



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS – REGIONAL CATALÃO
UNIDADE ACADÊMICA ESPECIAL DE MATEMÁTICA E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM E OTIMIZAÇÃO



Michael dos Santos Durval

**APLICAÇÃO DOS MAPAS AUTO-ORGANIZÁVEIS ASSOCIADO AO
MONITORAMENTO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL BASEADO NA
IMPEDÂNCIA ELETROMECHANICA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

CATALÃO – GO, 2018

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR
VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES E DISSERTAÇÕES
NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

1. Identificação do material bibliográfico: ☒ **Dissertação** ☐ **Tese**

2. Identificação da Tese ou Dissertação:

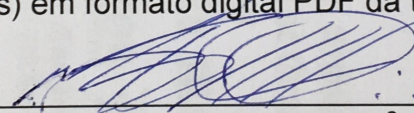
Nome completo do autor: Michael dos Santos Durval

Título do trabalho: Aplicação dos Mapas Auto-Organizáveis associado ao Monitoramento da Integridade Estrutural baseado na Impedância Eletromecânica

3. Informações de acesso ao documento:

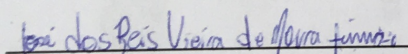
Concorda com a liberação total do documento ☒ **SIM** ☐ **NÃO**¹

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF da tese ou dissertação.



Assinatura do(a) autor(a)²

Ciente e de acordo:



Assinatura do(a) orientador(a)²

Data: 24 / 07 / 18

¹ Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

² A assinatura deve ser escaneada.

MICHAEL DOS SANTOS DURVAL

APLICAÇÃO DOS MAPAS AUTO-ORGANIZÁVEIS ASSOCIADO AO
MONITORAMENTO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL BASEADO NA
IMPEDÂNCIA ELETROMECHANICA

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Modelagem e Otimização pela Universidade Federal de Goiás – Regional Catalão.

Orientador:
José dos Reis Vieira de Moura Junior

CATALÃO – GO

2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Durval, Michael dos Santos

Aplicação dos Mapas Auto-Organizáveis Associado ao
Monitoramento da Integridade Estrutural Baseado na Impedância
Eletromecânica [manuscrito] / Michael dos Santos Durval. - 2018.
82 f.: il.

Orientador: Prof. José dos Reis Vieira de Moura Júnior.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Unidade
Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia, Catalão,
Programa de Pós-Graduação em Modelagem e Otimização, Catalão, 2018.

Inclui siglas, abreviaturas, símbolos, tabelas, lista de figuras, lista
de tabelas.

1. Monitoramento da Integridade estrutural. 2. Impedância
eletromecânica. 3. Pastilha PZT. 4. Redes neurais. 5. Mapas auto
organizáveis. I. Moura Júnior, José dos Reis Vieira de , orient. II.
Título.

CDU 621



Defesa Nº _____

Ata de Defesa Pública – Dissertação de Mestrado

Aos 04 dias do mês de julho do ano de 2018, às 14 h: 00 min, reuniram-se os componentes da banca examinadora, professores(as) Dr.(a) José dos Reis Vieira de Moura Júnior (presidente e Orientador), Dr. (a) Karina Mayumi Tsuruta e Dr. (a) Marcelo Henrique Stoppa para, em sessão pública realizada na sala do laboratório de Controle Operacional, da Regional Catalão (RC), da Universidade Federal de Goiás (UFG), procederem com a avaliação do trabalho intitulado: "Aplicação dos Mapas Auto-Organizáveis Associado ao Monitoramento da Integridade Estrutural Baseado na Impedância Eletromecânica" , em nível de Mestrado, área de concentração Modelagem e Otimização, de autoria de Michael dos Santos Durval, discente do Programa de Pós-Graduação em Modelagem e Otimização (PPGMO) da UFG/RC. A sessão foi aberta pelo presidente da banca, que fez a apresentação formal dos membros da banca. A seguir, a palavra foi concedida ao discente que, dentro do tempo regulamentar, procedeu a apresentação de seu trabalho. Terminada a apresentação, cada membro da banca arguiu o candidato, tendo-se adotado o sistema de diálogo sequencial. Terminada a fase de arguição, procedeu-se a avaliação do trabalho. Os membros da banca consideraram o trabalho final: (☒) **Aprovado** ou (☐) **Reprovado**. Cumpridas as formalidades de pauta, às 16 h: 30 min a presidência da mesa encerrou a sessão e para constar, eu José dos Reis Vieira de Moura Júnior, lavrei a presente Ata que, depois de lida e aprovada, segue assinada pelos membros da banca examinadora e pelo discente e, posteriormente, será homologada pelo Colegiado do PPGMO.

Catalão-GO, 04 de julho de 2018.

José dos Reis Vieira de Moura Júnior
Prof.(a) Dr. (a): José dos Reis Vieira de Moura Júnior
Programa de Pós-Graduação em Modelagem e
Otimização, UFG/RC.
(Presidente da Banca)

Karina Mayumi Tsuruta
Prof.(a) Dr. (a): Karina Mayumi Tsuruta
UFV

Marcelo Henrique Stoppa
Prof.(a) Dr. (a): Marcelo Henrique Stoppa
UFG/IMTec

Michael dos Santos Durval
Discente: Michael dos Santos Durval
Programa de Pós-Graduação em Modelagem e
Otimização, UFG/RC.

Dedico este trabalho, primeiramente, ao Grande Arquiteto do Universo, que me deu forças para vencer todas as dificuldades.

À minha mãe Roseli dos Santos Durval e minha avó Tereza dos Santos Durval, pelo amor, incentivo e apoio incondicional.

Este trabalho é dedicado também ao meu melhor amigo, Wisner Gonçalves Mesquita, que esteve ao meu lado durante esta longa caminhada.

Agradecimentos

A Deus por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades.

A esta universidade, seu corpo docente, direção e administração que oportunizaram a janela que hoje vislumbro um horizonte superior, eivado pela acendrada confiança no mérito e ética aqui presentes.

Ao meu orientador José dos Reis de Vieira Moura Junior, pelo suporte no tempo que lhe coube, pelas suas correções e incentivos.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

Tudo na vida é possível! Basta querer e acreditar. A realidade depende do observador.

Michael dos Santos Durval

RESUMO

DURVAL, M. S.. *Aplicação dos Mapas Auto-Organizáveis Associado ao Monitoramento da Integridade Estrutural Baseado na Impedância Eletromecânica*. 2018. 82 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem e Otimização) – Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia, Universidade Federal de Goiás – Regional Catalão, Catalão – GO.

O Monitoramento de Integridade Estrutural (*SHM – Structural Health Monitoring*) é uma técnica viável para se reduzir custos de manutenção além de aumentar a vida útil e melhorar o desempenho de estruturas de engenharia. A metodologia baseada em impedância usa o comportamento eletromecânico de materiais piezelétricos (PZT) para detectar 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 da pastilha PZT ou transdutor piezelétrico. A partir da variação dos sinais de impedância elétrica 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 (*SOMs – Self-Organizing Maps*) de Kohonen associado ao método SHM baseado na impedância eletromecânica para a detecção e a classificação de danos em uma viga de alumínio. Com base no sistema em análise, treinou-se a rede para cinco posições de falhas e severidades distintas. Por meio do modelo de rede neural dos mapas auto-organizáveis, a rede forneceu 30 mapas como respostas ao processo de treinamento e aprendizagem. Com isto, percebeu-se qualitativamente com base na concentração de energia dos mapas que o agrupamento e classificação das diferentes condições de danos em que a estrutura de engenharia foi submetida, ocorreu com sucesso. Para se estabelecer uma análise quantitativa que comprovasse o potencial da rede SOM, aplicou-se a fórmula da distância de Hamming, nos quais os resultados confirmaram sua precisão.

Palavras-chaves: Monitoramento da Integridade estrutural, Impedância eletromecânica, Pastilha PZT, Redes neurais, Mapas auto-organizáveis.

ABSTRACT

DURVAL, M. S.. *Application of the Self-Organization Maps Associated with the Structural Health Monitoring Based on the Electromechanical Impedance*. 2018. 82 f. Master Thesis in Modelling and Optimization – Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia, Universidade Federal de Goiás – Regional Catalão, Catalão – GO.

Structural Health Monitoring (SHM) is a very cost-effective technique to reduce maintenance 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 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 patch. 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. Based on the system under analysis, the network was trained to five different failure and severity positions. Through the neural network model of self-organizing maps, the network provided 30 maps as answers to the training and learning process. With this, it was realized qualitatively based on the concentration of energy of the maps that the grouping and classification of the different conditions of damages in which the engineering structure was submitted, happened with success. In order to establish a quantitative analysis proving the potential of the SOM network, the Hamming distance formula was applied, in which the results confirmed its accuracy.

Keywords: SHM, Electromechanical impedance, PZT patch, Neural networks, SOMs.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Modelo eletromecânico do método de integridade estrutural baseado em impedância eletromecânica.	47
Figura 3.1 – Rede de Kohonen.	52
Figura 3.2 – Exemplos de região de vizinhança.	53
Figura 3.3 – Redução da região de vizinhança.	54
Figura 3.4 – Etapas básica para implementação das funções de uma SOM.	56
Figura 3.5 – Demonstração gráfica do exemplo	59
Figura 4.1 – Representação do sistema de coleta de assinaturas de impedância.	61
Figura 4.2 – Representação gráfica da viga utilizada como amostra no procedimento experimental.	62
Figura 4.3 – Placa de aquisição das assinaturas de impedância eletromecânica utilizada no procedimento experimental.	62
Figura 4.4 – Representação gráfica dos padrões de sinais de impedância eletromecânica, dada as 6 condições iniciais.	63
Figura 4.5 – Representação gráfica dos padrões de sinais de impedância eletromecânica: Dano 1 x <i>Baseline</i>	64
Figura 4.6 – Representação gráfica dos padrões de sinais de impedância eletromecânica: Dano 2 x <i>Baseline</i>	64
Figura 4.7 – Representação gráfica dos padrões de sinais de impedância eletromecânica: Dano 3 x <i>Baseline</i>	65
Figura 4.8 – Representação gráfica dos padrões de sinais de impedância eletromecânica: Dano 4 x <i>Baseline</i>	65
Figura 4.9 – Representação gráfica dos padrões de sinais de impedância eletromecânica: Dano 5 x <i>Baseline</i>	66
Figura 4.10 – Representação gráfica da topologia adotada na rede SOM utilizada.	66
Figura 5.1 – Mapas auto-organizáveis obtidos no processo de simulação da rede.	69
Figura 5.2 – Mapas auto-organizáveis para o estado de baseline da viga de alumínio.	70
Figura 5.3 – Mapas auto-organizáveis de cada grupo classificado.	70
Figura 5.4 – Avaliação quantitativa dos resultados para o estado de <i>baseline</i>	71

Figura 5.5 – Avaliação quantitativa dos resultados para a condição de dano 1.	71
Figura 5.6 – Avaliação quantitativa dos resultados para a condição de dano 2.	72
Figura 5.7 – Avaliação quantitativa dos resultados para a condição de dano 3.	72
Figura 5.8 – Avaliação quantitativa dos resultados para a condição de dano 4.	72
Figura 5.9 – Avaliação quantitativa dos resultados para a condição de dano 5.	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Alguns trabalhos desenvolvidos nas duas últimas duas décadas relaciona-	
dos ao estudo SHM baseado na impedância eletromecânica.	38
Tabela 3.1 – Exemplo para Classificação de Cursos Universitários.	58

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 – Exemplo de implementação básica de uma SOM.	57
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASD — Average Square Deviation

CC — Coeficiente de Correlação

CCD — Correlation Coefficient Deviation

CI — Circuito Integrado

Cov — Covariância

END — Ensaios Não Destrutivos

FOS — Sensores de Fibra Ótica

MAPD — Desvio Percentual Absoluto Médio

MFC — Macro Fiber Composite

NDE — Non-Destructive Evaluation

PCA — Análise de Componentes Principais

PVDF — Fluorido de Polivinilideno

PZT — Titanato Zirconato de Chumbo

RMSD — Desvio Quadrático Médio

RNA — Rede Neural Artificial

SHM — Structural Health Monitoring

SOM — Self-Organizing Maps

LISTA DE SÍMBOLOS

D — Deslocamento

E — Campo elétrico

ϵ — Tensor dielétrico do material

d — Tensor de tensão piezelétrico

σ — Tensão

S — Deformação

d_{ij} — módulo piezelétrico

i — Direção do campo elétrico aplicado

j — Direção resultante da deformação normal

v — Voltagem aplicada na direção i

th — Espessura do PZT

Z_m — Impedância mecânica

F — Força

v — Voltagem de entrada no atuador PZT

R_m — Amortecimento Mecânico

M_m — Massa Mecânica

C_m — Flexibilidade Mecânica

Z — Impedância complexa da estrutura

V — Voltagem

I — Corrente de saída do PZT

X_L — Reatância indutiva

ω — Frequência angular

L — Indutância da bobina

X_C — Reatância capacitiva

f — Frequência

Z_a — Impedância complexa do PZT

Y — Admitância elétrica

Z_s — Impedância mecânica da estrutura

$\hat{Y}_{xx}^E$ — Módulo complexo de Young do PZT com campo elétrico nulo

d_{3x} — Constante de acoplamento piezoelétrico em uma direção x com deformação nula

$\bar{\epsilon}_{33}^T$ — Constante dielétrica complexa do PZT com tensão zero

δ — Fator de perda dielétrica tangencial do PZT

a — Constante geométrica do PZT

m — Micrômetro

mm — Milímetro

kHz — KiloHertz

M — Medida da falha

Re — Parte real do sinal de impedância

$Z_{1,i}$ — Sinal da impedância medido pelo PZT quando a estrutura está sob condições saudáveis

$Z_{2,i}$ — Sinal da impedância medido pelo PZT quando a estrutura está sob condição de falha

n — Quantidade de pontos a serem analisados

δASD — Diferença das médias de cada um dos sinais

$\bar{Z}_1$ — Média do sinal de impedância medido pelo PZT quando a estrutura está sob condições saudáveis

$\bar{Z}_2$ — Média do sinal da impedância medido pelo PZT quando a estrutura está sob condição de falha

S_{Z_1} — Desvio padrão do sinal de impedância medido pelo PZT quando a estrutura está sob condições saudáveis

S_{Z_2} — Desvio padrão do sinal da impedância medido pelo PZT quando a estrutura está sob condição de falha

MHz — MegaHertz

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	27
1.1	VISÃO GERAL SOBRE O SHM	27
1.2	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	28
2	MONITORAMENTO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL BASEADO NA IMPEDÂNCIA ELETROMECHANICA	31
2.1	Introdução	31
2.2	Ensaaios não-destrutivos	31
2.2.1	Inspeção visual	32
2.2.2	Testes radiográficos	33
2.2.3	Ensaaios por ultrassom	33
2.2.4	Técnicas das ondas de Lamb	34
2.2.5	Líquidos penetrantes	35
2.2.6	Medições de propriedades dinâmicas	36
2.2.7	Partículas magnéticas	36
2.2.8	Método de monitoramento de danos baseado na impedância eletromecânica	36
2.3	Algumas Aplicações de SHM Baseado na Impedância Eletromecânica	38
2.4	Fundamentos de Piezoelectricidade	41
2.4.1	Materiais piezelétricos	41
2.5	Conceitos de Impedância Elétrica e Mecânica	43
2.5.1	Impedância mecânica	43
2.5.2	Impedância elétrica	44
2.6	Método de Integridade Estrutural Baseado em Impedância Eletromecânica	46
2.7	Métricas de Dano para o Método de Impedância Eletromecânica	49
3	MEMÓRIAS AUTOASSOCIATIVAS	51
3.1	Introdução	51
3.2	Redes Neurais Artificiais	51
3.3	Redes de Kohonen	52
3.4	Uso da SOM no Matlab	56

4	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	61
4.1	Simulação Experimental	63
5	RESULTADOS	69
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	75
	REFERÊNCIAS	77

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Dentro do ambiente de manufatura há uma busca constante pela máxima eficiência e eficácia operacional desde a fase de concepção do projeto ou mesmo já em processos considerados modernos. Com isso torna-se crescente o interesse de estudos preditivos no que se diz respeito a danos que uma estrutura ou corpo possa sofrer no decorrer de sua vida útil afim de se evitar falhas, quebras ou catástrofes com o projeto (RYTTER, 1993).

Diferentes estruturas de engenharia mecânica, civil e aeroespacial tem sido utilizadas por um período longo de tempo, sendo elas submetidas a diversos tipos de esforços, tais como atrito, fadiga, impacto, concentração de tensão, aumento da ruptura, entre outros, além dessas estruturas sofrerem desgastes. Logo, para que o sistema opere de forma adequada é necessário que o dano seja identificado e corrigido. Um minucioso plano de manutenção muitas vezes baseado somente no tempo de vida útil, pode evitar que maiores prejuízos aconteçam (FARRAR; LIEVEN; BEMENT, 2005; PALOMINO, 2008; OLIVEIRA, 2013; LOPES JUNIOR *et al.*, 2000).

1.1 VISÃO GERAL SOBRE O SHM

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 de manutenção no monitoramento de estruturas da construção civil e nos sistemas aeroespaciais, com a finalidade de detectar em tempo real ou não, danos estruturais (AFSHARI, 2012; BAPTISTA, 2010; FARRAR, 2003). Conforme Rytter (1993), os sistemas avançados de monitoramento de integridade estrutural podem ser descritos em cinco etapas: (1) detectar a existência do dano; (2) identificar o 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

com o intuito de aumentar a segurança e confiabilidade das mesmas impactando diretamente na redução de custos operacionais e de manutenção (PALOMINO, 2008).

Várias técnicas utilizadas em sistemas de SHM tem sua origem nas Avaliações ou Ensaios Não-Destrutivos, do inglês *Non-Destructive Evaluation* (NDE) (AFSHARI, 2012; PALOMINO, 2008; STASZEWSKI; WORDEN, 2004).

