

CARACTERIZAÇÃO DE FALHAS ESTRUTURAIS UTILIZANDO SENSORES/ATUADORES PIEZELÉTRICOS E RNA

Rogério Mendonça Furtado

furtado@dem.feis.unesp.br

Vicente Lopes Júnior

vicente@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: Atualmente a manutenção preditiva tem grande importância e responsabilidade em nossas vidas. Fatores econômicos e de segurança tornaram esta ferramenta uma realidade cada vez mais aplicada nas empresas e indústrias. Existem alguns métodos que usualmente são empregados, dentre eles tem-se: análise de óleo, métodos baseados na análise de vibrações, partículas magnéticas, etc. Todos eles têm suas vantagens e limitações, neste sentido, devido sua importância, constantes pesquisas são realizadas na tentativa de aprimorar e de desenvolver novas técnicas de manutenção preditiva. Nesta ótica utilizou-se uma técnica de manutenção preditiva que se baseia no princípio da impedância elétrica através de elementos piezocerâmicos. Um ponto positivo desta técnica é que ela não é baseada em modelos matemáticos e, quando associada às redes neurais artificiais (RNA's), torna-se uma proposta atraente. Esta metodologia pode ser aplicada em uma grande quantidade de problemas, incluindo estruturas complexas com falhas simultâneas.

Os materiais piezoeletricos são utilizados na técnica da impedância elétrica que trabalha na região de altas frequências, geralmente entre 10Khz e 100Khz. Desta maneira, o atuador excita os modos locais apenas nas regiões próximas de cada PZT, definindo, assim, a área de influência de cada sensor/atuador. As RNA's são utilizadas para quantificar a severidade da falha, uma vez que a impedância elétrica fornece apenas informações qualitativas a respeito do dano. O artigo conclui apresentando resultados de um teste experimental em uma estrutura tipo “virabrequim” para a localização e a quantificação de falhas.

Palavras-chave: piezeletricidade, redes neurais artificiais, estruturas inteligentes, algoritmo backpropagation, impedância elétrica, PZT.

1. INTRODUÇÃO

Cada vez mais a manutenção preditiva vem fazendo parte de nosso cotidiano, sendo aplicada nas indústrias, em empresas, nas construções, no monitoramento de máquinas, etc. Sua utilização se justifica devido à necessidade de reduzir gastos e aumentar a confiabilidade e segurança das estruturas e equipamentos. Existem algumas técnicas de manutenção preditiva baseadas nos ensaios

não destrutivos (END) que já são largamente aplicadas, dentre elas tem-se: análise de óleo, partículas magnéticas, líquidos penetrantes, métodos baseados na análise de vibrações, etc. O aumento no nível de exigências dos sistemas é acompanhado por constantes pesquisas envolvendo novos materiais e o desenvolvimento de novas técnicas.

Na área de projetos, geralmente, estas técnicas são empregadas no diagnóstico e monitoramento de danos estruturais. A capacidade de avaliação de danos pode ser pensada de duas maneiras: (1) monitoramento das mudanças de sua condição e, se necessário, parar a operação do equipamento antes de piorar as condições e; (2) garantir que o dano iniciado não se estenda para uma situação de risco. As técnicas de obtenção de (1) estão melhores definidas que as de (2).

Métodos de análise de vibração para máquinas rotativas utilizando a técnica de *Order Tracking*, são apresentadas por Idehara (Idehara, 2003). Neste trabalho, o autor realiza análise de componentes rotativos através de sinais em função da velocidade de rotação. Métodos combinados, como por exemplo, a utilização da ferramenta das redes neurais artificiais e da transformada de wavelet no diagnóstico de falhas em máquinas rotativas, pode ser encontrada em Santiago (Santiago, 2004). Estas duas técnicas alternativas aplicadas no diagnóstico de máquinas, mostram as possibilidades de análise na área que estuda a manutenção preditiva.

