sistema em questão.

Devido à possibilidade de ocorrência de falhas em mais de um parâmetro, constrói-se uma rede de observadores de estado robustos a todos estes parâmetros que estão sujeito à falhas, podendo desta forma localizar a irregularidade presente no sistema (Fig. 2).

A análise de detecção e localização da falhas é realizada na unidade de decisão lógica que coleta e analisa a diferença entre as respostas dos observadores de estado e do sistema real.

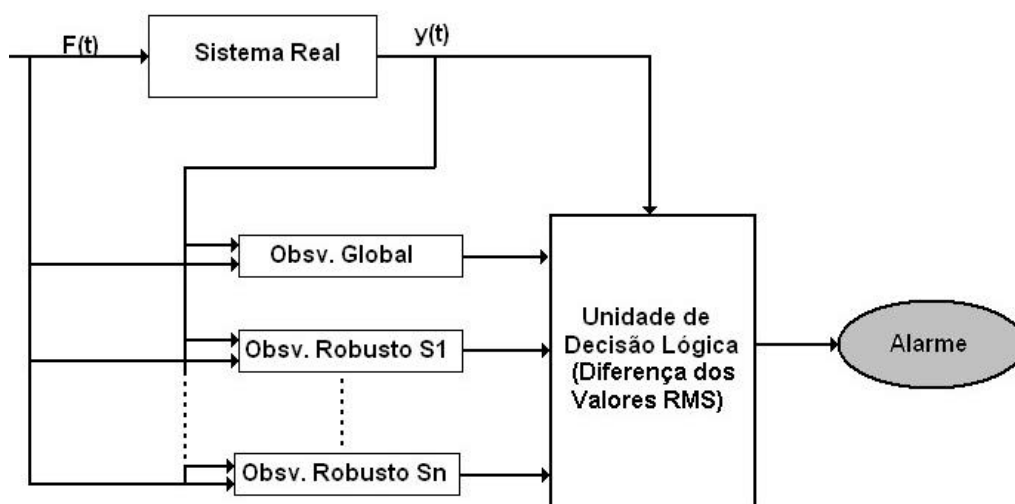


Figura 2 – Esquema de um banco de observadores para detecção e localização de falhas.

De uma forma geral, o desenvolvimento da metodologia para detecção e localização de falhas em sistemas de rotor considerando suas fundações, pode ser resumida da seguinte forma:

- Determinação do modelo matemático do sistema real, obtendo as matrizes  $[M]$ ,  $[C]$ ,  $[K]$  e  $[A]$ ;
- Seleção dos autovalores do sistema;
- Definição da matriz de medidas  $[C_{me}]$ , sendo que o sistema deve ser observável utilizando esta matriz;
- Todos os autovalores do sistema em análise devem ter parte real negativa para garantir estabilidade e rápida convergência;
- Se o sistema não for observável, novas medidas deverão ser feitas para garantir observabilidade, ou seja, deve-se definir outra matriz de medidas  $[C_{me}]$ ;
- Obtenção da matriz  $[L]$  do observador de estado, implementando a fórmula de Ackerman, calculando o ganho ótimo  $[L]$  e verificando a estabilidade do sistema;
- Obtenção da resposta do Observador de estado;
- Detecção e localização de Falhas numa unidade de decisão lógica.

### 3. APLICAÇÃO

Um esquema da montagem experimental utilizada pode ser visualizada na figura 3.

