

Modelagem de análise de falhas para identificação em treliças

DOI: 10.30609/JETI.2018-7231

Larissa Watanabe^{1*}, Gilberto P. Melo¹

¹UNESP – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, SP, Brasil.

Resumo

Nos últimos anos, tem havido um grande interesse das indústrias no desenvolvimento de novas técnicas de detecção e localização de falhas, pois se preocupam cada vez mais com a segurança, havendo assim, a necessidade de supervisão e monitoramento dos sistemas para que as falhas sejam evitadas ou sanadas o mais rápido possível. Determinados parâmetros em sistemas reais como massa, rigidez e amortecimento podem variar devido ao aparecimento de falhas ou ao próprio desgaste natural dos componentes. Um aparecimento de trincas pode provocar perdas econômicas ou até conduzir a situações perigosas com paradas abruptas das máquinas e/ou equipamentos. Neste trabalho, com auxílio de modelos teóricos bem definidos, métodos de identificação de parâmetros, observadores de estado e auxílio à decisão foi possível desenvolver uma metodologia para detecção e localização de trincas em estruturas reticuladas, dando ênfase às tridimensionais. A detecção e localização de trinca logo no seu início e sua propagação pode ser monitorada até uma possível parada programada. Utilizando a metodologia dos observadores de estado, pode-se ainda reconstruir os estados não medidos ou os valores provenientes de pontos de difícil acesso no sistema.

Palavras-Chave: Observadores de estado, modelo de falha, detecção de falha, localização de falha, estruturas reticuladas tridimensionais.

1.- Introdução

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

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

A técnica dos observadores de estado 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 para análise. O objetivo é montar um banco de observadores para supervisionar o processo, onde cada observador é dedicado somente a um parâmetro físico do sistema.

As metodologias utilizando observadores de estado existentes são na sua maioria destinadas a resolver problemas de controle e detecção de possíveis falhas em sensores e instrumentos [1,2]. As teorias de observadores de estado para sistema lineares invariantes no tempo começaram a ser desenvolvidas em 1966, quando Luenberger (1964) utilizou pela primeira vez estes observadores em sistema de controle.

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. Quanto à utilização destas metodologias através do emprego de modelos bem definidos, podem-se mencionar algumas mais utilizadas: observadores de Luenberger [3], observadores dedicados [3-5], detecção através de filtros [6,7], observadores robustos para entradas desconhecidas [2,8-10]. Neste contexto, poucos trabalhos dedicados à metodologia de diagnose de falhas em estruturas reticuladas são encontrados, principalmente em relação à propagação de trincas.

Determinados parâmetros em sistemas reais podem variar devido ao aparecimento de falhas ou ao próprio desgaste natural dos componentes. Como um aparecimento de trincas pode provocar perdas econômicas ou até conduzir a situações perigosas, neste

trabalho, desenvolveu-se uma metodologia, baseada no método de elementos finitos e a metodologia dos observadores de estado, capaz de detectar e localizar essas possíveis falhas no sistema reconstruindo os estados não medidos, podendo-se assim estimar as medidas dos valores provenientes de pontos de difícil acesso no sistema.

2.- 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. O observador de estado é um conjunto de equações diferenciais ordinárias que apresenta a mesma resposta do sistema real, partindo do princípio de que este esteja funcionando de maneira adequada.

Desta maneira, o efeito sentido pelo observador de estado pode detectar e localizar uma possível falha em um sistema mecânico com variações de parâmetros. O projeto dos observadores de estado é dividido em duas partes; (i) Montagem do observador global, e (ii) 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. 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 [1,11].

Na segunda etapa, antes da montagem dos observadores robustos aos possíveis parâmetros do sistema sujeito a falhas, é retirada de cada observador robusto aos parâmetros sujeito à falha uma variação percentual de perda deste parâmetro. Desta forma, a resposta do observador robusto que se aproximar da resposta do sistema com indício de falhas 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 seria de projetar observadores de estado robustos a todos os parâmetros sujeitos a falhas [11]. Na Figura 1, 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 precisão lógica, plotagem dos gráficos e resultados.