A caracterização de danos, para melhor entendimento, pode ser classificada por níveis. Doebling et al. (Doebling et al., 1998) usam quatro níveis de classificação:

- Nível 1 – Detecta a existência da falha;
- Nível 2 – Detecta e localiza a falha;
- Nível 3 – Detecta, localiza e quantifica a falha;
- Nível 4 – Detecta, localiza e quantifica a falha e, então, estima a vida útil restante do equipamento.

Inman (Inman, 2001) adiciona mais três níveis. Todos incorporando a utilização de materiais inteligentes:

- Nível 5 – Combina o nível 4 com estruturas inteligentes para auto-diagnóstico de falhas estruturais;
- Nível 6 – Combina o nível 4 com estruturas inteligentes e controle para formar um sistema de auto-reparo estrutural;
- Nível 7 – Combina o nível 1 com controle ativo e estruturas inteligentes para obtenção de um sistema simultâneo de controle e monitoramento.

Este artigo aplica uma técnica de manutenção preditiva utilizando materiais inteligentes e redes neurais artificiais para detecção e monitoramento de danos estruturais. Assim, poderia ser englobado em uma técnica que abrangeria o nível 3, apresentado por Doebling, e o nível 7, de maneira parcial.

Embora existam diversas definições para o termo inteligente (*“Smart”*), a comunidade de engenharia tem adotado o termo de estruturas inteligentes (*“Smart Structures”*), desde o início da década de 90, para descrever estruturas ou componentes estruturais com habilidades extraordinárias, que não são encontradas em materiais/estruturas convencionais. A Fig. (1) mostra de uma maneira sucinta a analogia entre estruturas inteligentes e os seres vivos (Egawa, 1997).

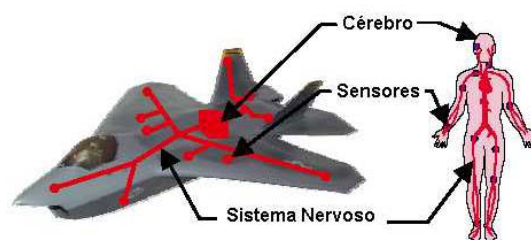


Figura 1. Conceitos prevalecentes de estruturas inteligentes

Materiais inteligentes têm a habilidade de converterem uma forma de energia em outra. Exemplos incluem a conversão de energia mecânica em elétrica e vice-versa pelos materiais piezelétricos,

calor para energia mecânica através das ligas de memória de forma, que em inglês tem a sigla SMA (*Shape Memory Alloys*), magnética para energia mecânica através de fluidos magnetorelógico e uma variedade de outros materiais. As duas formas de energia oriundas dos materiais inteligentes podem trazer uma série de vantagens para as estruturas e dispositivos que têm estes materiais incorporados. Estes materiais são fabricados de várias formas e tamanhos, propiciando assim sua utilização em diversas aplicações, incluindo lugares de difícil acesso. Além do que, estes materiais podem ser usados como sensores e atuadores permitindo o monitoramento e ação de controle nas estruturas em que estão agregados (Peairs, 2002).

2. IMPEDÂNCIA ELÉTRICA EM MATERIAIS PIEZOCERÂMICOS

A tensão mecânica, a deformação, o campo elétrico e o deslocamento elétrico, dentro do material piezelétrico, podem ser completamente descrito por um par de equações eletromecânica. Existem vários pares de equações eletromecânicas; a melhor escolha depende do problema a ser abordado. Usando a notação padrão IEEE 176-1987, a relação constitutiva linear do material piezelétrico pode ser descrita pela Eq. (1). As letras nos colchetes indicam as unidades das variáveis no Sistema Internacional de Unidades, com Newton (N), metro (m), Volt (V) e Coulomb (C).

