

## UTILIZAÇÃO DE UMA REDE NEURAL ARTMAP FUZZY COM PARÂMETRO DINÂMICO NA DETECÇÃO DE FALHAS EM UM SISTEMA VIBRO-IMPACTO

Luciano Rodrigues Maia, [lucianomaia01@hotmail.com](mailto:lucianomaia01@hotmail.com)<sup>1</sup>

Mara Lúcia Martins Lopes, [maraluciamartins@mat.feis.unesp.br](mailto:maraluciamartins@mat.feis.unesp.br)<sup>1</sup>

Fábio Roberto Chavarette, [fabio.chavarette@unesp.br](mailto:fabio.chavarette@unesp.br)<sup>1</sup>

Thays Abreu, [thays7abreu@gmail.com](mailto:thays7abreu@gmail.com)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>UNESP – Universidade Estadual Paulista, Av. Brasil Sul, 56, Centro, Ilha Solteira – SP, 15385-000

**Resumo:** O artigo apresenta uma metodologia baseada em um sistema inteligente para o monitoramento de falhas estruturais de um sistema vibro-impacto. As redes neurais artificiais são técnicas computacionais inspiradas na estrutura neural de organismos inteligentes e são bastante utilizadas na resolução de diversos problemas. Portanto, propõe-se a utilização das vantagens das redes neurais artificiais para efetuar a análise e monitoramento das falhas através da rede neural artificial ARTMAP Fuzzy com parâmetro dinâmico. Para avaliar a metodologia proposta, foram utilizados dados obtidos através de simulações realizadas em um modelo numérico, construído através de equações diferenciais. Assim, a partir da aquisição e processamento dos dados foi utilizada a rede neural ARTMAP Fuzzy para identificar as falhas na estrutura vibro impacto. Através dos resultados obtidos foi possível observar que a rede neural é capaz de identificar os sinais com falha e normais de um sistema vibro-impacto. Esta metodologia pode auxiliar os profissionais na inspeção de estruturas, visando identificar e caracterizar falhas, a fim de realizar a manutenção preventiva e agir no controle de vibrações e ruído do sistema.

**Palavras-chave:** Inteligência Artificial, Rede Neural ARTMAP Fuzzy, Detecção de Falhas, Sistema Vibro-Impacto

### 1. INTRODUÇÃO

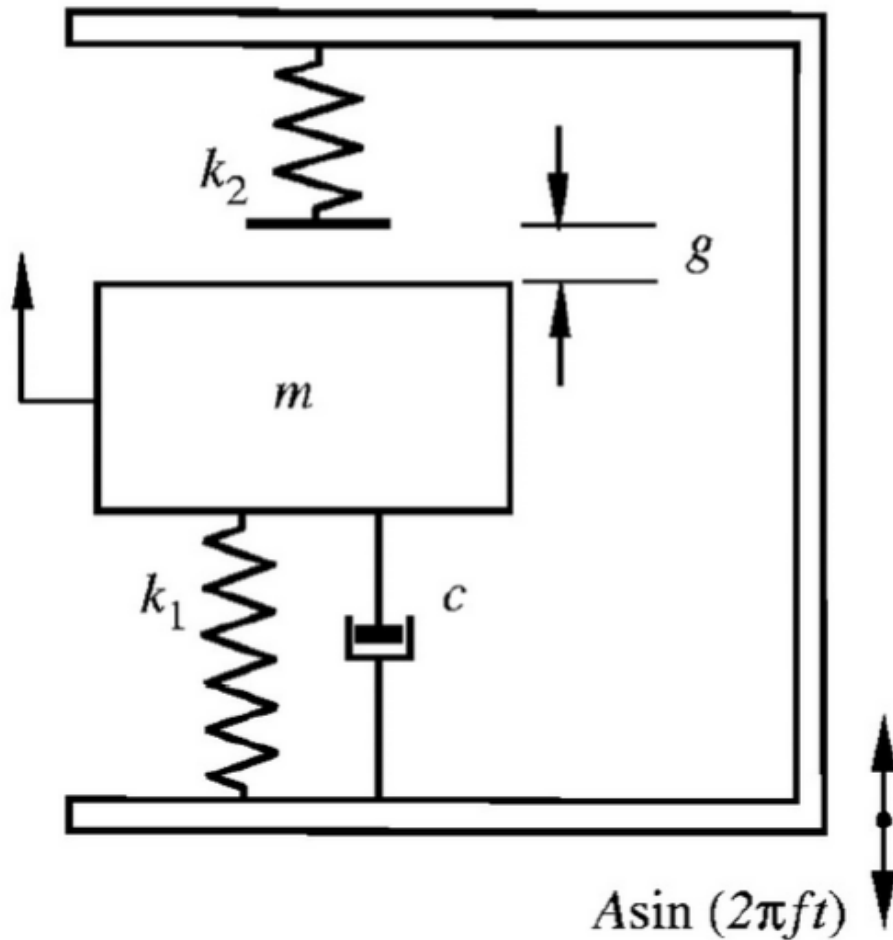
Nos sistemas mecânicos há várias aplicações no qual é necessário o uso do impacto para criar vibrações em certas partes do sistema. O estudo dos problemas de vibro impacto é o estudo do fenômeno no qual acontece quando componentes em contato (não necessariamente unidos) sofrem impactos entre si e geram um ruído de curto tempo de duração. Cita-se o vibro impacto de vigas que ocorre devido ao contato intermitente das estruturas na presença de folgas, gerando desgaste excessivo, vibração com grandes amplitudes, falhas prematuras de componentes e altos níveis de ruído. Um exemplo de aplicação são as plataformas petrolíferas que utilizam a energia de vibração axial para gerar vibro-impacto com o objetivo de aumentar a taxa de perfuração das brocas em regiões de rochas duras. Logo, o estudo da área de Vibro-Impacto é importante, pois pode auxiliar na prevenção de falhas e no controle de vibrações e ruído do sistema, sendo que as determinações da resposta no domínio do tempo do sistema e dos esforços de contato são de fundamental importância para o projeto desses sistemas.

