CLASSIFICAÇÃO DE DANOS POR MEIO DE MAPAS AUTO-ORGANIZÁVEIS (SOM) ASSOCIADO AO MONITORAMENTO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL BASEADO NA IMPEDÂNCIA ELETROMECHANICA

Michael dos Santos Durval¹, Stanley Washington Ferreira de Rezende², Bruno Pereira Barella³, João Paulo Moreira Bento⁴, José dos Reis Vieira de Moura Junior⁵

Mestrando em Modelagem e otimização. Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia, PPGMO. Contato: michaeldurval73@gmail.com.

²Graduando em Matemática industrial- Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, IMTec - Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia.

³Graduando em Matemática industrial -Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, IMTec - Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia.

⁴Mestrando em Modelagem e otimização - Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia, PPGMO. Contato:

⁵ Coordenador do curso de Graduação de Matemática Industrial Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, IMTec - Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia.

**Recebido em: 06/04/2018 – Aprovado em: 10/06/2018 – Publicado em: 20/06/2018
DOI: 10.18677/EnciBio_2018A113**

RESUMO

O Monitoramento de Integridade Estrutural (*SHM – Structural Health Monitoring*) é uma técnica bem viável para se reduzir custos, aumentar a vida útil e melhorar o desempenho de estruturas de engenharia. A metodologia baseada em impedância usa o comportamento eletromecânico de materiais piezoelétricos (PZT) para detectar anomalias e danos estruturais. Esta técnica utiliza altas frequências para excitar os modos locais, proporcionando, assim, o monitoramento de qualquer mudança da impedância mecânica estrutural na região de influência do PZT. A partir da variação dos sinais de impedância pode-se concluir pela existência ou não de um dano. Redes neurais artificiais (RNA) fazem parte de um amplo conceito chamado sistemas artificiais. O fundamento de redes neurais está associado ao funcionamento do cérebro humano, que após treinamento detém a capacidade de realizar associações. Esta ciência tem grande aplicabilidade na solução de problemas de inteligência artificial, através da modelagem de sistemas que usam conexões que possibilitam simular o sistema nervoso humano. Este trabalho utilizou a técnica dos mapas auto-organizáveis (*SOM – self-organizing maps*) de Kohonen associado ao SHM baseado na impedância eletromecânica para a detecção e a classificação de danos em uma viga de alumínio. Sendo o modelo da estrutura conhecido, treinou-se a rede para duas posições de falhas e em diversas severidades. Com isto, através do modelo de rede neural de mapas auto-

organizáveis, a rede foi treinada e as respostas puderam classificar com eficiência as diferentes condições de danos em que a estrutura de engenharia foi submetida, demonstrando o potencial das redes SOM no âmbito da análise da integridade estrutural.

PALAVRAS-CHAVE: Impedância Eletromecânica, Mapas Auto-organizáveis, Monitoramento da Integridade Estrutural.

CLASSIFICATION OF DAMAGES BY SELF-ORGANIZING MAPS (SOM) ASSOCIATED WITH THE STRUCTURAL HEALTH MONITORING BASED ON ELETROMECHANIC IMPEDANCE

ABSTRACT

Structural Health Monitoring (SHM) is a very cost-effective technique to reduce costs, increase life-cycle, and improve the performance of engineering structures. The impedance-based methodology uses the electromechanical behavior of piezoelectric materials (PZTs) to detect structural anomalies and damages. This technique uses high frequencies and excites the local modes, thus providing the monitoring of any change of the structural mechanical impedance in the region of influence of PZT. From the variation of the impedance signals, it can be concluded whether or not there is a damage. Artificial neural networks (RNA) are part of a broad concept called artificial systems. The foundation of neural networks is associated with the functioning of the human brain, which after training has the ability to perform associations. This science has great applicability in the solution of artificial intelligence problems, through the modeling of systems that use connections that make it possible to simulate the human nervous system. This work uses Kohonen's self-organizing maps (SOM) associated to SHM based on electromechanical impedance for the detection and classification of damages in an aluminum beam. Since the model of the known structure was trained, the network was trained for two failure positions at different severities. Thus, through the neural network model of self-organizing maps, the network was trained and the responses could efficiently classify the different damage conditions in which the engineering structure was submitted, demonstrating the potential of SOM networks in the scope of the analysis of structural integrity.