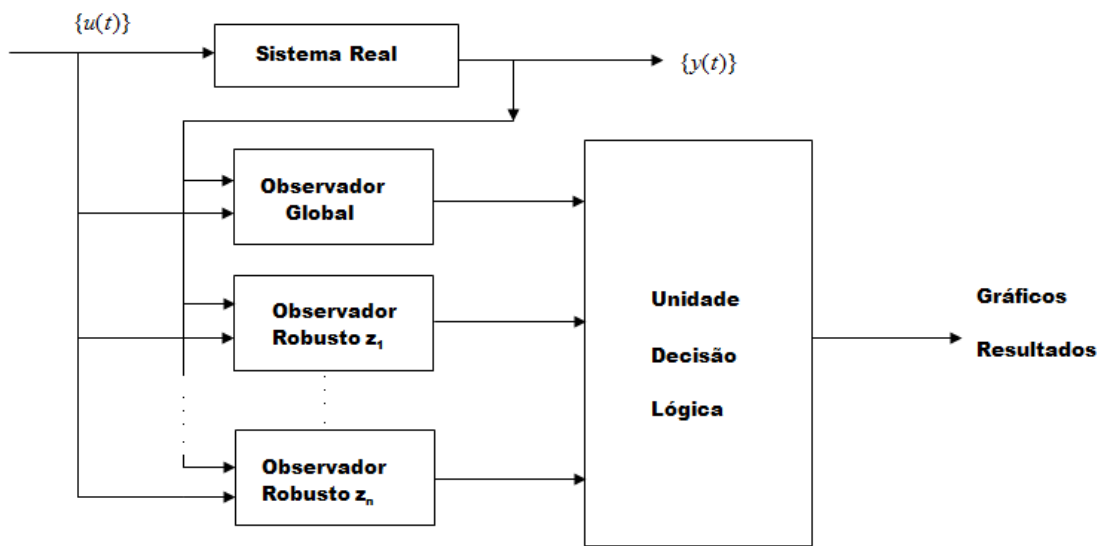


Figura 1: Sistema de observação [12].

Pode-se notar 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.

3.- Metodologia

A metodologia utilizou-se da técnica dos observadores de estado para a detecção de falhas através das variações de parâmetros de área e para a detecção das trincas. O procedimento metodológico seguiu as seguintes etapas: (i) Criação das Treliças, (ii) Redução da área/Inserção de trincas, (iii) Extração das Matrizes, (iv) Modelo Matemático, (v) Seleção de autovalores do sistema, (vi) Resposta do Sistema, (vii) Cálculo do Observador, (viii) Determinação da Matriz de Medidas, (ix) Verificação da Observabilidade, (x) Resposta do Observador, (xi) Detecção e localização de falhas.

Inicialmente, projetou-se treliças utilizando o software Ansys, realizando duas análises, uma com redução da área da seção transversal dos elementos das treliças e outra

através da inserção de trincas nos elementos da estrutura. Em seguida, extraídas as matrizes de massa e de rigidez desses sistemas obtendo-se o sistema real e o modelo matemático para o cálculo dos observadores de estado, através do software Matlab for Windows, e a partir da resposta do sistema, das matrizes de medidas e da resposta dos observadores de estado, obteve-se através da comparação entre os sinais, a resposta para a detecção e localização das falhas inseridas.

4.- Aplicação Numérica

Análises numéricas são determinadas a partir da metodologia dos observadores de estado. Neste trabalho foi modelada uma treliça pela técnica dos elementos finitos como apresentada na Figura 2. As rotinas computacionais foram desenvolvidas utilizando o software Matlab for Windows e o software Ansys.

O primeiro exemplo foi uma treliça tridimensional com 28 elementos, tendo os nós 1, 6, 7 e 12 apoiados, restringindo os movimentos em x, y e z. Neste exemplo foram consideradas as seguintes características do material: módulo de elasticidade (E) de 210 GPa, área de secção transversal (A) de $2,5 \times 10^{-3} \text{ m}^2$, densidade (ρ) de 7860 kg/m^3 , comprimento do elemento trincado (L) de 4m, altura do mesmo $h = 0,0282 \text{ m}$.