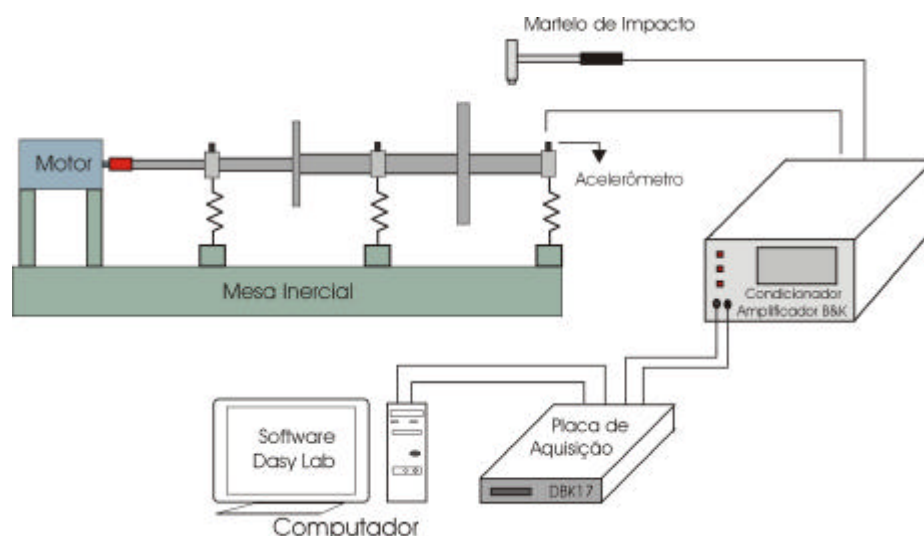


Figura 3 – Esquema da cadeia de medição utilizada.

Considerando a montagem experimental da Fig. 1 como um sistema de rotores discretizado com 5 elementos finitos, onde cada elemento possui dois nós, sendo dois graus de liberdade por nó (rotação e deslocamento), como pode ser visualizado na figura 4. A rigidez do conjunto mancal + fundação é representada por um conjunto de barras engastadas em uma das extremidades e fixadas ao eixo do rotor em sua outra extremidade, como pode ser observado na Fig. 1.

A figura 4 apresenta um esquema do sistema modelado. Os parâmetros físicos do sistema são mostrados na tabela 1.

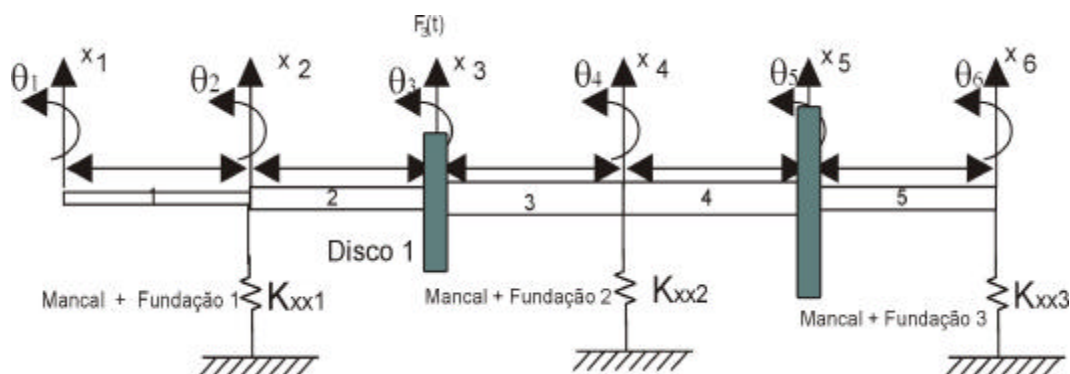


Figura 4. Sistema rotativo discretizado.

Tabela 1. Valores dos parâmetros físicos do sistema rotativo experimental.

<i>Elementos</i>	<i>Valores numéricos</i>
Mancais + Fundação	$K_{xx1} = 4.5047E^{04} \text{ N/m}$ ; $K_{xx2} = 4.1692E^{04} \text{ N/m}$ ; $K_{xx3} = 4.0613E^{04} \text{ N/m}$ ;
Discos	$M_1 = 0,32 \text{ kg}$ ; $M_2 = 1,4 \text{ kg}$ ; $d_1=100\text{mm}$ ; $d_2= 150.00\text{mm}$ ; $e_1=5.00\text{mm}$ ; $e_2=10.00\text{mm}$ .
Eixo	$L_1=10.90\text{mm}$ ; $L_2=11.83\text{mm}$ ; $L_3=12.77\text{mm}$ ; $L_4=11.32\text{mm}$ ; $L_5=11.98\text{mm}$ ; $d_1=10.0\text{mm}$ ; $d_2=14.0\text{mm}$ ; $d_3=15.0\text{mm}$ ; $d_4=15.0\text{mm}$ ; $d_5=14.0\text{mm}$ .