As equações diferenciais ordinárias, muitas vezes são usadas para modelar um problema físico real, podem sofrer influência de um conjunto de parâmetros, aos quais são denominados parâmetros de controle. Variando-se, gradualmente, um ou mais desses parâmetros de controle, pode-se estudar as respectivas respostas na dinâmica do sistema e verificar as possíveis mudanças (repentinas) no comportamento, com o objetivo de monitorá-las e evitá-las. Desta forma é necessário desenvolver formas eficientes de monitoramento, visando identificar e caracterizar falhas, de forma que, seja possível tomar decisões rápidas para realizar a manutenção preventiva, assegurar a integridade da estrutura e evitar comportamentos indesejáveis como o caos.

As técnicas inteligentes são utilizadas na classificação e tomadas de decisões. A rede neural artificial é um sistema inteligente que possui uma alta capacidade de generalização que é obtida através dos ajustes dos pesos sinápticos da rede neural (processo de aprendizagem) [2]. Assim, se justifica a utilização de tal técnica na abordagem do problema, uma vez que, se deseja classificar e tomar uma decisão quanto ao sistema analisado.

O modelo de sistema vibro-impacto adotado neste trabalho [3] foi utilizado em [5] e está representado na Figura 1. O modelo consiste de uma massa  $m$ , presa a uma base oscilante através de uma mola com coeficiente de rigidez  $k_1$  e um amortecedor viscoso com coeficiente de amortecimento  $c$ . No modelo existe uma segunda mola com coeficiente de rigidez  $k_2$ , após folga existente denominada  $g$ . O corpo de massa  $m$  pode se deslocar em função da excitação na forma

$A \cdot \sin(2\pi ft)$ , sendo  $f$  a frequência de oscilação e  $t$  o tempo. Quando a base sofre excitação, faz com que a massa se desloque, impactando sobre a rigidez secundária, caracterizando assim um sistema vibro-impacto.



