



DETECÇÃO NEURAL DE TRINCA EM UMA VIGA FLEXÍVEL ATIVAMENTE CONTROLADA

Marco Antonio de Oliveira Alves Junior
Eurípedes Guilherme de Oliveira Nóbrega
Universidade Estadual de Campinas
Departamento de Mecânica Computacional.
CP 6122 – CEP 13083-970 – Campinas, SP, Brasil

***Resumo.** O monitoramento de estruturas mecânicas para a detecção de falhas tem sido bastante estudado ao longo das duas últimas décadas. Os métodos baseados na geração de resíduos têm apresentado bons resultados, principalmente quando se inclui a especificação de robustez. Uma arquitetura baseada no cálculo de resíduos a partir de observadores de estado está sendo proposta para o monitoramento de trincas em uma viga submetida à flexão. Limiares adaptativos são implementados, evitando assim falsos alarmes. Para isto, os valores dos limiares são calculados a cada iteração visando compensar perturbações desconhecidas que alterem o comportamento normal da planta. No entanto, a formulação matemática de trincas é bastante complexa, acarretando grande custo computacional e tornando lento o processo para a estimação dos resíduos. Para que isto seja evitado, propõe-se o uso de observadores baseados em redes neurais, de modo a gerar uma detecção da falha mais rápida e precisa. Apresenta-se também, para efeito de comparação, o cálculo de resíduos baseados em observadores tradicionais. Os resultados obtidos comprovam a eficiência das redes neurais no monitoramento de trincas para vigas flexíveis.*

Palavras-chave: Detecção de falha, controle adaptativo, observador neural.

1. INTRODUÇÃO

Os estudos de detecção e diagnóstico de falhas foram intensificados nas duas últimas décadas, tendo sido adotados inicialmente métodos oriundos da área de controle. Três abordagens principais podem ser historicamente identificadas, baseadas em observadores, estimação de parâmetros e espaço de paridade. Dois trabalhos de revisão (Frank, 1997 e Frank 1990) apresentam um excelente panorama do que tem sido realizado na área. Todos os métodos têm como escopo fundamental a geração de sinais analiticamente redundantes, ao contrário da abordagem primitiva de redundância física. Podem ainda ser diferenciados quanto à existência de um modelo matemático, ou representado através de métodos de inteligência artificial. A Figura 1 apresenta o esquema adotado para os métodos baseados na existência de modelo matemático. Estes métodos têm sempre o mesmo objetivo, que é a geração de um resíduo a ser analisado por um módulo de tomada de decisão que eventualmente dispara um alarme.

