

DIAGNOSE DE FALHAS SIMULTÂNEAS EM SUSPENSÃO VEICULAR VIA OBSERVADORES DE ESTADO

Álvaro Fernando Gonçalves Crespo

afgcrespo@aluno.feis.unesp.br

Aldemir Aparecido Cavalini Junior

aacjunior@aluno.feis.unesp.br

Gilberto Pechoto de Melo

gilberto@dem.feis.unesp.br

Departamento de Engenharia Mecânica – GMSINT (Grupo de Materiais e Sistemas Inteligentes)
UNESP/FEIS - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Av. Brasil nº56, centro, CEP 15385-000

Resumo: *Devido ao interesse em melhores e mais confiáveis sistemas automotivos, novos estudos buscam analisar a dinâmica veicular e seu comportamento sob diversas condições possíveis. Dentre estes, o interesse de desenvolvimento de métodos para o monitoramento da integridade estrutural e do comportamento dinâmico da suspensão veicular tornam-se indispensáveis, uma vez que a resposta do sistema automotivo é influenciada por tais fatores. Para o monitoramento da integridade estrutural existem diversas técnicas, como impedância elétrica, normas de sistemas, análise de séries temporais e a metodologia de observadores de estados. Este último torna-se atrativo pela sua capacidade de detecção de falhas e acompanhamento da variação de parâmetros sem a necessidade de medição direta de todas as medidas, situação que ocorre em um conjunto de suspensão, onde não é possível medir todos as variáveis de estado do sistema. Sendo assim busca-se neste trabalho inicial verificar a aplicabilidade dos observadores de estado a um sistema veicular, com a finalidade de monitorar seus componentes básicos, estabelecendo assim uma metodologia para monitoramento em tempo real dos mesmos.*

Palavras-chave: *suspensão veicular, diagnose de falhas simultâneas, observadores de estado.*

1. INTRODUÇÃO

Entre os atuais interesses de pesquisadores e engenheiros no estudo de automóveis se destaca a investigação de problemas que envolvem a dirigibilidade do veículo, o desempenho e o conforto. Diversos trabalhos vêm sendo desenvolvidos com destaque nos seguintes temas: estudos da suspensão automotiva, análise da dinâmica veicular, reações do veículo quando submetido a condições de curva, influência da geometria de suspensão no automóvel, parada brusca e análises sobre o conforto.

Em geral, tudo aquilo que envolve a dinâmica veicular, como o problema de controle de vibrações e ruídos; e confiabilidades nos dispositivos e equipamentos incorporados no sistema são amplamente discutidos na literatura buscando, em muitos casos, acelerar a produção diminuindo os custos e otimizar o desempenho dos componentes e dos veículos em si.

Atualmente os investimentos no setor automobilístico são milionários e, então, pesquisas relacionadas ao tema são amplamente encorajadas. Algumas pesquisas envolvendo veículos automotores são direcionadas ao aumento da estabilidade, desempenho e confiabilidade dos componentes durante a utilização.

Neste contexto, os estudos do comportamento dinâmico e o monitoramento da integridade do sistema de suspensão dos veículos são de extrema importância para se garantir condições de utilização adequadas e seguras. Um sistema de suspensão eficiente é capaz de melhorar o desempenho do veículo em curvas, diminuindo a rolagem e a inclinação da carroceria evitando assim acidentes. Assim, existe a preocupação em detectar falhas estruturais, como trincas, perda de rigidez e conseqüente diminuição da capacidade de amortecer.

Entre diversas técnicas de monitoramento da integridade estrutural, como impedância elétrica, normas de sistemas e análise de séries temporais, está a metodologia que envolve o projeto de observadores de estados.

Os observadores de estado podem detectar falhas ou acompanhar variações de parâmetros físicos (como rigidez e amortecimento) nos pontos em estudo sem conhecimento de todas as medidas. A formulação é baseada na reconstrução dos estados não medidos ou os valores provenientes de pontos de difícil acesso no sistema e, assim, podendo monitorar a estrutura através da comparação do vetor de estado completo obtido para diferentes condições estruturais, ou seja, para o sistema com e sem falha.