Segundo Afshari (2012), um dos principais fatores que fazem os sistemas SHM mais práticos que as avaliações não destrutivas é a integração de sensores e atuadores (materiais inteligentes) na estrutura ou sistema que está sendo monitorada. Contudo, para o monitoramento da integridade de uma estrutura, se faz necessária a detecção contínua e a inspeção de acordo com uma propriedade específica da mesma, tal como temperatura, tensão, ondas acústicas ou modos de vibração. Dois dos sensores mais utilizados nos sistemas SHM são os sensores de fibra ótica (FOS) e os piezelétricos (PZT - Titanato Zirconato de Chumbo) (AFSHARI, 2012; BOLLER, 2001). Os sensores de fibra ótica são mais atrativos devido ao seu tamanho pequeno, peso leve, configurações passivas, baixo consumo de energia e alta sensibilidade (AFSHARI, 2012). Eles também são capazes de monitorar o parâmetro estrutural desejado sem ter nenhum contato físico. Isto torna os sensores de fibra ótica um candidato apropriado para os sistemas SHM em aeronaves em meios de alta temperatura. No entanto, um grande número de componentes, como fontes de laser e moduladores de fase que acompanham as fibras, tornam a abordagem de detecção de fibra ótica complexa e dispendiosa (TURNER *et al.*, 1994). 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 estes sensores. Os materiais piezelétricos são amplamente utilizados em aplicações SHM. Eles são principalmente favoráveis nas práticas de SHM baseadas na impedância e nas ondas de lamb, como explicado mais adiante, devido ao fato de serem capazes de fazer o papel do sensor e do atuador ao mesmo tempo. Eles também podem ser individualmente anexados à superfície da estrutura no local a ser monitorado (BOLLER, 2001). Outras vantagens dos sensores piezelétricos podem ser listadas como alta sensibilidade, estabilidade em uma ampla gama de temperatura e *design* simples. Estes sensores foram aplicados com sucesso no monitoramento da integridade da estrutura e detecção de rupturas na fuselagem de grandes aeronaves (TURNER *et al.*, 1994).

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O trabalho foi dividido em capítulos de forma a tornar mais claro os assuntos a serem abordados nesta dissertação.

No Capítulo 1 foi apresentada uma visão geral sobre técnicas denominadas Monitoramento da Integridade Estrutural e um sumário dos capítulos.

No Capítulo 2 são explicados os conceitos fundamentais sobre ensaios não-destrutivos

e o método da Integridade Estrutural baseado na impedância eletromecânica que serão necessários para o desenvolvimento deste trabalho.

No Capítulo 3 apresenta-se o conceito básico de redes neurais os mapas auto-organizáveis (SOMs).

No Capítulo 4 expõem-se o procedimento experimental adotado neste trabalho.

No Capítulo 5 são exibidos os resultados encontrados com o experimento.

Finalmente, no Capítulo 6 apresenta-se a conclusão do trabalho bem como sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

MONITORAMENTO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL BASEADO NA IMPEDÂNCIA ELETROMECÂNICA

2.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados os aspectos teóricos referentes ao método de monitoramento da integridade estrutural baseado na impedância eletromecânica. Primeiramente é explicado o conceito de ensaio não-destrutivo e alguns dos principais utilizados atualmente. Em seguida, foi realizada uma pesquisa sobre os trabalhos nas últimas duas décadas que vem abordando o assunto SHM baseado na impedância eletromecânica. Após isto, se faz um breve resumo sobre materiais piezelétricos. Então, apresenta-se uma revisão bibliográfica do estado da arte sobre o método de SHM baseado na impedância eletromecânica e algumas de suas aplicações. Para finalizar o capítulo, são abordadas diferentes métricas de danos propostas na literatura para quantificar os danos presentes nas estruturas submetidas ao método de SHM baseado na impedância eletromecânica.

2.2 Ensaios não-destrutivos

São denominados de ensaios não-destrutivos todos os métodos de avaliação da integridade estrutural que preservam as características primárias da estrutura após sua realização (BRAY; MCBRIDE, 1992). De modo geral, depara-se na indústria com inúmeras variáveis de processo que podem gerar imperfeições nos produtos que são classificadas como descontinuidades ou defeitos. Na fase de concepção de um projeto normalmente estes tipos de ensaios são realizados para avaliar o comportamento da estrutura quando submetido a um

determinado esforço. Com isto pode-se prever onde o dano ocorrerá e se tomar ações para eliminar ou atenuar o mesmo (PALOMINO, 2008).

Em ambientes industriais é comum para determinados tipos de máquinas de acordo com sua classificação de importância (classificação ABC conforme o plano de manutenção), que estas sejam submetidas a ensaios não-destrutivos para a detecção de possíveis danos. Estes procedimentos ajudam a aumentar a confiabilidade e segurança do processo no que tange a integridade estrutural do equipamento e/ou a integridade física humana dos que trabalham no ambiente em que estas máquinas estão instaladas (BRAY; MCBRIDE, 1992).

Dentre os diversos tipos de ensaios não-destrutivos pode-se citar: inspeções visuais, testes radiográficos, ensaios por ultra-som, técnicas das ondas de Lamb, líquidos penetrantes, medições de propriedades dinâmicas, partículas magnéticas e o método de monitoramento baseado na impedância eletromecânica.

2.2.1 Inspeção visual

A inspeção visual foi um dos primeiros métodos de ensaio não-destrutivo aplicados pelo homem. É, com certeza, o ensaio mais barato, usado em qualquer tipo de indústria. Assim, a inspeção visual exige definição clara e precisa de critérios de aceitação e rejeição do produto que está sendo inspecionado. Requer ainda inspetores treinados e especializados, para cada tipo ou família de produtos. Na maioria dos casos, estes ensaios são utilizados para auxiliar na decisão de qual outro método ou técnica de ensaio não-destrutivo se aplicar para a detecção do defeito (PALOMINO, 2008). O resultado obtido por esta técnica é imediato e podem ser armazenados em planilha de dados ou documento padrão da empresa que estejam associadas a estrutura em análise. Um dos aspectos fundamentais é a observância minuciosa por parte do profissional que realiza esta inspeção para que detalhes que possam ser relevantes não escondam características que conduzam a uma falha (BRAY; MCBRIDE, 1992). Uma desvantagem neste processo está relacionado ao grau de experiência do inspetor e sua acuidade visual, e mostra-se mais variável ainda quando se comparam observações visuais num grupo de pessoas. Para minimizar estas variáveis, se faz necessária a padronização dos fatores que possam causar variações no processo, como a luminosidade e a distância ou o ângulo em que é feita a observação. Além disso, há de se providenciar um preparo para que a inspeção visual ocorra, como a limpeza do corpo a ser examinado, sendo assim, as superfícies das peças ou partes a serem examinadas devem ser cuidadosamente limpas, de tal forma que resíduos como graxas, óleos, poeira, oxidação etc. não impeçam a detecção de possíveis discontinuidades e/ou até de defeito (PALOMINO, 2008).

2.2.2 Testes radiográficos

Uma imagem radiográfica nada mais é que uma sombra bidimensional projetada ou uma distribuição de raios-x de diferentes intensidades que atravessam a estrutura em avaliação. Deste modo, a estrutura é capaz de diminuir tal tipo de radiação de acordo com a massa, forma e dimensão do defeito. A variação de quantidade de radiação absorvida indica a existência de uma falha interna ou descontinuidade no material. A radiação que resulta dessa investigação pode ser vista através de um filme fotográfico, em telas fluorescentes ou imagens digitalizadas. A geração dos raios-x é feita através do impacto de elétrons a uma velocidade elevada sobre um corpo de prova metálico, na maioria das vezes de tungstênio incorporado ao cobre, com isto, obtêm-se a identificação das falhas (BRAY; MCBRIDE, 1992; PALOMINO, 2008).

Uma das vantagens deste teste sobre outros ensaios não-destrutivos está na capacidade de visualização da descontinuidade de materiais sólidos. Estruturas com geometrias complexas que muitas vezes seriam difíceis de serem submetidas à técnica de ultra-som, tem maior viabilidade de passar pelo teste de radiografia, desde que ambos os lados da mesma estejam disponíveis (fácil acesso) para análise. Com o uso do equipamento correto, torna-se possível a avaliação em tempo real, a partir de diferentes ângulos, possibilitando uma visualização em 3D, através da tecnologia de tomografia computadorizada (BRAY; MCBRIDE, 1992; PALOMINO, 2008).

Todavia, existem algumas desvantagens quanto ao processo de teste radiográfico, como a necessidade de acesso a ambos os lados do corpo em análise, a necessidade das fissuras estarem quase paralelas ao feixe de raio-x para melhor identificação da falha, o custo da avaliação é elevado, a coleta de dados não é imediata e tem-se um gasto maior de tempo para a avaliação dos resultados. Vale salientar que algumas peças, impedem o uso deste procedimento devido à emissão de radiações (BRAY; MCBRIDE, 1992; PALOMINO, 2008).

2.2.3 Ensaios por ultrassom

Todos os sons produzidos em um local qualquer refletem-se nas paredes que constituem o ambiente, podendo ainda ser transmitidos a outros ambientes. Este fenômeno constitui o fundamento do ensaio por ultrassom de materiais. Portanto, os ensaios por ultrassom caracterizam-se pelo uso de ondas ultrassônicas de alta frequência, superiores aos que a audição humana está acostumada, apresentando uma frequência mínima de 20 kHz. Do mesmo modo como uma onda sonora reflete ao incidir num anteparo qualquer, a vibração ou onda ultrassônica também reflete quando percorre um meio elástico, desta forma, a vibração ou onda ultrassônica refletirá ao incidir numa descontinuidade ou falha interna de um meio considerado. Através de aparelhos especiais, é possível detectar as reflexões provenientes do interior da peça examinada, localizando e interpretando as descontinuidades. Os equipamentos utilizados para identificar as falhas operam entre uma faixa de 106 a 107 kHz.

A técnica da ultrassonografia é muito utilizada e apresenta um custo relativamente baixo, todavia há a desvantagem dela poder ser aplicada por um profissional bem qualificado que seja capaz de calibrar o equipamento perfeitamente para a obtenção de bons resultados para análise (BRAY; MCBRIDE, 1992; PALOMINO, 2008; ANDREUCCI, 2011).

O teste ultrassônico de materiais é realizado por meio do uso de ondas mecânicas ou acústicas acopladas no meio em inspeção, diferentemente da técnica radiográfica, que utiliza de ondas eletromagnéticas. O ensaio por ultrassom define-se por ser um método não-destrutivo com o objetivo de identificar discontinuidades internas, encontradas nos mais diferentes tipos ou formas de materiais ferrosos ou não ferrosos. Tais discontinuidades são determinadas pelo próprio processo de fabricação da peça ou por componentes, como por exemplo, bolhas de gás em fundidos, dupla laminação em laminados, micro-trincas em forjados, escórias em uniões soldadas e muitos outros. Logo, o exame ultrassônico, assim como todo exame não destrutivo, visa diminuir o grau de incerteza na utilização de materiais ou peças de que tenham um alto grau de importância dentro de um sistema. O ensaio por ultrassom representa uma ferramenta indispensável para garantia da qualidade de peças de grandes espessuras, com geometria complexa de juntas soldadas e chapas. Sua aplicação está relacionada principalmente na indústria moderna, nas áreas de caldeiraria e estruturas marítimas. Em grande parte dos casos, os ensaios são aplicados em aços carbono e em menor porcentagem nos aços inoxidáveis (ANDREUCCI, 2011).

2.2.4 Técnicas das ondas de Lamb

As ondas de Lamb estão relacionadas aos modos de propagação das estruturas, sendo também conhecidas na literatura como ondas de placas, e tangem às perturbações elásticas que se propagam num material sólido (chapas, placas, etc.) com as interfaces ou contornos livres. A espessura do material deve ser da ordem de grandeza dos comprimentos de onda presentes. Nestas ondas, a movimentação da partícula ocorre tanto na direção de propagação quanto perpendicularmente ao comprimento do material (VIKTOROV, 1970; SIQUEIRA, 2000; FARIAS, 2006).

As ondas de Lamb são constituídas de superposições de ondas longitudinais e transversais em uma chapa fina e as características da propagação dependem intensamente das condições de contorno, tais como ângulo de incidência, forma de excitação, frequência central do transdutor, largura de banda e geometria do material. Os modos são denominados em função do movimento característico de suas partículas podendo ser simétricos ou assimétricos (FARIAS, 2006; PAVLAKOVIC; LOWE, 2001).

A técnica possibilita identificar possíveis defeitos presentes em uma estrutura esbelta. As ondas de Lamb são capazes de viajar por longas distâncias, até mesmo em corpos com uma grande taxa de atenuação, como por exemplo os compostos de fibra de carbono. Um outro ponto é que elas têm uma alta suscetibilidade de interferência no caminho de propa-

gação, como por exemplo, uma falha. Logo, essas ondas permitem que a área de análise seja rapidamente examinada, tendo a possibilidade de detecção de falhas tanto internas como superficiais (PALOMINO, 2008; RAGHAVAN; CESNIK, 2005).

Segundo Palomino (2008), o método das ondas de Lamb possuem as seguintes características: (1) possibilidade de analisar grandes estruturas, (2) capacidade de analisar estrutura de uma área seccionada, (3) monitoramento em projetos complexos e de alto custo, (4) boa sensibilidade a múltiplos defeitos com alta precisão de identificação e (5) baixo consumo de energia.

2.2.5 Líquidos penetrantes

O ensaio por líquidos penetrantes, é utilizado para detectar discontinuidades superficiais em estruturas tais como trincas, poros, dobras, etc., que não sejam visíveis a olho nu. É muito usado em peças de metais não ferrosos e também é utilizado para outros tipos de materiais sólidos, como metais ferrosos, cerâmicas vitrificadas, vidros, plásticos e outros que não sejam porosos ou com superfície muito grosseira (PALOMINO, 2008; ANDREUCCI, 2003).

O ensaio consiste em aplicar um líquido penetrante com características especiais sobre a superfície a ser analisada e após um tempo de reação, aplica-se um líquido revelador que possibilita a identificação da falha. Para a execução do método, seis passos principais devem ser seguidos, a saber: (1) limpeza da superfície, (2) aplicação do líquido penetrante, (3) remoção do excesso do líquido, (4) aplicação do revelador, (5) análise e inspeção da descontinuidade e (6) limpeza final da superfície após finalização do teste (BRAY; MCBRIDE, 1992; PALOMINO, 2008).

Pode-se dizer que a principal vantagem deste método é sua simplicidade de aplicação e de interpretar seus resultados, o treinamento operacional é simples e requer pouco tempo do operador, não há limitações quanto ao tamanho e forma das peças a serem ensaiadas, nem quanto ao tipo de material, o ensaio pode revelar descontinuidades extremamente finas, da ordem de 0,001 mm de largura, que são totalmente imperceptíveis a olho nu.

Algumas desvantagens para este processo é que ensaio só detecta descontinuidades superficiais, já que o líquido tem de penetrar na mesma. Por esta razão, a descontinuidade não pode estar preenchida com qualquer material estranho; a superfície do material a ser examinada não pode ser porosa ou absorvente, já que não seria possível remover totalmente o excesso de do líquido penetrante, e isso iria mascarar os resultados. Ainda, o ensaio pode se tornar inviável em estruturas de geometria complexas, que necessitam de absoluta limpeza após o ensaio, como é o caso de peças para a indústria alimentícia, farmacêutica ou hospitalar (PALOMINO, 2008; ANDREUCCI, 2003).

2.2.6 Medições de propriedades dinâmicas

Alguns métodos de reconhecimento de propriedades dinâmicas podem ser utilizados para a análise não destrutiva de sistemas estruturais. Estes ensaios são realizados através de uma vibração forçada na estrutura que está em análise, sendo que as resposta dinâmicas do sistema devem ser observadas. Normalmente, são identificadas duas características neste processo: a taxa de amortecimento ou atenuação da estrutura e as frequências naturais do sistema. As respostas provenientes deste ensaio podem ser analisadas com algum critério de identificação do dano. De forma geral, pode-se dizer que as identificações dos parâmetros de um sistema bem como suas alterações mais significativas podem ser obtidas através da medição de suas propriedades dinâmicas (BRAY; MCBRIDE, 1992; PALOMINO, 2008).

2.2.7 Partículas magnéticas

O ensaio por partículas magnéticas é largamente utilizado nas indústrias para detectar descontinuidades superficiais e sub-superficiais, até aproximadamente 3 milímetros de profundidade, em materiais ferromagnéticos. Pode ser aplicado tanto em peças acabadas quanto em semi-acabadas e durante as etapas de fabricação (PALOMINO, 2008).

Este ensaio consiste em submeter uma estrutura, ou parte dela, a um campo magnético. Na região magnetizada da peça as descontinuidades existentes irão causar um campo de fuga do fluxo magnético. A aplicação das partículas ferromagnéticas provoca a aglomeração destas nos campos de fuga, uma vez que serão por eles atraídas devido ao surgimento de pólos magnéticos. A aglomeração indicará o contorno do campo de fuga, fornecendo a visualização do formato e da extensão da descontinuidade (BRAY; MCBRIDE, 1992).

Segundo Bray e McBride (1992) a aplicação do ensaio deve obedecer a uma sequência básica que se compõe das seguintes etapas: (1) limpeza da superfície; (2) seleção do equipamento para magnetização e seleção das partículas ferromagnéticas; (3) planejamento do ensaio; (4) magnetização da peça; (5) aplicação das partículas; (6) eliminação do excesso de partículas da superfície; (7) observação das indicações e avaliação e registro dos resultados.

2.2.8 Método de monitoramento de danos baseado na impedância eletromecânica

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 de pequenos danos. 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 excita-

ções 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 monitoramento da integridade estrutural baseado em impedância (SHM) é possível através do monitoramento de alterações na impedância elétrica medida e de alta frequência de pastilhas piezocerâmicas pequenas e auto-sensíveis (PZT) (LIANG; SUN; ROGERS, 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, 1996a). 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 auto-alimentados (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 monitoramento da integridade estrutural baseado em impedância baseia-se no pressuposto de que no acoplamento eletromecânico entre a estrutura hospedeira e a pastilha piezelétrica, todos os parâmetros, exceto a impedância mecânica da estrutura, permanecem inalterados durante a formação de danos na estrutura. 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 (PARK *et al.*, 1999).

Segundo Palomino (2008), o conceito básico do monitoramento da integridade estrutural baseado na impedância eletromecânica está relacionado com o monitoramento da variação eletromecânica da estrutura, causada pela presença da falha ou dano, por meio da utilização de pastilhas de material piezoelétrico acopladas na superfície do corpo ou incorporado nele. Nestas pastilhas é medida a impedância elétrica que está diretamente relacionada com a impedância mecânica da estrutura. A partir da variação do sinal de impedância medidos pode-se concluir a presença ou não do dano, considerando com hipótese a manu-

tenção da integridade estrutural das pastilhas de material piezoelétrico.

Este método de SHM será abordado com maior profundidade no Capítulo 2 já que é o tema central desta dissertação.