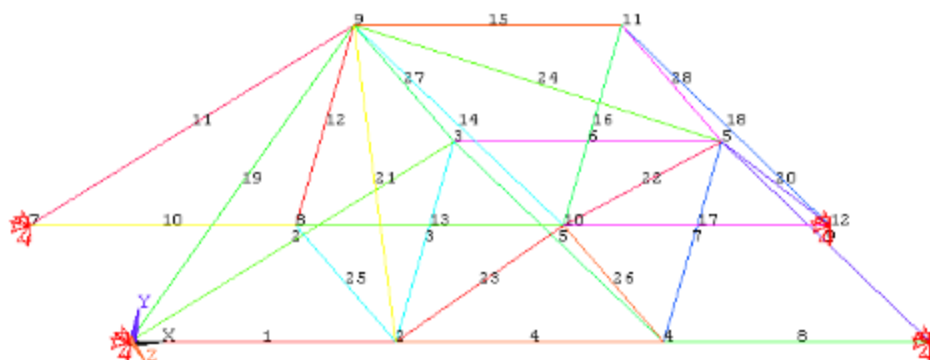


Figura 2: Exemplo de uma treliça tridimensional.

A simulação realizada para a treliça, Figura 2, teve como condições de contorno, apoiado nos nós 1, 6, 7 e 12, tendo os graus de liberdade em x, y, e z restritos, e uma condição inicial de impacto de uma velocidade de 4 m/s, no nó 11 e na direção positiva do eixo z, com um intervalo de tempo de 0 a 0.1 segundo.

Primeiramente foi realizada a inserção de falhas na área de secção transversal do material, escolhendo aleatoriamente o elemento 15 da treliça, foram reduzidos 11% da área

de sua seção transversal. A Figura 3 ilustra os gráficos da simulação, nas ordenadas são apresentados os valores medidos de deslocamento para o terceiro grau de liberdade e os valores reconstruídos deles para o observador, e nas abscissas o tempo em segundos. Como pode ser observado, Figura 3(a), tem-se primeiramente um sistema considerado “sem falha”, e pode-se observar que as curvas são coincidentes, significando que o observador global não detectou nenhuma irregularidade no sistema, já que o mesmo se comporta exatamente como o sistema real sem falha. Após a inserção de uma redução na área de seção transversal de 11% no elemento 15, tem-se que, Figura 3(b), curvas não coincidentes, detectando através do observador global uma possível falha.

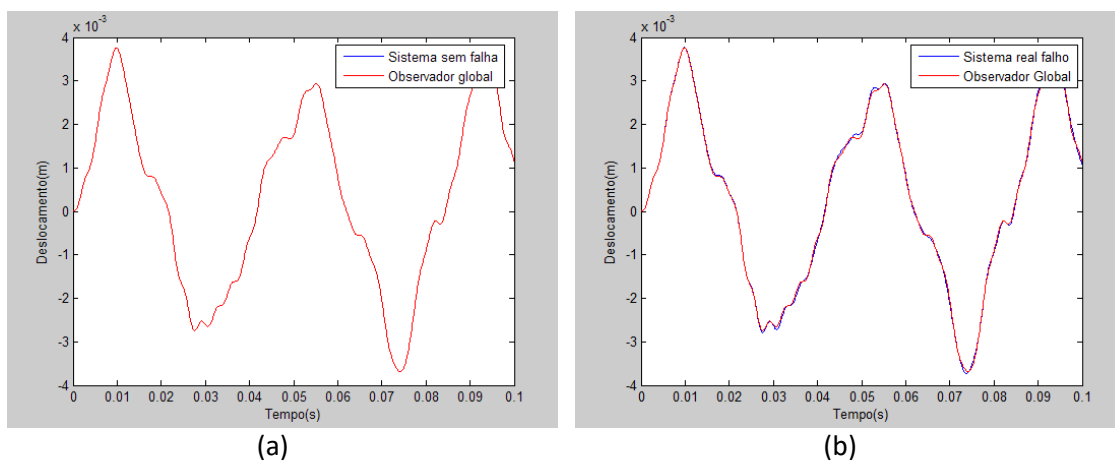


Figura 3: Resultados obtidos referente ao observador global.