KEYWORDS: Electromechanical Impedance, Self-Organizing Maps, Structural Health Monitoring.

INTRODUÇÃO

Diferentes estruturas de engenharia mecânica, civil e aeroespacial têm sido utilizadas por um período longo de tempo, sendo submetidas a diversos tipos de esforços, tais como atrito, fadiga, impacto, concentração de tensão, entre outros. Com o passar do tempo, estas estruturas sofrem desgastes e podem se danificar. Logo para que o sistema opere de forma adequada é necessário que condição de falha seja identificada e corrigida. Um minucioso plano de manutenção, muitas vezes baseado somente no tempo de vida útil, pode evitar que maiores prejuízos aconteçam (LOPES JR et al., 2000; FARRAR et al., 2005; PALOMINO, 2008; OLIVEIRA, 2013).

O Monitoramento da Integridade Estrutural, que vem do inglês *Structural Health Monitoring (SHM)* - é considerada uma tecnologia com potencial de alto impacto para a redução de riscos e custos no monitoramento de estruturas da construção civil e nos sistemas aeroespaciais, com a finalidade de detectar em

tempo real ou não, danos estruturais (FARRAR, et al., 2005; BAPTISTA, 2010; AFSHARRI, 2012). Os sistemas avançados de monitoramento de integridade estrutural podem ser descritos em cinco etapas: (1) detectar a existência do dano; (2) identificação do dano na estrutura; (3) identificar qual o tipo de dano; (4) avaliar a extensão do dano; (5) determinar o tempo de vida restante da estrutura. O papel fundamental do SHM é a criação de sistemas para monitoramento contínuo, inspeção e detecção de danos nas estruturas sem ou com pouca intervenção humana, desta forma, espera-se aumentar a segurança e confiabilidade das mesmas impactando diretamente na redução de custos operacionais e de manutenção (PALOMINO, 2008).

Os sensores piezelétricos funcionam de acordo com o efeito piezoelétrico inverso, isto é, a geração de deformação mecânica devido a uma tensão elétrica aplicada a esses sensores. Os materiais piezelétricos são amplamente utilizados em aplicações SHM. Eles são principalmente favoráveis nas práticas de SHM baseadas na impedância e na propagação de onda devido ao fato de serem capazes de ter o papel do sensor e do atuador ao mesmo tempo. Eles também podem ser individualmente anexados à superfície da estrutura em qualquer local desejado (BOLLER, 2001). Outras vantagens dos sensores piezelétricos podem ser listadas, como alta sensibilidade, estabilidade em uma ampla gama de temperatura, projeto simples, baixo custo entre outros. Esses sensores foram aplicados com sucesso no monitoramento da integridade da estrutura e detecção de rupturas na fuselagem de grandes aeronaves (TURNER et al., 1994).

A presença de dano, sob a forma de uma fissura, é considerada como uma mudança local nas propriedades e características de uma estrutura. Portanto, a excitação de alta frequência e o estudo de modos de alta frequência da estrutura são necessários para detectar, localizar e quantificar a extensão do dano. As excitações de frequência mais alta podem causar dificuldades ou limitações nas aplicações práticas da identificação de danos convencionais baseada em vibração por causa da baixa energia nestes modos e a alta densidade modal. O método de impedância elétrica, no entanto, é baseado nas excitações de alta frequência da estrutura e é prático na detecção de danos tanto global quanto local, dependendo da faixa de frequência de excitação aplicada (AFSHARI, 2012).

