

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta dissertação será disponibilizado somente a partir de 13/12/2016.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

FRANCISCO DIEGO GARRIDO DA SILVA

**MONITORAMENTO E ANÁLISE DA INTEGRIDADE DE UM TRATOR
UTILIZANDO REDES NEURAIS ARTMAP-*FUZZY***

Ilha Solteira
2016

FRANCISCO DIEGO GARRIDO DA SILVA

**MONITORAMENTO E ANÁLISE DA INTEGRIDADE DE UM TRATOR
UTILIZANDO REDES NEURAS ARTMAP-FUZZY**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Conhecimento: Mecânica dos Sólidos.

FÁBIO ROBERTO CHAVARETTE
Orientador

MARA LÚCIA MARTINS LOPES
Coorientadora

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

S586m Silva, Francisco Diego Garrido da .
Monitoramento e análise da integridade de um trator utilizando redes neurais artmap-fuzzy / Francisco Diego Garrido da Silva. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2016
70 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Mecânica Dos Sólidos., 2016

Orientador: Fábio Roberto Chavarette
Co-orientador: Mara Lúcia Martins Lopes
Inclui bibliografia

1. Redes neurais artificiais. 2. Artmap-fuzzy. 3. Monitoramento de integridade estrutural. 4. Detecção de falhas.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

**TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: MONITORAMENTO E ANÁLISE DA INTEGRIDADE DE UM TRATOR
UTILIZANDO REDES NEURAIS ARTMAP-FUZZY**

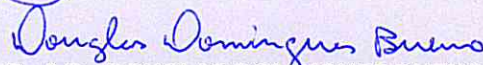
AUTOR: FRANCISCO DIEGO GARRIDO DA SILVA

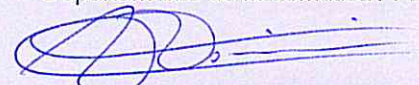
ORIENTADOR: FABIO ROBERTO CHAVARETTE

CO-ORIENTADORA: MARA LUCIA MARTINS LOPES

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ENGENHARIA MECÂNICA, área: MECANICA DOS SÓLIDOS, pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. FABIO ROBERTO CHAVARETTE
Departamento de Matemática / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. DOUGLAS DOMINGUES BUENO
Departamento de Matemática / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. ALFREDO BONINI NETO
Departamento de Engenharia de Biosistemas / Faculdade de Ciências e Engenharia

Ilha Solteira, 13 de junho de 2016

Dedico este trabalho aos meus pais Francisco e Hilda, e a minha irmã Chris, pelo amor familiar e incentivo.

À minha esposa Alessandra pelo amor, compreensão, incentivo, apoio e motivação. E aos meus filhos Benício e Laura que são minhas razões de viver.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente eu agradeço a Deus, pois sem Ele nada disso seria possível em minha vida. Pois o Senhor sempre me ajudou nos momentos de dificuldades, permitindo assim que este sonho se concretizasse.

Segundo ao meus pais, Francisco e Hilda que desde a minha meninice, estiveram presentes em minha vida como verdadeiros pais, mostrando-me as opções dos diversos caminhos que temos para trilhar, mas constantemente alertando-me quais eram os que me conduziriam para uma vida de cheia de amor e paz.

Quanto a minha esposa, não poderia ter uma pessoa melhor para estar ao meu lado durante este mestrado, pois sem a sua compreensão durante meus momentos de estudo, nada disso teria sido possível. E ela ainda me deu o maior presente que um homem pode receber de uma mulher, dois filhos maravilhosos. Benício e Laura, donos absolutos de um amor que brota da minha alma.

Não poderia esquecer da minha querida irmã, Chris, que sempre esteve ao meu lado nos momentos difíceis que enfrentei pela vida.

Agradeço uma pessoa especial que não está mais entre nós, meu caro amigo Adriano, pois foi quem me motivou enormemente a iniciar o mestrado na mecânica. E também pelo apoio dos amigos James, Parra, Outa, Aurélio, Paulo e Roni, pessoas muito queridas e que merecem minha admiração.

E claro, um agradecimento sincero ao meu orientador, Prof. Fábio Chavarette, e coorientadora Profa. Mara Lopes, que me acolheram de forma fraterna, e estiveram sempre prontos para ajudar. Meu muito obrigado pela paciência que tiveram comigo.

