

DIAGNOSE DE TRINCAS EM SISTEMAS CONTÍNUOS, ATRAVÉS DA METODOLOGIA DOS OBSERVADORES DE ESTADO

Alisson Teixeira Zacarias

atzacarias@dem.feis.unesp.br

Gilberto Pechoto de Melo

gilberto@dem.feis.unesp.br

Departamento de Engenharia Mecânica

Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, Av. Brasil n.º 56, centro, CEP 15385-000

Resumo: Hoje em dia 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, tendo-se a necessidade de supervisão e monitoramento de modo que a falha seja detectada e corrigida o mais rápido possível. Verifica-se na prática que determinados parâmetros dos sistemas podem variar durante o processo, devido a características específicas ou o desgaste natural de seus componentes. Sabe-se também que, mesmo nos sistemas bem projetados, a ocorrência de trincas em alguns componentes pode provocar perdas econômicas ou conduzir a situações perigosas. Os observadores de estado podem reconstruir os estados não medidos do sistema, desde que o mesmo seja observável, tornando possível, desta forma, estimar as medidas nos pontos de difícil acesso. A técnica dos observadores de estado consiste em desenvolver um modelo para o sistema em análise e comparar a estimativa da saída com a saída medida, a diferença entre os dois sinais presentes resulta em um resíduo que é utilizado para análise. Neste trabalho será montado um banco de observadores associado a um modelo de trinca de modo a acompanhar o progresso da mesma. Os resultados obtidos através de simulações computacionais em uma placa engastada discretizada pela técnica dos elementos finitos e as análises experimentais realizadas serão comparados com os experimentais para a validação da metodologia desenvolvida.

Palavras-chave: Observadores de Estado, Método dos Elementos Finitos, Elemento de Placa, Mecânica da Fratura, Propagação de Trincas.

1. INTRODUÇÃO

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. As teorias de observadores de estado para sistemas lineares invariantes no tempo começaram a ser desenvolvidas em 1966, quando Luenberger (1966) utilizou pela primeira vez estes observadores em sistemas de controle, onde foi demonstrado que se um sistema é linear, seu vetor de estado pode ser aproximadamente reconstruído através do projeto de um observador. O vetor de estado de ordem “ n ” e com “ m ” saídas independentes pode ser reconstruído com um observador de ordem “ $n-m$ ”, reconstruindo o restante dos estados a partir de equações diferenciais.

Mostrou-se também que o projeto de um observador para um sistema com “ m ” saídas pode ser reduzido a um projeto de “ m ” observadores como se fossem subsistemas com saídas simples, reduzindo sua complexidade. Luenberger (1971) também discutiu os elementos básicos do projeto de observador e apresentou de forma introdutória uma metodologia desenvolvida para a reconstrução de estados através de observadores.

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. Quanto à utilização destas metodologias através do emprego de modelos bem definidos, podem-se mencionar algumas mais utilizadas: observadores de Luenberger (1979), observadores de ordem reduzida, detecção através de filtros, consistência de espaço, observadores robustos para entradas desconhecidas e etc.

A idéia é utilizar o modelo de uma trinca para construir um banco de observadores capaz de supervisionar o processo na qual cada observador é dedicado a um determinado percentual de profundidade da trinca, porém, antes será abordado rapidamente a discretização de uma placa em elementos finitos de placa, para a obtenção das matrizes de rigidez e de massa, utilizadas nos observadores de estado.

1.1 Discretização da Placa pelo Método dos elementos Finitos

Considere inicialmente o elemento finito representado na Figura 1:

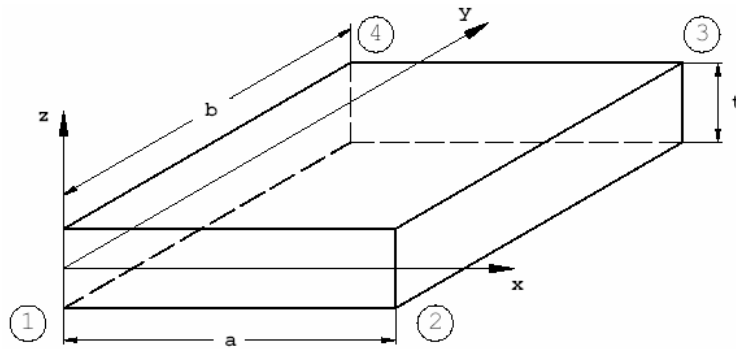


Figura 1: Elemento Finito Retangular

O elemento é composto por quatro nós, apresentando em cada nó três graus de liberdade, sendo duas rotações e uma translação. A translação é denotada por “w” na direção “z”, a rotação em torno do eixo “x” é denotada por “ θ_x ” e sobre o eixo “y” é denotada por “ θ_y ”. A direção positiva destas rotações é dada pela regra da mão direita. A Figura 2 ilustra os graus de liberdade.