2. CONCEITOS BÁSICOS DE OBSERVADORES DE ESTADO E DINÂMICA VEICULAR

O objetivo deste trabalho é realizar o monitoramento da integridade de um sistema de suspensão de um veículo automotor utilizando a metodologia de observadores de estados. Para representar o sistema de suspensão foi utilizado um modelo clássico de um quarto de carro, “quarter car”, e somente foi considerado o aspecto da dinâmica vertical de um veículo.

2.1 Observadores de Estados

O sistema representado na Figura 1, abaixo, utiliza observadores de estado, através dos quais são verificados a força de excitação $\{u(t)\}$ e a resposta $\{y(t)\}$, com observadores dos parâmetros sujeitos a falhas $z_1..z_n$ e uma unidade de decisão lógica. Quando determinado componente de um sistema mecânico começa a falhar, a influência deste processo é rapidamente verificada pelo observador de estado, pois o mesmo apresenta a mesma resposta do sistema real, desde que este esteja funcionando adequadamente. O objetivo é utilizar este efeito sentido pelo observador de estado para localizar a falha no sistema mecânico.

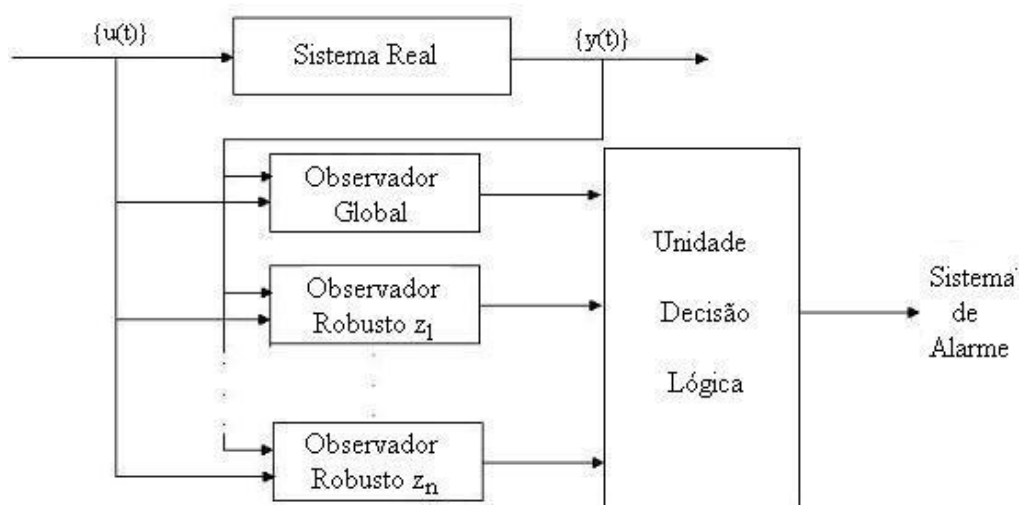


Figura 1: Esquema Simplificado de um Sistema com Observadores de Estado.

Para descrição do observador de estado, considera-se o seguinte sistema linear e invariante no tempo apresentado pela equação abaixo:

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

$$\{y(t)\} = [C_{me}] \{x(t)\} + [D] \{u(t)\} \quad (2)$$

Na qual $[A] \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $[B] \in \mathbb{R}^{n \times p}$, $[C_{me}]$ é a matriz de medidas e $\in \mathbb{R}^{k \times n}$, $[D] \in \mathbb{R}^{k \times p}$, sendo n a ordem do sistema, p o número de entradas $\{u(t)\}$, e k o número de saídas $\{y(t)\}$. O sistema é assumido como totalmente observável. Um observador para este sistema é dado por:

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

e

$$\{\bar{y}(t)\} = [C_{me}] \{\bar{x}(t)\}, \quad (4)$$

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

Pretende-se trabalhar com sistemas onde são observadas variações dos parâmetros:

$$\{\dot{x}(t)\} = [A + \sigma A] \{x(t)\} + [B] \{u(t)\} \quad (5)$$

e

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

Na qual $[A + \sigma A]$ é a matriz dinâmica do sistema com variação de parâmetros.