Finalizando, agradeço ao Departamento de Mecânica pela oportunidade dada e a possibilidade de ter vivenciado uma experiência ímpar, convivendo com profissionais excelentes como Prof. Douglas Bueno, Prof. Aparecido Gonçalves, Prof. Gilberto Peixoto, Prof. João Antônio, Prof. Gasche, Prof. Vicente Lopes, Prof. Campos e Prof. JBA.

“A melhor maneira de realizar seus sonhos é acordar”.

Paul Valéry.

RESUMO

Diante da constante necessidade de avanço tecnológico na agricultura para promover o aumento da produtividade e seguranças aos indivíduos envolvidos no processo, esta pesquisa apresenta o desenvolvimento de um sistema inteligente, utilizando redes neurais artificiais, aplicado ao monitoramento e análise de falhas estruturais em um trator. Simulou-se o trator por meio de um modelo numérico, representado através de equações diferenciais, o qual gera sinais conforme se alteram os parâmetros de velocidade do trator e a distância entre as saliências no solo. Para a análise, identificação e classificação dos dados simulados computacionalmente, foi utilizada uma rede neural do tipo ARTMAP-*Fuzzy*, que utiliza conceitos da Teoria da Ressonância Adaptativa, cujo algoritmo foi desenvolvido utilizando o programa Matlab. A principal aplicação deste sistema é inspecionar a estrutura do trator objetivando sua melhor conservação, indicando se o mesmo encontra-se em condições normais ou em caso de falha estrutural. Caso uma falha seja detectada, é possível classificar seu tipo. Os resultados evidenciados foram obtidos por meio de média simples entre as execuções do sistema, em virtude de se elevar a veracidade das informações demonstradas. Os resultados obtidos na aplicação da rede neural ao problema especificado mostraram-se ser satisfatórios.

Palavras-chaves: Redes neurais artificiais. ARTMAP-*Fuzzy*. Monitoramento de integridade estrutural. Detecção de falhas.

ABSTRACT

Faced with the constant need for technological advancement in agriculture to promote increased productivity and security to individuals involved in the process, this research presents the development of an intelligent system using artificial neural networks applied to the structural health monitoring and analysis of failure on a tractor. The tractor was simulated by means of a numerical model built by differential equations, which generates signals according to the parameters of tractor's speed and the distance between consecutive protrusions on the ground. For the analysis, identification and classification of computationally simulated data, an artificial neural network known as ARTMAP-fuzzy was used, which uses concepts of Adaptive Resonance Theory, whose algorithm was developed using Matlab. The main application of this system is to inspect the tractor structure aiming its better conservation, indicating whether it is in normal conditions or in case of structural failure. If the fault was detected, it is possible to classify the type of failure identified. The disclosed results were obtained by simple average between the executions of the system, because to increase the accuracy of the information shown. The results obtained in the application of artificial neural network to the specified problem proved to be satisfactory.

Keywords: Artificial neural networks. Fuzzy ARTMAP. Structural health monitoring. Failure Detection.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Acidente com trator em Descalvado – SP.....	23
Figura 2	- Acidente com trator em Portugal.....	23
Figura 3	- Neurônio biológico.....	27
Figura 4	- Componentes de um neurônio artificial.....	28
Figura 5	- Modelo não linear de um neurônio.....	29
Figura 6	- Funções de ativação: (a) Função de limiar. (b) Função linear por partes. (c) Função sigmóide para parâmetro de inclinação α variável.....	31
Figura 7	- Disposição de uma rede neural artificial.....	32
Figura 8	- Rede Neural Artificial ARTMAP- <i>Fuzzy</i>	40
Figura 9	- Fluxograma da rede neural ARTMAP- <i>Fuzzy</i>	44
Figura 10	- Modelo do trator.....	48
Figura 11	- Comportamento das rodas de um trator no campo: a) estado normal; b) o trator empina a frente; c) o trator empina a traseira; d) o trator salta.....	49
Figura 12	- Modelo do sistema dinâmico do trator.....	50
Figura 13	- Sinal nas condições normais.....	52
Figura 14	- Sinal de falha em que o trator empina a dianteira.....	52
Figura 15	- Sinal de falha em que o trator empina a traseira.....	53
Figura 16	- Sinal de falha em que o trator salta.....	53
Figura 17	- Lógica estrutural do sistema de SHM utilizando a rede ARTMAP- <i>Fuzzy</i>	54
Figura 18	- Combinações adotadas entre L e v	55
Figura 19	- Fluxograma do programa.....	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Sinais presentes na base de dados.....	56
Tabela 2	- Quantidade de amostras utilizadas no treinamento e diagnóstico.....	57
Tabela 3	- Valores dos parâmetros utilizados pela rede ARTMAP- <i>Fuzzy</i>	59
Tabela 4	- Resultados obtidos aplicando rede ARTMAP- <i>Fuzzy</i>	61