$$S_{ij} = s_{ijkl}^E T_{kl} + d_{kij}^t E_k \quad D_i = d_{ikl}^T T_{kl} + \varepsilon_{ik}^T E_k \quad (1)$$

onde o sobrescrito t indica matriz transposta, E e T indicam que os valores foram medidos com campo elétrico e tensão constante, respectivamente.

i, j, k, l representam os valores 1, 2, 3 (ou x, y, z)

S_{ij} = tensor deformação [m/m]

T_{kl} = tensor de tensão [N/m²]

E_k = campo elétrico [V/m; N/C]

d_{kij} = constante piezelétrica [C/N]

D_i = deslocamento elétrico ou indução [C/m²]

s_{ijkl} = tensor de compliança [m²/N]

ε_{ik}^T = permissividade dielétrica [C²/Nm²]

Um modelo simples, como mostrado na Fig. (2), pode descrever a interação entre um PZT e a estrutura a ele vinculada. O PZT é considerado como uma barra fina exposta a uma vibração axial em resposta a aplicação de tensão elétrica alternada. Uma extremidade é fixada e a outra é conectada na estrutura, representada por um sistema de um grau de liberdade.

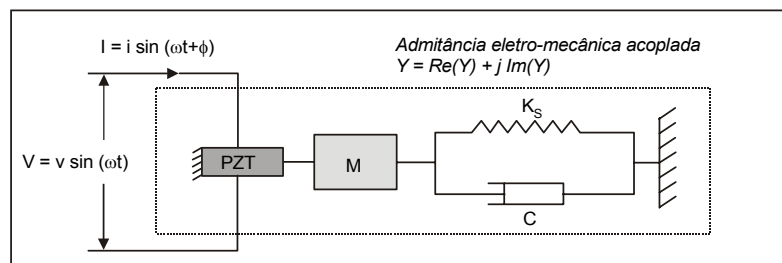


Figura 2. Modelo usado para representar o acoplamento de um PZT com a estrutura base.

A impedância elétrica é definida como a razão entre a tensão elétrica de entrada e a corrente resultante. Enquanto, a impedância mecânica, Eq. (2), é definida como a razão entre a força aplicada e a velocidade resultante no domínio da frequência (Ewins, 1991). O transdutor

eletromecânico acopla as impedâncias elétrica e mecânica. Sendo mais fácil medir a impedância elétrica do que a mecânica, esta característica pode ser utilizada com vantagens para muitas aplicações, como por exemplo, em situações onde a FRF poderia ser de difícil obtenção.

$$Z_s(\omega) = \frac{F(\omega)}{\dot{X}(\omega)} \quad Y_s(\omega) = \frac{1}{Z(\omega)} \quad (2)$$

sendo $Z_s(\omega)$ a impedância mecânica da estrutura, $F(\omega)$ a transformada de Fourier da força de entrada, $\dot{X}(\omega)$ a transformada de Fourier da velocidade e $Y_s(\omega)$ a admitância mecânica, a qual é o inverso da impedância e ω a frequência de excitação. Considerando o sistema da Fig.(2), as equações da piezeletricidade e após algumas substituições, a admitância elétrica para um PZT retangular com a direção de polarização no eixo 3 (direção z), pode ser encontrada como (Sun, 1996):

$$Y(\omega) = i\omega \frac{w_A l_A}{h_A} \left(\bar{\epsilon}_{33}^T - (d_{32})^2 \bar{Y}_{22}^E + \frac{Z_A(\omega)}{Z_s(\omega) + Z_A(\omega)} (d_{32})^2 \bar{Y}_{22}^E \frac{\tan(k l_A)}{k l_A} \right) \quad (3)$$

sendo Z_A a impedância mecânica do atuador ao longo da direção y, Z_s a impedância mecânica da estrutura, k a constante de rigidez do PZT, \bar{Y}_{22}^E módulo complexo do PZT para campo elétrico zero, w_A , h_A , e l_A a largura, a espessura e o comprimento do PZT respectivamente.