Considerando-se o sistema mostrado na figura 4, excitado com o martelo de impacto, gerando uma força impulsiva de velocidade inicial de 3.5 m/s aplicada no nó 3, medem-se os deslocamentos dos nó 2 e 4. O valor da velocidade inicial gerado pelo impacto do martelo é determinado através de uma conversão de unidades, considerando a sensibilidade do martelo de impacto.

O valor numérico da rigidez do mancal 2 sem falhas pode ser visualizado na tabela 5.1. Para a representação da falha, o mancal 2 foi substituído por um de rigidez igual a  $K_{xx2} = 1.3241e^{04} \text{ N/m}$  (redução de 68.24% de  $K_{xx2}$  sem falha ( $4.1692E^{04}$ )).

Para a aplicação da metodologia para detecção e localização de falhas empregada neste trabalho, há a necessidade de se dispor de um número adequado de medidas para posteriormente reconstruir as demais, desta forma, utilizou-se os valores  $x_2(t)$  e  $x_4(t)$  medidos experimentalmente no sistema e os valores de  $x_3(t)$  e  $\theta_3(t)$  simulados como sendo os valores existentes, reconstruindo-se assim os valores de  $x_1(t)$ ,  $x_5(t)$ ,  $\theta_2(t)$ ,  $\theta_1(t)$ ,  $\theta_4(t)$  e  $\theta_5(t)$  e suas respectivas velocidades através da metodologia dos observadores de estado.

Os resultados obtidos são mostrados nos gráficos das figuras 5 a 12, os quais mostram os valores da velocidade do nó 1 ( $\dot{x}_1(t)$ ). A análise é feita através da comparação entre a curva resposta dos observadores de estado e o sistema real. Primeiramente, compara-se o sistema real sem falha com o observador de estado global, neste caso, as curvas são praticamente coincidentes, como pode ser visto na Fig. 5(A), indicando que o sistema não possui nenhuma irregularidade. Quando é comparado as curvas de resposta do sistema real com falha com a curva de resposta do observador de estado global, percebe-se um distanciamento entre elas, identificando assim a irregularidade. A próxima etapa é a de localização da falha, para isso, compara-se a curva resposta do sistema real com falha com as curvas dos observadores de estado robustos a perdas gradativas de rigidez (Figuras 6 a 12).

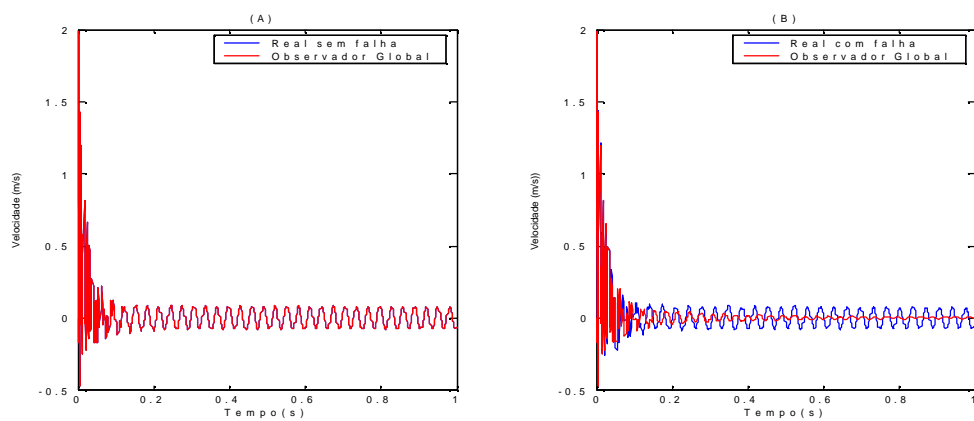


Figura 5 – (A) Sistema real falho x Observador robusto a 5% de  $K_{xx2}$ ; (B) Sistema real falho x Observador robusto a 10% de  $K_{xx2}$ .