Um observador para este sistema é dado por:

$$\{\bar{\dot{x}}(t)\} = [A + \sigma A] \{\bar{x}(t)\} + [B] \{u(t)\} + [L] (\{y(t)\} - \{\bar{y}(t)\}) \quad (7)$$

e

$$\{\bar{y}(t)\} = [C_{me}] \{\bar{x}(t)\}, \quad (8)$$

2.2. Observador Global e Robusto

O observador global é comparado com o sistema real, sendo que em um sistema sem alterações (rigidez, amortecimento, etc), os dois respondem da mesma forma. O observador robusto é montado considerando uma falha inserida no sistema e quando comparado com o sistema real pode localizar a mesma (observador de estado robusto ao parâmetro sujeito a falha).

A diferença básica entre os dois tipos de observadores está na montagem da matriz dinâmica do sistema. A matriz dinâmica do observador global é uma cópia fiel do sistema original. A matriz dinâmica de cada observador robusto é montada considerando uma possível falha no sistema, como por exemplo, percentuais de perda de rigidez em um elemento de viga devido à presença de uma trinca.

O observador global serve apenas como um sinal de alerta, indicando uma irregularidade no sistema. Os observadores robustos são responsáveis por identificá-la e localizá-la, caso estejam projetados para a falha ocorrida. Para aumentar a eficiência dos observadores robustos é montado um banco de observadores considerando as principais falhas que o sistema está sujeito.

O observador de estado global é um conjunto de equações diferenciais ordinárias. Deste modo, deve-se calcular a matriz dinâmica do sistema, que contém as características do mesmo, ou seja, a matriz de massa, rigidez e amortecimento.

A seguir são calculados os autovalores da matriz dinâmica. Para que se possa garantir a estabilidade e a rápida convergência os autovalores impostos para os cálculos posteriores devem estar à esquerda dos autovalores

2.3. Dinâmica Veicular

Na análise inicial da dinâmica vertical de um veículo de massa m , em condições de rodagem sobre um perfil de pista com velocidade v , é possível aproximá-lo como um sistema massa-mola-amortecedor, de constantes de rigidez e amortecimento k e c , respectivamente, excitado pela base.

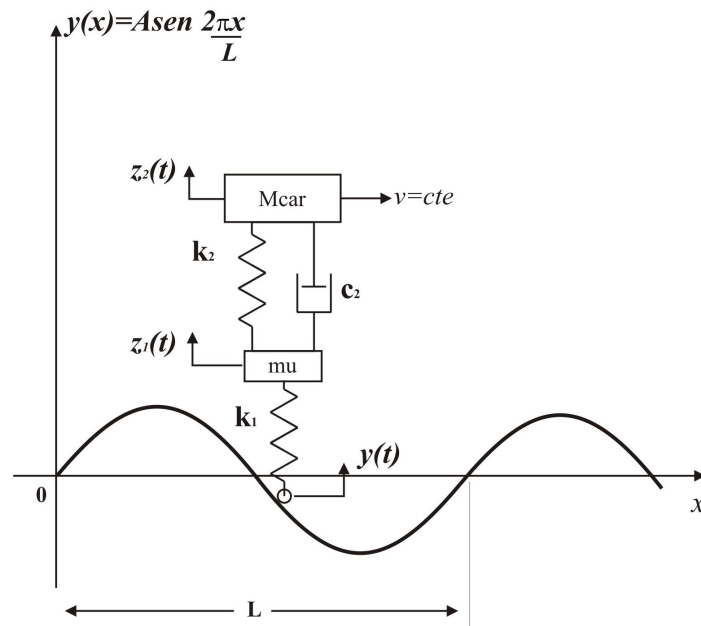


Figura 2. Vibração Decorrente de uma Excitação pela Base por meio de um Perfil de Pista Senoidal