A técnica da impedância elétrica fornece informações qualitativas a respeito da falha. Neste sentido, a falha métrica é definida como um valor escalar para monitorar a variação da impedância elétrica em tempo real. Deve-se definir um valor mínimo, “threshold”, acima do qual um sinal de alarme deve ser acionado para alertar o surgimento de falhas. Diversos valores podem ser empregados para definir o conceito de falha métrica, o mais simples pode ser definido como:

$$M = \sum_{i=1}^n [\text{Re}(Z_{i,1}) - \text{Re}(Z_{i,2})]^2 \quad (4)$$

sendo M a falha métrica, Re a parte real da impedância elétrica, $Z_{i,1}$ a impedância elétrica medida para a estrutura na condição normal (medida de referência) e $Z_{i,2}$ a impedância elétrica que será comparada com a medida de referência para cada intervalo de frequência i (Lopes Jr. et al., 2001). O monitoramento do sinal de impedância elétrica para a medida de $Z_{i,2}$ é usado no sistema de manutenção preditiva para detectar pequenas variações estruturais.

3. REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

Uma rede neural artificial (RNA) consiste de uma arquitetura de processamento de informações baseadas nas redes neurais biológicas e possui habilidades de identificação de funções e classificação de padrões. Similarmente às redes neurais biológicas, as RNA assimilam informações pela técnica de tentativa e erro. Isto significa que podem aprender mediante a apresentação de exemplos.

O elemento básico de uma rede neural é chamado de neurônio, que consiste de um nível de atividade, uma entrada e uma saída. A saída de um neurônio pode ser determinada como:

$$y_j = f \left(\sum_{i=1}^n w_{ji} x_i + b_j \right) \quad (5)$$

sendo y_j a saída do neurônio com índice j , f a função de transferência, que pode ser degrau, rampa, linear, sigmóide, etc., w_{ji} pesos associados ao neurônio, x_i a entrada do neurônio, b_j o valor de bias do neurônio e n número de entradas associadas ao neurônio j .

O tipo de rede utilizada empregou o algoritmo de treinamento Backpropagation com momento, sendo os pesos ajustados a partir da camada de saída até a camada de entrada. A adição do termo momento torna o algoritmo mais rápido computacionalmente. Este termo é utilizado para evitar a oscilação quando se utiliza valores altos para a taxa de treinamento, desta forma se utiliza uma variação no peso dependente da variação do peso passado.

4. APLICAÇÕES EXPERIMENTAIS

A estrutura abaixo tem um formato que se assemelha a um virabrequim, com as medidas apresentadas na Fig. (3.b) em milímetros. Esta estrutura foi previamente utilizada para quantificar danos através de um método de otimização hierárquica, (Lopes Jr. et al., 2001). Para esta estrutura foi monitorado a detecção, a localização e a quantificação da severidade da falha introduzida. Durante a localização da falha, utilizou-se as medidas da impedância elétrica de cada PZT para cada condição de falha no cálculo da falha métrica. Na fase de quantificação utilizou-se, também, as redes neurais artificiais, que foram treinadas e avaliadas tendo como padrão de entradas os valores da falha métrica.

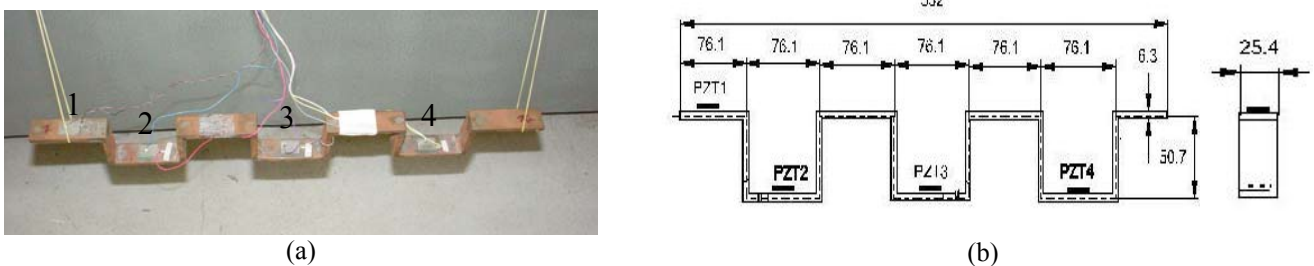


Figura 3. Estrutura do tipo virabrequim.