2.3 Algumas Aplicações de SHM Baseado na Impedância Eletromecânica

Nas últimas décadas o interesse pelo estudo do monitoramento da integridade estrutural baseado na impedância eletromecânica vem demonstrando crescimento, conforme pode se observar na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Alguns trabalhos desenvolvidos nas duas últimas décadas relacionados ao estudo SHM baseado na impedância eletromecânica.

Autor	Ano	Título do Trabalho
Park, Cudney e Inman (1999b)	1999	Impedance-Based Health Monitoring Technique for Massive Structures and High-Temperature Structures
Peairs (2006)	2006	High Frequency Modeling and Experimental Analysis for Implementation of Impedance-based Structural Health Monitoring
Park <i>et al.</i> (2008)	2008	Electro-Mechanical Impedance-Based Wireless Structural Health Monitoring Using PCA-Data Compression and K-means Clustering Algorithms
Moura Júnior (2008)	2008	Uma Contribuição aos Sistemas de Monitoramento de Integridade Estrutural Aplicada a Estruturas Aeronáuticas e Espaciais
Liu e Paurobally (2009)	2009	Robust Damage Metric in Terms of Magnitude and Phase for Impedance-based Structural Health Monitoring. Structural Health Monitoring
Baptista, Vieira Filho e Inman (2011)	2011	Sizing PZT Transducers in Impedance-Based Structural Health Monitoring
Min <i>et al.</i> (2012)	2012	Impedance-based structural health monitoring incorporating neural network technique for identification of damage type and severity
Afshari (2012)	2012	Vibration and Impedance based Structural Health Monitoring Applications and Thermal Effects
Jung <i>et al.</i> (2014)	2014	Relative baseline features for impedance-based structural health monitoring
Palomino, Steffen Junior e Finzi Neto (2014)	2014	Probabilistic Neural Network and Fuzzy Cluster Analysis Methods Applied to Impedance-Based SHM for Damage Classification

Fonte: o autor.

No trabalho desenvolvido por Park, Cudney e Inman (1999b), o princípio básico por trás desta técnica é usar a excitação estrutural de alta frequência (tipicamente maior que 30 kHz) através do sensor / atuador PZT ligado à superfície para detectar mudanças na impedância do ponto estrutural devido à presença de danos. Para tal, dois exemplos foram estudados. Para o primeiro, foi investigada a possibilidade de implementar a técnica de monitoramento da integridade estrutural baseada em impedância para detectar danos em estruturas maciças e densas. O segundo exemplo inclui a implementação desta técnica nas aplicações de alta temperatura. Através das investigações experimentais, a aplicabilidade da técnica em monitoramento da integridade estrutural baseada na impedância eletromecânica

nica de uma aplicação tão extrema foi verificada, e algumas questões práticas precisam ser resolvidas. Os dados coletados dos testes provaram sem dúvida a capacidade desta tecnologia para detectar danos existentes.

A pesquisa apresentada por [Peairs \(2006\)](#) mostra um modelo que foi desenvolvido com base na análise de circuito do circuito de baixo custo para o SHM baseado em impedância em combinação com elementos espectrais. Uma modificação da métrica de danos RMSD também foi proposta que é essencialmente a soma quadrada da estatística Z para cada ponto de frequência.

O trabalho desenvolvido por [Park et al. \(2008\)](#) apresenta um método prático para um monitoramento da integridade estrutural sem fio baseado na impedância eletromecânica, que incorpora a compactação de dados baseada na análise de componentes principais (ACP) e o reconhecimento de padrões baseado em *cluster* em *k-means*. Um sistema de sensor bordo integrado, que consiste em um circuito de medição de impedância miniaturizado (AD5933) e um *patch* auto-sensível de microfibras (MFC), é utilizado como *kit* de próxima geração do sistema SHM baseado em impedância eletromecânica. Os resultados de avaliação de danos baseados em RMSD usando a PCA mostraram capacidade de detecção de danos mais significativa do que os resultados RMSD obtidos a partir dos dados de impedância bruta sem o pré-processamento ACP. Além disso, um algoritmo de agrupamento *k-means* usando apenas dois componentes principais como características sensíveis a danos mostrou um resultado de identificação de danos muito bem sucedido.

O trabalho de [Moura Júnior \(2008\)](#) apresenta estudos para aplicações em estruturas mecânicas simples, metodologia de acoplamento de tecnologias *web* para o monitoramento online de estruturas e depósito de informações via banco de dados, além da avaliação e proposta de implantação de técnicas recentes de SHM (Ondas de Lamb e Impedância Eletromecânica). Os estudos partiram de uma proposta experimental, utilizando-se técnicas de inovação, métodos de inteligência artificial, análise de sinais, estatística e programação cliente-servidor via internet. Os resultados alcançados comprovam o grande potencial de uso destas técnicas de SHM em conjunto com metodologias matemáticas e computacionais já consagradas.

O trabalho de [Liu e Paurobally \(2009\)](#), aborda vários índices de danos construídos por partes reais e imaginárias ou a magnitude e a fase. Ele teoricamente deduziu e concluiu que o índice de danos em termos de mudanças na parte real não é de fato um índice corretamente definido e é fisicamente obscuro. Por outro lado, os índices em termos de mudança de magnitude e fase mostraram ser fisicamente claro e devidamente definido. O resultado experimental demonstrou que o índice de danos em termos de parte real foi amplamente influenciado pela fase, enquanto toda impedância complexa ofereceu uma métrica de danos otimizada e robusta.

O estudo desenvolvido por [Baptista, Vieira Filho e Inman \(2011\)](#), faz análise experi-

mental e teórica sobre o tamanho correto do PZT utilizado em sistemas de SHM que utilizam a técnica de impedância eletromecânica. As análises teóricas e experimentais mostram que a sensibilidade do sistema SHM de detecção de danos pode ser otimizada se os transdutores são corretamente dimensionados de acordo com o processo proposto. A pastilha deve ser pequena para garantir baixa capacitância estática e alta amplitude na impedância elétrica, o que garante bons resultados para os índices RMSD e CCD. Se a impedância mecânica da estrutura hospedeira é elevada em relação à impedância mecânica do transdutor, o aumento do tamanho do sensor melhora a sensibilidade para a detecção de danos, principalmente se o índice CCD é utilizado.

[Min et al. \(2012\)](#), propõe uma inovadora ferramenta de análise de padrões baseada em rede neural para identificar intervalos de frequência sensíveis a danos de forma autônoma e para fornecer informações detalhadas, como o tipo de dano e a gravidade. O algoritmo baseado em rede neural proposto foi incorporado um sensor de impedância sem fio para detectar danos reais em uma ponte em escala completa. A abordagem proposta que incorpora um nó de sensor de impedância sem fio foi usada para avaliar o tipo de dano e a severidade em casos multi-tipo e danos estruturais múltiplos. O desempenho da abordagem baseada na rede neural proposta foi validado em todas as identificações de estragos de parafusos soltos e entalhes em um feixe de alumínio articulado por parafusos e uma estrutura de tubo em escala laboratorial.

[Afshari \(2012\)](#), tem como objetivo principal de seu trabalho compreender e modelar como as cargas térmicas e as mudanças na temperatura ambiente influenciam os procedimentos de SHM de impedância eletromecânica e vibração usados para detectar rachaduras nas estruturas. Foi construído um modelo analítico representando a presença da rachadura nas estruturas do feixe e como essa presença afeta o comportamento dinâmico do feixe. A pesquisa resultou na descoberta e compreensão dos efeitos de temperatura nas metodologias SHM e adicionou uma base científica para prever falsos positivos nas aplicações.

[Jung et al. \(2014\)](#), descrevem duas novas ferramentas de processamento de sinal para o método de impedância para melhorar a capacidade de detecção de danos e para reduzir a quantidade de dados a processar no monitoramento da integridade estrutural. A primeira abordagem consiste em correlacionar instantaneamente os dados de impedância entre diferentes conjuntos de sensores, em oposição a ser correlacionada com dados de linha de base pré-armazenados. A segunda abordagem utiliza um parâmetro pré-definido de dados de impedância para estabelecer uma linha de base generalizada para monitoramento de juntas. Os resultados dos testes experimentais confirmam a capacidade dos conceitos de linha de base relativa e generalizada na redução da quantidade de dados e na identificação de danos estruturais.

A pesquisa realizada por [Palomino, Steffen Junior e Finzi Neto \(2014\)](#), utiliza da rede neural probabilística e os métodos de análise de agrupamento difusa para identificação, lo-

calização e classificação de dois tipos de danos, denominados, fissuras e perdas de rebites. Os resultados mostram que a rede neural probabilística e as metodologias de análise de linguagem diferencial são úteis para a identificação, a localização e a classificação de seus tipos de danos.

2.4 Fundamentos de Piezoelectricidade

O efeito da piezoelectricidade foi descoberto no final do século XIX pelos irmãos Curie quando descobriram que alguns materiais produzem uma resposta elétrica quando submetidos à tensão mecânica. A geração de cargas nesses materiais devido a uma deformação mecânica aplicada é chamada de efeito piezelétrico direto. Um ano após a descoberta do efeito piezelétrico direto, o efeito inverso foi deduzido matematicamente por Gabriel Lippmann. O efeito inverso (oposto) foi verificado experimentalmente pelos irmãos Curie ([AFSHARI, 2012](#)).

Os transdutores piezelétricos são largamente utilizados em diversos tipos de dispositivos eletrônicos por terem a vantagem de serem de baixo custo, com dimensões reduzidas e baixo consumo de energia, os que o tornam ótimos para utilização em equipamentos sem fio e alimentados por uma fonte geradora de energia. Há algumas décadas esses transdutores tem sido utilizados na identificação de falhas estruturais devido ao seu efeito piezelétrico que possibilita um acoplamento eletromecânico com a estrutura monitorada e, logo, permite analisar as condições mecânicas da estrutura a partir das propriedades elétricas do transdutor ([BAPTISTA, 2010](#)).

2.4.1 Materiais piezelétricos

São chamados de materiais piezelétricos aqueles materiais que apresentam a propriedade de alterar suas dimensões em consequência da aplicação de uma voltagem. Estes materiais também apresentam o efeito inverso, isto é, quando sujeito a uma deformação mecânica, apresentam uma mudança em suas propriedades elétricas. Em consequência disso, estes materiais podem ser utilizados com atuadores, sensores ou os dois ao mesmo tempo. O material mais popular dentre os materiais piezelétricos é o titanato-zirconato de chumbo, cuja a sigla do inglês é PZT ([PALOMINO, 2008](#)).

Os sensores e atuadores piezelétricos são alcançados através da polarização do material que, submetido a campos elétricos elevados a altas temperaturas adquire as características piezelétricas ([BANKS; SMITH; WANG, 1996](#)). Quando o material piezelétrico é utilizado a uma temperatura inferior a de Curie e sob a aplicação de um pequeno campo elétrico, percebe-se uma expansão macroscópica ao longo do eixo de polarização e uma contração perpendicular a esta ([PALOMINO, 2008](#)). Entretanto, quando submetidos a altas tempera-

turas, acima da temperatura de Curie, o material é despolarizado (BANKS; SMITH; WANG, 1996).

A relação entre o campo aplicado e a deformação resultante é quantificada pelo módulo piezelétrico d_{ij} , onde i é a direção do campo elétrico aplicado e j é a direção resultante da deformação normal, v a voltagem aplicada na direção i e th a espessura do PZT, como mostra a eq. (2.1):

$$\epsilon_{ij} = d_{ij} \frac{v}{th} \quad (2.1)$$

Conforme o preceito termodinâmico, é possível evidenciar as relações constitutivas como procedentes da energia total do sistema, ou seja, compreender as relações fenomenológicas dos efeitos piezelétricos diretos ou inversos (BANKS; SMITH; WANG, 1996). Todavia, mesmo que a resposta a aplicações estruturais típicas seja muito próxima da linear, ao se operar com níveis de excitação elevados, os elementos piezelétricos demonstram um efeito de histerese (não linear). Deste modo, os trabalhos que geralmente são desenvolvidos utilizando estes elementos são restritos as leis lineares formuladas por Voigt em 1910 (BANKS; SMITH; WANG, 1996), conforme exibidas nas eq. (2.2) e (2.3) que representam o efeito direto e inverso respectivamente.

$$D_m = \epsilon_{mn}^T d_{mkl} \sigma_{kl} \quad (2.2)$$

$$e_{ij} = S_{ijkl} \sigma_{kl} d_{mij} E_m \quad (2.3)$$

onde, D e E representam, respectivamente, o deslocamento e o campo elétrico, ϵ e d representam o tensor dielétrico do material e o tensor de tensão piezelétrico, enquanto a deformação no material é relacionada a tensão σ através da deformação S . Os índices subscritos decorrem da notação indicial.

Vale salientar que é usado o efeito direto do dispositivo ao utilizá-lo como sensor, já que o efeito inverso é responsável pela descrição do dispositivo como atuador. Dessa forma, é possível notar a capacidade destes materiais para aplicações de controle de identificação de falhas, por meio de um único componente, além de sua insensibilidade a variações de temperatura (abaixo da temperatura de Curie) (BANKS; SMITH; WANG, 1996).

Vários tipos de materiais demonstram propriedades piezelétricas. Dentre os mais populares, pode-se citar:

- As cerâmicas de PZT, por se tratar de um material cerâmico, sua rigidez é geralmente superior ao da estrutura na qual está inserido, resultando assim numa conversão eletromecânica de grande eficiência, tornando-se eficientes em aplicações como atua-

dores (BANKS; SMITH; WANG, 1996). O PZT também é sugerido com atuador auto-sensível, particularmente no controle e identificação de danos (BANKS; SMITH; WANG, 1996).

- Os polímeros piezelétricos, como o PVDF (fluorido polivinilideno), tem seus coeficientes de acoplamento eletromecânico bem menores do que os das pastilhas de PZT, sendo assim, seu uso como atuador não é adequado. Contudo, o potencial dielétrico dos PVDFs é cerca de vinte vezes superior aos dos PZTs, podendo serem expostos a campos elétricos muito maiores (BANKS; SMITH; WANG, 1996). Geralmente a utilização do PDVF é como sensor, lembrando ainda que seu custo é bem menor quando comparado com as pastilhas de PZT.

Pode-se observar que algumas vantagens dos elementos piezelétricos, são: respostas lineares em baixos níveis de excitação, baixo peso e grande flexibilidade como sensores e atuadores, além de exibirem uma resposta em ampla banda de frequência. Quanto as possíveis desvantagens destes elementos podemos citar a histerese observada para campos elétricos elevados, a dificuldade de fabricação dos PZTs devido suas características de material cerâmico, coeficientes de acoplamento eletromecânico baixos para os filmes de PVDF e, por fim, o decréscimo das características de polarização dos elementos piezelétricos ao longo do tempo, reduzindo assim o seu desempenho (MOURA JÚNIOR, 2008).

2.5 Conceitos de Impedância Elétrica e Mecânica

2.5.1 Impedância mecânica

A impedância mecânica é descrita pela razão entre a força aplicada num ponto e a velocidade resultante medida no mesmo ponto, conforme a eq. (2.4) (MASSOUD, 1985).

$$Z_m = \frac{F}{v} \quad (2.4)$$

onde Z_m é a impedância mecânica, F é Força e v é a velocidade. A impedância mecânica, após passagem ao domínio de Frequência, é uma quantidade complexa e expressa o quanto a estrutura resiste ao movimento quando se aplica uma força, sendo o recíproco da mobilidade (ou admitância). A impedância mecânica de uma estrutura varia com a frequência. Nas frequências de ressonância, a impedância é baixa, o que significa que menos força é necessária para movimentar uma estrutura em uma dada velocidade. Nos sistemas mecânicos, três grandezas básicas são relacionadas com a impedância mecânica (PALOMINO, 2008):

- Amortecimento Mecânico (R_m): está associado à parte real da impedância, sendo responsável por dissipar a potência mecânica entregue ao sistema. Um dispositivo me-

cânico se comporta como uma resistência mecânica quando, ao ser acionado por uma força, esta é proporcional à velocidade que o dispositivo adquire, eq. (2.5).

$$F(t) = R_m v(t) \quad (2.5)$$

No Sistema Internacional de Unidades, o amortecimento mecânico é dado por Ns/m .

- Massa Mecânica (M_m): está associada com a parte imaginária positiva da impedância complexa. Um dispositivo mecânico comporta-se como uma massa mecânica quando, ao ser acionado por uma força, resulta uma aceleração diretamente proporcional à força, eq. (2.6).

$$F(t) = M_m \frac{dv(t)}{dt} \quad (2.6)$$

Sua unidade é o Kg.

- Flexibilidade Mecânica (C_m): está relacionada com a parte imaginária negativa da impedância complexa. Um dispositivo mecânico se comporta como uma flexibilidade mecânica quando, ao ser acionado por uma força, se desloca proporcionalmente à força, eq. (2.7).

$$x(t) = C_m F(t) \quad (2.7)$$

Na maioria dos casos, entretanto, prefere-se não trabalhar com a flexibilidade, ou seja, usa-se seu inverso, a rigidez. Assim, define-se a rigidez como o inverso da flexibilidade mecânica, eq. (2.8).

$$K = \frac{1}{C_m} \quad (2.8)$$

2.5.2 Impedância elétrica

É denominada como impedância elétrica a oposição que um circuito ou componente eletroeletrônico oferece à passagem da corrente alternada, conforme expressa na eq. (2.9)

$$Z = \frac{V}{I} \quad (2.9)$$

onde Z é a impedância elétrica, V a voltagem e I a corrente.

Trata-se de uma grandeza complexa, e, portanto, dividida em duas partes: resistência (parte real) e reatância (parte imaginária) elétrica. A resistência nos circuitos de corrente alternada se comporta de maneira similar nos circuitos de corrente contínua e é expressa como um valor ôhmico positivo. Já a reatância pode ser indutiva, ou seja, é dada por um valor ôhmico não-negativo, ou capacitiva, representada por um valor ôhmico não-positivo (GIBILISCO, 2002).

A resistência é um valor escalar. Assim, para um circuito de corrente contínua, a corrente diminui conforme a resistência aumenta, obedecendo a conhecida Lei de Ohm. O mesmo comportamento é observado num circuito de corrente alternada. Já para uma indutância ou capacitância, a situação não é tão simples quanto à observada para a resistência.