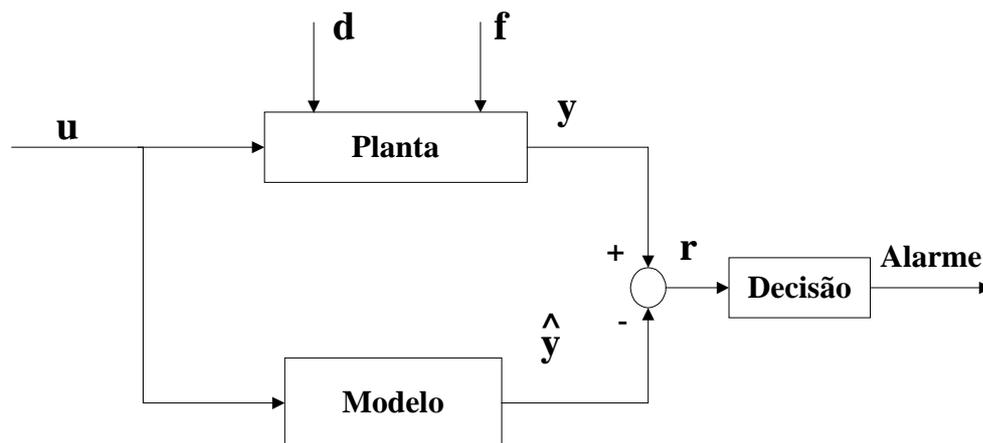


Figura 1 - Esquema básico de detecção de falha baseada em modelo da planta

Na Figura 1, u é a entrada e y é a saída da planta, d engloba as perturbações e incertezas de modelagem, f as falhas, \hat{y} é a estimativa da saída da planta e r é o resíduo. Todos esses sinais são em geral vetores com a dimensão compatível com a planta trabalhada. A idéia é que o modelo represente a planta em estado normal e assim o sinal de resíduo seja normalmente pequeno, tornando-se significativo quando ocorre alguma falha. No entanto, uma grande limitação do método é a ocorrência de alarmes falsos, o que acarretou o conceito de geração robusta de resíduos, definido como a capacidade do modelo de discriminar entre as respostas da planta às perturbações e às falhas (Frank, 1994). O módulo de decisão complementa a robustez através de filtros de pós-processamento dos resíduos e do uso de limiares adaptativos, que procuram acompanhar as condições operacionais do sistema, evitando assim alarmes falsos.

Por outro lado, uma tendência atual são as estruturas mecânicas ativamente controladas. Como a origem da detecção de falhas, conforme mencionado, está na área de controle, abre-se naturalmente espaço para o desenvolvimento de técnicas na detecção de falhas em estruturas controladas. Com os métodos modernos de controle, pode-se esperar em muitos casos um bom comportamento do sistema, ocasionado por critério de projeto, o que poderia facilitar a detecção do desvio da operação normal. No entanto, dependendo da capacidade do método de controle de acomodar as variações dos parâmetros ao longo do tempo de operação da planta, as perturbações dos sinais causadas por uma falha em evolução podem ser facilmente mascaradas. A monitoração de sistemas em malha fechada exige assim considerações adicionais de robustez, em relação a um sistema não controlado. Deve-se mencionar no entanto que, fazendo uso da infra-estrutura já existente para o controle, envolvendo normalmente sensores, computadores e mesmo a abordagem matemática do sistema, é possível adicionar, com relativamente pouco custo, a capacidade de monitoração. Ainda, a possibilidade de controlar um sistema que apresenta uma falha, extraindo apesar disso, um desempenho adequado, é um grande atrativo, principalmente quando há dificuldades operacionais para a manutenção dos sistemas, como por exemplo em aeronaves e satélites.

O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um método de detecção de falhas baseado em observadores implementados através de redes neurais multicamadas. O método é aplicado à detecção de trincas em uma viga, cujas vibrações são controladas de forma adaptativa, portanto com capacidade de acomodar um certo nível de falhas. Foi implementado um controle auto-sintonizado indireto, onde a solução da equação da viga foi obtida pelo método dos elementos finitos, gerando-se em seguida um modelo reduzido da planta. Para a simulação da trinca, incluiu-se um elemento sem massa representando a trinca.

Para a detecção da trinca foram primeiro implementados observadores de Luenberger da saída da planta, gerando resíduos robustos, a partir dos modelos reduzidos tanto da planta normal como da planta com trinca. No entanto, para haver uma boa convergência na solução das tensões existentes na ponta da trinca, grande quantidade de elementos seriam necessários (Gerstle, 1990), gerando modelos de alta ordem e assim dificultando o controle. Adicionalmente, matrizes de ordem muito maiores do que as normalmente tratadas na área de controle são facilmente obtidas através do método de elementos finitos, o que poderia inviabilizar a aplicação pelo alto custo computacional. Isto torna-se ainda mais significativo ao se tratar de estruturas de maior complexidade. Para contornar tal problema, foram adotados os observadores baseados em redes neurais, que, por sofrerem treinamento com base em sinais de entrada e saída, podem representar com simplicidade e precisão sistemas complexos, presumindo-se aqui o processamento de matrizes de menor ordem e portanto maior eficiência computacional.

O trabalho está dividido em seis seções. A seção 2 mostra a formulação da viga e de sua trinca por elementos finitos. A seção 3 explica o controle auto-sintonizável implementado bem como apresenta o resultado atingido. A seção 4 define a técnica robusta para detecção de falha, mostrando as equações usadas e os resultados de detecção encontrados. A seção 5 define o observador neural e apresenta os resultados no treinamento e na detecção. Por fim a seção 6 é a conclusão avaliando a pertinência do método desenvolvido.