Na Fig. (3.a) pode-se notar quatro PZT's colados ao longo da estrutura, numerados de 1 a 4. Cada PZT tem formato quadrado com lados de 20 mm e espessura de 0.267 mm. Estes PZT's delimitam a área de influência para localização das falhas. Foram utilizados PZT's de denominação PSI-5A-S4, (Piezo System), com as seguintes propriedades: Módulo de Elasticidade $E = 63 \text{ GPa}$; Constante Dielétrica $d_{31} = -190 \times 10^{-12} \text{ m.V}^{-1}$.

A falha foi inserida na estrutura no lado oposto e em baixo do PZT_4, indicado na Fig. (3.a) pelo numero quatro, através de um corte realizado por uma serra circular com 0.3 mm de espessura ao longo da largura da estrutura, como mostra a Fig. (4). Para cada PZT, foram realizadas seis medidas de impedância elétrica na faixa entre 45 a 55KHz; a situação padrão sem falha, referência, e as cinco demais com falhas. As falhas introduzidas e as respectivas profundidades podem ser observadas na Tab. (1).

Tabela 1. Características das falhas introduzidas na estrutura do tipo virabrequim.

<i>Tipo de falhas</i>	<i>Profundidade (mm)</i>
Falha 1	0.2
Falha 2	0.6
Falha 3	1.0
Falha 4	1.2
Falha 5	1.4



Figura 4. Detalhe da falha introduzida.

Como a técnica da impedância elétrica trabalha com altas frequências para excitar os modos locais, pode-se avaliar as regiões e conseqüentemente as falhas de forma independente. A Fig. (5) apresenta os valores da falha métrica para os quatros PZT's em cada condição de falha. Note que os valores estão normalizados em relação ao maior valor e que em todos os casos foi obtido no PZT_4. Mesmo se tratando de uma falha incipiente, 0.3 mm de largura e 0.2 mm de profundidade, a técnica foi capaz de detectar e localizar a região onde a falha está presente.