O SHM baseado em impedância é possível através do monitoramento de alterações na impedância elétrica medida e de alta frequência de pastilhas piezocerâmicas pequenas e auto sensíveis (PZT) (LIANG et al., 1994). Este método funciona através do acoplamento entre a admitância elétrica (inversa da impedância elétrica) das pastilhas de PZT ligados ou incorporados dentro da estrutura a ser analisada e as impedâncias mecânicas do PZT e a própria estrutura. Esta técnica não se baseia em nenhum modelo estrutural, tornando-o aplicável a qualquer estrutura complexa (LALANDE; ROGERS, 1996). Os métodos de impedância podem ser aplicados como um sistema SHM *on-line* e devido às baixas forças de excitação requeridas, ele pode ser executado por sistemas autoalimentados (LALANDE et al., 1996b). Demonstrou-se que a parte real da impedância complexa medida é mais sensível aos recursos de dano dentro da estrutura enquanto a parte imaginária é mais sensível às variações de temperatura (PARK et al., 2003).

A impedância medida pelas pastilhas de PZT fornece dados úteis sobre a integridade da estrutura sendo analisada. No entanto, esses dados em seu estado original não processado, não fornecem informações quantificáveis sobre a presença e o estado do dano dentro da estrutura. Portanto, ao processar o sinal medido, é necessário definir um índice que seja sensível ao dano e insensível aos outros

parâmetros. Diferentes métodos estatísticos são amplamente utilizados no SHM baseado em impedância para formar índices de dano, alguns exemplos são o desvio quadrático médio (RMSD), a covariância (Cov), o coeficiente de correlação (CC) e o desvio percentual absoluto médio (MAPD) (TSENG ; NAIDU., 2002).

O método de SHM baseado em impedância baseia-se no pressuposto de que no acoplamento eletromecânico entre a estrutura sob investigação e a pastilha piezelétrica, todos os parâmetros, exceto a impedância mecânica do sistema, permanecem inalterados durante a formação de danos. Um dos fatores que podem causar tal alteração é a variação nos parâmetros ambientais, como a temperatura. As propriedades do material do PZT, bem como o módulo de Young da estrutura em análise, são conhecidas como dependentes da temperatura. Portanto, se a temperatura ambiente for variada, o SHM baseado em impedância mostra variações na integridade da estrutura chamado falso positivo. Houve esforços realizados para compensar o efeito da temperatura nos aplicativos de monitoramento de integridade estrutural baseados em impedância (PARK et al., 1999). O modelo eletromecânico que quantifica e explica o processo de medição para um sistema de 1 grau de liberdade, é retratado na Figura 1.

FIGURA 1 – Modelo eletromecânico do método de integridade estrutural baseado em impedância eletromecânica. Fonte: Elaborado pelos autores

Com base no sistema da figura 1, Liang et al. (1994) comprovaram que a admitância pode ser expressa como uma função combinada da impedância mecânica do atuador PZT, $Z_a(\omega)$, conforme mostra a Equação 1:

$$Y(\omega) = i\omega a \left(\bar{\epsilon}_{33}^T (1 - i\delta) - \frac{Z_s(\omega)}{Z_s(\omega) + Z_a(\omega)} d_{3x}^2 \hat{Y}_{xx}^E \right), \quad (1)$$

onde $Y(\omega)$ é a admitância elétrica, Z_a é a impedância mecânica do PZT, Z_s é a impedância mecânica da estrutura, $\hat{Y}_{xx}^E$ é o módulo complexo de Young do PZT com campo elétrico nulo, d_{3x}^2 é a constante de acoplamento do PZT em uma direção X com deformação nula, $\bar{\epsilon}_{33}^T$ é a constante dielétrica com deformação nula, δ é o fator de perda dielétrica do PZT, a é uma constante geométrica do PZT.

Supondo-se que as propriedades do PZT não variem com o tempo, a Equação 1 evidencia que a impedância elétrica do PZT está relacionada diretamente com a impedância mecânica da estrutura. Eventuais danos provocam alterações na impedância mecânica da estrutura, mudando as características dinâmicas locais. Fica claro que por este motivo, os sinais de impedância elétrica do PZT são usados para monitoramento da integridade estrutural do sistema (PALOMINO, 2008).