Observando as diferenças de RMS, Figura 4, essas diferenças dos valores de deslocamentos do terceiro grau de liberdade com o observador global referente, nota-se que em um sistema sem falha a diferença é mínima quando comparada com os sistemas com falhas. Através da comparação do sistema real sem falha com o observador global, verificou-se que no sistema sem falha quase não existe diferença do valor RMS, enquanto que quando inseridas as falhas as diferenças de RMS aumentam, e conseqüentemente as curvas da Figura 3 se distanciam, detectando possíveis falhas.

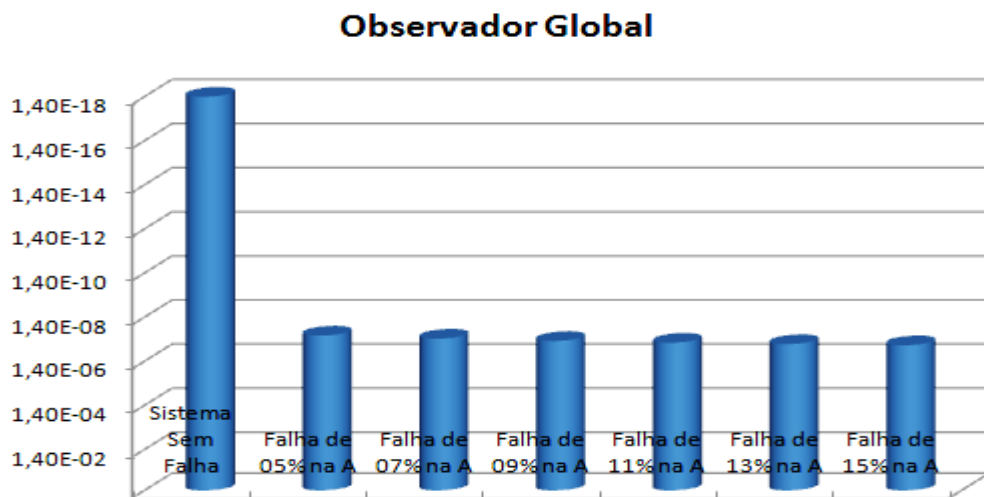


Figura 4: Diferença de RMS dos valores de deslocamento do terceiro grau de liberdade com o observador global.

Detectada a falha, o próximo passo é localizá-la. Para isso, monta-se um banco de observadores robustos aos possíveis parâmetros do sistema sujeito a falhas. Quando o sistema real falho se comporta exatamente como o observador robusto responsável pela redução dos 11% da área no elemento 15, pode-se concluir que é nesse lugar a localização da falha, ou seja, o observador robusto localizou a falha, o sistema possui uma falha de redução de área de 11% no elemento 15. Analisando a Figura 5 verifica-se que a diferença de RMS do observador robusto referente a redução de área de 11% do elemento 15 é mínima quando comparada com as outras diferenças de RMS para os outros observadores robustos, confirmando o local da falha inserida.