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ART	<i>Adaptive Resonance Theory</i>
BAM	<i>Bidirectional Associative Memory</i>
CI	Computação Inteligente
CNM	<i>Combinatorial Neural Model</i>
CPN	<i>Counterpropagation Network</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
IA	Inteligência Artificial
NDE	<i>Nondestructive Evaluation</i>
PRS	Processar Resultados Salvos
RBFN	<i>Radial Basis Function Network</i>
RNA	Rede Neural Artificial
SHM	<i>Structural Health Monitoring</i>
SOM	<i>Self-Organizing Map</i>
SVM	<i>Support Vector Machines</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	OBJETIVO DO TRABALHO.....	14
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TEXTO.....	15
2	ATUALIZAÇÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1	MONITORAMENTO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL.....	17
2.2	REDES NEURAIS ARTIFICIAIS.....	17
2.3	SISTEMAS INTELIGENTES APLICADOS EM SHM.....	18
3	MONITORAMENTO DA INTEGRIDADE DO TRATOR.....	21
3.1	INTRODUÇÃO.....	21
3.2	FALHA ESTRUTURAL.....	21
4	REDES NEURAIS ARTIFICIAIS.....	24
4.1	RESUMO HISTÓRICO.....	24
4.2	NEURÔNIO BIOLÓGICO.....	26
4.3	NEURÔNIO ARTIFICIAL.....	28
4.3.1	Funções de ativação.....	30
4.4	ARQUITETURA DAS REDES NEURAIS ARTIFICIAIS.....	31
4.5	TREINAMENTO DA REDE NEURAL.....	33
4.6	TIPOS DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS.....	34
4.7	BENEFÍCIOS DAS REDES NEURAIS ARTIFICIAIS.....	36
4.8	APLICAÇÕES DAS REDES NEURAIS ARTIFICIAIS.....	37
5	TEORIA DA RESSONÂNCIA ADAPTATIVA.....	38
5.1	REDE NEURAL ART.....	38
5.1.1	Rede neural ARTMAP-Fuzzy.....	39
5.1.2	Algoritmo ARTMAP-Fuzzy.....	41
5.2	PRINCIPAIS CONCEITOS DA LÓGICA NEBULOSA.....	45
5.2.1	Breve histórico.....	45
5.2.2	Fusão com redes neurais.....	47
6	DESENVOLVIMENTO E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.....	48
6.1	MODELO NUMÉRICO.....	48
7	METODOLOGIA PROPOSTA.....	54
7.1	SISTEMA DE MONITORAMENTO E DIAGNÓSTICO DE FALHAS ESTRUTURAIS.....	54
7.1.1	Geração de amostras.....	55
7.1.2	Aleatoriedade.....	56
7.1.3	Treinamento do sistema.....	57
7.1.4	Classificação do sistema.....	58
8	APLICAÇÕES E RESULTADOS.....	59
8.1	PARÂMETROS UTILIZADOS.....	59
8.2	DETALHAMENTO DO PROGRAMA.....	60
8.3	RESULTADOS.....	61

8.4	DISCUSSÃO E ANÁLISE DO RESULTADO.....	62
8.4.1	Sugestões para tomadas de decisões.....	63
9	CONCLUSÃO.....	64
9.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	64
	REFERÊNCIAS.....	66

1 INTRODUÇÃO

A agricultura é uma das principais atividades econômicas da sociedade moderna e, como em todas as áreas, a informatização tem sido incorporada nos processos produtivos ao longo dos anos. A incorporação das tecnologias possibilitou principalmente a expansão da área cultivada e o aumento da produtividade (PERUZZI; CHAVARETTE; GUILHERME, 2010).

Um crescimento ainda maior da produção agrícola depende, entre outros fatores, do nível de tecnologia em tratores usados na agricultura. Os tratores, para atenderem as exigências de custos e de produtividade, devem permitir a seus operadores a condição de exigir destas máquinas o máximo desempenho nas tarefas do campo, com incremento satisfatório de ergonomia e segurança de seus operadores. Sob certas condições do traçado e velocidade, o trator pode apresentar instabilidade direcional e níveis de vibrações que são prejudiciais à sua estrutura ou, em casos mais extremos, até mesmo tombamento (KHOURY et al., 2004). Quanto maior a velocidade, mais excessivamente é percebido a ação dos processos dinâmicos, que podem interferir na dirigibilidade do veículo (PERUZZI; CHAVARETTE; GUILHERME, 2010).