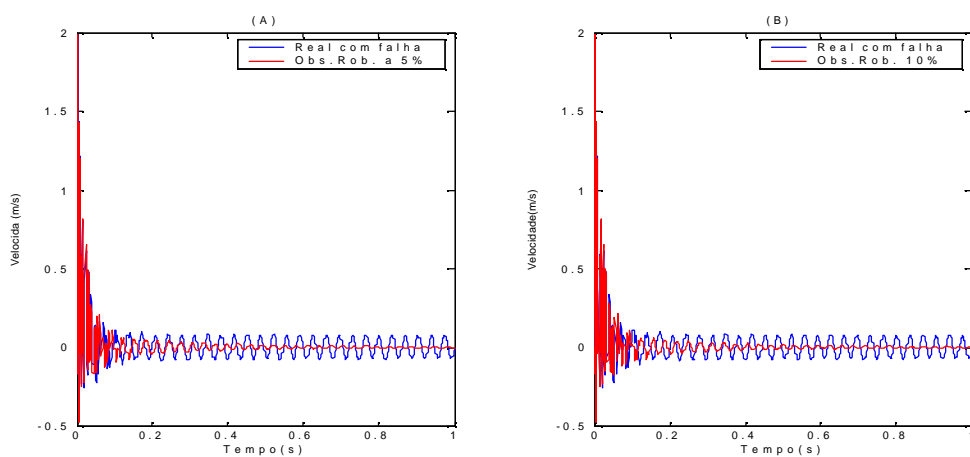


Figura 6 – (A) Sistema real falho x Observador robusto a 5% de  $K_{xx2}$ ; (B) Sistema real falho x Observador robusto a 10% de  $K_{xx2}$ .

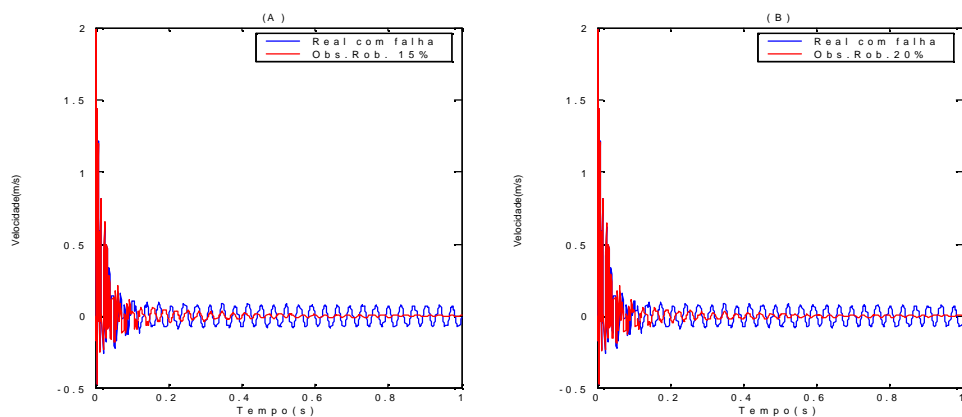


Figura 7 – (A) Sistema real falho x Observador robusto a 15% de  $K_{xx2}$ ; (B) Sistema real falho x Observador robusto a 20% de  $K_{xx2}$ .