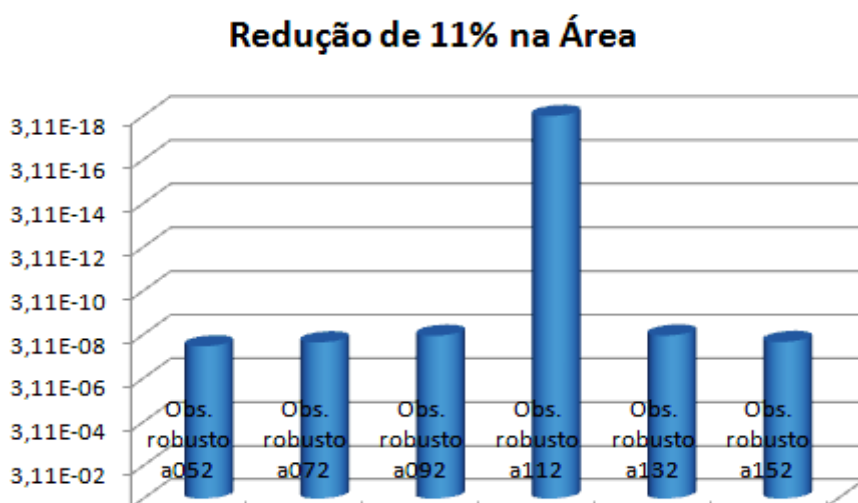


Figura 5: Diferença de RMS entre o sistema real falho e os observadores robustos para a falha de redução de 11% da área do elemento 15.

Para a análise de trincas, com as mesmas condições iniciais, sendo agora o comprimento do elemento trincado (L) de 5 m, pois a trinca foi inserida agora no elemento 21. Foi inserida uma trinca de profundidade de 25% da altura da barra aleatoriamente no elemento 21 da treliça da Figura 2, considerando a condição de trinca aberta ($\gamma = 1$).

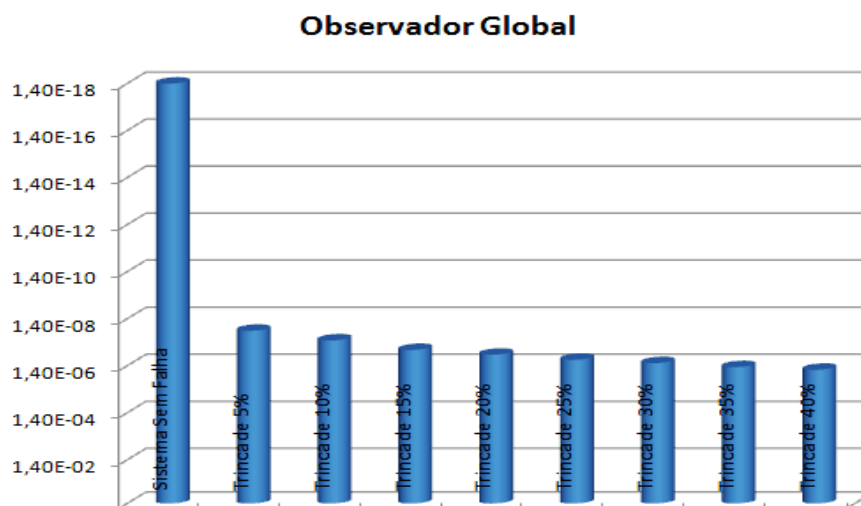


Figura 6: Diferença de RMS dos valores de deslocamento do terceiro grau de liberdade com o observador global.

A Figura 6 ilustra os resultados obtidos das diferenças de RMS quando inserida as trincas, estas diferenças são bem maiores em comparação ao sistema sem falha, confirmando que o observador global detectou possíveis trincas no sistema.

Detectada a falha, o próximo passo é localizá-la. Para isso, monta-se um banco de observadores robustos aos possíveis parâmetros do sistema sujeito a falhas. A Figura 7, ilustra os resultados obtidos para diferença RMS, o observador robusto responsável pela trinca de 25% da altura da barra do elemento 21 apresenta diferença é mínima em relação aos demais, podendo concluir-se que é nesse lugar a localização da falha.