2. FORMULAÇÃO DO MODELO DA PLANTA

Para a formulação do modelo da planta admitiu-se inicialmente uma viga com 10 elementos e dois graus de liberdade por nó, engastada em uma de suas extremidades e livre na outra. O modelo de estado respectivo seria portanto de ordem quarenta. Para uma representação satisfatória, admitiu-se o modelo reduzido com as quatro primeiras frequências naturais e portanto de oitava ordem. Para este, foi admitido ainda um fator de amortecimento de 0,01 para todas as frequências. Deste modo, há uma incerteza não estruturada na representação adotada para a identificação da planta.

2.1. Modelagem da viga normal

Foi usada a equação de Bernoulli-Euler para a simulação da viga,

$$EI \frac{d^4 V}{dx^4} + \rho A dx \ddot{V} + p(x) = 0, \quad (1)$$

sendo E o módulo de Elasticidade, I o momento de inércia, ρ densidade volumétrica, A a área da seção transversal, $p(x)$ o peso próprio da viga por unidade de comprimento e V o deslocamento transversal da viga.

A solução para a Eq. (1) foi obtida através de um programa implementando o método dos elementos finitos desenvolvido em ambiente MATLAB. O programa apresenta como resultado as matrizes globais de rigidez e massa da viga, possibilitando assim a sua modelagem linear por variáveis de estado. Sendo K a matriz de rigidez e M a matriz de massa globais, o modelo de estado foi obtido a partir de

$$\begin{bmatrix} 0 & M \\ M & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & -M \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ \dot{x} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} p \\ 0 \end{Bmatrix}, \quad (2)$$

onde x representa o deslocamento de cada elemento da viga e p a excitação em força. Em seguida foram acrescentados os fatores de amortecimentos. A Tabela 1 apresenta as dimensões da viga e a Tabela 2 as frequências naturais resultantes.

Tabela 1. Dimensões da viga

Base b	16 mm
Altura h	6 mm
Comprimento L	800 mm

Tabela 2. Frequências naturais da viga

f_1	7.71 Hz
f_2	48.32 Hz
f_3	135.35 Hz
f_4	265.41 Hz

Na Figura 2 podem-se observar os diagramas de Bode do modelo da viga com dez elementos e o reduzido de oitava ordem.

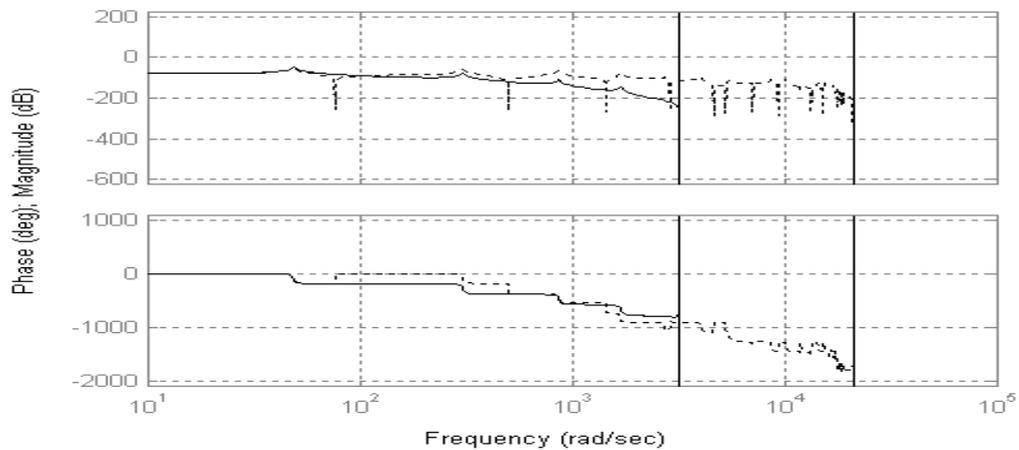


Figura 2- Resposta em frequência dos modelos da viga

2.2 Modelagem da viga com trinca

Adotou-se a abordagem da energia de deformação (Qian, 1998), o que torna possível estabelecer as equações dos modos de aparecimento de trinca, que pode se dar de três formas: modo de abertura K_I , modo de cisalhamento K_{II} e modo de rasgamento K_{III} . Conhecendo-se os prováveis modos de aparecimento da trinca consegue-se estabelecer o efeito da trinca no modelo da viga. A energia de deformação de um elemento sem trinca é dada por