Por outro lado, uma rede neural é um conjunto interconectado de elementos simples de processamento, unidades ou nós, cuja funcionalidade está vagamente baseada nos neurônios biológicos. A capacidade de processamento da rede é baseada nas conexões, sinápticas entre neurônios e respectivos pesos obtidos por um processo de adaptação ou aprendizagem de um conjunto de padrões de treinamento. Na maioria dos casos, o papel das RNA é voltado para solucionar problemas reais, modelando sistemas por meio de circuitos (conexões) que possibilitam simular o sistema nervoso humano (GURNEY, 1997).

Segundo Krose et al. (1996), as RNA podem ser mais adequadamente caracterizadas como modelos computacionais com propriedades particulares, com a capacidade de se adaptar ou aprender, de modo a generalizar, agrupar ou organizar dados, a qual é baseada no processamento paralelo. Os modelos matemáticos utilizados nas redes neurais artificiais são bem mais simples quando comparados com a complexidade das estruturas elementares das Redes Neurais Biológicas, indicando assim as dificuldades deparadas para buscar imitar o funcionamento do sistema nervoso humano. Uma rede neural artificial dispõe de dezenas a no máximo milhares de unidades de processamento (neurônios) enquanto o sistema nervoso é composto por bilhões de células nervosas (GURNEY, 1997).

Uma rede neural artificial pode ser descrita como um conjunto de diversas unidades interconectadas (parecida à estrutura do cérebro), chamadas de neurônios artificiais, cada um integrando um pequeno montante local de memória. Tais conceitos foram comprovados por estudos efetuados nas células nervosas naturais. Sendo assim, busca-se alcançar ao máximo o desempenho das RNA em comparação com as das redes neurais biológicas (GURNEY, 1997).

Uma primeira onda de interesse nos estudos das redes neurais - também conhecidas como modelos conexionistas ou processamento paralelo distribuído emergiu após a introdução de neurônios simplificados por McCulloch e Pitts (1943). Estes neurônios foram apresentados como modelos de neurônios biológicos e como componentes conceituais para circuitos que poderiam executar tarefas computacionais (KROSE et al., 1996).

O interesse mais profundo pelas redes neurais surgiu somente após alguns resultados teóricos importantes serem alcançados no começo dos anos 1980 (mais notavelmente a descoberta da propagação do erro de volta), e novos desenvolvimentos de *hardware* que aumentaram as capacidades de processamento (KROSE et al., 1996).

Um dos mais utilizados exemplos de redes de aprendizado de caráter não supervisionado e o mais popular modelo de rede auto-organizada são os chamados mapas auto-organizáveis (SOM – *Self Organizing Maps*), proposto por Kohonen (1982, 1984), sendo que este na literatura é conhecido como Redes de Kohonen. As redes de Kohonen tomam como base o comportamento cerebral onde predomina o treinamento não supervisionado (VALENÇA, 2009).

A principal justificativa para a utilização dos mapas auto-organizáveis de Kohonen é reunir os padrões de entradas que são semelhantes entre si criando classes ou agrupamentos denominados *clusters*. Uma SOM não necessita de informação prévia dos dados, pois a rede irá criar seu próprio entendimento – armazenamento de informação. Logo, uma rede de Kohonen geralmente é uma grade de neurônios unidimensional ou bidimensional. Um exemplo de uma rede de Kohonen bidimensional para uma assinatura de impedância qualquer, pode ser visualizada na Figura 2.

FIGURA 2 – Rede de Kohonen. Fonte: Elaborado pelos autores

Na figura 2, é possível perceber as duas camadas conectadas por relações sinápticas: a camada de entrada e de saída. O círculo escuro (cheio) representa um neurônio de entrada pelo qual são apresentados os sinais de entrada para treinamento da rede. Já os círculos brancos (vazios) correspondem a um neurônio da camada de saída por onde os resultados são obtidos.