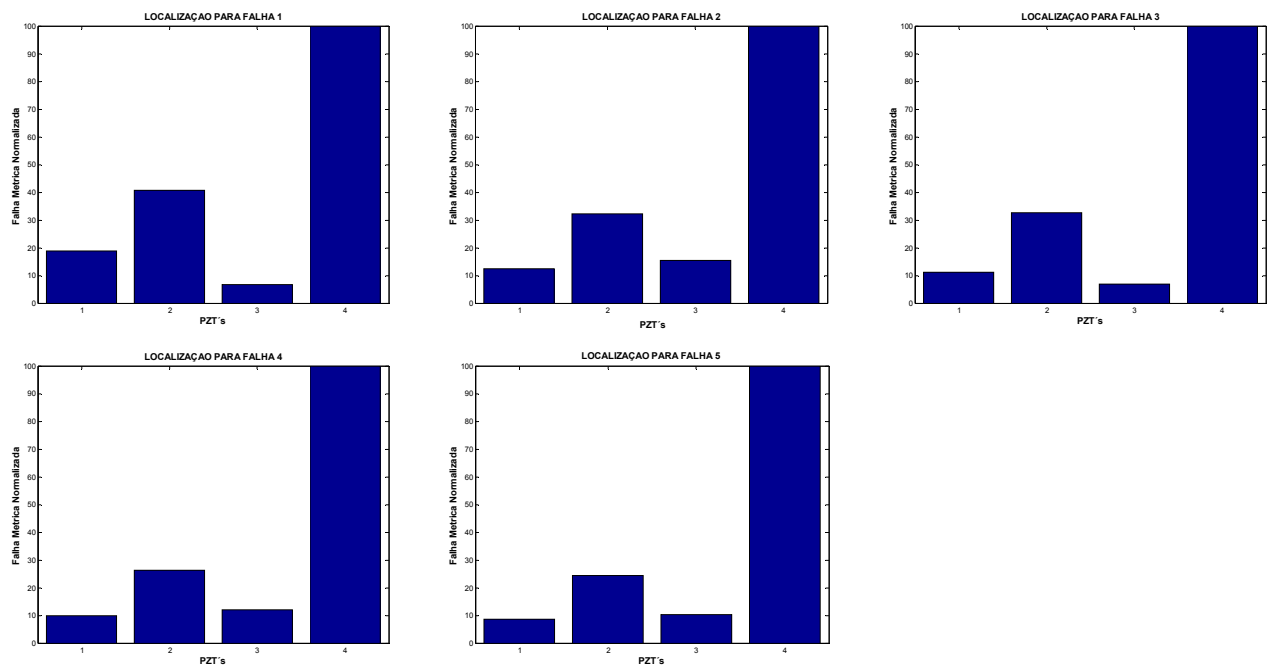
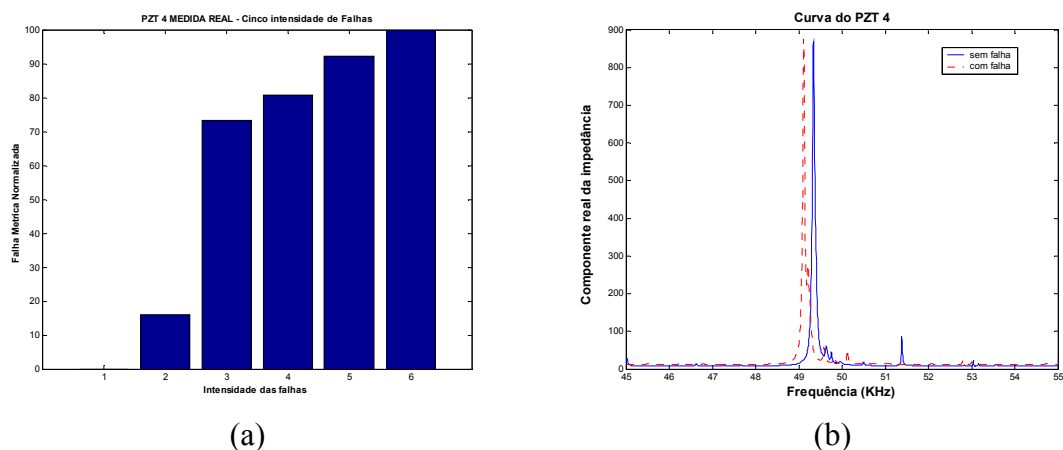


Figura 5. Falha métrica para os quatros PZT's em cada condição de falha.

Na fase de quantificação da falha, utilizou-se os dados da evolução da falha métrica para o PZT_4 como padrões de treinamento e de avaliação da rede neural. A metodologia exige uma rede neural para cada PZT, ou seja, após a localização da região onde a falha está presente deve ser utilizada a rede neural treinada para o referido PZT, para quantificar a severidade da falha. A Fig. (6.a) apresenta a evolução da falha métrica obtida para o PZT_4. Note que os valores estão normalizados em relação ao valor máximo.



(a) (b)
Figura 6. Medidas de impedância para o PZT 4.

As barras apresentadas na figura acima representam o valor da falha métrica calculada para cada profundidade de falha na região de influência do PZT_4. As falhas estão em ordem crescente, partindo da condição sem falha, barra 1, até a falha máxima, barra 6, que representa a falha com 1.4 mm de profundidade. A Fig. (6.b) apresenta o gráfico da componente real da impedância elétrica no PZT_4 para a condição sem falha e com a falha de 1.4 mm de profundidade. Pode-se notar claramente a diferença entre as curvas.