$$W^{(0)} = \left[M^2 L + MPL^2 + \frac{P^2 L^3}{3} \right] / 2EI \quad (3)$$

onde M é o momento fletor e P o carregamento transversal da viga. A energia de deformação para um elemento com trinca é representada por

$$W^{(1)} = b \int_0^a \left[\frac{(K_I^2 + K_{II}^2)}{E'} + \frac{(1-\nu)K_{III}^2}{E} \right] da \quad (4)$$

sendo b a largura da seção transversal, a a profundidade da trinca, ν o módulo de Poisson, E é o módulo de elasticidade, e $E' = E$ para tensões planas ou $E' = E/(1 - \nu^2)$ para deformações planas. Admitindo-se a ausência de forças axiais, e definindo $K_I = K_{IP} + K_{IM}$, como o fator de intensidade de tensão causado apenas por carregamentos transversais e momentos fletores, a equação acima torna-se:

$$W^{(1)} = b \int_0^a \left[\frac{(K_{IM}^2 + K_{IP}^2) + K_{IIP}^2}{E'} \right] da \quad (5)$$

Os termos de intensidade de tensão são calculados como

$$\begin{aligned} K_{IM} &= \frac{6M}{bh^2} \sqrt{\pi a} F_I(\alpha), \\ K_{IP} &= \frac{3PL}{bh^2} \sqrt{\pi a} F_I(\alpha), \\ K_{IIP} &= \frac{P}{bh^2} \sqrt{\pi a} F_{II}(\alpha), \end{aligned} \quad (6)$$

sendo h a altura da seção transversal da viga, e $F_i(\alpha)$ funções que dependem da relação entre a profundidade da trinca a altura da seção transversal, $\alpha = a/h$. As equações respectivas são:

$$\begin{aligned} F_I(\alpha) &= \sqrt{\frac{2}{\pi\alpha} \operatorname{tg} \frac{\pi\alpha}{2} \frac{0,923 + 0,199 [1 - \sin(0,5\pi\alpha)]^4}{\cos(0,5\pi\alpha)}} \\ F_{II}(\alpha) &= (3\alpha - 2\alpha^2) \frac{1,122 + 0,561\alpha + 0,085\alpha^2 + 0,18\alpha^3}{\sqrt{1-\alpha}}, \end{aligned} \quad (7)$$

Com as equações apresentadas, pode-se calcular a matriz de flexibilidade através da relação,

$$C_{ij}^k = \frac{\partial^2 W^k}{\partial P_i \partial P_j}, \quad (8)$$

onde i, j, k , fazem parte da notação indicial que representa as energias de deformação e carregamentos citados anteriormente. Desta forma a matriz de flexibilidade local pode ser calculada como

$$C_{ij} = C_{ij}^{(0)} + C_{ij}^{(1)}, \quad (9)$$

de onde se obtém a matriz de rigidez com a influência da trinca.

3. CONTROLE ADAPTATIVO

O controle adaptativo auto-sintonizado foi adotado para atenuar as vibrações apresentadas pela viga quando submetida a carregamentos dinâmicos transversais. A planta é representada pela função de transferência discreta

$$y(q) = \frac{B(q)}{A(q)}u(q), \quad (10)$$

onde q é o operador avanço unitário, $u(q)$ e $y(q)$ são a entrada e a saída da planta, e $B(q)$ e $A(q)$ os polinômios coprimos, $A(q)$ mônico, que representam sua função de transferência. Admite-se um modelo de referência

$$y_m(q) = \frac{B_m(q)}{A_m(q)}r(q). \quad (11)$$

onde o subscrito m indica o modelo de referência e $r(q)$ é a entrada de referência. O objetivo do controlador é garantir que o desempenho do sistema será ditado pelos zeros e pólos do modelo de referência, arbitrado pelo projetista. O controle é exercido através de três polinômios, R , S e T , calculados através das equações