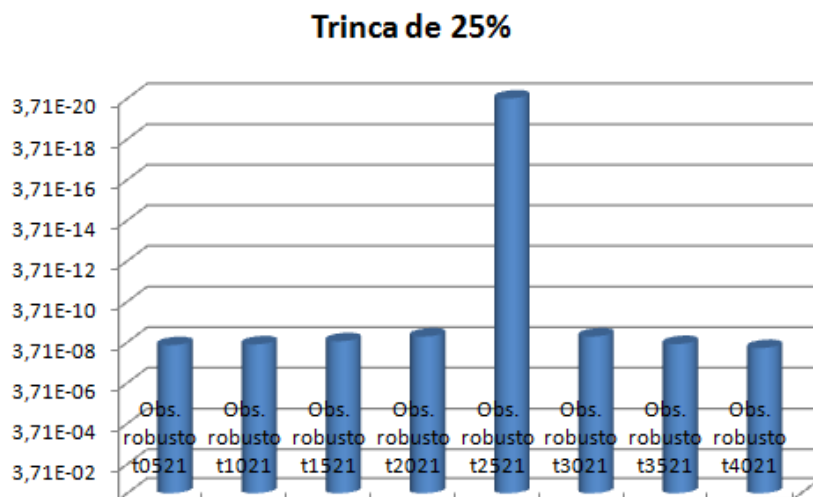


Figura 7: Diferença de RMS entre o sistema real falho e os observadores robustos para a trinca de profundidade de 25% da altura da barra do elemento 21.

O próximo passo foi inserir duas trincas simultaneamente na treliça da Figura 2. Foram inseridas aleatoriamente uma trinca de profundidade de 10% da altura da barra no elemento 8 e uma outra de 35% no elemento 21. Com as mesmas condições iniciais, sendo o comprimento dos elementos trincados de 4 m e 5 m respectivamente. E a partir da Figura 8 tem-se que a diferença de RMS dos valores de deslocamento do terceiro grau de liberdade do sistema sem falha com o observador global é mínima e quando inseridas as trincas as diferenças aumentam, confirmando que o observador global detectou irregularidades no sistema.

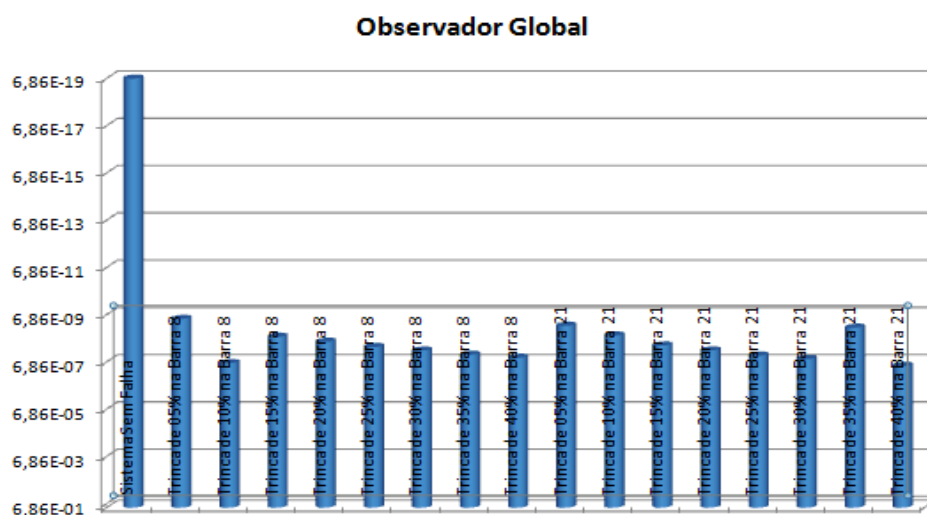


Figura 8: Diferença de RMS dos valores de deslocamento do terceiro grau de liberdade com o observador global.

Detectada as trincas, o próximo passo são localizá-las, ou seja, através dos observadores robustos, saber quais são os tamanhos de suas profundidades e em quais elementos se encontram as trincas.