O perfil da estrada $y(x)$ é dado por:

$$y = A \text{ sen } \frac{2\pi x}{L} \quad (8)$$

Na qual A é a amplitude da ondulação do terreno e L é o comprimento dessa ondulação devido ao movimento do veículo ao longo do perfil $y(x)$ ocorre em um movimento vertical $y(t)$ da roda. Considerando que a velocidade do carro é constante, é possível escrever:

$$x = v t \quad (9)$$

Portanto o movimento vertical $y(t)$ pode então ser expresso como:

$$y = A \text{ sen } \frac{2\pi v t}{L} \quad (10)$$

3.MODELAGEM

O sistema foi modelado utilizando a proposta um quarto de carro, representado por duas massas, M_{car} e μ , respectivamente massa relativa a um quarto do veículo e massa não suspensa ou “unsprung weight”, sendo que estas são interligadas por um amortecedor c_2 e uma mola k_2 , amortecedor de mola de uma suspensão veicular com molas helicoidais e entre a massa μ e o solo

há a mola k_1 relativa à rigidez do pneu do veículo. Portanto, pode-se modelar o sistema com dois graus de liberdade, como mostra a Figura 3. O modelo dinâmico do sistema foi obtido através do Método de Newton e, ainda, foi considerada a formulação no espaço de estados em coordenadas físicas. As falhas serão simuladas através da redução de rigidez da mola k_2 do sistema de suspensão e perda do amortecimento do amortecedor c_2 , os estados não medidos, devido à restrição no número de sensores, serão estimados utilizando a metodologia dos observadores de estado.

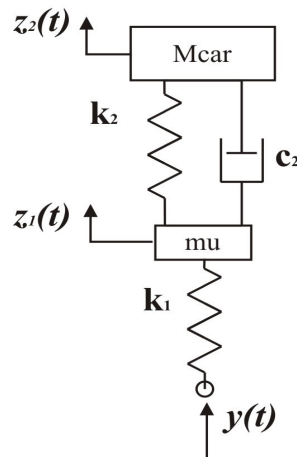


Figura 3: Modelo de Carro

A equação que governa o sistema é:

$$\begin{bmatrix} \mu & 0 \\ 0 & M_{car} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{z}_1 \\ \ddot{z}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} k_1 y(t) \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (11)$$

Em espaço de estados:

$$\begin{cases} \dot{\{z(t)\}} = [A]\{z(t)\} + [B]\{u(t)\} \\ \{y(t)\} = [C_{ms}]\{z(t)\} + [D]\{u(t)\} \end{cases} \quad (12)$$

na qual:

- $\{z(t)\}$ é o vetor de estado;
- $\{u(t)\}$ é o vetor dos sinais de entrada;
- $\{y(t)\}$ é o conjunto de sinais de saída;

Para o sistema em questão as matrizes são:

Matriz Dinâmica do Sistema	Vetor dos Sinais de Entrada	Matriz de Medidas do Sistema
$[A] = \begin{bmatrix} [0] & [I] \\ [[M^{-1}][k]] & [M^{-1}][c] \end{bmatrix}$	$[B] = \begin{bmatrix} [0] \\ [M^{-1}] \end{bmatrix}$	$[C_{ms}] = [0 \ 1 \ 0 \ 0]$
Matriz de Massa	Matriz Rigidez	Matriz de Amortecimento
$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix}$	$[k] = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix}$	$[C] = \begin{bmatrix} c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix}$

Tabela 1: Matrizes Para o Sistema Modelado

A matriz D é uma matriz nula de ordem n, a mesma ordem da matriz dinâmica. O observador empregado foi o Observador do tipo Identidade:

$$\{\dot{\hat{z}}(t)\} = [A + \Delta A]\{\hat{z}(t)\} + [L]'\{C\}\{z(t)\} + [B]'\{u(t)\}$$

na qual $[A + \Delta A]$ é a matriz corrigida, dada por:

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

O ganho do observador L foi obtido pelo Regulador Linear Quadrático LQR, do toolbox do MATLAB®®, e C_{me} é a matriz de medidas do sistema neste caso, por estar sendo medido apenas o deslocamento z_2 , é dada por:

$$[C_{me}] = [0 \ 1 \ 0 \ 0]$$

Com o sistema modelado, foi executada uma rotina em MATLAB® para a execução computacional do experimento.