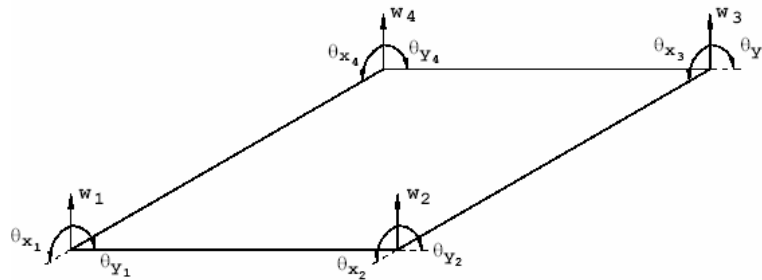


Figura 2: Graus de Liberdade

1.1.1 Matriz de rigidez

A matriz de rigidez do elemento pode ser escrita na forma genérica,

$$K^{(e)} = D_f \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{12}^t & K_{22} & K_{23} \\ K_{13}^t & K_{23}^t & K_{33} \end{bmatrix} \quad (1)$$

na qual a definição de cada um dos blocos é dada por:

$$\mathbf{K}_{11} = \begin{bmatrix} \frac{4a}{b^3} + \frac{14}{5ab} + \frac{4b}{a^3} - \frac{4\nu}{5ab} & \frac{1}{5b} + \frac{2b}{a^2} + \frac{4\nu}{5b} & \frac{1}{5a} + \frac{2a}{b^2} + \frac{4\nu}{5a} & \frac{2a}{b^3} - \frac{14}{5ab} - \frac{4b}{a^3} + \frac{4\nu}{5ab} \\ \frac{1}{5b} + \frac{2b}{a^2} + \frac{4\nu}{5b} & \frac{4a}{15b} + \frac{4b}{3a} - \frac{4a\nu}{15b} & \nu & \frac{-1}{5b} - \frac{2b}{a^2} + \frac{\nu}{5b} \\ \frac{1}{5a} + \frac{2a}{b^2} + \frac{4\nu}{5a} & \nu & \frac{4a}{3b} + \frac{4b}{15a} - \frac{4b\nu}{15a} & \frac{-1}{5a} + \frac{a}{b^2} - \frac{4\nu}{5a} \\ \frac{2a}{b^3} - \frac{14}{5ab} - \frac{4b}{a^3} + \frac{4\nu}{5ab} & \frac{-1}{5b} - \frac{2b}{a^2} + \frac{\nu}{5b} & \frac{-1}{5a} + \frac{a}{b^2} - \frac{4\nu}{5a} & \frac{4a}{b^3} + \frac{14}{5ab} + \frac{4b}{a^3} - \frac{4\nu}{5ab} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{K}_{12} = \begin{bmatrix} \frac{1}{5b} + \frac{2b}{a^2} - \frac{\nu}{5b} & \frac{-1}{5a} + \frac{a}{b^2} - \frac{4\nu}{5a} & \frac{-2a}{b^3} + \frac{14}{5ab} - \frac{2b}{a^3} - \frac{4\nu}{5ab} & \frac{-1}{5b} + \frac{b}{a^2} + \frac{\nu}{5b} \\ \frac{-a}{15b} + \frac{2b}{3a} + \frac{a\nu}{15b} & 0 & \frac{1}{5b} - \frac{b}{a^2} - \frac{\nu}{5b} & \frac{a}{15b} + \frac{b}{3a} - \frac{a\nu}{15b} \\ 0 & \frac{2a}{3b} + \frac{4b(-1+\nu)}{15a} & \frac{-a}{b^2} - \frac{-1+\nu}{5a} & 0 \\ \frac{-1}{5b} - \frac{2b}{a^2} - \frac{4\nu}{5b} & \frac{1}{5a} + \frac{2a}{b^2} + \frac{4\nu}{5a} & \frac{-4a}{b^3} - \frac{14}{5ab} + \frac{2b}{a^3} + \frac{4\nu}{5ab} & \frac{1}{5b} - \frac{b}{a^2} + \frac{4\nu}{5b} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{K}_{13} = \begin{bmatrix} \frac{a}{b^2} + \frac{-1+\nu}{5a} & \frac{-4a}{b^3} - \frac{14}{5ab} + \frac{2b}{a^3} + \frac{4\nu}{5ab} & \frac{-1}{5b} + \frac{b}{a^2} - \frac{4\nu}{5b} & \frac{1}{5a} + \frac{2a}{b^2} - \frac{\nu}{5a} \\ 0 & \frac{-1}{5b} + \frac{b}{a^2} - \frac{4\nu}{5b} & \frac{-4a}{15b} + \frac{2b}{3a} + \frac{4a\nu}{15b} & 0 \\ \frac{a}{3b} - \frac{b(-1+\nu)}{15a} & \frac{-1}{5a} - \frac{2a}{b^2} + \frac{\nu}{5a} & 0 & \frac{2a}{3b} - \frac{b}{15a} + \frac{b\nu}{15a} \\ \frac{2a}{b^2} - \frac{-1+\nu}{5a} & \frac{-2a}{b^3} + \frac{14}{5ab} - \frac{2b}{a^3} - \frac{4\nu}{5ab} & \frac{1}{5b} - \frac{b}{a^2} - \frac{\nu}{5b} & \frac{a}{b^2} + \frac{-1+\nu}{5a} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{K}_{22} = \begin{bmatrix} \frac{4a}{15b} + \frac{4b}{3a} - \frac{4a\nu}{15b} & -\nu & \frac{1}{5b} - \frac{b}{a^2} + \frac{4\nu}{5b} & \frac{-4a}{15b} + \frac{2b}{3a} + \frac{4a\nu}{15b} \\ -\nu & \frac{4a}{3b} - \frac{4b(-1+\nu)}{15a} & \frac{-2a}{b^2} + \frac{-1+\nu}{5a} & 0 \\ \frac{1}{5b} - \frac{b}{a^2} + \frac{4\nu}{5b} & \frac{-2a}{b^2} + \frac{-1+\nu}{5a} & \frac{4a}{b^3} + \frac{14}{5ab} + \frac{4b}{a^3} - \frac{4\nu}{5ab} & \frac{-1}{5b} - \frac{2b}{a^2} - \frac{4\nu}{5b} \\ \frac{-4a}{15b} + \frac{2b}{3a} + \frac{4a\nu}{15b} & 0 & \frac{-1}{5b} - \frac{2b}{a^2} - \frac{4\nu}{5b} & \frac{4a}{15b} + \frac{4b}{3a} - \frac{4a\nu}{15b} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{K}_{23} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{-1}{5b} + \frac{b}{a^2} + \frac{\nu}{5b} & \frac{a}{15b} + \frac{b}{3a} - \frac{a\nu}{15b} & 0 \\ \frac{2a}{3b} + \frac{b(-1+\nu)}{15a} & \frac{-a}{b^2} - \frac{-1+\nu}{5a} & 0 & \frac{a}{3b} - \frac{b(-1+\nu)}{15a} \\ \frac{-1}{5a} - \frac{2a}{b^2} - \frac{4\nu}{5a} & \frac{2a}{b^3} - \frac{14}{5ab} - \frac{4b}{a^3} + \frac{4\nu}{5ab} & \frac{-1}{5b} - \frac{2b}{a^2} + \frac{\nu}{5b} & \frac{1}{5a} - \frac{a}{b^2} + \frac{4\nu}{5a} \\ \nu & \frac{1}{5b} + \frac{2b}{a^2} - \frac{\nu}{5b} & \frac{-a}{15b} + \frac{2b}{3a} + \frac{a\nu}{15b} & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{K}_{33} = \begin{bmatrix} \frac{4a}{3b} - \frac{4b(-1+\nu)}{15a} & \frac{1}{5a} - \frac{a}{b^2} + \frac{4\nu}{5a} & 0 & \frac{2a}{3b} + \frac{4b(-1+\nu)}{15a} \\ \frac{1}{5a} - \frac{a}{b^2} + \frac{4\nu}{5a} & \frac{4a}{b^3} + \frac{14}{5ab} + \frac{4b}{a^3} - \frac{4\nu}{5ab} & \frac{1}{5b} + \frac{2b}{a^2} + \frac{4\nu}{5b} & \frac{-1}{5a} - \frac{2a}{b^2} - \frac{4\nu}{5a} \\ 0 & \frac{1}{5b} + \frac{2b}{a^2} + \frac{4\nu}{5b} & \frac{4a}{15b} + \frac{4b}{3a} - \frac{4a\nu}{15b} & -\nu \\ \frac{2a}{3b} + \frac{4b(-1+\nu)}{15a} & \frac{-1}{5a} - \frac{2a}{b^2} - \frac{4\nu}{5a} & -\nu & \frac{4a}{3b} + \frac{4b}{15a} - \frac{4b\nu}{15a} \end{bmatrix} \quad (7)$$