**Figura 1. Modelo do sistema vibro-impacto. Fonte: Referência [3]**

Através da manipulação matemática mostrada por [5] a equação diferencial adimensional de segunda ordem que rege o sistema é dada pela equação (1), sendo  $\sigma$  a amplitude da força adimensional,  $\omega$  a frequência de excitação adimensional,  $\tau$  o tempo adimensional,  $\xi$  o fator de amortecimento,  $\varphi$  a razão de rigidez,  $x$  denota a posição da massa  $m$ , e  $H$  representa a função de Heaviside. Através da resolução numérica da equação (1) são obtidos os sinais, no tempo e na frequência, para a posição e a velocidade do bloco.

$$\ddot{x} = \sigma \omega^2 \sin(\omega \tau) - 2\xi \dot{x} - x - \varphi(x - e)H(x - e) \quad (1)$$

No presente trabalho foi utilizada a rede neural artificial ARTMAP Fuzzy [1]. A principal característica das redes neurais da família ART é a sua grande semelhança com um sistema nervoso biológico, sendo que tendo seu principal foco na plasticidade, ou seja, na habilidade de aprender novos padrões sem esquecer os antigos, dessa forma consegue-se excelentes resultados a longo prazo, pois a rede pode ser continuamente melhorada com a aquisição de novos sinais. A rede ARTMAP Fuzzy consiste em dois módulos ART Fuzzy, ARTa e ARTb, além do módulo Inter-ART. As entradas são apresentadas no módulo ARTa e suas saídas correspondentes no módulo ARTb enquanto o módulo Inter-ART determina o mapeamento entre os padrões de entrada e saída [1]. O fluxograma de treinamento da rede ARTMAP Fuzzy é mostrado na Figura 2.

A rede neural artificial ARTMAP Fuzzy foi modificada fixando o parâmetro de vigilância do módulo ARTa ( $\rho_a$ ) para o maior valor possível e então diminuir o seu valor gradativamente para cada sinal individualmente, até que a ressonância ocorra, dessa forma temos sempre o maior valor do parâmetro de vigilância possível [6]. Na prática isso representa que a criteriosidade da rede é sempre a maior possível dependendo do sinal fornecido, isso combinado com sua plasticidade faz com que esta rede seja ideal para aplicações com grande diversidade de dados, que geralmente são difíceis de serem analisados por outras arquiteturas de rede.