4. RESULTADOS

Foram simuladas falha de 25% da rigidez em k_2 , 50% do fator de amortecimento em c_2 e uma falha simultânea de 30% da rigidez em k_2 e 40% do fator de amortecimento em c_2 . E foram obtidos os seguintes gráficos de resposta do sistema;

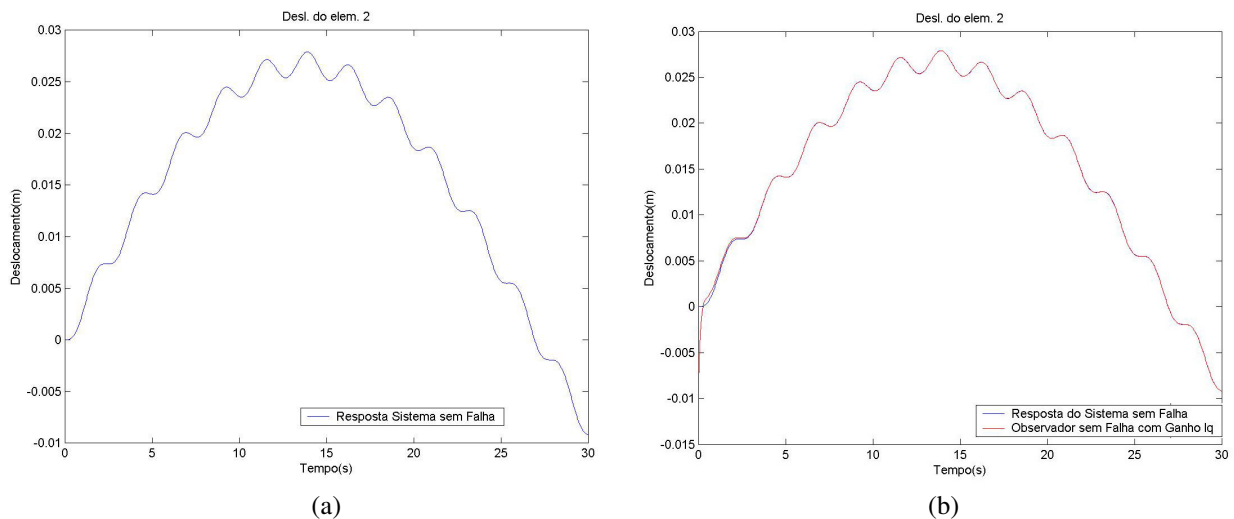


Figura 4. Resposta do Sistema (a) sem Falha e Resposta do Observador global (b)

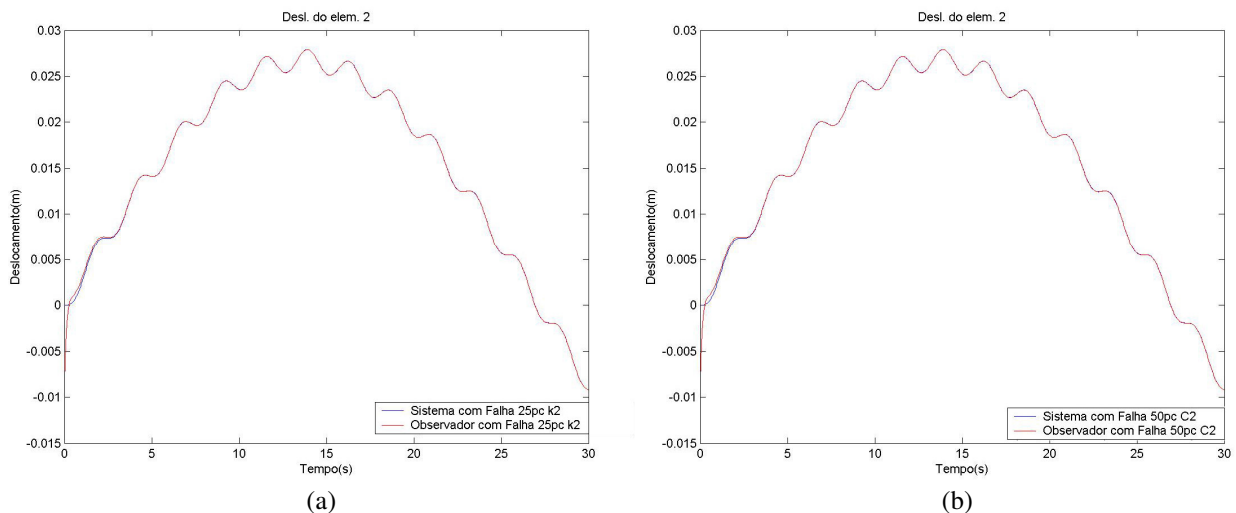


Figura 5. Resposta do Sistema e Observador Robusto a 25% de rigidez em k_2 (a) e

Resposta do Sistema e Observador Robusto com 25% de amortecimento a c_2 (b)

