

LIZETH VARGAS PALOMINO

**TÉCNICAS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL
APLICADAS AO MÉTODO DE MONITORAMENTO DE
INTEGRIDADE ESTRUTURAL BASEADO NA
IMPEDÂNCIA ELETROMECAÂNICA PARA
MONITORAMENTO DE DANOS EM ESTRUTURAS
AERONÁUTICAS**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2012

LIZETH VARGAS PALOMINO

**TÉCNICAS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL APLICADAS AO
MÉTODO DE MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL
BASEADO NA IMPEDÂNCIA ELETROMECÂNICA PARA
MONITORAMENTO DE DANOS EM ESTRUTURAS AERONÁUTICAS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de concentração: Mecânica dos sólidos e vibrações.

Orientador: Prof. Dr. Valder Steffen Jr

UBERLÂNDIA –MG

2012

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU , MG, Brasil

P181t Palomino, Lizeth Vargas, 1983-
2012 Técnicas de inteligência artificial aplicadas ao método de monitora-
mento de integridade estrutural baseado na impedância eletromecânica
para monitoramento de danos em estruturas aeronáuticas / Lizeth Vargas
Palomino. - 2012.
215 p. : il.

Orientador: Valder Steffen Jr.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Aeronaves - Teses. 3. Localização
de falhas (Engenharia) - Teses. 4. Redes neurais (Computação) - Teses. I.
Steffen Junior, Valder. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 621

LIZETH VARGAS PALOMINO

**TÉCNICAS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL APLICADAS AO MÉTODO DE
MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL BASEADO NA
IMPEDÂNCIA ELETROMECAÂNICA PARA MONITORAMENTO DE DANOS
EM ESTRUTURAS AERONÁUTICAS**

Tese **APROVADA** pelo Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da
Universidade Federal de Uberlândia.

Área de concentração: Mecânica dos sólidos e
vibrações.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Valder Steffen Jr – UFU – Orientador

Prof. Dr.

Prof. Dr.

Prof. Dr.

Prof. Dr.

Uberlândia, 3 de Julho de 2012

*A Nereo, Luz Miryam,
Rocio e Romain.*

AGRADECIMENTOS

A Deus pela oportunidade e pela força.

À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Mecânica pela oportunidade de realizar este curso.

Ao CNPq pelo apoio financeiro na realização desta pesquisa.

A meu orientador Valder Steffen Jr., que contribuiu com este trabalho e com minha formação.

Ao Prof. Roberto Mendez Finzi Neto pela ajuda no desenvolvimento deste trabalho.

A minha querida família Nereo, Luz Miryam, Rocio e Romain pelo apoio e carinho incondicional, que mesmo muito distantes, me acompanharam em todas as horas.

À Karina Mayumi Tsuruta pela ajuda e amizade incondicional.

Ao técnico de laboratório Carlos Humberto pela disposição de ajudar em toda a parte experimental deste trabalho.

Aos colegas do Laboratório LMest pela amizade.

À Fernanda, Yara, Carlos, Dayana, Hernan, Jessica, Lizette, Jean, Miguel e Enrique que se tornaram uma nova família neste novo país.

Ao Brasil por me acolher como sua cidadã por estes seis anos.

Palomino, L. V. **Técnicas de inteligência artificial aplicadas ao método de monitoramento de integridade estrutural baseado na impedância eletromecânica para monitoramento de danos em estruturas aeronáuticas**. 2012. 175 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

RESUMO

O conceito básico da técnica de integridade estrutural baseada na impedância tem a ver com o monitoramento da variação da impedância eletromecânica da estrutura, causada pela presença alterações estruturais, através de pastilhas de material piezelétrico coladas na superfície da estrutura ou nela incorporadas. A impedância medida se relaciona com a impedância mecânica da estrutura. A partir da variação dos sinais de impedância pode-se concluir pela existência ou não de uma falha. Para quantificar esta falha, métricas de dano são especialmente definidas, permitindo atribuir-lhe um valor escalar característico. Este trabalho pretende inicialmente avaliar a influência de algumas condições ambientais, tais como os campos magnéticos e os meios iônicos na medição de impedância. Os resultados obtidos mostram que os campos magnéticos não tem influência na medição de impedância e que os meios iônicos influenciam os resultados; entretanto, ao blindar o sensor, este efeito se reduz consideravelmente. Também foi estudada a influencia da geometria, ou seja, do formato do PZT e da posição do sensor com respeito ao dano. Verificou-se que o formato do PZT não tem nenhuma influência na medição e que a posição do sensor é importante para detectar corretamente o dano. Neste trabalho se apresenta o desenvolvimento de um sistema de medição de impedância de baixo custo e portátil que tem a capacidade de medir e armazenar a medição de 16 PZTs sem a necessidade de intervenção humana. Um aspecto de fundamental importância no contexto deste trabalho é a caracterização do dano a partir dos sinais de impedância coletados. Neste sentido, as técnicas de inteligência artificial conhecidas como redes neurais e análises de cluster *fuzzy*, foram testadas para classificar danos em estruturas aeronáuticas, obtendo resultados satisfatórios para esta tarefa. Uma última contribuição deste trabalho é o estudo do comportamento da técnica de monitoramento de integridade estrutural baseado na impedância eletromecânica na detecção de danos em estruturas submetidas a carregamento dinâmico. Os resultados obtidos mostram que a técnica funciona adequadamente nestes casos.

Palavras chave: Monitoramento de Integridade Estrutural, Impedância Eletromecânica, Redes Neurais, Análise de Cluster, Condições Ambientais, Sistema de Medição de Impedância.

Palomino, L. V.. **Artificial intelligence techniques applied to the impedance-based structural health monitoring technique for monitoring damage in aircraft structures.** 2012. 175 p. PhD Thesis, Federal University of Uberlândia, Uberlândia.

ABSTRACT

The basic concept of impedance-based structure health monitoring is measuring the variation of the electromechanical impedance of the structure as caused by the presence of damage by using patches of piezoelectric material bonded on the surface of the structure (or embedded into). The measured electrical impedance of the PZT patch is directly related to the mechanical impedance of the structure. That is why the presence of damage can be detected by monitoring the variation of the impedance signal. In order to quantify damage, a metric is specially defined, which allows to assign a characteristic scalar value to the fault. This study initially evaluates the influence of environmental conditions in the impedance measurement, such as temperature, magnetic fields and ionic environment. The results show that the magnetic field does not influence the impedance measurement and that the ionic environment influences the results. However, when the sensor is shielded, the effect of the ionic environment is significantly reduced. The influence of the sensor geometry has also been studied. It has been established that the shape of the PZT patch (rectangular or circular) has no influence on the impedance measurement. However, the position of the sensor is an important issue to correctly detect damage. This work presents the development of a low-cost portable system for impedance measuring to automatically measure and store data from 16 PZT patches, without human intervention. One fundamental aspect in the context of this work is to characterize the damage type from the various impedance signals collected. In this sense, the techniques of artificial intelligence known as neural networks and fuzzy cluster analysis were tested for classifying damage of aircraft structures, obtaining satisfactory results. One last contribution of the present work is the study of the performance of the electromechanical impedance-based structural health monitoring technique to detect damage in structures under dynamic loading. Encouraging results were obtained for this aim.

Keywords: Structural health monitoring, Electromechanical impedance, Artificial neural network, Fuzzy cluster analysis, Environment conditions, impedance measurement system.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- Modelo eletromecânico do método de integridade estrutural baseado na impedância eletromecânica	13
Figura 2.2 – Impedância em função da frequência.....	15
Figura 2.3- Exemplo da variação da amplitude entre duas medições de impedância para o caso sem dano na estrutura.....	17
Figura 3.1 – (a)Viga utilizada para ensaio com cargas dinâmicas (b) Detalhe do PZT e trincas.....	24
Figura 3.2 – (a) Sensor de deslocamento; (b) Sensor de força; (c) Apresentação dos resultados.....	24
Figura 3.3 – Bancada experimental; ensaio com cargas dinâmicas	25
Figura 3.4 - Sinais dos sensores de força e de deslocamento.....	26
Figura 3.5 – Propagação da trinca na viga	27
Figura 3.6 – Sinais e métrica de dano do sensor de impedância da viga do ensaio com carga dinâmico; Estado em repouso	27
Figura 3.7 – Sinais e métrica de dano do sensor de impedância da viga do ensaio com carga dinâmica.....	28
Figura 3.8 – Métrica de dano do sensor de impedância da viga do ensaio com carga dinâmica.....	28
Figura 4.1– Descrição geométrica da viga utilizada para o ensaio com campos eletromagnéticos.....	32
Figura 4.2– Aparato experimental para o ensaio de influência do campo eletromagnético	32
Figura 4.3– Viga de alumínio dentro da bobina geradora de campo contendo massa adicionada.....	33
Figura 4.4 – Sinais de impedância eletromecânica para diferentes campos eletromagnéticos sem nenhuma massa adicionada.....	34
Figura 4.5 – Sinais de impedância eletromecânica para cada um dos campos magnéticos aplicados	35

Figura 4.6 – Métrica de dano CCD para os experimentos de influência do campo eletromagnético	35
Figura 4.7 – Gráfico dos efeitos principais do meta-modelo	36
Figura 4.8 – Superfícies de resposta para os meta-modelos de regressão do ensaio de campos eletromagnéticos	38
Figura 4.9 – Geometria da viga utilizada para o ensaio de meios iônicos	38
Figura 4.10 – Descrição dos danos inseridos na estrutura	39
Figura 4.11 – Imagem da viga submersa na água	39
Figura 4.12 – Sinais de impedância eletromecânica ao longo do domínio da frequência para o ensaio iônico	40
Figura 4.13 – Métrica de dano RMSD para os experimentos de influência de meios iônicos.....	41
Figura 4.14 – Representação dos efeitos das variáveis do meta-modelo da influência do meio iônico	42
Figura 4.15 – Superfície de resposta para o meta-modelo de regressão do ensaio de meios iônicos.....	43
Figura 4.16 – Blindagem da pastilha de PZT para o ensaio iônico	44
Figura 4.17 – Estrutura com rebite para ensaio de meios iônicos.....	44
Figura 4.18 – Sinais de Impedância eletromecânica no domínio da frequência para o ensaio iônico com a pastilha piezelétrica blindada	45
Figura 4.19 – Métrica de dano RMSD para os experimentos de influência de meios iônicos com blindagem.....	46
Figura 4.20 – Representação dos efeitos das variáveis do meta-modelo da influência do meio iônico com blindagem	46
Figura 4.21 – Superfície de resposta para o meta-modelo de regressão do ensaio de meios iônicos com blindagem da pastilha de PZT	48
Figura 4.22 - Dimensionamento da viga e posicionamento das pastilhas piezelétricas com formato quadrado e circular	49
Figura 4.23 - Descrição da viga com pastilhas de PZT quadrada e circular	49
Figura 4.24 - Dimensionamento da placa e posicionamento das pastilhas piezelétricas com formatos quadrado e circular	49
Figura 4.25 - Descrição da placa com pastilhas de PZT quadrada e redonda	50
Figura 4.26 – Sinais de impedância para ensaio de formato das pastilhas de PZT	51
Figura 4.27 – Métrica de dano CCD para os experimentos de influência de formato das pastilhas de PZT.....	51

Figura 4.28 – Gráfico dos efeitos principais do meta-modelo para o ensaio da influência do formato da pastilha de PZT	52
Figura 4.29 – Superfícies de resposta para os meta-modelos de regressão do ensaio de formato das pastilhas de PZT	54
Figura 4.30 – Painel aeronáutico.....	55
Figura 4.31 – Sinais dos sensores de impedância do painel aeronáutico	55
Figura 4.32 – Gráficos da métrica de dano (painel aeronáutico)	56
Figura 4.33 – Janela de avião (estrutura em alumínio)	57
Figura 4.34 – Sinais dos sensores de impedância instalados na região da janela de avião.....	58
Figura 4.35 – Gráficos da Métrica de Dano (Janela de avião)	58
Figura 5.1 - Representação da impedância no plano complexo	60
Figura 5.2 - Circuito do método da ponte.....	61
Figura 5.3 - Circuito do método ressonante	61
Figura 5.4 - Circuito do método I-V	62
Figura 5.5 - Circuito do Método da Ponte Auto-Balanceada	63
Figura 5.6- Analisador de impedância HP 4194A.....	63
Figura 5.7 - Função DELAY TIME do analisador de impedância HP 4194A	64
Figura 5.8- Painel superior da placa de aquisição de dados USB-6259.....	65
Figura 5.9- Arquitetura básica do sistema proposto	67
Figura 5.10- Fluxograma do software baseado em magnitudes elétricas.....	68
Figura 5.11- Sinal quadrado pelo <i>hardware</i>	69
Figura 5.12- Valor médio da corrente de resposta	69
Figura 5.13- Tempo entre as bordas de descida dos sinais de excitação e resposta quando o PZT apresenta comportamento capacitivo	70
Figura 5.14 – Exemplo de medição da distância entre as bordas de dois sinais	70
Figura 5.15- Tempo entre as bordas de descida dos sinais de excitação e resposta quando o PZT apresenta comportamento indutivo	71
Figura 5.16 – Painel Frontal do Software	72
Figura 5.17 - Dimensões da viga e posições do PZT e do rebite.....	73
Figura 5.18 – Viga Rebitada com um PZT	73
Figura 5.19 – Sinais da parte real da impedância sem dano	74
Figura 5.20– Métrica de dano - Analisador de Impedância	75
Figura 5.21 – Métrica de dano - sistema alternativo.....	75
Figura 6.1 – Arquitetura das redes neurais probabilísticas	79
Figura 6.2 - Vigas rebitadas usadas para detecção e classificação de danos	86

Figura 6.3 – Sinais dos sensores de impedância das vigas rebitadas	87
Figura 6.4 – Métricas de Dano das vigas rebitadas	88
Figura 6.5– Graus de pertinência inicial para vigas rebitadas; Algoritmo <i>Fuzzy C-means</i>	91
Figura 6.6– Graus de pertinência inicial para vigas rebitadas; Algoritmo <i>Fuzzy C-means</i>	91
Figura 6.7– Centroides de cada um dos estados do PZT1 das vigas rebitadas; Algoritmo <i>Fuzzy C-means</i>	92
Figura 6.8– Graus de pertinência inicial para vigas rebitadas; Algoritmo de Gustafson-Kessel	93
Figura 6.9– Graus de pertinência final para vigas rebitadas; Algoritmo de Gustafson-Kessel	93
Figura 6.10– Centróides de cada um dos estados do PZT1 das vigas rebitadas; Algoritmo de Gustafson-Kessel	94
Figura 6.11– Graus de pertinência final para o PZTA das vigas rebitadas	95
Figura 6.12– Graus de pertinência final para o PZTB das vigas rebitadas	95
Figura 6.13 - Placas com parafuso usadas para detecção e classificação de danos	97
Figura 6.14 –Danos inseridos nas placas com parafuso	97
Figura 6.15 – Sinais de impedância das pastilhas de PZT das placas com parafuso	98
Figura 6.16 – Métricas de Dano das placas com parafuso	98
Figura 6.17– Graus de pertinência inicial para placas com parafuso; Algoritmo <i>Fuzzy C-means</i>	100
Figura 6.18– Graus de pertinência inicial para placas com parafuso; Algoritmo <i>Fuzzy C-means</i>	101
Figura 6.19– Centroides de cada um dos estados do PZT1 e do PZT2 das placas com parafuso; Algoritmo <i>Fuzzy C-means</i>	101
Figura 6.20– Graus de pertinência inicial para placas com parafuso; Algoritmo de Gustafson-Kessel	102
Figura 6.21– Graus de pertinência final para placas com parafuso; Algoritmo de Gustafson-Kessel	102
Figura 6.22 – Centroides das placas com parafuso; Algoritmo de Gustafson-Kessel	103
Figura 6.23– Graus de pertinência final para o PZTA das placas com parafuso ..	104
Figura 6.24 – Painel aeronáutico instrumentado com oito pastilhas de PZT	105

Figura 6.25 – Sinais dos sensores de impedância do painel aeronáutico	107
Figura 6.26 – Métricas de Dano do painel aeronáutico	107
Figura 6.27– Graus de pertinência inicial para o painel aeronáutico; Algoritmo C-means.....	110
Figura 6.28– Graus de pertinência final para o painel aeronáutico; Algoritmo C-means.....	111
Figura 6.29– Centroides de cada um dos estados do PZT7 do painel aeronáutico; Algoritmo <i>Fuzzy C-means</i>	111
Figura 6.30– Graus de pertinência inicial para o painel aeronáutico; Algoritmo de Gustafson-Kessel.....	112
Figura 6.31– Graus de pertinência final para o painel aeronáutico; Algoritmo de Gustafson-Kessel.....	113
Figura 6.32– Centroides de cada um dos estados do PZT8 do painel aeronáutico; Algoritmo de Gustafson-Kessel	114
Figura 6.33–Danos inseridos na janela aeronáutica.....	115
Figura 6.34 – Sinais dos sensores de impedância da janela da estrutura aeronáutica	116
Figura 6.35 – Métricas de Dano da janela da estrutura aeronáutica.....	117
Figura 6.36– Graus de pertinência inicial para a janela da estrutura aeronáutica; Algoritmo <i>Fuzzy C-means</i>	120
Figura 6.37– Graus de pertinência final para a janela da estrutura aeronáutica; Algoritmo <i>Fuzzy C-means</i>	121
Figura 6.38– Centroides de cada um dos estados do PZT7 da janela da estrutura aeronáutica; Algoritmo <i>Fuzzy C-mean</i>	121
Figura 6.39– Graus de pertinência inicial para a janela da estrutura aeronáutica; Algoritmo de Gustafson-Kessel	122
Figura 6.40– Graus de pertinência final para a janela da estrutura aeronáutica; Algoritmo de Gustafson-Kessel	124
Figura 6.41– Centroides de cada um dos estados do PZT7 da janela da estrutura aeronáutica; Algoritmo de Gustafson-Kessel.....	124
Figura 6.42 - Viga com parafusos	125
Figura 6.43 – Sinais e métrica de dano da viga com parafusos.....	125
Figura 6.44 – Graus de pertinência da pastilha de PZT da viga com parafusos; Algoritmo C-means	127
Figura 6.45– Centroides de cada um dos estados do PZT da viga com parafusos; Algoritmo <i>Fuzzy C-means</i>	128

Figura 6.46 – Graus de pertinência para a viga com parafusos; Algoritmo de Gustafson-Kessel	128
Figura 6.47– Centroides de cada um dos estados do PZT7 da viga com parafusos; Algoritmo de Gustafson-Kessel	129
Figura 6.48–Placa com 16 pastilhas de PZT	130
Figura 6.49 – Sinais de impedância; placa com 16 pastilhas de PZT	133
Figura 6.50 – Métrica de dano CCD para a placa com 16 pastilhas de PZT	134
Figura 6.51 – Graus de pertinência inicial para a placa com 16 PZTs; Algoritmo <i>Fuzzy C-means</i>	138
Figura 6.52 – Graus de pertinência inicial para a placa com 16 pastilhas de PZT; Algoritmo <i>Fuzzy C-means</i>	139
Figura 6.53– Centroides de cada um dos estados do PZT3 da placa com 16 PZTs; Algoritmo <i>Fuzzy C-means</i>	141
Figura 6.54– Graus de pertinência inicial para a placa com 16 pastilhas de PZT; Algoritmo de Gustafson-Kessel	142
Figura 6.55 – Graus de pertinência final placa 16 PZTs; Algoritmo de Gustafson-Kessel	144
Figura 6.56– Centroides de cada um dos estados do PZT4 da placa com 16 pastilhas de PZT; Algoritmo de Gustafson-Kessel	145

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Estados da viga; ensaio com carga dinâmica	26
Tabela 4.1. Experimentos realizados para o estudo da influência do campo magnético.....	33
Tabela 4.2. Concentração de sal de aquário na água	39
Tabela 4.3 – Definição dos experimentos para estudar a influência de meios iônicos.	40
Tabela 4.4 – Definição de experimentos para estudar a influência dos meios iônicos com a pastilha piezelétrica blindada	45
Tabela 6.1 – Estados das vigas Rebitadas.....	87
Tabela 6.2 – Descrição da Rede Neural Probabilística para Detectar Dano nas vigas rebitadas.....	89
Tabela 6.3 – Classificação do Conjunto de Teste das Redes Neurais Probabilísticas para cada PZT das vigas rebitadas.....	89
Tabela 6.4 – Redes Neurais Probabilísticas para Classificação Geral de Vigas com Rebite	90
Tabela 6.5 - Classificação do Conjunto de Teste da Rede Neural Probabilística Geral para vigas com rebites.....	90
Tabela 6.6 – Algoritmo <i>Fuzzy C-means</i> ; Viga rebitada	92
Tabela 6.7 – Algoritmo de Gustafson-Kessel; Viga rebitada	94
Tabela 6.8 – Medições do PZTA das vigas rebitadas	96
Tabela 6.9 – Medições do PZTB das vigas rebitadas	96
Tabela 6.10 – Estados das placas com parafusos	97
Tabela 6.11 – Classificação do Conjunto de Teste das Redes Neurais Probabilísticas para cada PZT das placas com parafusos.....	99
Tabela 6.12 – Redes Neurais Probabilísticas para Classificação Geral de placas com parafuso	99
Tabela 6.13 - Classificação do Conjunto de Teste da Rede Neural Probabilística Geral para as placas com parafuso	100
Tabela 6.14 – Algoritmo <i>Fuzzy C-means</i> ; Placas com parafuso.....	101

Tabela 6.15 – Algoritmo de Gustafson-Kessel; Placas com parafusos	103
Tabela 6.16 – Medições do PZTA das placas parafusadas.....	104
Tabela 6.17 – Estados do painel aeronáutico	105
Tabela 6.18 – Classificação do Conjunto de Teste das Redes Neurais Probabilísticas para cada pastilha de PZT do painel aeronáutico	108
Tabela 6.19 – Algoritmo <i>Fuzzy C-means</i> ; Painel aeronáutico	111
Tabela 6.20 – Algoritmo de Gustafson-Kessel; Painel aeronáutico.....	113
Tabela 6.21 – Estados do painel aeronáutico	114
Tabela 6.22 – Classificação do Conjunto de Teste das Redes Neurais Probabilísticas para cada pastilha de PZT da janela da estrutura aeronáutica	118
Tabela 6.23 – Algoritmo <i>Fuzzy C-means</i> ; janela da estrutura aeronáutica.....	121
Tabela 6.24 – Algoritmo de Gustafson-Kessel; Janela da estrutura aeronáutica .	123
Tabela 6.25 - Estados da Viga com Parafusos	125
Tabela 6.26 – Rede Neural Probabilística para localização de dano	126
Tabela 6.27 – Resultados do Conjunto de Teste da Rede Neural Probabilística para a viga com parafusos	126
Tabela 6.28 – Algoritmo <i>Fuzzy C-means</i> ; viga com parafusos.....	127
Tabela 6.29 – Algoritmo de Gustafson-Kessel; viga com parafusos	128
Tabela 6.30 - Estados da placa com 16 PZTs	130
Tabela 6.31 – Classificação do Conjunto de Teste das Redes Neurais Probabilísticas para cada pastilha de PZT da placa com 16 PZTs	135
Tabela 6.32 – Algoritmo <i>Fuzzy C-means</i> ; placa com 16 pastilhas de PZT	140
Tabela 6.33 – Algoritmo <i>Fuzzy C-means</i> ; Placa com 16 pastilhas de PZT.....	144
Tabela AI.1 – Gráficos dos centroides de cada um dos estados das pastilhas de PZT das vigas rebitadas; Algoritmo <i>Fuzzy C-means</i>	161
Tabela AI.2 – Gráficos dos centroides de cada um dos estados das pastilhas de PZT das vigas rebitadas; Algoritmo de Gustafson-Kessel.....	162
Tabela AI.3 – Gráficos dos centroides de cada um dos estados das pastilhas de PZT do painel aeronáutico; Algoritmo <i>Fuzzy C-means</i>	163
Tabela AI.4 – Gráficos dos centroides de cada um dos estados das pastilhas de PZT do painel aeronáutico; Algoritmo de Gustafson-Kessel	165
Tabela AI.5 – Gráficos dos centroides de cada um dos estados das pastilhas de PZT da janela da estrutura aeronáutica; Algoritmo <i>Fuzzy C-means</i>	167
Tabela AI.6 – Gráficos dos centroides de cada um dos estados das pastilhas de PZT da janela da estrutura aeronáutica; Algoritmo de Gustafson-Kessel.....	168

Tabela AI.7 – Gráficos dos centroides de cada um dos estados das pastilhas de PZT da placa com 16 PZTs, Algoritmo <i>Fuzzy C-means</i>	170
Tabela AI.8 – Gráficos dos centroides de cada um dos estados das pastilhas de PZT da placa com 16 PZTs, Algoritmo de Gustafson-Kessel	177

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANOVA	Análise de Variância.
ASD	Diferença Média Quadrada.
CC	Coeficiente de Correlação.
CCD	Desvio do Coeficiente de Correlação.
END	Ensaio não Destrutivo.
FEMEC	Faculdade de Engenharia Mecânica
FFT	Função de Transferência
INCT	Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia
MAPD	Desvio Percentual da Média Absoluta.
PVDF	Fluorido de Polivinilideno.
PZT	Titanato-zirconato de Chumbo.
RMSD	Desvio Médio da Raiz Quadrada.
SHM	Monitoramento de Integridade Estrutural.
UFU	Universidade Federal de Uberlândia

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Constante Geométrica do PZT
B	Campo eletromagnético
C	Capacitância
C_m	Flexibilidade Mecânica
D	Deslocamento
E	Campo elétrico
d	Distancia ao centroide
d_{ij}	Modulo Piezelétrico
F	Força
I	Corrente elétrica
K	Rigidez
L	Indutância
M	Metrica de dano
M_m	Massa Mecânica
n	Número Total de Pontos Freqüenciais
N	Número de espiras
R_m	Amortecimento mecânico
R	Resistência elétrica
$\text{Re}(Z_{1,i})$	Parte Real da Impedância da Medição sem Dano (<i>Baseline</i>) em uma Freqüência i
$\text{Re}(Z_{2,i})$	Parte Real da Impedância em uma Freqüência i para uma nova Configuração da Estrutura
$\text{Re}(\bar{Z}_1)$	Média da Parte Real da Impedância da Medição sem Dano (<i>Baseline</i>) em uma Freqüência i
$\text{Re}(\bar{Z}_2)$	Média da Parte Real da Impedância em uma Freqüência i para uma nova Configuração da Estrutura
R_m	Amortecimento Mecânico
S_{z_i}	Desvio Padrão do Sinal de Impedância da Referência

S_{Z_2}	Desvio Padrão do Sinal de Impedância a ser Comparado
$S_{Z_1,i}$	Desvio Padrão de cada Ponto do Sinal de Referência
t	Tempo
v	Velocidade
V	Voltagem
X	Reatância
X_c	Reatância Capacitiva
X_L	Reatância Indutiva
Y	Admitância Elétrica
\hat{Y}_{xx}^E	Módulo de Young Complexo do PZT com Campo Elétrico Nulo
Z	Impedância elétrica
Z_a	Impedância Mecânica do PZT
Z_m	Impedância Mecânica
Z_s	Impedância Mecânica da Estrutura
ε	Deformação
$\bar{\varepsilon}_{33}^T$	Constante Dielétrica com Deformação Nula
σ	Tensão
δ	Fator de Perda Dielétrica do PZT
ω	Frequência
μ	Constante magnética

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	I
LISTA DE TABELAS	VII
SUMÁRIO	XV
CAPÍTULO I	1
INTRODUÇÃO	1
1.1. <i>Objetivo da Tese</i>	<i>2</i>
1.2. <i>Estrutura do Trabalho</i>	<i>4</i>
CAPÍTULO II	7
MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL BASEADO NA IMPEDÂNCIA	
ELETROMECAÂNICA.....	7
2.1. <i>Introdução</i>	<i>7</i>
2.2. <i>Conceitos de Impedância Elétrica e Mecânica</i>	<i>7</i>
2.2.1. <i>Impedância mecânica</i>	<i>7</i>
2.2.2. <i>Impedância elétrica</i>	<i>9</i>
2.3. <i>Materiais Piezelétricos</i>	<i>10</i>
2.4. <i>Método de Integridade Estrutural Baseado em Impedância Eletromecânica</i>	<i>12</i>
2.4.1. <i>Comparações do método da impedância com outras técnicas de END</i>	<i>20</i>
CAPÍTULO III	23
MONITORAMENTO DO CRESCIMENTO DE TRINCAS EM UMA VIGA DE ALUMÍNIO	
SUBMETIDA A CARGAS DINÂMICAS	23
3.1. <i>Introdução</i>	<i>23</i>
3.2. <i>Ensaio de Estrutura com Carga Dinâmica</i>	<i>23</i>
CAPÍTULO IV	29
INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS AMBIENTAIS E GEOMÉTRICOS NO	
MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL BASEADO NA IMPEDÂNCIA	
ELETROMECAÂNICA.....	29
4.1. <i>Introdução</i>	<i>29</i>
4.2. <i>Técnicas de Meta-modelagem Estatística</i>	<i>30</i>
4.3. <i>Influência de Campos Magnéticos no Método da Impedância Eletromecânica</i>	<i>31</i>

4.4. <i>Influência de meios iônicos</i>	38
4.4.1. Ensaio iônico com a pastilha piezelétrica blindada.....	44
4.5. <i>Influência do Formato do PZT</i>	48
4.6. <i>Influência da Posição do Sensor</i>	54
CAPÍTULO V	59
SISTEMA DE MEDIÇÃO DE IMPEDÂNCIA ELETROMECÂNICA PARA	
MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL BASEADO EM IMPEDÂNCIA	
ELETROMECÂNICA	59
5.1. <i>Introdução</i>	59
5.2. <i>Impedância Elétrica</i>	59
5.3. <i>Métodos para Medição de Impedância</i>	60
5.3.1. Método da ponte (Bridge Method).....	61
5.3.2. Método ressonante (Resonant Method).....	61
5.3.3. Método I-V.....	62
5.3.4. Método da ponte auto-balanceada.....	62
5.4. <i>Medição de Impedância no Método de Monitoramento de Integridade Estrutural</i>	
<i>Baseado na Impedância Eletromecânica</i>	63
5.5. <i>Sistema de Medição de Impedância Proposto</i>	65
5.6. <i>Ensaio para Avaliação do Sistema</i>	73
5.6. <i>Projeto EMBRAER</i>	76
CAPÍTULO VI	77
TÉCNICAS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL APLICADAS AO MÉTODO DE	
MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL BASEADO EM IMPEDÂNCIA	
ELETROMECÂNICA PARA CLASSIFICAÇÃO DE DANOS	77
6.1. <i>Introdução</i>	77
6.2. <i>Redes Neurais Artificiais</i>	77
6.2.1. Rede neural artificial probabilística	79
6.3. <i>Análises de Cluster</i>	80
6.3.1. Técnicas hierárquicas aglomerativas	80
6.3.2. Técnicas de agrupamento não hierárquicas	81
6.4. <i>Estudo de Caso # 1: Vigas Rebitadas</i>	86
6.4.1. Rede neural probabilística nas vigas rebitadas para classificação de danos ...	88
6.4.2. Análise de cluster nas vigas rebitadas para classificação de danos.....	90
6.5. <i>Estudo de Caso # 2: Placas com Corrosão Localizada</i>	96
6.5.1. Rede neural probabilística nas placas com parafuso para classificação de	
danos.....	98

6.5.2. Análise de cluster nas placas com parafusos para classificação de danos	100
6.6. <i>Estudo de Caso # 3: Painel Aeronáutico</i>	104
6.6.1. Rede neural probabilística para o painel aeronáutico para classificação de danos	108
6.6.2. Análise de cluster para o painel aeronáutico para classificação de danos	109
6.7. <i>Estudo de Caso #4: Janela Aeronáutica</i>	114
6.7.1. Rede neural probabilística para a janela da estrutura aeronáutica para classificação de danos	117
6.7.2. Análise de cluster para a janela da estrutura aeronáutica para classificação de danos	119
6.8. <i>Estudo de Caso #5: Posição do Dano</i>	124
CAPÍTULO VII	147
CONCLUSÃO	147
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	153
ANEXO I	161
CENTROIDES DOS ALGORITMOS DE ANÁLISE DE CLUSTER FUZZY	161

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Danos que ocorrem normalmente nos equipamentos industriais e nas estruturas em geral podem estar associados a diferentes fatores como o atrito, fadiga, impacto, concentração de tensão e crescimento de trinca, dentre outras razões. Para o adequado funcionamento de um sistema de engenharia, a falha deve ser localizada e reparada, oportunamente. Um dos processos mais ambiciosos da Engenharia atual é o monitoramento da integridade estrutural em tempo real de componentes de elevado custo ou de grande responsabilidade para o sistema considerado.

O monitoramento de integridade estrutural (SHM - *Structural Health Monitoring*) é o processo de detecção de dano dentro do contexto de aplicações voltadas para várias áreas da engenharia, tais como, aeroespacial, civil e mecânica, principalmente. Uma das finalidades mais importantes é prever e aumentar a vida útil de um sistema de engenharia. Desta forma, a criação ou aperfeiçoamento de técnicas que aumentem a precisão, robustez e confiabilidade dos processos de monitoramento são altamente desejáveis, sendo objeto de vários estudos tanto no meio industrial quanto no meio acadêmico (FARRAR; LIEVEN; BEMENT, 2005). Dessa forma, deseja-se aumentar a segurança e a confiabilidade das estruturas, além de reduzir custos operacionais e de manutenção. A essência do SHM é desenvolver sistemas auto-suficientes para monitoramento contínuo, inspeção e detecção de danos nas estruturas, exigindo-se o mínimo de intervenção humana.

Os métodos de avaliação de integridade estrutural, geralmente denominados como Ensaios Não Destrutivos (END), são caracterizados por manter, após a realização do ensaio de avaliação, as mesmas características da estrutura determinadas anteriormente ao ensaio (BRAY; McBRIDE, 1992). Na área de projetos, geralmente, estas técnicas são empregadas no diagnóstico e monitoramento de danos estruturais. A capacidade de avaliação de danos pode ser vista de duas formas: (1) monitorar as mudanças de sua condição e, se necessário, interromper a operação do equipamento antes que tais condições se deteriore;

e (2) garantir que o dano iniciado não se estenda para uma situação de risco (FURTADO, 2004).

Deve-se salientar que técnicas destrutivas aplicadas na manutenção de máquinas ou equipamentos podem ser tão precisas ou até melhores que as técnicas não destrutivas para avaliação de integridade estrutural. Mas, devido à necessidade de substituição de componentes a cada avaliação, as técnicas não destrutivas obviamente não são as mais indicadas em muitas aplicações. Em alguns casos, uma parada do equipamento se faz necessária para a aplicação de uma das técnicas não destrutivas, porém sem que haja necessidade obrigatória da substituição de componentes após a avaliação (BRAY; McBRIDE, 1992). Por causa deste procedimento, tem ocorrido naturalmente um aumento na confiabilidade e segurança do processo, uma vez que os próprios componentes em uso passaram a ser avaliados. Com a expansão da tecnologia, tornou-se importante a criação de sistemas de engenharia cujos projetos têm que prever a futura necessidade de utilização de técnicas não destrutivas para monitorar em funcionamento (BRAY; McBRIDE, 1992).

Alguns ensaios não destrutivos utilizados pela indústria são os seguintes: Inspeção visual, testes radiográficos, ensaios por ultrassom, técnica de ondas de Lamb, líquidos penetrantes, medições de propriedades dinâmicas, partículas magnéticas, vácuo comparativo, além do método de monitoramento de integridade estrutural baseado na impedância eletromecânica, sendo este último o tema deste trabalho (PALOMINO, 2008).

Uma técnica que vem sendo bastante aplicada na indústria aeronáutica é a do vácuo comparativo. Esta, funciona através da utilização de sensores que detectam pequenas mudanças de pressão quando uma rachadura ou trinca passa ocorre na região onde se encontra um canal capilar mantido sob vácuo. Esta técnica inclui quatro elementos principais: uma bomba de vácuo, impedância de fluxo calibrado, canais capilares mantidos sob vácuo, e um monitor de pressão diferencial. Em situação de normalidade, o vácuo é mantido por meio de um duto de conexão de alta impedância ligado a uma fonte de vácuo constante. Qualquer alta impedância do fluxo de ar através do duto cria uma queda de pressão que é detectada pelo sensor de pressão diferencial (WISHAW; BARTON, 2001).

1.1. Objetivo da Tese

Esta tese de doutorado se insere no contexto de um projeto financiado pela FINEP com participação da EMBRAER (CT-AERO), cujo objetivo é o de desenvolver metodologias de monitoramento de integridade estrutural baseadas em técnicas tais como a da impedância eletromecânica, emissão acústica, e vácuo comparativo. A intenção é aplicar

estas técnicas em estruturas aeronáuticas, conforme interesse da EMBRAER. Além disso, o trabalho está inserido dentro do INCT de Estruturas Inteligentes em Engenharia, aprovado em Dezembro de 2008. Lembra-se que a medição da impedância eletromecânica é feita com a utilização de materiais ditos inteligentes, no caso, as cerâmicas piezelétricas, caracterizados pelo aproveitamento dos chamados efeitos piezelétricos direto e inverso, permitindo serem utilizadas simultaneamente como sensor e atuador. Tipicamente, foram utilizadas pastilhas de PZT (titanato zirconato de chumbo).

O Laboratório de Mecânica de Estruturas Prof. José Eduardo Tannús Reis, da Faculdade de Engenharia Mecânica da UFU, iniciou suas atividades de pesquisa com materiais e estruturas inteligentes há cerca de doze anos. Na área de SHM foram já realizados alguns trabalhos em nível de pós-graduação, podendo ser mencionados: o trabalho de mestrado de Moura (2004), dedicado à utilização de técnicas estatísticas acopladas ao método da impedância eletromecânica no monitoramento de falhas em estruturas. Outro trabalho também em nível de mestrado, Palomino (2008), aborda principalmente as diferentes métricas que podem ser utilizadas para quantificar as medições de impedância eletromecânica, particularmente em estruturas rebitadas. A tese de doutorado de Moura (2008) apresenta um estudo bastante extenso da utilização de técnicas de SHM, incluindo técnicas de classificação de falhas, sendo mostradas várias aplicações em engenharia aeronáutica e aeroespacial. Além do uso da Impedância eletromecânica, o trabalho relata ainda uma primeira aplicação das ondas de Lamb na identificação de falhas causadas por corrosão metálica, no contexto da Universidade Federal de Uberlândia. A dissertação de mestrado de Tsuruta (2008) volta-se para materiais compostos, em particular sob a influência de impacto, onde técnicas de SHM foram utilizadas para monitorar situações de risco. O último trabalho concluído na UFU, Leucas (2009), em nível de mestrado, apresenta um estudo do desempenho das técnicas de impedância eletromecânica e das ondas Lamb aplicadas à detecção de danos em estruturas metálicas rebitadas, como vigas e painéis aeronáuticos. Estas dissertações e teses geraram várias publicações de periódicos e artigos de congressos científicos, sendo muitos deles incluídos nas citações bibliográficas desta tese.

O objetivo principal desta tese é aplicar técnicas de inteligência artificial, tais como as redes neurais artificiais e análises de cluster para classificar danos detectados pelo método de integridade estrutural baseado em impedância eletromecânica. Para poder obter um número de medições suficientes, de forma a permitir a aplicação destas técnicas, foi necessário desenvolver um sistema de medição automático capaz de armazenar grandes quantidades de dados. Para isto foram desenvolvidas ferramentas de software e de hardware, envolvendo principalmente um código computacional de monitoramento

construído numa plataforma *LabView*, operação de uma placa de aquisição de dados da *National Instruments* e um circuito de condicionamento de sinais especialmente desenvolvido.

Um questionamento associado ao uso da técnica de monitoramento baseada em impedância eletromecânica no contexto desta tese tem a ver com a influência das condições ambientais sobre o método proposto. Sendo assim, foram realizados vários ensaios com o objetivo de estudar a influência das variações das condições ambientais e até mesmo do formato do sensor-atuador utilizado sobre os sinais de impedância eletromecânica.

Ainda, para complementar o trabalho de mestrado da mesma autora (PALOMINO, 2008), foi realizado um ensaio em uma estrutura submetida a cargas dinâmicas, com o objetivo de avaliar a viabilidade da aplicação do método de impedância eletromecânica em estruturas reais submetidas a este tipo de carregamento.

1.2. Estrutura do Trabalho

No capítulo 1 é feita uma introdução do tema Monitoramento de Integridade Estrutural e são apresentados, de forma geral, o objetivo do trabalho e os temas tratados nos diferentes capítulos desta tese.

No capítulo 2 são abordados os conceitos fundamentais do Método de Integridade Estrutural Baseado na impedância eletromecânica. Neste sentido, é realizada uma revisão bibliográfica do estado da arte desta técnica.

No capítulo 3 o método de monitoramento de integridade estrutural baseado na impedância eletromecânica é aplicado para monitorar o crescimento de trinca em uma viga de alumínio submetida a cargas dinâmicas. As medições de impedância foram tomadas tanto para a estrutura em repouso, como para a estrutura sob carregamento dinâmico.

No capítulo 4 é apresentado um estudo das influências dos meios eletromagnéticos e iônicos nas medições de impedância eletromecânica, sendo estas avaliadas por meio de técnicas estatísticas como a análise de variância (ANOVA) e meta-modelagem. Além das influências ambientais também se apresenta um estudo da influência do formato da pastilha de PZT e de sua posição na estrutura sobre os resultados obtidos no monitoramento de dano estrutural quando do uso do método da impedância eletromecânica.

No capítulo 5 se descreve um sistema de medição de impedância eletromecânica desenvolvido para o método de integridade estrutural baseado na impedância eletromecânica. Este sistema utiliza medições de fasores e serve-se da plataforma *LabView* para processar a informação e apresentá-la em um entorno amigável ao usuário.

No capítulo 6, técnicas de inteligência artificial como as redes neurais artificiais e análises de cluster são aplicadas para classificar danos por meio dos sinais medidos de impedância eletromecânica, tanto para estruturas mecânicas simples (viga e placa), como para estruturas aeronáuticas reais (painel aeronáutico e janela de aeronave). Os danos que foram estudados nestas estruturas são perda de rebite, trinca e corrosão, encontradas tipicamente em estruturas de material metálico.

O capítulo 7 encerra o trabalho, apresentando as principais ideias e conclusões obtidas, assim como perspectivas futuras para este campo de pesquisa.

CAPÍTULO II

MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL BASEADO NA IMPEDÂNCIA ELETROMECÂNICA

2.1. Introdução

Neste capítulo apresentam-se os fundamentos teóricos do método de monitoramento estrutural baseado na impedância eletromecânica. Inicialmente são apresentadas as definições de Impedância Mecânica e Impedância Elétrica para, em seguida, apresentar um resumo dos materiais piezelétricos. Como última parte deste capítulo apresenta-se uma revisão bibliográfica do estado da arte do método de monitoramento de integridade estrutural baseado na impedância eletromecânica.

2.2. Conceitos de Impedância Elétrica e Mecânica

2.2.1. Impedância mecânica

A impedância mecânica de um ponto de uma estrutura é a razão entre a força aplicada neste ponto e a velocidade resultante medida no mesmo ponto, Eq. (2.1) (MASSOUD, 1985).

$$Z_m = \frac{F}{v}, \quad (2.1)$$

sendo Z_m a impedância mecânica, F a força e v a velocidade.

A impedância mecânica é uma grandeza complexa que expressa quanto a estrutura resiste ao movimento quando da aplicação de uma força, sendo seu recíproco a mobilidade (ou admitância mecânica). A impedância mecânica de uma estrutura varia com a frequência.

Nos sistemas mecânicos serão manipuladas três grandezas básicas relacionadas com a impedância mecânica:

- Amortecimento Mecânico (R_m): está associado à parte real da impedância, sendo responsável por dissipar toda a potência mecânica entregue ao sistema. Um dispositivo mecânico se comporta como uma resistência mecânica quando, ao ser acionado por uma força, esta é proporcional à velocidade, Eq (2.2).

$$F(t) = R_m v(t) . \quad (2.2)$$

No Sistema Internacional de Unidades, o amortecimento mecânico é dado por $N \cdot s / m$

- 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. (2.3).

$$F(t) = M_m \frac{dv(t)}{dt} . \quad (2.3)$$

Sua unidade no SI (sistema internacional) é o kg.

- Flexibilidade Mecânica (C_m): está relacionada com a parte imaginária 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. (2.4).

$$x(t) = C_m F(t) . \quad (2.4)$$

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. (2.5).

$$K = \frac{1}{C_m} . \quad (2.5)$$

2.2.2. Impedância elétrica

É denominada como impedância elétrica a resistência que um circuito ou componente elétrico oferece à passagem da corrente alternada, Eq (2.6)

$$Z = \frac{V}{I}, \quad (2.6)$$

sendo Z a impedância elétrica, V a voltagem e I a corrente elétrica.

Trata-se de uma grandeza complexa, e, portanto, dividida também em duas partes: resistência (parte real) e reatância elétrica (parte imaginária). 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 (R) é um valor escalar, ou seja, é representada em uma escala unidimensional. Assim, para um circuito de corrente contínua, a corrente diminui conforme a resistência aumenta, obedecendo à 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 para a resistência elétrica (GIBILISCO, 2002).

Reatância elétrica (X) é a oposição oferecida à passagem da corrente alternada, podendo apresentar-se tanto na forma indutiva como capacitiva em um circuito elétrico. Constitui-se então numa componente da impedância de um circuito que não está associada a uma resistência pura. Quando a Reatância é menor que zero, a reatância é capacitiva (X_c) e o seu valor em ohms é dado pela Eq.(2.7):

$$X_c = \frac{1}{2\pi\omega C}, \quad (2.7)$$

onde C é a capacitância expressa em Farad.

Por outro lado, quando a Reatância é maior que zero, a reatância é indutiva (X_L) e o seu valor em ohms é dado pela Eq.(2.8):

$$X_L = 2\pi\omega L, \quad (2.8)$$

onde L é a indutância expressa em Henries.

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

2.3. Materiais Piezelétricos

Em termos gerais, os materiais que apresentam a propriedade de mudar suas dimensões em consequência da aplicação de uma voltagem são chamados de materiais piezelétricos (efeito direto). Tais materiais também apresentam o chamado efeito inverso, ou seja, ao ser aplicada uma deformação mecânica, resulta uma mudança em suas propriedades elétricas. Consequentemente, tais materiais podem ser usados tanto como atuadores, como sensores, ou mesmo como sensores e atuadores ao mesmo tempo. O material piezelétrico mais conhecido é o titanato-zirconato de chumbo, cuja sigla PZT vem do inglês *lead-zirconate-titanate*.

Os sensores e atuadores piezelétricos são obtidos pela polarização do material que, submetido a campos elétricos elevados em altas temperaturas (acima da temperatura de Curie), adquire características piezelétricas (BANKS; SMITH; WANG, 1996). Quando o material piezelétrico é usado numa temperatura inferior à temperatura de Curie e se lhe aplica um pequeno campo elétrico, observa-se uma expansão macroscópica ao longo do eixo de polarização e uma contração perpendicular a este. Deve-se salientar que, se o material piezelétrico for exposto a temperaturas superiores à de Curie, ele perde suas propriedades piezelétricas.