Os resultados de diversas pesquisas científicas atestam que o trator é a máquina móvel responsável pela maioria dos acidentes no campo e, dentre estes, o tombamento é o principal causador das fatalidades. O tombamento se deve a perda da estabilidade, tendo como causa prevalecte as saliências do terreno associado com a velocidade do veículo, além de seu centro de gravidade elevado (MONTEMOR; VELOSO; AREOSA, 2015).

Desta forma é necessário desenvolver maneiras eficientes de monitorar a estrutura, visando detectar falhas em estados iniciais, intervir na sua propagação e, conseqüentemente, impedir o seu desgaste ou até mesmo um acidente com vítimas fatais. Esta atual e importante linha de pesquisa é denominada Monitoramento da Integridade de Estruturas, do inglês *Structural Health Monitoring* (SHM).

Conforme destacado por Hall (1999), um SHM deve satisfazer os seguintes requisitos:

- Aquisição e processamento de dados;
- Validação e análise de sinais;
- Identificação e caracterização de falhas;

- Interpretação de mudanças adversas em uma estrutura;
- Auxiliar a tomada de decisões.

Em geral, as estruturas passam por avaliações de integridade estrutural. Nestes casos, são realizadas avaliações não destrutivas, do inglês *Nondestructive Evaluation* (NDE), visando estimar seu grau de segurança e confiabilidade.

Nos últimos anos, os sistemas de monitoramento de integridade estrutural vêm sofrendo uma evolução significativa, principalmente devido ao avanço das tecnologias de sensores, atuadores, materiais inteligentes, técnicas eficientes de processamento de dados e sinais, e principalmente a crescente demanda de se empregar tais ferramentas em tempo real.

Neste contexto, uma possível solução para se desenvolver um SHM moderno e eficiente é a utilização de sensores inteligentes e/ou técnicas de computação inteligentes (redes neurais artificiais, sistemas imunológicos, algoritmos genéticos, lógica *fuzzy*, e outros mais), que viabilizam habilidades como a extração de conhecimentos e informações de processos complexos, facilitando a análise de sinais e proporcionando a automatização da tomada de decisões.

Neste estudo, apresenta-se a proposta de uma metodologia para o desenvolvimento de um sistema de SHM, baseado em técnicas de computação inteligente (CI). Neste sentido, emprega-se uma rede neural artificial (RNA) do tipo *ARTMAP-Fuzzy* (CARPENTER et al., 1992) para realizar a análise e monitoramento da integridade de um trator, devido as suas características de aprendizagem e reconhecimento de padrões e, também por apresentarem bom desempenho em outros tipos de problemas de reconhecimento de padrões e diagnóstico, conforme destacado pelos autores em (TAN; LIM, 2010; LIMA et al., 2013; TONELLI NETO, 2012; LIMA et al., 2014a).

1.1 OBJETIVO DO TRABALHO

Este trabalho tem por objetivo aplicar um método de redes neurais artificiais, mais especificamente uma rede do tipo *ARTMAP-Fuzzy*, que utiliza a teoria da ressonância adaptativa, do inglês *Adaptive Resonance Theory* (ART), no monitoramento da dinâmica de um trator. Considerando o sistema trator-campo como um sistema vibratório não-linear com excitação periódica externa. O intuito deste sistema inteligente é oferecer informações suficiente para que sejam tomadas

decisões ótimas, evitando assim danos à estrutura do trator, como vibrações mecânicas, saltos, empinamento dianteiro e traseiro, e precipuamente evitando acidentes com vítimas.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

A dissertação está estruturada em 9 capítulos mais as referências bibliográficas. A seguir apresenta-se um breve resumo dos tópicos.