O presente trabalho utilizou como corpo de prova uma viga de alumínio, onde foram aplicadas duas condições de falhas sobre esta em diferentes severidades com o intuito de classificar a integridade do corpo. Por meio do experimento realizado, a técnica aplicada apresentou bons resultados.

MATERIAL E MÉTODOS

O procedimento experimental adotado neste trabalho teve por objetivo classificar dois danos impostos a uma viga de alumínio, de dimensões 500x25x3 mm. O dano que foi simulado artificialmente se baseou na adição de massa ao sistema em duas posições diferentes, sendo o posicionamento da pastilha PZT (50 mm em relação a extremidade da viga) e a localização de cada dano aplicado individualmente, Dano 1 (50 mm em relação ao PZT) e Dano 2 (200 mm em relação ao PZT), sendo que para o caso em estudo, esta massa foi expressa por um ímã de dimensões 10x10x10 mm acoplado mecanicamente à viga. As localizações escolhidas para a delimitação do dano artificial na viga podem ser visualizadas a partir da Figura 3, em que para cada caso a coleta de dados se estabeleceu individualmente.

FIGURA 3 – Representação gráfica da viga utilizada como amostra no procedimento experimental. Fonte: Elaborado pelos autores

O sistema de aquisição das assinaturas de impedância eletromecânica foi composto por uma placa de monitoramento EVAL-AD5933EBZ fabricada pela empresa Analog Devices, conforme Figura 4.

FIGURA 4 – Placa de aquisição das assinaturas de impedância eletromecânica utilizada no procedimento experimental. Fonte: Elaborado pelos autores

Esta placa possui o CI AD5933 que se tornou de particular interesse devido às suas capacidades de medição de impedância. A aquisição do sinal é apresentada pelo conversor analógico digital e um micro controlador processa e realiza a transformada discreta de Fourier (DFT), a placa opera com faixa de tensão de 2.7 V até 5.5 V, sendo que, com a finalidade de verificar a funcionalidade da placa na coleta de assinaturas, realizou-se a calibragem do sistema com uma pastilha PZT de 60 uF acoplado em paralelo com uma resistência de 10000 Ω e em série à outra resistência de 1200 Ω , visto que estes foram ligados entre os pinos da placa RFB. A tensão de alimentação da placa normalmente é fornecida pela porta USB do computador. A placa armazena os dados coletados que são: frequência, impedância, parte real da impedância, parte imaginária da impedância, fase e magnitude da impedância. Sendo que para o presente trabalho foi utilizada apenas a parte real da impedância, visto que está diretamente ligada a característica mecânica da estrutura (SEPEHRY et al., 2011).

O transdutor piezoelétrico utilizado tanto como atuador quanto sensor no procedimento, trata-se de uma pastilha PZT de 20 mm de diâmetro por 3 mm de espessura (GALLEGO-JUÁREZ, 1989; BITTENCOURT et al., 2004). As configurações utilizadas na placa se basearam em uma faixa de frequência de 30 a 46 kHz com uma amostragem de 511 pontos.

Apenas a parte real da impedância eletromecânica foi utilizada no processo de treinamento e simulação da rede neural, haja vista de que a parte imaginária é mais sensível a variações de temperatura, o que pode acarretar em alterações no processo de aprendizado da rede (RAJU, 1997; BASTANI et al., 2012).

Tendo definidas as configurações de aquisição e a topologia a ser utilizada, efetuou-se a coleta de cinco amostras de sinais de impedância eletromecânica para

cada conjunto de estado da viga, resultando assim em uma população final de 15 amostras. As médias de cada grupo de sinais podem ser visualizadas na Figura 5.

FIGURA 5 – Representação gráfica dos padrões de sinais de impedância eletromecânica, dada as 3 condições iniciais. Fonte: Elaborado pelos autores

Percebe-se que os padrões de sinais adotados para cada grupo permitem a linear identificação de características entre estes, assim possibilitando a aplicação da rede para identificação e classificação (PARK et al., 2003). A topologia escolhida na construção da rede SOM trata-se de uma transformação não linear do espaço multidimensional em um espaço bidimensional de dimensões 20x30 neurônios, com 600 sinapses de saída, sendo que inicialmente foram utilizados para o processo de treinamento 15 padrões de entradas referentes as condições estabelecidas. A Figura seis esboça o esquema da topologia da rede utilizada.