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, como mostra a Eq. (2.9)

$$\varepsilon_{jj} = d_{ij} \frac{V}{th}, \quad (2.9)$$

sendo V a voltagem aplicada na direção i e th a espessura do PZT.

Conforme anteriormente comentado, a temperatura de trabalho do PZT é abaixo da temperatura de Curie. Se ao PZT é aplicado um campo elétrico com uma temperatura acima da temperatura de Curie, os dipolos voltam a ter direções aleatórias (perde a polarização). Em temperaturas muito baixas também pode ocorrer que, ao aplicar um campo elétrico, os dipolos se desalinhem, comprometendo as propriedades do material.

As pastilhas de PZT têm temperaturas de Curie acima de 300 °C e não são de fácil polarização, exceto em altas temperaturas. Os materiais piezelétricos mais flexíveis (por exemplo, o PVDF - Fluorido de Polivinilideno) têm temperaturas de Curie abaixo de 200 °C e são mais fáceis de serem polarizados.

Utilizando o formalismo termodinâmico proposto por Devonshire (1954) citado por Bank, Smith e Wang (1996), é possível encontrar as relações constitutivas como procedentes da energia total do sistema, ou seja, compreender as relações fenomenológicas dos efeitos piezelétricos diretos e inversos. Entretanto, embora a resposta a aplicações estruturais típicas seja muito próxima da linear, ao se trabalhar com níveis de excitação elevados os elementos piezelétricos revelam um efeito de histerese (não linear). Desta forma, os trabalhos que geralmente são desenvolvidos utilizando estes elementos, são restritos às leis lineares formuladas por Voigt em 1910 (BANKS; SMITH; WANG, 1996), conforme podem ser observadas pelas Eqs. (2.10) e (2.11) que representam os efeitos direto e inverso, respectivamente.

$$D_m = \varepsilon_{mn}^T E_n + d_{mkl} \sigma_{kl}, \quad (2.10)$$

$$e_{ij} = s_{ijkl} \sigma_{kl} + d_{mij} E_m, \quad (2.11)$$

nas quais 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 piezoelétrica, enquanto a deformação no material e é relacionada à tensão σ através da complacência s . Os subscritos que aparecem nas equações acima decorrem da notação indicial.

É importante ressaltar que é utilizado o efeito direto do material ao utilizá-lo como sensor, já que o efeito inverso é responsável pela descrição do material como atuador. Assim, é possível perceber a capacidade destes materiais para aplicações de controle e detecção de danos, através de um único componente.

Diversos tipos de materiais exibem propriedades piezelétricas. Dentre os mais utilizados, pode-se citar:

- Cerâmicas piezelétricas, em particular as cerâmicas de PZT. Por se tratar de um material cerâmico, sua rigidez é geralmente superior à da estrutura na qual ele está inserido, resultando numa conversão eletromecânica de grande eficiência (comparadas com PVDF), tornando-o adequado para aplicações como atuadores (BANKS; SMITH; WANG, 1996). Sua aplicação em controle vem sendo muito

explorada por ser o PZT efetivo em grandes faixas de frequências. O PZT é ainda recomendado como atuador auto-sensível, particularmente no controle e identificação de falhas (BANKS; SMITH; WANG, 1996).

- Polímeros piezelétricos, como o PVDF (Fluorido de Polivinilideno), cujo uso como atuador não é adequado, uma vez que seus coeficientes de acoplamento eletromecânico são bem menores do que os das pastilhas de PZT. Em contrapartida, o potencial dielétrico dos PVDFs é cerca de vinte vezes superior ao dos PZTs, podendo ser expostos a campos elétricos muito maiores (BANKS; SMITH; WANG, 1996). Estes são utilizados comumente como sensores, lembrando ainda que seu custo é bem inferior ao do verificado para as pastilhas de PZT.

2.4. Método de Integridade Estrutural Baseado em Impedância Eletromecânica

A técnica de monitoramento da integridade da estrutura baseado na impedância eletromecânica utiliza a propriedade piezelétrica dos materiais, constituindo-se num método de avaliação não destrutivo (PARK *et al*, 2003). O conceito básico desta técnica é o monitoramento da variação da impedância mecânica da estrutura causada pela presença de danos. Como a medição direta da impedância mecânica da estrutura é uma tarefa difícil, o método utiliza materiais piezelétricos colados ou incorporados à estrutura, permitindo medir a impedância elétrica. Esta se relaciona com a impedância mecânica da estrutura, que é afetada pela presença do dano. Evidentemente, considera-se que o material piezelétrico utilizado como sensor-atuador para medição da impedância elétrica permanece íntegro durante o ensaio.

O desenvolvimento teórico que propôs o uso da impedância como técnica para monitoramento estrutural foi inicialmente proposto por Liang; Sun; Rogers (1994) e posteriormente ampliado por Chaudhry *et al* (1995, 1996), Sun *et al* (1995), Park *et al* (1999a), Park; Cudney; Inman (1999b, 2000a, 2000b, 2001); Park *et al* (2003), Giurgiutiu e Zagrai (2000, 2002), Giurgiutiu; Zagrai; Bao (2002), Giurgiutiu *et al* (2003), Soh *et al* (2000), Bhalla; Naidu; Soh (2002), Bhalla *et al* (2002), Moura e Steffen (2004), Pears (2006), Moura (2008), Raghavan e Cesnik (2008), Liu e Paurobally (2009), Grisso e Inman (2010), Baptista; Filho; Inman (2010) e Neto *et al* (2011).

O método de monitoramento da integridade estrutural utiliza sensores de impedância para monitorar as mudanças na rigidez, amortecimento e massa da estrutura. O sensor de impedância consiste em uma pequena pastilha piezelétrica, usualmente menor que 25x25x0.1mm, que é usada para medir diretamente a resposta dinâmica local.

Como visto anteriormente, os materiais piezelétricos atuam produzindo uma mudança na voltagem elétrica quando sofrem uma deformação mecânica. Inversamente, uma deformação mecânica é produzida quando é aplicado um campo elétrico. O método de monitoramento baseado na impedância utiliza simultaneamente ambas as versões, direta e inversa, do efeito piezelétrico para obter medições de impedância (PARK *et al*, 2003).

Quando o PZT é colado na estrutura e é aplicada uma pequena diferença de potencial elétrico, geralmente de 1V (RAJU,1997), uma deformação é produzida na pastilha de PZT e na interface de sua união com a estrutura (efeito piezelétrico inverso). Usando uma frequência de excitação alta (do ponto de vista dos ensaios típicos de análise modal), a resposta dinâmica da estrutura é representativa somente a área vizinha ao local de instalação do sensor. A resposta mecânica da vibração da região onde se encontra a pastilha de PZT é transmitida pelo sensor na forma de uma resposta elétrica (efeito piezelétrico direto). Quando uma falha mecânica causa mudanças na resposta dinâmica (dada pelo sinal de impedância), isto se manifesta na resposta elétrica do PZT.

O modelo eletromecânico que quantifica e descreve o processo de medição acima mencionado é visto na Fig.2.1 para um sistema de um grau de liberdade.

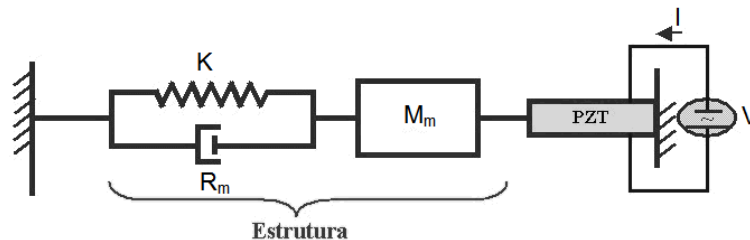


Figura 2.1- Modelo eletromecânico do método de integridade estrutural baseado na impedância eletromecânica

A partir deste sistema, Liang; Sun; Rogers (1994) demonstraram que a admitância $Y(\omega)$ do atuador PZT pode ser escrita como uma função combinada da impedância mecânica do atuador PZT, $Z_a(\omega)$, e da estrutura, $Z_s(\omega)$, assim como mostra a Eq. (2.12):

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

onde:

Y é a admitância elétrica do atuador.

Z_a é a impedância mecânica do PZT

Z_s é a impedância mecânica da estrutura

\hat{Y}_{xx}^E é o modulo complexo de Young do PZT com campo elétrico nulo.

d_{3x} é a constante de acoplamento do PZT em uma direção x com deformação nula.

$\bar{\epsilon}_{33}^T$ é a constante dielétrica com deformação nula.

δ é o fator de perda dielétrica do PZT.

a é uma constante geométrica do PZT.

Supondo que as propriedades mecânicas do PZT não variem ao longo do tempo de monitoramento, a Eq. (2.12) mostra que a impedância elétrica do PZT é diretamente relacionada com a impedância mecânica da estrutura. Danos eventuais ocasionam mudanças na impedância mecânica da estrutura, alterando as características dinâmicas locais. Por isso, os sinais de impedância elétrica do PZT são utilizados para o monitoramento da integridade estrutural do sistema representado pela impedância mecânica da estrutura.

Deve ser notado que a admitância elétrica é basicamente capacitiva, mostrando que a parte imaginária é o termo dominante. Este termo imaginário é mais sensível à variação de temperatura do que a parte real. Desta forma, a parte real do sinal é geralmente utilizada na maioria das aplicações (RAJU, 1997). Trabalhos mais recentes, entretanto, usam tanto a parte real como a parte imaginária do sinal para fins de monitoramento (PEAIRS, 2006).

A sensibilidade da técnica em detectar danos estruturais está relacionada com a banda de frequência selecionada. Um dano muito pequeno na estrutura não provoca mudanças significativas nas propriedades de rigidez, massa e amortecimento da estrutura. Portanto, é necessário um comprimento de onda de excitação suficientemente pequeno, de forma que consiga detectar o dano. Segundo a literatura, a faixa de frequência tipicamente usada no método de impedância é de 30 kHz a 250 kHz. Tal faixa é determinada geralmente por um método de tentativa e erro. Entretanto, Moura e Steffen (2004) apresentam um procedimento estatístico que pode ser utilizado para obtenção das melhores configurações para os ensaios de impedância eletromecânica. No método baseado na impedância as faixas de frequência que contêm de 20 a 30 picos são geralmente as escolhidas, pois o número de picos implica uma resposta dinâmica mais rica ao longo da faixa de frequência. Como exemplo, pode-se observar a Fig. 2.2, onde se apresenta a resposta dinâmica na faixa de frequência entre 10 kHz e 250 kHz medida em uma viga de alumínio. Destacam-se duas faixas onde maior número de picos é verificado (10 kHz a 45 kHz e 100 kHz a 175 kHz).

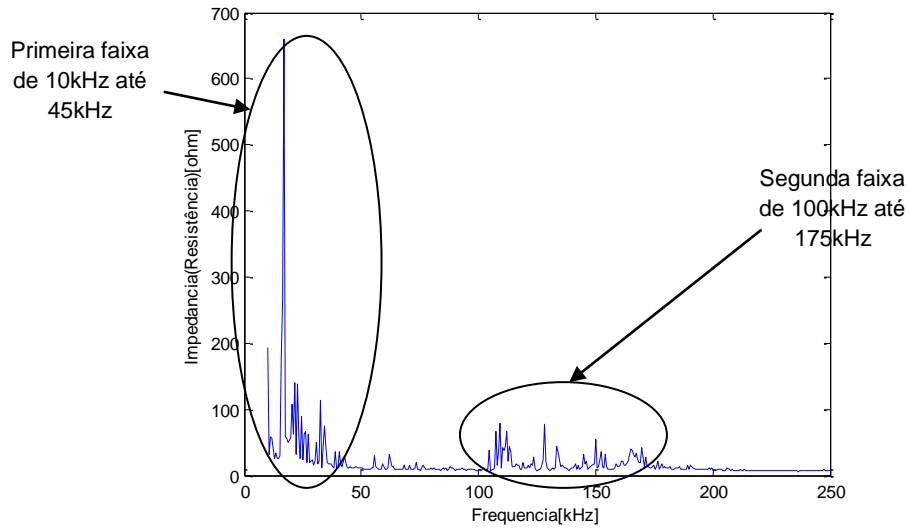


Figura 2.2 – Impedância em função da frequência

Uma faixa em torno de uma frequência elevada (150 kHz) é favorável para identificar a localização, já numa faixa mais baixa, em torno de (70 kHz), detecta-se apenas as áreas onde se encontram os danos, Sun *et al* (1995). As medições da impedância elétrica não podem confundir os dois tipos de picos que aparecem no espectro de frequência: um tipo tem a ver com as frequências de ressonância da estrutura; outro tipo é encontrado para a frequência de ressonância da pastilha de PZT. Para estruturas leves, é melhor evitar a ressonância da pastilha de PZT quando selecionar a faixa de frequência. Isso porque a magnitude da resposta é muito maior, quando comparada com a da ressonância da estrutura (PARK *et al*, 2003).

Enquanto a maior parte dos trabalhos tem utilizado a parte real da impedância ou da admitância, Bhalla; Naidu; Soh (2002) introduzem o conceito de assinatura “ativa”, já que é possível utilizar a componente interativa direta do sinal após filtrar a componente “inerte”. Como são conhecidas as propriedades do material piezelétrico (PZT), pode-se reescrever a Eq. (2.12) na forma da Eq. (2.13).

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

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).

$$Y_P = i\omega a \bar{\epsilon}_{33}^T, \quad (2.14)$$

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

Como o termo passivo ainda apresenta a parte real do sinal e o termo ativo contém a parte imaginária, basta isolar o termo ativo da soma da Eq. (2.13) para trabalhar tanto com a parte imaginária quanto com a parte real para identificação de falhas, mantendo assim toda a informação das condições da estrutura (PARK *et al*, 2003).

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

As altas frequências utilizadas pelo método de impedância tornam difícil prever a medição exata da impedância do sensor-atuador piezelétrico. Muitos fatores dificultam uma modelagem típica da impedância que seja válida para as faixas de frequência usadas pelo método. Os sinais medidos podem ter variações associadas ao meio ambiente e não propriamente devido a um dano. Assim, é conveniente utilizar técnicas estatísticas para avaliar a medida da impedância, o que é conseguido através das chamadas métricas de dano.

Para se estabelecer uma metodologia capaz de quantificar as alterações estruturais estudadas, deve-se estabelecer uma referência para a métrica de dano, correspondente à estrutura sem falha. Assim, podem ser realizadas comparações envolvendo os valores da métrica para a estrutura com e sem dano. Estas comparações são capazes de apontar se existe ou não dano na estrutura. Ou seja, o objetivo geral da métrica de dano é quantificar a diferença entre medições da impedância quando comparadas com os dados obtidos para a estrutura sem dano (ou *baseline*).

O modelo estatístico mais utilizado na literatura é o desvio médio da raiz quadrada, sendo sua definição formal descrita pela Eq.(2.16) (GRISSE,2004, PEAIRS,2006)

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

onde $\text{Re}(Z_{1,i})$ é a parte real da impedância da medição sem dano (*baseline*) em uma frequência i , $\text{Re}(Z_{2,i})$ é a parte real da impedância em uma frequência i para uma nova

configuração da estrutura, e n é o número total de pontos frequenciais usados na comparação. O cálculo é feito dentro de uma faixa de frequência previamente definida.

Peairs (2006) apresenta uma modificação no desvio médio da raiz quadrada, RMSD1, conforme mostrada na equação a seguir (para efeitos de nomenclatura, o desvio médio da raiz quadrada definido pela Eq.(2.17) é denominado RMSD1):

$$RMSD1 = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{((\text{Re}(Z_{1,i}) - \text{Re}(\bar{Z}_1)) - (\text{Re}(Z_{2,i}) - \text{Re}(\bar{Z}_2)))^2}{n} \right)}, \quad (2.17)$$

onde $\text{Re}(\bar{Z}_1)$ e $\text{Re}(\bar{Z}_2)$ são as médias das medições para as duas condições analisadas. Estas médias foram incluídas na Eq.(2.17) para reduzir o efeito de pequenas variações sobre o valor da métrica, resultado de mudanças na temperatura ou de possíveis resistências elétricas dos cabos de conexão do sensor ao analisador de impedância, como se pode observar na Fig. 2.3, onde são ilustradas medições feitas em uma viga de alumínio mantendo as mesmas condições (sem dano).

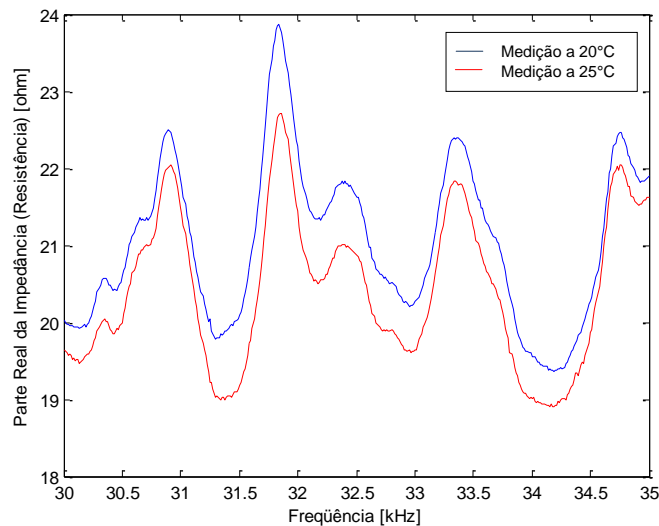


Figura 2.3- Exemplo da variação da amplitude entre duas medições de impedância para o caso sem dano na estrutura.

As variações mostradas na Fig. 2.3 são bastante frequentes, pelo que, para se determinar a referência (*baseline*), ou seja, a medição para a estrutura sem dano, se usa uma média de várias medições feitas com a estrutura em estado considerado saudável.

Com esta média e o desvio padrão calculado para cada ponto, Peairs (2006) apresenta a Eq.(2.18) como uma nova definição do desvio médio da raiz quadrada

$$RMSD2 = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\left(\frac{\text{Re}(\bar{Z}_{1,i}) - \text{Re}(Z_{2,i})}{S_{Z_1,i}} \right)^2}{n} \right)}, \quad (2.18)$$

onde se inclui o desvio padrão de cada ponto do sinal de referência, $S_{Z_1,i}$, com o fim de tornar a métrica pouco sensível a mudanças no sinal de impedância devidas a alterações do meio ambiente (e não associados propriamente a algum dano).

Com a Eq. (2.18) concluiu-se a apresentação das definições encontradas na literatura envolvendo o cálculo da métrica de dano baseado no desvio médio da raiz quadrada.

Já a métrica de dano referente ao desvio do coeficiente de correlação é usada para interpretar e quantificar a informação contida em dois conjuntos de dados. A formulação matemática, Eq. (2.19), envolve a diferença entre um e o coeficiente de correlação entre uma medição e a referência (GIURGIUTIU; ZAGRAI, 2005).

$$CCD = 1 - CC, \quad (2.19)$$

onde CCD é o desvio do coeficiente de correlação e CC é o coeficiente de correlação dado pela Eq (2.20)

$$CC = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(\text{Re}(Z_{1,i}) - \text{Re}(\bar{Z}_1))(\text{Re}(Z_{2,i}) - \text{Re}(\bar{Z}_2))}{S_{Z_1} S_{Z_2}}, \quad (2.20)$$

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. Quando o coeficiente de correlação é igual a 1 os sinais têm total correlação. Quanto maior é a diferença entre os sinais, menor é o valor de CC . O valor de CC é utilizado também para comparar e quantificar sinais de admitância (NAIDU; SOH,2003).

A diferença média quadrada é outra das métricas utilizadas pelo método da impedância eletromecânica para quantificar o dano (RAJU,1997), sendo sua formulação matemática apresentada pela Eq.(2.21)

$$ASD = \sum_{i=1}^n [\text{Re}(Z_{1,i}) - (\text{Re}(Z_{2,i}) - \delta)]^2, \quad (2.21)$$

onde δ é a diferença das médias de cada um dos sinais, como mostra a Eq.(2.22)

$$\delta = \text{Re}(\bar{Z}_1) - \text{Re}(\bar{Z}_2). \quad (2.22)$$

Com o uso desta métrica de dano, também se busca minimizar o efeito das variações da amplitude devidas a mudanças no meio ambiente.

Ainda outra métrica utilizada pelo método da impedância eletromecânica é o desvio percentual da média absoluta (TSENG e NAIDU, 2002)

$$MAPD = \sum_{i=1}^n \left| \frac{(\text{Re}(Z_{1,i}) - \text{Re}(Z_{2,i}))}{\text{Re}(Z_{1,i})} \right|. \quad (2.23)$$

Observa-se que o MAPD, Eq. (2.23), é similar ao desvio médio da raiz quadrada definida por RMSD3, pois ambos avaliam as diferenças dos sinais em cada ponto dos dados da medição.

Peairs (2002) apresenta a métrica baseada na simples somatória da diferença média entre os sinais. Esta métrica de dano não utiliza nenhuma relação entre valores, sendo implementada como mostra a Eq.(2.24)

$$M = \sum_{i=1}^n (\text{Re}(Z_{1,i}) - \text{Re}(Z_{2,i}))^2. \quad (2.24)$$

O trabalho mais recente sobre métricas de dano é de Liu e Paurobally (2011), onde os autores apresentam uma métrica baseada na magnitude e na fase da impedância, como mostra a Eq. (2.25),

$$M_{r\theta} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n |r(Z_{2,i}) - r(Z_{1,i})|}{\sum_{i=1}^n |r(Z_{1,i})|} + \frac{\sum_{i=1}^n |\theta(Z_{2,i}) - \theta(Z_{1,i})|}{\sum_{i=1}^n |\theta(Z_{1,i})|}}, \quad (2.25)$$

onde $r(Z_{1,i})$ e $\theta(Z_{1,i})$ são a magnitude e a fase da impedância da medição sem dano (*baseline*) em uma frequência i , $r(Z_{2,i})$ e $\theta(Z_{2,i})$ são a magnitude e a fase da impedância em uma frequência i para uma nova configuração da estrutura, e n é o número total de pontos frequenciais usados na comparação.

2.4.1. Comparações do método da impedância com outras técnicas de END

Algumas comparações entre o método de avaliação da integridade estrutural baseado em impedância com outras técnicas de avaliação não destrutivas podem ser encontradas em Park *et al* (2000a) e Giurgiutiu *et al* (2002).

O método baseado na impedância percebe as variações das propriedades estruturais observando as respostas dinâmicas das estruturas tal como nos métodos de análise modal, para os quais diferentes formas de identificação e localização de falhas tem sido propostas (PARK *et al*, 2003). A maior diferença entre tais técnicas se encontra na faixa de frequência usada para detectar as mudanças da integridade da estrutura. É importante salientar que, dependendo do modelo global de baixa ordem, uma frequência baixa não é suficientemente sensível a uma falha em seu estado incipiente. Porém, as altas frequências são sensíveis a pequenas mudanças na integridade da estrutura, o que justifica o procedimento adotado ao se considerar a técnica da impedância eletromecânica.

Como o método utiliza somente um elemento piezelétrico que combina características tanto de atuador como de sensor, considera-se que o método é mais prático que a tradicional combinação acelerômetro-*shaker* utilizada pelos métodos baseados nos sinais de vibração (PARK *et al*, 2003).

Algumas das outras técnicas não destrutivas descritas no capítulo anterior se mostraram capazes de identificar pequenas falhas, mas são necessários conhecimentos específicos para interpretação dos dados, já que requerem instrumentos bastante complexos. Além disto, a maioria requer que a avaliação seja realizada durante paradas do equipamento, prejudicando ou impossibilitando a realização do procedimento em tempo real (PARK *et al*, 2003).

No ensaio por ultrassom de componentes estruturais, um transdutor piezelétrico é usado para produzir uma onda acústica. Com base no tempo de atraso da transmissão da onda, alterações no comprimento (deformação) e na densidade do componente estudado podem ser determinadas. Este método, entretanto, não se presta para uso autônomo, tal como o método de impedância. Além disso, técnicos experientes são necessários para avaliar os dados dos ensaios de ultrassom para discernir o possível dano (PARK; INMAN, 2005).

O método de emissão acústica usa ondas elásticas geradas por danos incipientes. Este método é geralmente usado nas mesmas aplicações que o método de impedância. Ambos os métodos são ideais para monitorar partes críticas da estrutura. Deve-se lembrar, entretanto, que o método da Emissão Acústica requer uma fonte de potência que produza emissão acústica, enquanto a técnica da impedância é baseada simplesmente no conceito de sensor-atuador (DOSCH; INMAN; GARCIA, 1992).

Para o método do ensaio por impacto, um pulso de tensão é introduzido na estrutura a partir de um impacto, sendo as ondas de tensão resultante medidas e analisadas por um transdutor. O pulso se propaga pela estrutura e é refletido devido a trincas (descontinuidades) encontradas na estrutura. O método precisa também de uma fonte externa de excitação, e não é sensível a pequenas trincas (incipientes) na estrutura (PARK; INMAN, 2005).

Finalmente, os custos relativos à técnica da impedância são muito inferiores aos dos demais métodos que utilizam altas frequências como o ultrassom, além de serem capazes de monitorar uma área maior, devido a sua sensibilidade (PARK *et al*, 2003).

As principais vantagens do método de impedância em comparação com outros métodos são:

- A técnica não é baseada em modelos e pode ser usada em estruturas complexas.
- A técnica usa pequenos atuadores para monitorar locais de difícil acesso.
- A técnica é sensível a pequenas alterações estruturais.
- As medições são de fácil interpretação.
- A técnica pode ser utilizada on-line, não impondo paradas ao equipamento em avaliação.

Algumas desvantagens do método de impedância em comparação com outros métodos são relacionadas aos tipos de sensores-atuadores disponíveis. Em alguns casos, a área de influência do sensor pode não ser capaz de detectar a falha. Deve-se salientar, entretanto, que esta pequena limitação vem sendo superada pelas novas gerações de sensores e pela otimização da distribuição espacial dos mesmos na estrutura. Um exemplo de superação de limitações anteriores tem a ver com o sensor-atuador MFC (*micro fiber composite*) que é capaz de acomodar-se a curvaturas de componentes estruturais, por ser mais flexível que o PZT, sem perda das principais características das pastilhas de PZT.

CAPÍTULO III

MONITORAMENTO DO CRESCIMENTO DE TRINCAS EM UMA VIGA DE ALUMÍNIO SUBMETIDA A CARGAS DINÂMICAS

3.1. Introdução

O ensaio de fadiga é um processo pelo qual se produz uma alteração estrutural permanente, progressiva e localizada, que ocorre quando um material é sujeito a condições que produzem tensões dinâmicas em um ou em vários pontos, e que pode culminar em trincas ou, em alguns casos, na fratura completa após um número suficiente de ciclos de carga (BRANCO,1994). A ruptura por fadiga é provocada pela nucleação e propagação de trincas que aparecem em uma peça submetida a tensões mecânicas e, na maioria das vezes, ocorre de forma súbita. Ou seja, ocorre sem emitir algum sinal prévio, pois a trinca não é visível. Com o fim de avaliar a sensibilidade do método de monitoramento de integridade estrutural baseado na impedância eletromecânica, aplicou-se o método de monitoramento de integridade estrutural baseado na impedância eletromecânica em uma viga submetida a cargas dinâmicas constantes. Foram tomadas medições de impedância quando para a estrutura em repouso e para a estrutura submetida a carga. Os resultados são alentadores, já que a propagação da trinca pode ser acompanhada tanto nas medições feitas para a estrutura em repouso, como nas medições com carga dinâmica.

3.2. Ensaio de Estrutura com Carga Dinâmica

Para avaliar a viabilidade do uso do monitoramento de integridade estrutural baseado na impedância eletromecânica em estruturas submetidas a cargas dinâmicas foi utilizada uma viga de alumínio de 80 x 3,2 x 0,3 cm. Com um de seus lados engastado e o outro preso a um excitador eletrodinâmico de vibração (*shaker*) conforme a Fig. 3.1(a).



Figura 3.1 – (a)Viga utilizada para ensaio com cargas dinâmicas (b) Detalhe do PZT e trincas

Uma pastilha de PZT redonda de 1,5 cm de diâmetro e 0,1 cm de espessura foi colada a 55 cm da posição do *shaker* (ver Fig. 3.1(a)). Foram geradas trincas provocadas por dois cortes feitos na extremidade engastada da viga, conforme a Fig. 3.1(b).

Para medir a força e o deslocamento aplicados na viga foram utilizados dois sensores, um vibrômetro e um sensor de força acoplado ao *shaker*, como mostram as Figs. 3.2(a) e (b). Para adquirir e armazenar os sinais dos sensores foi desenvolvido um código computacional em uma plataforma *Labview*. Na Fig. 3.2(c) pode-se ver a janela de saída do programa desenvolvido.

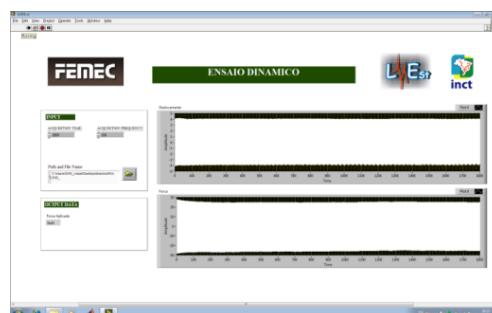
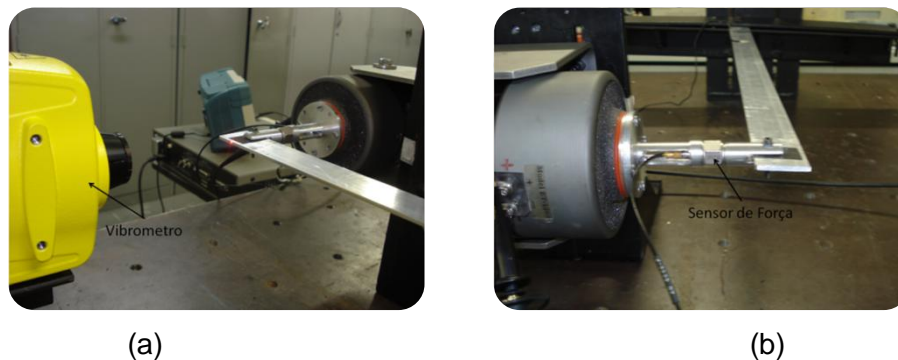


Figura 3.2 – (a) Sensor de deslocamento; (b) Sensor de força; (c) Apresentação dos resultados

A Figura 6.3 apresenta a bancada experimental completa que foi utilizada neste ensaio.

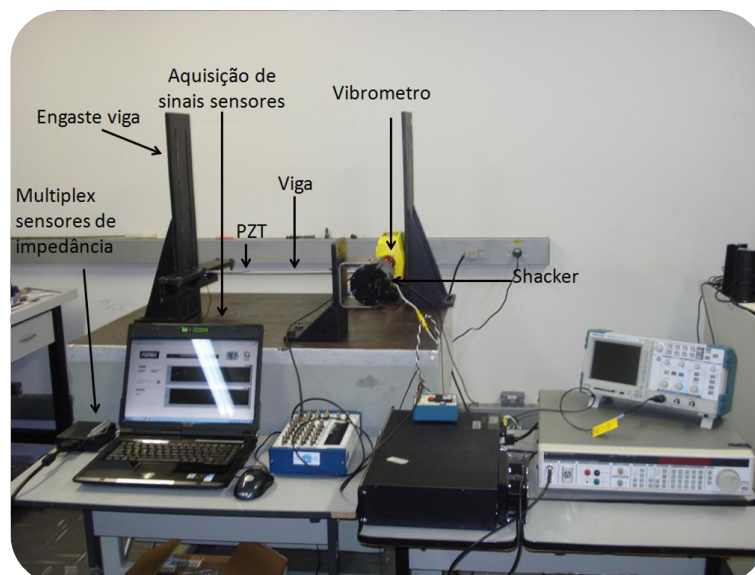


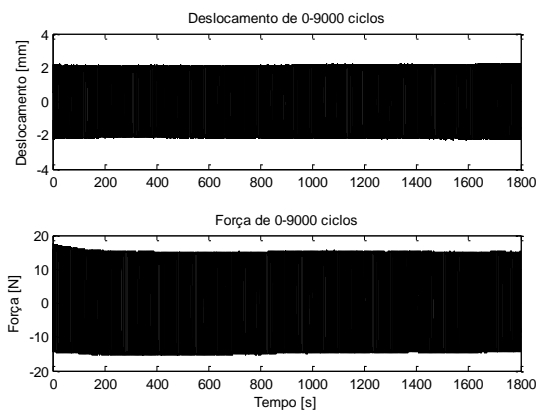
Figura 3.3 – Bancada experimental; ensaio com cargas dinâmicas

Conforme mencionado anteriormente, as medições de impedância foram feitas tanto com a estrutura em repouso como com a estrutura submetida a carga dinâmica. Primeiramente, foram feitas as medições para a viga em repouso (*baseline*); em seguida o sistema foi submetido a um ciclo de carga por um período de meia hora a 5 Hz, ou seja, 9000 ciclos foram aplicados na viga. Durante este tempo foram adquiridos os sinais de impedância. Após meia hora de ciclagem o sistema foi colocado em repouso e novamente foram feitas medições de impedância. Este procedimento foi realizado até que a viga foi levada ao colapso estrutural ao atingir 31.940 ciclos. Assim, foram adquiridos 9 estados distintos da estrutura, conforme a Tab. 3.1.

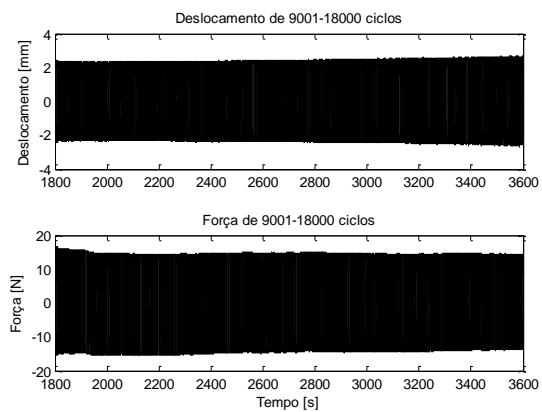
Na Figura 3.4 tem-se os sinais dos sensores de deslocamento e de força para cada um dos 4 ciclos que foram medidos. É evidente que de 0 a 18000 ciclos os sinais são quase constantes; já ao final da aplicação de 18001 a 27000 ciclos pode-se observar que a amplitude do deslocamento aumenta e a amplitude da força diminui. Nesta situação a trinca já é visível e apresenta mais de 4 mm (ver Fig.3.5(a)) de comprimento. Finalmente, tem-se o sinal correspondendo a 27000 a 31940 ciclos, contendo o momento em que a viga se rompeu (Fig.3.5(b)). Pode-se observar como a força foi diminuindo até chegar a 0 e o deslocamento permaneceu constante.

Tabela 3.1 – Estados da viga; ensaio com carga dinâmica

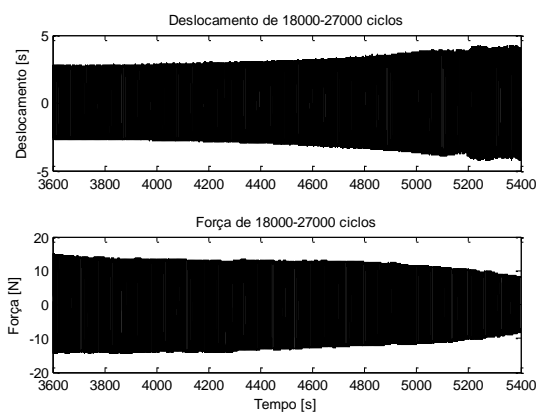
No.	Estados	Descrição	No. De Medição
1	<i>Baseline</i>	Viga em repouso	1-30
2	Estado 1	Viga com carga, de 0-9000 ciclos	31-60
3	Estado 2	Viga em repouso após 9000 ciclos	61-90
4	Estado 3	Viga com carga, de 9001-18000 ciclos	91-120
5	Estado 4	Viga em repouso após 18000 ciclos	121-150
6	Estado 5	Viga com carga, de 18001-27000 ciclos	151-180
7	Estado 6	Viga em repouso após 27000 ciclos	181-210
8	Estado 7	Viga com carga, de 27001-31940 ciclos	211-240
9	Estado 8	Viga em repouso após 31940 ciclos	241-270



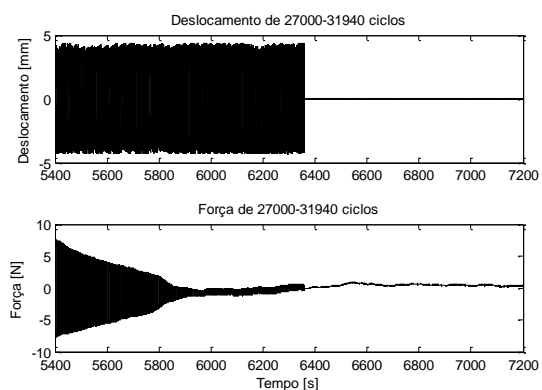
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.4 - Sinais dos sensores de força e de deslocamento



Figura 3.5 – Propagação da trinca na viga

Os sinais de impedância médios para o estado em repouso e a correspondente métrica de dano, calculada usando a Eq.(2.19), são apresentados na Fig. 3.6. É evidente que existe uma grande diferença no valor da métrica quando a trinca é visível, que demonstra que a técnica de impedância consegue detectar claramente a nucleação e a propagação da trinca, conforme comentado anteriormente no trabalho de Palomino (2008).

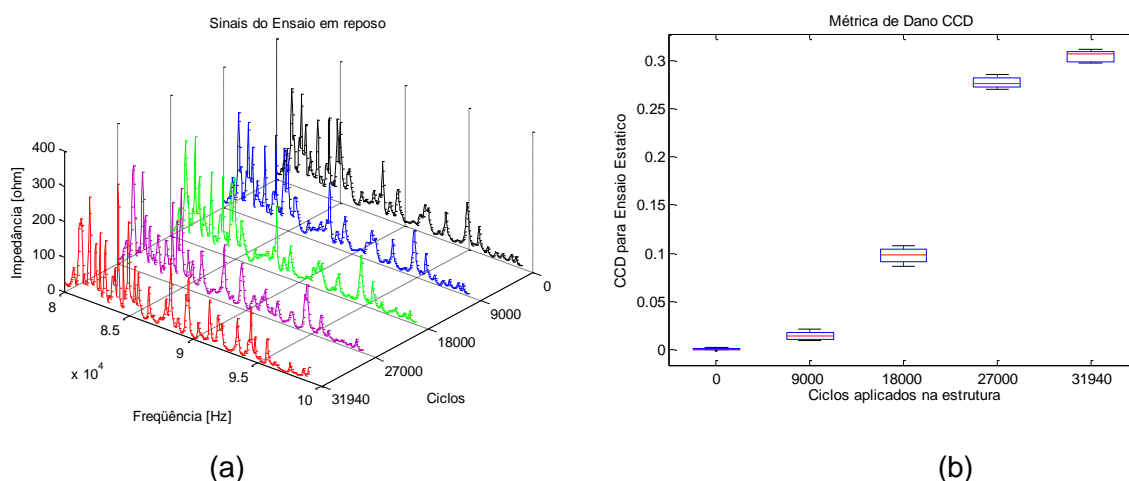


Figura 3.6 – Sinais e métrica de dano do sensor de impedância da viga do ensaio com carga dinâmica; Estado em repouso

Os sinais de impedância médios durante a aplicação de carga dinâmica e sua correspondente métrica de dano, calculada com a Eq.(2.19), são apresentados na Fig. 3.7. Novamente, existe uma grande diferença no valor da métrica quando a trinca é visível, mostrando que a técnica da impedância consegue detectar claramente a nucleação e a propagação da trinca quando a estrutura é submetida a cargas dinâmicas em baixa

frequência. Pode-se observar que o desvio padrão dos últimos dois estados é maior que os anteriores, uma vez que a trinca cresce à medida que o número de ciclos é aumentado.

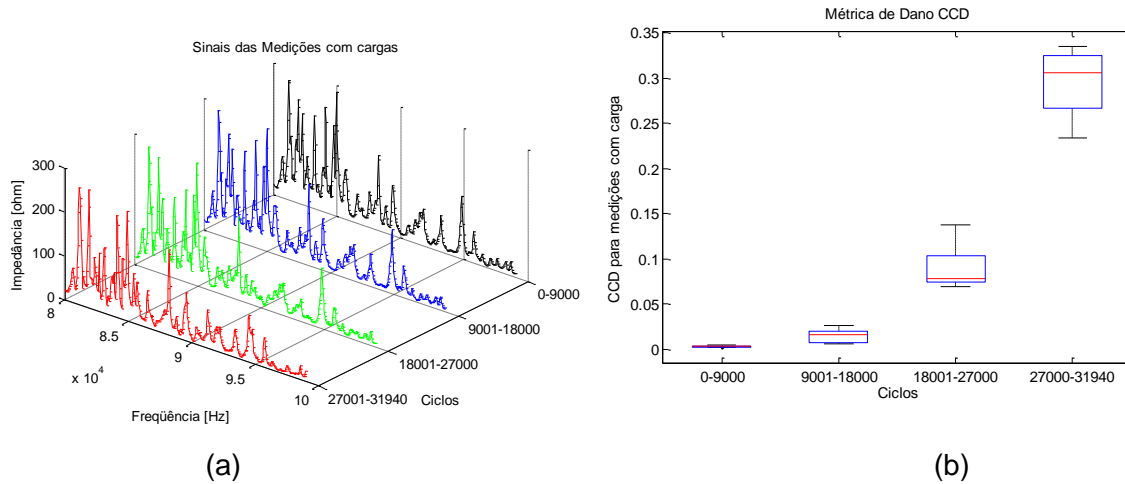


Figura 3.7 – Sinais e métrica de dano do sensor de impedância da viga do ensaio com carga dinâmica

Finalmente, na Fig. 3.8, apresenta-se a métrica de dano tanto para as medições para o caso em repouso, como as medições durante a aplicação de cargas dinâmicas. Pode-se observar que os valores da métrica são similares ao se comparar os estados em repouso com aqueles em que carregamento dinâmico é aplicado.

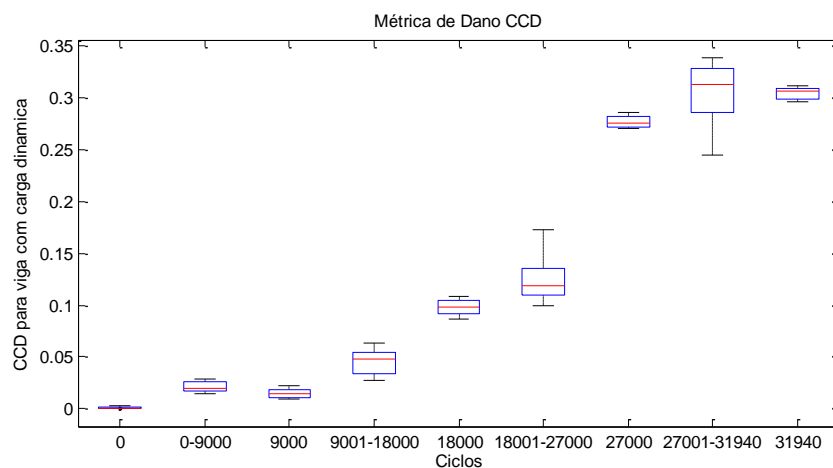


Figura 3.8 – Métrica de dano do sensor de impedância da viga do ensaio com carga dinâmica

CAPÍTULO IV

INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS AMBIENTAIS E GEOMÉTRICOS NO MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL BASEADO NA IMPEDÂNCIA ELETROMECHANICA

4.1. Introdução

Conforme mencionado nos capítulos anteriores, entende-se por monitoramento da integridade estrutural (SHM) o processo da detecção de falha em estruturas mecânicas, aeronáuticas, aeroespaciais e civis (MOURA; STEFFEN, 2006). Para o sucesso do monitoramento, o sistema deve ser robusto a variações ambientais de diversas origens (PALOMINO *et al.*, 2012). De outra forma, as variações ambientais poderiam influenciar as medidas, comprometendo a confiabilidade do procedimento e impedindo o uso das métricas associadas ao método. Além disso, o processo de monitoramento da integridade estrutural pode identificar uma situação de *falso positivo*, ou, ainda mais preocupante, de *falso negativo* durante a avaliação de estruturas.

O efeito da temperatura nos sinais de impedância eletromecânica tem sido o tema de vários trabalhos desenvolvidos na área. Uma conclusão clara é que as altas temperaturas produzem variações de deslocamento vertical no sinal de impedância (PARK *et al.*, 1999). Já estudos envolvendo baixa temperatura apresentam resultados mais animadores, já que o sinal não se vê influenciado significativamente (MOURA; STEFFEN; INMAN, 2007).

Além de estudos da influência da temperatura, existe um estudo sobre a influência da pressão no método de impedância eletromecânica (MOURA; STEFFEN; INMAN, 2007). A conclusão que apresentam os autores é que a pressão não tem uma influência significativa nas variações do sinal de impedância.

Outro trabalho dedicado às influências externas sobre as medições é relatado em um estudo dos sinais de excitação da pastilha piezoelétrica (BAPTISTA; VIEIRA; INMAN, 2011). Nele se estudam três tipos diferentes de sinais: Ruído branco, sinal *chirp* e ruído randômico

periódico, sendo o sinal *chirp* se apresentou como o de melhor desempenho. Além disso, a voltagem de excitação das pastilhas piezelétrica foi avaliada, obtendo-se como resultado pouca influência da mesma.

Com a intenção de complementar os trabalhos anteriores, neste capítulo serão apresentados estudos da influência dos campos magnéticos, dos meios iônicos, além do formato e posição do sensor. Para analisar as influências mencionadas foram utilizadas técnicas de meta-modelagem estatística que serão descritas no início deste capítulo.

4.2. Técnicas de Meta-modelagem Estatística

Durante o processo de avaliação de um dado sistema, é necessária a formulação do problema que o representa, sendo que o modelo correspondente pode ser determinístico ou empírico. Um modelo determinístico é um modelo para o qual é conhecido o conjunto de regras e leis que caracterizam seu comportamento. Já em um modelo empírico, ao contrário, não são conhecidos os conjuntos de regras a ele associados. Desta forma, estes modelos são construídos a partir de experimentos a partir dos quais se busca descrever o comportamento do fenômeno estudado. Assim, este modelo somente pode ser avaliado na região próxima da investigada e, por isso, o modelo empírico é apenas um modelo local, não permitindo extrapolações para outras regiões (NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2003).

Nos casos em que se necessita da criação de um modelo empírico (MONTGOMERY, 1997) do sistema que tenha grande representatividade, são aplicados os conceitos de meta-modelagem. Geralmente estes meta-modelos são gerados devido ao desconhecimento da formulação analítica do sistema, ou, então, visando a redução de complexidade do sistema em estudo de forma a representá-lo através de uma representação matemática simplificada (em geral um polinômio). Entretanto, cabe salientar que normalmente se considera que o meta-modelo tem boa representatividade dentro de uma vizinhança bem definida.