1.1.2 Matriz de massa

A matriz de massa do elemento finito retangular na sua forma explícita é dada por:

$$m = \frac{\rho tab}{25200} \left[\begin{array}{cccccccccccc} 3454 & & & & & & & & & & & Sim. \\ 461b & 80b^2 & & & & & & & & & & \\ 461a & 63ab & 80a^2 & & & & & & & & & \\ 1226 & 199b & 274a & 3454 & & & & & & & & \\ 199b & 40b^2 & 42ab & 461b & 80b^2 & & & & & & & \\ -274a & -42ab & -60a^2 & -461a & -63ab & 80a^2 & & & & & & \\ 394 & 116b & 116a & 1226 & 274b & -199a & 3454 & & & & & \\ -116b & -30b^2 & -28ab & -274b & -60b^2 & 42ab & -461b & 80b^2 & & & & \\ -116a & -28ab & -30a^2 & -199a & -42ab & 40a^2 & -461a & 63ab & 80a^2 & & & \\ 1226 & 274b & 199a & 394 & 116b & -116a & 1226 & -199b & -274a & 3454 & & \\ -274b & -60b^2 & -42ab & -116b & -30b^2 & 28ab & -199b & 40b^2 & 42ab & -461b & 80b^2 & \\ 199a & 42ab & 40a^2 & 116a & 28ab & -30a^2 & 274a & -42ab & -60a^2 & 461a & -63ab & 80a^2 \end{array} \right] \quad (8)$$

Tabela 1 - Nomenclatura usada no elemento finito retangular

Símbolo	Descrição
D_f	Rigidez de Flexão do Elemento Finito
a	Comprimento do Elemento Finito
b	Largura do Elemento Finito
ρ	Densidade do Material
ν	Coefficiente de Poisson
t	Espessura do Elemento

1.2 Metodologia dos Observadores de Estado

Para um sistema linear e invariante no tempo, considera esse a seguinte representação da variável de estado do sistema para a descrição do observador de estado:

$$\dot{\{x(t)\}} = [A]\{x(t)\} + [B]\{u(t)\} \quad (9)$$

$$\dot{\{y(t)\}} = [Cme]\{x(t)\} + [D]\{u(t)\} \quad (10)$$

Tabela 2 - Nomenclatura usada no modelo do observador de estado

Símbolo	Descrição
$\{x(t)\}$	Vetor de estado
$\{u(t)\}$	Vetor de entrada
$\{y(t)\}$	Vetor de saída
$[A]$	Matriz dinâmica
$[B]$	Matriz de distribuição
$[C_{me}]$	Matriz de medidas
$[D]$	Matriz constante

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 primeira ordem. Um observador de estado para o sistema da equação (9) e (10) é dado da seguinte forma:

$$\dot{\hat{x}}(t) = [A]\hat{x}(t) + [B]\{u(t)\} + [L](\{y(t)\} - \hat{y}(t)) \quad (11)$$

$$\hat{y}(t) = [Cme]\hat{x}(t) \quad (12)$$

Na qual $[L]$ é a matriz do observador de estado, a matriz $[Cme]$ é assumida de ser de posto completo, ou seja, o posto dela deve ser igual à ordem do sistema.

Trabalhando com sistema onde são observadas variações dos parâmetros, tem-se:

$$\dot{x}(t) = [A + \Delta A]\{x(t)\} + [B]\{u(t)\} \quad (13)$$

$$\{y(t)\} = [Cme]\{x(t)\} + [D]\{u(t)\} \quad (14)$$

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

Logo, um observador de estado para o sistema de equação (13) e (14) é dada por:

$$\dot{\hat{x}}(t) = [A + \Delta A]\hat{x}(t) + [B]\{u(t)\} + [L](\{y(t)\} - \hat{y}(t)) \quad (15)$$

$$\hat{y}(t) = [Cme]\hat{x}(t) \quad (16)$$

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

1.2.1 Projeto dos observadores de estado

Em um sistema mecânico, quando 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 começa a surgir no sistema. O observador de estado é um conjunto de equações diferenciais ordinárias de primeira ordem que apresenta a mesma resposta do sistema real, parte no 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 dessa idéia, o projeto do observador de estado é dividida 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 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.