$$\begin{aligned} \hat{A}R + \hat{B}S &= A_o A_m \\ T &= A_o \frac{B_m}{\hat{B}} \end{aligned}, \quad (12)$$

a primeira das quais é conhecida como equação diofantina, e onde o polinômio A_o é definido como um observador, também arbitrado, que assegura uma solução causal para a equação. O símbolo "^" nas equações acima indicam estimativas realizadas "on-line" para os respectivos polinômios. Para maiores detalhes sobre o controle auto-sintonizável, pode-se consultar (Aström, 1997). Na Figura 3 encontra-se o diagrama de blocos do controlador implementado.

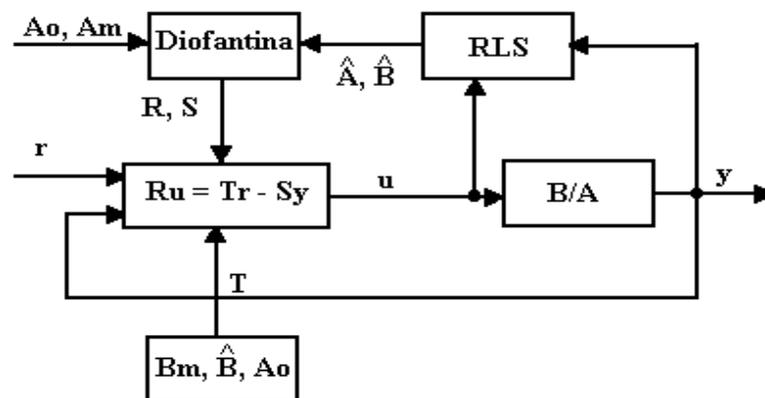


Figura 3 - Controle auto-sintonizado da planta

A análise a seguir é baseada no diagrama de blocos da Figura 3. O sinal de controle u é aplicado à planta, cuja saída é y . Estes dois sinais são medidos e processados pelo módulo RLS, que realiza a estimação recursiva dos parâmetros do modelo polinomial da planta. De posse da estimativa da planta é resolvida a equação diofantina que calcula os polinômios da lei de controle, e em seguida é calculado o novo sinal u a ser aplicado à planta no próximo intervalo de amostragem, reiniciando o ciclo.

Admitiu-se para o modelo de referência uma função também de oitava ordem, mantendo-se as frequências naturais, porém com fator de amortecimento de 0,707, o que assegura uma resposta rápida e com baixo sobressinal. O sinal de referência (r) que deve ser seguido pela

planta foi adotado como uma onda quadrada de amplitude $1e-5$ m e período de quatro segundos. O resultado obtido encontra-se na Figura 4.