Para quantificar a falha, utilizou-se uma rede neural multilayer perceptron com treinamento via backpropagation com duas camadas de processamento. Nos neurônios intermediários empregou-se a função de transferência do tipo sigmoideal, já para o neurônio de saída a função de transferência empregada foi do tipo linear. Por se tratar de um problema relativamente simples e com um pequeno número de padrões, utilizou-se uma rede neural relativamente pequena com cinco neurônios na camada intermediária.

Os padrões utilizados na fase de treinamento foram as falhas métricas referentes às profundidades descritas na Tab. (1). Entretanto, na fase de avaliação, além de se utilizar os mesmos padrões que foram utilizados na fase de treinamento, utilizou-se também os padrões referentes as profundidades de 0.4 e 0.8 mm. Esses dados não foram apresentados a rede neural durante a fase de treinamento, desta maneira pode-se avaliar o comportamento da rede diante de um padrão desconhecido (generalização). A Tab. (2) mostra os padrões fornecidos à rede e as respostas obtidas.

Tabela 2. Resposta da rede neural na quantificação da falha.

Falha Métrica (%)	Profundidade da falha (mm)	Resposta da rede profundidade (mm)	Erro %
0.0000	0.0	0.0032	0.32
0.1613	0.2	0.2133	1.33
0.2081	0.4	0.3791	2.09
0.7329	0.6	0.6309	3.09
0.7602	0.8	0.7745	2.55
0.8072	1.0	1.0049	0.49
0.9227	1.2	1.2014	0.14
1.0000	1.4	1.3991	0.09

Como se pode notar a rede apresentou um bom resultado na quantificação da profundidade das falhas, mesmo não sendo treinada para as profundidades de 0.4 e 0.8 mm. Os erros apresentados na verificação da rede não prejudicam as estimativas da profundidade das falhas. Neste sentido, a quantificação da severidade da falha através das redes neurais pode ser estimada adequadamente.

Cabe observar que a faixa de frequência adotada exibe apenas um pico de ressonância. Os resultados poderiam ser melhorados se fosse adotada uma faixa de frequência com maior quantidade de picos. A técnica da impedância elétrica, como proposto neste trabalho, pressupõe

análise independente para cada região de influência do PZT. Portanto, cada sinal, originário dos PZT's, pode ser adquirido em uma faixa diferente de frequências.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Procurou-se com este trabalho, apresentar uma técnica recente que vem sendo aplicada no monitoramento de falhas em estruturas. Existem diversas técnicas de manutenção preditiva bem difundidas, cada uma com suas potencialidades e limitações. Em especial, a técnica da impedância elétrica tem como ponto positivo a localização exata da região onde a falha está presente, sem a necessidade de modelos matemáticos. O emprego de redes neurais artificiais em conjunto com a técnica de impedância elétrica, medida nos sensores/atuadores piezelétricos, forneceu informações qualitativas da severidade da falha. É importante notar que, embora não apresentados nas aplicações, esta metodologia pode ser aplicada para identificação de falhas simultâneas.

Os resultados experimentais para localização e quantificação de falhas foram obtidos em uma estrutura do tipo virabrequim. Com quatro PZT's distribuídos ao longo da estrutura, Fig. (3.a), foi possível a localização da região onde a falha foi inserida, Fig. (5), mesmo tratando-se de uma falha relativamente pequena, 0.3 mm de largura e 0.2 mm de profundidade, e a quantificação de diferentes profundidades de falhas. A Tab. (2) apresenta os resultados obtidos por meio das RNA's. O erro máximo obtido foi de aproximadamente 3.1%, um valor satisfatório para a estimativa da severidade do dano.