A reatância indutiva X_L de um indutor pode variar desde zero, para o caso de um curto circuito, para uma bobina pequena, chegando a kilohms ou megaohms conforme se vê nas grandes bobinas. Como resistência pura, a reatância indutiva afeta a corrente em um circuito de corrente alternada. Porém, não sendo uma resistência pura, a reatância muda de acordo com a frequência. Isto faz com que se modifique a forma pela qual a corrente flui em relação à tensão. Para uma fonte de corrente alternada, se a frequência é dada por ω em hertz e a indutância da bobina é L em Henrys, então a reatância indutiva X_L em ohms é dada pela eq. (2.10):

$$X_L = 2\pi\omega L \quad (2.10)$$

A reatância indutiva tem sua contrapartida na forma de reatância capacitiva. Seja um capacitor alimentado por uma fonte de corrente alternada, a frequência da corrente alternada varia de alguns Hertz até muitos mega-hertz. Inicialmente, a tensão entre as duas placas do capacitor irá acompanhar quase similarmente a reversão de polaridade condicionada pela corrente alternada. Ao elevar-se a frequência, a carga não ficará bem estabelecida em cada ciclo. Quando a frequência tornar-se muito alta, o conjunto das placas irá se comportar como um curto-circuito (RABELO, 2014).

Portanto, a oposição oferecida pelas duas placas para a corrente alternada é denominada por reatância capacitiva, X_C , que irá variar com a frequência. Assim como a reatância indutiva e a resistência, esta também possui sua escala em ohms. Todavia, os valores são negativos ao invés de positivos e o valor de X_C aumenta de modo negativo conforme a frequência diminui.

Muitas vezes os valores da reatância capacitiva são descritos de forma absoluta, retirando-se o sinal negativo. Em cálculos de impedância complexa, entretanto, este valor é sempre considerado uma grandeza não-positiva, evitando confusão com a reatância indutiva.

Assim, a reatância capacitiva é possível de ser considerada como uma imagem espelhada da reatância indutiva, ou seja, é a sua extensão em valores negativos. Para uma dada

fonte de corrente alternada de frequência f em Hertz, com um capacitor C expresso em Farads, a reatância capacitiva X_C em ohms é obtida pela eq. (2.11):

$$X_C = \frac{1}{2\pi\omega C} \quad (2.11)$$

Finalmente, quando a reatância é nula, a impedância é igual a resistência ôhmica e o circuito é dito como sendo puramente resistivo.

2.6 Método de Integridade Estrutural Baseado em Impedância Eletromecânica

A técnica de monitoramento de integridade estrutural baseado na impedância é considerada uma ferramenta adequada para identificação de falhas estruturais em tempo real e é considerado como um método novo de avaliação não destrutiva (PARK *et al.*, 2003).

Segundo Palomino (2008), a concepção básica deste método é o monitoramento da variação da impedância mecânica da estrutura causada pela presença de danos. Os transdutores piezelétricos são utilizados para captar alterações em propriedades dinâmicas estruturais (rigidez, amortecimento e massa). A técnica do monitoramento da integridade estrutural baseada na impedância eletromecânica, se beneficia de ambos os efeitos piezelétricos, direto e inverso (sensor e atuador), simultaneamente obtendo assim uma assinatura de impedância para a estrutura. Neste caso, quando uma pastilha de PZT colada (ou incorporada) a uma estrutura é acionada por um campo elétrico alternado com frequência de excitação elevada, uma pequena deformação é produzida na pastilha e na estrutura monitorada. A reação desta região às vibrações mecânicas de alta frequência é transmitida de volta à pastilha de PZT na forma de uma resposta elétrica. Quando um dano causa uma mudança na resposta dinâmica (alteração de fase, frequência ou magnitude), isto se manifesta na resposta elétrica do PZT. De forma geral, a dimensão do dano detectável em um material é inversamente proporcional à faixa de frequência do sinal adquirido. Logo, esta técnica é recomendada para detecção de danos incipientes (PARK; INMAN, 2005).

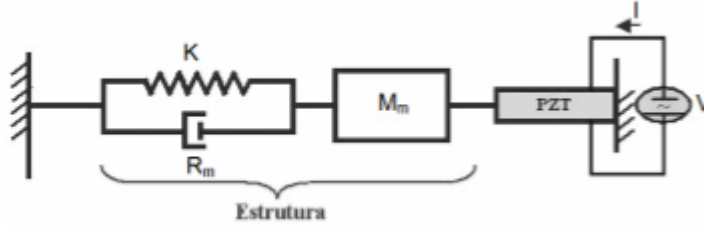
O uso do mesmo elemento como sensor e atuador não somente reduz o número de componentes, assim como a quantidade de cabos associados a cada um (PARK *et al.*, 2003).

O desenvolvimento teórico que propôs o uso da impedância como técnica para monitoramento estrutural foi inicialmente proposto por Liang, Sun e Rogers (1994) e posteriormente ampliado por Chaudhry *et al.* (1995), Chaudhry *et al.* (1996), Sun *et al.* (1995), Park *et al.* (1999), Park, Cudney e Inman (1999b), Park, Cudney e Inman (2000a), Park, Cudney e Inman (2000b), Park, Cudney e Inman (2001), Park *et al.* (2003), Giurgiutiu e Zagari (2000), Giurgiutiu e Zagari (2002), Giurgiutiu, Zagari e Bao (2002), Giurgiutiu *et al.* (2003), Soh *et al.* (2000), Bhalla *et al.* (2002), Bhalla, Naidu e Soh (2003), Moura Junior e Steffen Junior (2004),

Peairs (2006), Moura Júnior (2008), Raghavan e Cesnik (2008), Liu e Paurobally (2009), Grisso e Inman (2010), Baptista, Vieira Filho e Inman (2011), RABELO *et al.* (2015).

O modelo eletromecânico que quantifica e explica o processo de medição para um sistema de 1 grau de liberdade, é retratado na Figura 2.1.

Figura 2.1 – Modelo eletromecânico do método de integridade estrutural baseado em impedância eletromecânica.



Fonte: Adaptado de Moura Júnior (2008).

Supondo-se que as propriedades da pastilha PZT não variem com o tempo, a eq. (2.12) mostra 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).

Com base nos sistemas da Figura 2.1, Liang, Sun e Rogers (1994) comprovaram que a admitância pode ser expressa como uma função combinada da impedância mecânica do atuador PZT, $Z_a(\omega)$:

$$Y(\omega) = i\omega a \left(\bar{\epsilon}_{33}^T (1 - i\delta) - \frac{Z_s(\omega)}{Z_s(\omega) + Z_a(\omega)} d_{3x}^2 \hat{Y}_{xx}^E \right) \quad (2.12)$$

onde Y 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.

Deve-se salientar que a admitância elétrica é basicamente capacitiva, e sua parte imaginária é o fator dominante. Este fator imaginário tem mais sensibilidade as variações de temperatura que a parte real. Logo, a parte real do sinal é mais utilizada na maioria das aplicações (RAJU, 1997).

A sensibilidade técnica em detectar danos estruturais está relacionada com a banda de frequência selecionada. Um dano muito pequeno na estrutura não causa mudanças significativas nas propriedades da estrutura (rigidez, massa e amortecimento). Logo, funda-

mental um comprimento de onda de excitação suficientemente pequeno de forma que consiga identificar o dano (PALOMINO, 2008).

Conforme transcrito na literatura, a faixa de frequência tipicamente utilizada para a técnica de impedância está entre 30kHz a 250kHz. Contudo, Moura Junior e Steffen Junior (2004) descrevem um procedimento estatístico que pode ser usado para obtenção das melhores configurações para os ensaios de impedância eletromecânica.

Segundo Sun *et al.* (1995), para faixas de frequências elevadas, em torno de (150kHz) são favoráveis para se detectar a localização, enquanto em frequências mais baixas (70kHz), detectam-se apenas as áreas onde se encontram os danos. Quando fala-se em estruturas mais leves é recomendado evitar a ressonância da pastilha do PZT no momento de selecionar a faixa da frequência, isso porque a magnitude da resposta é muito superior, quando comparada com a da ressonância da estrutura (PARK *et al.*, 2003).

A grande maioria dos trabalhos na área de impedância tem utilizado a parte real da admitância, porém Bhalla, Naidu e Soh (2003) introduzem o conceito de assinatura ativa, já que se é possível utilizar a componente interativa direta do sinal após filtrar a componente inerte. Tendo as propriedades do material do PZT conhecidas, pode-se reescrever a eq. (2.12) na forma da eq. (2.13).

$$Y = i\omega a \bar{e}_{33}^T - i\omega a \frac{Z_s(\omega)}{Z_s(\omega) + Z_a(\omega)} d_{3x}^2 \hat{Y}_{xx}^E = Y_p + Y_A \quad (2.13)$$

onde o termo Y_p (eq. (2.14)) denota a parte passiva da admitância (representa a contribuição do PZT) e o termo Y_A (eq. (2.15)) representa a parte ativa (interação PZT-estrutura).

$$Y_p = i\omega a \bar{e}_{33}^T \quad (2.14)$$

$$Y_a = -i\omega a \frac{Z_s(\omega)}{Z_s(\omega) + Z_a(\omega)} d_{3x}^2 \hat{Y}_{xx}^E \quad (2.15)$$

Como o termo passivo ainda apresenta a parte real do sinal e o termo ativo contém a parte imaginária, isola-se o ativo da soma da eq. (2.12) para se trabalhar com ambas as partes para a identificação de falhas, conservando assim toda a informação das condições da estrutura (PARK *et al.*, 2003).

Segundo Park *et al.* (2003), quanto a região sensível para identificação de mudanças, para um simples PZT, o mesmo pode identificar uma falha localizada a distância (radial) de até 0,4 metros em estruturas de materiais compostos e de até 2 metros em estruturas de barra constituída de um único metal.

2.7 Métricas de Dano para o Método de Impedância Eletromecânica

Para se quantificar os danos presentes nas estruturas submetidas ao método de monitoramento de integridade estrutural baseada na impedância eletromecânica são adotadas diversas técnicas estatísticas também conhecidas como métricas de danos. Dentre elas destacam-se: o desvio percentual da média absoluta, a diferença quadrada entre os dois sinais, o desvio médio da raiz quadrada com suas variantes, o desvio do coeficiente de correlação e a diferença média quadrada (PALOMINO, 2008).

O objetivo geral da métrica de dano é quantificar a diferença entre as medições da impedância quando comparadas com os dados obtidos para a estrutura sem danos (baseline). O modelo estatístico mais empregado na literatura é o desvio médio da raiz quadrada, dada pela eq. (2.16)

$$RMSD = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{(Re(Z_{1,i}) - Re(Z_{2,i}))^2}{n} \right)} \quad (2.16)$$

onde, $Re(Z_{1,i})$ é a parte real da impedância da medição sem dano em uma frequência i , $Re(Z_{2,i})$ é a parte real da impedância numa frequência i para uma nova configuração da estrutura, e n é o número total de pontos frequências utilizados na comparação. O cálculo é realizado dentro de uma faixa de frequência previamente definida. Uma alternativa para esta métrica propõe-se substituir o denominador pela parte real da impedância da referência (estrutura sem dano), conforme descrita na eq. (2.17) (PEAIRS, 2006; GRISSE; INMAN, 2010).

$$RMSD1 = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{(Re(Z_{1,i}) - Re(Z_{2,i}))^2}{Re(Z_{1,i})^2} \right)} \quad (2.17)$$

A métrica de dano referente ao desvio do coeficiente de correlação é utilizada para interpretar e quantificar a informação contida em dois conjuntos de dados. Conforme escrita na eq. (2.18), observa-se que sua formulação matemática envolve a diferença entre um e o coeficiente de correlação entre uma medição e a referência (GIURGIUTIU; ZAGRAI, 2005).

$$CCD = 1 - CC \quad (2.18)$$

onde CCD é o desvio do coeficiente de correlação e CC é o coeficiente de correlação dado pela eq. (2.19):

$$CC = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(Re(Z_{1,i}) - Re(\bar{Z}_1))(Re(Z_{2,i}) - Re(\bar{Z}_2))}{S_{z_1} S_{z_2}} \quad (2.19)$$

sendo que S_{z_1} é o desvio padrão do sinal de impedância da referência e S_{z_2} é o desvio padrão do sinal de impedância a ser comparado. Quanto maior for diferença entre os sinais, menor será o valor de CC , que é utilizado para comparar e quantificar os sinais de admitância (NAIDU; SOH, 2004).

Outra métrica de dano utilizada para o método de impedância eletromecânica é a diferença média quadrada (RAJU, 1997), conforme eq. (2.20). Com o uso de métrica de dano, busca-se tirar o efeito das variações da amplitude devido a interferência no meio ambiente.

$$ASD = \sum_{i=1}^n [Re(Z_{1,i}) - (Re(Z_{2,i}) - \delta)]^2 \quad (2.20)$$

onde δ é a diferença das médias de cada um dos sinais, como mostra a eq. (2.21)

$$\delta = Re(\bar{Z}_1) - Re(\bar{Z}_2) \quad (2.21)$$

Outra métrica utilizada pelo método da impedância eletromecânica é o desvio percentual da media absoluta (TSENG; NAIDU, 2002), expressa na eq. (2.22).

$$MAPD = \sum_{i=1}^n \left| \frac{Re(Z_{1,i}) - Re(Z_{2,i})}{Re(Z_{1,i})} \right| \quad (2.22)$$

Como última métrica de dano neste tópico, apresenta-se a somatória da diferença média entre os sinais (PEAIRS, 2002). Esta métrica de dano não utiliza nenhuma relação entre valores, sendo expressa na eq. (2.23).

$$M = \sum_{i=1}^n (Re(Z_{1,i}) - Re(Z_{2,i}))^2 \quad (2.23)$$

No trabalho de Palomino (2008), foi realizado um estudo sistemático envolvendo as várias métricas de danos propostas pela literatura. Neste foram realizados ensaios numa placa de alumínio, onde os resultados mostraram que a métrica RMSD é a mais sensível quando utilizada no monitoramento da integridade estrutural baseado na técnica da impedância eletromecânica, sendo esta a escolhida.

Capítulo 3

MEMÓRIAS AUTOASSOCIATIVAS

3.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados os aspectos teóricos básicos referentes a uma técnica de redes neurais artificiais utilizada para a solução do problema deste trabalho. Primeiramente é apresentado o conceito fundamental de redes neurais. Em seguida, é apresentado o conceito sobre os mapas auto-organizáveis (SOM - *Self Organizing Maps*) de Kohonen. Após isso, se faz um breve resumo sobre a implementação do método em Matlab[®].

3.2 Redes Neurais Artificiais

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 RNAs é voltado para solucionar problemas reais, modelando sistemas por meio de circuitos (conexões) que possibilitam simular o sistema nervoso humano (GURNEY, 1997).

Segundo Krose e Smagt (1996), as RNAs podem ser mais adequadamente caracterizadas como "modelos computacionais" com propriedades particulares, como a capacidade de se adaptar ou aprender, para generalizar, ou para agrupar ou organizar dados, e qual operação é baseada no processamento paralelo.

Os modelos matemáticos utilizados nas RNAs são bem mais simples quando comparados com a complexidade das estruturas elementares das Redes Neurais Biológicas, indicando assim as dificuldades deparadas para se 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 RNA 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 RNAs 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 em 1943. Estes neurônios foram apresentados como modelos de neurônios biológicos e como componentes conceituais para circuitos que poderiam executar tarefas computacionais (KROSE; SMAGT, 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 do algoritmo de propagação de retorno do erro), e novos desenvolvimentos de hardware que aumentaram as capacidades de processamento (KROSE; SMAGT, 1996).

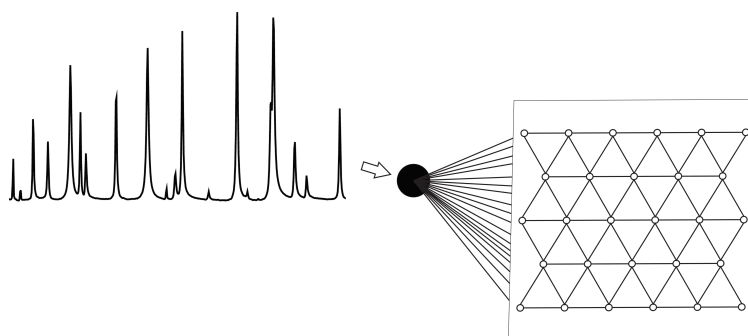
3.3 Redes de Kohonen

Um dos mais conhecidos e utilizados modelos de redes auto-organizadas ou não supervisionadas são os mapas auto-organizáveis (SOM-*Self Organizing Maps*), proposta por Teuvo Kohonen (KOHONEN, 1982; KOHONEN, 1984), conhecido como “Redes de Kohonen”. As redes de Kohonen tomam como base o comportamento cerebral onde predomina-se o treinamento não supervisionado (VALENÇA, 1995).

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*.

Logo, uma rede de Kohonen geralmente é uma grade de neurônios unidimensional ou bidimensional. Um exemplo de uma rede de Kohonen bidimensional pode ser visualizada na Figura 3.1.

Figura 3.1 – Rede de Kohonen.



Fonte: o autor.

Na Figura 3.1, é possível perceber as camadas conectadas por relações sinápticas: a camada de entrada e de saída. Cada círculo escuro (cheio) representa um neurônio de en-

trada no qual são apresentados os valores de entrada. Já os círculos brancos (vazios) apresenta um neurônio da camada de saída por onde os resultados são obtidos.

Através de um aprendizado competitivo baseado no uso de uma função objetivo que possibilite caracterizar o neurônio vencedor, a rede de Kohonen constrói um mapeamento topológico. Para definição do neurônio vencedor a métrica mais utilizada é a distância euclidiana entre os padrões de entrada e o conjunto de pesos do neurônio, expressa na eq. (3.1)

$$d_{xw} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (x_j - w_{ij})^2} \quad (3.1)$$

onde, d_{xw} é a distância euclidiana entre o conjunto de entrada e o conjuntos de pesos sinápticos, x_j são os padrões de entrada, w_{ij} são os pesos sinápticos que ligam as entradas aos neurônios da grade de saída e n é o número de entradas.

O propósito da adequação dos pesos em meio da fase de aprendizado das redes de Kohonen está destinado em minimizar a distância euclidiana, logo o neurônio vencedor será aquele que estiver na menor distância. Neste sentido, o processo competitivo pode ser realizado de duas formas: o neurônio vencedor leva tudo (*winner-take-all*) ou leva apenas parte (*winner-take-quota*) (VALENÇA, 1995).

Para o aprendizado do tipo o vencedor leva tudo, tem-se a eq. (3.2).