Na segunda etapa, antes da montagem dos observadores robustos aos possíveis parâmetros do sistema sujeito a falhas, são retirados 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 a possibilidade de um ou mais parâmetros falharem um mesmo tempo. Neste caso, a solução de acordo com Melo (1998) seria projetar observadores de estado robustos a todos os parâmetros sujeito à falhas.

1.2.2 Modelagem matemática do sistema físico (sistema real)

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, determinam-se primeiramente os parâmetros do sistema e suas frequências naturais, e a partir daí, comparam-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.

1.2.3 Obtenção das matrizes [M], [K] e [C]

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

1.2.4 Determinação da matriz dinâmica [A]

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

$$[A] = \begin{bmatrix} [0] & \vdots & [I] \\ \dots & \dots & \dots \\ -[M]^{-1}[K] & \vdots & -[M]^{-1}[C] \end{bmatrix} \quad (17)$$

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

1.2.5 Solução da equação do sistema real

Através de uma rotina computacional desenvolvida utilizando o método numérico de Runge-Kutta de quarta 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 $x_1(t)$, $x_2(t)$,...

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

A equação do sistema na forma de estado é dada da seguinte forma:

$$\dot{\{x(t)\}} = [A + \Delta A]\{x(t)\} + [B]\{u(t)\} \quad (18)$$

1.2.6 Determinação dos autovalores de [A]

Nesta etapa, obtém 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 parte real negativa a esquerda dos autovalores de [A] para garantir a estabilidade e rápida convergência do processo.

1.2.7 Cálculo dos observadores de estado

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

1.2.8 Seleção dos autovalores do observador

Os autovalores do observador são selecionados para serem negativos, de modo que os estados do observador convirjam 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 para a seleção de bons autovalores ainda não está completamente resolvido, mas esse tipo de prática adotada apresenta bons resultados.

$$P = [\text{autovalores do observador}] \quad (19)$$

1.2.9 Definição na matriz de medidas [Cme]

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

$$C_{me} = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \quad (20)$$

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

Nesse caso, se o sistema for observável medindo somente em $x_1(t)$, não existe necessidade de realizar outra medida. 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.

1.2.10 Cálculo da matriz de Observabilidade

Adotada a matriz de medida [Cme] no item anterior, calcula-se nesta etapa a matriz de observabilidade dos observadores de estado construídos.

Nesta metodologia desenvolvida, o cálculo dessa matriz é feito utilizando a função “obsv” do Matlab de acordo com equação (21). É através desta função que se pode analisar se observador de estado construído será observável ou não usando a matriz de medidas adotadas.

$$[O] = \text{obsv}(A, C_{me}) \quad (21)$$

Obtida a matriz de Observabilidade [O], calcula-se o “rank” ou posto dessa 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 a próxima etapa.

Agora, caso o sistema não seja observável usando a matriz de medida escolhida, volta-se a etapa de escolha da matriz de medidas e determina-se uma outra matriz de medidas. Considerando o caso de um sistema massa mola amortecedor de três 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 dada da seguinte forma:

$$[Cme] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

Sendo assim, se o sistema for observável para esta nova matriz de medidas escolhidas, a equação (22), pode seguir para a próxima etapa. Caso contrário, retorna-se novamente e realizam-se os mesmos cálculos até que o sistema seja observável utilizando a matriz de medidas adotadas. Portanto, verifica-se novamente a existência da necessidade de se usar quantas medidas forem necessárias até que o sistema seja observável.

1.2.11 Cálculo da matriz do observador [L]

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

Nesta metodologia, o cálculo dessa matriz é feito utilizando a função “place” do Matlab de acordo com a equação (23):

$$L = \text{place}(A', Cme', p') \quad (23)$$

Este comando checa a qualidade da alocação dos autovalores de [L]. Caso essa alocação seja ruim, haverá uma instabilidade no processo, sendo assim, novos autovalores devem ser adotados, ou seja, deve-se voltar ao passo de escolha dos autovalores 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.

1.2.12 Solução da equação do observador de estado

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

$$\dot{\hat{x}}(t) = [A + \Delta A] \hat{x}(t) + [B] \{u(t)\} + [L] (\{y(t)\} - \hat{y}(t)) \quad (24)$$

A solução desta equação fornece como resultado a resposta do observador tanto global quanto robusto no tempo, ou seja, os valores dos deslocamentos dos observadores montados.