Para criar um meta-modelo, é necessário antes lembrar que o mesmo pode ser realizado de várias formas. Seu nível de complexidade é determinado pelo quanto se pode incorrer em erros ao adotá-lo.

Desta forma, pode-se criar um meta-modelo de regressão do sistema sintetizado por uma equação polinomial como a Eq. (4.1), onde Y é a resposta de interesse, X são os fatores avaliados (variáveis que influenciam na resposta), B são os parâmetros do modelo e ε é o erro aleatório associado ao fator (os erros aleatórios são decorrentes de várias origens que variam segundo o caso em tela). Neste caso, para determinação da curva representativa do modelo, pode-se utilizar um ajuste por mínimos quadrados, sendo que ε é

o valor da distância entre o valor obtido pelo experimento e o valor obtido pela curva de regressão (NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2003),

$$Y = BX + \varepsilon . \quad (4.1)$$

A Eq. (4.2) é muito importante, pois ela permite a obtenção dos coeficientes angulares ou parâmetros do modelo da curva de regressão, utilizando o método dos mínimos quadrados. Nela, X é a tabela de coeficientes de contraste e Y é a matriz de resposta do sistema,

$$B = (X'X)^{-1} X'Y . \quad (4.2)$$

Antes de aceitar um modelo como satisfatório, é necessário o exame dos resíduos, pois assim verifica-se se o modelo pode ser considerado como sendo bom (resíduos são pequenos) ou ruim (resíduos importantes).

Uma ferramenta útil durante o processo de avaliação é a ANOVA (*Analysis of Variance*) (MONTGOMERY, 1991), que faz uma análise de variância para os ajustes de um modelo. Basicamente, o desempenho de um modelo é avaliado pela análise dos desvios das observações em relação à média global. Estes desvios possuem basicamente duas fontes de variação, sendo uma devida à regressão e a outra devida aos resíduos.

Portanto, é possível compreender que o termo de variação devido à regressão representa o afastamento da previsão do modelo para o ponto em questão, em relação à média global. A variação quanto aos resíduos significa a diferença entre o valor observado e o valor previsto, significando que, num modelo bem ajustado, este valor é pequeno. Assim, uma parcela da variação dos resultados observados em relação à média se deve à equação de regressão, enquanto que uma outra parcela restante é devida aos resíduos. Quanto maior for a parcela devida à regressão, melhor será o ajuste do modelo.

4.3. Influência de Campos Magnéticos no Método da Impedância Eletromecânica

Para a avaliação das influências dos campos magnéticos em uma estrutura que é submetida à avaliação de sua integridade através do método da impedância eletromecânica, foi utilizada uma viga de alumínio, de 28,4 cm de comprimento (Fig. 4.1). Optou-se por

estudar uma estrutura que dispõe de duas pastilhas de PZT coladas, a primeira em uma das extremidades (PZT1) e, a outra, ao centro da viga (PZT2).

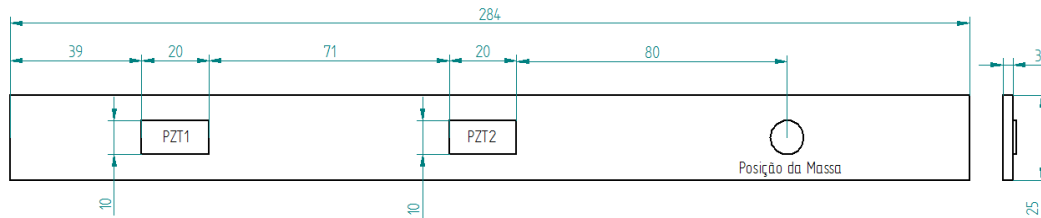
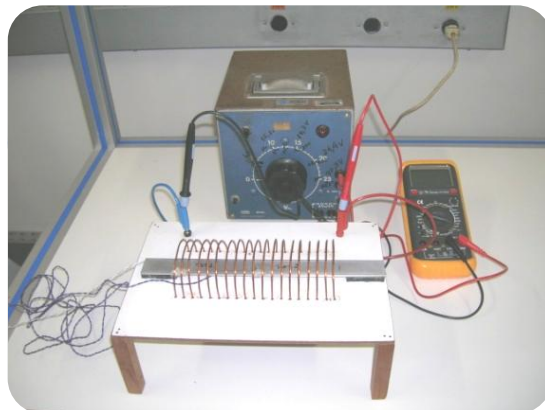


Figura 4.1– Descrição geométrica da viga utilizada para o ensaio com campos eletromagnéticos

A faixa de frequência analisada para o PZT1 foi de 35,5 kHz a 45 kHz e, para o PZT2, foi de 34 kHz a 40 kHz. A Fig. 4.2 apresenta o aparato experimental utilizado.



a) Equipamento de medição



b) Montagem experimental

Figura 4.2– Aparato experimental para o ensaio de influência do campo eletromagnético

Para inserir danos na superfície da estrutura foram adicionadas sequencialmente duas massas próximas às pastilhas de PZT, como mostra a Fig. 4.3. A primeira massa foi de 1g e, a segunda, de 2g.

Para geração do campo eletromagnético foram aplicadas na bobina de cobre duas tensões diferentes, a saber, de 2V e de 4V, além de também tomar medições sem campo aplicado, ou seja, 0V aplicados na bobina de cobre. Segundo a Eq. (4.2), deduzida a partir das leis de Biot-Savard e Ampère (CLAYTON, 2006), pode-se facilmente obter os valores dos campos gerados,

$$B = \frac{\mu_0 N I_c}{2R} , \quad (4.3)$$

onde $\mu_0 = 1,2566 \times 10^{-6}$ Tm/A (constante magnética), $N = 18$ espiras completas, $I_c = \text{Voltagem} / 0,5 \, \Omega$, $R = 0,04$ m (raio médio das espiras). Sendo assim, os valores do campo B são, respectivamente: $1,13094 \times 10^{-3}$ T e $2,26188 \times 10^{-3}$ T. Para simplificar os cálculos, os campos serão referenciados pela voltagem que foi aplicada para gerá-los (0V, 2V e 4V).

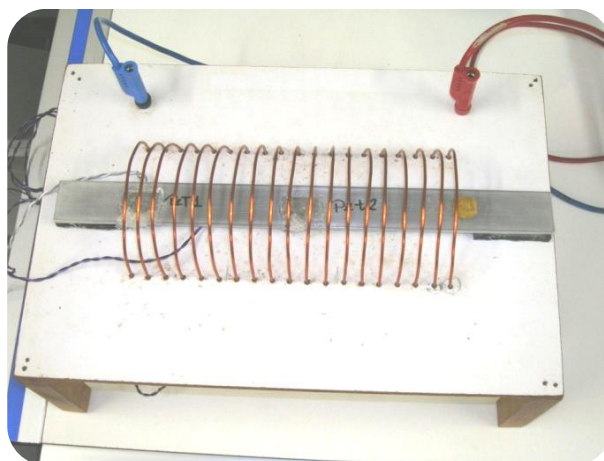


Figura 4.3– Viga de alumínio dentro da bobina geradora de campo contendo massa adicionada

Para a elaboração dos meta-modelos de verificação da influência eletromagnética para cada pastilha piezelétrica, foram utilizados os experimentos descritos na Tab. 4.1.

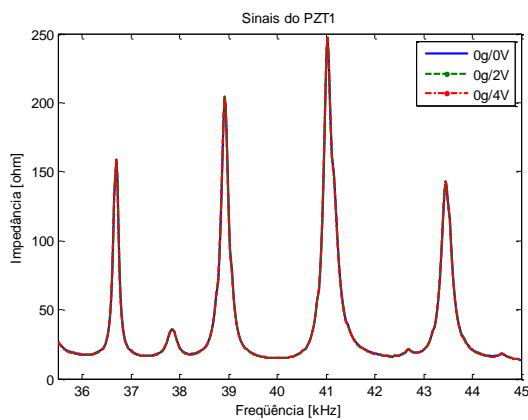
Tabela 4.1. Experimentos realizados para o estudo da influência do campo magnético

Massa adicionada	Ensaio N°			Campo
x	1	2	3	0 Volt
x	4	5	6	2 Volts
x	7	8	9	4 Volts
1g	10	11	12	0 Volt
1g	13	14	15	2 Volts
1g	16	17	18	4 Volts
2g	19	20	21	0 Volt
2g	22	23	24	2 Volts
2g	25	26	27	4 Volts

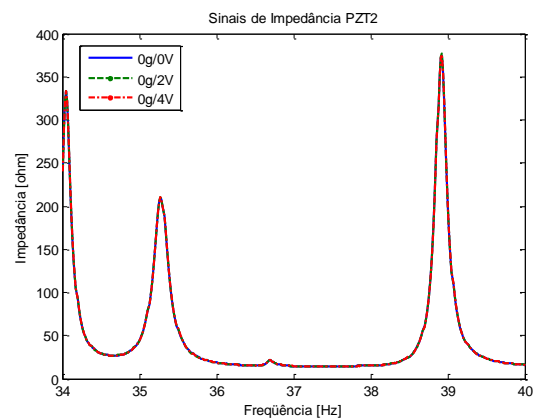
Na Fig. 4.4 podem-se observar os sinais de impedância medidos na estrutura para as pastilhas piezelétricas PZT1 e PZT2 para diferentes campos magnéticos, sem dano (sem

adição de massa). É evidente que os sinais são muito parecidos para os três campos analisados (0V, 2V e 4V).

Os sinais de impedância eletromecânica para cada campo magnético e consideradas as massas acrescentadas são apresentados na Fig. 4.5. Pode-se observar que, para os casos com adição de massa, os sinais têm maior variação que quando só se está alterando o campo magnético.



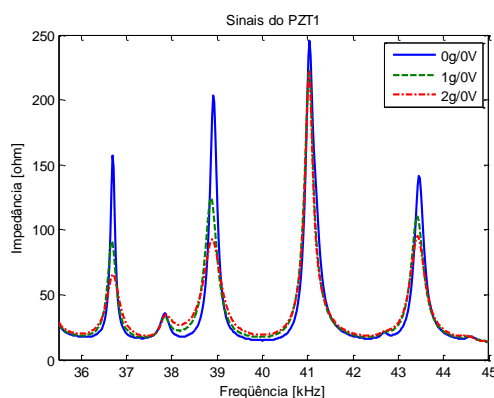
(a) Sinais PZT1



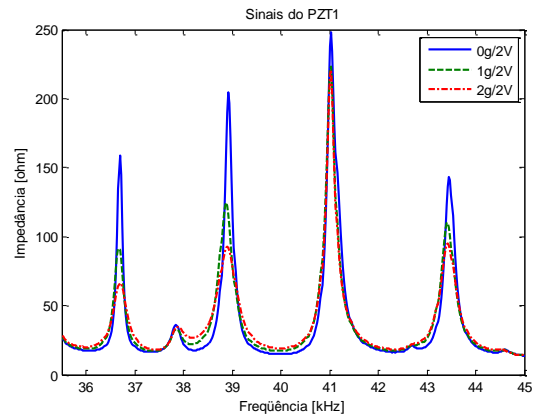
(b) Sinais PZT2

Figura 4.4 – Sinais de impedância eletromecânica para diferentes campos eletromagnéticos sem nenhuma massa adicionada

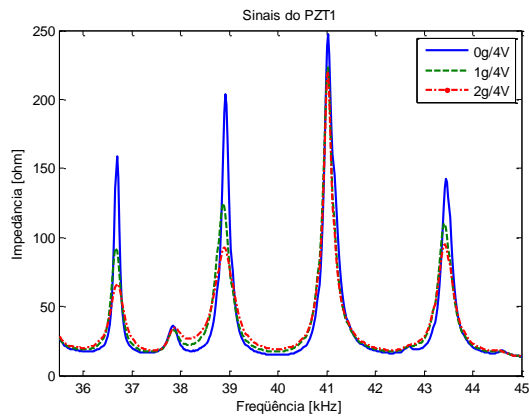
A partir dos sinais de impedância eletromecânica medidos foram calculados os valores da métrica de dano usando a métrica CCD (Desvio do Coeficiente de Correção, Eq.(2.19)). Na Fig. 4.6 se ilustra os valores calculados para cada uma das duas pastilhas de PZT. Nesta mesma figura ficam evidentes os três grupos de métricas facilmente separáveis devido às pequenas massas adicionadas.



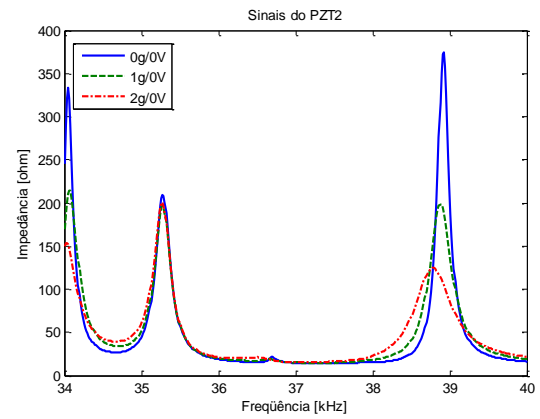
(a) Sinais PZT1 para 0 Volt



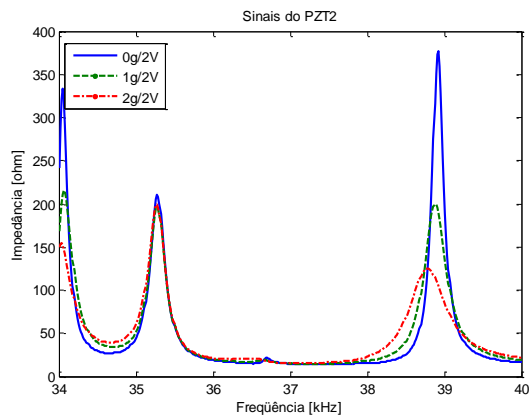
(b) Sinais PZT1 para 2 Volts



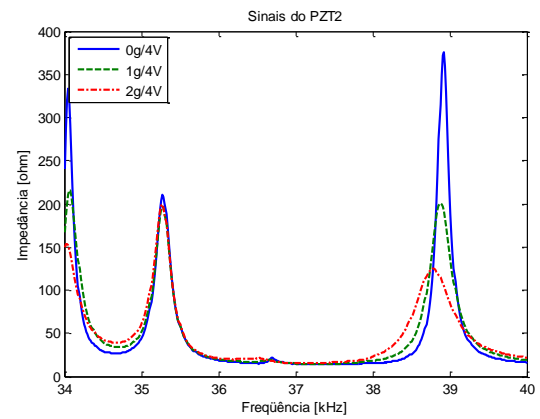
(c) Sinais PZT1 para 4 Volts



(d) Sinais PZT2 para 0Volt

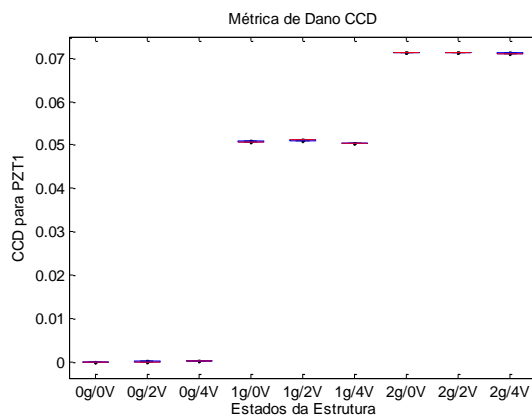


(e) Sinais PZT2 para 2Volts

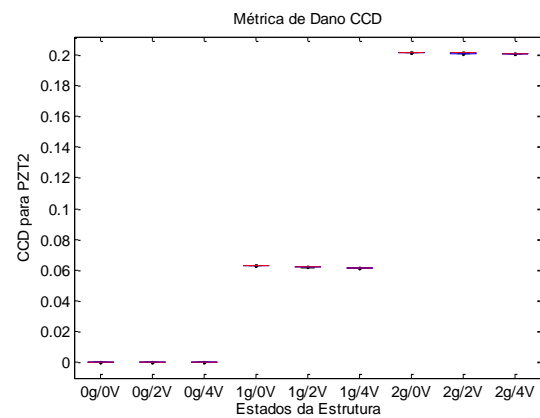


(f) Sinais PZT2 para 4Volts

Figura 4.5 – Sinais de impedância eletromecânica para cada um dos campos magnéticos aplicados



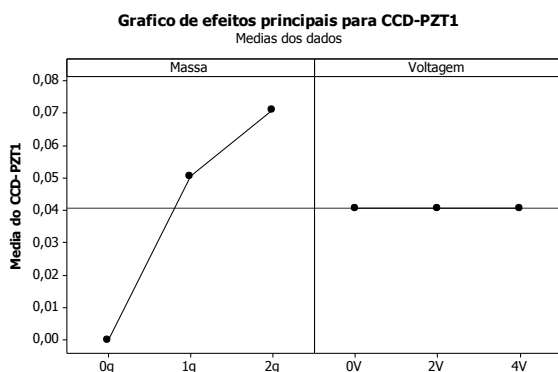
(a) Métrica de Dano PZT1



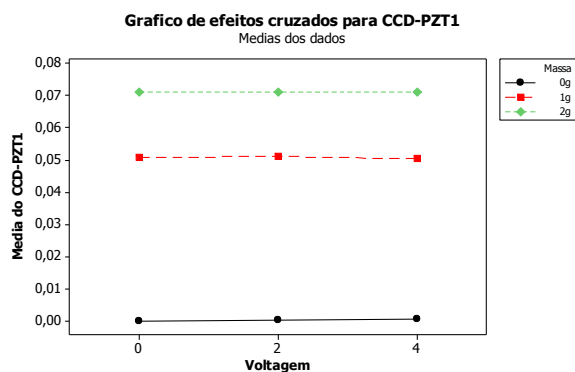
(b) Métrica de Dano PZT2

Figura 4.6 – Métrica de dano CCD para os experimentos de influência do campo eletromagnético

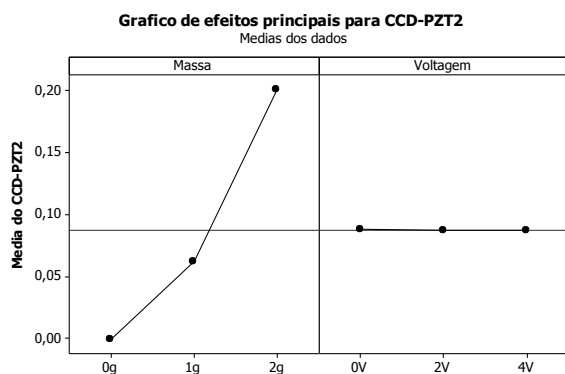
Ao realizar uma análise estatística dos efeitos principais de cada um dos fatores estudados (massa, voltagem), percebe-se que há maior contribuição do efeito isolado da pequena massa adicionada em relação à tensão elétrica do campo (Fig.4.7(a) e (c)). Ao se observar o gráfico com os efeitos cruzados de cada uma das pastilhas de PZT (Fig. 4.7 (b) e (d)), novamente, nota-se uma pequena inclinação da tensão e uma grande variação para a massa.



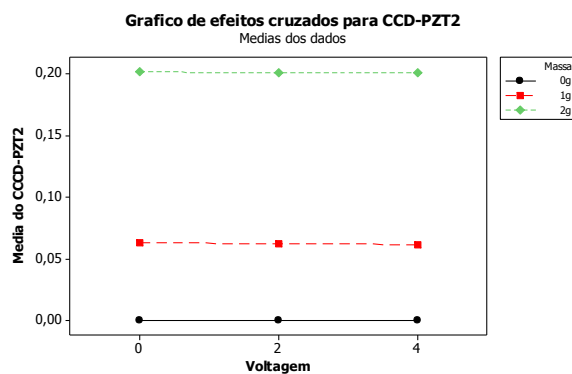
(a) Gráfico de efeitos isolados PZT1



(b) Gráfico de efeitos cruzados PZT1



(c) Gráfico de efeitos isolados PZT2



(d) Gráfico de efeitos cruzados PZT2

Figura 4.7 – Gráfico dos efeitos principais do meta-modelo

Os dados dos meta-modelos (para PZT1 e PZT2) foram obtidos e analisados através do MINITAB. Os resultados podem ser visualizados a seguir:

Análise de regressão geral: CCD-PZT1 versus Massa. Voltagem

Equação da regressão

$$\text{CCD-PZT1} = 0,0052463 + 0,0354833 \text{ Massa} - 1,11111\text{e-}005 \text{ Voltagem}$$

Coeficientes

Termos	Coef	EE do coef.	T	P	IC de 95%	VIF
Constante	0,0052463	0,0029020	1,8078	0,083	(-0,0007431. 0,0112357)	
Massa	0,0354833	0,0017771	19,9669	0,000	(0,0318156. 0,0391511)	1
Voltagem	-0,0000111	0,0008886	-0,0125	0,990	(-0,0018450. 0,0018228)	1

S = 0,00753963 R-quad. = 94,32% R-quad. (ajustado) = 93,85%
PRESS = 0,00166293 R-quad. (pred.) = 93,08%

Análise de variância

Fonte	GL	Seq SS	SC Ajust.	MC Ajust.	F	P
Regressão	2	0,0226632	0,0226632	0,0113316	199,3	0,000000
Massa	1	0,0226632	0,0226632	0,0226632	398,7	0,000000
Voltagem	1	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0,0	0,990126
Erro	24	0,0013643	0,0013643	0,0000568		
Falta de ajuste	6	0,0013641	0,0013641	0,0002274	24554,5	0,000000
Error puro	18	0,0000002	0,0000002	0,0000000		
Total	26	0,0240275				

Análise de regressão geral: CCD-PZT2 versus Massa. Voltagem

Equação da regressão

$$\text{CCD-PZT2} = -0,0124481 + 0,100456 \text{ Massa} - 0,000177778 \text{ Voltagem}$$

Coeficientes

Termos	Coef	Seq SS.	T	P	IC de 95%	VIF
Constante	-0,012448	0,0073930	-1,6838	0,105	(-0,0277066. 0,002810)	
Massa	0,100456	0,0045273	22,1889	0,000	(0,0911117. 0,109799)	1
Voltagem	-0,000178	0,0022636	-0,0785	0,938	(-0,0048497. 0,004494)	1

S = 0,0192076 R-quad. = 95,35% R-quad. (ajustado) = 94,96%
 PRESS = 0,0108063 R-quad. (pred.) = 94,33%

Análise de variância

Fonte	GL	Seq SS.	SC Ajust.	MC Ajust.	F	P
Regressão	2	0,181646	0,181646	0,090823	246,2	0,000000
Massa	1	0,181644	0,181644	0,181644	492,3	0,000000
Voltagem	1	0,000002	0,000002	0,000002	0,0	0,938053
Erro	24	0,008854	0,008854	0,000369		
Falta de ajuste	6	0,008854	0,008854	0,001476	76621,6	0,000000
Erro puro	18	0,000000	0,000000	0,000000		
Total	26	0,190500				

Conforme descrito pelos programas, pode-se perceber que o valor R-quad. (ajustado) para o PZT1 é de 93,85% e para o PZT2 é de 94,96%, caracterizando uma grande capacidade de representação dos meta-modelos de primeiro grau dos experimentos realizados. Observando os modelos de regressão, pode-se perceber que o valor do coeficiente do fator massa é maior, o que representa uma grande influência deste fator no processo de monitoramento, ou seja, o dano tem maior influencia sobre a métrica do que os campos eletromagnéticos aplicados.

Na Fig. 4.8 pode-se observar as superfícies de resposta de cada uma das pastilhas de PZT, além dos valores obtidos no cálculo da métrica de dano.

Conforme foi observado no experimento, restrito ao domínio de análise em questão, para o monitoramento de variações estruturais, não se verifica influência associada à variação de campo eletromagnético. Este fato pode ser observado tanto pelos coeficientes do meta-modelo baseado em regressão, quanto pelos gráficos dos efeitos principais.

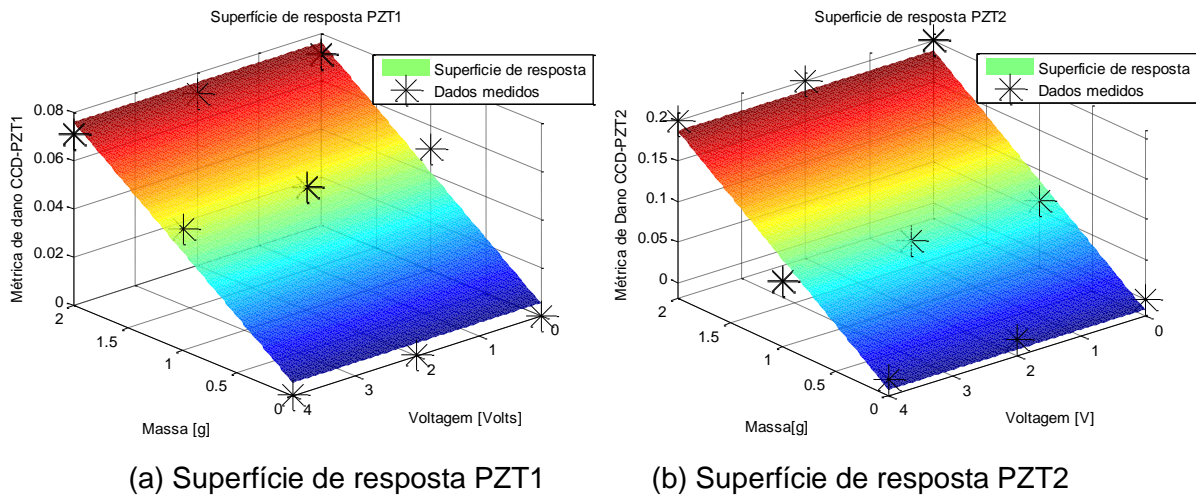


Figura 4.8 – Superfícies de resposta para os meta-modelos de regressão do ensaio de campos eletromagnéticos

4.4. Influência de meios iônicos

Para a avaliação da influência de meios iônicos no método de monitoramento de integridade estrutural baseado na impedância eletromecânica, uma viga de alumínio de aproximadamente 40 cm de comprimento foi utilizada (Fig. 4.9).

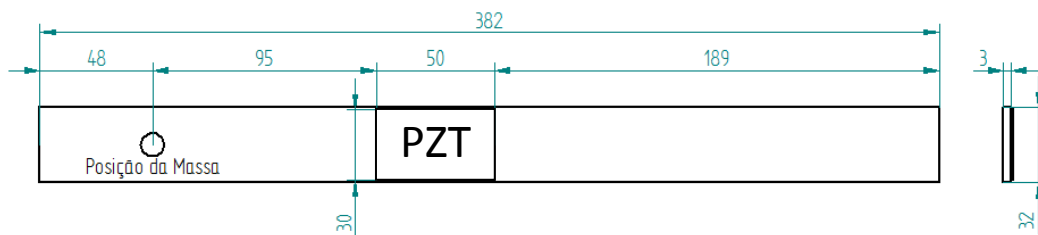


Figura 4.9 – Geometria da viga utilizada para o ensaio de meios iônicos

Para inserir dano na superfície da estrutura foi utilizado o procedimento de adição de massa numa região próxima da pastilha de PZT, como mostrado na Fig. 4.9.

Nesta viga analisou-se a faixa de frequência de 76 kHz a 85 kHz. As duas massas adicionadas para simular dano (modificação estrutural) foram de 2,307g e 8,472g, representando, respectivamente, 2,14% e 7,84% da massa total da viga.

A Fig. 4.10(a) mostra as massas que foram adicionadas à viga para realização dos experimentos, e a Fig.4.10(b) mostra a estrutura (viga) já com uma massa adicional inserida.



(a) Massas de adição utilizadas



(b) Estrutura com massa adicionada

Figura 4.10 – Descrição dos danos inseridos na estrutura

Para obter três meios iônicos diferentes, utilizou-se água com sal de aquário em diferentes concentrações, como se descreve na Tab. 4.2.

Tabela 4.2. Concentração de sal de aquário na água

Quantidade de Água	Quantidade de Sal	Observação
1,75L	0g	Sem sal.
1,75L	29,2g	Metade da proporção de sal recomendada para obter água salgada para aquário.
1,75L	58,3g	Proporção de sal recomendada para obter água salgada para aquário.

Durante os ensaios, a viga de alumínio foi submersa em um recipiente de material plástico (Fig. 4.11) para cada uma das concentrações de sal descritas na Tab. 4.2. Na Fig. 3.11 pode-se observar a viga submersa na água.

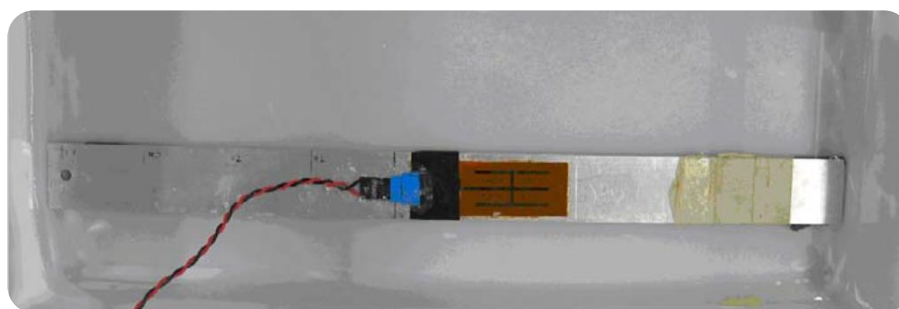


Figura 4.11 – Imagem da viga submersa na água

O planejamento de experimentos utilizado neste estudo é apresentado na Tab. 4.3. Conforme pode ser observado, foram realizadas 10 repetições para cada configuração. Para cada configuração foi adotado um número de grupo para posterior identificação nos gráficos de impedância eletromecânica e métrica do dano.

A Fig. 4.12 apresenta os sinais de impedância obtidos para os experimentos descritos na Tab. 4.3, Nela são mostradas apenas as médias dos 10 ensaios para cada grupo. Percebe-se a proximidade das médias dos sinais para os casos com quantidades iguais de sal (meios iônicos iguais). De acordo com este gráfico, os sinais de impedância eletromecânica apresentam uma maior variação devido à quantidade de sal adicionada.

Tabela 4.3 – Definição dos experimentos para estudar a influência de meios iônicos.

# do Grupo	Sal	Massa	Medições									
1	Sem Sal	Sem massa	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	Sem Sal	2,307 g	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
3	Sem Sal	8,472 g	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
4	29,2g	Sem massa	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
5	29,2g	2,307 g	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
6	29,2g	8,472 g	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
7	58,3g	Sem massa	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
8	58,3g	2,307 g	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
9	58,3g	8,472g	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90

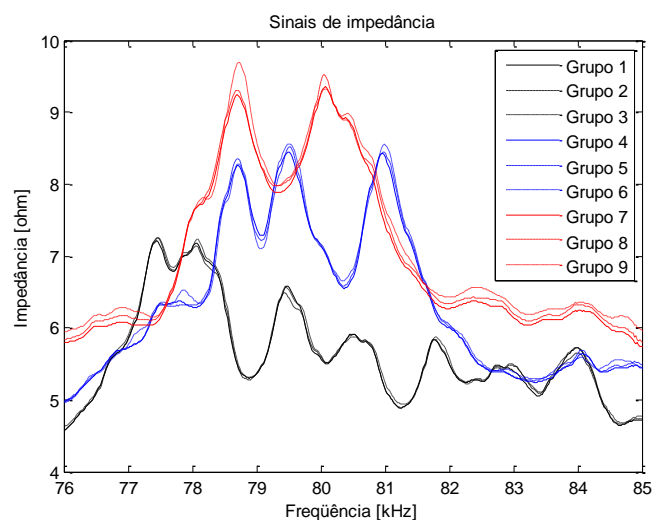


Figura 4.12 – Sinais de impedância eletromecânica ao longo do domínio da frequência para o ensaio iônico

A partir dos sinais de impedância eletromecânica medidos foram calculados os valores da métrica de dano usando a métrica RMSD (Desvio Médio da Raiz Quadrada, Eq.(2.16)). Na Fig. 4.13 são apresentados os valores calculados para cada um dos grupos

estabelecidos. Nesta mesma figura ficam evidentes os três grupos de métricas facilmente separáveis devido à variação do meio iônico.

Com o objetivo de simplificar os cálculos do meta-modelo e sabendo que o objetivo deste trabalho é estudar a influência dos meios iônicos no monitoramento de integridade estrutural baseado na impedância eletromecânica (e não criar um modelo relacionando a quantidade de sal ou massa adicionada), os valores de concentração de sal serão representados por 0 (sem sal), 0,5 (29,2g de sal) e 1 (58,3 g de sal). Já os valores de massa serão representados por 0 (sem massa), 1 (massa de 2,307g) e 2 (massa de 8,472g).

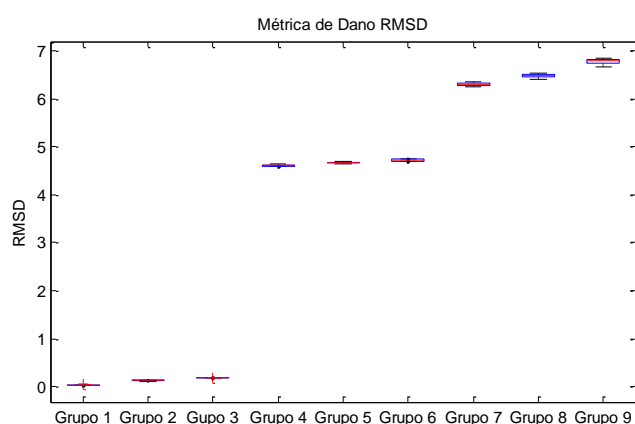
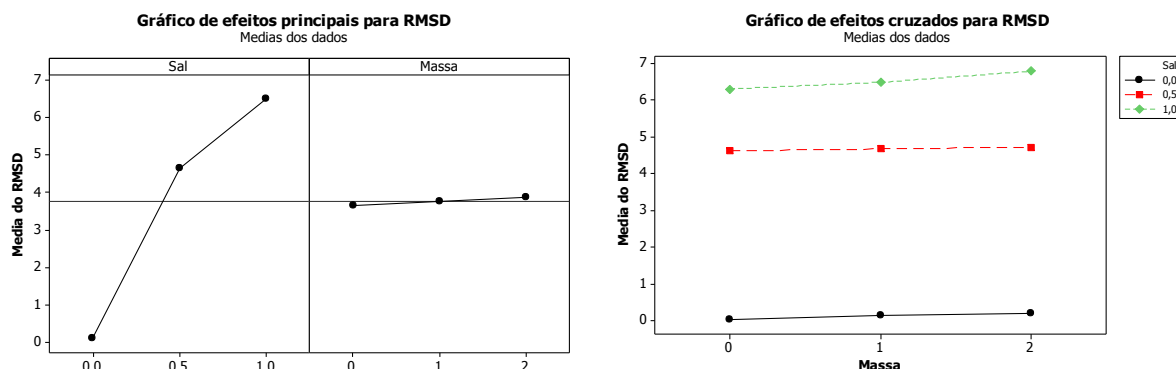


Figura 4.13 – Métrica de dano RMSD para os experimentos de influência de meios iônicos

Ao realizar uma análise estatística dos efeitos principais de cada um dos fatores estudados (massa, concentração de sal), percebe-se que há maior contribuição do efeito isolado da concentração de sal em relação à massa (Fig.4.14 (a)). Ao se observar o gráfico com os efeitos cruzados (Fig. 4.14 (b)), nota-se novamente uma pequena inclinação da massa e uma grande variação para concentração de sal.

Conforme se percebe na Fig. 4.14(a), o que foi observado anteriormente sobre o efeito isolado da quantidade de sal é confirmado pelo ângulo positivo superior ao equivalente à massa adicionada. Isso significa que a variação da condição de 0,5 de sal para sal completo proporciona uma maior variação na métrica de dano do que aquela ocasionada pela variação da massa, alterando a configuração do ensaio (massa 1 para a massa 2). Deve ser lembrado, entretanto, que enquanto a variável sal é alterada de uma dada quantidade de água salgada para o dobro (saturada, de 1/2 para completa), a massa é alterada de aproximadamente 2% para 8% da massa da estrutura adicionada (da massa1 para a massa 2).



(a) Efeitos principais do meta-modelo

(b) Interação dos efeitos do meta-modelo

Figura 4.14 – Representação dos efeitos das variáveis do meta-modelo da influência do meio iônico

Na Fig.4.14(b) se percebe através dos efeitos cruzados (interação de efeitos) que a inclinação das curvas para a massa se alteram sutilmente. Entretanto, para a quantidade de sal, as médias são alteradas de maneira mais significativa.

Os dados do meta-modelo foram obtidos e analisados através do MINITAB. Os resultados podem ser visualizados a seguir:

Análise de regressão geral: RMSD versus Sal. Massa

Equação de regressão

$$\text{RMSD} = 0,440719 + 6,40864 \text{ Sal} + 0,122747 \text{ Massa}$$

Coeficientes						
Termos	Coef	SE do coef.	T	P	IC de 95%	VIF
Constante	0,44072	0,137397	3,2076	0,002	(0,16763. 0,71381)	
Sal	6,40864	0,168276	38,0840	0,000	(6,07418. 6,74311)	1
Massa	0,12275	0,084138	1,4589	0,148	(-0,04449. 0,28998)	1

S = 0,651732 R-quad. = 94,35% R-quad. (ajustado) = 94,22%
PRESS = 39,1155 R-quad. (pred.) = 94,02%

Análise de variância

Fonte	GL	Seq SS	SC Ajust.	MC Ajust.	F	P
Regressão	2	616,965	616,965	308,482	726,26	0,000000
Sal	1	616,061	616,061	616,061	1450,39	0,000000
Massa	1	0,904	0,904	0,904	2,13	0,148202
Erro	87	36,954	36,954	0,425		
Falta de ajuste	6	36,887	36,887	6,148	7455,98	0,000000
Erro puro	81	0,067	0,067	0,001		
Total	89	653,918				

Ao se observar a última coluna VIF (*Variance Inflation Factors* – Fatores de Inflação de Variância) da análise de regressão, deve-se lembrar de que VIF igual a 1 significa que não existe associação linear entre as variáveis independentes (dano e sal). R-Sq representa o coeficiente de determinação, que é responsável por definir a contribuição dada à métrica de dano através de cada uma das variáveis independentes. Com o valor de R-quad

(ajustado) suficientemente elevado (94,22%), pode-se afirmar que o modelo apresenta boa capacidade de representação do fenômeno estudado (94,22% das variações são causadas pelas variáveis consideradas).

Observando o modelo de regressão, pode-se perceber a grande influência do fator quantidade de sal para o processo de monitoramento. Assim, recomenda-se que, no caso do monitoramento de estruturas submersas com características similares às estudadas, dispositivos de medição próprios para meios iônicos sejam utilizados simultaneamente, de maneira que a salinidade do meio seja medida e inserida no modelo de previsão de danos, visto a grande importância deste fator no monitoramento da impedância.

Entretanto, as variações de escalas utilizadas para cada variável devem ser revistas para aplicações bem definidas. Enquanto a variável massa estava associada a situações em que nenhuma massa foi adicionada; 1% da massa da estrutura; 2% da massa da estrutura; a outra variável considerada, ou seja, a quantidade de sal, esta variou de forma bem mais significativa, a saber, sem sal; água salgada (procedimento de aquariofilistas); água saturada. Isto pode ter sido o fator que tenha levado a uma inclinação tão acentuada do meta-modelo quanto ao meio iônico e, assim, ficou destacada sua importância para o processo de monitoramento em estudo. Para casos específicos, outros experimentos com faixas bem delimitadas de escala devem ser realizados. Dessa forma, tanto a sensibilidade da alteração estrutural (pela adição de massa) como os índices de salinidade da água, devem ser revistos.

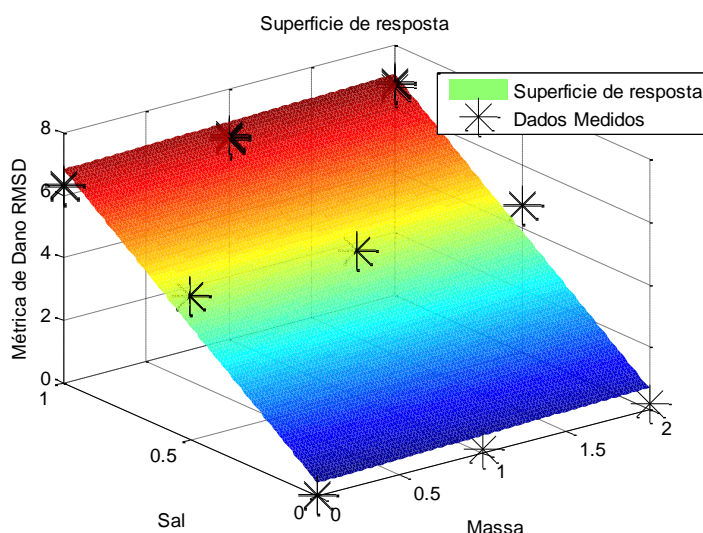


Figura 4.15 – Superfície de resposta para o meta-modelo de regressão do ensaio de meios iônicos

Após a elaboração dos ensaios e análise dos resultados do planejamento de experimentos, foi construída uma superfície de resposta baseada no meta-modelo de regressão linear. Tanto a superfície de resposta baseada em regressão como os pontos obtidos experimentalmente são apresentados na Fig. 4.15.

Novamente, como mostrado na Fig. 4.15, a inclinação no eixo da quantidade sal é muito superior ao discreto crescimento verificado no eixo da adição de massa.

4.4.1. Ensaio iônico com a pastilha piezelétrica blindada

Um segundo ensaio foi realizado com o fim de analisar o comportamento dos sinais de impedância em um meio iônico com o sensor blindado. Foi utilizada a mesma viga do ensaio descrito anteriormente, sendo que, desta feita, o sensor foi recoberto com fita isolante líquida como mostra a Fig. 4.16.

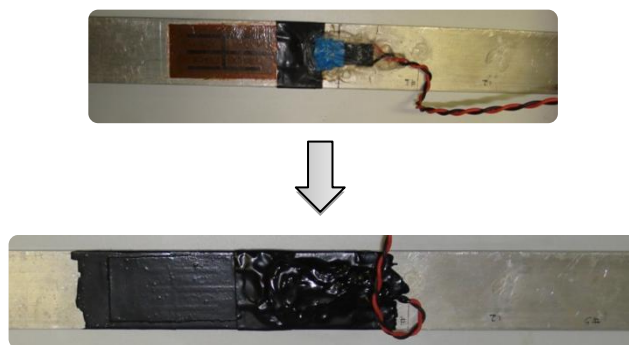


Figura 4.16 – Blindagem da pastilha de PZT para o ensaio iônico

Além da blindagem foi adicionado um rebite a 125 mm da pastilha piezelétrica, como mostra a Fig. 4.17. Para simular o dano o rebite foi retirado. Neste ensaio foram utilizadas as mesmas quantidades de sal descritas na Tab. 4.2.



Figura 4.17 – Estrutura com rebite para ensaio de meios iônicos

O planejamento de experimentos abordado neste estudo é apresentado na Tab. 4.4. Conforme pode ser observado, foram realizadas 10 repetições para cada configuração.

Neste sentido, para cada configuração foi adotado um número de grupo para posterior identificação nos gráficos de impedância eletromecânica e métrica do dano.

A Fig. 4.18 apresenta os sinais de impedância obtidos para os experimentos descritos na Tab. 4.4. Nela são mostradas apenas as médias dos 10 ensaios para cada grupo. Pode-se perceber a proximidade das médias dos sinais para os casos com dano e sem dano. De acordo com este gráfico, os sinais de impedância eletromecânica apresentam uma maior variação devido à perda de rebite que à variação de sal na água.

Tabela 4.4 – Definição de experimentos para estudar a influência dos meios iônicos com a pastilha piezelétrica blindada

# do Grupo	Sal	Dano	Medições									
1	Sem Sal	Com rebite	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	Sem Sal	Sem rebite	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
3	29,2g	Com rebite	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
4	29,2g	Sem rebite	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
5	58,3g	Com rebite	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
6	58,3g	Sem rebite	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60

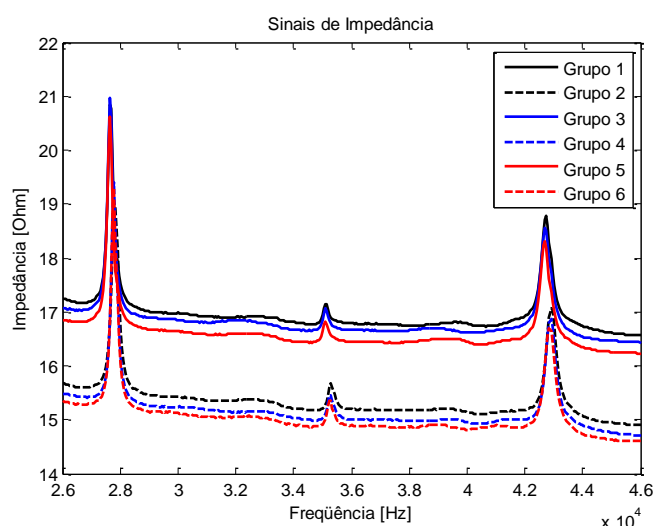


Figura 4.18 – Sinais de Impedância eletromecânica no domínio da frequência para o ensaio iônico com a pastilha piezelétrica blindada

A partir dos sinais de impedância eletromecânica medidos foram calculados os valores da métrica de dano usando a métrica RMSD (Desvio Médio da Raiz Quadrada, Eq.(2.16)). Na Fig. 4.19 se ilustra os valores calculados para cada um dos grupos estabelecidos. Nesta

mesma figura ficam evidentes os dois grupos de métricas, facilmente separáveis, devido à perda do rebite.

Os valores de concentração de sal são representados por 0 (sem sal), 0,5 (29,2g de sal) e 1 (58,3 g de sal).