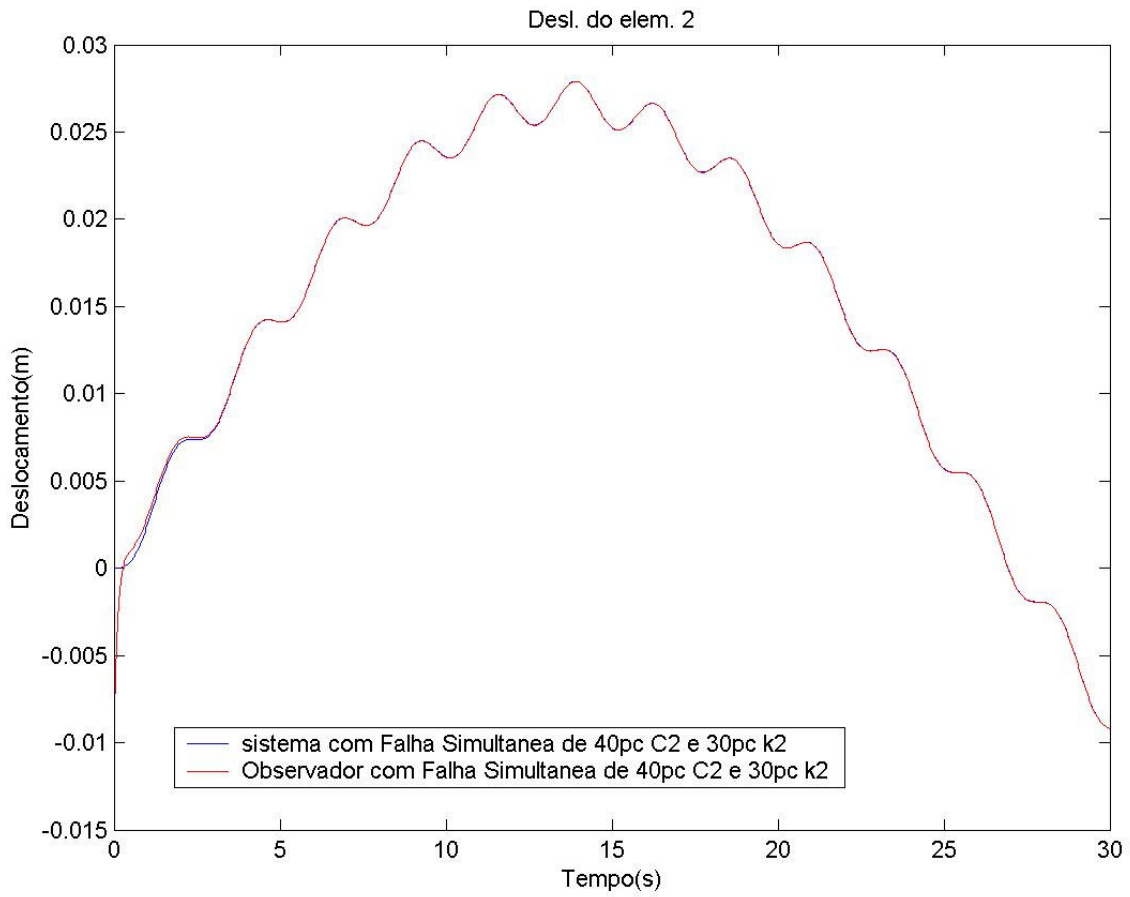


Figura 6. Resposta do Sistema com Falha Simultânea e Resposta do Observador Robusto com Falha Simultânea