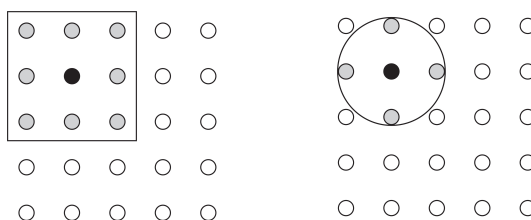
$$w_{ij}^v = w_{ij}^v(\text{antigo}) + \alpha \cdot (x_j - w_{ij}^v(\text{antigo})) \quad (3.2)$$

onde w_{ij}^v são os pesos sinápticos que ligam os padrões de entrada ao neurônio vencedor, x_j são os padrões de entrada e α é a taxa de aprendizagem.

Já para o aprendizado tipo vencedor leva parte, tanto o neurônio vencedor assim como sua vizinhança tem os pesos sinápticos ajustados.

Quanto as formas de se estabelecer a função de vizinhança, as mais comuns são o formato de vizinhança quadrado e circular (gaussiana), conforme Figura 3.2.

Figura 3.2 – Exemplos de região de vizinhança.



Fonte: Adaptado de Valença (1995).

Quando da utilização da função gaussiana, a vizinhança é dada conforme a eq. (3.3).

$$h_i^v(n) = \exp \left[\frac{d_i^v}{2\alpha^2(n)} \right] \quad (3.3)$$

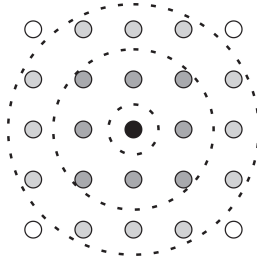
onde $h_i^v(n)$ é o valor da vizinhança entre um neurônio vizinho “ i ” e o neurônio vencedor “ v ”, d_i^v é a distância entre o neurônio vencedor “ v ” e o neurônio vizinho excitado cujos os pesos serão atualizados.

A expressão 3.4 mostra como é feito o ajuste dos pesos de todos os neurônios dentro da região de vizinhança:

$$w_{ij}^v(novo) = w_{ij}(antigo) + \alpha \cdot h_i^v \left(x_j - w_{ij}^v(antigo) \right) \quad (3.4)$$

No algoritmo competitivo a redução da região de vizinhança se dá pelo aumento do número de iterações, pois isto possibilita a organização do mapa topológico. Conforme Figura 3.3, observa-se um exemplo de redução da região de vizinhança durante o treinamento (VALENÇA, 1995).

Figura 3.3 – Redução da região de vizinhança.



Fonte: Adaptado de Valença (1995).

Para se obter a convergência de forma mais rápida, em geral a largura da função de vizinhança σ deve decrescer com o número de iterações, conforme mostra a eq. (3.5) (VALENÇA, 1995):

$$\sigma(n) = \sigma(0) \exp \left[-\frac{n}{\tau_1} \right] \quad (3.5)$$

onde $\sigma(n)$ é o valor da largura da função na iteração n , $\sigma(0)$ é um valor inicial para a largura da função e τ_1 é uma constante de tempo que diminui a medida que o número de iterações aumenta.

Ajustes cada vez mais finos se dão com o decrescimento da taxa de aprendizagem. Para isto, utiliza-se uma função exponencial similar ao do desvio padrão $\sigma(n)$, expressa na

eq. (3.6).

$$\alpha(n) = \alpha(0) \exp \left[-\frac{n}{\tau_2} \right] \quad (3.6)$$

onde, $\alpha(n)$ é a taxa de aprendizagem para a iteração n , $\alpha(0)$ é um valor inicial para a taxa de aprendizagem e τ_2 é uma constante de tempo que depende do número de iterações.

Assim, o algoritmo básico para os mapas auto-organizados de Kohonen é resumido conforme os seguintes passos (VALENÇA, 1995):

Passo 1: Inicializar – Estabelecer uma topologia para a rede e determinar o número de iterações.

- O conjunto de pesos iniciais w_{ij} é gerado aleatoriamente com valores pequenos;
- Atribuir um valor grande para a vizinhança de modo que inclua todas as unidades;
- Determinar um valor para a taxa de aprendizagem e para as constantes τ_1 e τ_2 .

Passo 2: Atribuição dos padrões de entrada.

- Competição – os valores dos padrões de entrada são apresentados e calcula-se a resposta dos neurônios de saída, conforme a eq. (3.1). Quem tiver a menor distância euclidiana será o vencedor.
- Cooperação – após escolhido o neurônio vencedor, calcula-se o valor da vizinhança topológica conforme expressa na eq. (3.3).

Passo 3: Ajuste dos pesos.

- O ajuste dos pesos para o neurônio vencedor e os demais de sua região são ajustados na direção do vetor dos padrões de entrada, conforme eq. (3.4).

$$w_{ij} = w_{ij}(\text{antigo}) + \alpha h_i^v (x_j - w_{ij}^v(\text{antigo})) \quad (3.7)$$

Passo 4: Cálculo dos novos valores da largura da função (eq. (3.5)) e taxa de aprendizagem (eq. (3.6)).

Passo 5: Testar a condição de parada.

Passo 6: Incrementar o número da iteração, retorna ao Passo 2 e se repete o algoritmo até que a condição de parada seja satisfeita.

Um critério comum utilizado para análise comparativa dos resultados da rede em relação ao nível de classificação e agrupamento desta é a distância de Hamming, que é o número de posições nas quais dois vetores de mesmo comprimento diferem entre si. Seu cálculo é realizado através da eq. (3.8):

$$Dist. Hamming = \sqrt{(m_i - x_i)^2} \quad (3.8)$$

onde, m é cada mapa da rede e x é o mapa que se está comparando.

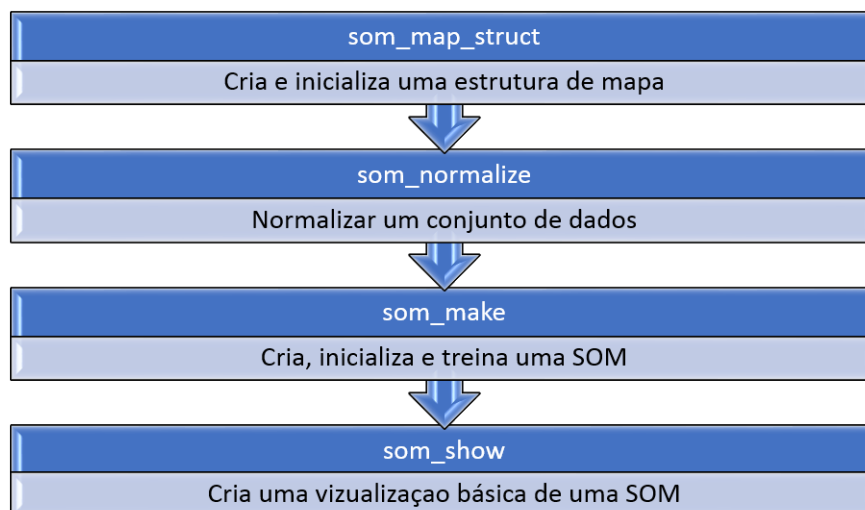
3.4 Uso da SOM no Matlab

Existem duas formas para modelar uma SOM no Matlab. A primeira delas, utiliza a SOM Toolbox 5.0, onde sua construção é realizada passo a passo. Neste caso, o número de neurônios e suas relações topológicas precisam ser fixados desde o início. Logo, existem quatro questões que precisam ser decididas: o número de neurônios, as dimensões da grade do mapa, a estrutura do mapa e a sua forma.

Desta forma, através do SOM Toolbox 5.0, uma SOM pode ser implementada em etapas utilizando-se de quatro funções básicas, conforme ilustrado na Figura 3.4.

A função *som_map_struct* cria uma estrutura de mapas auto-organizáveis. A estrutura contém o mapa, os códigos, rótulos, topologia, informações sobre normalização e treinamento, bem como nomes de componentes e um nome para o mapa. O parâmetro obrigatório é a dimensão do mapa. A maioria dos outros campos podem ser valores dados usando argumentos opcionais. Se eles não forem especificados, os valores padrões serão usados.

Figura 3.4 – Etapas básica para implementação das funções de uma SOM.



Fonte: o autor.

O próximo passo é a utilização da função *som_normalize*. Esta é usada para inicializar e adicionar, refazer e aplicar normalizações em estruturas de dados, mapas ou conjuntos. Se uma estrutura de dados ou mapas for dada, as normalizações especificadas são adicionadas ao campo *.comp_norm* da estrutura depois de garantir que todas as normalizações especificadas nela tenham *status* 'realizado'.

Após se ter aplicado as normalizações nos dados, passa-se para a fase de inicialização e treinamento de uma SOM, que da forma mais simples, pode-se usar a função *som_make*. Primeiro, ocorre-se a inicialização linear ao longo de dois grandes autovetores, mas se isto não poder ser feito (os autovetores não podem ser calculados), a inicialização aleatória é usada. Após a inicialização, o SOM é treinado em duas fases: a) primeiro treino mais “grosso” e depois um ajuste fino. Se o argumento 'rastreamento' for maior que zero, o erro médio de quantização e o erro topográfico do mapa final são calculados.

Em seguida, utilizando da função *som_show*, mostram-se as visualizações básicas da SOM: planos componentes, matrizes de distância unificada, bem como planos vazios e planos de cores fixas.

A segunda forma, utiliza do pacote básico da SOM do Matlab. Para facilitar a compreensão o código do Quadro 3.1 apresenta um exemplo de implementação básica de uma SOM.

FUNÇÃO	DESCRIÇÃO
$x = [1 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ 1]$	Inserir os parâmetros de entrada
<code>net=selforgmap ([2 1])</code>	Criar uma SOM
<code>net= train (net, x)</code>	Treinar uma SOM
<code>view= (net)</code>	Visualizar uma SOM
<code>y=net(x)</code>	Plotar uma SOM
<code>classes=vec2ind (y)</code>	Retornar o índice do neurônio

Fonte: Retirado de [mathworks.com](https://www.mathworks.com) (2017).

Quadro 3.1 – Exemplo de implementação básica de uma SOM.

Primeiro, são apresentados os dados de entrada para a função, onde “*x*” representa os valores de entrada de um vetor, que neste caso tem-se três parâmetros com dois exemplos. Estes valores definem o vetor de entrada da rede que será usada para calibrar os pesos.

Em seguida, a função *selforgmap* define as variáveis usadas nas fases de aprendizado, estes valores são usados para o treinamento e adaptação. Logo, a função cria mapas auto-organizados para classificar amostras com o máximo de detalhamento desejado, selecionando o número de neurônios em cada dimensão da camada. Para o caso do exemplo apresentado tem-se dois neurônios na camada de saída.

Então, a função inicia o treinamento da rede usando os valores dos parâmetros de treinamento indicados por *net.train*. Normalmente, um período de treinamento é definido

como uma apresentação única de todos os vetores de entrada para a rede. A rede é atualizada de acordo com os resultados de todas estas apresentações. O treinamento ocorre até que um número máximo de iterações seja atingido, ou quando o objetivo de desempenho aconteça baseado numa condição de parada.

Assim, a função $view=(net)$ abre uma janela que mostra a rede neural (especificada na rede) como um diagrama gráfico, e a função $y=(net)$ plota os resultados em forma gráfica onde se possibilita a identificação das similaridades comuns na SOM.

Por fim, a função $classes=vec2ind(y)$ retorna o índice do neurônio com uma saída de 1, para cada vetor.

Para se demonstrar o funcionamento do código expresso no Quadro 3.1, apresenta-se o seguinte exemplo, em que pretende classificar quais dos cursos universitários são da área de exatas ou não, com base nas disciplinas constantes em sua grade curricular, expressa na Tabela 3.1

Tabela 3.1 – Exemplo para Classificação de Cursos Universitários.

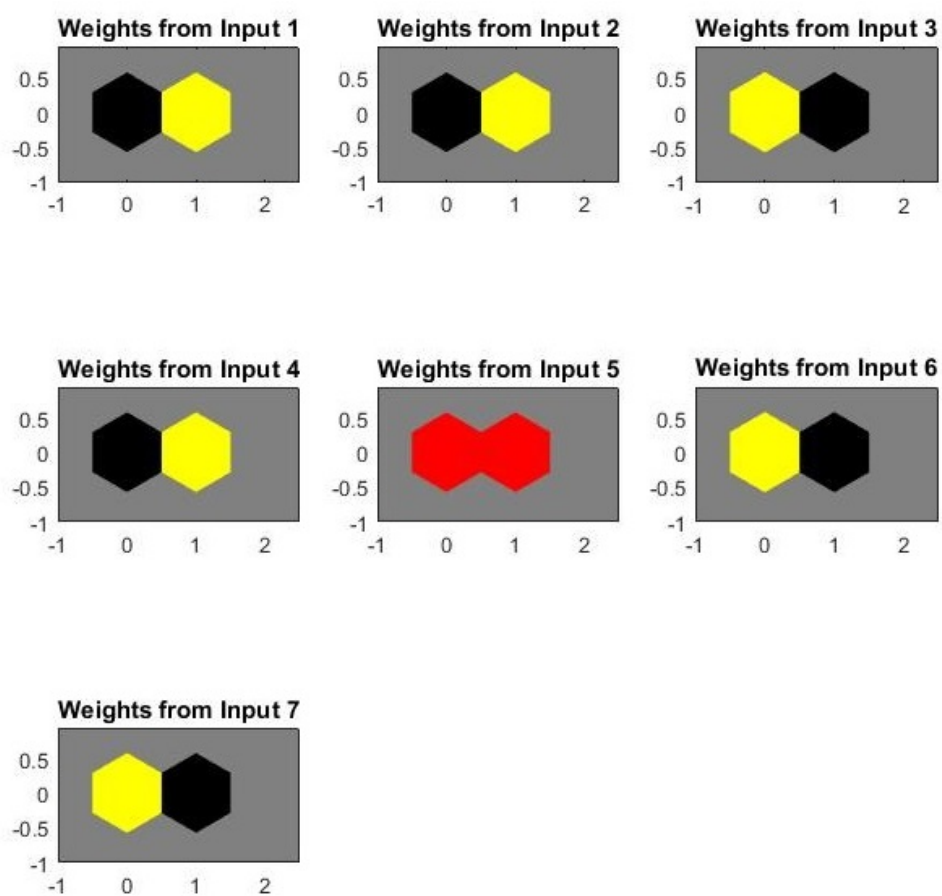
Índice	Curso	Cálculo	Álgebra	Biologia
1	Engenharia	1	1	0
2	Matemática	1	1	0
3	Agronomia	1	0	1
4	Computação	1	1	0
5	Direito	0	0	0
6	Medicina	0	0	1
7	Biologia	1	0	1

Fonte: o autor.

Colocando-se os dados no código apresentado no Quadro 3.1, tem-se os seguintes resultados conforme Figura 3.5.

Com base nos gráficos na Figura 3.5, pode-se identificar a presença de 3 conjuntos de dados. O primeiro conjunto é composto pelos gráficos 1, 2 e 4 (neurônios escuros e claros) apontando que estes são pertencentes ao mesmo conjunto, que para este caso é a classificação dos cursos da área de exatas, conforme os pesos estabelecidos. O segundo conjunto é composto pelos gráficos 3, 6 e 7 (neurônios claros e escuros) que apontam para um outro conjunto similar, sendo que estes podem tem algum ponto em comum (disciplinas) com a área de exatas. Já o terceiro conjunto é dado somente pelo gráfico 5 que descarta qualquer relação com a área das exatas, quanto biomédicas.

Figura 3.5 – Demonstração gráfica do exemplo



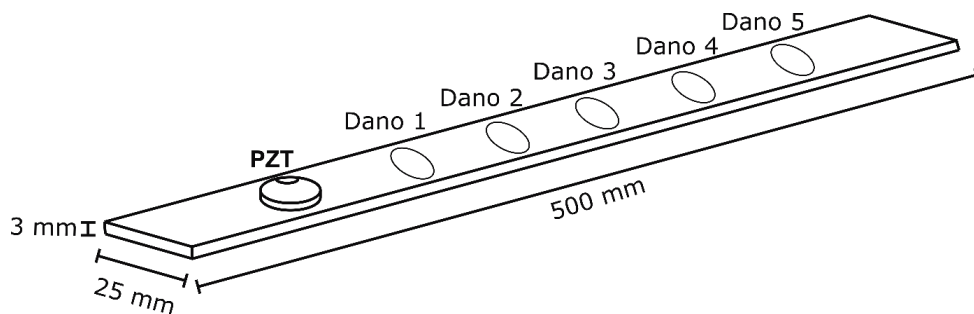
Fonte: o autor.

Capítulo 4

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento experimental adotado neste trabalho teve por objetivo classificar os diferentes tipos de danos impostos a uma viga de alumínio bi-apoiada Figura 4.1, de dimensões (500x25x3) mm.

Figura 4.1 – Representação do sistema de coleta de assinaturas de impedância.

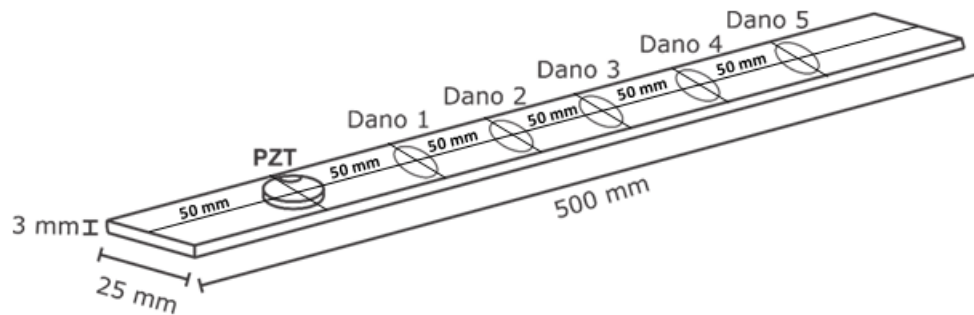


Fonte: o autor.

O dano que foi simulado artificialmente se baseou na adição de massa ao sistema em 5 posições diferentes, com 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), Dano 2 (100 mm em relação ao PZT), Dano 3 (150 mm em relação ao PZT), Dano 4 (200 mm em relação ao PZT) e Dano 5 (250 mm em relação ao PZT), sendo que para o caso em estudo, esta massa foi expressa por dois imãs de dimensões 10 mm de diâmetro por 3 mm de espessura acoplados magneticamente à viga (um de cada lado da placa).

As localizações escolhidas para a delimitação do dano artificial na viga podem ser visualizadas a partir da Fig. 4.2, em que para cada caso a coleta de dados se estabeleceu individualmente.