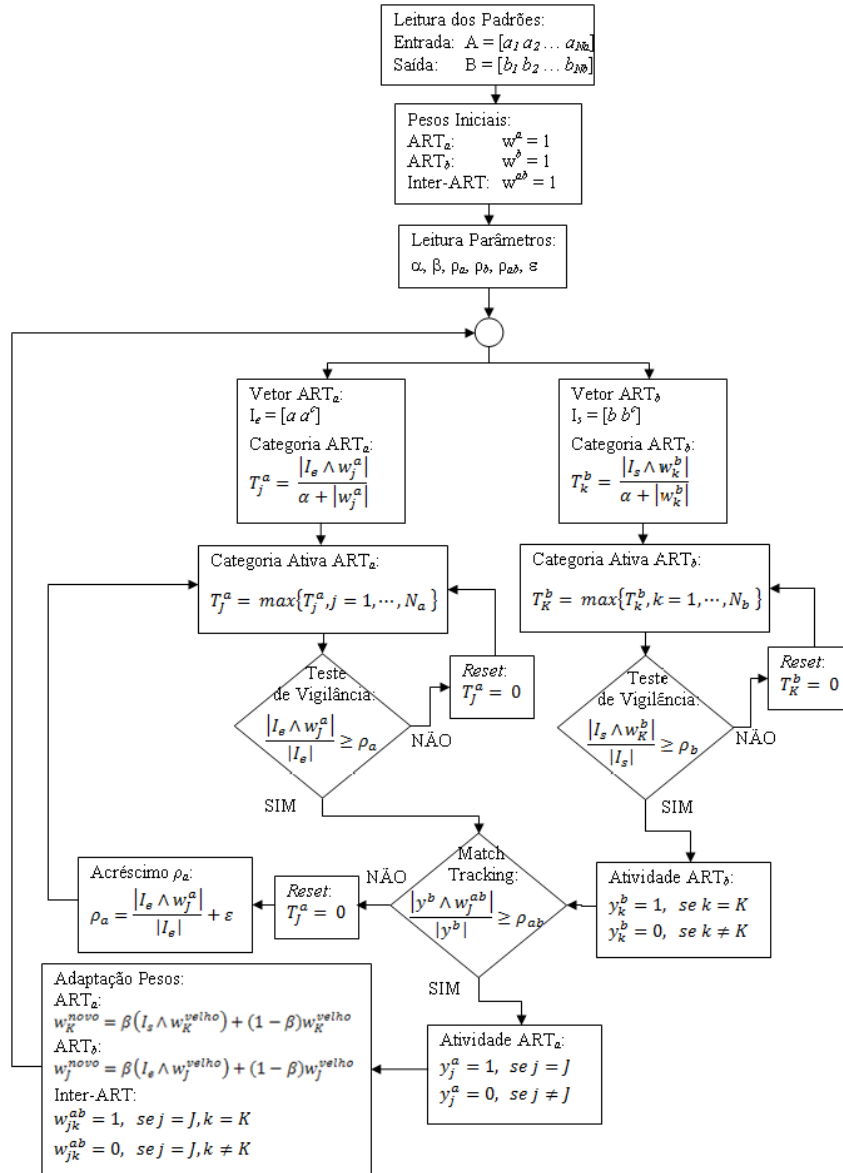


Figura 2. Fluxograma do treinamento da rede neural ARTMAP Fuzzy. Fonte: Referência [4]

## 2. PROCEDIMENTO COMPUTACIONAL

O sistema de monitoramento de integridade de estruturas em um sistema vibro-impacto será composto de três módulos principais: a aquisição de dados, o treinamento e o diagnóstico da rede neural ARTMAP Fuzzy.

A aquisição de dados foi feita por meio de um modelo dinâmico formado por um sistema de equações diferenciais apresentado na Equação (1). Os sinais do sistema vibro-impacto foram gerados com base na resolução numérica realizada através do integrador numérico Runge Kutta de 4ª ordem no software livre OCTAVE, sendo que as condições iniciais utilizadas foram nulas tanto para a posição quanto para a velocidade, e o passo de tempo foi de 0,1. A Tabela 1 apresenta os demais parâmetros utilizados no modelo.

Tabela 1. Parâmetros utilizados no problema analisado.

| Parâmetros | Valores |
|------------|---------|
| $\sigma$   | 0,30    |
| $\omega$   | 0 – 1   |
| $\tau$     | 0 – 100 |
| $\zeta$    | 0,01    |
| $\varphi$  | 29      |
| $e$        | 1,26    |

A variação de tempo adimensional utilizado foi proposital para que fosse possível se analisar o comportamento transiente do sistema, e assim detectar falhas logo no início de sua operação (no caso de uma aplicação prática).

Foram gerados dados para diferentes frequências de excitação do sistema,  $\omega$ , variando desde 0 até 1 com passo de 10<sup>-4</sup>, sendo assim gerados 10000 sinais de posição diferentes no domínio do tempo. Esses sinais foram submetidos a uma transformada de Fourier para que fosse possível se analisar o espectro de frequência dos mesmos. Através da análise dos resultados percebeu-se que as amplitudes encontradas se tornavam insignificantes para frequências altas, portanto esses pontos foram removidos do sinal, sendo que 5% do sinal original foi mantido (correspondente à parte de baixa frequência). Sendo assim foi possível se obter 10000 sinais diferentes, sendo que cada sinal possui 512 pontos, contendo a região de baixa frequência da transformada de Fourier da posição do sistema vibro-impacto.

Por meio da análise dos sinais de frequência foi possível observar que a mudança entre o comportamento normal e o comportamento com falha ocorria quando a frequência de excitação estava em torno de 0,7, assim esse valor foi adotado como o limite entre os dois comportamentos. Portanto, dos 10000 sinais gerados 7000 sinais corresponde ao sistema funcionando no seu estado normal (sinais normais) e os demais sinais representam o sistema operando fora do seu estado normal (3000 sinais com falha).

É realizado o ajuste dos pesos da rede neural artificial que serão utilizados no diagnóstico dos dados (identificação de falha). Este processo é realizado de forma off-line. O conjunto de sinais gerados foi dividido em: sinais normais e com falha sendo que 70% dos sinais de cada grupo foram separados aleatoriamente para serem usados no treinamento da rede neural, e os outros 30% para serem usados na fase de diagnóstico. Logo o módulo de treinamento possui um conjunto de dados composto por 7000 sinais (normais e com falha).