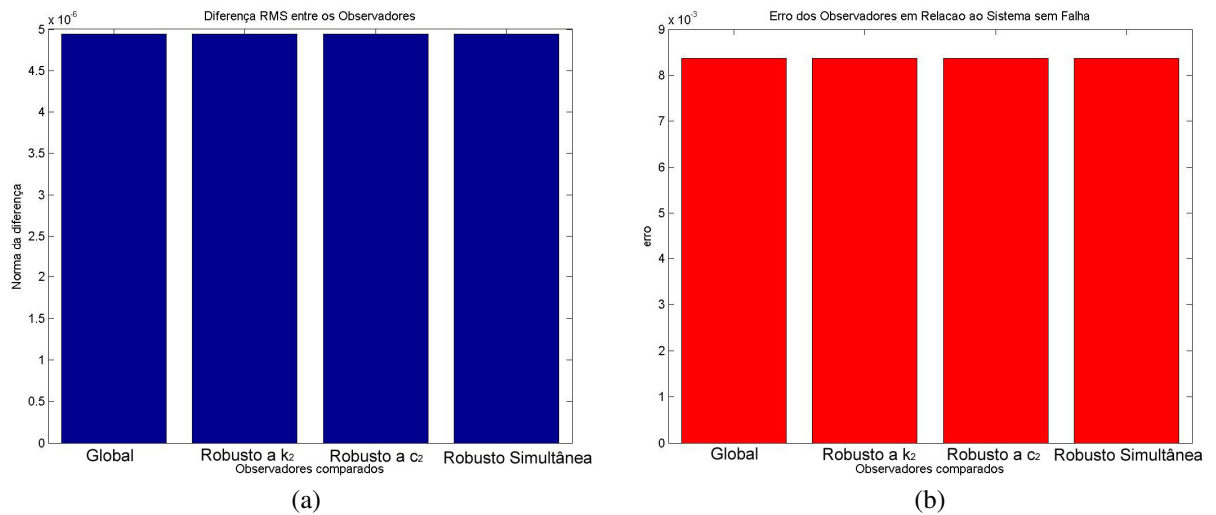


Figura 7. Diferença da RMS dos Observadores (a) e Erro entre os Observadores e os Sistemas Reais (b)

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os observadores de estado são utilizados para o monitoramento de sistemas mecânicos por meio da resposta do próprio sistema em funcionamento, e sua resposta deve ser a mesma do sistema, no caso de falhas existentes, o observador consegue captá-las e ativar um sistema de alarme. Sua diferença e qualidade existem na capacidade de reconstruir os parâmetros do sistema, mesmo que estes não sejam medidos diretamente. Devido a isso é possível sua aplicação em sistemas de suspensões automotoras, nas quais não é possível a medição de todos os parâmetros influenciadores da dinâmica do veículo.

Sendo assim a proposta consiste em verificar a aplicabilidade da metodologia dos observadores de estado, em um modelo de suspensão veicular, analisando os parâmetros e resposta da dinâmica vertical. Ainda foi acrescentada a situação de falhas simultâneas nos elementos k_2 e c_2 , de modo a verificar a eficiência do método a esta situação freqüente na realidade. As máximas diferenças entre as respostas dos observadores com suas respectivas respostas do sistema foram 0.008367 para o observador global, 0.0083654 para o observador robusto a 25% de rigidez em k_2 , 0.0083682 para o observador robusto a 50% de amortecimento de c_2 e 0.0083665 para o observador robusto a uma falha simultânea de 30% de rigidez de k_2 e 40% de amortecimento de c_2 . Entretanto todos os observadores apresentaram um intervalo tempo para a convergência com a resposta do sistema, uma possível explicação para esse fato é que o tipo de observador de estado, Identidade, não ser o mais adequado para a proposta. Assim fica a proposta de novos trabalhos dentro do tema de estudar quais os tipos de observadores de estado que melhor se aplicam ao caso, com rápida convergência para os diversos tipos de excitações.