- Capítulo 1 – Introdução
 - Neste capítulo apresenta-se a introdução, objetivo e estrutura da dissertação.
- Capítulo 2 – Atualização Bibliográfica
 - O capítulo 2 apresenta o levantamento bibliográfica utilizado para embasar teoricamente os assuntos abordados pelo trabalho, como: monitoramento da integridade estrutural, redes neurais artificiais e o uso de métodos inteligentes em SHM.
- Capítulo 3 – Monitoramento da Integridade Estrutural
 - Neste capítulo apresenta-se basicamente o conceito de dano, falha estrutural e SHM.
- Capítulo 4 – Redes Neurais Artificiais
 - O capítulo 4 apresenta a história e principais conceitos de uma RNA. Também é visto sua arquitetura, formas de aquisição do conhecimento, alguns tipos de redes existentes, seus benefícios e aplicações.
- Capítulo 5 – Teoria da Ressonância Adaptativa
 - Neste capítulo são apresentados os conceitos básicos de métodos da família ART, em especial a ARTMAP-*Fuzzy*. Assim como uma apresentação sucinta de lógica nebulosa.
- Capítulo 6 – Desenvolvimento e Simulação Computacional
 - No capítulo 6 consta o modelo numérico e a explicação de como foram geradas as amostras utilizadas pelo sistema.
- Capítulo 7 – Metodologia Proposta

- É descrito no capítulo 7 o funcionamento do sistema SHM desenvolvido e seus módulos de treinamento e classificação.
- Capítulo 8 – Aplicações e Resultados
 - Neste capítulo é detalhado a configuração do sistema e do programa, desenvolvido para automatizar as execuções. Também são mostrados os resultados obtidos e uma discussão sobre os mesmos.
- Capítulo 9 – Conclusão.
 - No capítulo 9 apresenta-se uma síntese conclusiva de todo o trabalho e uma proposta para sua possível continuidade.

9 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentada uma pesquisa sobre o uso de um método de computação inteligente, no caso redes neurais artificiais, aplicado ao monitoramento e diagnóstico de saltos e tombamento de um trator. Foi proposto interpretar os saltos como danos e o tombamento como falha do sistema definido pelo trator em movimento no solo irregular. Especificamente, foi possível identificar a existência de danos ou falha e, também, classificar o tipo do evento. Foram consideradas duas condições de danos: a de o trator empinar a dianteira ou a traseira; e a falha ao saltar perdendo totalmente o contato com o solo. Foi entendido salto como tombamento pois ele pode ser causado pelo mesmo.

Destaca-se que a configuração dos parâmetros do sistema de SHM, exigidos pela rede ARTMAP-*Fuzzy*, deve ser realizada de forma precisa e cautelosa, pois um ligeiro erro na configuração dos parâmetros de vigilância, da taxa de treinamento ou do parâmetro de escolha, compromete significativamente o desempenho do sistema.

O método de diagnóstico proposto alcançou um índice médio de acerto de 96,69% quando executado com a sua melhor configuração de parâmetros. A rede neural ARTMAP-*Fuzzy* mostrou-se apta para ser utilizada como um sistema de tempo real, pois a fase de treinamento, que é mais demorada, pode ser realizada de forma *offline*, enquanto que a fase de diagnóstico obteve um tempo de resposta de 3,86 milésimos de segundos por amostra classificada. Este tempo é considerado aceitável para um sistema de tomada de decisão em tempo real.

Portanto, conclui-se que o sistema para monitoramento de falhas em estruturas proposto a partir de uma rede neural artificial ARTMAP-*Fuzzy* é confiável e preciso quando utilizado com objetivo de manter a integridade do trator e, conseqüentemente, a segurança do seu condutor.

9.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para dar continuidade a esta pesquisa sugere-se os seguintes itens:

- Aplicar o sistema de SHM ARTMAP-*Fuzzy* em outros problemas, como por exemplo: estruturas marítimas, espaciais, aeronaves, pontes e edifícios;

- Verificar a possibilidade de utilizar o sistema de SHM para prevenir a ocorrência de anormalidades, ou seja, antecipadamente à ocorrência de falhas estruturais.
- Incorporar o módulo de treinamento continuado nos sistemas que utilizam ARTMAP-*Fuzzy* como método de classificação, explorando mais amplamente a característica de estabilidade e plasticidade.
- Agregar outros métodos a rede ARTMAP-*Fuzzy*, como enxame de partículas, para auxiliar na seleção de conjunto de critérios; e coeficiente Kappa, para reduzir a quantidade de atributos.