FIGURA 6 – Representação gráfica da topologia adotada na rede SOM utilizada. Fonte: Elaborado pelos autores

Para realização do processo de treinamento da rede, os padrões de entrada foram apresentados 600 vezes ao modelo, que passou a ponderar cada peso entre os múltiplos neurônios da vizinhança, ou seja, foram utilizadas 600 épocas no procedimento de aprendizagem da rede. Após ter a rede treinada e os pesos de cada conexão já ponderados, foram utilizados dois padrões de entradas de cada condição para simulação e validação do modelo, totalizando assim nove padrões para treinamento e seis padrões para validação. Os resultados obtidos evidenciaram

que a metodologia proposta consegue distinguir com eficiência os conjuntos apresentados, mesmo que nenhuma informação tenha sido dada a rede previamente.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos experimentos realizados foram obtidos resultados que passam a ser ilustrados a seguir conforme a Figura 7 dos pesos:

FIGURA 7 – Mapas auto organizáveis obtidos no processo de simulação da rede.
Fonte: Elaborado pelos autores

Na figura acima pode ser visualizado o mapeamento unidimensional referente a cada sinal de impedância do conjunto de amostra utilizado no processo de construção da rede, para um novo domínio bidimensional em relação a distribuição de energia dos pesos de cada amostra calculada pela rede neural de Kohonen. Assim sendo, infere-se que cada nível de estado da estrutura é distinguível qualitativamente pela similaridade entre os diferentes mapas energéticos.

Em seguida, a fim de se estabelecer uma análise quantitativa da precisão da rede em relação ao reconhecimento de padrões, aplicou-se a fórmula da distância *Hamming* comparando-se as respostas dos padrões utilizados na fase de treinamento com as respostas dos sinais de teste da rede. A Figura 8 apresenta as distâncias encontradas para cada padrão.

FIGURA 8 – Avaliação quantitativa dos resultados pelo cálculo da distância.
Fonte: Elaborado pelos autores

Analisando a figura acima, pode-se identificar os níveis de estado da estrutura por meio dos resultados gráficos referentes aos padrões de validação pelos mapas 2 e 4 para o estado de baseline (sem danos), 7 e 9 para a condição de dano 1, 12 e 14 para a condição de dano 2. Essa análise quantitativa se dá quando o módulo da distância do teste em relação a sua classe é nulo. Com isso, ficou evidenciado que a utilização dessa metodologia no campo da análise da integridade estrutural baseada na impedância eletromecânica, torna-se viável e de grande aplicação devido a versatilidade e capacidade de integralização com outros métodos já consagrados na literatura.

A partir dos mapas auto-organizáveis obtidos como resultados pelo modelo, ficou provado que o método proposto de identificação de falhas por redes neurais SOM foi capaz de classificar com eficiência os diferentes tipos de estados da viga quando submetida ou não a um tipo de dano.

CONCLUSÕES

Neste trabalho foram apresentados os principais conceitos referentes ao monitoramento da integridade estrutural baseado na impedância eletromecânica. O tema vem sendo estudado há algumas décadas por diversos pesquisadores demonstrando um grande aprimoramento das técnicas utilizadas para tal fim.

Existem inúmeros métodos para realizar a análise de integridade estrutural baseado em impedância. Contudo poucos deles permitem obter informações quando não se sabe ao certo o que cada conjunto de amostra representa, neste sentido o uso das redes neurais através de aprendizado não supervisionado tem ganhado maior destaque quanto a classificação de conjuntos e mapeamento de dados, fornecendo resultados eficazes que justificam a sua aplicabilidade.