4. REFERÊNCIAS

- ABIDIN, M. A. Z., GORDON, T., RAHNEJAT, H., “ Suspension and Road Profile Effects in Vehicle Pitch-Plane Response to Transient Braking and Throttle Actions”, *IAVSD 2003 18th IAVSD-Symposium*, Atsugi, Japan, 2003.
- BARRETO, M. A. Z., “Dinâmica Longitudinal: efeitos da geometria de suspensão nas mudanças de atitude da massa suspensa e os esforços nos elementos da suspensão”, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 248p. Tese (Mestrado) 2005.
- DING, X.; GUO, L. and FRANK P. M., Parameterization of Linear Observers and its Application to Observer Design, *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol.39, n.8, pp. 1648-1652, 1994.
- FELÍCIO, L. C., FREITAS JR, L. M. P., “Estudo da Dinâmica Vertical de uma Suspensão Veicular do Tipo Macpherson”, Anais do IV Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - Recife PE, 2006.
- HILL, G., “Vehicle Dynamics Lecture Notes”, Fachhochschule Regensburg. Regensburg, Deutschland, 2006.
- LEMOES, G. F., “Detecção de Falhas via Observadores de Estado em Sistemas Rotativos, Considerando-se suas Fundações, Ilha Solteira”, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Tese (Mestrado) 2004.
- MELO, G. P., MORAIS, T. S., FERNANDES, F ; DANIEL, G. B., “Detecção e Localização de Dano Estrutural Através de Observador de Estado Estocástico”. In: VII Simpósio de Mecânica Computacional - SIMMEC 2006, Araxá , 2006.

- MELO, G. P., KOROISHI, E. H., “Otimização e Análise da Estabilidade de uma suspensão Mecânica na Presença de controladores PI, PD e PID”. In: 3. Congresso Temático de Dinâmica e Controle da SBMAC, Guaratinguetá, 2006.
- MELO, G.P., “Detecção e Localização de Falhas via Observadores de Estado de Ordem Reduzida”, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Tese (Doutorado), Campinas, 1998.
- MELO, G.P., and LEMOS, G.F. “Fault Detection of Rotor-Support-Structure Including Foundation Effects using Reduced-Order State Observers” –Anais(em CD-ROM) XXIV Iberian Latin American Association for Computational Methods in Engineering-Ouro Preto MG, 2003.
- MORAIS, T. S., 2006, “Diagnose de Falhas via Observadores de Estado com Excitações Desconhecidas, Identificadas via Funções Ortogonais”, Ilha Solteira, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista. Tese de Mestrado.
- OGATA, K., 1997, “Engenharia de Controle Moderno” Universidade de Minnessota, Editora Prentice-Hall do Brasil LTDA, pp. 813.
- PERSEGUIM, O. T., “Dinâmica veicular relativa ao ride de veículos e métricas para sua avaliação”, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 248p. Tese (Doutorado) 2005

SIMULTANEOUS FAULT DIAGNOSES IN VEHICULAR SUSPENSION VIA STATE OBSERVERS

Álvaro Fernando Gonçalves Crespo

afgcrespo@aluno.feis.unesp.br

Gilberto Pechoto de Melo

gilberto@dem.feis.unesp.br

Departamento de Engenharia Mecânica – GMSINT (Grupo de Materiais e Sistemas Inteligentes)

UNESP/FEIS - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Av. Brasil n°56, centro, CEP 15385-000

***Abstract.:** Due to the interest in better and more trustful automotive systems, new applications searching analyze vehicular dynamics and its behavior under various possible conditions. Among these, the interest from development of methods for Structural Health Monitoring and of dynamic behavior of vehicular suspension becomes indispensable, a time that the automotive system response is influenced for such factors. To Structural Health Monitoring exist some techniques, like electric impedance, system norms, analysis of temporary series and the methodology of state observer. This last one become attractive for its capacity of fault detection and accompaniment of the parameters variations without the necessity of direct measurement of all measures, situation that it occurs in a suspension conjunct, that it isn't possible measure any stat variables from system. In such case search in this work verify the applicability of state observer in a vehicular system, with a purpose to monitor its basic components, establishing so a methodology for monitoring in real time of the same ones. Simultaneous*

Keywords: vehicular suspension, Simultaneous fault diagnoses, state observer, quarter car