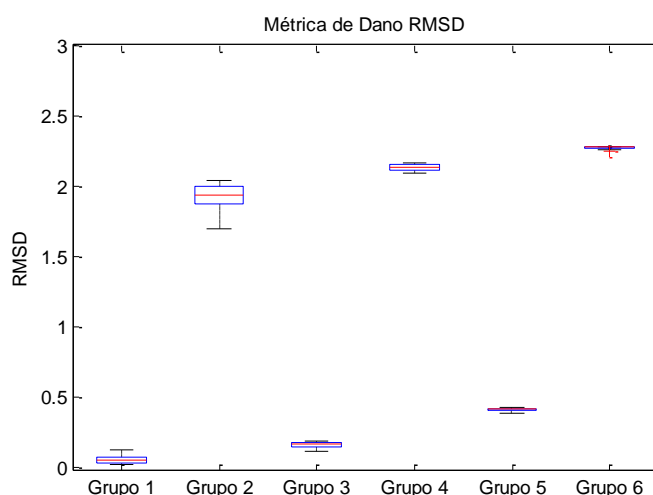
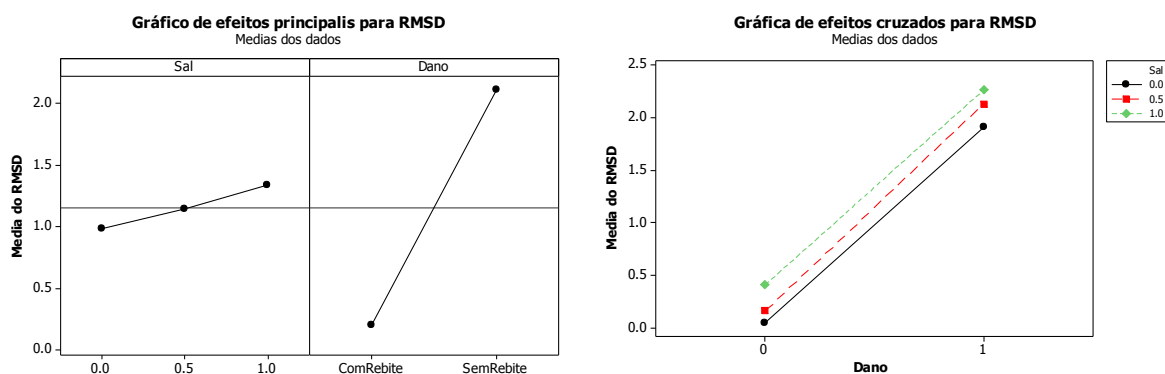


Figura 4.19 – Métrica de dano RMSD para os experimentos de influência de meios iônicos com blindagem

Ao realizar uma análise estatística dos efeitos principais de cada um dos fatores estudados (dano, concentração de sal), percebe-se que há maior contribuição do efeito isolado do dano em relação à concentração de sal (Fig.4.20 (a)).



(a) Efeitos principais do meta-modelo

(b) Interação dos efeitos do meta-modelo

Figura 4.20 – Representação dos efeitos das variáveis do meta-modelo da influência do meio iônico com blindagem

Ao se observar o gráfico com os efeitos cruzados (Fig. 4.20 (b)), novamente, nota-se uma pequena inclinação da concentração de sal e uma grande variação para o dano inserido.

Conforme se percebe na Fig. 4.20(a), o que foi observado anteriormente sobre o efeito isolado do dano inserido é confirmado pelo ângulo positivo superior ao equivalente à concentração de sal. Na Fig.4.20(b) se percebe através dos efeitos cruzados (interação de efeitos) que a inclinação das curvas para a concentração de sal se alteram sutilmente. Entretanto, para a perda do rebite, as médias são alteradas mais significativamente.

Os dados do meta-modelo foram obtidos e analisados através do MINITAB. Os resultados podem ser visualizados a seguir:

Análise de regressão geral: RMSD versus Sal. Massa

Equação de regressão

$$\text{RMSD} = 0.026395 + 0.35561 \text{ Sal} + 1.90006 \text{ Dano}$$

Coefficientes						
Termos	Coef	SE del coef.	T	P	IC de 95%	VIF
Constante	0.02640	0.0127964	2.063	0.044	(0.00077, 0.05202)	
Sal	0.35561	0.0167544	21.225	0.000	(0.32206, 0.38916)	1
Dano	1.90006	0.0136799	138.895	0.000	(1.87267, 1.92746)	1

S = 0.0529819 R-quad. = 99.71% R-quad. (ajustado) = 99.70%
 PRESS = 0.178328 R-quad. (pred.) = 99.68%

Análise de variância

Fonte	GL	Seq SS	SC Ajust.	MC Ajust.	F	P
Regressão	2	55.4182	55.4182	27.7091	9871.1	0.0000000
Sal	1	1.2646	1.2646	1.2646	450.5	0.0000000
Dano	1	54.1536	54.1536	54.1536	19291.8	0.0000000
Erro	57	0.1600	0.1600	0.0028		
Falta de ajuste	3	0.0432	0.0432	0.0144	6.6	0.0006663
Erro puro	54	0.1169	0.1169	0.0022		
Total	59	55.5782				

Observando o modelo de regressão, pode-se perceber que o valor do coeficiente do fator dano é maior, o que representa uma grande influência deste fator no processo de monitoramento, ou seja, o dano tem maior influência na métrica que os meios iônicos aplicados. Após a elaboração da regressão, foi construída uma superfície de resposta baseada no meta-modelo de regressão linear (Fig. 4.21).

Tanto a superfície de resposta baseada em regressão como os pontos obtidos experimentalmente são apresentados na Fig. 4.21. Novamente a inclinação no eixo do dano é evidentemente muito superior ao discreto crescimento verificado no eixo da adição da concentração de sal.

Analisando estes resultados pode-se concluir que a técnica pode se aplicar em meios iônicos sempre que o sensor seja blindado, ou seja, tanto quanto possível isolado do meio no qual está inserido.

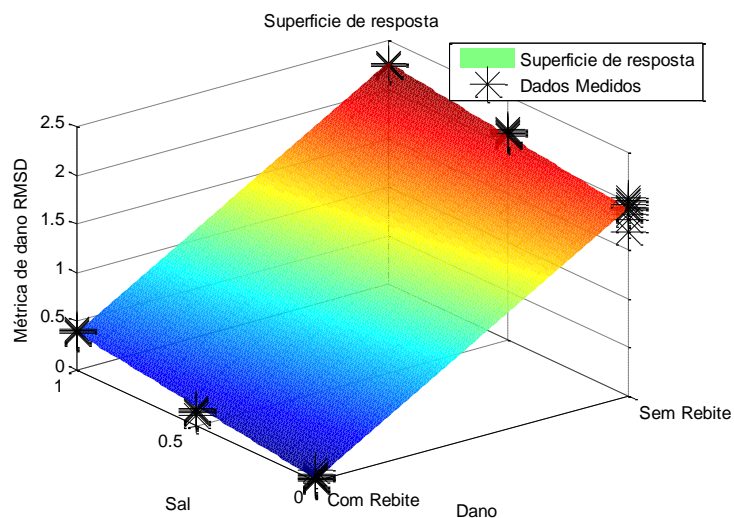


Figura 4.21 – Superfície de resposta para o meta-modelo de regressão do ensaio de meios iônicos com blindagem da pastilha de PZT

4.5. Influência do Formato do PZT

O método de monitoramento baseado na impedância eletromecânica utiliza pastilhas piezelétricas acopladas na estrutura que se deseja monitorar. Para isto os sinais obtidos devem ser sensíveis a mudanças físicas na estrutura, a fim de detectar danos incipientes. Para melhorar a eficiência da técnica foi realizado um estudo da influência dos formatos das pastilhas piezelétricas usadas nos ensaios. Neste experimento, foram utilizados dois formatos básicos de pastilhas piezelétricas, o circular e o quadrado. Neste caso, as cerâmicas piezelétricas foram coladas em estruturas do tipo viga e placa.

Utilizou-se uma viga de alumínio, com dimensões de 300 mm de comprimento, 32 mm de largura e 3,2 mm de espessura (Fig. 4.22). Na Fig. 4.22 observa-se que a viga tem duas pastilhas piezelétricas, uma com formato quadrado de 15 mm X 15 mm X 1 mm e, outra, circular com diâmetro de 15 mm e com 1 mm de espessura, sendo que as duas possuem área semelhantes, além das mesmas serem coladas na mesma posição nas duas faces da viga.

A figura 4.23(a) apresenta as duas faces da viga utilizada no experimento. Para simulação do dano foi adicionado um parafuso em um extremo da mesma para caracterizar uma modificação estrutural (“dano”) (Fig.4.23(b)).

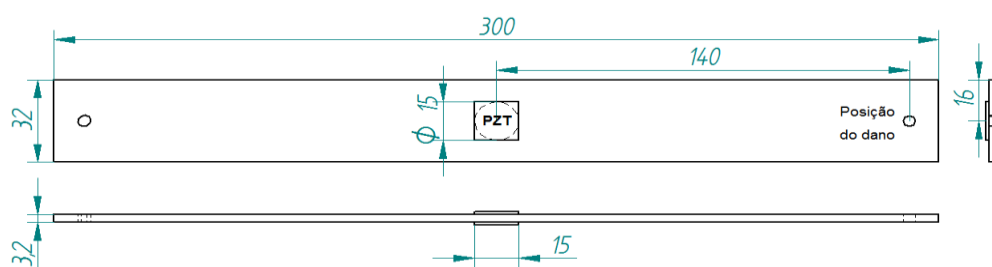


Figura 4.22 - Dimensionamento da viga e posicionamento das pastilhas piezelétricas com formato quadrado e circular

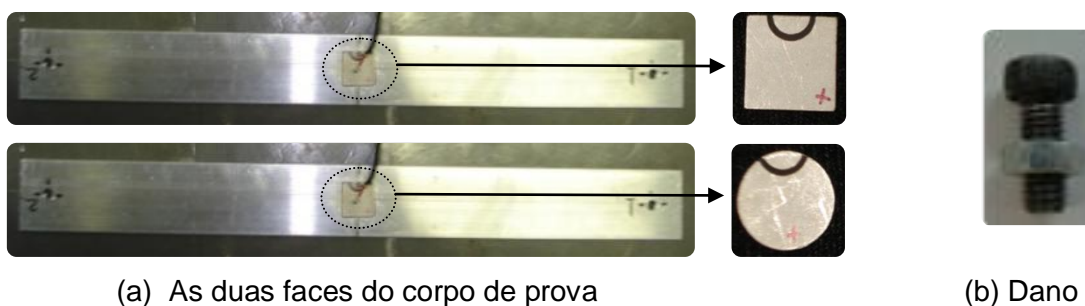


Figura 4.23 - Descrição da viga com pastilhas de PZT quadrada e circular

Foi ainda utilizada uma placa de alumínio com 300 mm x 300 mm x 3,2 mm. Em um dos lados da placa colou-se uma pastilha piezelétrica com formato quadrado de 15 mm x 15 mm x 1 mm na posição mostrada na Fig. 4.24, e, no outro lado, foi colada uma pastilha de PZT circular de diâmetro igual a 15 mm com 1 mm de espessura. As duas pastilhas foram coladas na mesma posição nos dois lados da placa.

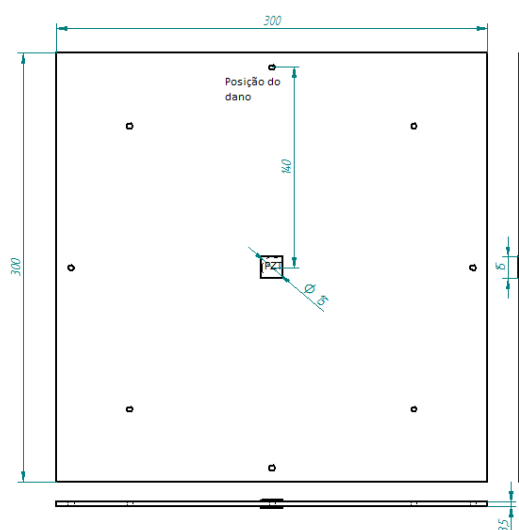


Figura 4.24 - Dimensionamento da placa e posicionamento das pastilhas piezelétricas com formatos quadrado e circular

A figura 4.25 apresenta as duas faces da viga utilizada no experimento. Para simulação do dano foi adicionado o mesmo parafuso utilizado anteriormente na viga. Este foi instalado próximo à borda da placa (Fig.4.23(b)) como mostra a Fig.4.24.

Foram obtidos 12 sinais de impedância antes e após a adição do parafuso (na viga e, posteriormente, na placa) nas faixas de frequência de 80 kHz a 88 kHz e de 60 kHz a 70 kHz, respectivamente. Na Fig. 4.26 pode-se observar como a média dos sinais de cada pastilha de PZT foi alterada quando da adição do parafuso.

A partir dos sinais de impedância eletromecânica medidos, foram calculados os valores da métrica de dano usando a métrica CCD (Desvio do Coeficiente de Correção, Eq.(2.19)).

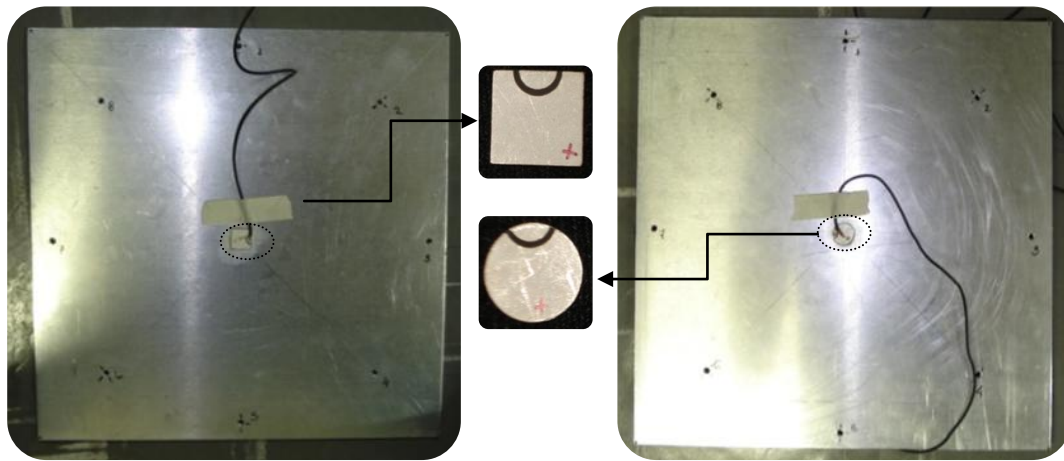
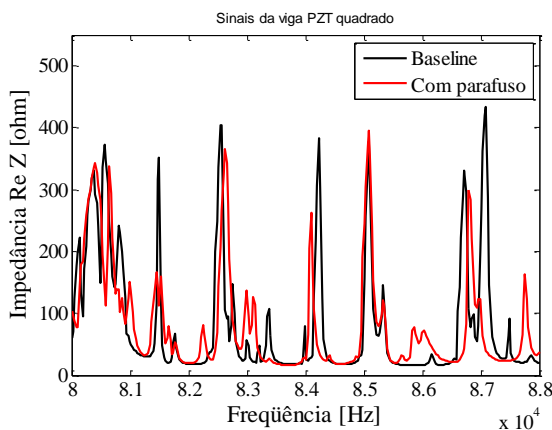
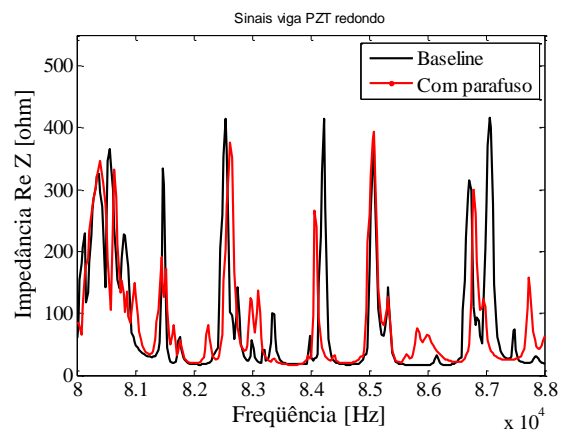


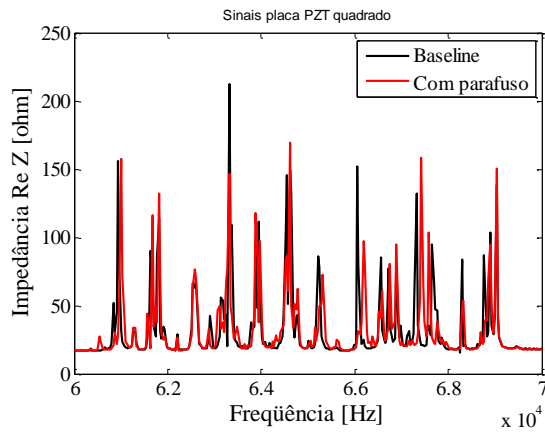
Figura 4.25 - Descrição da placa com pastilhas de PZT quadrada e redonda



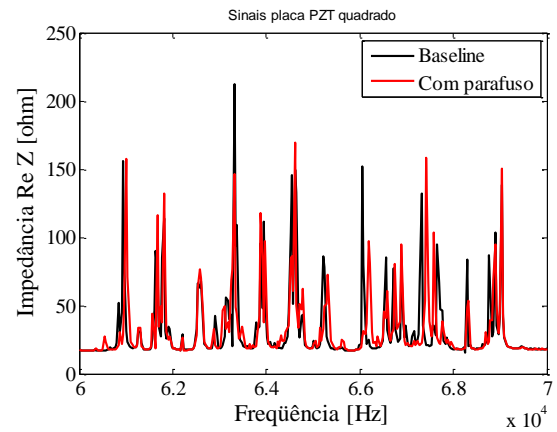
(a) Sinais viga - PZT quadrado



(b) Sinais viga - PZT redondo

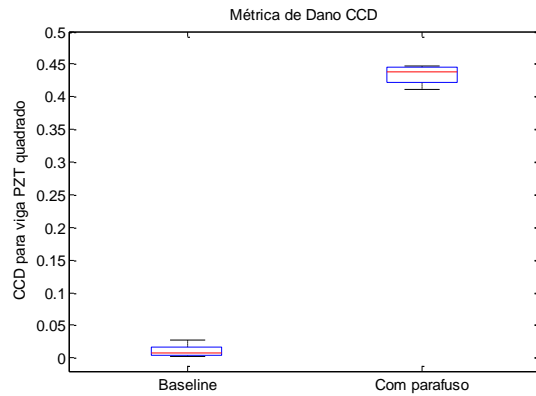


(c) Sinais placa - PZT quadrado

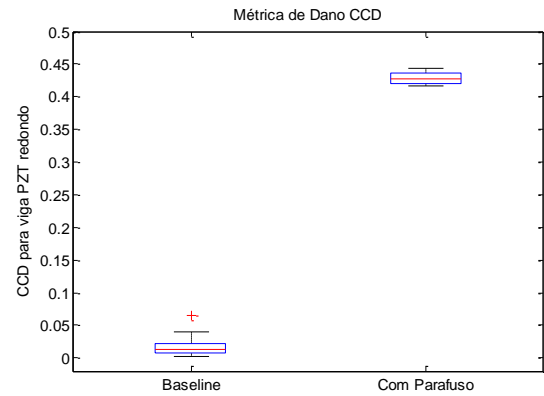


(d) Sinais placa - PZT redondo

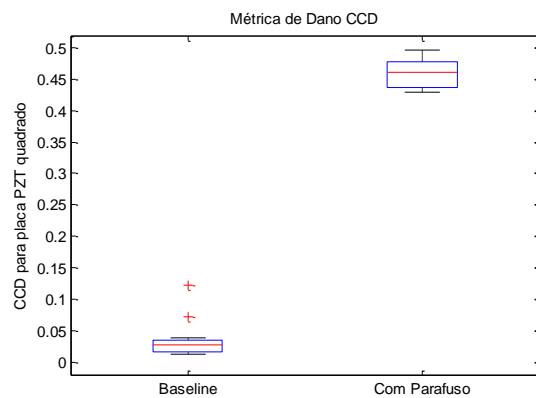
Figura 4.26 – Sinais de impedância para ensaio de formato das pastilhas de PZT



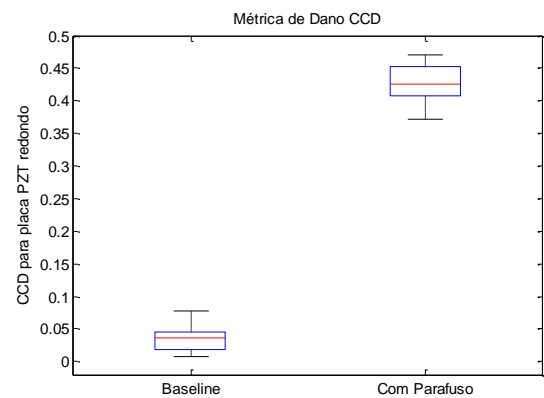
(a) Métrica de Dano viga - PZT quadrado



(b) Métrica de Dano viga - PZT redondo



(c) Métrica de Dano placa - PZT quadrado

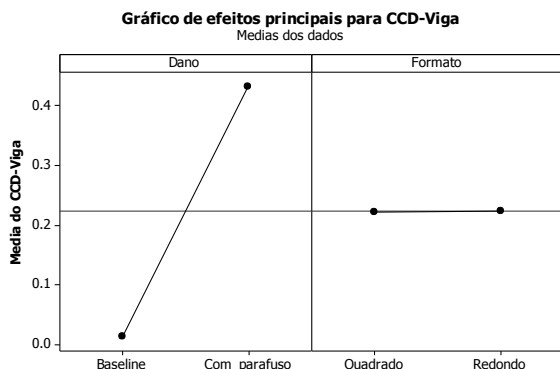


(d) Métrica de Dano placa - PZT redondo

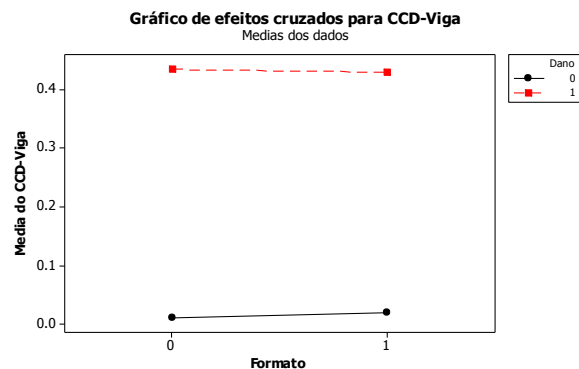
Figura 4.27 – Métrica de dano CCD para os experimentos de influência de formato das pastilhas de PZT

Na Fig. 4.27 se ilustra os valores calculados para cada uma das pastilhas piezelétricas da viga e da placa. Nestes gráficos ficam evidentes dois grupos de métricas (facilmente separáveis) devido à presença do dano.

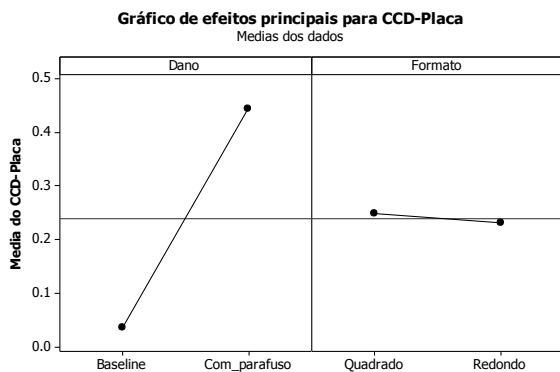
Ao realizar uma análise estatística dos efeitos principais de cada um dos fatores estudados (dano, formato), percebe-se que há maior contribuição do efeito isolado do dano em relação ao formato do PZT (Fig.4.28(a) e (c)). Quanto ao gráfico com os efeitos cruzados de cada uma das pastilhas de PZT (Fig. 4.28 (b) e (d)), novamente, nota-se uma pequena inclinação da reta referente ao formato e uma grande variação para as curvas que se referem às estruturas com o parafuso.



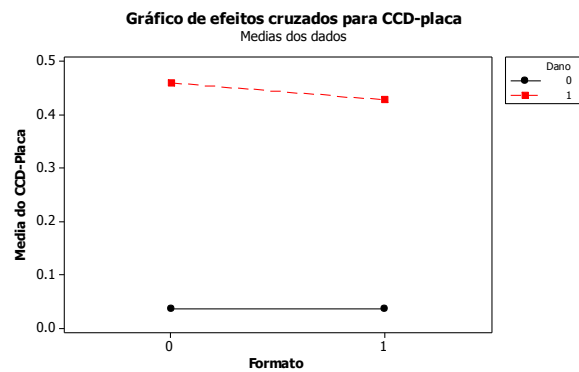
(a) Gráfico de efeitos isolados - Viga



(b) Gráfico de efeitos cruzados - Viga



(c) Gráfico de efeitos isolados - Placa



(d) Gráfico de efeitos cruzados - Placa

Figura 4.28 – Gráfico dos efeitos principais do meta-modelo para o ensaio da influência do formato da pastilha de PZT

Os dados dos meta-modelos (para viga e placa) foram obtidos e analisados através do MINITAB. Os resultados podem ser visualizados a seguir:

Análise de regressão geral: CCD-viga versus Dano. Formato

Equação da regressão

$$\text{CCD} = 0.0139542 + 0.41645 \text{ Dano} + 0.00154167 \text{ Formato}$$

Coeficientes						
Termos	Coef	EE do coef.	T	P	IC de 95%	VIF
Constante	0.013954	0.0032682	4.270	0.000	(0.007372, 0.020537)	
Dano	0.416450	0.0037738	110.353	0.000	(0.408849, 0.424051)	1
Formato	0.001542	0.0037738	0.409	0.685	(-0.006059, 0.009143)	1

S = 0.0130728 R-quad. = 99.63% R-quad. (ajustado) = 99.62%
 PRESS = 0.00875004 R-quad. (pred.) = 99.58%

Análise de variância

Fonte	GL	Seq SS	SC Ajust.	MC Ajust.	F	P
Regressão	2	2.08120	2.08120	1.04060	6089.0	0.000000
Dano	1	2.08117	2.08117	2.08117	12177.7	0.000000
Formato	1	0.00003	0.00003	0.00003	0.2	0.684831
Erro	45	0.00769	0.00769	0.00017		
Falta de ajuste	1	0.00048	0.00048	0.00048	2.9	0.093124
Erro puro	44	0.00721	0.00721	0.00016		
Total	47	2.08889				

Análise de regressão geral: CCD-placa versus Dano. Formato

Equação da regressão

$$\text{CCD} = 0.0439417 + 0.408242 \text{ Dano} - 0.016425 \text{ Formato}$$

Coeficientes						
Termos	Coef	EE do coef.	T	P	IC de 95%	VIF
Constante	0.043942	0.0068584	6.4070	0.000	(0.030128, 0.057755)	
Dano	0.408242	0.0079194	51.5499	0.000	(0.392291, 0.424192)	1
Formato	-0.016425	0.0079194	-2.0740	0.044	(-0.032375, -0.000475)	1

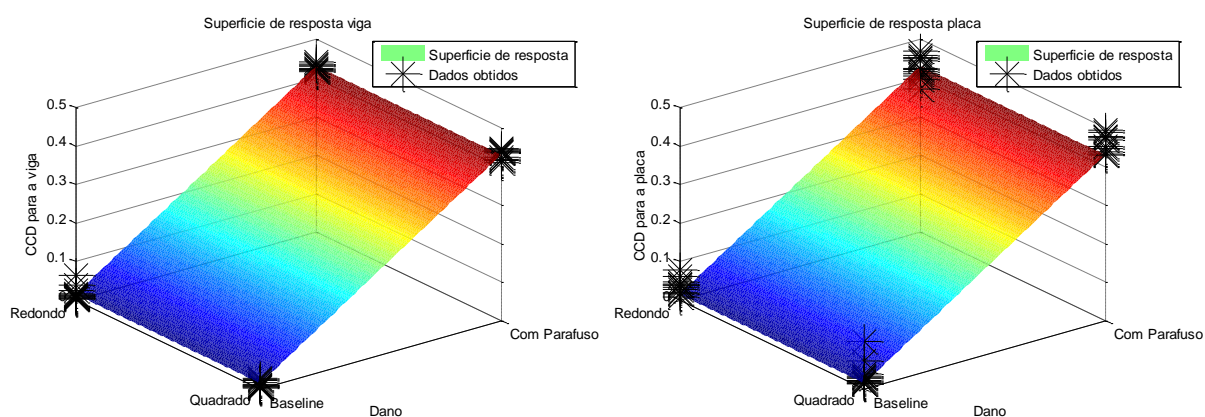
S = 0.0274334 R-quad. = 98.34% R-quad. (ajustado) = 98.26%
 PRESS = 0.0385328 R-quad. (pred.) = 98.11%

Análise de variância

Fonte	GL	Seq SS	SC Ajust.	MC Ajust.	F	P
Regressão	2	2.00317	2.00317	1.00159	1330.85	0.0000000
Dano	1	1.99994	1.99994	1.99994	2657.39	0.0000000
Formato	1	0.00324	0.00324	0.00324	4.30	0.0438273
Erro	45	0.03387	0.03387	0.00075		
Falta de ajuste	1	0.00295	0.00295	0.00295	4.19	0.0466368
Erro puro	44	0.03092	0.03092	0.00070		
Total	47	2.03704				

Conforme descrito pelos programas, pode-se perceber que o valor de R-quad. (ajustado) para a viga é de 99,62% e para a placa é de 99,62%, caracterizando, portanto, grande capacidade de representação dos meta-modelos de primeiro grau em relação aos experimentos realizados. Observando os modelos de regressão, pode-se perceber que o valor do coeficiente do fator dano (estruturas com parafuso) é maior, o que representa uma influência importante do fator dano para o processo de monitoramento, ou seja, o dano tem maior influência na métrica do que o formato da pastilha de PZT, tanto na viga como na placa.

Na Fig. 4.29 pode-se observar as superfícies de resposta de cada uma das pastilhas de PZT, além dos valores obtidos no cálculo da métrica de dano.



(a) Superfície de resposta - Viga

(b) Superfície de resposta - Placa

Figura 4.29 – Superfícies de resposta para os meta-modelos de regressão do ensaio de formato das pastilhas de PZT

Conforme foi observado no experimento, restrito evidentemente ao domínio de análise utilizado, não se verifica para o monitoramento de variações estruturais influência quanto à variação do formato da pastilha de PZT. Isto pode ser comprovado tanto pelos coeficientes do meta-modelo baseado em regressão, quanto pelos gráficos dos efeitos principais.

4.6. Influência da Posição do Sensor

Para determinar qual é a melhor posição do sensor para detectar danos foram feitos dois ensaios em duas estruturas aeronáuticas de alumínio. A primeira estrutura foi um painel aeronáutico de 80x80 cm como mostra a Fig. 4.30(a). A estrutura foi instrumentada com 5 pastilhas de PZT: duas com formato quadrado de 15x15x0,1 mm (PZT3 e PZT4) e três redondas com diâmetro de 15 mm e espessura de 0,1 mm (PZT1, PZT2 e PZT5). Tais pastilhas de PZT são ilustradas na Fig.4.30(b). Os formatos das pastilhas de PZT foram escolhidos pela facilidade de colagem, já que, como foi observado na seção 4.5, a influência do formato do PZT não é relevante.

Para simular o dano foi removido um rebite localizado próximo ao PZT3, como mostra a Fig.4.30(c). Foram medidos os sinais de impedância para as cinco pastilhas piezelétricas, primeiramente para a estrutura com todos os rebites intactos e, depois, para a estrutura com dano (sem um dos rebites). Foram tomadas 200 medições para cada um dos dois estados da estrutura.

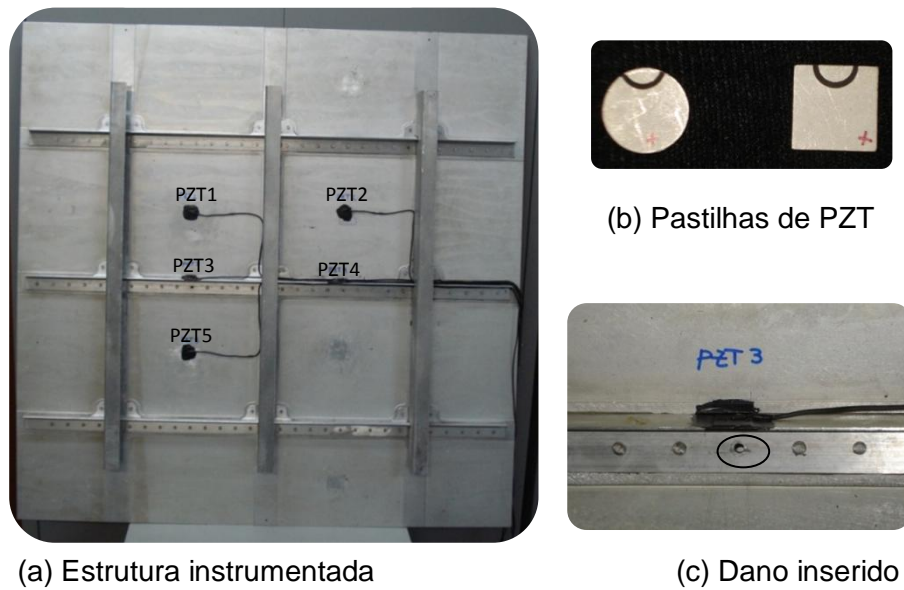


Figura 4.30 – Painel aeronáutico

As médias dos sinais de impedância de cada PZT são apresentadas na Fig. 4.31. Existem algumas diferenças entre os sinais sem dano e os sinais com dano dos PZT3 e PZT5. O PZT4 apresentou uma leve variação nos dois estados. Já os sinais do PZT1 e PZT2 não tiveram variações.

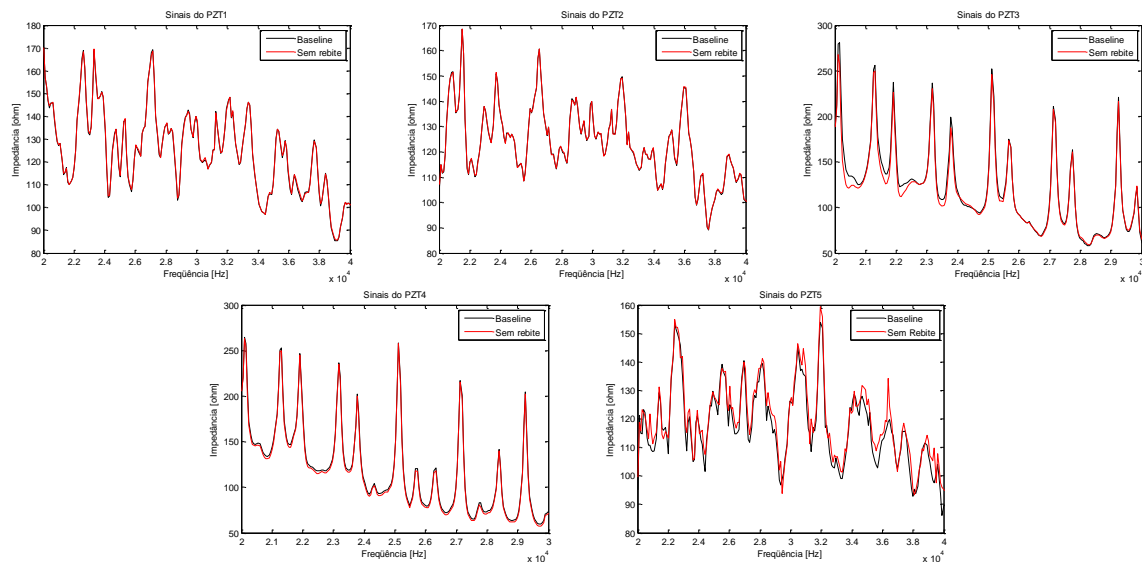


Figura 4.31 – Sinais dos sensores de impedância do painel aeronáutico

Na Fig.4.32 são observados os resultados obtidos ao calcular a métrica de dano (CCD - Desvio do Coeficiente de Correlação (Eq. 2.19)). Observam-se duas caixas azuis em cada gráfico: a primeira representa as métricas de dano obtidas dos sinais medidos quando o

painel continha todos os rebites intactos; a segunda caixa representa os valores obtidos com as medições feitas depois do dano (perda do rebite). A linha vermelha representa a média e a caixa azul representa o desvio padrão dos valores obtidos (Fig. 4.32).

Quando foi retirado o rebite observou-se que nenhum dos PZT1, PZT2, PZT3 e PZT4 foi capaz de detectar o dano. Já o PZT5 detectou a perda de rebite, possivelmente devido a duas razões: i) encontra-se instalado diretamente na placa; ii) a vibração à qual está submetido ocorre na mesma direção do dano inserido. Já o PZT3, que se encontra instalado na viga de reforço, apresentou pouca sensibilidade, embora seja a pastilha de PZT mais próxima do rebite retirado. Por outro lado, a vibração à qual está submetido ocorre a 90 graus do dano inserido.

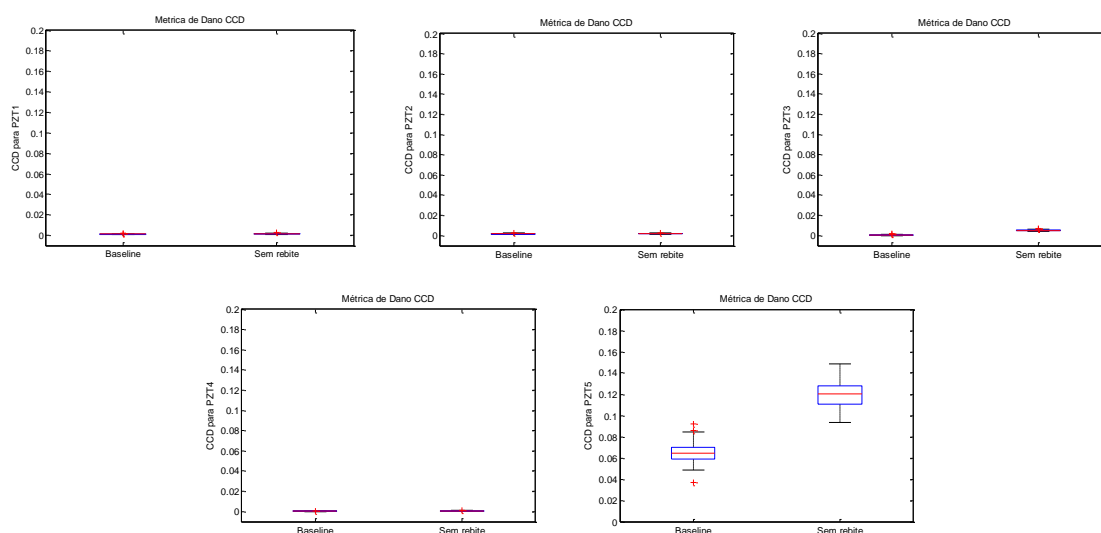


Figura 4.32 – Gráficos da métrica de dano (painel aeronáutico)

A segunda estrutura aeronáutica utilizada contém uma janela, conforme ilustrado na Fig. 4.33(a). Devido ao tamanho e à complexidade da estrutura, dez pastilhas de PZT foram utilizadas no experimento: seis PZTs com formato quadrado foram colados sobre as vigas de reforço e quatro PZTs com formato circular foram colados na placa (Fig.4.33(b)). O número de pastilhas de PZT utilizado foi arbitrário e nenhum estudo preliminar foi feito para otimizar esse número. Foram considerados dois estados da estrutura. Para cada estado foram feitas 200 medições. Os estados estudados são os seguintes: o primeiro é o *baseline* (referência) e o segundo estado se refere à remoção de uma a garra jacaré colocada previamente próxima ao PZT7 (Fig.4.33(c)).

Ao começar os testes o PZT10 apresentou pouca estabilidade e repetibilidade, tendo por isso sido descartado do ensaio.

Os sinais de impedância dos nove PZTs podem ser observados na Fig.4.34. Observando os sinais, pode-se dividi-los em três grupos: (1) os PZTs que não tiveram variações (PZT1, PZT3, PZT4, PZT5 e PZT6); (2) Os PZTs que tiveram variações mínimas (PZT2, PZT8 e PZT9); (3) O PZT que teve uma variação destacada (PZT7).

Na Fig.4.35 são apresentados os gráficos dos valores obtidos com a métrica de dano CCD (Desvio do Coeficiente de Correlação (Eq. 2.19)). Nestes gráficos torna-se evidente que as pastilhas de PZT coladas na placa da estrutura foram capazes de detectar o dano, além do PZT2 que se encontrava na viga de reforço na vizinhança de onde foi retirada a garra.

Embora o PZT2 estivesse mais perto do dano, pode-se observar que o PZT7 foi o que apresentou maior variação no valor da métrica.



(a) Janela instrumentada



(b) Detalhes dos 10 PZTs



(c) Detalhes dos "danos" inseridos

Figura 4.33 – Janela de avião (estrutura em alumínio)

Como conclusão dos ensaios apresentados, pode-se concluir que as pastilhas de PZT que mostraram maior sensibilidade aos danos foram as que estavam localizadas mais próximas destes e, além disso, aquelas para as quais a direção da vibração imposta era coincidente com a direção do dano inserido.

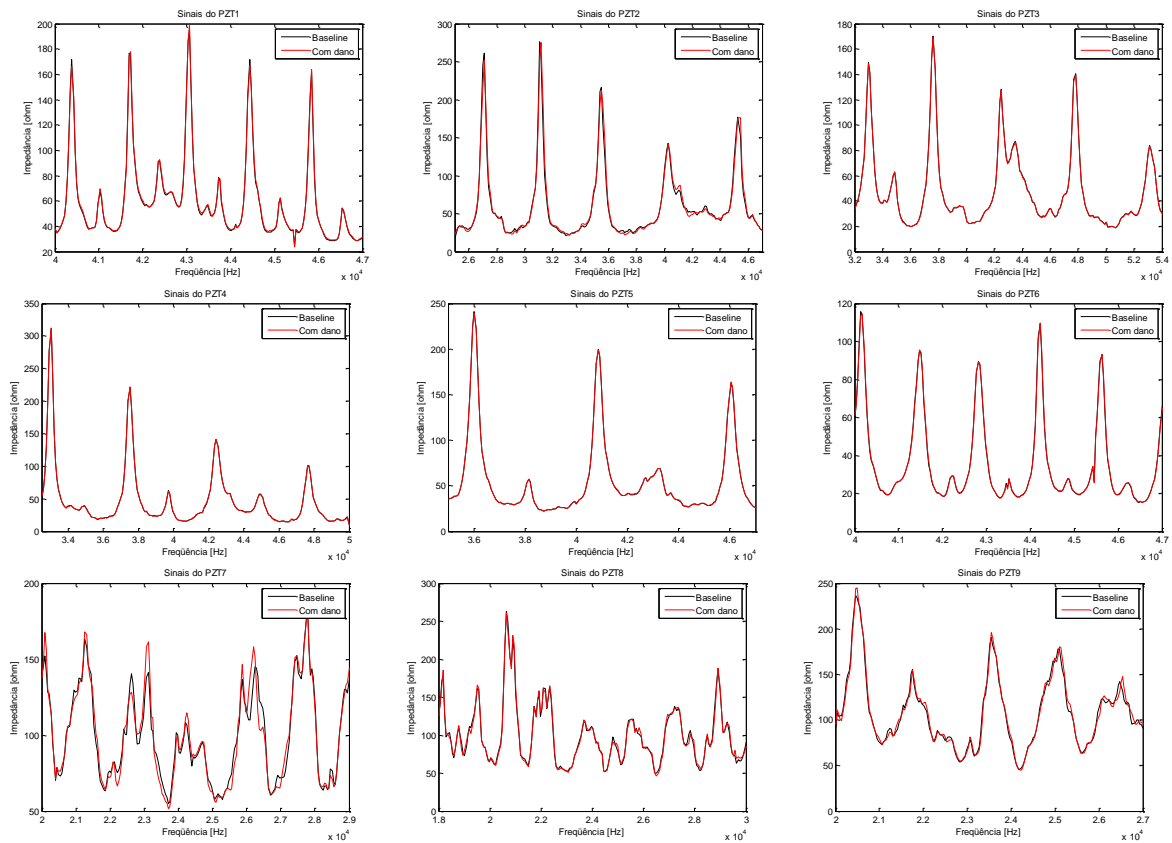


Figura 4.34 – Sinais dos sensores de impedância instalados na região da janela de avião

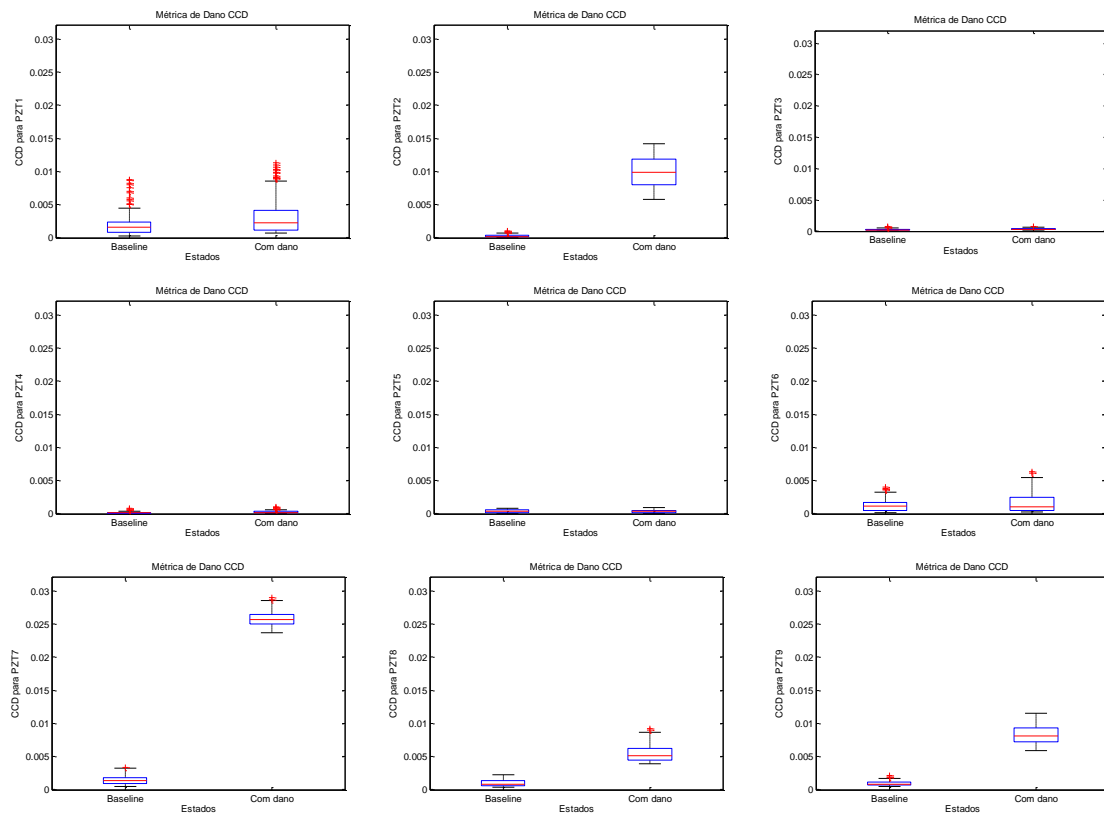


Figura 4.35 – Gráficos da Métrica de Dano (Janela de avião)

CAPÍTULO V

SISTEMA DE MEDIÇÃO DE IMPEDÂNCIA ELETROMECÂNICA PARA MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL BASEADO EM IMPEDÂNCIA ELETROMECÂNICA

5.1. Introdução

Geralmente analisadores de alto custo e de um único canal de impedância são usados para processar os dados para o monitoramento de integridade estrutural baseado na impedância eletromecânica. No entanto, para estruturas de grandes dimensões, é desejável uma rede de sensores piezelétricos sobre a área a ser monitorizada e medir esses transdutores sucessivamente, de modo a aumentar a probabilidade de detecção bem sucedida de danos que se encontram ainda em uma fase incipiente. Neste contexto, um sistema de baixo custo, facilmente e bastante expansível, é proposto neste capítulo para monitorar uma matriz *multiplex* de pastilhas piezelétricas.

5.2. Impedância Elétrica

A impedância elétrica é um importante parâmetro utilizado para caracterizar circuitos elétricos, componentes e materiais utilizados na fabricação de vários dispositivos utilizados pela indústria. A impedância (Z) é definida como a oposição total que um circuito ou componente elétrico oferece à passagem de corrente alternada em uma determinada frequência. Ela pode ser calculada pela razão entre a tensão fornecida ao circuito ou componente e a corrente que passa por ele, Eq. (2.6).