Assim diante do exposto, pode-se concluir que o meta-modelo conseguiu classificar com eficiência as diferentes condições de falhas que foram impostas a estrutura, demonstrando o potencial das redes SOM no âmbito da análise da integridade estrutural.

Vale salientar que, a aplicação de tal metodologia agregada a outras propostas de quantificação de danos já consagradas na literatura, torna-se de grande aplicabilidade no processo decisório. Assim sendo, poder-se-ia realizar como trabalhos futuros a aplicação desta e de outros tipos de redes já conhecidas de modo a elaborar modelos mais robustos de avaliação de danos, agregando-os também a técnicas já desenvolvidas neste.

REFERÊNCIAS

AFSHARI M. **Vibration and Impedance based Structural Health Monitoring Applications and Thermal Effects**. Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA, USA, 2012. Disponível em: <https://vtechworks.lib.vt.edu/handle/10919/27954>.

BAPTISTA, F. G. **Uma Contribuição aos Sistemas de Monitoramento de Integridade Estrutural Baseados na Impedância Eletromecânica**. Ilha Solteira, SP, Brasil, 2010. Disponível em: http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaelettrica/pos-graduacao/059-tese_fabricio_baptista.pdf.

BASTANI, A., AMINDAVAR, H., SHAMSHIRSAZ, M., & SEPEHRY, N. Identification of temperature variation and vibration disturbance in impedance-based structural health monitoring using piezoelectric sensor array method. **Structural Health Monitoring**, 2012, 11.3: 305-314. Disponível em: <<http://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/1475921711427486>>. Doi: 10.1177/1475921711427486.

BITTENCOURT, C., GRUPPIONI, H. C. P., TSURUTA, K. M., MOURA JUNIOR, J. R. V., RADE, D. A., RADE, R. S. L. **Estudo experimental da utilização do método da impedância eletromecânica para análise da influência da posição de pastilhas de PZT em relação à falhas estruturais**. 2004. Disponível em: <http://abcm.org.br/anais/creem/2007/PDF/0268.PDF>.

BOLLER, C. Ways and options for aircraft structural health management. **Smart Materials and Structures**, 10: 432, 2001. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/231152612_Ways_and_options_for_aircraft_structural_health_management>. DOI: 10.1088/0964-1726/10/3/302.

FARRAR C., and Damage Prognosis Team from Weapon Response Group, Los Alamos National Laboratory. An introduction to damage prognosis. **Pan American**

Advanced Study Institute of Damage Prognosis, Florianópolis, SC, Brasil, 2005. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/0470869097.ch1/summary>>. DOI: 10.1002/0470869097.ch1.

GALLEGO-JUÁREZ, J. A. Piezoelectric ceramics and ultrasonic transducers. **Journal of Physics E: Scientific Instruments**, London, v. 22, n. 10, p. 804-816, 1989. Disponível em: <<http://iopscience.iop.org/0022-3735/22/10/001>>.

GURNEY, K. **An Introduction to neural networks**. UCL Press Limited, London, 1997. Disponível em: <https://www.inf.ed.ac.uk/teaching/courses/nlu/assets/reading/Gurney_et_al.pdf>. ISBN: ISBN-13: 978-1857286731.

KOHONEN, T. Self-Organized Formation of Topologically Correct Feature Maps. **Biological Cybernetics**, v. 43, pp. 59–69. 255, 1982. Disponível em: <<https://cioslab.vcu.edu/alg/Visualize/kohonen-82.pdf>>. DOI: 10.1007/BF00337288.

KOHONEN, T. **Self-Organization and Associative Memory**. Springer Verlag, Berlin, 1984. DOI: [10.1137/1027085](https://doi.org/10.1137/1027085)

KROSE, B., SMAGT, P. VAN DER. **An Introduction to Neural Networks**. Eight edition, The University of Amsterdam, Amsterdam, 1996. Disponível em: <<https://www.infor.uva.es/~teodoro/neuro-intro.pdf>>.