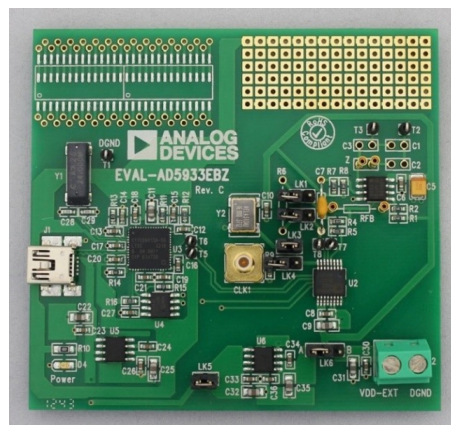
Figura 4.2 – Representação gráfica da viga utilizada como amostra no procedimento experimental.



Fonte: o autor.

O sistema de aquisição das assinaturas de impedância eletromecânica foi constituído por uma placa de monitoramento EVAL-AD5933EBZ fabricada pela empresa *Analog Devices*, conforme Fig. 4.3. 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 tensão de 2.7 V até 5.5 V, sendo que, com a finalidade de se verificar a funcionalidade da placa na coleta de assinaturas, realizou-se a calibragem do sistema com uma pastilha PZT de 60 μF acoplado em paralelo com uma resistência de 10000 Ω e em serie com uma 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 imaginaria da impedância, fase e magnitude da impedância. Para o presente trabalho foi utilizada apenas a parte real da impedância (parte do sinal onde as propriedades mecânicas da estrutura estão armazenadas) (SEPEHRY; SHAMSHIRSAZ; BASTANI, 2011).

Figura 4.3 – Placa de aquisição das assinaturas de impedância eletromecânica utilizada no procedimento experimental.



Fonte: o autor.

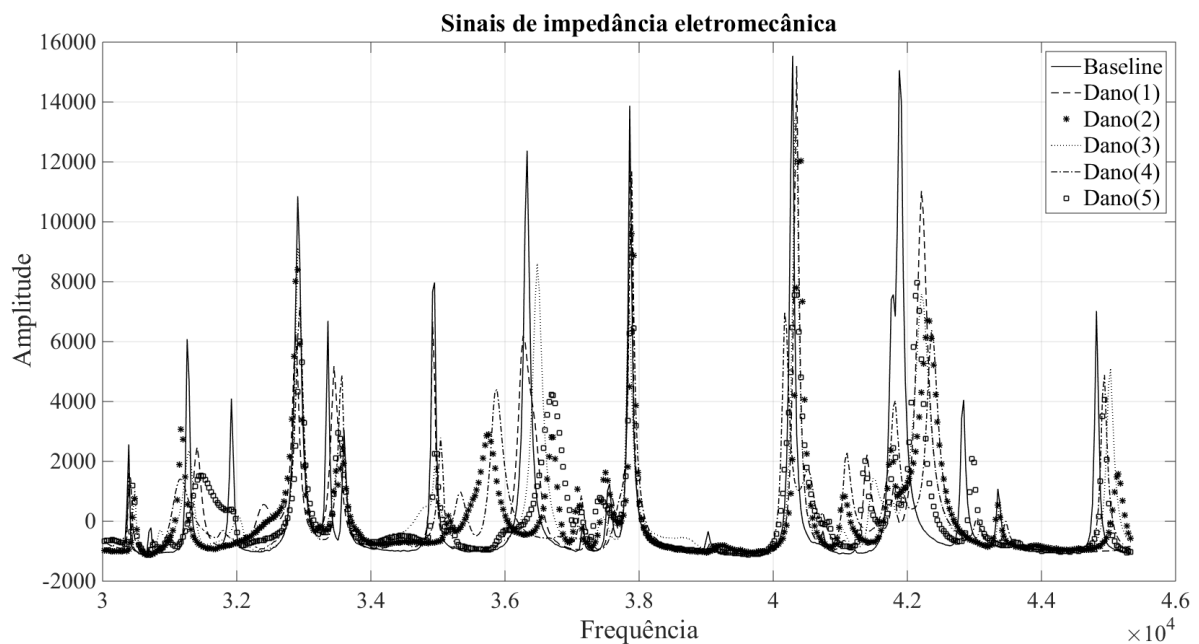
O transdutor piezelétrico utilizado tanto como atuador quanto como sensor no pro-

cedimento, trata-se de uma pastilha PZT de 20 mm de diâmetro por 3 mm de espessura (GALLEGO-JUAREZ, 1989; BITTENCOURT *et al.*, 2004). As configurações utilizadas na placa para a banda de frequência deste estudo foram selecionadas por tentativa e erro, logo o range adotado foi de 30 a 46 kHz com uma amostragem de 511 pontos.

4.1 Simulação Experimental

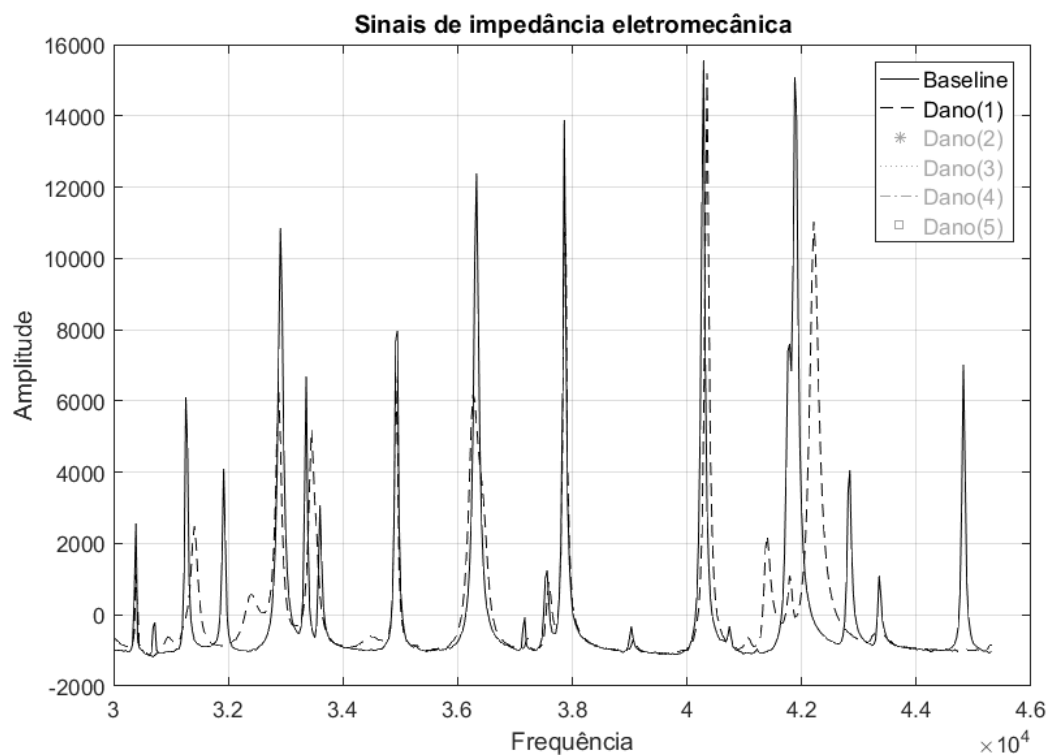
Tendo as configurações de aquisição e a topologia a ser utilizada definidas, efetuou-se a coleta de 5 amostras de sinais de impedância eletromecânica para cada conjunto de estado da viga, sendo assim uma população final de 30 amostras. As médias de cada grupo de sinais podem ser visualizadas na Fig. 4.4.

Figura 4.4 – Representação gráfica dos padrões de sinais de impedância eletromecânica, dada as 6 condições iniciais.

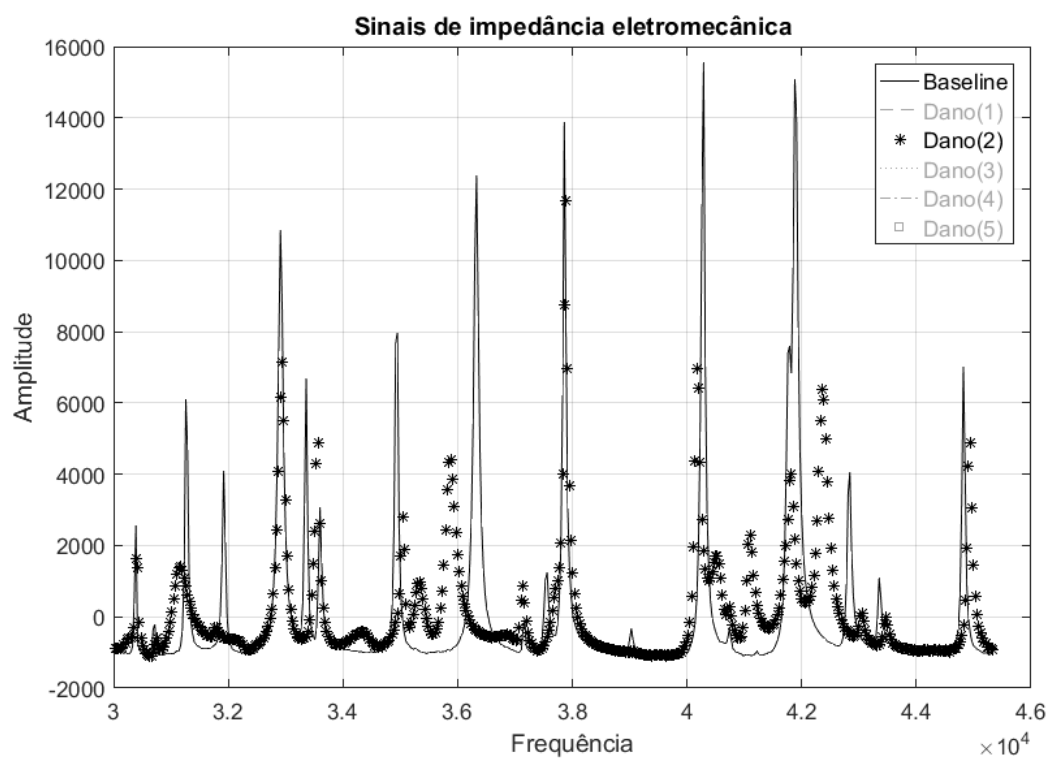


Fonte: o autor.

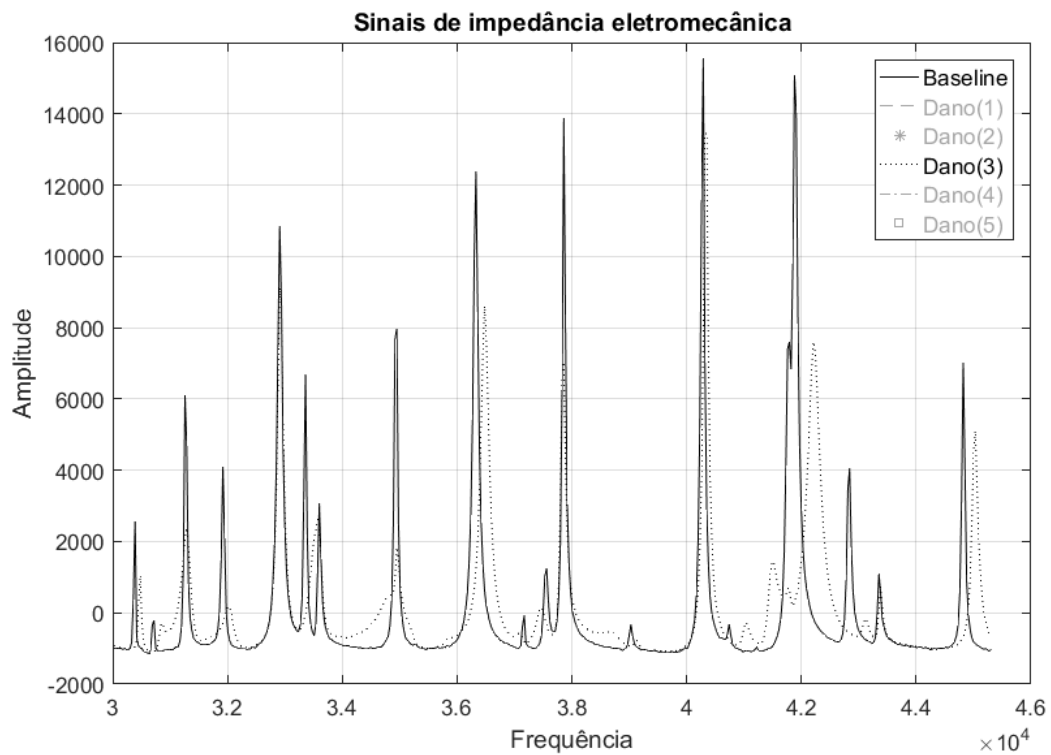
Para melhor visualização e interpretação dos sinais de impedância eletromecânica, a Figura 4.4 foi expandida em outras cinco figuras, comparando-se sempre a condição de *baseline* da viga com cada dano. Assim sendo, pela variação dos picos de ressonância (atenuação em relação à amplitude e deslocamento em relação à frequência) pode-se avaliar qualitativamente a presença de falha.

Figura 4.5 – Representação gráfica dos padrões de sinais de impedância eletromecânica: Dano 1 x *Baseline*.

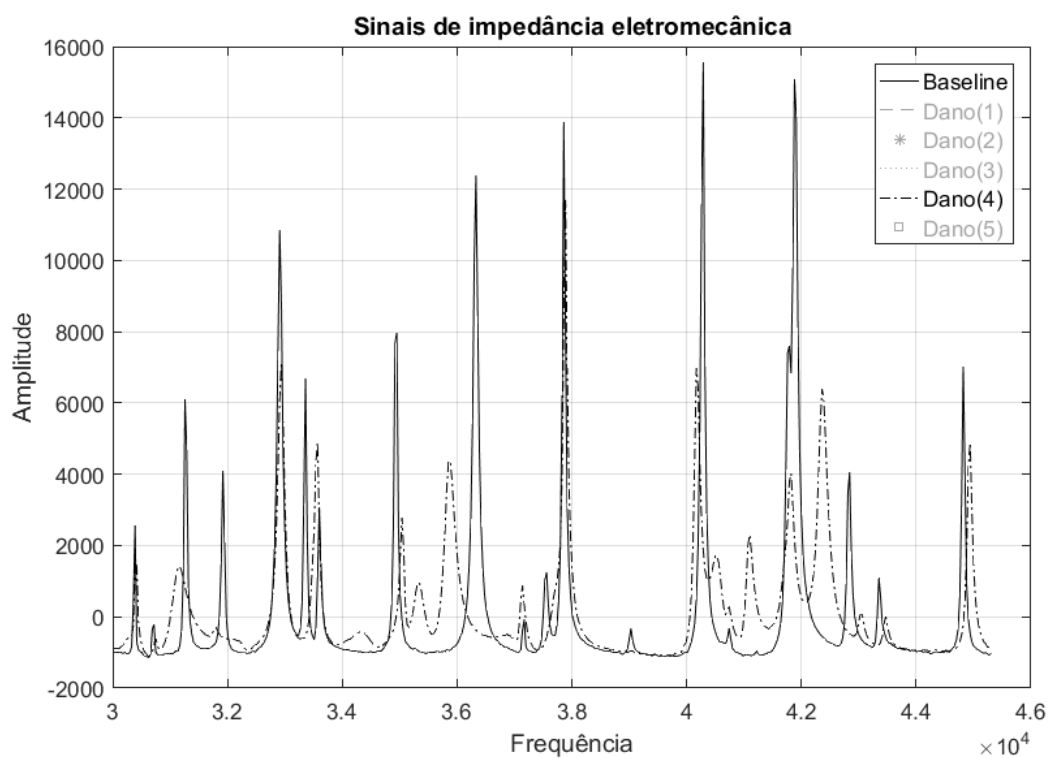
Fonte: o autor.

Figura 4.6 – Representação gráfica dos padrões de sinais de impedância eletromecânica: Dano 2 x *Baseline*.

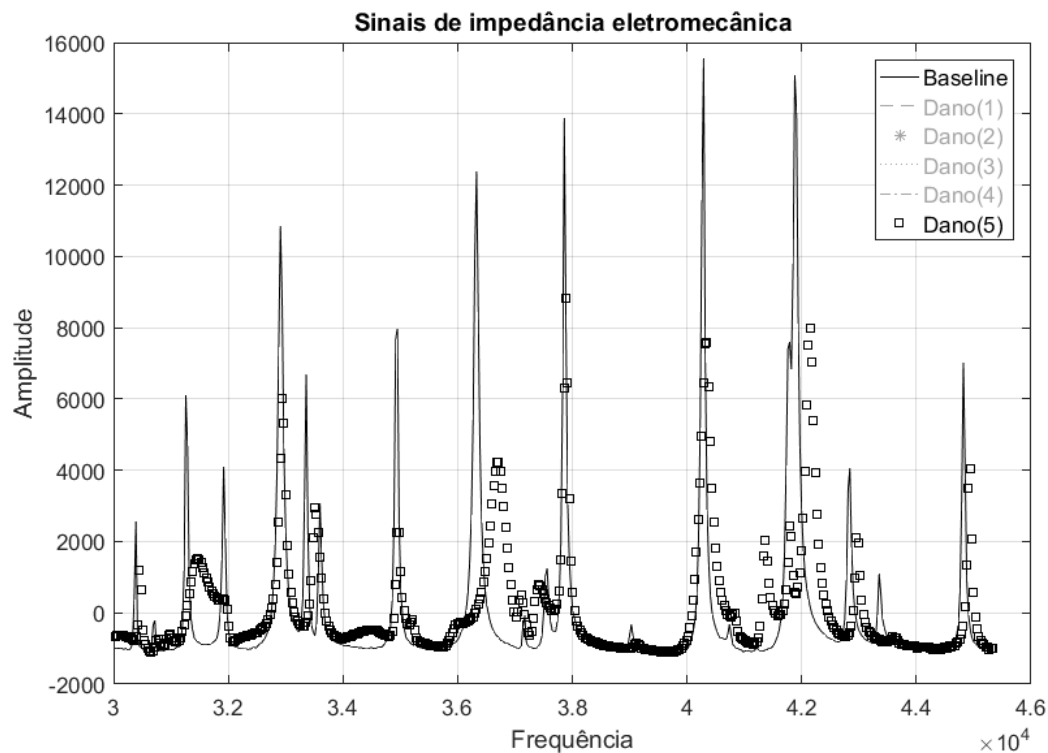
Fonte: o autor.

Figura 4.7 – Representação gráfica dos padrões de sinais de impedância eletromecânica: Dano 3 x *Baseline*.

Fonte: o autor.

Figura 4.8 – Representação gráfica dos padrões de sinais de impedância eletromecânica: Dano 4 x *Baseline*.