REFERÊNCIAS

- ACIDENTE faz vítima mortal em S. João da Pesqueira. **Correio do Amanhã**, 17 jun. 2015. Disponível em: <http://www.cmjornal.xl.pt/nacional/detalhe/morre_em_capotamento_de_trator.html>. Acesso em: 18 jan. 2016.
- ALTRAN, A. B. **Sistema inteligente para previsão de carga multinodal em sistemas elétricos de potência**. 2010. 86 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2010.
- BIONDI, L. N. et al. Minicurso de sistema especialista nebuloso. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 38., 2006, Goiânia. **Anais...** Rio de Janeiro: Sobrapo, 2006. p. 2508-2543.
- CARPENTER, G. A. et al. Fuzzy ARTMAP: a neural network architecture for incremental supervised learning of analog multidimensional maps. **IEEE Transactions on Neural Networks**, Piscataway, v. 3, n. 5, p. 698-713, set 1992.
- CARPENTER, G. A.; GROSSBERG, S. A massively parallel architecture for a self-organizing neural pattern recognition machine. **Computer Vision, Graphics, and Image Processing**, Maryland Heights, v. 37, n. 1, p. 54-115, 1987a.
- CARPENTER, G. A.; GROSSBERG, S. ART2: self-organization of stable category recognition codes for analog input patterns. **Applied Optics**, Washington, v. 26, n. 23, p. 4919-4930, 1987b.
- CARPENTER, G. A.; GROSSBERG, S. ART3: hierarchical search using chemical transmitters in self-organizing pattern recognition architectures. **Neural Networks**, Kidlington, v. 3, n. 2, p. 129-152, 1990.
- CARPENTER, G. A.; GROSSBERG, S. **Pattern recognition by self organizing**. Cambridge: MIT Press, 1991. 710 p.
- CARPENTER, G. A.; GROSSBERG, S.; REYNOLDS, J. H. ARTMAP: supervised real-time learning and classification of nonstationary data by a self-organizing neural network. **Neural Networks**, Kidlington, v. 4, n. 5, p. 565-588, 1991a.
- CARPENTER, G. A.; GROSSBERG, S.; ROSEN, D. B. Fuzzy ART: fast stable learning and categorization of analog patterns by an adaptive resonance system. **Neural Networks**, Kidlington, v. 4, n. 6, p. 759-771, 1991b.
- FARRAR, C. R.; WORDEN, K. An introduction to structural health monitoring. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering**, London, v. 365, n. 1851, december 2006. p. 303-315.
- FRANÇA, A. A. **Detecção e localização de danos em materiais compósitos aplicado em aeronaves utilizando redes neurais artificiais**. 2014. 109 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)- Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2014.

FUKUSHIMA, K. Neocognitron: A self-organizing neural network model for a mechanism of pattern recognition unaffected by shift in position. **Biological Cybernetics**, New York, v. 36, p. 193-202, 1980.

FURTADO, R. M.; LOPES, V. J. Localização de falhas estruturais usando sensores e atuadores piezoelétricos e redes neurais artificiais. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA - CONEM, 2., 2002, João Pessoa. **Anais...** Rio de Janeiro: ABCM, 2002.

GONSALEZ, C. G. **Metodologias para Reconhecimento de Padrões em Sistemas SHM Utilizando a Técnica da Impedância Eletromecânica (E/M)**. 2012. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)- Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2012.

GONSALEZ, C. G. et al. Structural damage detection in an aeronautical panel using analysis of variance. **Mechanical System and Signal Processing**, London, v. 52-53, p. 206-216, 2014.

GROSSBERG, S. Adaptive pattern classification and universal recoding I: Parallel development and coding of neural feature detectors. **Biological Cybernetics**, New York, v. 23, n. 3, p. 121-134, 1976.

GROSSBERG, S. How does a brain build a cognitive code? **Psychological Review**, Washington, v. 87, p. 1-51, january 1980.

HALL, S. R. The effective management and use of structural health data. **Structural Health Monitoring 2000**, Palo Alto, v. 1, n. 1, p. 265-275, 1999.

HAYKIN, S. **Redes neurais: princípios e prática**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001. 900 p.

HEBB, D. O. **The organization of Behavior: a neuropsychological theory**. New York: Wiley, 1949. 335 p.

HECHT-NIELSEN, R. Counterpropagation networks. **Applied Optics**, Washington, v. 26, n. 23, p. 4979-4984, dec. 1987.

HOPFIELD, J. J. Neural network and physical systems with emergent collective computational abilities. **National Academy of Sciences. Proceedings**, Washington, v. 79, n. 8, p. 2554-2558, 1982.

KHAN, I. A.; PARHI, D. R. Fault detection of composite beam by using the modal parameters and RBFNN technique. **Journal of Mechanical Science and Technology**, Heidelberg, v. 29, n. 4, p. 1637-1648, 2015.

KHOURY, J. K. J. et al. Modelagem da estabilidade de tratores agrícolas de pneus. **Pesq. Agropec. Bras.**, Brasília, v. 39, n. 5, p. 459-468, mai. 2004.