LALANDE, F. and ROGERS, C.A. Solid-state active sensing for in-situ health monitoring. **Proceedings, Society for Machinery Failure Prevention Technology Showcase**, Mobile, AL, 1996. Disponível em: <<https://pdfs.semanticscholar.org/2e76/d9779b10f0143f97fff1dcdb4aa285ddf5ca.pdf>>

LALANDE, F., ROGERS, C., CHILDS, B. and CHAUDHRY, Z. High-frequency impedance analysis for NDE of complex precision parts. **Proceedings, SPIE Conference on Smart Structures and Materials**, San Diego, CA, 1996. Disponível em: <<https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/2717/0000/High-frequency-impedance-analysis-for-NDE-of-complex-precision-parts/10.1117/12.239026.full?SSO=1>>. DOI: 10.1117/12.239026.

LIANG, C.; SUN, F. P.; ROGERS, C. A. Coupled Electromechanical Analysis of Adaptive Material Systems – Determination of the Actuator Power Consumption and System Energy Transfer. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 5, p. 12-20, 1994. Disponível em: <<http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/1045389X9400500102>>. DOI: 10.1177/1045389X9400500102.

LOPES JUNIOR, V.; PARK, G.; CUDNEY, H. H.; INMAN, D. J. Impedance-based structural healthy with artificial neural networks. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, London, v. 11, n. 3, p. 206-214, 2000. Disponível em: <<http://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1106/H0EV-7PWM-QYHW-E7VF>>. DOI: 10.1106/H0EV-7PWM-QYHW-E7VF.

OLIVEIRA, M. A., 2013. **Monitoramento de integridade estrutural baseada em sensores piezelétricos e análise de sinais no domínio do tempo**. Tese de Doutorado apresentada a Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, SP, Brasil

PALOMINO, L. V. **Análise das Métricas de Dano Associadas à Técnica da Impedância Eletromecânica para o Monitoramento de Integridade Estrutural**. 117 f. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/14804>>.

PARK, G., KABEYA, K., CUDNEY, H.H. and INMAN, D.J. Impedance-based structural health monitoring for temperature varying applications. **JSME international journal**. Series A, Solid mechanics and material engineering, 42(2): 249-258, 1999. Disponível em: <https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsmea1997/42/2/42_2_249/_article>. DOI: [10.1299/jsmea.42.249](https://doi.org/10.1299/jsmea.42.249).

PARK, G., SOHN, H., FARRAR, C. and INMAN, D. Overview of piezoelectric impedance-based health monitoring and path forward. **Shock and Vibration Digest**, 35(6): 451-464, 2003. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/255062349_Overview_of_Piezoelectric_Impedance-Based_Health_Monitoring_and_Path_Forward>. DOI: 10.1177/05831024030356001.

RAJU, V. **Implementing Impedance – Based Health Monitoring**. Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, USA, 1997. Disponível em: <<https://vtechworks.lib.vt.edu/handle/10919/35657>>.

SEPEHRY, N. and Shamshirsaz, M. and Bastani, A. Experimental and theoretical analysis in impedance-based structural health monitoring with varying temperature. **Structural Health Monitoring**, Vol. 10, p. 573-585, 2011. Disponível em: <<http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/1475921710388338>>. DOI: 10.1177/1475921710388338.

TSENG, K. and NAIDU, A. Non-parametric damage detection and characterization using smart piezoceramic material. **Smart Materials and Structures**, 11: 317, 2002. Disponível em: <<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0964-1726/11/3/301/meta>>. DOI: 10.1088/0964-1726/11/3/301.

TURNER, R., FUIERER, P., NEWNHAM, R. and SHROUT, T. Materials for high temperature acoustic and vibration sensors: A review. **Applied acoustics**, 41(4): 299-324, 1994. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0003682X94900914>>. DOI: [10.1016/0003-682X\(94\)90091-4](https://doi.org/10.1016/0003-682X(94)90091-4).

VALENÇA, M. **Fundamentos das redes neurais: exemplos em Java**. 2.ed.rev.ampl. – Olinda, PE: Livro Rápido 2009, 384p.: il. ISBN 978-85-7716-342-7.