Um novo conjunto de dados diferente do conjunto de treinamento deve ser apresentado à rede, ou seja, os 3000 sinais (normais e com falha) que não participaram do módulo de treinamento, e cada dado será analisado individualmente. Uma vez treinada a rede neural, esta tem a capacidade de através do reconhecimento de categoria, classificar os dados não treinados, e assim, consequentemente, identificar o sinal com falha.

### 3. RESULTADO E DISCUSSÃO

A rede neural ARTMAP Fuzzy com parâmetro dinâmico foi utilizada para monitorar um sistema vibro-impacto. Os parâmetros utilizados no treinamento e diagnóstico da rede neural são apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2. Parâmetros utilizados na rede ARTMAP Fuzzy com parâmetro dinâmico.**

| <i>Parâmetros</i> | <i>Valores</i> |
|-------------------|----------------|
| $\alpha$          | 0,20           |
| $\beta$           | 1,00           |
| $\rho_a$          | 0,80           |
| $\rho_b$          | 0,95           |
| $\rho_{ab}$       | 1,00           |
| $\varepsilon$     | 0,01           |

Para cada sinal a ser analisado pa assume o valor de 0,8 e não ocorrendo a ressonância da rede neural entra em ação o processo que faz com que o valor deste parâmetro seja reduzido até que ocorra a ressonância da rede neural. O tamanho do passo utilizado neste processo é de 0,01 cada vez que não tem a convergência para cada sinal.

O resultado foi obtido através de um teste de referência cruzada no qual o sistema foi executado 30 vezes com a finalidade de garantir a veracidade dos resultados e demonstrar a robustez do método. Os dados de treinamento e diagnóstico foram escolhidos, aleatoriamente, e aplicados à rede no qual indicou um percentual médio de acertos da rede de 99,987%. O tempo processamento médio para a fase de treinamento foi em torno de 1 hora e 26 minutos, e para a fase de diagnóstico em torno de 12 minutos. Na tabela 3 é possível observar que as simulações realizadas forneceram, apenas, dois percentuais de acertos, 100% e 99,97%, ou seja, na fase de diagnóstico a rede neural identificava todos os sinais ou apenas não reconhecia um dos sinais. Os sinais o qual a rede não reconheceu referem-se: 1) sinal com falha (logo após o limiar de 0,7) foi identificado pela rede neural como um sinal normal e 2) sinal normal (logo antes do limiar de 0,7) a rede classificou como um sinal com falha.

**Tabela 3. Quantidade de acertos para os percentuais de acertos obtidos em 30 testes.**

|      |        |
|------|--------|
| 100% | 99,97% |
| 17   | 13     |

O fato de esta rede apresentar parâmetro dinâmico tem pontos positivos e negativos, o processo se torna mais confiável, já que a rede sempre mantém sua criteriosidade no máximo em todas as vezes que inicia o diagnóstico e só diminui caso não haja resposta, isso faz com que cada sinal seja aceito com a máxima criteriosidade possível para aquele sinal, gerando melhores resultados. O lado negativo é o maior tempo de processamento, pois o abaixamento

sucessivo da criteriosidade da rede faz com que o mesmo sinal seja processado diversas vezes, ocasionando uma relativa lentidão quando comparada à rede com parâmetro fixo.

Nota-se que a rede oferece um excelente comportamento, apresentando erros singulares somente no limiar entre o comportamento normal e com falha, o que é esperado devido à similaridade dos sinais para tal nível de precisão. É possível observar que o sistema de identificação de falhas proposto apresenta um bom desempenho com um percentual de acerto em torno de 99,987%. Tais resultados mostram a confiabilidade desse tipo de rede e a viabilidade de seu uso em aplicações práticas de engenharia, o que levaria a uma grande economia pois a detecção de falhas é feita de modo online.

#### 4. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos pela rede ARTMAP Fuzzy com parâmetro dinâmico foram muito bons, visto que, todos os resultados distantes do limiar foram corretamente identificados, e mesmo na região próxima ao limiar obteve-se uma boa taxa de acerto. Tem-se que a rede neural obteve em alguns casos apenas um erro de classificação. Este tipo de erro de classificação pode ocorrer devido à similaridade dos sinais usados, já que o passo de frequência de excitação é muito baixo, dessa forma acredita-se que seria possível aplicar a mesma rede, porém separando os sinais por faixas de frequência, dessa forma, é possível, não só identificar falhas, mas também a faixa de frequência que excita a estrutura.