6. AGRADECIMENTOS

A Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela concessão da bolsa de mestrado para o desenvolvimento deste trabalho.

7. REFERÊNCIAS

- DOEBLING, S. W.; FARRAR, C. R.; PRIME, M. B. A summary review of vibration-based damage identification methods. **The Shock and Vibration Digest**, Thousand Oaks, v.30, n.2, p.91-105, 1998.
- EGAWA, K. **A new Concept of Maintenance Inspection. Structural Health Monitoring Currents Status and Perspectives**, Stanford, CA, September, p.18-20, 1997.
- EWINS, D.J. **Modal testing: theory and practice**. New York: John Wiley & Sons, 1991. 269p.
- FURTADO, R. M.; TEBALDI, A.; LOPES JR., V. Fault identification in smart structures using genetic algorithms and artificial neural networks In: INTERNATIONAL MODAL ANALYSIS CONFERENCE – IMAC, 21, 2003. **Conference on Structural Dynamics**. Kissimmee: S.n., 2003. (CD-ROM).
- IDEHARA, S. J. **Aplicação de técnicas de Order Tracking para análise de máquinas e componentes rotativos**. Campinas, 2003. 132p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual de Campinas.
- IEEE Standard on Piezoelectric (1978). **IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonic**, New York, v. 31, n. 2, 1984.
- INMAN, D. J. Smart structures: examples and new problems. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA – COBEM, 16, 2001, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia: ABCM, 2001. p.26-30, 2001.

- LOPES JUNIOR., V.; MÜLLER-SLANY, H.; BRUNZEL F.; INMAN, D.J. Damage detection in structures by electrical impedance and optimization technique. In: IUTAM SYMPOSIUM ON SMART STRUCTURES AND STRUCTRONIC SYSTEMS, 89, 2000, Magdeburg. **Proceedings...** Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001. p.239-246.
- PEAIRS, D. M. **Development of a self-sensing and self-healing bolted joint.** Blacksburg-VA, 2002. Master's thesis (Master's thesis) - Virginia Polytechnic, Institute and State University.
- SANTIAGO, D. F. A. **Diagnóstico de falhas em máquinas rotativas utilizando transformada de wavelet e redes neurais artificiais.** Campinas, 2004. 117p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual de Campinas.

CHARACTERIZATION OF STRUCTURE FAULTS USING PIEZOELECTRIC SENSORS/ACTUATORS AND ANN

Rogério Mendonça Furtado
furtado@dem.feis.unesp.br

Vicente Lopes Júnior
vicente@dem.feis.unesp.br

Department of Mechanical Engineering – UNESP – Ilha Solteira, Av. Brasil Centro, n.º 56, Ilha Solteira, São Paulo, Zip Code: 15385-000, Brazil.

Abstract: *Nowadays the predictive maintenance has great importance and responsibility in our lives. Economic factors and safety turned this tool more and more a reality applied in companies and industries. There are some methods that are, usually, used, as for instance: oil analysis, methods based on vibrations analysis, magnetic particles, etc. All they have its advantages and limitations, in this sense, constants researches are accomplished in the tentative to improve and develop new techniques of predictive maintenance. In this optics is presented a technique based on electric impedance using elements piezoelectric (PZT's) as sensor and actuator. This technique is a non-based model, and when associated to the artificial neural networks (ANN's), it becomes an attractive proposal that can be applied in a great amount of problems, as for instance smart structures monitoring.*

The piezoelectric material used in the technique of the electric impedance works in high frequency, usually 10Khz and 100Khz. So, it excites local modes and it defines the influence area of each PZT, allowing, the detection of multiple damages in the structure. ANN's are used to quantify the severity of the fault, once the electric impedance just supplies qualitative information regarding the damage. The paper concludes with experimental tests for location and quantification of faults in structure.

Keyword: *piezoelectricity, artificial neural network, smart structures, backpropagation algorithm, electrical impedance, PZT.*