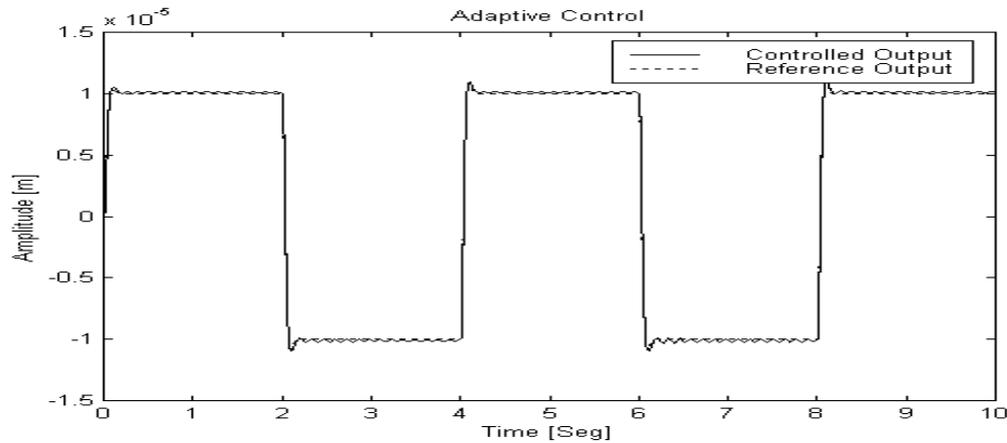


Figura 4 - Saída controlada da planta

No gráfico da Figura 4 pode-se ver a saída do modelo de referência para a onda quadrada, esta não representada para permitir melhor visualização. Sobreposta, encontra-se a saída da planta, que seguiu muito bem a saída do modelo de referência, sendo quase indistinguível na escala da figura. Deve-se ressaltar que os valores inicializados para os polinômios da planta foram pré-estimados antes da atuação do controlador, de modo a assegurar o bom desempenho apresentado, evitando assim oscilações na saída da planta durante o processo de convergência do estimador recursivo. Ainda, durante o tempo da simulação, os parâmetros da planta foram mantidos constantes, o que também contribuiu para o desempenho do controlador.

4. PROJETO DO OBSERVADOR ROBUSTO

O objetivo do observador para a detecção de falhas é a reprodução dos sinais medidos, ou seja, tratam-se de observadores de saída e não de estado. O propósito básico é permitir a comparação redundante dos sinais medidos com os sinais analíticos, possibilitando assim a geração dos resíduos quando da ocorrência de alguma perturbação dos sinais de saída. Deve-se no entanto evitar que as perturbações normais, devidos a ruído de medição, erros de modelagem, etc., venham a acarretar alarmes. Considerando o modelo de estado para a planta

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases}, \quad (13)$$

ou ainda, para a saída

$$y(s) = G(s)u(s) + \Delta y(s) + H(s)f(s), \quad (14)$$

onde $y(s)$ é a transformada de Laplace da saída, $G(s)$ a função de transferência da planta, $u(s)$ o sinal de controle transformado, $\Delta y(s)$ a incerteza da planta, $H(s)$ a função de transferência do vetor de falhas $f(s)$, pode-se escrever para o resíduo

$$r(s) = \hat{M}(s)(y(s) - G(s)u(s)) \quad (15)$$

onde $G(s) = \hat{M}^{-1}(s)\hat{N}(s)$ é uma fatoração em polinômios coprimos (Ding, 1990) da função de transferência da planta incluindo um observador de Luenberger de ganho L , tal que

$$\begin{aligned}\hat{M} &= I - C(sI - A + LC)^{-1}L \\ \hat{N} &= C(sI - A + LC)^{-1}B\end{aligned}\quad (16)$$

Em conseqüência, o resíduo pode ser escrito como

$$r(s) = \hat{M}(s)y(s) - \hat{N}(s)u(s), \quad (17)$$

o que se pode mostrar ser equivalente à equação abaixo,

$$r(s) = y(s) - \hat{y}(s), \quad (18)$$

onde $\hat{y}(s)$ é a saída estimada pelo observador. Ou seja, o resíduo assim gerado é na verdade o erro de estimação.

Para o limiar adaptativo foi admitida a expressão (Frank, 1994b)

$$J = \|\delta\hat{M}u\| \quad (19)$$

onde δ é um limite estabelecido para a incerteza da planta e $\| \cdot \|$ representa uma norma a ser adotada, no caso o valor médio quadrático. Com isso o alarme passa a ter um limiar variável, que depende das condições operacionais da planta, sendo disparado quando ocorre a ultrapassagem do limiar $\|r(s)\| > \|J\|$.