Fonte: o autor.

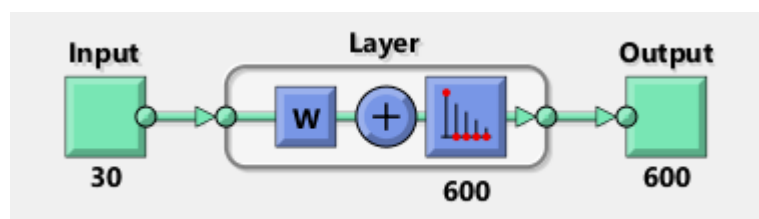
Figura 4.9 – Representação gráfica dos padrões de sinais de impedância eletromecânica: Dano 5 x *Baseline*.

Fonte: o autor.

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; INMAN, 2005).

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 30 padrões de entradas referentes as condições estabelecidas. A Fig. 4.10 ilustra a topologia da rede utilizada.

Figura 4.10 – Representação gráfica da topologia adotada na rede SOM utilizada.



Fonte: o autor.

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.

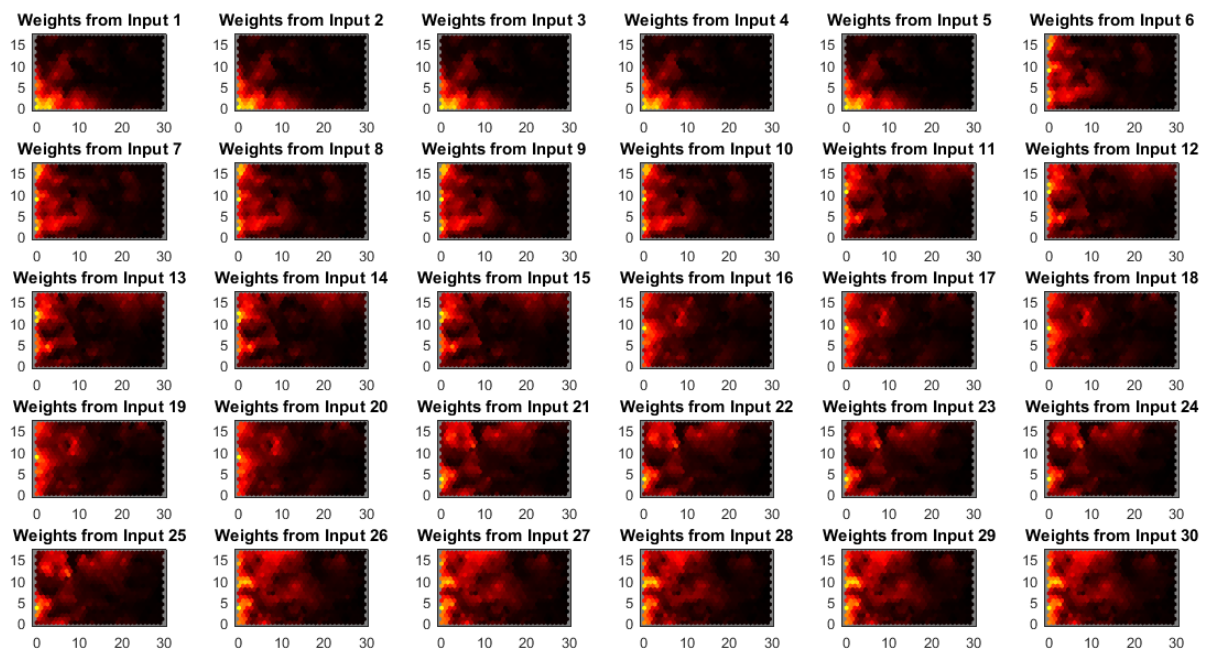
Após ter a rede treinada e os pesos de cada conexão já ponderados, foram utilizados 2 padrões de entradas de cada condição para simulação e validação do modelo, totalizando assim 18 padrões para treinamento e 12 padrões para validação. Os resultados obtidos evidenciaram que a metodologia proposta consegue distinguir conjuntos apresentados.

Capítulo 5

RESULTADOS

Como resultado da tratativa do problema, o algoritmo de Kohonen gerou um mapa para cada amostra de sinal de impedância, ou seja, 30 mapas de concentração de energia conforme a Figura 5.1:

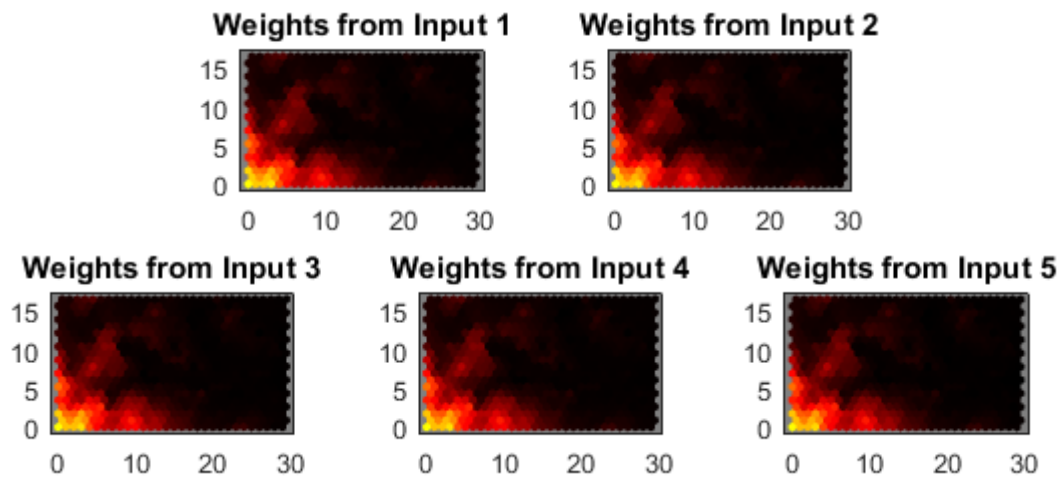
Figura 5.1 – Mapas auto-organizáveis obtidos no processo de simulação da rede.



Fonte: o autor.

As áreas mais claras de cada mapa representam a maior concentração de energia quanto ao agrupamento dos 511 pontos de cada amostra de assinatura de impedância. Sendo assim, por meio qualitativo pode-se classificar os grupos por similaridade visual. Na Figura 5.2, apresenta-se a vista ampliada dos mapas do estado de *baseline* da viga que foram classificados e agrupados pela rede.

Figura 5.2 – Mapas auto-organizáveis para o estado de baseline da viga de alumínio.

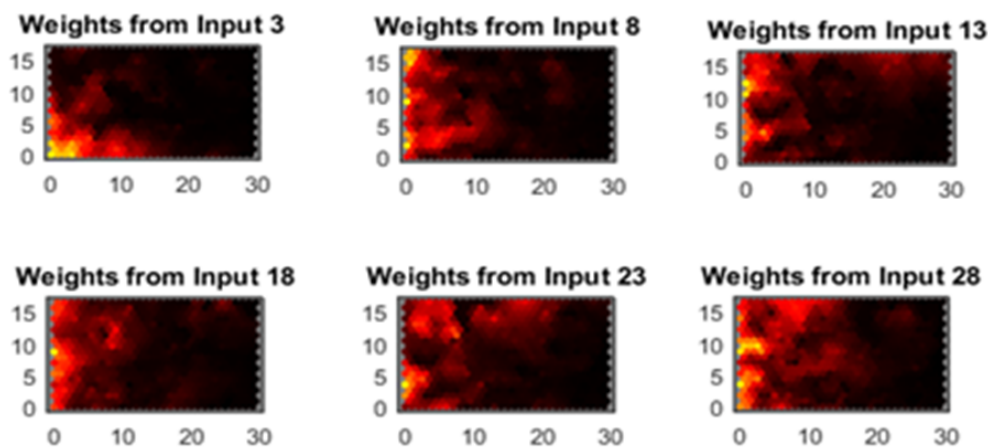


Fonte: o autor.

Na Figura 5.2 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.

Como existem mapas para condições repetidas de testes (mapas de 1-5: *baseline*; mapas de 6-10: dano 1; mapas de 11-15: dano 2; mapas de 16-20: dano 3; mapas de 21-25: dano 4 e mapas de 26-30: dano 5) foi escolhido o mapa intermediário de cada grupo para melhor compreensão qualitativas dos mesmos, conforme a Figura 5.3.

Figura 5.3 – Mapas auto-organizáveis de cada grupo classificado.



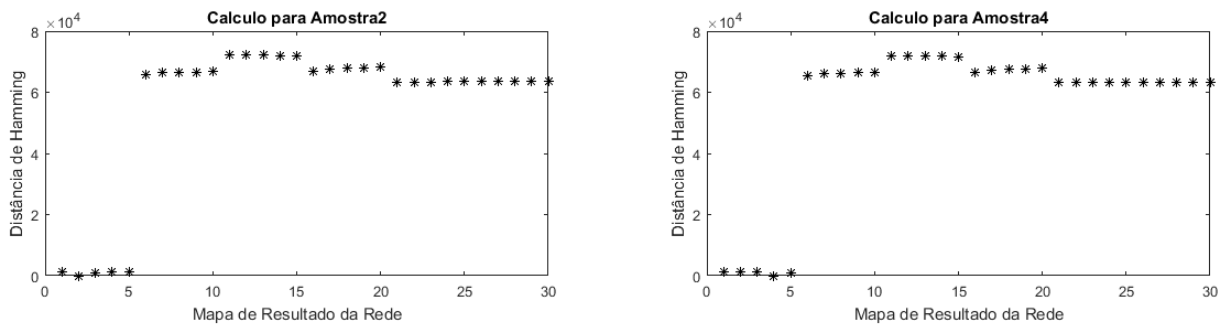
Fonte: o autor.

Pode-se analisar através da Fig. 5.3 as diferenças da concentração de energia para

cada grupo de dano, sendo o mapa 3 a condição de *baseline*, mapa 8 dano 1, mapa 13 dano 2, mapa 18 dano 3, mapa 23 dano 4 e mapa 28 dano 5.

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 as respostas dos padrões utilizados na fase de treinamento com as respostas dos sinais de teste da rede. A Figura 5.4 apresenta as distâncias encontradas para a condição de *baseline*.

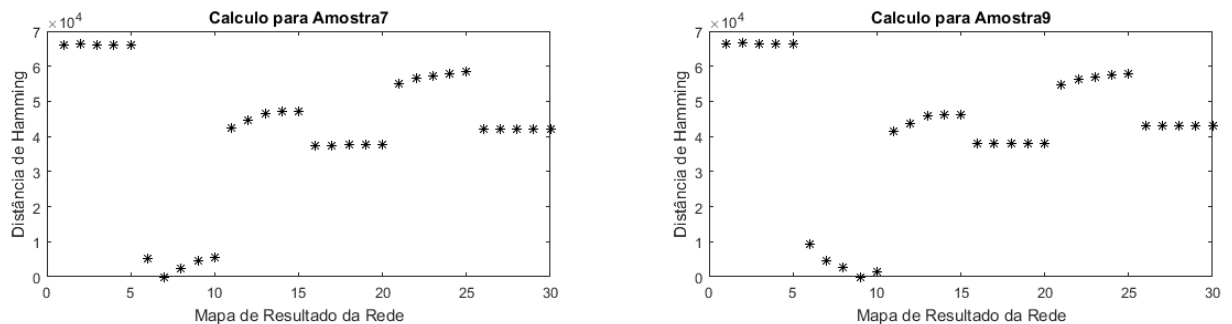
Figura 5.4 – Avaliação quantitativa dos resultados para o estado de *baseline*.



Fonte: o autor.

Quanto menor for a distância de Hamming significa que a amostra comparada é mais próxima de pertencer a um determinado agrupamento na rede, sendo assim, analisando a Figura 5.4, pode-se identificar que o mapa dois e quatro fazem parte do estado de *baseline* (sem danos) da viga. Desta forma, a Figura 5.5 apresentam os resultados da distância para a condição de dano 1.

Figura 5.5 – Avaliação quantitativa dos resultados para a condição de dano 1.

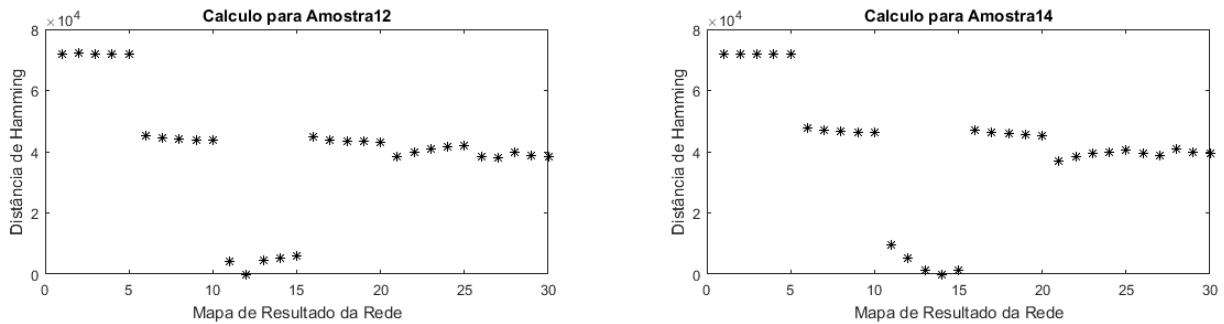


Fonte: o autor.

A Figura 5.5 apontam que as amostras 7 e 9 apresentam uma distância de hamming que as colocam classificadas para a condição de dano 2.

A Figura 5.6 apresentam os resultados da distância para a condição de dano 2.

Figura 5.6 – Avaliação quantitativa dos resultados para a condição de dano 2.

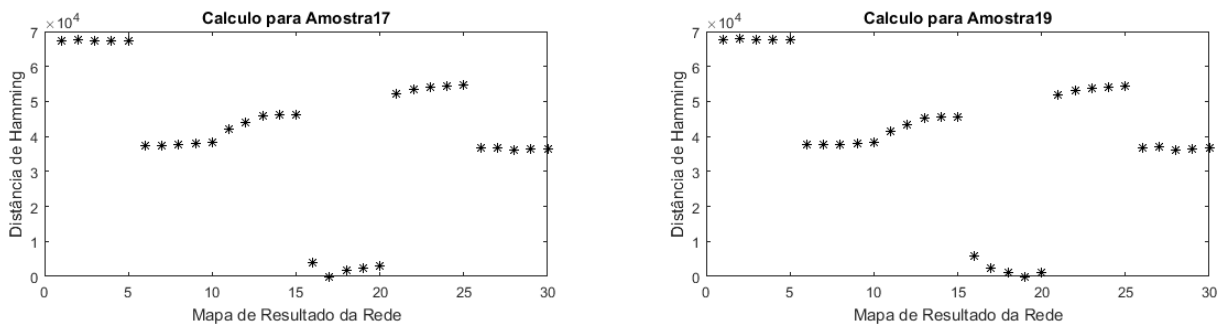


Fonte: o autor.

A Figura 5.6 apresentam os menores cálculos da distância para os mapas 12 e 14 dentro da área da condição de dano 2.

A Figura 5.7 apresentam os resultados da distância para a condição de dano 3.

Figura 5.7 – Avaliação quantitativa dos resultados para a condição de dano 3.

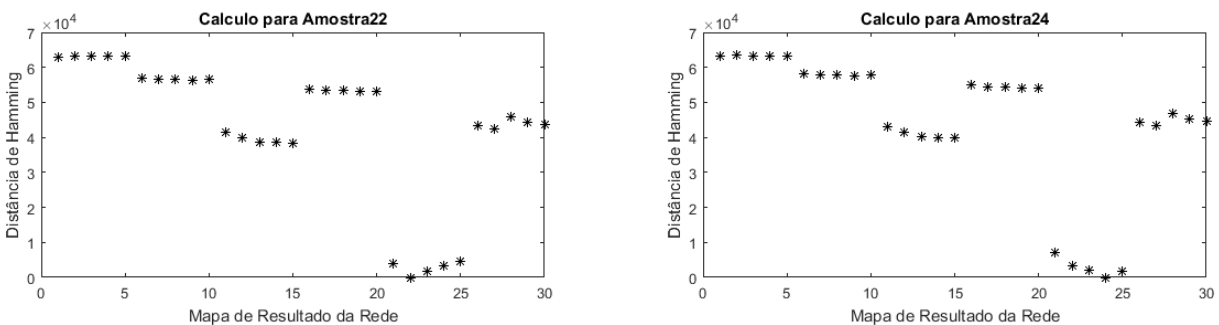


Fonte: o autor.

Com base na análise da Figura 5.7 os mapas 17 e 19 se enquadram dentro da condição de dano 3.

A Figura 5.8 apresentam os resultados da distância para a condição de dano 4.

Figura 5.8 – Avaliação quantitativa dos resultados para a condição de dano 4.

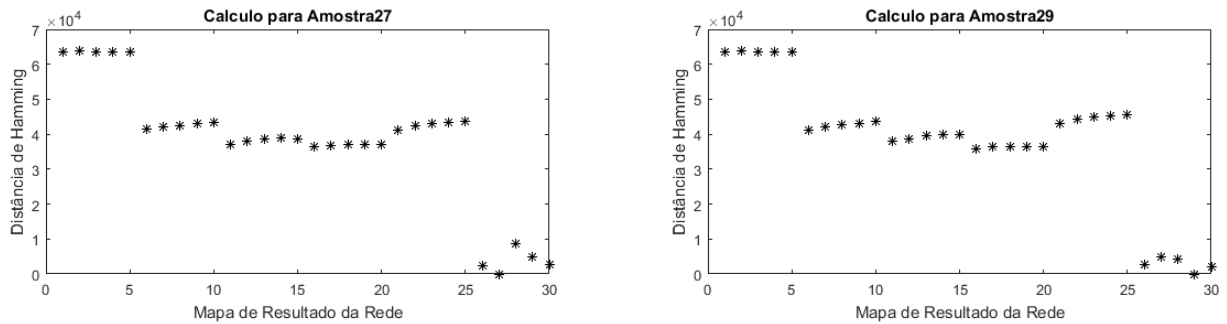


Fonte: o autor.

Analisando a Figura 5.8 percebe-se que os mapas 22 e 24 pertencem ao conjunto da condição de dano 4.

A Figura 5.9 apresentam os resultados da distância para a condição de dano 5.

Figura 5.9 – Avaliação quantitativa dos resultados para a condição de dano 5.



Fonte: o autor.

Por fim, a Figura 5.9 demonstra que através do cálculo da distância os mapas 27 e 29 fazem parte da condição de dano 5.