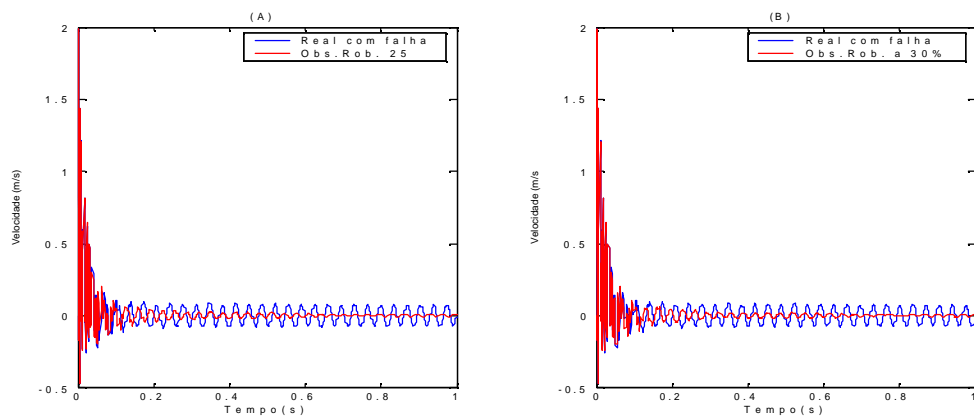


Figura 8 – (A) Sistema real falho x Observador robusto a 25% de  $K_{xx2}$ ; (B) Sistema real falho x Observador robusto a 30% de  $K_{xx2}$ .

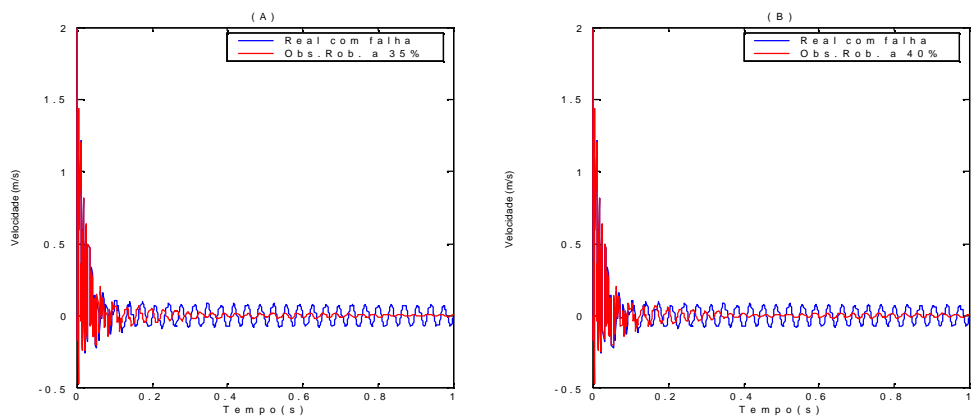


Figura 9 – (A) Sistema real falho x Observador robusto a 35% de  $K_{xx2}$ ; (B) Sistema real falho x Observador robusto a 40% de  $K_{xx2}$ .

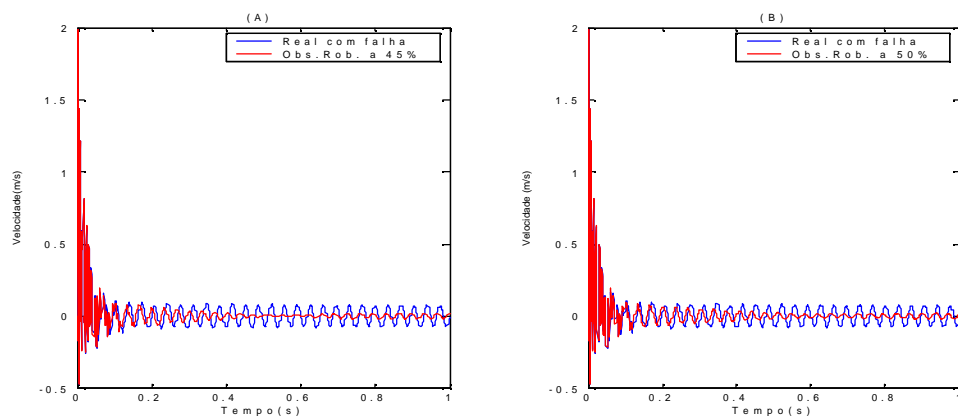


Figura 10 – (A) Sistema real falho x Observador robusto a 45% de  $K_{xx2}$ ; (B) Sistema real falho x Observador robusto a 50% de  $K_{xx2}$ .