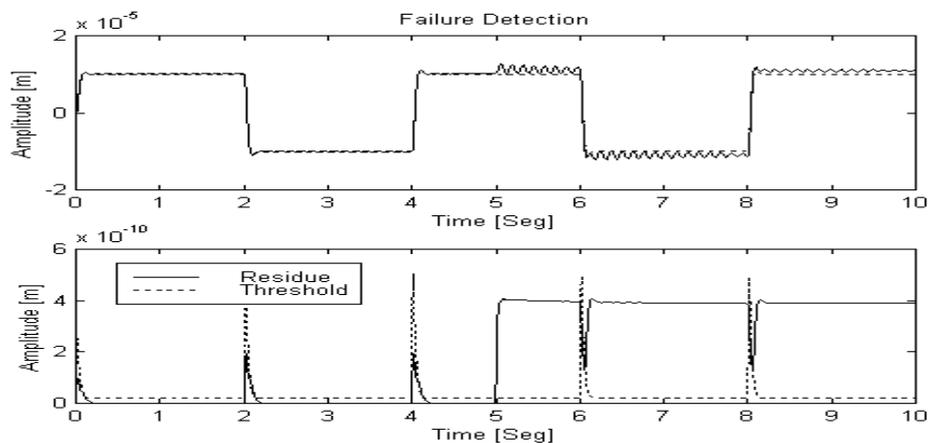


Figura 5 - Detecção de falha

A Figura 5 apresenta o resultado para uma trinca com $\alpha = 0,3$ incluída no instante 5 s. Observa-se no gráfico superior a conseqüência do aparecimento da trinca, através de uma oscilação na saída controlada, notando-se no entanto que a oscilação tende a desaparecer, o que é um efeito do controle adaptativo, re-estimando o novo modelo da planta. No entanto, pode-se observar no gráfico inferior, que o resíduo ultrapassa o valor do limiar, e mantém-se em estado de alarme comprovando a alteração dos parâmetros da planta.

5. DETECÇÃO DE FALHA USANDO OBSERVADOR NEURAL

Tendo em vista a capacidade de representação das redes neurais para sistemas complexos foi desenvolvido um observador neural para a saída da planta, conforme já mencionado. Para isto, uma rede foi adotada para reproduzir o comportamento dinâmico da planta, segundo o esquema apresentado na Fig. 6. Foram usados para treinamento o sinal de controle e a saída atrasada da planta, com os pesos ajustados por retropropagação em função da diferença entre a saída da planta e a estimativa gerada. Sobre redes neurais, consultar (Haykin, 1999).

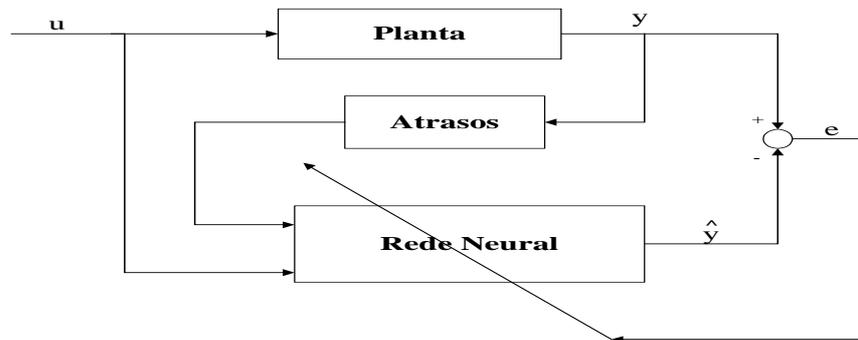


Figura 6 - Treinamento neural

Admitiu-se uma topologia com duas camadas intermediárias com função de ativação tangente hiperbólica e uma camada de saída linear com apenas um neurônio. A aplicação do treinamento pode ser visualizado na Fig. 7, onde até o instante 5 s foi simulada a operação normal da planta controlada adaptativamente, quando então foi introduzida a falha. Pode-se notar que a convergência da rede neural foi satisfatória. O objetivo do observador neural é reproduzir a saída da planta quando esta se encontra em estado normal. Ao surgir uma alteração no seu comportamento, a diferença entre a saída real e a estimada pela rede é o resíduo, o qual deve ser comparado com um limiar para o disparo do alarme respectivo, nos moldes já descritos na seção anterior.