Por meio dos mapas auto-organizáveis obtidos como resultados pelo modelo, 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 dano.

Com isto, pode-se observar que a utilização desta metodologia no campo da análise da integridade estrutural baseada na impedância eletromecânica se torna viável. Ainda, ela é de grande aplicação devido a sua versatilidade e capacidade de integralização com outros métodos já consagrados na literatura.

Capítulo 6

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foram apresentados os conceitos básicos referentes ao monitoramento da integridade estrutural baseado na impedância eletromecânica, redes neurais artificiais e a SOM de Kohonen. Quanto ao SHM, pode-se notar que o tema vem sendo estudado há algumas décadas por diversos pesquisadores demonstrando um grande aprimoramento das técnicas utilizadas para tal. Dentre os vários métodos utilizados para se realizar o SHM, este trabalho teve como foco a técnica da impedância eletromecânica, que faz parte da classe dos ensaios não-destrutivos. No sentido de redes neurais artificiais, foi utilizada a rede SOM de Kohonen para fornecer um agrupamento e classificação dos dados.

Existem alguns métodos para realizar o monitoramento da integridade estrutural baseado na impedância eletromecânica, contudo poucos deles permitem abstrair informações quando não se sabe nada sobre o conjunto de dados da amostra. Neste sentido, o uso das redes neurais através de aprendizado não supervisionado têm ganhado maior destaque na classificação de conjuntos e no mapeamento de dados, fornecendo resultados eficazes que justificam a sua aplicabilidade.

Sabe-se em especial das vantagens na utilização da SOM para se resolver problemas reais de classificação e como esta técnica vem sendo cada mais abordada em diversos estudos. Com base nisto, foi apresentada a aplicação de uma metodologia de classificação de danos em estruturas simples, fazendo-se para isto a utilização de mapas auto-organizáveis de Kohonen e da técnica de SHM baseada em impedância eletromecânica.

O presente trabalho utilizou como sistema uma viga de alumínio, onde se aplicou cinco condições de falhas sobre esta em diferentes severidades simuladas por adição de massa. Por meio do experimento realizado, a técnica aplicada apresentou como resultado 100% de acerto, uma vez que esta classificou todas as amostras de estado da viga em seus seis níveis correspondentes. Esta resposta da rede pode ser não apenas oriunda ao método

aplicado, mas também ao fato do objeto de estudo utilizado ser de configuração simples.

Para se estabelecer uma análise quantitativa quanto a precisão da rede ao reconhecimento de padrões, foi aplicada a fórmula da distância de Hamming, onde os gráficos apresentados comprovaram a eficiência da SOM.

Assim diante do exposto, pode-se concluir que o meta-modelo conseguiu classificar com eficiência as diferentes condições de falhas que foram impostas à estrutura, com isto, observou-se 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.

As principais contribuições deste trabalho foram a associação das temáticas de SHM baseado na técnica da impedância eletromecânica com um método de rede neural artificial denominado mapas auto-organizáveis de Kohonen, para a solução do problema de agrupamento e classificação de danos em uma estrutura simples.

Como trabalhos futuros pode-se aplicar os mesmos conceitos utilizados neste trabalho em estruturas complexas e de materiais compósitos. O método apresentado também pode ser utilizado em outros cenários reais em ambientes controlados ou industriais, principalmente em sistemas de vários componentes. Sob o ponto de vista acadêmico, trabalhos futuros poderiam abordar 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*. 144 f. Tese (Doctor of Philosophy In Mechanical Engineering) — Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA, 2012. Citado 6 vezes nas páginas 27, 28, 37, 38, 40 e 41.

ANDREUCCI, R. *Líquidos Penetrantes*. São Paulo, 2003. Citado na página 35.

_____. *Ensaio não-destrutivo por ultrassom*. 01. ed. São Paulo, 2011. Citado na página 34.

BANKS, H.; SMITH, R.; WANG, Y. *Smart material structures: modeling, estimation, and control*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1996. ISSN 0298-3168. ISBN 9780471970248. Citado 3 vezes nas páginas 41, 42 e 43.

BAPTISTA, F. G. *Uma Contribuição aos Sistemas de Monitoramento de Integridade Estrutural Baseados na Impedância Eletromecânica*. Tese (Doutorado), Ilha solteria:São Paulo, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 41.

BAPTISTA, F. G.; VIEIRA FILHO, J.; INMAN, D. J. Sizing pzt transducers in impedance-based structural health monitoring. *IEEE Sensors Journal*, IEEE, v. 11, n. 6, p. 1405–1414, 2011. Citado 4 vezes nas páginas 38, 39, 46 e 47.

BHALLA, S. *et al.* Practical issues in the implementation of electro-mechanical impedance technique for nde. In: *Proc. of SPIE Vol.* [S.l.: s.n.], 2002. v. 4935, p. 485. Citado 2 vezes nas páginas 46 e 47.

BHALLA, S.; NAIDU, A. S.; SOH, C. K. Influence of structure-actuator interactions and temperature on piezoelectric mechatronic signatures for nde. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS AND PHOTONICS. *Smart Materials, Structures, and Systems*. [S.l.]: Proceedings ISSS-SPIE 2002 International Conference on Smart Materials Structures and Systems, 2003. p. 263–269. Citado 3 vezes nas páginas 46, 47 e 48.

BITTENCOURT, C. *et al.* Estudo experimental da utilização do método da impedância eletromecânica para análise da influência da posição de pastilhas pzt em relação à falhas estruturais. Uberlândia-MG, 2004. Citado na página 63.

BOLLER, C. Ways and options for aircraft structural health management. *Smart Materials and Structures*, v. 5, p. 432, Oct 2001. ISSN 0964-1726. Citado na página 28.

BRAY, D. E.; MCBRIDE, D. *Nondestructive testing techniques*. [S.l.]: New York : Wiley, 1992. ISBN 0471525138 (alk. paper). Citado 6 vezes nas páginas 31, 32, 33, 34, 35 e 36.

CHAUDHRY, Z. *et al.* Monitoring the integrity of composite patch structural repair via piezoelectric actuators/sensors. In: *36th Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*. [S.l.: s.n.], 1996. p. 1074. Citado 2 vezes nas páginas 46 e 47.

CHAUDHRY, Z. A. *et al.* Local-area health monitoring of aircraft via piezoelectric actuator/sensor patches. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS AND PHOTONICS. *Smart Structures & Materials' 95*. [S.l.], 1995. p. 268–276. Citado 2 vezes nas páginas 46 e 47.

FARIAS, C. T. T. *Utilização das ondas ultrassônicas de Lamb na inspeção de materiais compósitos laminados fibra-metal*. Tese (Doutorado), Rio de Janeiro, 2006. Citado na página 34.

FARRAR, C. Damage prognosis team from weapon response group. *Los Alamos National Laboratory, "An Introduction to Damage Prognosis", Pan American Advanced Study Institute on Damage Prognosis, Florianopolis, SC, Brasil*, 2003. Citado na página 27.

FARRAR, C. R.; LIEVEN, N. A. J.; BEMENT, M. An introduction to damage prognosis. In: _____. *Damage Prognosis for Aerospace, Civil and Mechanical Systems*. USA: John Wiley & Sons Inc., 2005. cap. 1, p. 1 – 12. ISBN 0470869070. Citado na página 27.

GALLEGO-JUAREZ, J. Piezoelectric ceramics and ultrasonic transducers. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, IOP Publishing, v. 22, n. 10, p. 804, 1989. Citado na página 63.

GIBILISCO, S. *Manual de eletrônica e das telecomunicações*. [S.l.]: Reichmann & Affonso, 2002. Citado na página 45.

GIURGIUTIU, V.; ZAGRAI, A. Damage detection in thin plates and aerospace structures with the electro-mechanical impedance method. *Structural Health Monitoring*, v. 4, n. 2, p. 99–118, 2005. Citado na página 49.

GIURGIUTIU, V. *et al.* Active sensors for health monitoring of aging aerospace structures. *International Journal of the Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management*, v. 6, n. 1, p. 3–21, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 46 e 47.

GIURGIUTIU, V.; ZAGRAI, A. N. Characterization of piezoelectric wafer active sensors. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, v. 11, n. 12, p. 959–976, 2000. Citado 2 vezes nas páginas 46 e 47.

_____. Embedded self-sensing piezoelectric active sensors for on-line structural identification. *International Journal of the Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management*, v. 124, p. 116–125, 2002. Citado 2 vezes nas páginas 46 e 47.

GIURGIUTIU, V.; ZAGRAI, A. N.; BAO, J. J. Piezoelectric wafer embedded active sensors for aging aircraft structural health monitoring. *Structural Health Monitoring*, v. 1, n. 1, p. 41–61, 2002. Citado 2 vezes nas páginas 46 e 47.

GRISSE, B. L.; INMAN, D. J. Temperature corrected sensor diagnostics for impedance-based shm. *Journal of Sound and Vibration*, Elsevier, v. 329, n. 12, p. 2323–2336, 2010. Citado 3 vezes nas páginas 46, 47 e 49.

GURNEY, K. *An introduction to neural networks*. [S.l.]: CRC press, 1997. Citado 2 vezes nas páginas 51 e 52.

JUNG, H. K. *et al.* Relative baseline features for impedance-based structural health monitoring. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Sage Publications Sage UK: London, England, v. 25, n. 18, p. 2294–2304, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 40.

KOHONEN, T. Self-organized formation of topologically correct feature maps. *Biological cybernetics*, Springer, v. 43, n. 1, p. 59–69, 1982. Citado na página 52.

_____. *Self-organization and associative memory*. Berlin: SpringerVerlag, 1984. v. 8. Citado na página 52.

KROSE, B.; SMAGT, P. v. d. *An introduction to neural networks*. The University of Amsterdam, Amsterdam, 1996. Citado 2 vezes nas páginas 51 e 52.

LALANDE, F. *et al.* High-frequency impedance analysis for ndeofcomplex precision parts. In: . San Diego, USA: Proceedings, SPIE Conference on Smart Structures and Materials, 1996b. Citado na página 37.

LALANDE, F.; ROGERS, C. A. Solid-state active sensing for in-situ health monitoring. In: . Mobile, USA: Proceedings, Society for Machinery Failure Prevention Technology Showcase, 1996a. Citado na página 37.

LIANG, C.; SUN, F.; ROGERS, C. Coupled electro-mechanical analysis of adaptive material systems — determination of the actuator power consumption and system energy transfer. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, v. 5, n. 1, p. 12–20, 1994. Citado 3 vezes nas páginas 37, 46 e 47.

LIU, X.; PAUROBALLY, R. Robust damage metric in terms of magnitude and phase for impedance-based structural health monitoring. *Structural Health Monitoring*, Sage Publications Sage UK: London, England, v. 8, n. 4, p. 303–309, 2009. Citado 4 vezes nas páginas 38, 39, 46 e 47.

LOPES JUNIOR, V. *et al.* Impedance-based structural health monitoring with artificial neural networks. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Sage Publications Sage CA: Thousand Oaks, CA, v. 11, n. 3, p. 206–214, 2000. Citado na página 27.

MASSOUD, M. *Impedance methods for machine analysis: modal parameters extraction techniques*. [S.l.]: Université de Sherbrooke, 1985. 4-14 p. Citado na página 43.

MATHWORKS.COM. 2017. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/help/nnet/ref/selforgmap.html?requestedDomain=www.mathworks.com>>. Citado na página 57.

MIN, J. *et al.* Impedance-based structural health monitoring incorporating neural network technique for identification of damage type and severity. *Engineering Structures*, v. 39, p. 210–220, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 40.

Moura Junior, J. d. R. V.; Steffen Junior, V. Impedance-based health monitoring: frequency band evaluation. XXII IMAC, Dearborn, USA, 2004. Citado 3 vezes nas páginas 46, 47 e 48.

MOURA JÚNIOR, J. R. V. de. *Uma contribuição aos sistemas de monitoramento de integridade estrutural aplicada a estruturas aeronáuticas e espaciais*. 144 f. Tese (Doutor em Engenharia Mecânica) — Faculdade de Engenharia de Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008. Citado 5 vezes nas páginas 38, 39, 43, 46 e 47.

NAIDU, A.; SOH, C. Damage severity and propagation characterization with admittance signatures of piezo transducers. *Smart Materials and Structures*, IOP Publishing, v. 13, n. 2, p. 393, 2004. Citado na página 50.

OLIVEIRA, M. A. d. *Monitoramento de integridade estrutural baseada em sensores piezelétricos e análise de sinais no domínio do tempo*. Tese (Doutorado), Ilha solteria: São Paulo, 2013. Citado na página 27.

PALOMINO, L. V. *Análise das métricas de dano associadas à técnica da impedância eletromecânica para o monitoramento de integridade estrutural*. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Faculdade de Engenharia de Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008. Citado 15 vezes nas páginas 27, 28, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 41, 43, 46, 47, 48, 49 e 50.

PALOMINO, L. V.; Steffen Junior, V.; Finzi Neto, R. M. Probabilistic neural network and fuzzy cluster analysis methods applied to impedance-based shm for damage classification. *Shock and Vibration*, v. 2014, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 40.

PARK, G.; CUDNEY, H.; INMAN, D. J. Impedance-based health monitoring technique for massive structures and high-temperature structures. *Smart Structures and Materials*, Sensory Phenomena and Measurement Instrumentation for Smart Structures and Materials. Proceedings of the SPIE, v. 3670, p. 461–469, 1999b. Citado 3 vezes nas páginas 38, 46 e 47.

PARK, G.; CUDNEY, H. H.; INMAN, D. J. Impedance-based health monitoring of civil structural components. *Journal of Infrastructure Systems*, v. 6, n. 4, p. 153–160, 2000. Citado 2 vezes nas páginas 46 e 47.

_____. An integrated health monitoring technique using structural impedance sensors. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, v. 11, n. 6, p. 448–455, 2000. Citado 2 vezes nas páginas 46 e 47.

_____. Feasibility of using impedance-based damage assessment for pipeline structures. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, John Wiley & Sons, Ltd., v. 30, n. 10, p. 1463–1474, 2001. ISSN 1096-9845. Citado 2 vezes nas páginas 46 e 47.

PARK, G.; INMAN, D. J. Impedance-based structural health monitoring. *Damage prognosis for aerospace, civil and mechanical systems*, John Wiley & Sons, p. 1–12, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 46 e 66.

PARK, G. *et al.* Impedance-based structural health monitoring for temperature varying applications. *JSME International Journal Series A Solid Mechanics and Material Engineering*, The Japan Society of Mechanical Engineers, v. 42, n. 2, p. 249–258, 1999. Citado 3 vezes nas páginas 37, 46 e 47.

_____. Overview of piezoelectric impedance-based health monitoring and path forward. *Shock and Vibration Digest*, v. 35, n. 6, p. 451–463, 2003. Citado 4 vezes nas páginas 37, 46, 47 e 48.

PARK, S. *et al.* Electro-mechanical impedance-based wireless structural health monitoring using pca-data compression and k-means clustering algorithms. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Sage Publications Sage UK: London, England, v. 19, n. 4, p. 509–520, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 39.

PAVLAKOVIC, B.; LOWE, M. Disperse tm-a system for generating dispersion curves. version 2.0. *Imperial College, NDT Lab*, London, 2001. Citado na página 34.

PEAIRS, D. M. *Development of a self-sensing and self-healing bolted joint*. 94 f. Dissertação (Master of Science) — Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA, 2002. Citado na página 50.

PEAIRS, D. M. *High frequency modeling and experimental analysis for implementation of impedance-based structural health monitoring*. Tese (Doutorado) — Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, 2006. Citado 5 vezes nas páginas 38, 39, 46, 47 e 49.

RABELO, D. de S. *Monitoramento de integridade estrutural baseado na técnica da impedância eletromecânica incorporando compensação do efeito da variação da temperatura*. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Faculdade de Engenharia de Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014. Citado na página 45.

RABELO, D. S. *et al.* A statistical approach for assessing reliability for impedance-based structural health monitoring using probability of detection. *Structural Health Monitoring 2015*, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 46 e 47.

RAGHAVAN, A.; CESNIK, C. E. Effects of elevated temperature on guided-wave structural health monitoring. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, v. 19, n. 12, p. 1383–1398, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 46 e 47.

RAGHAVAN, A.; CESNIK, C. E. S. *Lamb-wave based structural health monitoring*. [S.l.]: Chichester: Wiley, 2005. Citado na página 35.

RAJU, V. *Implementing impedance - based health monitoring*. 225 f. Dissertação (Master of science in mechanical engineering) — Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA, 1997. Citado 2 vezes nas páginas 47 e 50.

RYTTER, A. *Vibrational based inspection of civil engineering structures*. Tese (Doutorado) — Dept. of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University, Denmark, 1993. Citado na página 27.

SEPEHRY, N.; SHAMSHIRSAZ, M.; BASTANI, A. Experimental and theoretical analysis in impedance-based structural health monitoring with varying temperature. *Structural Health Monitoring*, Sage Publications Sage UK: London, England, v. 10, n. 6, p. 573–585, 2011. Citado na página 62.

SIQUEIRA, M. H. S. *Inspeção em grandes distancias utilizando ondas ultra-sônicas guiadas e inteligência artificial*. Tese (Doutorado) — Engenharia Metalúrgica e Materiais), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2000. Citado na página 34.

SOH, C. K. *et al.* Performance of smart piezoceramic patches in health monitoring of a rc bridge. *Smart Materials and Structures*, v. 9, n. 4, p. 533, 2000. Citado 2 vezes nas páginas 46 e 47.

STASZEWSKI, W. J.; WORDEN, K. *Health monitoring of aerospace structures: smart sensor technologies and signal processing*. Munich: John Wiley & Sons, 2004. Citado na página 28.

SUN, F. P. *et al.* Truss structure integrity identification using pzt sensor-actuator. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, v. 6, n. 1, p. 134–139, 1995. Citado 3 vezes nas páginas 46, 47 e 48.

TSENG, K. K.-H.; NAIDU, A. S. K. Non-parametric damage detection and characterization using smart piezoceramic material. *Smart Materials and Structures*, v. 11, n. 3, p. 317, 2002. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 50.

TURNER, R. *et al.* Materials for high temperature acoustic and vibration sensors: A review. *Applied acoustics*, v. 41, p. 299–324, 1994. ISSN 0003-682X. Citado na página 28.

VALENÇA, M. Fundamentos das redes neurais: exemplos em java. *Livro Rápido*, 1995. Citado 4 vezes nas páginas 52, 53, 54 e 55.

VIKTOROV, I. A. *Rayleigh and lamb waves*. 2. ed. New York: Plenum Press, 1970. Citado na página 34.