1.2.13 Unidade de decisão lógica

Nesta última etapa, através de uma rotina computacional desenvolvida, esse é a diferença entre os valores RMS do deslocamento do sistema (simulado) e dos observadores (global e robusto a parâmetros sujeitos a falhas), a fim de se detectar e de se localizar as falhas 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.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Serão realizadas simulações computacionais em dois diferentes tipos de estruturas, listadas abaixo:

- Sistema discreto utilizando mesas vibratórias do Laboratório de Vibrações da Faculdade de Engenharia – Campus de Ilha Solteira, onde será aplicada a metodologia dos observadores de estado, para condições iniciais e excitado com forças harmônicas.

- Sistema contínuo representado por uma placa engastada. Nela será aplicada a metodologia dos observadores de estado utilizando um modelo de falha para detecção de trincas. Serão analisadas as respostas no transiente, através da excitação com condições iniciais e em regime permanente com excitação harmônica. A trinca será provocada através de pequenas fissuras, simulando a propagação da mesma.

Etapas Experimentais: Todo trabalho experimental será desenvolvido no Laboratório de Vibrações e Instrumentação do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira.

A fim de se verificar a validade da metodologia a ser desenvolvida, será montada no Laboratório de Vibrações e Instrumentação do Departamento de Engenharia Mecânica (LVI/DEM/FEIS) uma placa engastada em uma base rígida, para garantir o engaste.

Será obtido o modelo matemático deste sistema, juntamente com o sistema de equações diferenciais, na forma matricial, que o descreve.

Para a análise experimental, tanto para uma excitação impulsiva quanto para uma excitação harmônica, esta placa será discretizada em elementos finitos de placa.

Primeiramente será simulada uma placa sem nenhuma falha e em seguida, uma placa com uma falha. A simulação desta falha será feita através de um corte superficial em um dos elementos de discretização da placa, simulando uma trinca na superfície.

Para os dois tipos de análises, serão obtidas curvas de resposta do sistema, as quais serão comparadas com as curvas geradas pelos observadores de estado, podendo desta maneira realizar a detecção de uma possível trinca na superfície desta placa e sua respectiva localização.

3. BIBLIOGRAFIA

Luenberger, D. G., Observers for Multivariable Systems, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol AC11, pp. 190-197, 1966.

Luenberger LUENBERGER, D. G., An Introduction to Observers, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol AC16, nº.6, pp. 596-602, 1971.

Luenberger LUENBERGER, D. G., Introduction to Dynamic Systems. Theory, Models, & Applications, New York, Chichester, Toronto, John Wiley & Sons, 445p., 1979.

Melo, G. P., Identificação de Sistemas Mecânicos Através do Método das Séries de Fourier – Um Método no Domínio do Tempo, UFU de Uberlândia 11p, 1992.

Melo, G. P., 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).

Melo, G. P. & Steffen Jr., V., Mechanical Systems Identification Through Fourier Series Time-Domain Technique, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences, Vol.XV, no.2, pp.124-135, 1994.

4. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são responsáveis por todo conteúdo deste trabalho.

CRACK DIAGNOSIS IN CONTINUOUS SYSTEMS THROUGH STATE-OBSERVER METHODOLOGY

Alisson Teixeira Zacarias

atzacarias@dem.feis.unesp.br

Gilberto Pechoto de Melo

gilberto@dem.feis.unesp.br

Department of Mechanical Engineering,

Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, Av. Brazil n.º 56, ZIP CODE 15385-000

Abstract: Nowadays a main factor of interest in industries in the development of new techniques for detection and localization of faults it is the concern with the security of its systems. The need for supervising and monitoring is to detect and correct the fault as fastest as possible.

It is verified, practically, that some determined parameters of the systems can vary during the process, due the specific characteristics or the natural wearing of its components. It is known that even in well-designed systems the occurrence of cracks in some components can provoke economic losses or lead to dangerous situations. The state observers methodology can reconstruct the unmeasured states of the system, since that it is observable, becoming possible in this way to esteem the measures for points of difficult access. The technique of state observers consists of developing a model for the system under analysis and to compare the estimate of exit with the measured exit, the difference between these two signals results in a residue that is used for analysis.

In this work will be assembled a bank of observers associated to a model of crack in order to follow its progress. The results gotten through computational simulations in a cantilever plate discretized by using the technique of finite elements and carried through experimental will be compared with experimental results to validate the developed methodology.

Keywords: State Observer, Finite Elements Methods, Plate Element, Fracture Mechanics, Crack Propagation.