A impedância é uma grandeza complexa, e, portanto, dividida em duas partes: resistência (parte real) e reatância (parte imaginária) (Fig. 5.1). A resistência (R) nos circuitos de corrente alternada se comporta de maneira similar à observada nos circuitos de

corrente contínua, sendo, portanto, um valor positivo cuja unidade é o ohm (Ω) (GIBILISCO, 2002). Se a reatância (X) for maior do que zero, dizemos que ela é do tipo indutiva e se for menor do que zero, dizemos que é do tipo capacitiva.

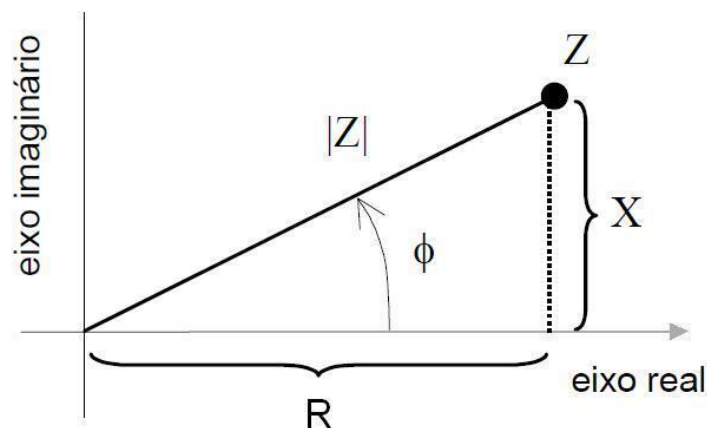


Figura 5.1 - Representação da impedância no plano complexo

A resistência (R) é um valor escalar, ou seja, é representada em uma escala unidimensional. Assim, para um circuito de corrente contínua, a corrente diminui conforme a resistência aumenta, obedecendo a Lei de Ohm. Esta lei também assegura o mesmo para a corrente alternada em uma resistência. Já para uma indutância ou capacitância, o cálculo não é tão simples quanto para a resistência elétrica (GIBILISCO, 2002).

Reatância (X) é a oposição oferecida à passagem da corrente alternada, podendo apresentar-se tanto na forma indutiva como capacitiva em um circuito elétrico. Constitui-se, então, numa componente da impedância de um circuito que não está associada a uma resistência elétrica pura.

5.3. Métodos para Medição de Impedância

Existem diversos métodos para medir impedância. Cada um possui vantagens e desvantagens. Para se escolher o melhor método para uma determinada aplicação devem ser considerados vários fatores, tais como a faixa de frequência a ser utilizada, a precisão das medidas e a facilidade de implementação. A seguir são apresentados quatro métodos dentre os mais utilizados (AGILENT TECHNOLOGIES, 2006).

5.3.1. Método da ponte (Bridge Method)

O circuito representativo deste método é apresentado na Fig. 5.2.

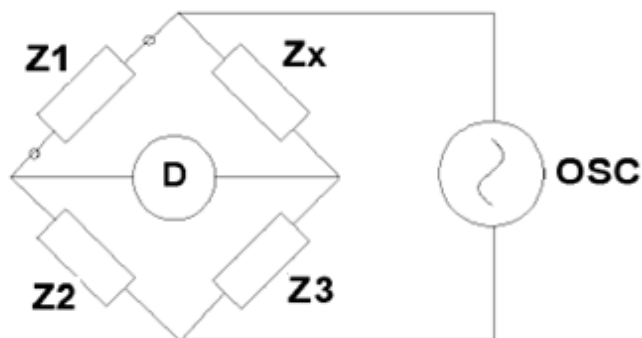


Figura 5.2 - Circuito do método da ponte

Quando nenhuma corrente flui através do detector (D), o valor da impedância desconhecida (Z_x) pode ser calculado pela relação entre os valores dos outros elementos da ponte, Eq. (5.1). Diversos tipos de circuitos em ponte, utilizando combinações de resistências, capacitores e indutores, são empregados em diversas aplicações.

$$Z_x = \frac{Z_1}{Z_2} Z_3 \quad (5.1)$$

5.3.2. Método ressonante (Resonant Method)

O circuito associado a este método é apresentado na Fig. 5.3.

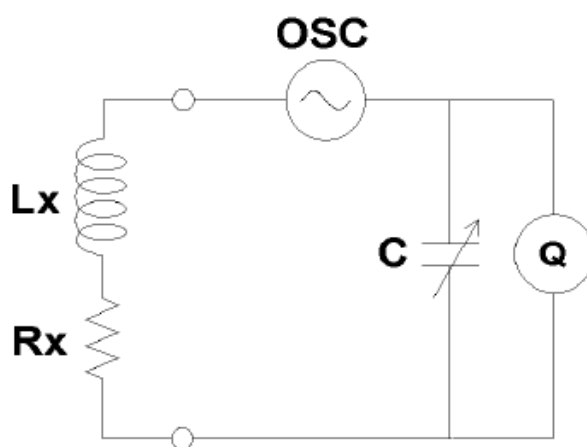


Figura 5.3 - Circuito do método ressonante

Quando um circuito atinge a ressonância através do ajuste de uma capacitância variável (C), a impedância desconhecida (L_x e R_x) é obtida através da relação entre a frequência da tensão aplicada, o valor da capacitância (C) e o valor da tensão entre os terminais do capacitor (Q).

5.3.3. Método I-V

A Fig. 5.4 mostra o circuito correspondente a este método.

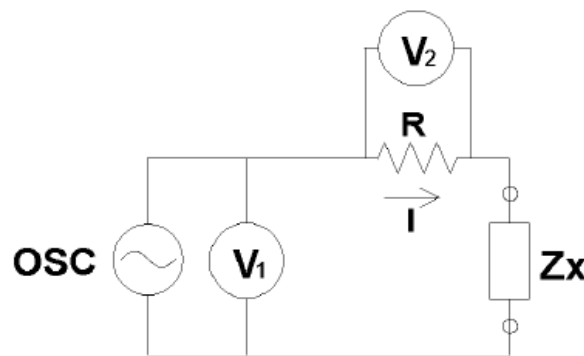


Figura 5.4 - Circuito do método I-V

Uma impedância desconhecida, Z_x , pode ser calculada através dos valores da tensão e da corrente existentes no circuito, conforme a Eq. (2.6). A corrente é calculada pela Lei de Ohm através da tensão medida sobre uma resistência de valor pequeno e conhecido. Desse procedimento resulta a Eq. (5.2).

$$Z_x = \frac{V_1}{I} = \frac{V_1}{V_2} R \quad (5.2)$$

5.3.4. Método da ponte auto-balanceada

Para este circuito (Fig. 5.5) pode-se afirmar que toda corrente que flui através de Z_x também flui pelo resistor R . O potencial no ponto L é mantido em zero volt (conhecido como “terra virtual”) pela presença de um amplificador operacional que funciona como um conversor corrente-tensão. A impedância Z_x é calculada através da tensão medida no terminal de alta (H) e a tensão sobre o resistor R .

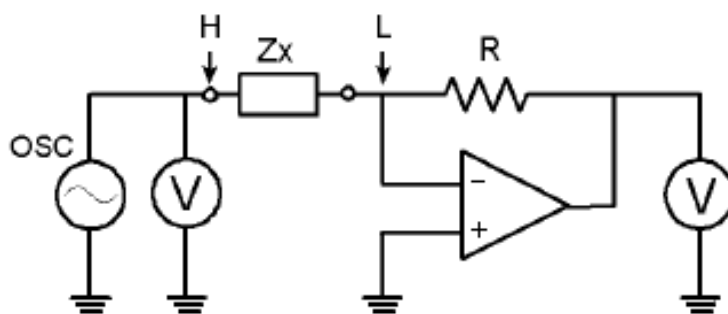


Figura 5.5 - Circuito do Método da Ponte Auto-Balanceada

5.4. Medição de Impedância no Método de Monitoramento de Integridade Estrutural Baseado na Impedância Eletromecânica.

Os sinais de impedância são geralmente obtidos através de um analisador de impedância. No caso do Laboratório de Mecânica de Estruturas Professor José Eduardo Tannús Reis, da FEMEC/UFU, tem-se o analisador de impedância HP 4194A (Fig. 5.6) que possui onze funções de medição de impedância e cobre uma faixa de frequência de 100 Hz até 40 MHz.



Figura 5.6- Analisador de impedância HP 4194A

Os níveis de saída são de 10 mV até 1 V rms. Segundo o manual do equipamento, mais de 401 pontos podem ser selecionados para aplicações especiais. As medições básicas tem precisão de 0,17% para medir impedância. Outros parâmetros devem ser ajustados. O tempo de integração (INTEG TIME) é usado para selecionar o tempo de integração digital, que pode ser SHORT, MED ou LONG. Os dois últimos são selecionados para minimizar os ruídos no sinal. SHORT é o ajuste usado inicialmente. O tempo de

integração pode ser alterado a qualquer momento, inclusive durante uma medição. Outro parâmetro a configurar é a média (AVERAGING), que é usada para alterar o número de medições por ponto, sendo que o valor de *default* é igual a 1. Esta média é usada para eliminar os efeitos de ruído no sinal. É mais adequado selecionar valores pequenos para esta média em aplicações onde o teste tem que ser feito em tempo real. Assim, quando são selecionados valores pequenos, o tempo de resposta é muito mais rápido do que quando se selecionam valores maiores. Para um sinal final de boa qualidade, pode-se selecionar o valor igual a 256, ou seja, o maior valor disponível para ajuste. Outro parâmetro que pode ser alterado no analisador de impedância é o DELAY TIME; com ele pode-se estabelecer um tempo de excitação antes de efetuar a medição propriamente dita. Segundo a Fig. 5.7, este pode assumir valores de 0 a 3600 segundos.

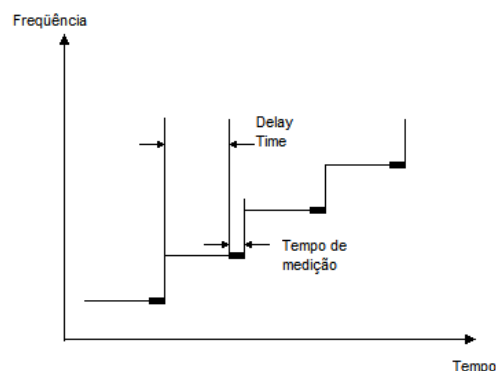


Figura 5.7 - Função DELAY TIME do analisador de impedância HP 4194A

Os dados adquiridos pelo analisador de impedância são transferidos para um computador pessoal para posterior análise e avaliação. Algumas desvantagens deste procedimento é que o equipamento de medição não é portátil, além de ser de custo muito elevado. Outro aspecto importante é que apenas poucos recursos do mesmo são utilizados nos ensaios de impedância eletromecânica. Finalmente, este equipamento dificilmente poderia ser embarcado no caso de aplicações aeronáuticas ou aeroespaciais.

Na literatura encontram-se algumas propostas alternativas para medir impedância. Peairs; Park; Inman (2004) propuseram uma versão de baixo custo usando um analisador de sinal FFT e um resistor associado a um amplificador operacional para medir a corrente da pastilha de PZT. Com esse arranjo, amplitude e fase da impedância são medidas e podem ser usadas para calcular a parte real da impedância da pastilha de PZT sobre uma ampla faixa de frequências. A principal desvantagem deste método é a limitação da gama

de frequências de excitação imposta pela frequência de amostragem do analisador de sinal FFT, o que provoca erros na medição de fase.

O trabalho de Peairs foi ampliado por vários grupos de pesquisa durante os últimos anos. Xu e Giurgiutiu (2005) propuseram uma maneira de melhorar o tempo de processamento e os requisitos de aquisição de dados através do desenvolvimento de um sinal de excitação do tipo *swept* com um espectro de energia constante. Filho e Baptista (2008) continuam na mesma direção, mas, como alternativa, eles optaram por usar um sinal de excitação do tipo *chirp*, levando também a bons resultados.

Além das técnicas baseadas em FFT para análises de impedância encontra-se o algoritmo baseado em ajuste de curva. Radil; Ramos; Serra (2008) propuseram um método muito preciso para medir a impedância. Com uma taxa de amostragem baixa, os autores foram capazes de reconstruir a tensão de excitação e a corrente aplicada à impedância. Em seguida, a fase e a amplitude da impedância foram extraídas com grande precisão (menos de 1% de erro) e estabilidade.

5.5. Sistema de Medição de Impedância Proposto

O sistema para coleta dos sinais de impedância é baseado no software LabVIEW[®] e em uma placa de aquisição de dados da *National Instruments*. O Laboratório de Mecânica de Estruturas Prof. José Eduardo Tannús Reis (LMest) da Universidade Federal de Uberlândia possui uma placa modelo USB-6259 que se comunica com o computador através de uma porta USB (*Universal Serial Bus*). Esse dispositivo pode gerar sinais a uma taxa de até 2,86 MS/s e adquirir a uma taxa de até 1,25 MS/s. A Fig.5.8 mostra o painel superior dessa placa.

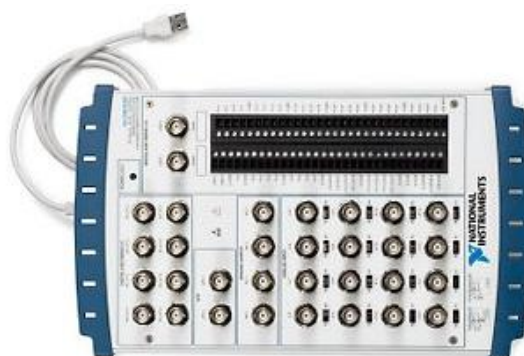


Figura 5.8- Painel superior da placa de aquisição de dados USB-6259

O LabVIEW® (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*) é uma linguagem de programação gráfica desenvolvida pela *National Instruments*. A primeira versão surgiu em 1986 para o Macintosh e atualmente existem ambientes de desenvolvimento para os Sistemas Operacionais Windows, Linux e Mac OS X. A linguagem gráfica do LabVIEW® é chamada "G". Os principais campos de aplicação do LabVIEW® são a aquisição de dados e a automação industrial. A programação é feita de acordo com o modelo de fluxo de dados, o que oferece a esta linguagem vantagens para a aquisição e manipulação de dados.

Os programas em LabVIEW® são chamados de instrumentos virtuais ou, simplesmente, VIs (*Virtual Instruments*). São compostos pelo painel frontal, que contém a interface com o usuário, e pelo diagrama de blocos, que contém o código gráfico do programa. Em princípio, cada programa (VI) pode ser executado isoladamente, ou, ainda, ser utilizado como um subprograma (*SubVI*) em uma aplicação maior. Os *SubVIs* podem ser comparados às funções “chamadas” no código de um programa principal. O programador liga *SubVIs* com linhas de ligação e define, deste modo, o fluxo de dados. Cada VI pode possuir entradas e/ou saídas. A execução de um VI começa quando todas as entradas estão disponíveis e os resultados do processamento são colocados nas saídas tão logo a execução do subprograma tenha terminado. Dessa forma, a ordem segundo a qual as tarefas são executadas é definida em função do fluxo dos dados. Uma importante consequência destas regras é a facilidade com que podem ser criados processos paralelos no LabVIEW®. Os *SubVIs*, sem interdependência dos respectivos dados, são processados em paralelo. Por isso, uma grande vantagem dessa linguagem gráfica em relação às linguagens baseadas em texto é a facilidade com que se criam componentes que são executados paralelamente. O painel frontal do LabVIEW® é um meio confortável para construir programas com uma boa interface gráfica. Para construir essa interface o programador não precisa escrever nenhuma linha de código. Controles e indicadores nesse painel permitem que o usuário insira ou extraia dados de um VI em execução.

O sistema proposto, além do LabVIEW® e da placa de aquisição da *National Instruments*, tem outro *hardware* desenvolvido pelo Prof. Dr. Roberto Mendes Finzi Neto, durante parte de seu pós-doutorado na Universidade Federal de Uberlândia, dentro do projeto “Monitoramento da Integridade Estrutural de Aeronaves”, financiado pela FINEP e pela EMBRAER (CT-AERO), sob a coordenação do Prof. Dr. Valder Steffen Jr. Os conceitos utilizados para tal desenvolvimento foram baseados no artigo escrito por Castelló; García-Gil; Espí (2008). Esse hardware possui ainda a função de chaveador envolvendo 16 PZTs que podem ser a ele conectados. A Fig.5.9 ilustra a arquitetura básica do sistema.

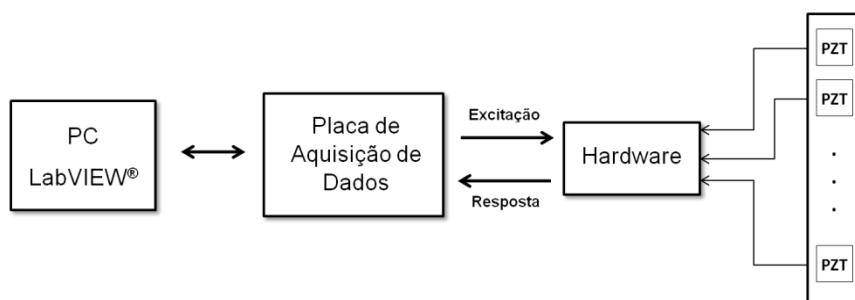


Figura 5.9- Arquitetura básica do sistema proposto

A magnitude dos sinais de excitação e resposta, e a defasagem entre eles são medidas e calculadas diretamente, através de simples manipulações realizadas pelo *hardware* desenvolvido. Dessa forma, ferramentas como a FFT não são utilizados. Nesse trabalho, serão apresentados apenas os princípios do funcionamento desse sistema e a função que é desempenhada pelo *software* desenvolvido no LabVIEW® sem, contudo, detalhar os circuitos que compõem o hardware. Vale ressaltar que tal detalhamento não faz parte do escopo desse trabalho.

Com o intuito de tornar mais fácil o entendimento do funcionamento do software, seu algoritmo é ilustrado no fluxograma mostrado na Fig. 5.10.

Ao iniciar o programa, o usuário deve configurar alguns parâmetros para que seja dado início ao ensaio. Um desses parâmetros é o número de iterações. Esse é o número de medições que devem ser realizadas em cada pastilha de PZT.

O cálculo do intervalo entre duas frequências consecutivas (Δf) é feito com base nas frequências inicial, final e o número de pontos escolhidos pelo usuário. Os contadores de PZTs e iterações são inicializados e, então, é dado início à geração do sinal de excitação. Em cada frequência o sinal é gerado durante, aproximadamente, 40 ms.

O sinal de excitação é transmitido ao hardware que, por sua vez, transmite-o ao PZT. O sinal de resposta do PZT e o sinal de excitação são manipulados pelo hardware para que seja possível extrair suas características de magnitude e fase, sem que seja necessário adquiri-los no domínio do tempo.

As manipulações realizadas pelo hardware são as seguintes:

- Quadratura dos sinais de excitação e resposta: a parte positiva do sinal é quadrada e a parte negativa é rejeitada. Um exemplo dessa manipulação é mostrado na Fig. 5.11.

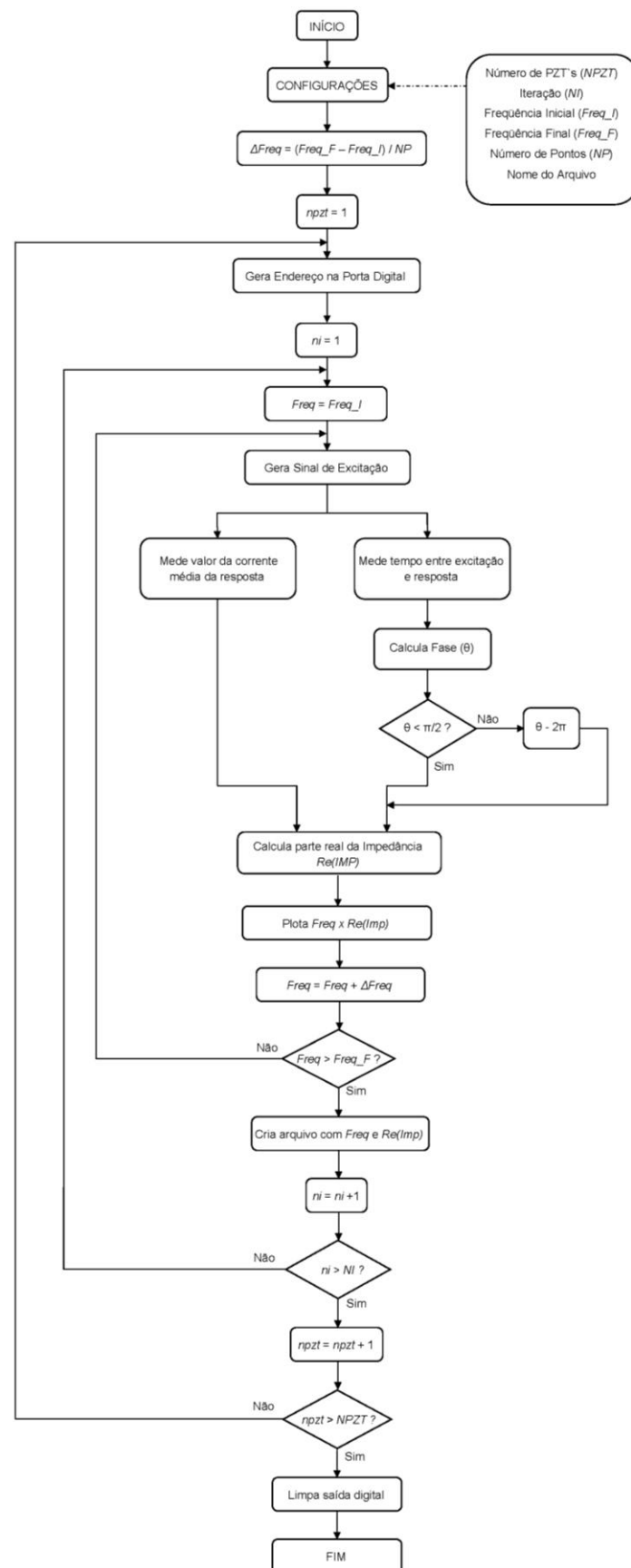


Figura 5.10- Fluxograma do software baseado em magnitudes elétricas

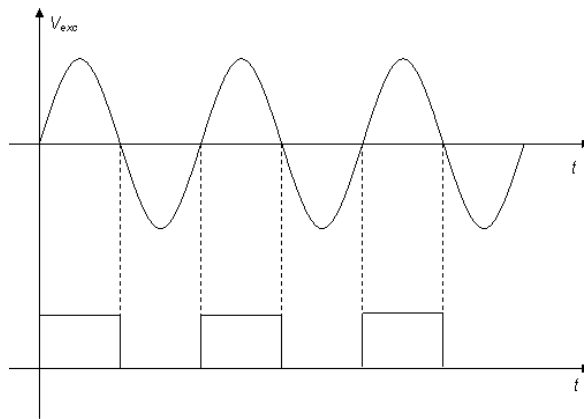


Figura 5.11- Sinal quadrado pelo *hardware*

- Obtenção do valor médio da corrente da resposta e da tensão de excitação. Esse valor é enviado como um nível DC. A Fig.5.12 exemplifica esse tipo de sinal.

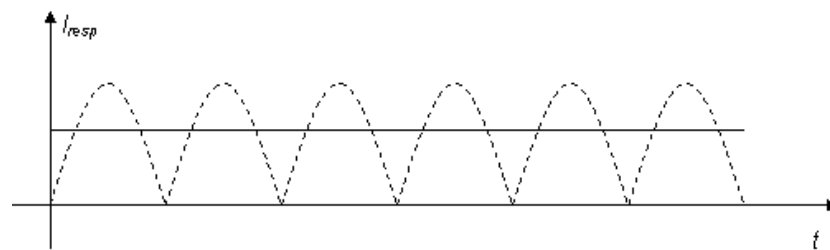


Figura 5.12- Valor médio da corrente de resposta

Como a placa de aquisição de dados não lê sinais de corrente, o *hardware* gera uma tensão contínua, proporcional ao valor de corrente obtido. Por isso é necessário, na equação final para o cálculo da impedância, levar em consideração o ganho dado pelo *hardware* na geração dessa tensão.

Com a Eq. (5.3) pode-se calcular o valor médio de um sinal senoidal:

$$V_{i(med)} = \frac{2}{\pi} V_i, \quad (5.3)$$

onde $V_{i(med)}$ é a tensão média da excitação, V_i é o sinal de excitação gerado (que é um valor conhecido).

Dessa forma, os sinais que são adquiridos pelo *software*, através da placa de aquisição de dados, são os sinais quadrados da tensão e da resposta, e o sinal DC mostrado na Fig. 5.13. Como o PZT não é uma resistência pura, podendo apresentar comportamento capacitivo ou indutivo, o sinal que passa por ele (sinal de resposta) é,

respectivamente, adiantado ou atrasado em relação ao sinal de excitação. Por isso se conclui que existe uma defasagem entre eles.

Para calcular essa diferença de fase entre as ondas quadradas desses sinais, é necessário medir o tempo entre a subida ou a descida de duas bordas consecutivas desses sinais. A Fig.5.13 demonstra o tempo que deve ser medido para o caso em que o PZT apresenta comportamento capacitivo, ou seja, a resposta está adiantada em relação à tensão.

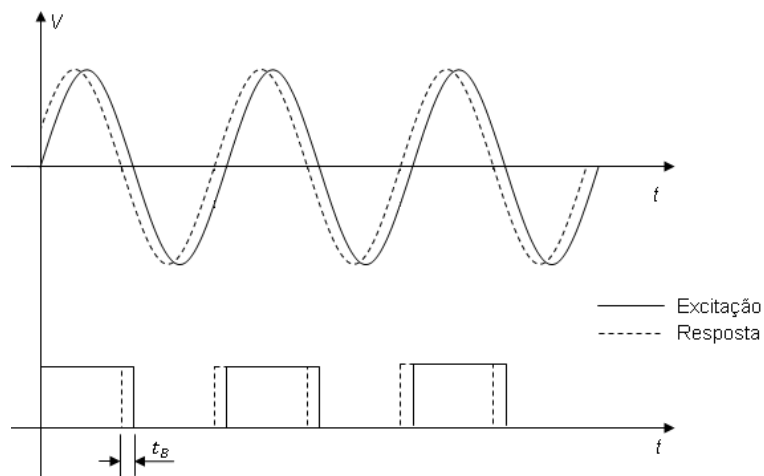


Figura 5.13- Tempo entre as bordas de descida dos sinais de excitação e resposta quando o PZT apresenta comportamento capacitivo

Para medir esse tempo t_B , é utilizado o contador existente na placa da *National Instruments*. O princípio que serve para essa medição pode ser chamado de Distância da Borda de Dois Sinais (*Two-Signal Edge-Separation*). Um exemplo é apresentado na Fig.5.14.

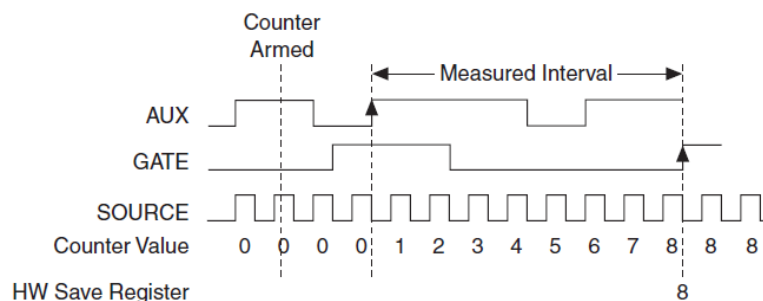


Figura 5.14 – Exemplo de medição da distância entre as bordas de dois sinais

Conhecendo o valor do *clock* (relógio) da fonte do contador (*source*) e o valor armazenado no registrador (*HW Save Register*), é possível calcular o tempo entre as duas

bordas dos sinais que estão entrando nas portas AUX e GATE do contador. É possível escolher se a medição deve ser feita entre as bordas de subida (caso mostrado na Fig.5.14) ou as de descida. Com o valor da defasagem entre os sinais (em segundos) e a frequência dos mesmos, pode-se calcular a defasagem em graus ou radianos. A Eq.(5.4), a seguir, permite calcular a defasagem entre os sinais em radianos.

$$\theta = 2\pi f t_B \quad (5.4)$$

onde θ é a defasagem em radianos, f é a frequência dos sinais e t_B é o tempo medido entre as duas bordas.

O canal que dispara o contador da placa é o canal AUX. Como o PZT apresenta comportamento capacitivo na maioria das frequências de excitação, o sinal quadrado da resposta foi conectado a esse canal, fazendo com que a referência no cálculo da defasagem entre os sinais seja o sinal da resposta. Assim, quando o PZT apresenta comportamento capacitivo, o tempo medido é o mesmo representado na Fig. 5.13.

No entanto, quando o PZT passa a se comportar como um indutor, o sinal de excitação fica adiantado da resposta. Dessa forma, o tempo que é medido pelo contador torna-se maior e é ilustrado pela Fig.5.15.

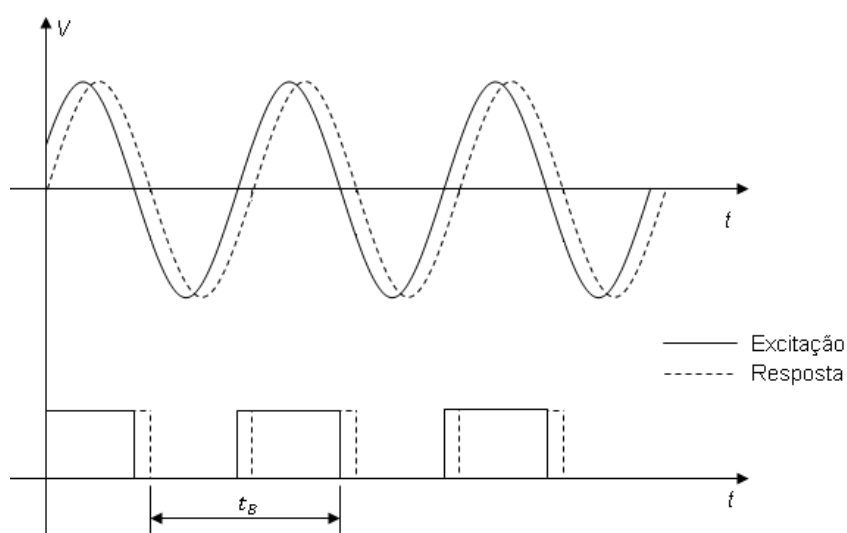


Figura 5.15- Tempo entre as bordas de descida dos sinais de excitação e resposta quando o PZT apresenta comportamento indutivo

Nesse caso, o cálculo simples que é realizado para compensar essa diferença é apresentado pela Eq.(5.5):

$$\theta = \theta - 2\pi \quad (5.5)$$

O circuito utilizado para obter a corrente que atravessa o PZT, necessária para o cálculo da impedância, é o apresentado na Fig.5.4.

Com os valores de defasagem entre os sinais de excitação e resposta, e os valores médios da tensão de excitação e da corrente resultante, pode-se calcular a parte real da impedância elétrica do PZT através da Eq. (5.6). Como citado anteriormente, em cada frequência o sinal de excitação dura aproximadamente 40 ms. Para que os resultados apresentados sejam mais estáveis, durante cada frequência de excitação o software adquire 50 valores de defasagem e de corrente. Através da média desses valores é realizado o cálculo da parte real da impedância.

$$\text{Re}(Z) = \left(\frac{V_{i(\text{med})} \cos \phi}{I_{(\text{med})}} \right) - R \quad (5.6)$$

onde $\text{Re}(Z)$ é a parte real da impedância do PZT, $V_{i(\text{med})}$ é a tensão média da excitação, ϕ é a defasagem entre os sinais de excitação e resposta, $I_{(\text{med})}$ é a corrente média da resposta e R é o valor da resistência *shunt* utilizada no circuito.

É importante mencionar que essa não é exatamente a equação final que foi implementada no software, pois algumas constantes foram adicionadas para compensar os ganhos internos que os circuitos que compõem o *hardware* apresentam.

O painel frontal do *software* é mostrado na Fig.5.16 a seguir.

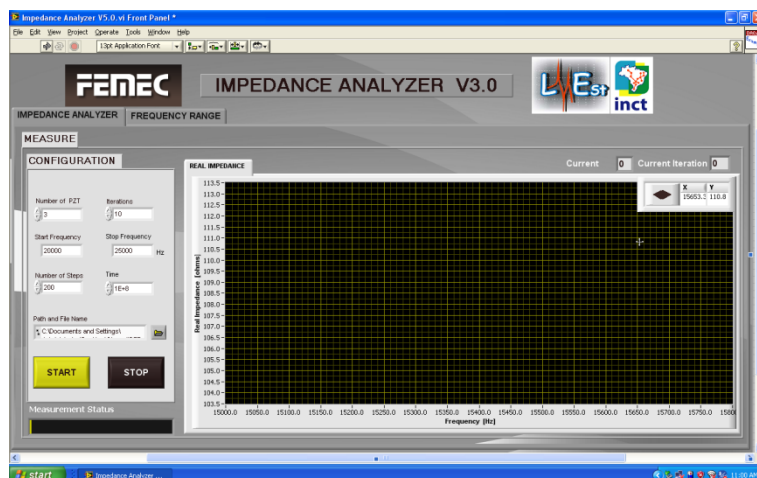


Figura 5.16 – Painel Frontal do Software

5.6. Ensaios para Avaliação do Sistema

Para avaliar o sistema de medição de impedância eletromecânica em aplicações de SHM, um ensaio de perda de rebite foi realizado. Esse tipo de dano é comum em estruturas aeronáuticas metálicas e o monitoramento de sua ocorrência é considerado importante.

Nesse ensaio foi utilizada uma viga de alumínio, com dimensões de 32 x 600 mm e 3 mm de espessura, e uma pastilha de PZT com dimensões de 25 mm de diâmetro e 0,127 mm de espessura, colado conforme a Fig. 5.17. Na Fig. 5.18 pode-se observar o corpo de prova utilizado neste ensaio.

As funções de impedância obtidas pelos dois métodos apresentados anteriormente foram processadas no software MATLAB visando a extração de características relacionadas à presença e a severidade do dano inserido na estrutura.

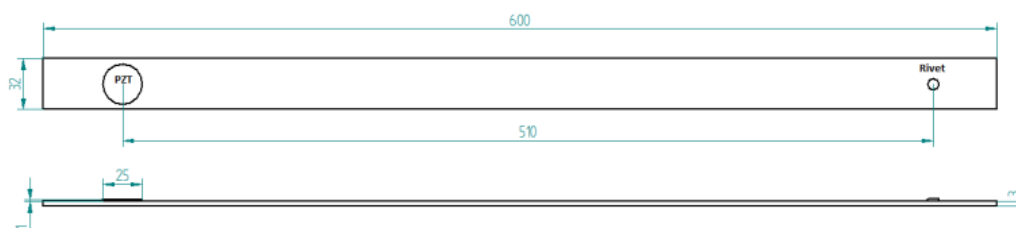


Figura 5.17 - Dimensões da viga e posições do PZT e do rebite



Figura 5.18 – Viga Rebitada com um PZT

Os sinais de impedância foram obtidos para duas condições: Sem falha (Condição antes da retirada do rebite (sistema original)) e com falha (Condição após a retirada do rebite da viga (perda do rebite)).

Para cada condição foram utilizadas 3 faixas de frequências, determinadas por tentativa e erro (procedimento experimental comum na técnica de monitoramento de integridade estrutural baseado em impedância eletromecânica (PARK e INMAN, 2005)): (a) 10 a 14 kHz, (b) 30 a 40 kHz e (c) 100 a 105 kHz. Essas frequências foram escolhidas para identificar o comportamento dos sistemas à medida que se aumenta a frequência, pois existem fatores como a taxa de amostragem da placa, por exemplo, que podem prejudicar a

qualidade dos sinais gerados e adquiridos à medida que a frequência aumenta. Para cada condição e faixa de frequência, foram obtidas 10 medidas da parte real da impedância da pastilha de PZT.

Na Fig. 5.19 são apresentados os gráficos da parte real da impedância em função da frequência para as três faixas avaliadas na condição sem falha. Em cada gráfico são mostradas as funções obtidas tanto usando o analisador (comercial) de impedância como o sistema proposto.

Os gráficos das funções para a condição com falha variam de forma semelhante à condição sem falha. Por isso, apenas os da primeira condição são apresentados. Como se considera que o instrumento padrão para as medições de impedância é o analisador de impedância da HP, as curvas de impedância devem ser analisadas tendo como referência a curva obtida através daquele equipamento. Ao se analisar os gráficos da Fig. 5.19, é possível perceber que o método desenvolvido acompanhou satisfatoriamente o formato da curva de impedância padrão em todas as faixas de frequência consideradas, ou seja, existe grande proximidade entre as curvas obtidas por meio do sistema proposto neste trabalho com aquelas provenientes do analisador de impedância.

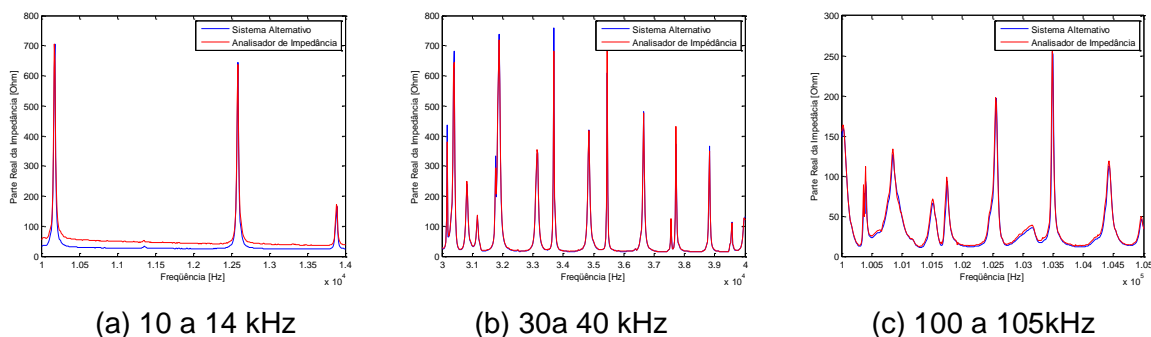


Figura 5.19 – Sinais da parte real da impedância sem dano

É possível perceber que, em baixas frequências, como as mostradas na Fig.5.19(a), verifica-se maior diferença entre os sinais fornecidos pelo analisador de impedância e os obtidos pelo sistema alternativo. Por isso, foi realizado um simples ensaio utilizando uma resistência pura no lugar do PZT para determinar o comportamento do sistema em uma grande faixa de frequência. Sabe-se que a curva da impedância de uma resistência real varia pouco ao longo da frequência. No entanto, nesse ensaio foi constatado que, para frequências inferiores a 20 kHz, o sistema possui um comportamento inadequado, pois a curva de impedância da resistência varia de forma não linear. Esse comportamento é causado pelas características internas dos componentes utilizados nos circuitos do *hardware* que foi desenvolvido. Portanto, não é recomendável a utilização do sistema

alternativo em aplicações que utilizem a medição de impedância em frequências inferiores a 20 kHz. Deve-se, entretanto, salientar que o método de monitoramento baseado na técnica da impedância é normalmente utilizado com frequências maiores que esta, minimizando, portanto, a importância da limitação acima mencionada.

Utilizando a métrica de dano dada pelo desvio médio da raiz quadrada (RMSD, Eq. (2.16)) é possível obter o valor da métrica do dano inserido.

Com o intuito de avaliar as influências de ruídos e variações ambientais presentes nas medições, a métrica do dano foi calculada primeiramente entre os valores das dez medidas sem dano e a média destes valores.

Assim, os valores de referência foram comparados com as funções de impedância adquiridas após a retirada do rebite (*baseline* x Sem Rebite). Os gráficos das métricas são apresentados nas Fig. 5.20 e 5.21 através de “diagramas de caixa” (*box plots*) para o *baseline* e a condição sem rebite.

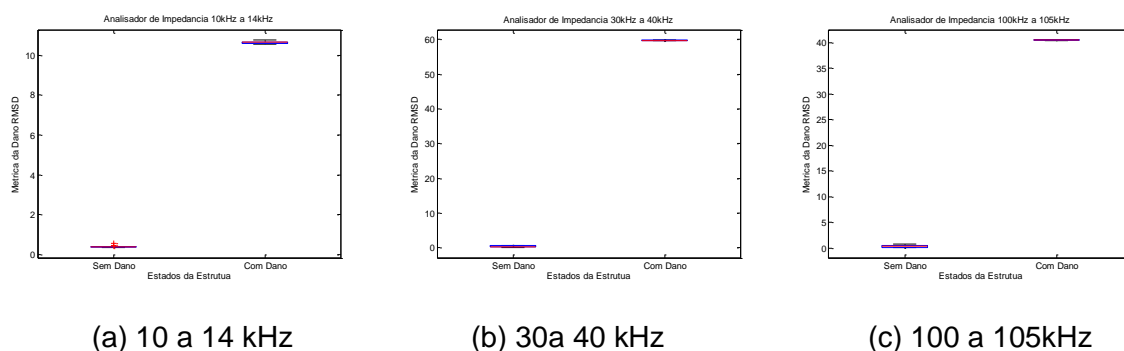


Figura 5.20– Métrica de dano - Analisador de Impedância

Nos diagramas de caixa, a linha vermelha indica a média dos valores das métricas para as 10 medições realizadas e as linhas azuis indicam o desvio padrão desses valores em relação à média.

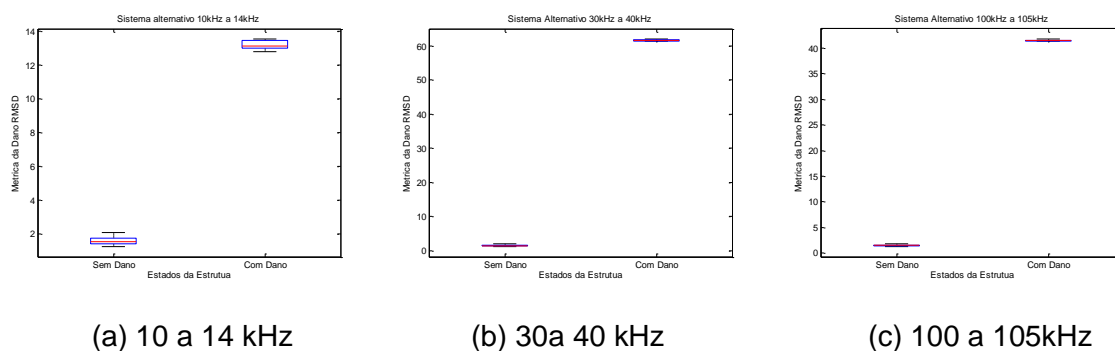


Figura 5.21 – Métrica de dano - sistema alternativo

Através da análise dos gráficos das Fig. 5.20 e 5.21 é possível perceber que o sistema alternativo foi capaz de identificar as falhas inseridas na estrutura, uma vez que os valores das métricas com dano (sem rebite) foram superiores aos valores sem dano, conforme claramente verificado nos diagramas de caixa.

Exceto para a faixa de frequência de 10 a 14 kHz, na qual, como explicado anteriormente, o sistema baseado em magnitudes elétricas apresenta comportamento indesejado, os valores das métricas obtidos com o Sistema Alternativo foram iguais aos valores obtidos com o analisador de impedância. Isso demonstra que os sinais variaram da mesma proporção quando o dano foi inserido na estrutura.

5.6. Projeto EMBRAER

No contexto do projeto “Monitoramento da Integridade Estrutural de Aeronaves (SHM)”, com a participação da EMBRAER, a equipe de SHM do INCT-EIE vem desenvolvendo uma arquitetura completa de monitoramento de integridade estrutural baseado em impedância eletromecânica para estruturas aeronáuticas (MARTINS *et al*, 2011). Neste sistema o trabalho do software *LabView*[®] é feito por um DSP, sendo dispensado assim o computador do sistema de medição de sinais (FINZI *et al.*, 2011). Além do sistema de aquisição de sinais a arquitetura conta ainda com uma plataforma *web* onde se controla o sistema de aquisição remotamente e são, também, analisados os resultados (cálculo de métricas), gerando informes e *e-mails* do estado da estrutura (MARTINS *et al*, 2011). A intenção aqui é a de se permitir a intervenção na estrutura que está sendo monitorada sempre que as medições assim apontarem.

CAPÍTULO VI

TÉCNICAS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL APLICADAS AO MÉTODO DE MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL BASEADO EM IMPEDÂNCIA ELETROMECHANICA PARA CLASSIFICAÇÃO DE DANOS

6.1. Introdução

Um dos grandes desafios no monitoramento de integridade estrutural é distinguir grupos de danos em um universo que contém danos de diferentes tipos e origens. Dentre alternativas para este estudo destacam-se as técnicas de inteligência artificial. No presente trabalho serão aplicadas as redes neurais probabilísticas e a análise de cluster (OLIVEIRA et al, 2007).

6.2. Redes Neurais Artificiais

As redes neurais artificiais são métodos computacionalmente fundamentados na estrutura neural (ou neuronal) de organismos inteligentes e que adquirem conhecimento através da experiência (MINGOTI, 2005). Estas redes foram desenvolvidas, originalmente, pelo neuro-fisiologista McCulloch e pelo matemático Walter Pitts, da Universidade de Illinois, com o trabalho intitulado “*Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity*” (citado por OLIVEIRA et al, 2007). O trabalho consiste em uma analogia entre células nervosas vivas e um processo lógico binário. Atualmente são encontrados modelos de redes neurais artificiais bem diferentes e mais complexos do que aquele apresentado originalmente por McCulloch e Pitts.

Os modelos de redes neurais manipulam informações pela interação de um grande número de unidades básicas de processamento, denominadas neurônios artificiais. O sistema recebe sinais externos que são processados e produzem uma ou várias saídas.

Assim, os neurônios do sistema enviam sinais entre si, fazendo com que a informação seja distribuída por meio da rede.

Uma função específica, denominada soma, simula a captação do estímulo presente nos dendritos, acumulando de maneira ponderada (por meio de pesos) os dados recebidos das entradas do neurônio em s_j (Eq.(6.1)).

$$s_j = \sum_{i=1}^n x_i w_{ij} \quad (6.1)$$

Com o valor da soma ponderada, a função de transferência do neurônio artificial utiliza um limiar θ para determinar a ativação ou não do mesmo. Assim, a saída do neurônio será 1 somente se a soma ponderada for maior ou igual a θ .

Desta forma, as redes neurais são tipicamente organizadas em camadas, com unidades que podem estar conectadas às unidades de camada posterior. Tem-se a camada de entrada, na qual os padrões são apresentados à rede, as camadas intermediárias ou ocultas, onde se faz a maior parte do processamento de aprendizado da rede, e a camada de saída, na qual os resultados finais são apresentados (ANTOGNETTI; MILTINOVIC, 1991).