KOHONEN, T. Correlation Matrix Memories. **IEEE Transactions on Computers**, New York, v. c-21, n. 4, p. 353-359, apr 1972.

KOHONEN, T. Self-organized formation of topologically correct feature maps. **Biological Cybernetics**, Heidelberg, v. 43, n. 1, p. 59-69, 1982.

KOSKO, B. Bidirectional associative memories. **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics**, New York, v. 18, n. 1, p. 49-60, jan/feb 1988.

KROSE, B.; SMAGT, P. V. **An introduction to neural network**. Amsterdam: University of Amsterdam, 1996. 135 p.

LEE, J.; KIM, S. Structural damage detection in the frequency domain using neural networks. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, London, v. 18, n. 1, p. 785-792, 2007.

LEE, K. H. **First course on fuzzy theory and applications**. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005. 335 p.

LIMA, F. P. A. **Monitoramento e identificação de falhas em estruturas aeronáuticas e mecânicas utilizando técnicas de computação inteligente**. 2014. 72 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2014.

LIMA, F. P. A. et al. ARTMAP-Fuzzy artificial neural network applied to the monitoring and fault identification in structural. **Lecture Notes in Information Technology**, Korea, v. 39, n. 1, p. 3-9, 2013.

LIMA, F. P. A. et al. Diagnóstico de falhas em estruturas mecânicas utilizando rede neural artificial ARTMAP-Fuzzy. In: CONGRESSO DE MATEMÁTICA APLICADA E COMPUTACIONAL - CMAC, 1., 2014, Curitiba. **Congresso...** Curitiba: SBMAC, 2014a. p. 1-6.

LIMA, F. P. A. et al. Monitoramento da integridade de estruturas aeronáuticas utilizando um método inteligente baseado em sistemas imunológicos artificiais. In: SERIES OF THE BRAZILIAN SOCIETY OF APPLIED AND COMPUTATIONAL MATHEMATICS, 2., 2014, Curitiba. **Proceedings...** Curitiba: SBMAC, 2014b. p. 1-6

LOPES, M. L. M. **Desenvolvimento de redes neurais para previsão de cargas elétricas de sistemas de energia elétrica**. 2005. 149 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)- Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2005.

MACHADO, R. J.; ROCHA, A. F. **Handling knowledge in high order neural networks: the combinatorial neural network**. Rio de Janeiro: IBM Rio Scientific Center, 1989. (Technical Report, CCR076).

MAIO, C. E. B. **Técnicas para monitoramento de integridade estrutural usando sensores e atuadores piezoelétricos**. 2011. 113 f. Dissertação (Mestrado em

Engenharia Mecânica)- Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo - USP, São Carlos, 2011.

MARTINS, J. R. D. **Detecção e classificação de curtos-circuitos em sistemas de distribuição usando rede neural artificial ARTMAP nebulosa**. 2010. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)- Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2010.

MCCULLOCH, W. S.; PITTS, W. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. **Bulletin Mathematical Biophysics**, New York, v. 5, n. 1, p. 115-133, 1943.

MINSKY, M. L.; PAPERT, S. A. **Perceptrons**: an introduction to computational geometry. Cambridge: MIT Press, 1969. 308 p.

MONTEMOR, C.; VELOSO, L.; AREOSA, J. Acidentes com tratores agrícolas e florestais: aprender para prevenir. **Sociologia, Revista da Faculdade de Letras da Universidade do Porto**, Porto, v. 30, n. 1, p. 119-143, 2015.

PANDEY, P. C.; BARAI, S. V. Multilayer perceptron in damage detection of bridge structures. **Computers & Structures**, Kidlington, v. 54, n. 4, p. 597-608, 1995.

PERUZZI, N. J.; CHAVARETTE, F. R.; GUILHERME, I. R. Análise da dinâmica do modelo de um trator com excitação periódica vertical. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA DE DINÂMICA, CONTROLE E APLICAÇÕES - DINCON, 9., 2010, Serra Negra. **Conferencia...** Serra Negra: SBMAC, 2010. p. 552-557.

RIBEIRO, D. T. M.; MELO, D. T. **Sistemas especialistas e lógica fuzzy**: análise de risco cardíaco. Mococa: [s.n.], 2013. 92 p.

ROSENBLATT, F. The Perceptron: a probabilistic model for information storage and organization in the brain. **Psychological Review**, Washington, v. 65, n. 1, p. 386-408, 1958.

ROSENBLATT, F. **Principles of neurodynamics**. Washington: Spartan Books, 1962. 616 p.