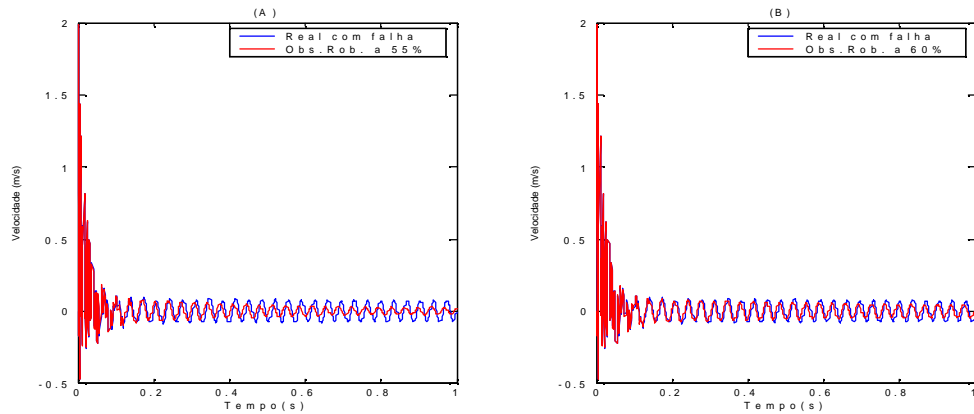


Figura 11 – (A) Sistema real falho x Observador robusto a 55% de  $K_{xx2}$ ; (B) Sistema real falho x Observador robusto a 60% de  $K_{xx2}$ .

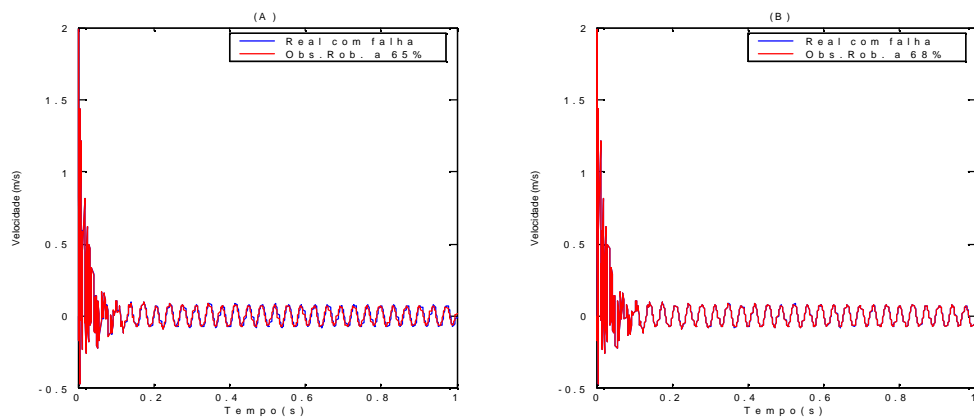


Figura 12 – (A) Sistema real falho x Observador robusto a 65% de  $K_{xx2}$ ; (B) Sistema real falho x Observador robusto a 68% de  $K_{xx2}$ .

Após analisar os gráficos, percebe-se que a figura 12 (B) apresenta a resposta do observador de estado robusto que mais se aproxima da curva do sistema real com falha, localizando desta forma a irregularidade e a severidade da mesma.

## 4. CONCLUSÕES

Foi realizada uma análise transiente do sistema rotativo para a comprovação experimental da metodologia proposta. Nesta etapa, definiu-se primeiramente os parâmetros sujeitos a falha. (mancais) e posteriormente montou-se observadores de estado robustos a perdas gradativas destes parâmetros. Após uma análise gráfica é possível detectar e localizar uma irregularidade presente no sistema (perda de rigidez do mancal 2), como pode ser visualizado nos gráficos 5.8 a 5.15. Uma outra forma de análise é mostrada nas tabelas 5.2 e 5.3, onde se pode verificar que somente o observador de estado robusto dedicado ao parâmetro falho consegue detectar a irregularidade presente.