A rede neural possui, tipicamente, duas fases de processamento, a saber, a de aprendizado e a de utilização propriamente dita. Estes dois momentos são bem distintos e aplicados em tempos diferentes. No aprendizado, em geral, os dados amostrais são divididos em dois conjuntos. O primeiro serve para o treinamento da rede, onde os pesos de suas conexões são ajustados de acordo com os padrões apresentados. Nessa fase, a rede neural extrai regras básicas a partir de dados reais. O segundo conjunto serve para testar a qualidade de treinamento da rede. Já o processo de utilização é a maneira pela qual a rede responde a um estímulo de entrada sem que ocorram modificações na estrutura (BRAGA; CARVALHO; LUDERMIR, 2000).

Existem diferentes tipos de redes neurais artificiais segundo o tipo de problema que está sendo tratado. Redes com uma única camada, por exemplo, só conseguem resolver problemas linearmente separáveis (BRAGA; CARVALHO; LUDERMIR, 2000). Para caracterizar esses tipos de redes, devem ser considerados:

- O número de camadas da rede;
- O número de neurônios por camada;
- O tipo de conexões: *feedforward*, *feedback*, lateral;
- O grau de conexão entre os neurônios: um a um, total, randômico, etc.

Dentre as redes neurais artificiais tem-se a rede probabilística, esta muito utilizada para fins de classificação.

6.2.1. Rede neural artificial probabilística

Trata-se de uma rede usada para classificação baseada na função de distribuição de probabilidade. Como no início do processo não é conhecida a função de probabilidade de cada classe, a rede a estima. A arquitetura da rede pode ser observada na Fig. 6.1.

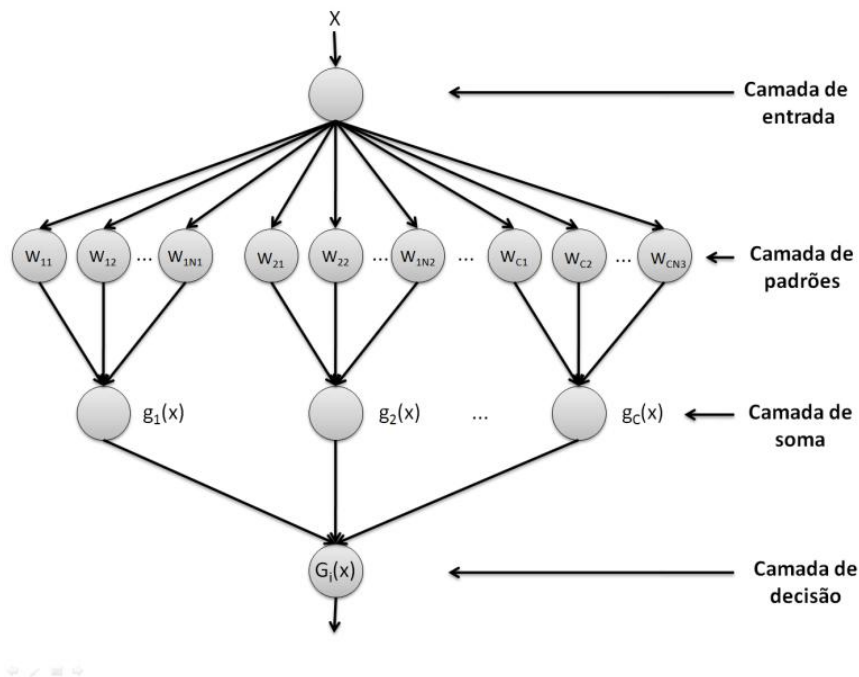


Figura 6.1 – Arquitetura das redes neurais probabilísticas

Quando uma entrada X é apresentada à camada de entrada da rede, ela é distribuída para a camada seguinte. Na camada de padrões são calculadas as distâncias entre os vetores de entrada e os esperados através da Eq.(6.2), que é computada em cada neurônio j da classe i .

$$ft_{i,j}(X) = \frac{1}{(2\pi)^{d/2} \sigma_i^d} \exp \left[\frac{-(X - W_{i,j})^T (X - W_{i,j})}{2\sigma_i^2} \right], \quad (6.2)$$

onde $ft_{i,j}(X)$ é a contribuição do neurônio j na classe i , σ é a função de transferência e $W_{i,j}$ é o peso do neurônio j da classe i . A cada neurônio i da camada de soma adiciona-se a contribuição de cada neurônio da camada de padrões. Na camada de saída, a entrada X é associada à classe com maior probabilidade (SPECHT, 2009) de acerto.

O treinamento desta rede consiste num único passo, ou seja, os pesos de cada neurônio da camada de padrões são formados pelo vetor de características de cada amostra de treinamento.

6.3. Análises de Cluster

As técnicas aqui abordadas são também conhecidas como análise de conglomerados, classificação, ou cluster. Estas desempenham um papel importante quando se deseja interpretar e/ou classificar grande volume de objetos descritos com base em certo número de características bem definidas. O objetivo é o de dividir os elementos da amostra em grupos, de forma que os elementos pertencentes a um mesmo grupo sejam similares entre si com respeito às variáveis que neles foram medidas. Além disso, os elementos pertencentes a grupos diferentes devem ser heterogêneos em relação a estas mesmas características (MINGOTI, 2005).

Uma questão importante refere-se ao critério a ser utilizado para decidir até que ponto dois elementos do conjunto de dados podem ser considerados como semelhantes ou não. Se for considerado que para cada elemento amostral têm-se informações de p -variáveis armazenadas em um vetor, a comparação de diferentes elementos amostrais poderá ser feita através de medidas de distância. Assim, pode-se calcular as distâncias entre os vetores de observações dos elementos amostrais e agrupar aqueles para os quais a distância se verificar menor. Existem várias medidas de similaridade e dissimilaridade e cada uma delas produz um determinado tipo de agrupamento.

Logo, ao definir que os conjuntos devem ser circulares, elipsoidais ou retangulares, é possível sintetizar métricas que atendam a tais requisitos. Algumas medidas mais comuns, apropriadas para variáveis quantitativas, são a distância euclidiana, a distância generalizada ou ponderada e a distância de Minkowsky. Já para variáveis qualitativas, existem alguns coeficientes de similaridade tais como o coeficiente de concordância simples, o coeficiente de concordância positiva, o coeficiente de concordância de Jaccard e a distância Euclidiana média (MINGOTI, 2005).

As técnicas de conglomerados ou de cluster são frequentemente classificadas em dois tipos, a saber, as hierárquicas e as não hierárquicas.

6.3.1. Técnicas hierárquicas aglomerativas

As técnicas hierárquicas partem do princípio de que, no início do processo, cada elemento do conjunto de dados observado é considerado como sendo um conglomerado

isolado. Em cada passo do algoritmo, os elementos amostrais vão sendo agrupados, formando novos conglomerados até o momento em que todos os elementos considerados estão em um único grupo. Os passos principais para a aplicação das técnicas hierárquicas aglomerativas podem ser resumidos da seguinte forma:

- Cada elemento constitui um cluster de tamanho 1.
- Em cada estágio do algoritmo de agrupamento, os pares de conglomerados mais similares são combinados e passam a constituir um único conglomerado.
- Apenas um novo conglomerado pode ser formado em cada passo. Dessa forma, em cada estágio do processo, o número de conglomerados vai sendo diminuído.
- A propriedade de hierarquia é observada, ou seja, uma vez reunidos os elementos em um dado conglomerado, estes não poderão ser separados.

A escolha do número final de grupos em que o conjunto de dados deve ser repartido é subjetiva. Existem alguns métodos que podem ser utilizados para auxiliar na determinação do número de grupos, dentre os quais se encontram a análise do comportamento do nível de fusão, a análise do comportamento do nível de similaridade, a análise da soma dos quadrados entre grupos, o coeficiente R^2 , a estatística pseudo F , a correlação semi-parcial, a estatística pseudo T^2 e a estatística CCC (*Cubic Clustering Criterium*) (MINGOTI, 2005). O propósito é encontrar o número de grupos que esteja associado à “partição natural” dos elementos que estão sendo comparados e agrupados.

Existem vários métodos de agrupamento hierárquico, sendo que os mais comuns e disponíveis na maioria dos softwares estatísticos são o método de ligação simples, o método de ligação completa, o método de médias das distâncias, o método do centróide e o método de Ward (MINGOTI, 2005).

6.3.2. Técnicas de agrupamento não hierárquicas

Os métodos não hierárquicos são aqueles que tem como objetivo encontrar diretamente uma partição de n elementos em k grupos (clusters), de modo que a partição satisfaça a dois requisitos básicos: “coesão” interna e isolamento dos clusters formados. Para se buscar a “melhor” partição de ordem k , alguns critérios de qualidade da partição devem ser empregados. Os métodos não hierárquicos apresentam as seguintes características:

- Requerem que o usuário tenha especificado previamente o número de clusters k desejado.
- Em cada estágio do agrupamento os novos grupos podem ser formados através da divisão ou junção de grupos já combinados em passos anteriores.
- Os algoritmos computacionais utilizados nos métodos não hierárquicos são do tipo iterativo.

Alguns métodos não hierárquicos são os seguintes: k-Médias, Método Fuzzy C-means e o Método de Gustafson-Kessel. Estes métodos serão agora explicados em mais detalhes, já que foram utilizados neste trabalho.

- Métodos das k-Médias

O método pode ser apresentado segundo quatro passos:

1. Escolhe-se k centróides, chamados de “sementes” ou “protótipos”, para se inicializar o processo de partição.
2. Cada elemento do conjunto de dados é, então, comparado com cada centróide inicial, através de uma medida de distância que, em geral, é a distância Euclidiana dada pela Eq.(6.3);

$$d(X_l, X_k) = \sqrt{(X_l - X_k)'(X_l - X_k)} = \sqrt{\sum_{i=1}^p (X_{il} - X_{ik})^2}, \quad (6.3)$$

onde P é o numero de variáveis aleatórias medidas em cada elemento, X_l é o elemento e X_k é o centróide. O elemento é alocado ao grupo cuja distância é a menor.

3. Depois de aplicar o passo 2 para cada um dos n elementos amostrais, recalcula-se os valores dos centróides para cada novo grupo formado e repete-se o passo 2, considerando agora os centróides destes novos grupos;
4. Os passos 2 e 3 devem ser repetidos até que todos os elementos amostrais estejam “bem alocados” em seus grupos, isto é, até que nenhuma realocação de elementos seja necessária.

A escolha das sementes iniciais de agrupamento influencia no agrupamento final. Portanto, cuidados são necessários na escolha das sementes. Algumas sugestões são:

- O uso de técnicas hierárquicas aglomerativas: utiliza-se algum dos métodos de agrupamentos das técnicas hierárquicas para obter os k grupos iniciais. A partir daí, calcula-se o vetor das médias de cada grupo formado, sendo estes vetores de médias as sementes iniciais usadas no método das k-médias.
- Escolha aleatória: as k sementes iniciais são escolhidas aleatoriamente dentro do conjunto de dados a ser analisado.
- Escolha através de uma variável aleatória, ou seja, escolha-se a variável de maior variância dentre as p componentes do vetor aleatório X em consideração.
- Observação dos valores discrepantes do conjunto de dados de forma que, através de uma análise estatística, busca-se k elementos discrepantes no conjunto de dados.
- Escolha prefixada, onde as sementes são escolhidas arbitrariamente pelo pesquisador.
- Escolhe-se diretamente os k primeiros valores do banco de dados.

- Método *fuzzy* C-means

É um método iterativo que requer do usuário uma pré-especificação do número de grupos c para ser utilizado. Supõe-se que existam n elementos amostrais e para cada elemento tenham sido medidas p -variáveis aleatórias. O método *fuzzy* procura a partição (para formar os diversos grupos de pertinência) que minimiza a função objetivo dada pela Eq.(6.4).

$$J = \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^n (u_{ij})^m d(X_j, V_i) \quad (6.4)$$

onde V_i é o protótipo do conglomerado i , $i = 1, \dots, c$; $m > 1$ é o parâmetro; u_{ij} é a probabilidade de que o elemento X_j pertença ao conglomerado cujo protótipo é V_i ; $d(\cdot)$ é a distância escolhida pelo pesquisador, sendo, em geral, a distância Euclidiana.

O parâmetro m é importante no que concerne ao grau permitido de “mistura” dos clusters. Se for muito próximo de 1, obtém-se partições próximas às resultantes dos algoritmos convencionais de *clustering*, ou seja, com graus de pertinência binários. Por outro lado, à medida que são utilizados valores maiores que m , a tendência é a de obter uma configuração na qual cada ponto pertencerá a vários clusters com graus cada vez maiores e, no caso limite, todos pertencerão a cada um dos *clusters* – tal situação de entropia

elevada também não é interessante neste contexto. Normalmente, o valor recomendado para m é 2 (OLIVEIRA, 2007).

Pode ser demonstrado que a função J é minimizada quando as probabilidades u_{ij} são escolhidas de acordo com a Eq. (6.5),

$$u_{ij} = \left[\sum_{k=1}^c \left(\frac{d(X_j, V_i)}{d(X_j, V_k)} \right)^{\frac{2}{m-1}} \right]^{-1}, \quad (6.5)$$

onde V_i é dado por a Eq. (6.6) para todo $i = 1, 2, \dots, c$; $j = 1, 2, \dots, n$.

$$V_i = \frac{\sum_{j=1}^n (u_{ij})^m X_j}{\sum_{j=1}^n (u_{ij})^m}. \quad (6.6)$$

Para se encontrar a solução final, deve-se ter os protótipos e as probabilidades u_{ij} iniciais. Nos algoritmos computacionais disponíveis, as probabilidades u_{ij} são geradas de uma distribuição uniforme no intervalo $[0,1]$. Os protótipos vão se modificando a cada iteração e o algoritmo é interrompido quando a distância entre os protótipos vai se modificando a cada iteração. O algoritmo é interrompido quando a distância entre os protótipos de uma iteração em relação à anterior é menor ou igual a certo valor de erro ε preestabelecido pelo usuário, Eq. (6.7).

$$d(V_t, V_{t+1}) < \varepsilon, \quad (6.7)$$

onde V_t e V_{t+1} são os vetores que guardam os protótipos das iterações t e $t+1$.

Ao contrário do método das k-Médias, que fornece como resultado uma partição na qual cada elemento pertence a um único cluster, no método *fuzzy*, para cada elemento amostral, estima-se a probabilidade que o mesmo pertença a cada um dos c clusters da partição. Assim, é possível identificar elementos amostrais que estão na interface, ou seja, que se assemelham a mais de um dos c grupos. Um critério que pode ser utilizado para se

determinar a partição final é alocar o elemento amostral àquele conglomerado para o qual sua probabilidade de pertinência é maior.

- Método de Gustafson-Kessel

O algoritmo de Gustafson-Kessel adota uma abordagem mais geral, levando em consideração tanto a forma como o tamanho dos clusters, sendo bastante satisfatório quando se trabalha com configurações aproximadamente hiperelipsoidais. A respectiva função objetivo é dada pela Eq. (6.8).

$$J = \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^n (u_{ij})^m (X_j - V_i)^T P_i (X_j - V_i) \quad , \quad (6.8)$$

onde,

$$P_i = \frac{\sum_{j=1}^n (u_{ij})^m (X_j - V_i)(X_j - V_i)^T}{\sum_{j=1}^n (u_{ij})^m} \quad , \quad (6.9)$$

sendo que P_i são as matrizes de covariância dos c clusters. Pode-se observar que a distância é dada pela Eq. (6.10). Esta distância é chamada de distância de Mahalanobis.

$$d^2(X_j - V_i) = \|X_j - V_i\| = (X_j - V_i)^T P_i (X_j - V_i) \quad (6.10)$$

A distância de Mahalanobis é uma medida de distância introduzida pelo matemático indiano Prasanta Chandra Mahalanobis em 1936 (MAHALANOBIS, 1936). É baseada nas correlações entre variáveis com as quais padrões distintos podem ser identificados e analisados. É uma estatística útil para determinar a similaridade entre uma amostra desconhecida e uma conhecida.

Esta se distingue da distância euclidiana, já que leva em conta as correlações do conjunto de dados e é invariante à escala, ou seja, não depende da escala das medições.

Tanto para o *Fuzzy C-means* como para o Gustafson-Kessel, o processo de minimização das funções objetivo é realizado de modo iterativo, sendo o critério de parada realizado por meio do monitoramento dos valores assumidos pela função. Quando sua

estabilização é caracterizada, o algoritmo assume que houve convergência para os valores desejados (HÖPPNER et al, 1999).

6.4. Estudo de Caso # 1: Vigas Rebitadas

Para avaliar a viabilidade do uso dos métodos de inteligência artificial (redes neurais e análise de cluster) no método de monitoramento de integridade estrutural para classificar danos, foram utilizadas 3 vigas de alumínio de 60x3,2x0,3cm, contendo um rebite em uma de suas extremidades (Ver Fig.6.2(a)). Duas pastilhas de PZT redondas de 2,5cm de diâmetro e 0,1 cm de espessura foram coladas em cada uma das vigas como mostram as Fig.6.2(a) e (b). Para simular dois danos incipientes e distintos nas vigas, o rebite foi removido e a seguir foi feito um furo de 0,1 mm próximo à posição do rebite com a finalidade de simular uma pequena trinca (Fig. 6.2(c)). A descrição de cada estado da estrutura é apresentada na Tab. 6.1. Duzentas (200) medições foram tomadas para cada um dos estados, utilizando o sistema de medição de impedância descrito no Capítulo 5 deste trabalho. Cada sinal medido contém 200 pontos e a faixa utilizada foi de 20 kHz até 35 kHz.

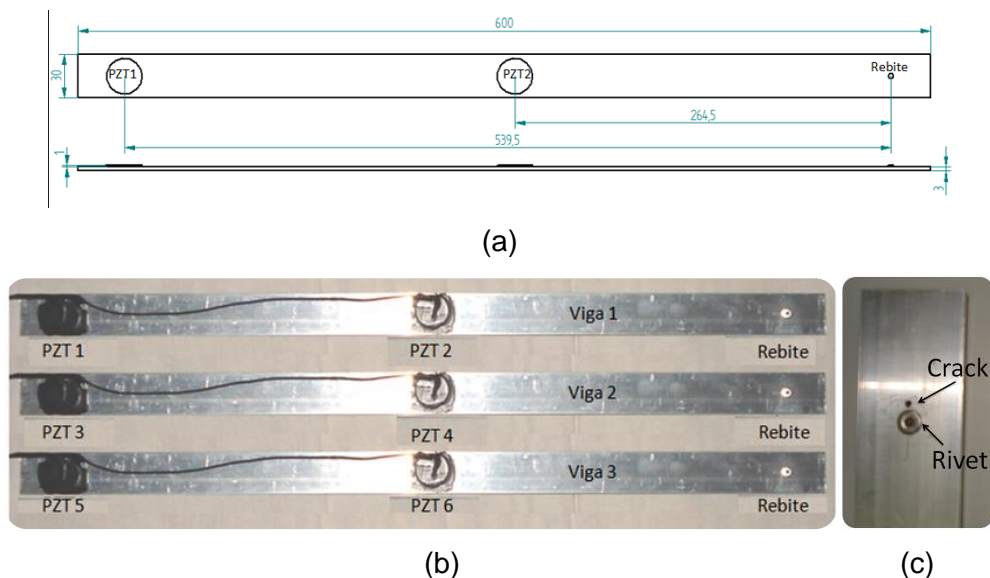


Figura 6.2 - Vigas rebitadas usadas para detecção e classificação de danos

Os sinais de impedância médios correspondendo a cada um dos estados das vigas são apresentados na Fig. 6.3. Para quantificar a diferença entre os sinais foi utilizada a métrica de dano descrita pela Eq. (2.19).

Tabela 6.1 – Estados das vigas Rebitadas

No.	Estados	Descrição	No. de Medição
1	Baseline	As vigas com os rebites	1-200
2	Dano 1	As vigas sem os rebites	201-400
1	Baseline	As vigas com os rebites	401-600
3	Dano2	As vigas com os rebites e com os furos	601-800

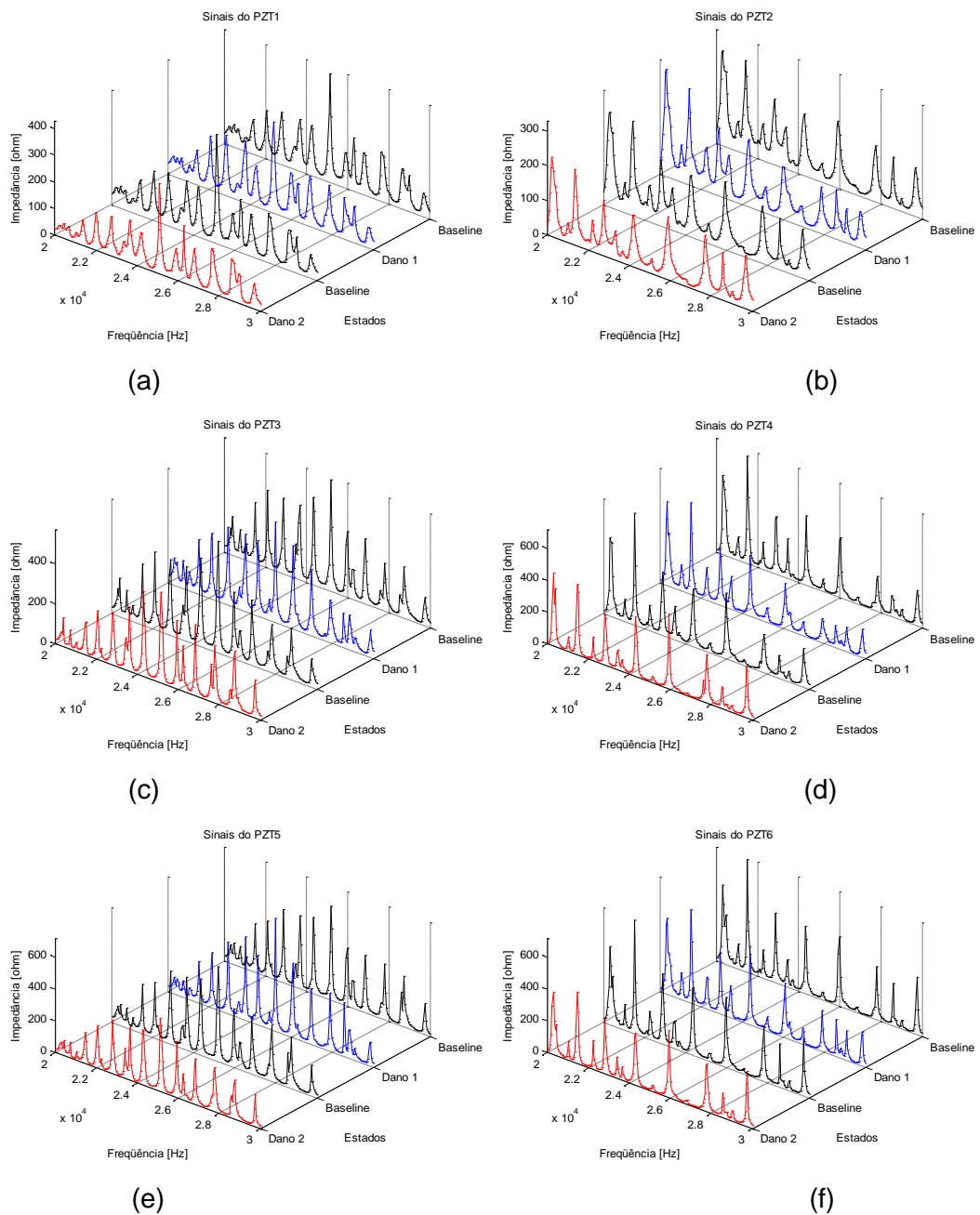


Figura 6.3 – Sinais dos sensores de impedância das vigas rebitadas

Os resultados obtidos são apresentados na Fig. 6.4. É evidente que a métrica de dano para o dano 1 (sem rebite) é maior que para o dano 2 (furo). O Dano2 não apresenta uma diferença considerável com respeito ao *baseline*, pelo que se torna difícil garantir que a técnica efetivamente detectou o dano ou não.

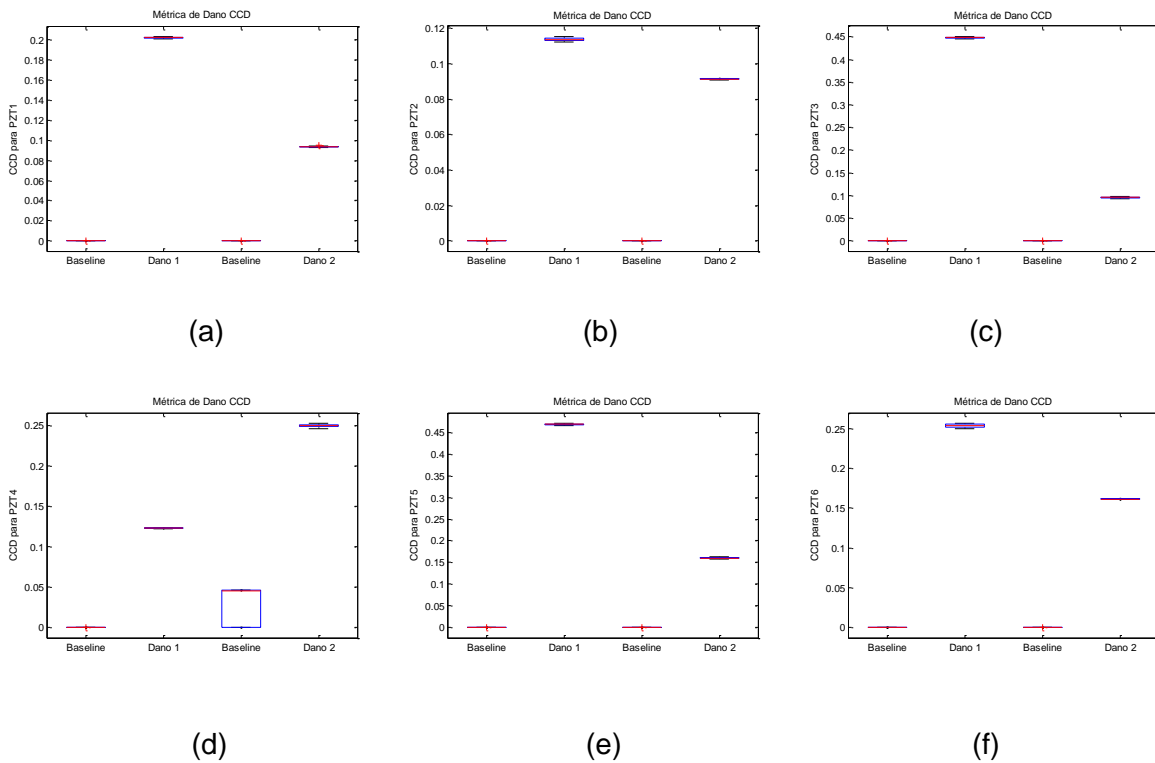


Figura 6.4 – Métricas de Dano das vigas rebitadas

6.4.1. Rede neural probabilística nas vigas rebitadas para classificação de danos

Para classificar os danos, os sinais de impedância medidos nas vigas foram utilizados como sendo as entradas das redes neurais. Foram implementadas oito redes probabilísticas para analisar estas vigas. Todas estas redes foram construídas com a mesma arquitetura, uma vez que se destinavam à mesma função (classificação de danos nas vigas). As seis primeiras redes foram aplicadas a cada uma das vigas. A descrição das redes e dos conjuntos de treinamento e de teste das seis primeiras redes pode ser observada na Tab.6.2. 90% das medições foram usadas para treinar a rede e as outras 10% foram usadas para testar a rede.

Os resultados obtidos com o conjunto de teste de cada uma das seis redes neurais probabilísticas são apresentados na Tab. 6.3. As porcentagens de erro na classificação de danos foram de 0% para o PZT 6, 1,25% para o PZT1, para o PZT3 e para o PZT 5, 2,5% para o PZT4 e 3,75% para o PZT2. Pode-se observar que as redes não erraram na

classificação do estado correspondente ao *baseline*, uma vez que o número de medições do *baseline* foi maior que para os demais estados.

Tabela 6.2 – Descrição da Rede Neural Probabilística para Detectar Dano nas vigas rebitadas

Camada	Número de Neurônios		
Entrada	190		
Padrões	570		
Soma	3		
Saída	1		
	<i>Baseline</i>	Dano 1	Dano 2
Conjunto de treinamento	360	180	180
Conjunto de Teste	40	20	20

Tabela 6.3 – Classificação do Conjunto de Teste das Redes Neurais Probabilísticas para cada PZT das vigas rebitadas

		Baseline	Dano1	Dano2	Erro %
PZT1	✓	40	19	20	1,25%
	X	0	1	0	
Total		40	20	20	
PZT2	✓	40	18	19	3,75%
	X	0	2	1	
Total		40	20	20	
PZT3	✓	40	19	20	1,25%
	X	0	1	0	
Total		40	20	20	
PZT4	✓	40	18	20	2,5%
	X	0	2	0	
Total		40	20	20	
PZT5	✓	40	19	20	1,25%
	X	0	1	0	
Total		40	20	20	
PZT6	✓	40	20	20	0%
	X	0	0	0	
Total		40	20	20	

Foram também implementadas duas redes neurais probabilísticas gerais para classificação de dano nas três vigas, sendo uma primeira para os PZTs 1, 3 e 5 (denominados PZTA) e outra para os PZTs 2, 4 e 6 (denominados PZTB). As arquiteturas destas redes são as mesmas descritas na Tab. 6.2 e os conjuntos de treinamento e teste acham-se descritos na Tab.6.4.

Tabela 6.4 – Redes Neurais Probabilísticas para Classificação Geral de Vigas com Rebite

	Baseline	Dano 1	Dano 2
Conjunto de treinamento	1080	540	540
Conjunto de Teste	120	60	60

Os resultados para as redes de classificação geral para as três vigas rebitadas podem ser observados na Tab.6.5. A porcentagem de erro foi de 2,92% para o PZTA e 2,25% para o PZTB, similares aos resultados obtidos para cada uma das vigas.

Tabela 6.5 - Classificação do Conjunto de Teste da Rede Neural Probabilística Geral para vigas com rebites

		Baseline	Dano1	Dano2	Erro %
PZTA	✓	120	55	58	2,92%
	X	0	5	2	
Total		120	60	60	
PZTB	✓	120	56	58	2,5%
	X	0	4	2	
Total		120	60	60	

6.4.2. Análise de cluster nas vigas rebitadas para classificação de danos

Outra técnica de inteligência artificial que poder ser utilizada para classificar os danos é a chamada análise de cluster. Neste trabalho foram utilizados os algoritmos conhecidos como Fuzzy C-means e Gustafson-Kessel.

O primeiro resultado apresentado é do algoritmo *Fuzzy C-means*. Na Fig. 6.5 pode-se observar o grau de pertinência de cada medição com respeito a cada estado considerado (*baseline*, Dano 1 e Dano 2) para as seis Pastilhas de PZT. Quando o algoritmo é inicializado, o grau de pertinência é atribuído aleatoriamente, procurando não favorecer nenhum dos estados. Depois de 10 iterações para o PZT1, PZT3, PZT5 e PZT6, 11 iterações para o PZT2 e 27 iterações para o PZT6 (Tab. 6.6) o algoritmo foi interrompido

pela convergência do processo. Pode-se, então, observar os graus de pertinência final conforme mostrados nas Fig. 6.6.

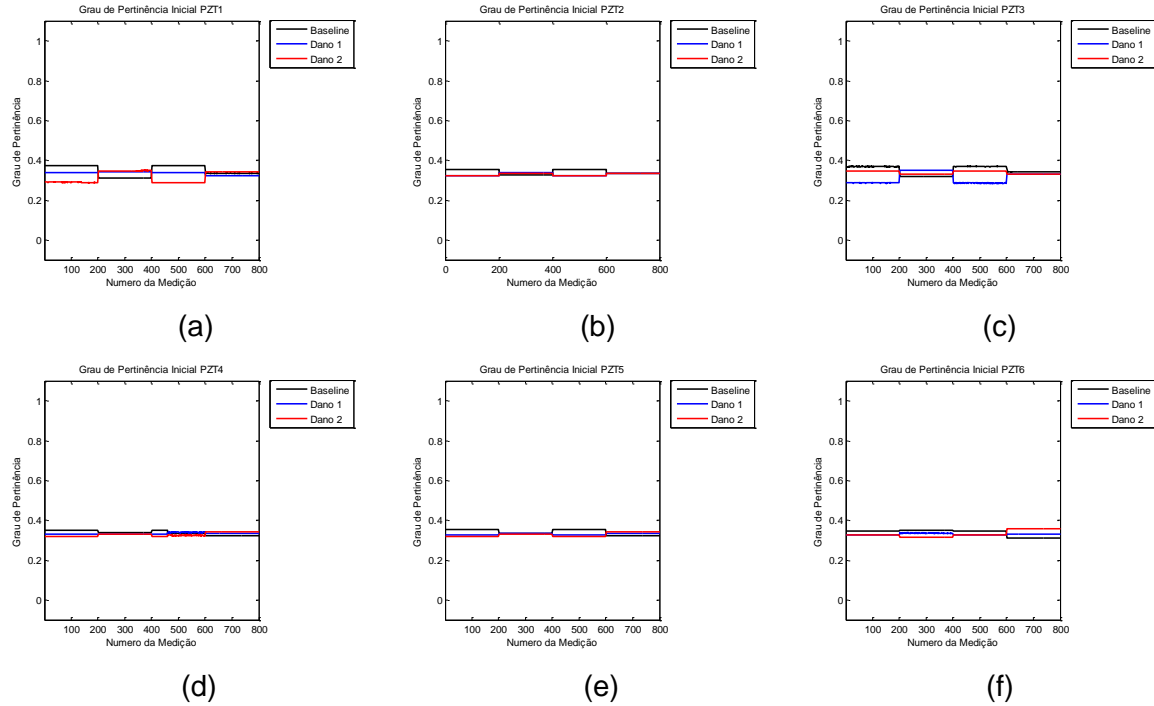


Figura 6.5– Graus de pertinência inicial para vigas rebitadas; Algoritmo *Fuzzy C-means*

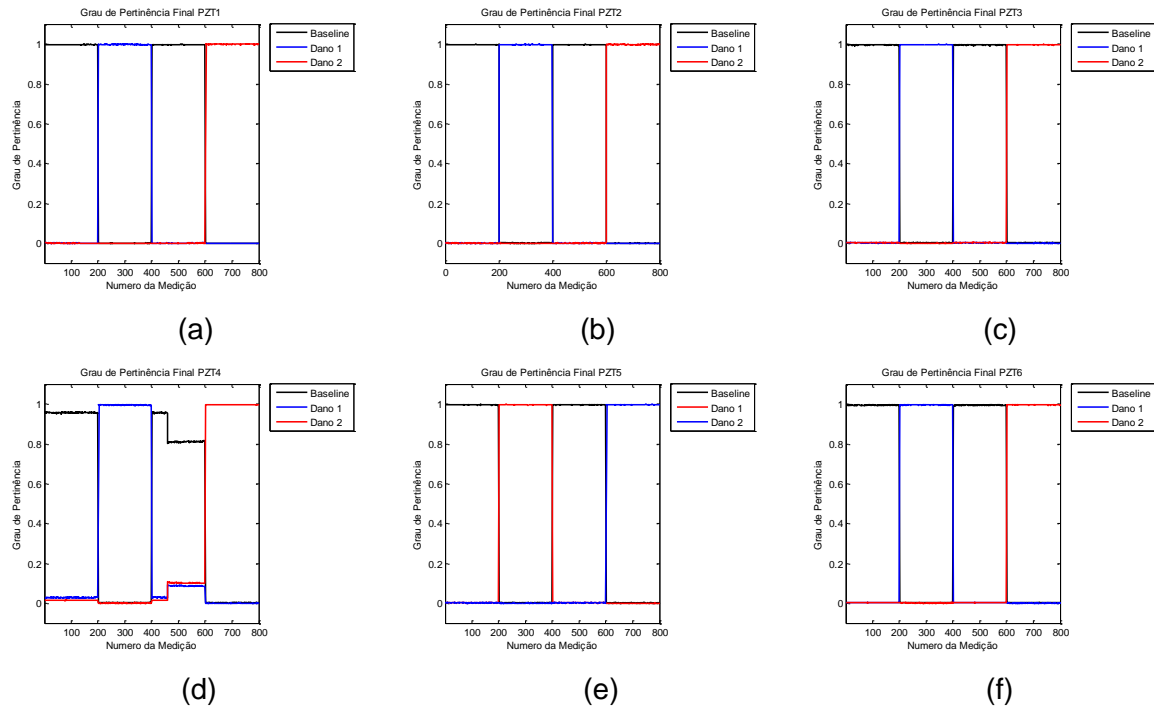


Figura 6.6– Graus de pertinência inicial para vigas rebitadas; Algoritmo *Fuzzy C-means*

Baseado na informação da Tab.6.1, pode-se notar que todas as medições foram classificadas corretamente com uma porcentagem de pertinência aos estados superior a 99%, com exceção do PZT4 que apresentou graus de pertinência menores que 85% no *baseline* (Fig.6.6(d)).

Tabela 6.6 – Algoritmo *Fuzzy C-means*; Viga rebitada

	Iterações	Função Objetivo Inicial	Função Objetivo Final
PZT1	10	7778,825	59,459
PZT2	11	7299,827	63,222
PZT3	10	7370,41	109,053
PZT4	27	7172,561	1251,307
PZT5	10	7578,836	96,762
PZT6	10	7201,812	146,279

Na Fig. 6.7 pode-se observar como o algoritmo conseguiu ajustar os sinais de cada um dos estados para o PZT1 (os sinais dos centroides ajustados dos demais PZTs podem ser encontrados no anexo I). Os centroides correspondem ao sinal representativo de cada um dos estados analisados para a estrutura.

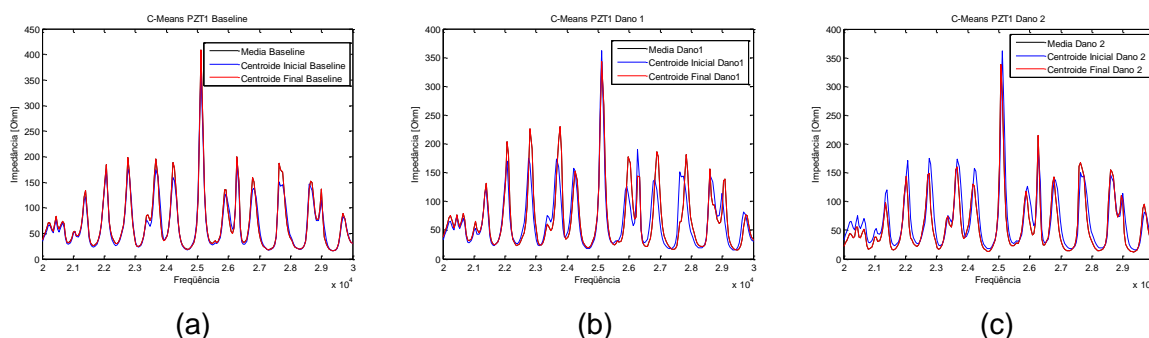


Figura 6.7– Centroides de cada um dos estados do PZT1 das vigas rebitadas; Algoritmo *Fuzzy C-means*

Os graus de pertinência inicial para o algoritmo de Gustafson-Kessel são apresentados na Fig.6.8. Semelhantemente ao encontrado para o C-Means, o grau de pertinência inicial é atribuído aleatoriamente, procurando não favorecer nenhum dos estados. Depois de algumas iterações (Tab. 6.7) o algoritmo foi interrompido pela convergência do processo para cada uma das pastilhas de PZT. Pode-se, então, observar os graus de pertinência final conforme mostrados na Fig. 6.9. De maneira semelhante ao

caso do algoritmo anterior todas as medições foram classificadas corretamente com uma porcentagem de pertinência aos estados superior a 99%.

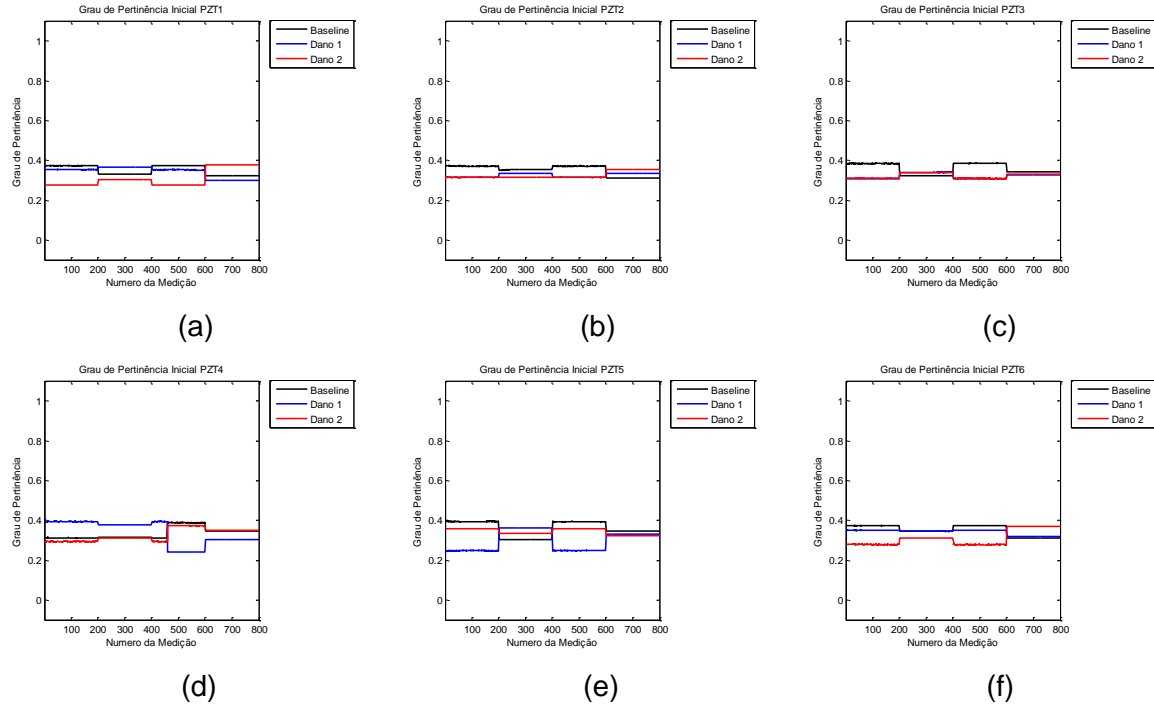


Figura 6.8– Graus de pertinência inicial para vigas rebitadas; Algoritmo de Gustafson-Kessel

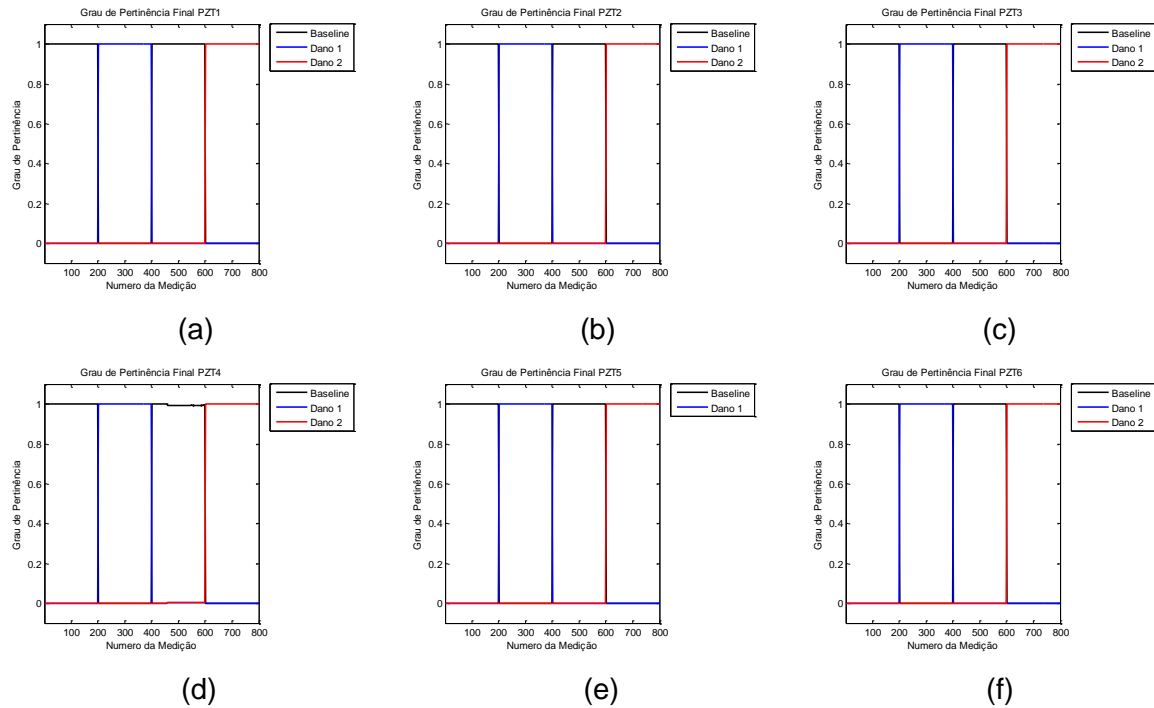


Figura 6.9– Graus de pertinência final para vigas rebitadas; Algoritmo de Gustafson-Kessel

O Algoritmo de Gustafson - Kessel apresenta melhor resultado que o algoritmo de C-means devido a que o primeiro está desenhado para trabalhar com formas e tamanhos de *clusters* diferentes; já o segundo trabalha bem com cluster do mesmo tamanho (OLIVEIRA *et al*, 2007). No caso deste ensaio dispõe-se de numa quantidade maior de dados do *baseline*, portanto os tamanhos dos clusters são diferentes e, por esta razão, o algoritmo de Gustafson-Kessel apresentou melhor resultado.

Na Fig. 6.10 pode-se observar como o algoritmo conseguiu ajustar os sinais de cada um dos estados para o PZT2 (os sinais dos centroides ajustados dos demais PZTs podem ser encontrados no Anexo I).