RUMELHART, D. E.; HINTON, G. E.; WILLIAMS, R. J. Learning representations by back-propagating errors. **Nature**, London, v. 323, n. 9, p. 533-536, oct 1986.

SAKAI, K. **Nonlinear dynamics and chaos in agricultural systems**. Amsterdam: Elsevier Science B.V., 2006. 220 p.

SERRANO-GOTARREDONA, T.; LINARES-BARRANCO, B.; ANDREOU, A. G. **Adaptive resonance theory microchips**: circuit design techniques. New York: Springer, 1998.

SHEN, T. et al. Damage location and identification of the wing structure with probabilistic neural networks. In: PROGNOSTICS & SYSTEM HEALTH MANAGEMENT CONFERENCE, 1., 2011, Shenzhen. **Conference...** Shenzhen: IEEE, 2011. p. 1-6.

SILVA, I. N.; SPATTI, D. H.; FLAUZINO, R. A. **Redes neurais artificiais: para engenharia e ciências aplicadas**. São Paulo: Artliber, 2010. 399 p.

SILVA, S.; DIAS, M. J.; LOPES, V. Jr. Structural health monitoring in smart structures through time series analysis. **Structural Health Monitoring**, London, v. 7, n. 3, p. 231-244, 2008.

SOHN, H. et al. **A review of structural health monitoring literature: 1996-2001**. [S.l.]: Los Alamos National Laboratory, 2004. p. 301.

SOUZA, A. S. et al. Analysis of structural integrity using an ARTMAP-Fuzzy artificial neural network. **Advanced Materials Research**, Hong Kong, v. 838-841, p. 3287-3290, 2013.

SOUZA, S. S. F.; LIMA, F. P. A.; CHAVARETTE, F. R. Monitoring of structural integrity using unsupervised data clustering techniques. **International Journal of Pure and Applied Mathematics**, Bulgaria, v. 104, n. 1, p. 119-133, 2015.

TAN, S. C.; LIM, C. P. Evolutionary Fuzzy ARTMAP neural networks and their applications to fault detection and diagnosis. **Neural Processing Letters**, New York, v. 31, n. 3, p. 219-242, may 2010.

TEBALDI, A. **Detecção de falhas estruturais usando sensores e atuadores piezelétricos e algoritmos genéticos**. 2004. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)- Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2004.

TEBALDI, A.; COELHO, L. S.; LOPES, V. J. Detecção de falhas em estruturas inteligentes usando otimização por nuvem de partículas: fundamentos e estudo de casos. **Revista Controle & Automação**, Campinas, v. 17, n. 3, p. 312-330, 2006.

TONELLI-NETO, M. S. **Formulação do controle preventivo em sistemas de distribuição de energia elétrica baseada na lógica fuzzy e redes neurais**. 2012. 137 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)- Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2012.

TRABALHADOR morre em acidente com trator em Descalvado. **São Carlos Agora**, 23 nov. 2012. Disponível em:
<<http://www.saocarlosagora.com.br/regiao/noticia/2012/11/23/36240/trabalhador-rural-morre-em-acidente-com-trator-em-descalvado/>>. Acesso em: 18 jan. 2016.

WANG, F. L. et al. Damage diagnosis for complex steel truss bridges using multi-layer genetic algorithm. **Journal of Civil Structural Health Monitoring**, England, v. 3, n. 2, p. 117-127, 2013.

WERBOS, P. J. **Beyond regression: new tools for prediction and analysis in the**. 1974. 906 f. Thesis (Doutorado)- Harvard University, Harvard, 1974.

WIDROW, B.; HOFF, M. E. **Adaptative switching circuits**. ire wescon convention record. California: Institute of Radio Engineers, 1960. p. 96-104.

XIANG-JUN, C. et al. Application of wavelet analysis in vibration signal processing of bridge structure. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MEASURING TECHNOLOGY AND MECHATRONICS AUTOMATION, 2., 2010, Changsha City. **Conference...** Changsha City: IEEE, 2010. p. 671-674.

XU, Z. et al. A selective fuzzy ARTMAP ensemble and its application to the fault diagnosis of rolling element bearing. **Neurocomputing**, Amsterdam, v. 182, p. 25-35, 2016.

YEGNANARAYANA, B. **Artificial neural networks**. New Delhi: Prentice-Hall of India, 2005. 476 p.

ZADEH, L. A. Fuzzy sets. **Information and Control**, Maryland Heights, v. 8, p. 338-353, 1965.