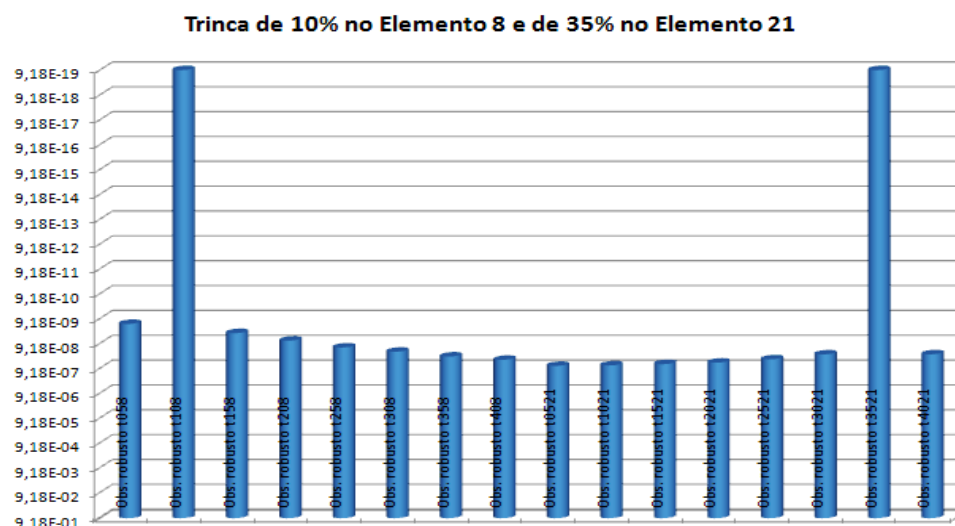


Figura 9: Diferença de RMS entre o sistema real falho e os observadores robustos para a trinca de profundidade de 10% da altura da barra no elemento 8 e de 35% no elemento 21.

A pela Figura 9, ilustra as diferenças de RMS entre o sistema real falho e os observadores robustos, e as diferenças de RMS mínimas são exatamente no local onde foram inseridas as trincas de 10% no elemento 8 e de 35% no elemento 21 da barra da treliça.

5.- Conclusões

A proposta deste trabalho foi a utilização de modelos de falhas e observadores de estado em treliças, os estudos realizados mostraram que a técnica dos observadores de estado utiliza um número reduzido de medidas com a reconstrução dos estados, mesmo em um sistema com muitos graus de liberdade essa técnica se mostrou muito eficiente, detectando e localizando as falhas perfeitamente, tanto na redução da área da seção transversal dos elementos, quanto nas trincas inseridas.

Esse método foi capaz de detectar as falhas introduzidas com o sensor no primeiro nó das estruturas, o que favorece bastante em sistemas reais, os quais possam ser de grande porte e com pontos de difíceis acessos. Essa metodologia foi capaz de detectar trincas de profundidades diferentes e em elementos diferentes e simultaneamente.

6.- Referências

- [1] AZEVEDO, Á. F. M. Método dos elementos finitos. Portugal: Faculdade De Engenharia da Universidade do Porto, 2003. 248 p.
- [2] BATHE, K.J. Finite element procedures. New Jersey: Prentice-Hall, 1996. 1037p.
- [3] BEER, F.P. JOHNSTON JR., E. R. Resistência dos materiais. 3.ed. São Paulo: Makron Books , 1995. 1255 p.
- [4] CHO, Y. M.; XU, G.; KAILATH T. Fast recursive identification of state space models via exploitation of displacement structure. Automatica, Elmsford, v.30, n.1, p.45-49, 1994.
- [5] CLARK, R. N., Instrument fault detection. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, New York, v.AES14, n.3, p. 456-465, 1978.
- [6] COOPER, J. E.; DESFORGES, M. Physical parameter identification using an unknown random input. In: ISMA 19. Tools for noise and vibration analysis. [S.l.: s.n] 1994. p. 1123-1128.
- [7] D'AZZO, J.J.; HOUPIS, C. H. Linear control system analysis and design. São Paulo: McGraw-Hill, 1988. 660p.
- [8] FRANK, P. M. Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy – a survey and some new results. Automatica, Elmsford, v.26, n.3, p.459-474, 1990.
- [9] FRANK, P. M.; SELIGER, R. Fault detection and isolation in automatic processes. Control and Dynamics Systems, Academic Press, New York, v.49, n.5, p.241-287, 1991.
- [10] LUENBERGER, D. G. Observing the state of a linear system. IEEE Military Eletronics, New York, v. MIL-8, n.2, p.74-80, 1964.
- [11] MUSCOLINO, G.; CACCIOLA, P.; MPOLLONIA, N. Crack detection and location in a damaged beam vibrating under white noise. Computers and Structures, Elmsford, Elmsford, v.81, n.18-19, p. 1773-1782, 2003.
- [12] MEIROVITCH, L. Fundamentals of vibrations. New York: Mcgraw-hill, 2001. 806 p.