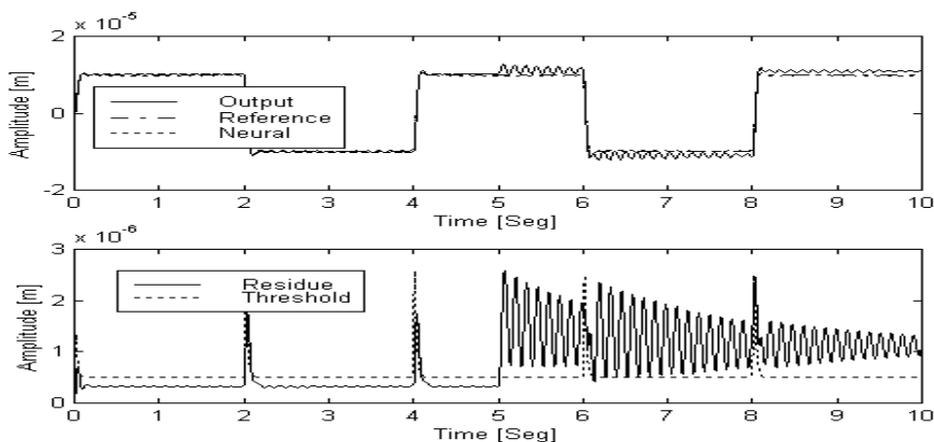


Figura 7 - Detecção de Falha por redes neurais

Observa-se na Fig. 7 que ocorreu a detecção da falha imediatamente, tendo o resíduo ultrapassado o valor do limiar e permanecido assim durante o tempo do gráfico. Pode-se inferir um valor residual como tendência, apesar do controle adaptativo acomodar a variação da planta.

6. CONCLUSÃO

O objetivo do trabalho aqui descrito foi desenvolver um observador neural com capacidade para detectar a ocorrência de trincas em uma viga com vibrações controladas adaptativamente. Os resultados obtidos permitem concluir que tal objetivo foi bem atendido, possibilitando a detecção mesmo quando o controle adaptativo acomoda a falha atenuando a vibração apesar da variação do modelo da planta. Porém não está ainda comprovado que as redes neurais podem substituir com vantagem os observadores tradicionais, projetados para a detecção de falhas, quanto ao aspecto da capacidade de representação e consequentemente no custo computacional. Para tanto, é necessário que o método desenvolvido seja aplicado a uma estrutura mais complexa.

REFERÊNCIAS

- Astrom, K., J. & Wittenmark, B., 1997, Computer Controlled Systems, Third Edition, Prentice Hall.
- Ding, X., & Frank, P., M., 1990, Fault detection via factorization approach, Systems & Control Letters, V. 14, No 5, pp. 431-436.
- Frank, P. M., 1990, Fault diagnosis in dynamics systems using analytical and knowledge-based redundancy - a survey and some new results , Automatica, V. 26, No 3 pp. 459-474.
- Frank, P. M., 1994, Enhancement of robustness in observer-based fault detection, Int. J. Control, Vol. 59, No. 4, pp. 955-981.
- Frank, P. M. & Ding, X., 1994, Frequency domain approach to optimally robust residual generator and evaluation for model-based fault diagnosis, Automatica, 30, pp. 789-904.
- Frank, P. M. & Ding, X., 1997, Survey of robust residual generation and evaluation methods in observer-based fault detection systems, Elsevier Science, pp. 403-424.
- Gerstle W. H. & Abdalla, J. E., 1990, Finite Element Meshing Criteria for Crack Problems, Fracture Mechanics: Twenty-First Symposium. pp. 509-521.
- Haykin, Simon, 1999, Neural Networks, A Comprehensive Foundation, Prentice Hall, Second Edition.
- Qian, G. L.; Gu S. N. & Jian, J. S., 1998, The Dynamic Behaviour and Crack Detection of Beam With a Crack, Journal of Sound and Vibration, vol. 10, pp. 233-243, November.

NEURAL CRACK DETECTION FOR ACTIVELY CONTROLLED FLEXIBLE BEAM

Abstract. Fault detection studies of mechanical structures has been intensified in the last two decades. Methods based on residual generation have presented good results, mainly when robustness requirements are included. An architecture based on output observers for residual generation is proposed for monitoring of a controlled flexible beam, in order to detect a crack. Adaptive thresholds are implemented to avoid false alarms, with values calculated each iteration, trying to compensate for the unknown disturbances that tend to alter the regular operation of the plant. On the other hand, the crack formulation implies in complex models and brings high computational cost that could make the whole process slow. To avoid this problem, it is proposed the use of neural observers, expected to generate faster and more accurate failure detection. Furthermore, observer-based results are also presented, to compare with the neural residual generation. It is possible to conclude that neural observer is an efficient method for crack detection in flexible beams.

Keywords: *Fault detection, adaptive control, neural observer.*