Tabela 6.7 – Algoritmo de Gustafson-Kessel; Viga rebitada

	Iterações	Função Objetivo Inicial	Função Objetivo Final
PZT1	6	84087740,706	1,557
PZT2	7	105691062,101	2,304
PZT3	8	99266429,274	1,079
PZT4	16	89762329,605	365987,129
PZT5	6	81305835,41	0,595
PZT6	6	7905152,24	0,669

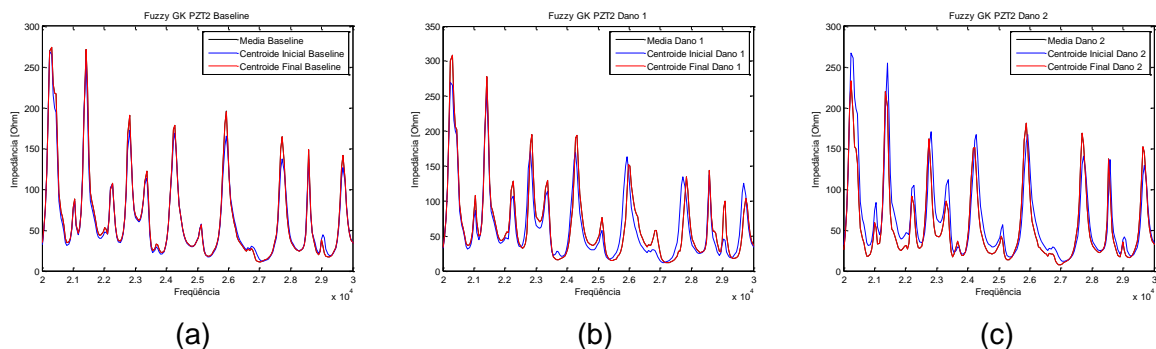


Figura 6.10– Centróides de cada um dos estados do PZT1 das vigas rebitadas; Algoritmo de Gustafson-Kessel

Semelhantemente ao caso da rede neural probabilística, foram aplicados os algoritmos de análise de cluster para o PZTA (PZT1, PZT3 e PZT5) e o PZTB (PZT2, PZT4 e PZT6), com o objetivo de verificar se é possível aplicar estas técnicas para classificar danos em vigas rebitadas de maneira geral. Nas Fig. 6.11 e 6.12 pode-se observar o grau de pertinência final de cada um dos algoritmos para o PZTA e o PZTB, respectivamente.

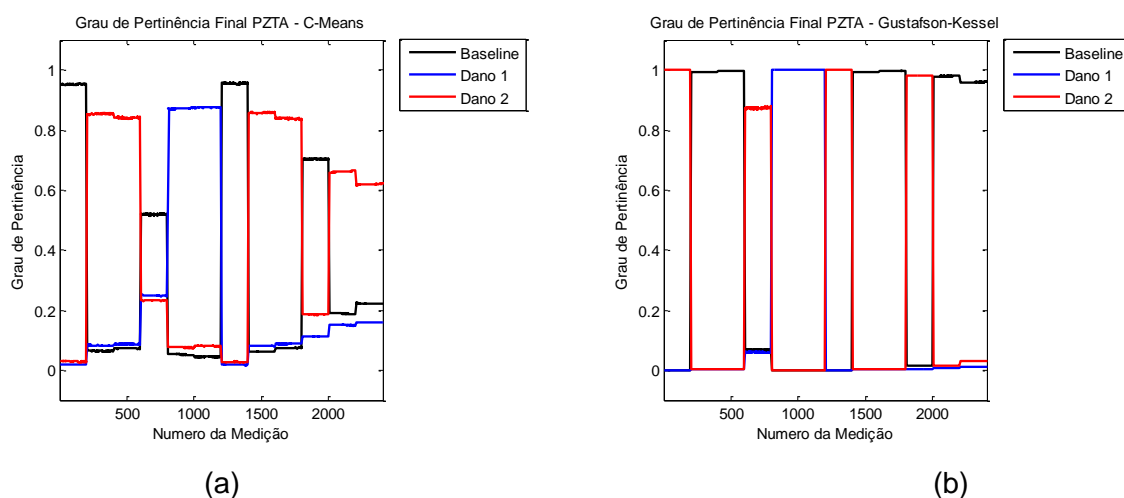


Figura 6.11– Graus de pertinência final para o PZTA das vigas rebitadas

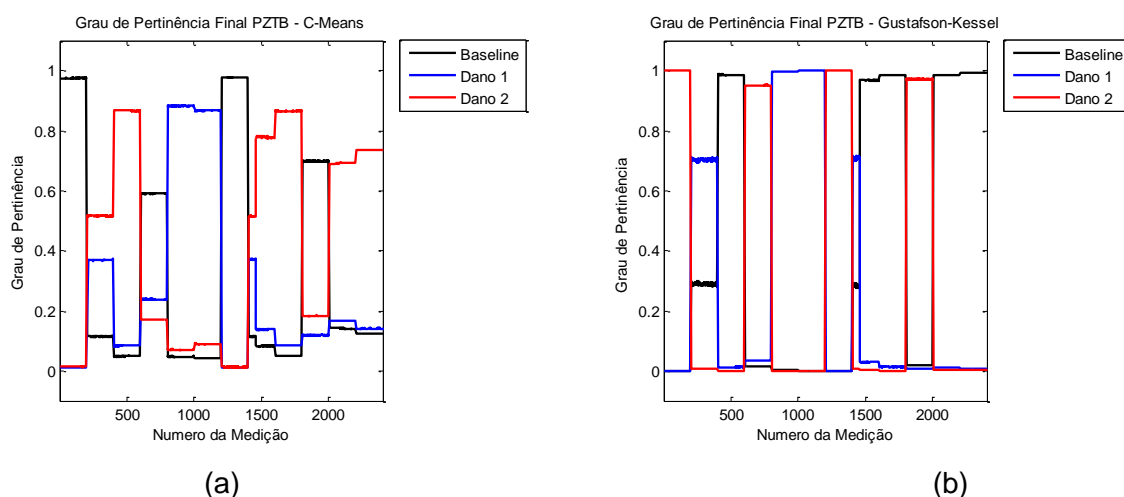


Figura 6.12– Graus de pertinência final para o PZTB das vigas rebitadas

Com as informações das Tab. 6.8 e 6.9, é evidente que nenhum dos dois algoritmos conseguiu classificar corretamente os estados da estrutura. Isto pode ser devido à diferença nos sinais de cada uma das pastilhas de PZT. Este problema não existe na rede neural probabilística porque, na etapa de treinamento da rede, tanto os sinais como a resposta de classificação desejada são apresentados à rede, ficando assim esta influenciada em sua aprendizagem. Isto não acontece com a análise de cluster, já que, nesta técnica, os dados são divididos somente segundo suas semelhanças e diferenças.

Tabela 6.8 – Medições do PZTA das vigas rebitadas

Estados da Estrutura	PZT	No. de Medição
Baseline	PZT1	1-200
	PZT3	201-400
	PZT5	401-600
Dano 1	PZT1	601-800
	PZT3	801-1000
	PZT5	1001-1200
Baseline	PZT1	1201-1400
	PZT3	1400-1600
	PZT5	1601-1800
Dano 2	PZT1	1801-2000
	PZT3	2001-2200
	PZT5	2201-2400

Tabela 6.9 – Medições do PZTB das vigas rebitadas

Estados da Estrutura	PZT	No. de Medição
Baseline	PZT2	1-200
	PZT4	201-400
	PZT6	401-600
Dano 1	PZT2	601-800
	PZT4	801-1000
	PZT6	1001-1200
Baseline	PZT2	1201-1400
	PZT4	1400-1600
	PZT6	1601-1800
Dano 2	PZT2	1801-2000
	PZT4	2001-2200
	PZT6	2201-2400

6.5. Estudo de Caso # 2: Placas com Corrosão Localizada

Após ter observado os resultados obtidos para a viga, passou-se a estudar uma estrutura um pouco mais complexa, como é o caso de uma placa. Assim, foram utilizadas

duas placas de alumínio de 30 x 30 x 0,3cm, contendo um parafuso como se observa na Fig. 6.13(a). Uma pastilha de PZT quadrada de 1,5x1,5x0,1cm foi colada em cada uma das placas como mostram as Fig.6.13(a) e (b). Para simular dois danos incipientes diferentes nas placas, o parafuso foi removido e a seguir foi aplicado ácido clorídrico próximo à posição do parafuso com a finalidade de simular uma pequena corrosão localizada (Fig. 6.14). A descrição de cada estado da estrutura é mostrada na Tab. 6.10. Duzentas (200) medições foram tomadas para cada um dos estados. Cada sinal medido contém 200 pontos e a faixa de frequência utilizada foi de 60 kHz até 70 kHz.

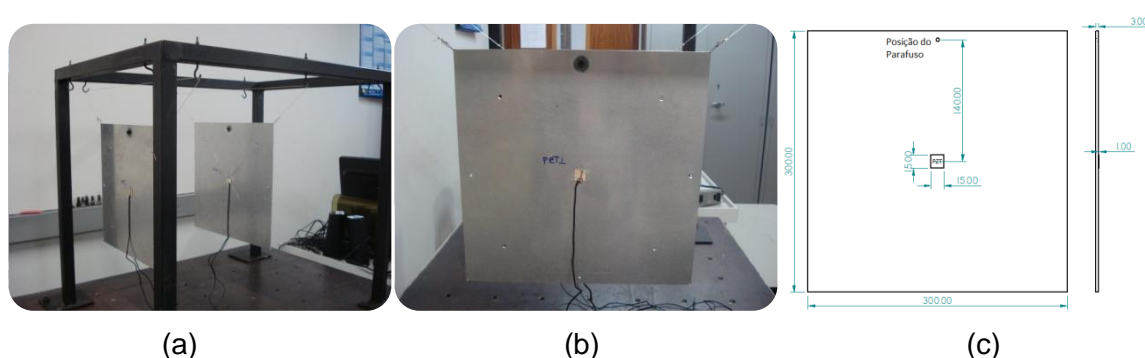


Figura 6.13 - Placas com parafuso usadas para detecção e classificação de danos

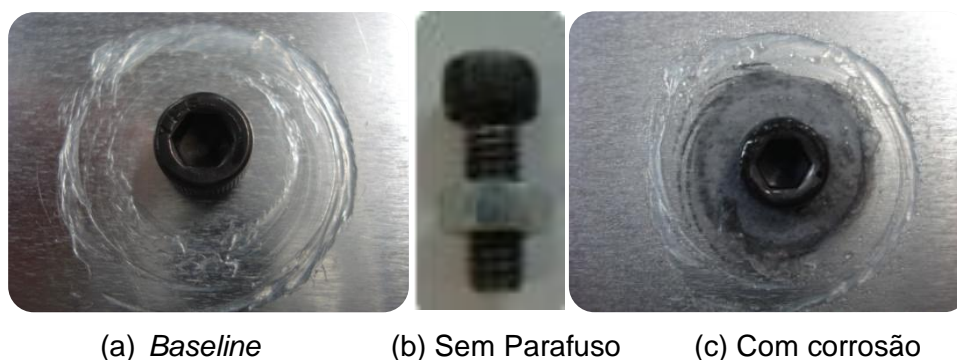


Figura 6.14 –Danos inseridos nas placas com parafuso

Tabela 6.10 – Estados das placas com parafusos

No.	Estados	Descrição	No. De Medição
1	Baseline	As placas com os parafusos	1-200
2	Dano 1	As placas sem os parafusos	201-400
1	Baseline	As placas com os parafusos	401-600
3	Dano2	As placas com os parafusos e com corrosão localizada	601-800

Os sinais de impedância médios correspondendo a cada um dos estados das placas são apresentados na Fig. 6.15.

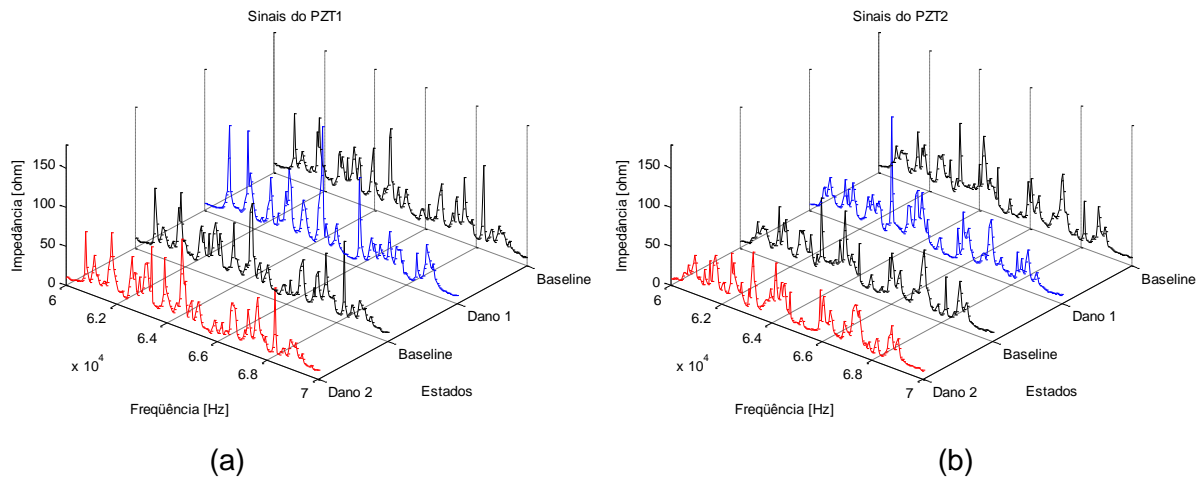


Figura 6.15 – Sinais de impedância das pastilhas de PZT das placas com parafuso

Para quantificar a diferença entre os sinais foi utilizada a métrica de dano descrita pela Eq. (2.19). Os resultados obtidos são apresentados na Fig. 6.16. É evidente que a métrica de dano para o dano 1 (sem parafuso) é maior que para o dano 2 (corrosão localizada). O dano 2 não apresenta uma diferença considerável com respeito ao *baseline*, razão pela qual se torna difícil garantir se a técnica efetivamente detectou ou não o dano.

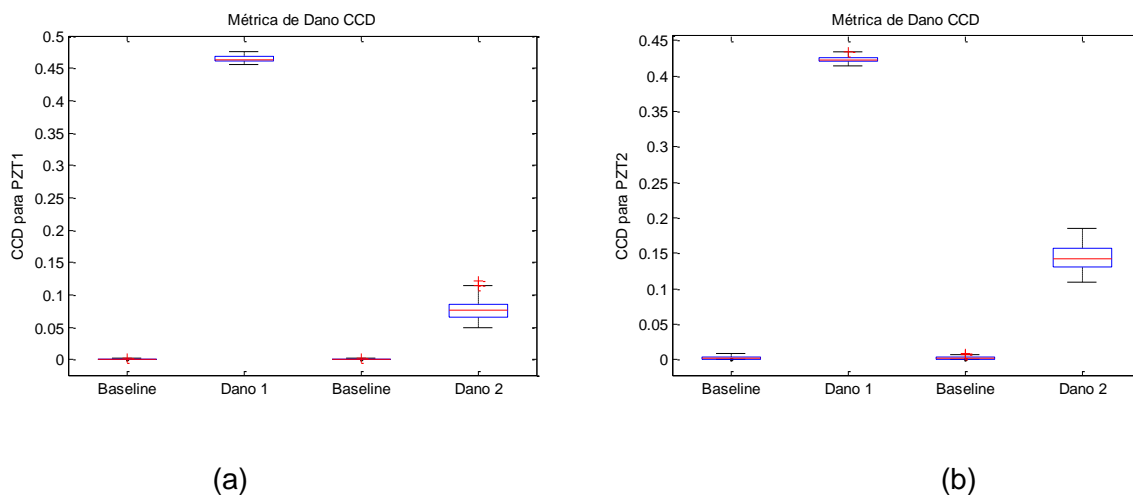


Figura 6.16 – Métricas de Dano das placas com parafuso

6.5.1. Rede neural probabilística nas placas com parafuso para classificação de danos

Para classificar os danos, os sinais de impedância medidos nas placas foram utilizados como sendo as entradas das redes neurais. Foram implementadas três redes probabilísticas para analisar estas placas. Todas estas redes foram construídas com a

mesma arquitetura, uma vez que se destinavam à mesma função (classificação de danos nas placas). As duas primeiras redes foram aplicadas a cada uma das placas. A descrição das redes e dos conjuntos de treinamento e de teste destas redes são as mesmas que as descritas na Tab. 6.2.

Os resultados obtidos com o conjunto de teste de cada uma das seis redes neurais probabilísticas são apresentados na Tab. 6.11. As porcentagens de erro na classificação de danos foram de 2,5% para as duas pastilhas de PZT. Pode-se observar que os erros se apresentaram quando da determinação da corrosão localizada, que é justamente aquele que gera menor variação nos valores da métrica de dano.

Tabela 6.11 – Classificação do Conjunto de Teste das Redes Neurais Probabilísticas para cada PZT das placas com parafusos

		Baseline	Dano1	Dano2	Erro %
PZT1	✓	40	20	18	2,5%
	X	0	0	2	
Total		40	20	20	
PZT2	✓	40	20	18	2,5%
	X	0	0	2	
Total		40	20	20	

Também foi implementada uma rede neural probabilística geral para classificação de dano nas duas placas. A arquitetura desta rede é a mesma descrita na Tab. 6.2 e os conjuntos de treinamento e teste acham-se descritos na Tab.6.12.

Tabela 6.12 – Redes Neurais Probabilísticas para Classificação Geral de placas com parafuso

	Baseline	Dano 1	Dano 2
Conjunto de treinamento	720	360	360
Conjunto de Teste	80	40	40

Os resultados para a rede de classificação geral para as duas placas com parafuso podem ser observados na Tab.6.13. A porcentagem de erro foi de 3,75%, superior, portanto, aos resultados obtidos para cada uma das placas, embora lembrando que se trata de uma porcentagem pequena de erro.

Tabela 6.13 - Classificação do Conjunto de Teste da Rede Neural Probabilística Geral para as placas com parafuso

		<i>Baseline</i>	<i>Dano1</i>	<i>Dano2</i>	<i>Erro %</i>
PZTA	✓	80	38	36	
	X	0	2	4	3,75%
Total		80	40	40	

6.5.2. Análise de cluster nas placas com parafusos para classificação de danos

Na Fig. 6.17 pode-se observar o grau de pertinência de cada medição em relação a cada estado considerado (*baseline*, Dano 1 e Dano 2) para as duaspastilhas de PZT. Quando o algoritmo C-means é inicializado, o grau de pertinência é atribuído aleatoriamente, procurando não favorecer nenhum dos estados. Depois de 12 iterações para o PZT1 e 25 iterações para o PZT2 (Tab. 6.14) o algoritmo foi interrompido pela convergência do processo. Pode-se, então, observar os graus de pertinência final conforme mostrados nas Fig. 6.18. Baseado na informação da Tab.6.10, pode-se notar que todas as medições foram classificadas corretamente com uma porcentagem de pertinência aos estados superior a 90%.

Na Fig. 6.19 pode-se observar como o algoritmo conseguiu ajustar os sinais de cada um dos estados para o PZT1 e para o PZT2. Os centroides correspondem ao sinal representativo de cada um dos estados analisados para a estrutura.

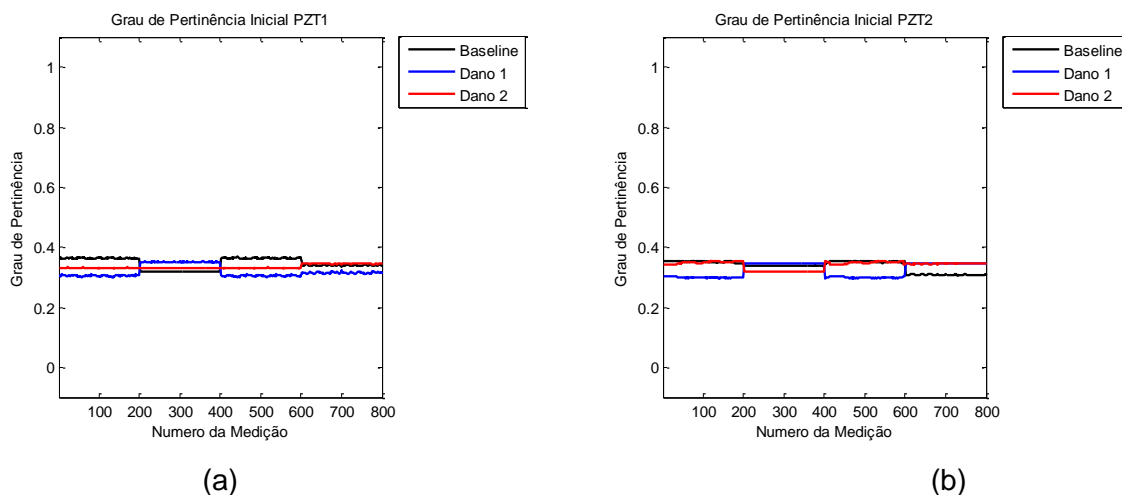


Figura 6.17– Graus de pertinência inicial para placas com parafuso; Algoritmo *Fuzzy C-means*

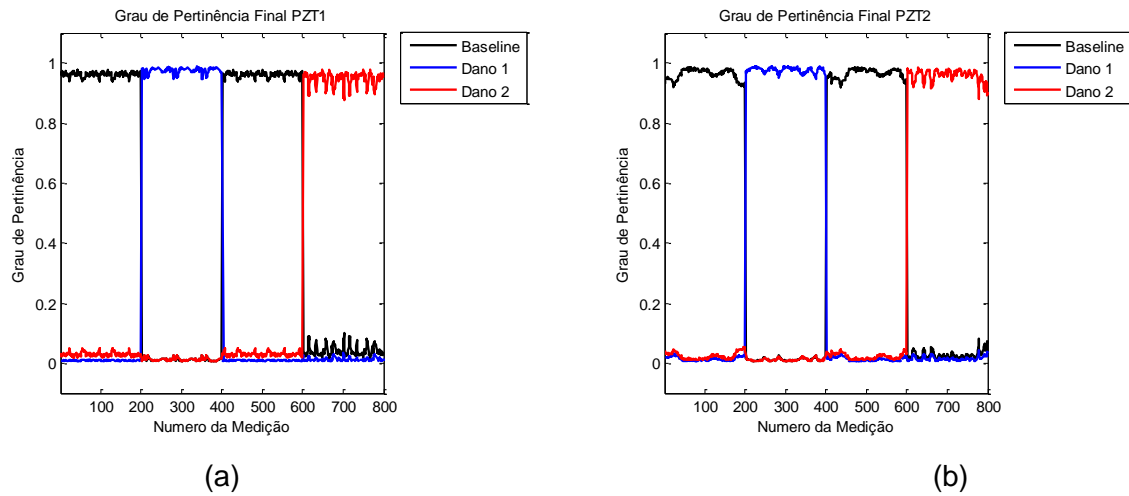


Figura 6.18– Graus de pertinência inicial para placas com parafuso; Algoritmo Fuzzy C-means

Tabela 6.14 – Algoritmo *Fuzzy C-means*; Placas com parafuso

	Iterações	Função Objetivo Inicial	Função Objetivo Final
PZT1	12	5333,925	743,097
PZT2	15	5187,78	785,563

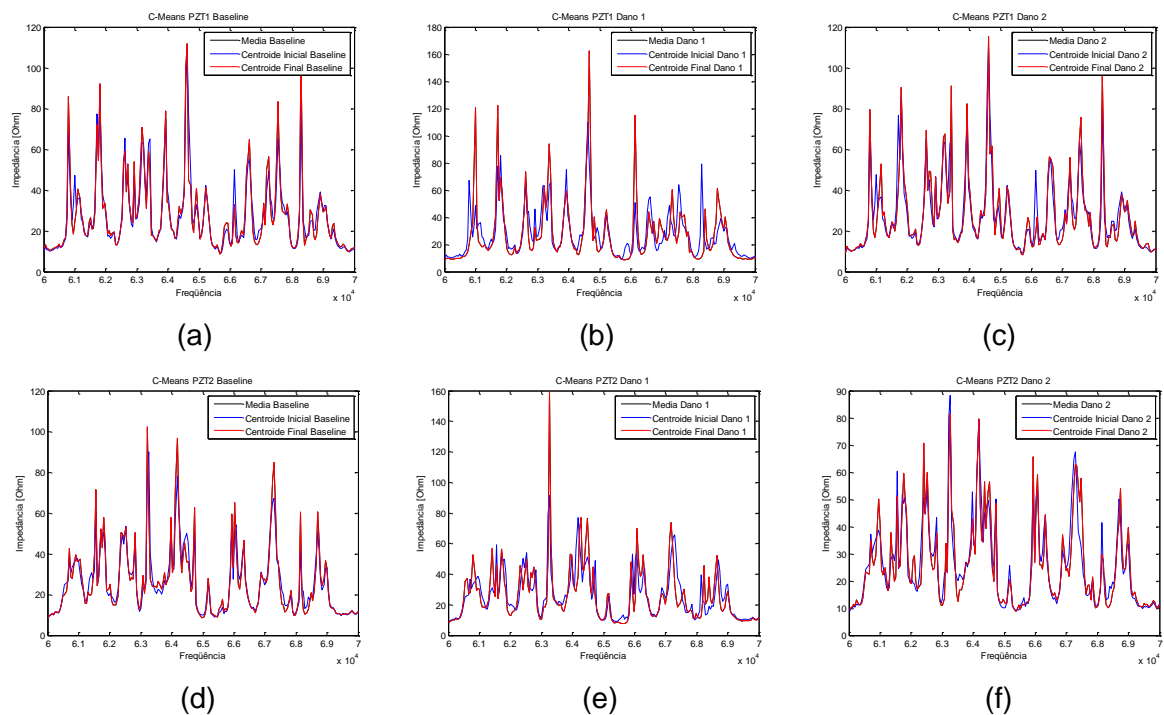


Figura 6.19– Centroides de cada um dos estados do PZT1 e do PZT2 das placas com parafuso; Algoritmo *Fuzzy C-means*

Os graus de pertinência inicial para o algoritmo de Gustafson-Kessel são apresentados na Fig.6.20. Depois de algumas iterações (Tab. 6.15) o algoritmo foi interrompido pela convergência do processo para cada uma das pastilhas de PZT. Pode-se, então, observar os graus de pertinência final conforme mostrados nas Fig. 6.21. Semelhantemente ao observado para o algoritmo anterior, todas as medições foram classificadas corretamente com uma porcentagem de pertinência aos estados igual a 100%.

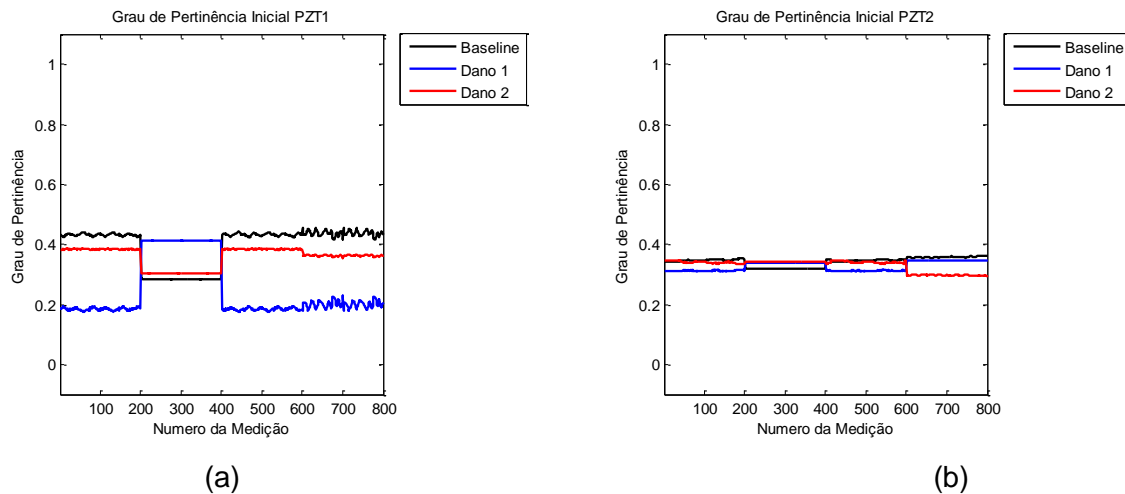


Figura 6.20– Graus de pertinência inicial para placas com parafuso; Algoritmo de Gustafson-Kessel

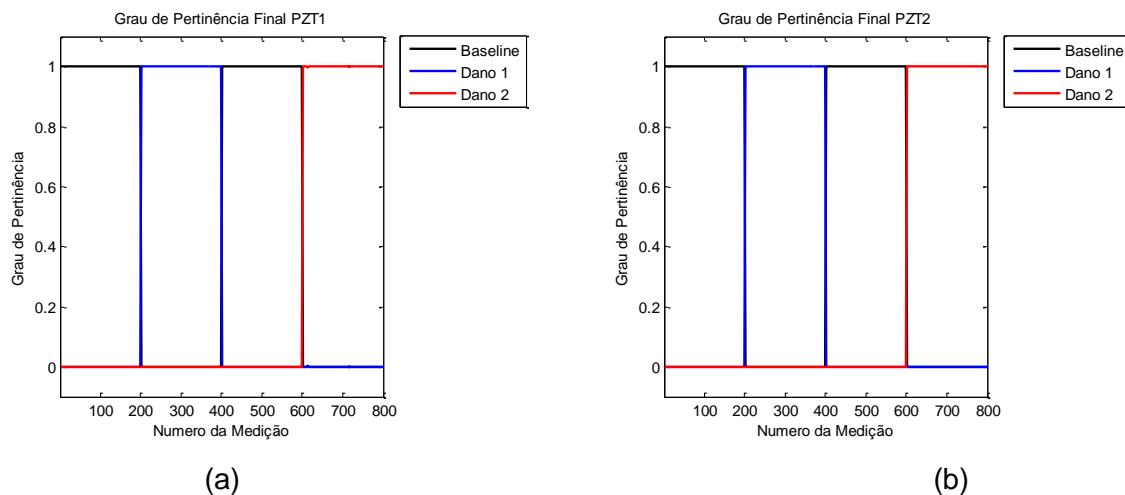


Figura 6.21– Graus de pertinência final para placas com parafuso; Algoritmo de Gustafson-Kessel

Tabela 6.15 – Algoritmo de Gustafson-Kessel; Placas com parafusos

	Iterações	Função Objetivo Inicial	Função Objetivo Final
PZT1	8	28867231,872	320,047
PZT2	10	13922051,752	593,298

Na Fig. 6.22 pode-se observar como o algoritmo conseguiu ajustar os sinais de cada um dos estados, tanto para o PZT1 como para o PZT2.

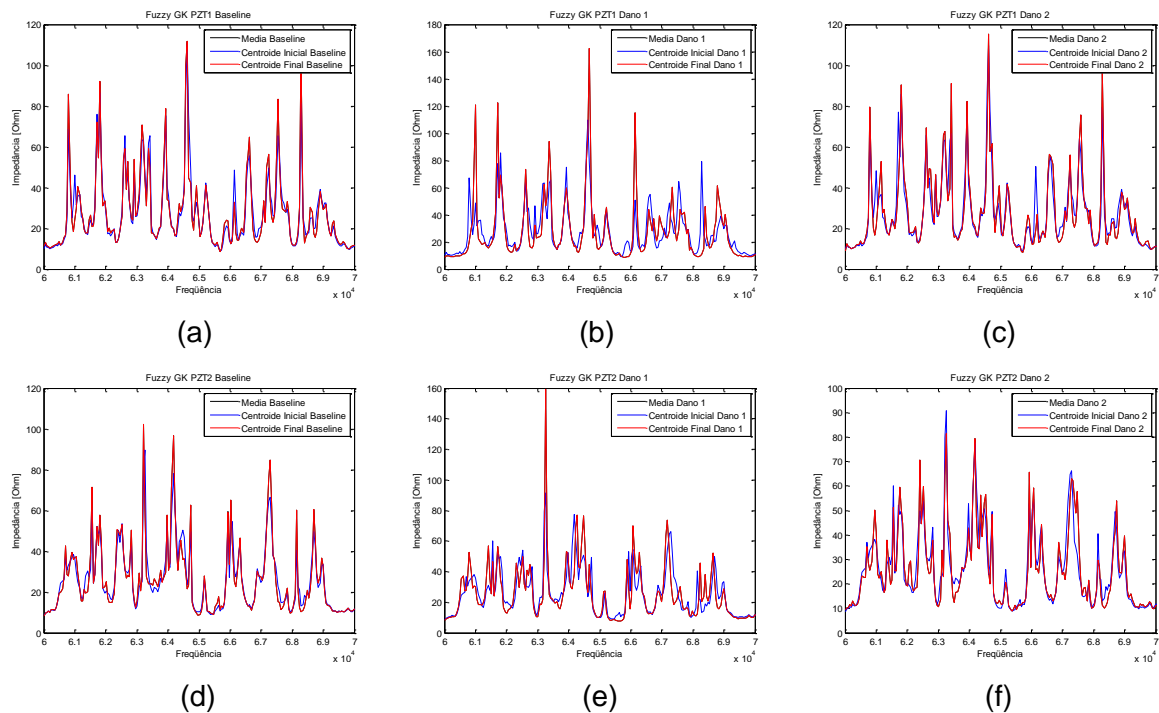


Figura 6.22 – Centroides das placas com parafuso; Algoritmo de Gustafson-Kessel

Semelhantermente ao caso da rede neural probabilística, foram aplicados os algoritmos de análise de cluster para o PZTA (PZT1 e PZT2 juntos), com o objetivo de verificar se é possível aplicar estas técnicas para classificar danos em placas com parafusos de maneira geral. Na Fig. 6.23 pode-se observar o grau de pertinência final de cada um dos algoritmos para o PZTA.

Com as informações da Tab. 6.16 é evidente que novamente nenhum dos dois algoritmos conseguiu classificar corretamente os estados da estrutura.

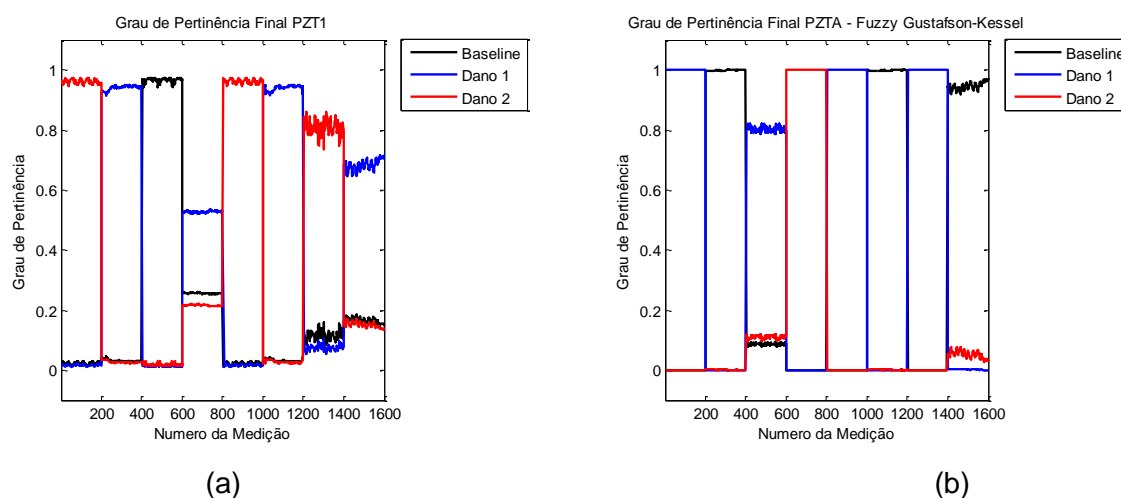


Figura 6.23– Graus de pertinência final para o PZTA das placas com parafuso

Tabela 6.16 – Medições do PZTA das placas parafusadas

Estado	PZT	No. de Medição
Baseline	PZT1	1-200
	PZT2	201-400
Dano 1	PZT1	401-600
	PZT2	601-800
Baseline	PZT1	801-1000
	PZT2	1001-1200
Dano 2	PZT1	1201-1400
	PZT2	1401-1600

6.6. Estudo de Caso # 3: Painel Aeronáutico

Para estudar a aplicação dos métodos de inteligência artificial em estruturas reais foi feito um ensaio em um painel aeronáutico de 80x80cm, como mostra a Fig. 6.24. A estrutura foi instrumentada com oito pastilhas de PZT: duas com formato quadrado de 15x15x0,1 mm (PZT3 e PZT4) e seis redondas com diâmetro de 15mm e espessura de 0,1mm (PZT1, PZT2, PZT5, PZT6, PZT7 e PZT8). Os formatos das pastilhas de PZT foram escolhidos pela facilidade de colagem, já que, como foi observado na seção 4.5, a influência do formato da pastilha de PZT não é relevante.

Para simular dois tipos de danos diferentes, foi primeiro removido um rebite localizado próximo ao PZT3, como mostra a Fig. 4.24(c). E, seguida, após terem sido feitas as

medições para este estado, o rebite foi recolocado e procedeu-se a aplicação de ácido clorídrico em torno do rebite para obter corrosão localizada (ver Fig.4.24(c)).

A descrição de cada estado da estrutura é apresentada na Tab. 6.17. Duzentas (200) medições foram tomadas para cada um dos estados. Cada sinal medido contém 200 pontos.

Para quantificar a diferença entre os sinais foi utilizada a métrica de dano descrita pela Eq. (2.19). Os resultados obtidos são apresentados na Fig. 6.26. É evidente que a métrica para o dano 1 (sem rebite) é maior do que para o dano 2 (furo). O Dano 2 não apresenta uma diferença considerável com respeito ao *baseline*, razão pela qual é difícil garantir se a técnica efetivamente detectou ou não o dano.

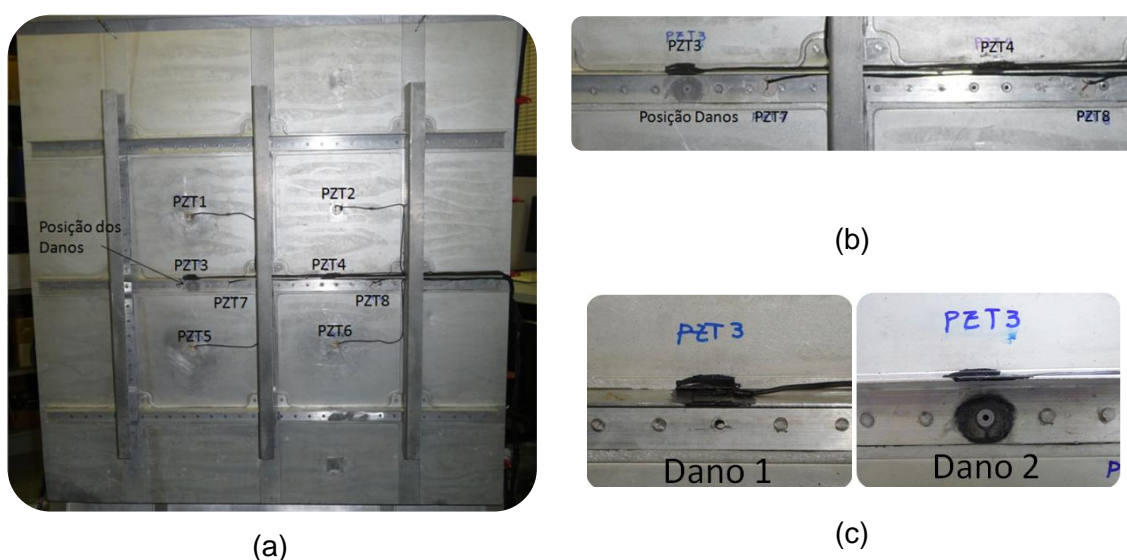
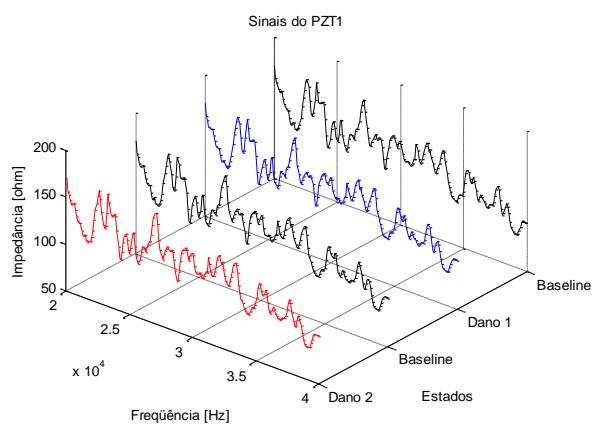


Figura 6.24 – Painel aeronáutico instrumentado com oito pastilhas de PZT

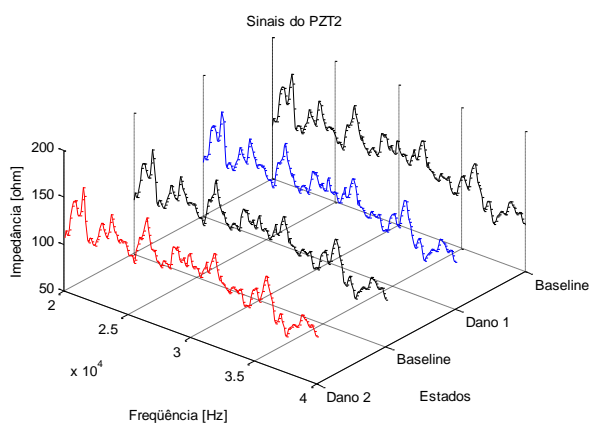
Tabela 6.17 – Estados do painel aeronáutico

No.	Estados	Descrição	No. De Medição
1	<i>Baseline</i>	O painel com todos os rebites	1-200
2	Dano 1	O painel sem um dos rebites (Fig.6.24(c))	201-400
1	<i>Baseline</i>	O painel com todos os rebites	401-600
3	Dano2	O painel com todos os rebites e com corrosão localizada	601-800

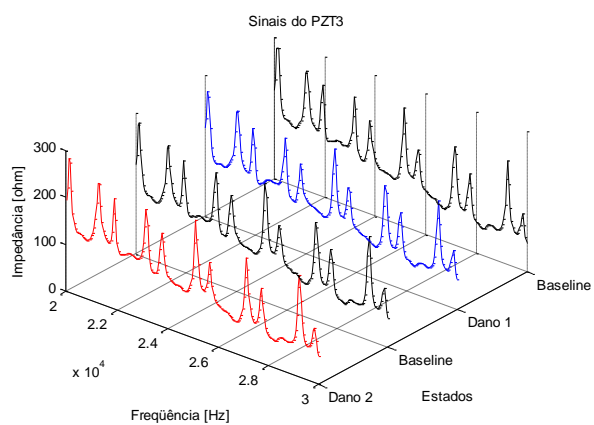
Os sinais de impedância médios correspondendo a cada um dos estados da estrutura são apresentados na Fig. 6.25.



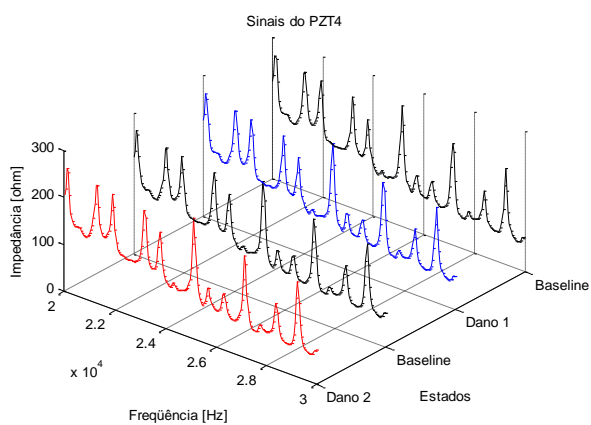
(a)



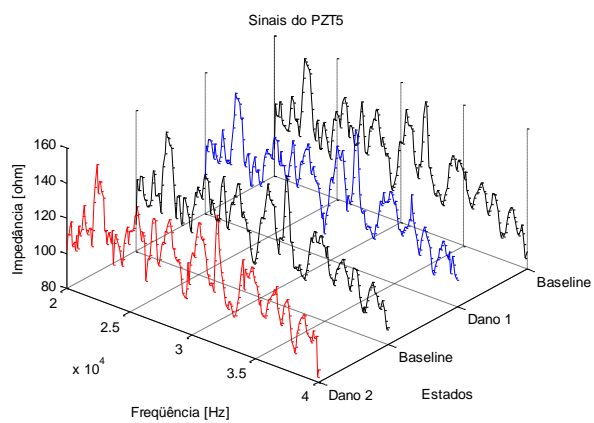
(b)



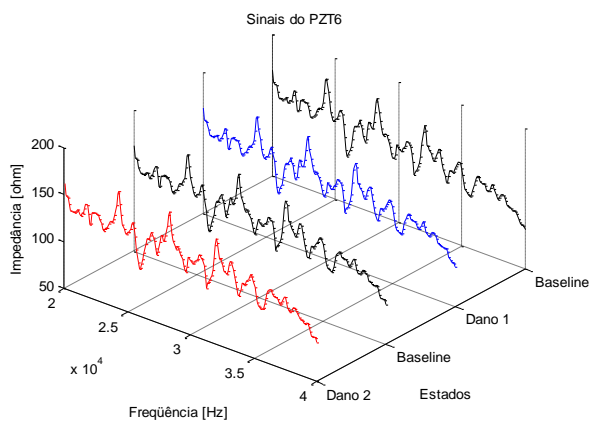
(c)



(d)



(e)



(f)

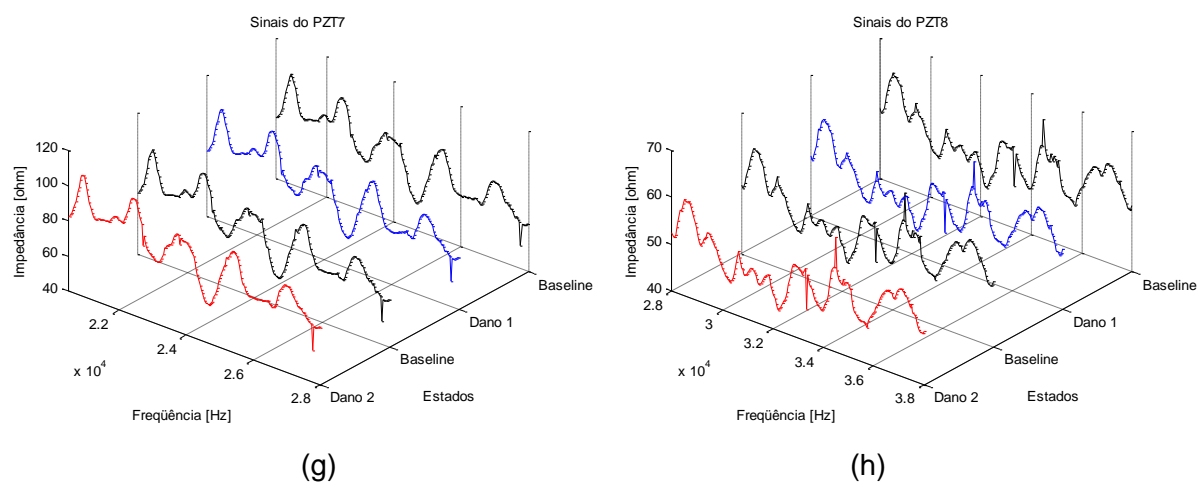


Figura 6.25 – Sinais dos sensores de impedância do painel aeronáutico

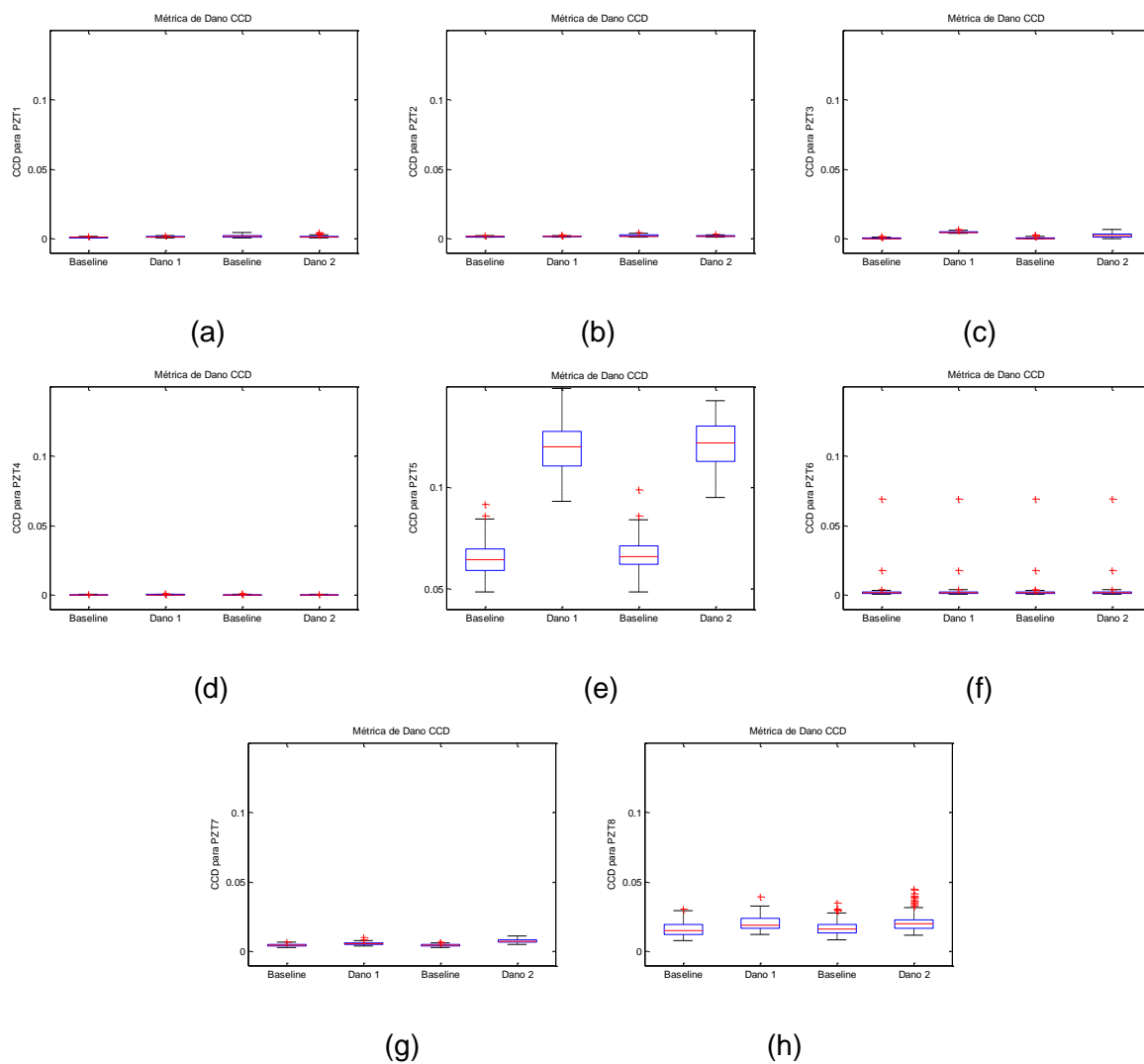


Figura 6.26 – Métricas de Dano do painel aeronáutico

6.6.1. Rede neural probabilística para o painel aeronáutico para classificação de danos

Para classificar os danos, os sinais de impedância medidos no painel foram utilizados como sendo as entradas das redes neurais. Foram implementadas oito (uma para cada PZT) redes probabilísticas para analisar esta estrutura. Todas estas redes foram construídas com a mesma arquitetura, uma vez que se destinavam à mesma função (classificação de danos no painel). A descrição das redes e dos conjuntos de treinamento e de teste destas redes são as mesmas que as apresentadas na Tab. 6.2.