## **5. AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem à Fapesp (Fundação de Amparo de Pesquisa de São Paulo) pelo suporte financeiro para o desenvolvimento deste trabalho.

## **6. REFERÊNCIAS**

- Luenberger, D. G., “An Introduction to Observers”, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol AC16, n.º.6, pp. 596-602, 1971.
- Melo, G.P. “Detecção e Localização de Falhas via Observadores de Estado de Ordem Reduzida, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica”, Universidade Estadual de Campinas, 125p. Tese (Doutorado) 1998.
- Cavalca, K. L., Bachschmid, N. “Dynamic Behaviour Analysis of Multistage Centrifugal Pumps with Interstage Seals by a Modal Turnction Method”, Journal of The Brazilian Society of Mechanical Sciences, Vol. XV, n.3, pp. 263-280,1993.
- Bonello P., & Brennan, M. J., “Modelling The Dynamic Behaviour Of A Supercritical Rotor On A Flexible Foundation Using The Mechanical Impedance Technique”, Journal of Sound and Vibration, vol. 239, n.º 2, pp. 445-466, 2001.
- Kang, Y., Chang, Y. -P., Tsai, J.-W., Mu, L.-H. and Chang, Y. - F. “An Investigation in Stiffness Effects on Dynamics of Rotor-Bearing-Foundation Systems”, Journal of Sound and Vibration 231(2) pp. 343-374, (2000).
- Lemos, G.F., Melo, G.P., “Fault Detection of Rotor-Support Structure Including Foundation Effects Using Reduced Order State Observer”, XXIV Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil, 2003.
- Lemos, G.F., Melo, G.P., “Fault Detection of Rotor-Support Structure Including Foundation Effects”, 17<sup>th</sup> International Congress of Mechanical Engeneering, Cobem 2003, São Paulo, SP, Brasil, 2003.

## **6. DIREITOS AUTORAIS**

os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

# LOCATION OF FAULTS IN ROTATIVE SYSTEMS USING STATE OBSERVER METODOLOGY – EXPERIMENTAL ANALYSIS

**Gilson Ferreira de Lemos**  
[lemos@dem.feis.unesp.br](mailto:lemos@dem.feis.unesp.br)

**Gilberto Pechoto de Melo**  
[gilberto@dem.feis.unesp.br](mailto:gilberto@dem.feis.unesp.br)

Mechanical/Electrical\* Engineering Department – UNESP – Ilha Solteira, Av. Brasil Centro, n.º 56, Ilha Solteira, São Paulo, ZIP Code.: 15385-000, Brazil.

**Abstract.** *The rotative machines they are equipments used in several types of industries (aeronautics, of generation of energy etc.). A sudden breakdown of an equipment of this type provokes in economic losses, inconveniences to the users of services or even to losses of human lives, depending on the equipment in subject. To avoid such problems it is very important to use tools that can inform about the existence of faults, as well as, about the evolution of these in time. The main types of damages in rotative axes are the located defects (changes stiffness of bearings) and the traverse faults (Cracks). This work presents an experimental analysis of a system of rotors with fault presence located in the system. For the characterization of the presence of the faults, the methodology used consists of evaluating the rigidity alteration generated by the presence of the same. The modeling of the system is made using the methodology of the finite elements together with the technique of the mechanical impedances. How identification strategy and location of the fault, the state observers' methodology is used. The state observers' technique can reconstruct the non-measured states or can estimate the values of points of difficult access in the system of the rotor. Thus, the faults at these points can be detected without the knowledge of measured data, monitoring them through the reconstructions of their states. The parameters of interest subjects to fault in the system are chosen, projecting an observer of global state to detect the irregularity and a group of robust state observers for the location of the irregularity.*

**Keywords:** *State Observers, Rotor, Finite Elements, Location of Faults.*