Partindo desse mesmo princípio seria possível analisar a mudança do parâmetro de amplitude da força adimensional ( $\sigma$ ) (já que pode ser uma variável no sistema) e dessa forma teríamos uma rede mais robusta que identificaria falhas não só devido à frequência de excitação como também à força aplicada. É razoável se conjecturar que a percentagem de acertos nesse caso também seria próxima dos 100% visto que essa rede só tem apresentado falhas nos valores próximos ao limite de separação entre comportamento normal e com falha. Dessa forma sua aplicação em sistemas reais (dado o treinamento com dados reais) se mostra muito favorável, já que após o treinamento seu tempo de resposta é de apenas 245 milissegundos por sinal analisado, podendo até mesmo ser usado em aplicações on-line.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Laboratório Sisplexos, onde este projeto foi realizado, à Universidade Estadual Paulista (UNESP) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS) por toda infraestrutura e suporte, e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro.

#### 6. REFERÊNCIAS

- [1] G. A. Carpenter, S. Grossberg, N. Markuzon, J. H. Reynold and D. B. Rosen, Fuzzy ARTMAP: A neural network for incremental supervised learning of analog multidimensional maps, IEEE Transactions on Neural Network, vol. 3, 689-713, (1992).
- [2] S. Haykin, Neural networks: A Comprehensive Foundation, Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey, USA, (1999).
- [3] J. Ing, E. Pavlovskaja, M. Wiercigroch, S. Banerjee, Bifurcation analysis of an impact oscillator with a one-sided elastic constraint near grazing, Physica D: Nonlinear Phenomena, vol. 239, 312-321, (2010).
- [4] M. L. M. Lopes, Desenvolvimento de Redes Neurais para Previsão de Cargas Elétricas de Sistemas de Energia Elétrica, Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, UNESP, (2005).
- [5] R. F. B. Lourenço, Análise computacional do comportamento dinâmico de um sistema vibro-impacto, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, UNESP, (2017).
- [6] L. R. Maia, M. L. M. Lopes, e F. R. Chavarette, Reconhecimento de imagem utilizando técnicas de computação inteligente, CIC-UNESP (2016) (to appear).

#### 7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

### FAULT DETECTION IN A VIBRO-IMPACT SYSTEM USING A DYNAMICAL PARAMETER FUZZY ARTMAP NEURAL NETWORK

Luciano Rodrigues Maia, [lucianomaia01@hotmail.com](mailto:lucianomaia01@hotmail.com)<sup>1</sup>  
Mara Lúcia Martins Lopes, [mara@mat.feis.unesp.br](mailto:mara@mat.feis.unesp.br)<sup>1</sup>  
Fábio Roberto Chavarette, [fabio.chavarette@unesp.br](mailto:fabio.chavarette@unesp.br)<sup>1</sup>  
Thays Abreu, [thays7abreu@gmail.com](mailto:thays7abreu@gmail.com)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>UNESP – Universidade Estadual Paulista, Av. Brasil Sul, 56, Centro, Ilha Solteira – SP, 15385-000

**Abstract.** *The article presents a methodology based on an intelligent system for the monitoring of structural failures of a vibro-impact system. Artificial neural networks are computational techniques inspired by the neural structure of intelligent organisms and are widely used in solving various problems. Therefore, it is proposed to use the advantages of artificial neural networks to perform fault analysis and monitoring through the artificial neural network ARTMAP Fuzzy with dynamic parameter. To evaluate the proposed methodology, we used data obtained through simulations performed in a numerical model, constructed through differential equations. Thus, from the data acquisition and processing, the ARTMAP Fuzzy neural network was used to identify the failures in the vibro-impact structure. Through the obtained results it was possible to observe that the neural network is able to identify the faulty and normal signals of a vibro-impact system. This methodology can help professionals in the inspection of structures, aiming to identify and characterize faults, in order to perform preventive maintenance and control of vibrations and system noise.*

**Keywords:** *Artificial Intelligence, Fuzzy ARTMAP Neural Network, Fault Detection, Vibro-Impact System*