Os resultados obtidos com o conjunto de teste de cada uma das oito redes neurais probabilísticas são apresentados na Tab. 6.18.

As porcentagens de erro na classificação de danos do PZT1, do PZT2 e do PZT6 foram maiores que 48%, já que estes PZT não serão usados para detectar os danos inseridos. O PZT3 e o PZT4 apresentaram porcentagem de erro superior a 10%, embora se deva ressaltar que o Dano1 (perda do rebite) não teve erro de classificação. Isto porque estas pastilhas de PZT conseguiram detectar somente este dano. O PZT5, o PZT7 e o PZT8 tiveram erros menores que 4%, portanto similar aos resultados obtidos para as estruturas mais simples (viga e placa). Pode-se assim concluir que estas três pastilhas de PZT conseguiram detectar adequadamente os dois danos inseridos na estrutura.

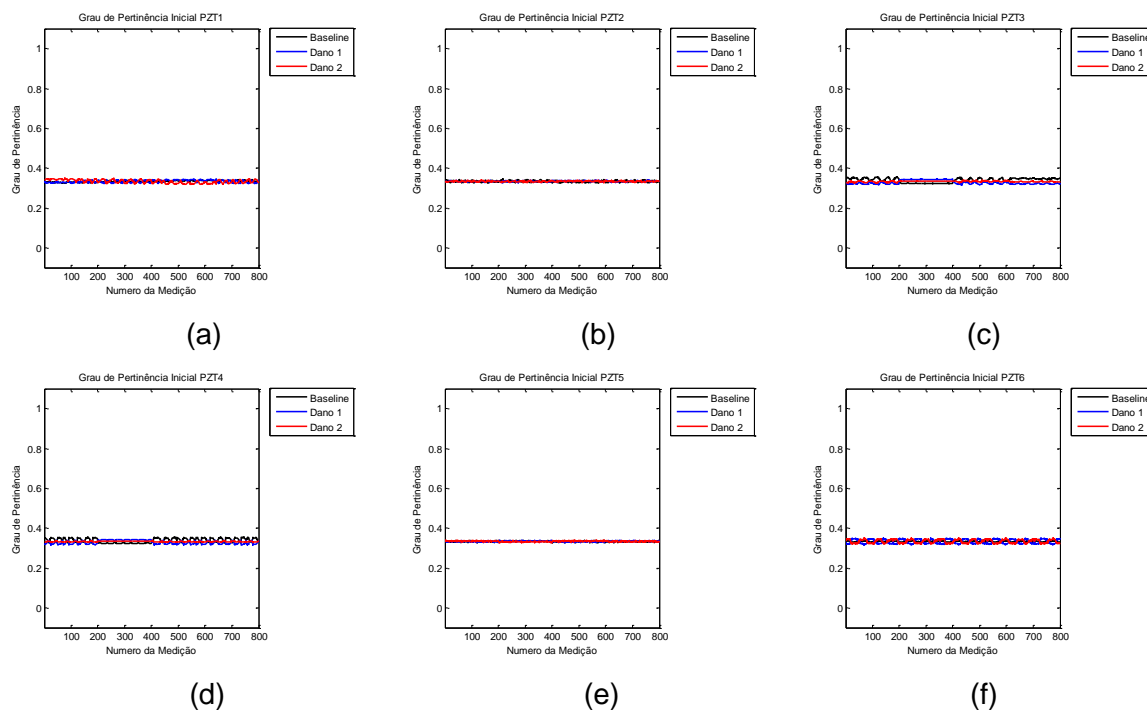
Tabela 6.18 – Classificação do Conjunto de Teste das Redes Neurais Probabilísticas para cada pastilha de PZT do painel aeronáutico

		Baseline	Dano1	Dano2	Erro %
PZT1	✓	23	10	5	52,5%
	X	17	10	15	
Total		40	20	20	
PZT2	✓	20	9	8	55%
	X	20	11	12	
Total		40	20	20	
PZT3	✓	35	20	16	11,25%
	X	5	0	4	
Total		40	20	20	
PZT4	✓	32	20	14	17,5%
	X	8	0	6	
Total		40	20	20	

		Baseline	Dano1	Dano2	Erro %
PZT5	✓	40	19	18	3,75%
	X	0	1	2	
Total		40	20	20	
PZT6	✓	40	12	8	48,75%
	X	19	8	12	
Total		40	20	20	
PZT7	✓	40	20	19	1,25%
	X	0	0	1	
Total		40	20	20	
PZT8	✓	40	20	18	2,5%
	X	0	0	2	
Total		40	20	20	

6.6.2. Análise de cluster para o painel aeronáutico para classificação de danos

Na Fig. 6.27 pode-se observar o grau de pertinência de cada medição para cada estado considerado (*baseline*, Dano 1 e Dano 2) para as oito Pastilhas de PZT, obtidos ao ser inicializado o algoritmo C-means.



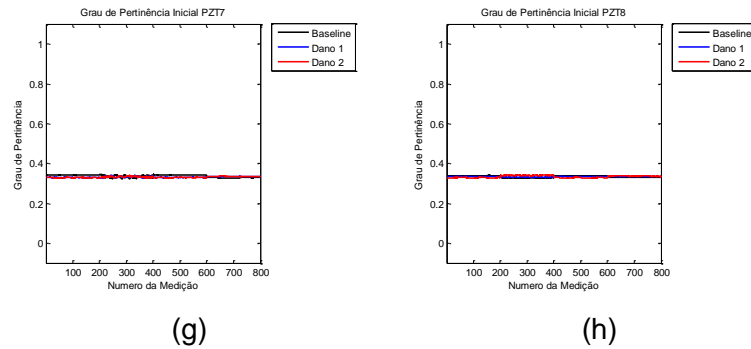
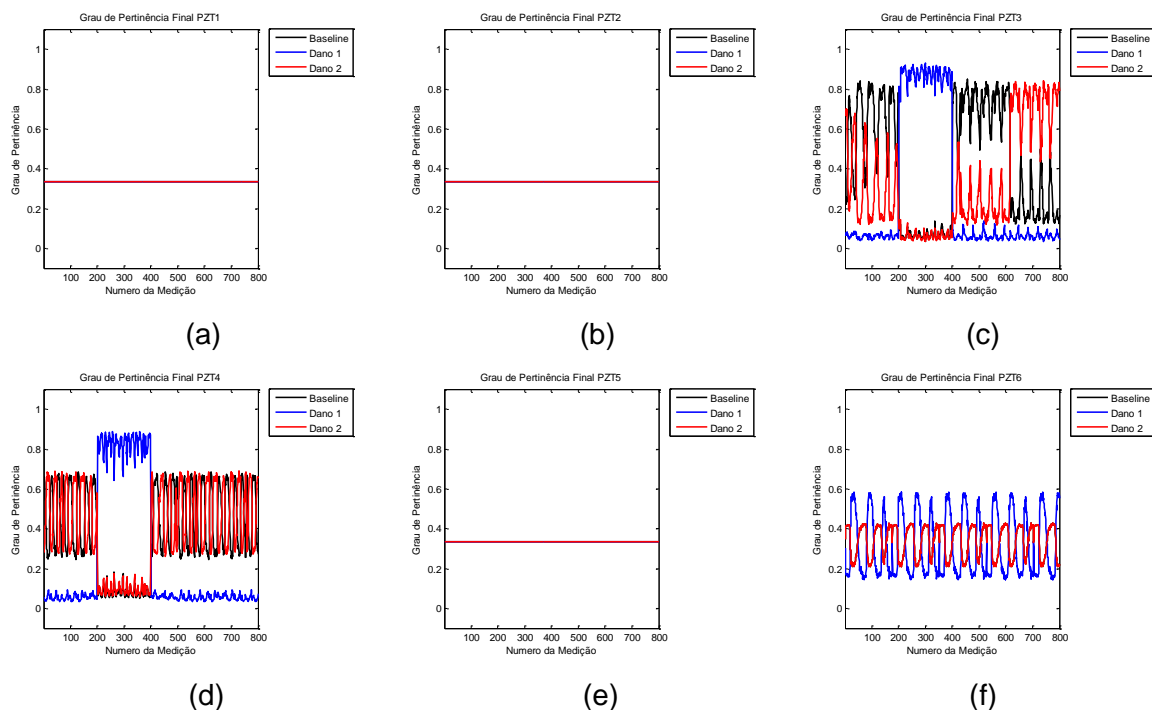


Figura 6.27– Graus de pertinência inicial para o painel aeronáutico; Algoritmo C-means

Depois de várias iterações (Tab. 6.19) o algoritmo foi interrompido pela convergência do processo. Pode-se, então, observar os graus de pertinência final conforme mostrados nas Fig. 6.28. Os resultados do PZT1, do PZT2 e do PZT5 mostram que o algoritmo *Fuzzy C-means* não conseguiu classificar os danos, resultando o mesmo grau de pertinência para todos os clusters. Pode-se também notar que, após várias iterações do algoritmo, o valor da função objetivo não variou consideravelmente (Ver Tab. 6.19). Para PZT6 todas as medições foram classificadas incorretamente, sendo que o grau de pertinência das medições do cluster *Baseline* é igual ao do cluster do Dano2. Quanto aos PZT3 e PZT4, o Dano1 foi bem classificado com graus de pertinência maiores que 60%; já o *Baseline* e o Dano2 não conseguiram ser classificados adequadamente. Finalmente, quanto aos PZT7 e PZT8, o algoritmo *Fuzzy C-means* conseguiu classificar corretamente todas as medições com um grau de pertinência maior que 50%.



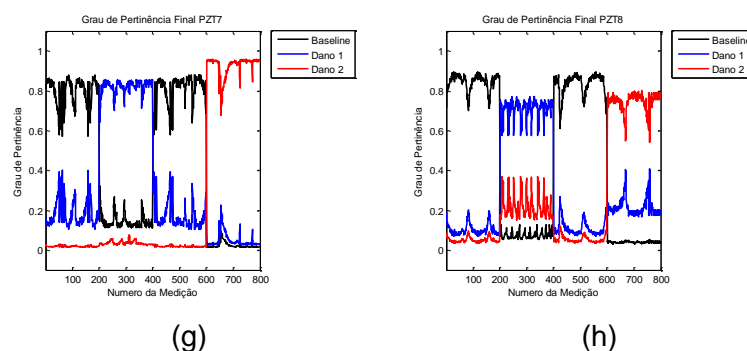


Figura 6.28– Graus de pertinência final para o painel aeronáutico; Algoritmo C-means

Tabela 6.19 – Algoritmo *Fuzzy C-means*; Painel aeronáutico

	Iterações	Função Objetivo Inicial	Função Objetivo Final
PZT1	53	1627,242	1627,034
PZT2	30	1537,76	1537,683
PZT3	47	2523,279	1616,334
PZT4	57	2399,916	1596,66
PZT5	15	1702,9	1702,847
PZT6	265	1160,475	1143,511
PZT7	19	3494,665	1096,84
PZT8	26	2700,491	1479,602

Na Fig. 6.29 pode-se observar como o algoritmo conseguiu ajustar os sinais de cada um dos estados para o PZT7 (os sinais dos centroides ajustados das demais pastilhas de PZT podem ser encontrados no anexo I).

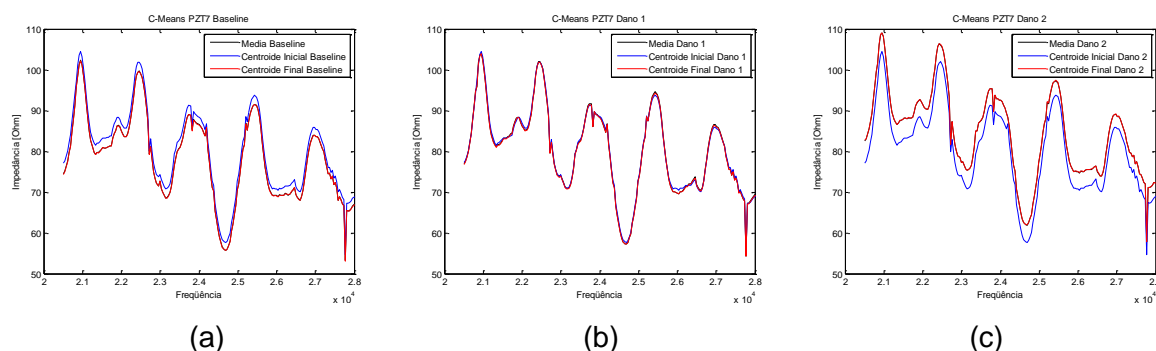


Figura 6.29– Centroides de cada um dos estados do PZT7 do painel aeronáutico; Algoritmo *Fuzzy C-means*

Os graus de pertinência iniciais para o algoritmo de Gustafson-Kessel são apresentados na Fig.6.30. Depois de algumas iterações (Tab. 6.20) o algoritmo foi

interrompido pela convergência do processo para cada uma das pastilhas de PZT utilizadas no processo. Pode-se, então, observar os graus de pertinência final conforme mostrados nas Fig. 6.31. Os resultados do PZT1, do PZT2 e do PZT6 confirmam novamente que estes PZTs não conseguiram enxergar os danos e, assim, a classificação não foi possível. O PZT3 e o PZT4 classificaram corretamente o Dano 1; já o Dano2 foi impossível de discriminá-lo em relação ao *Baseline*. Finalmente, o PZT5, o PZT7 e o PZT8 conseguiram classificar corretamente os dois danos com um grau de pertinência maior que 80%. O PZT5 apresentou valores de pertinência menores uma vez que o desvio dos sinais é consideravelmente maior que os desvios do PZT7 e PZT8 (ver Fig. 6.26).

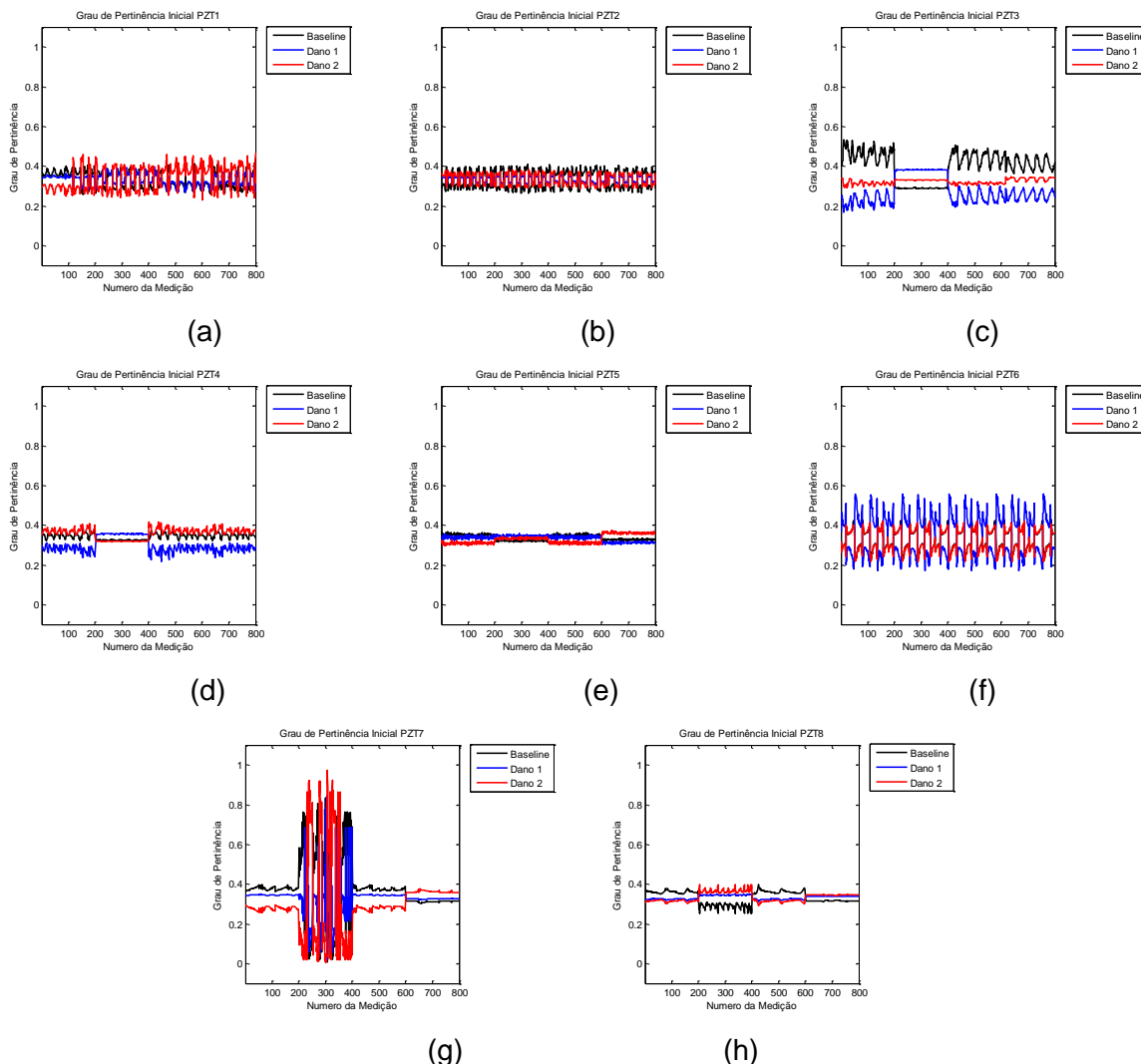


Figura 6.30– Graus de pertinência inicial para o painel aeronáutico; Algoritmo de Gustafson-Kessel

Tabela 6.20 – Algoritmo de Gustafson-Kessel; Paineil aeronáutico

	Iterações	Função Objetivo Inicial	Função Objetivo Final
PZT1	139	3173,262	446,395
PZT2	102	831,342	118,823
PZT3	67	532244,526	5803,566
PZT4	47	602945,975	2788,759
PZT5	18	186,055	95,991
PZT6	131	3644,445	1594,554
PZT7	13	1041994,032	23013,747
PZT8	25	1452335,476	10885,113

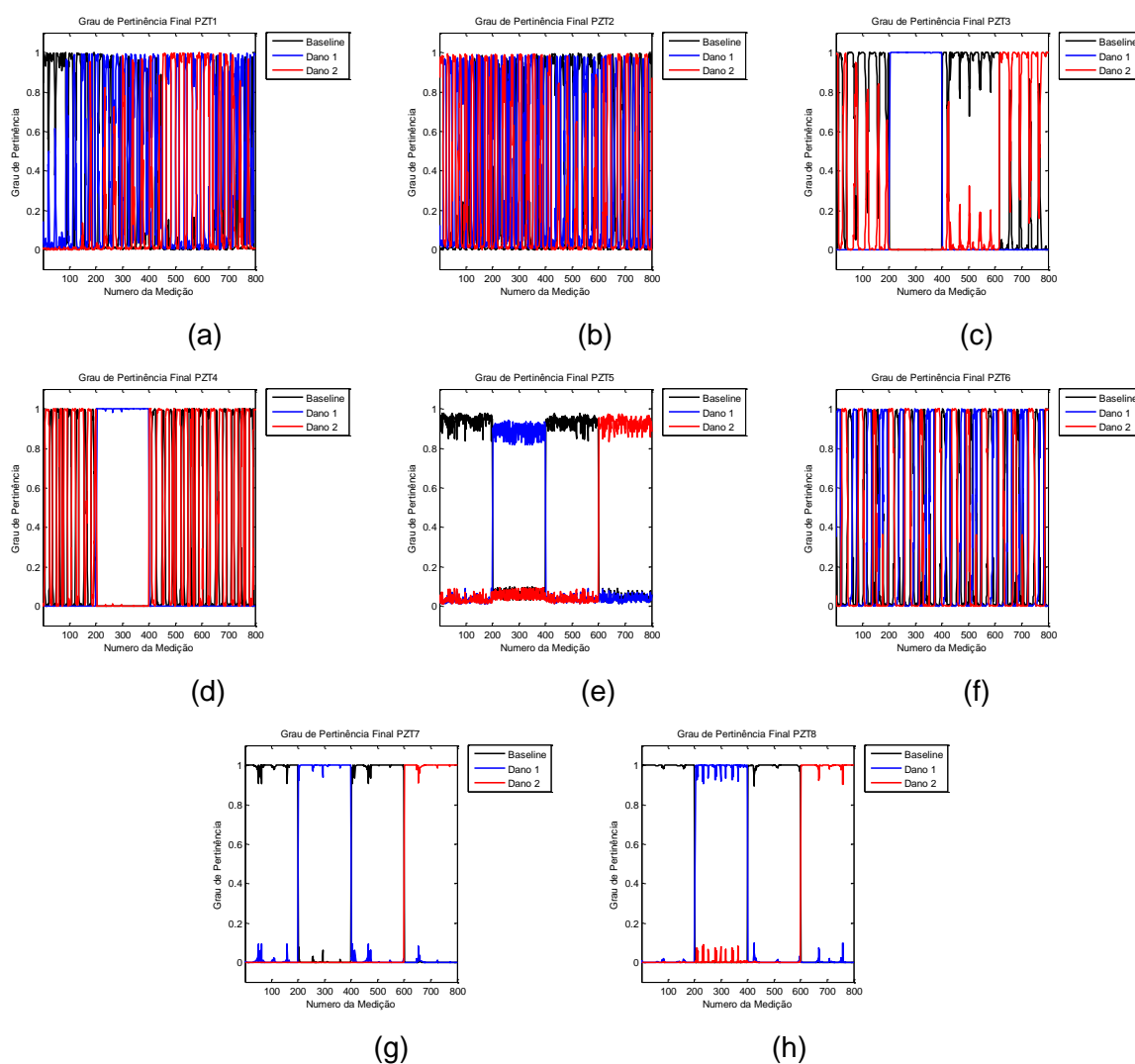


Figura 6.31– Graus de pertinência final para o paineíl aeronáutico; Algoritmo de Gustafson-Kessel

Na Fig. 6.32 pode-se observar como o algoritmo conseguiu ajustar os sinais dos estados para o PZT8 (os sinais dos demais PZTs estão no Anexo I).

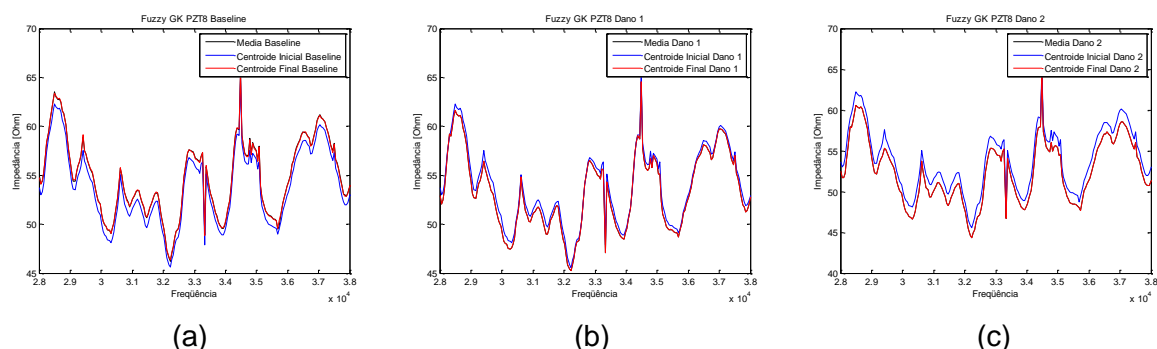


Figura 6.32– Centroides de cada um dos estados do PZT8 do painel aeronáutico; Algoritmo de Gustafson-Kessel

6.7. Estudo de Caso #4: Janela Aeronáutica

Uma segunda estrutura aeronáutica foi utilizada para testar as técnicas de inteligência artificial no monitoramento de integridade estrutural para classificação de danos. Trata-se de uma janela localizada em uma estrutura aeronáutica de alumínio, conforme ilustrado na Fig. 4.33(a). Devido ao tamanho e à complexidade da estrutura, dez pastilhas de PZT foram utilizadas no experimento: seis pastilhas com formato quadrado foram coladas sobre as vigas de reforço e quatro com formato circular foram coladas na placa (Fig.4.33(b)). O número de pastilhas de PZT utilizado foi arbitrário e nenhum estudo preliminar foi feito para otimizar esse número. Para simular dois danos diferentes na estrutura, primeiro foi adicionada uma massa conforme a Fig. 6.33(a); posteriormente, após ser retirada a massa retromencionada, uma das garras (localizada próximo ao PZT2) foi retirada (ver Fig. 6.33(b)). Para cada estado foram feitas 200 medições conforme Tab. 6.21. Para cada medição foram tomados 200 pontos. Ao começar os testes o PZT10 apresentou pouca estabilidade e repetibilidade, tendo por isso sido descartado do ensaio.

Tabela 6.21 – Estados do painel aeronáutico

No.	Estados	Descrição	No. De Medição
1	Baseline	Janela com todas as garras	1-200
2	Dano 1	Janela com todas as garras e adição de massa	201-400
1	Baseline	Janela com todas as garras	401-600
3	Dano2	Janela sem a garra perto do PZT2 (Fig.6.33(b))	601-800

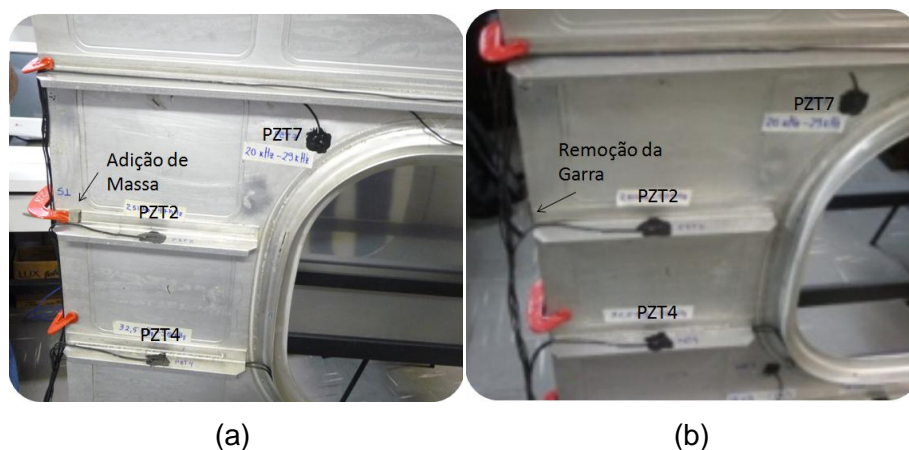
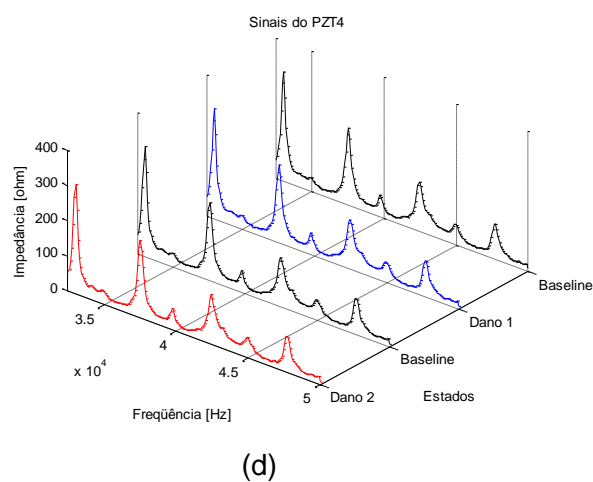
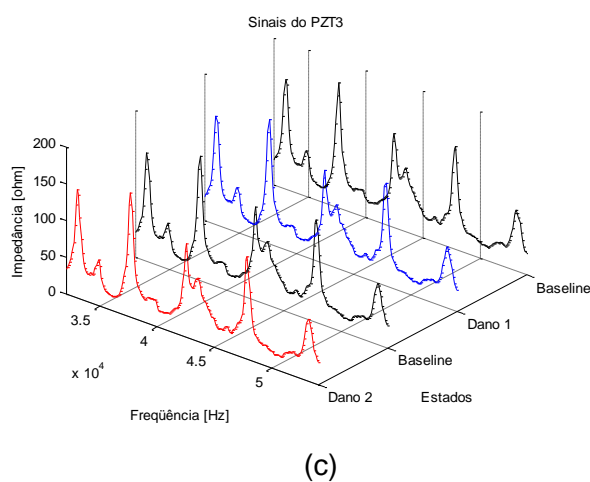
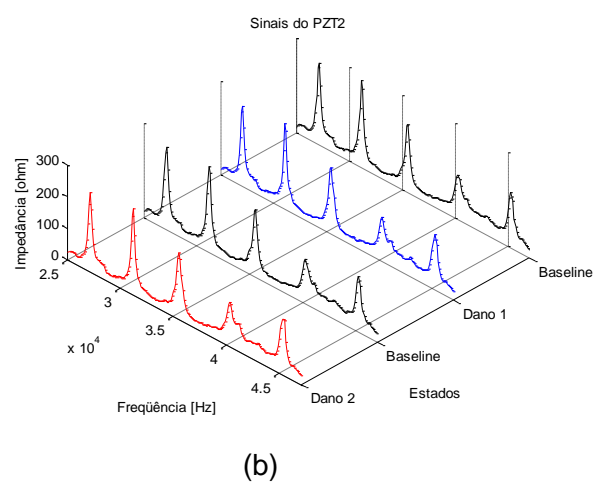
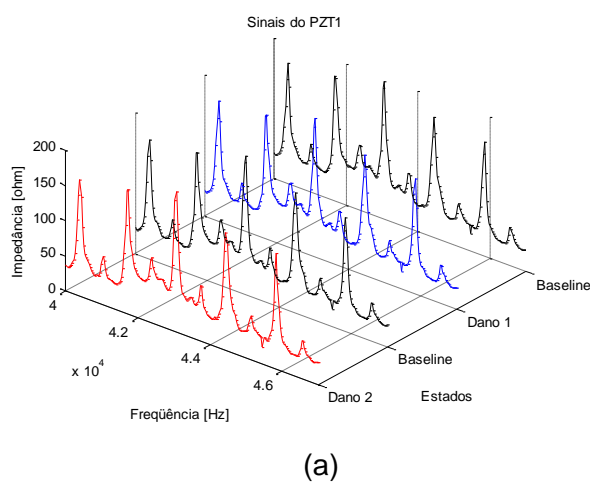


Figura 6.33–Danos inseridos na janela aeronáutica

Os sinais de impedância médios correspondendo a cada um dos estados da janela são apresentados na Fig. 6.34.



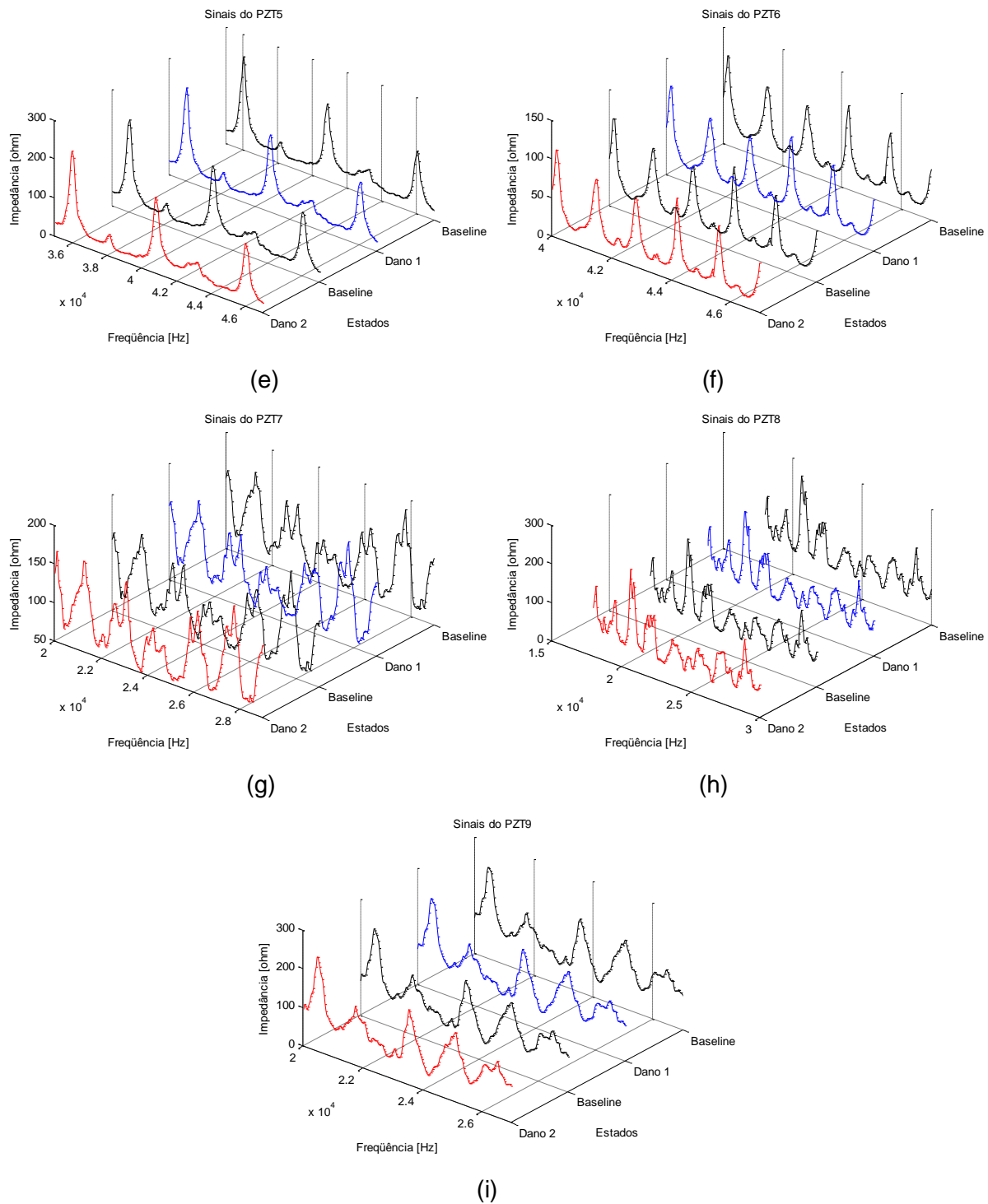


Figura 6.34 – Sinais dos sensores de impedância da janela da estrutura aeronáutica

Para quantificar a diferença entre os sinais foi utilizada a métrica de dano descrita pela Eq. (2.19). Os resultados obtidos são apresentados na Fig. 6.35.

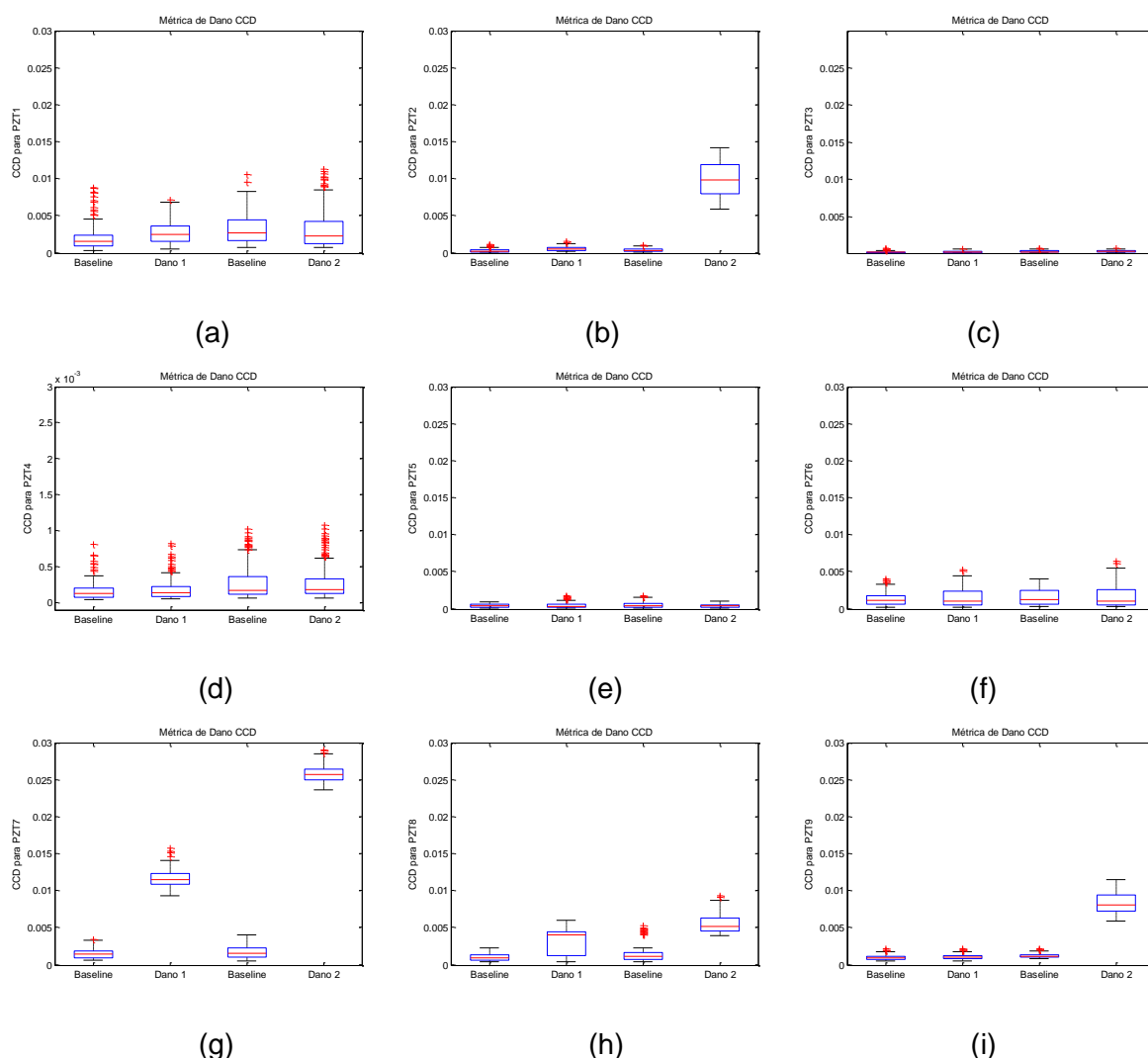


Figura 6.35 – Métricas de Dano da janela da estrutura aeronáutica

Os valores da métrica permitem observar que o PZT7 é capaz de detectar os dois danos inseridos na estrutura, embora o valor da métrica para o Dano1 seja menor que o encontrado para o Dano2. O PZT2 detectou somente a perda da garra localizada próximo a ele. Já as pastilhas de PZT que estavam coladas nas vigas de reforço (PZT1, PZT3, PZT4, PZT5 e PZT6) não tiveram maior variação com os danos inseridos. O PZT8 e o PZT9 somente conseguiram detectar a remoção da garra.

6.7.1. Rede neural probabilística para a janela da estrutura aeronáutica para classificação de danos

Para classificar os danos, os sinais de impedância medidos na janela foram utilizados como sendo as entradas das redes neurais. Foram implementadas nove (uma para cada PZT) redes probabilísticas para analisar esta estrutura. Todas estas redes foram construídas com a mesma arquitetura, uma vez que se destinavam todas à mesma função (classificação

de danos na janela). A descrição das redes e dos conjuntos de treinamento e de teste destas redes é a mesma que a descrita na Tab. 6.2.

Os resultados obtidos com o conjunto de teste de cada uma das oito redes neurais probabilísticas são apresentados na Tab. 6.22.

As porcentagens de erro na classificação de danos do PZT1, do PZT3, do PZT4, do PZT5 e do PZT6 foram maiores que 48%. Estes PZT não se dedicam à detecção de danos. Os danos aqui apontados foram inseridos na placa e tais pastilhas de PZT estão coladas nas vigas de reforço (ver item 4.6 deste trabalho). O PZT2, embora instalado em uma viga de reforço, conseguiu detectar o Dano2 sem erros; é provável que este sucesso se deva ao fato deste sensor se encontrar próximo da posição da garra. O PZT8 e o PZT9 detectaram somente a remoção da garra sem erros, com um percentual de erro total inferior a 20%. Finalmente, o PZT7 que se encontra colado diretamente na placa e próximo da garra removida, conseguiu detectar todos os estados com erro de 1,25%.

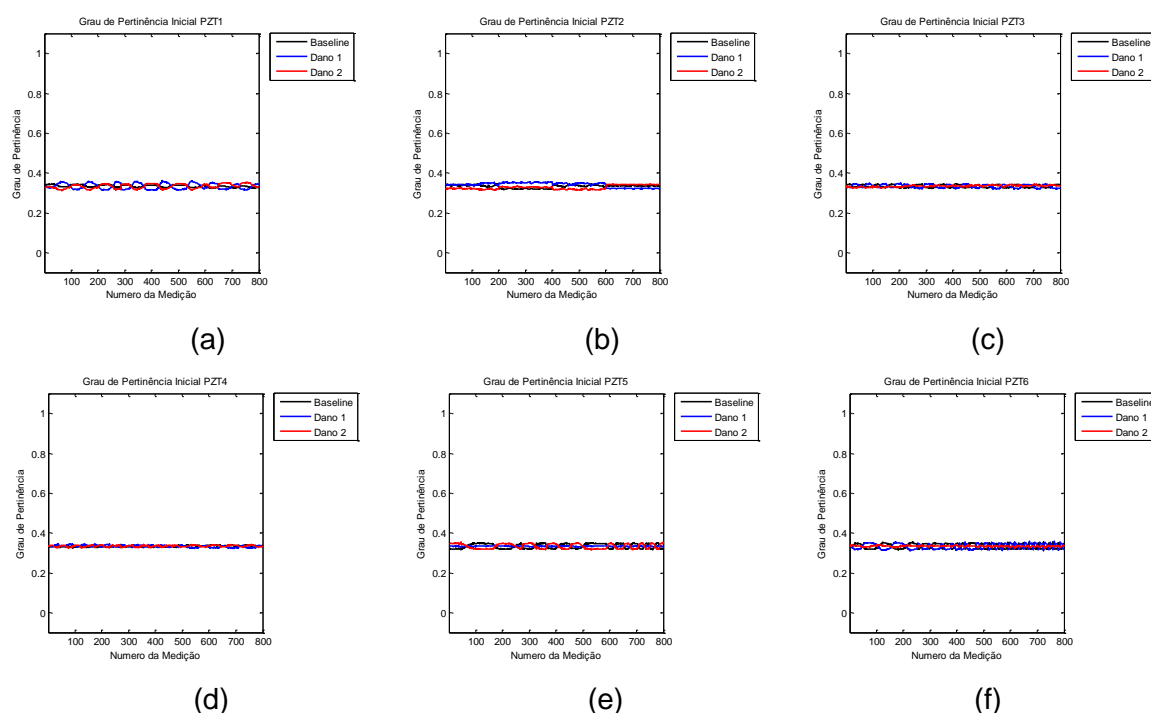
Tabela 6.22 – Classificação do Conjunto de Teste das Redes Neurais Probabilísticas para cada pastilha de PZT da janela da estrutura aeronáutica

		Baseline	Dano1	Dano2	Erro %
PZT1	✓	21	8	12	48,75%
	X	19	12	8	
Total		40	20	20	
PZT2	✓	36	16	20	10%
	X	4	4	0	
Total		40	20	20	
PZT3	✓	20	3	7	62,5%
	X	20	17	13	
Total		40	20	20	
PZT4	✓	19	7	13	51,25%
	X	21	13	7	
Total		40	20	20	
PZT5	✓	21	8	13	47,5%
	X	19	12	7	
Total		40	20	20	
PZT6	✓	17	9	9	56,25%
	X	23	11	11	
Total		40	20	20	

		Baseline	Dano1	Dano2	Erro %
PZT7	✓	40	19	20	1,25%
	X	0	1	0	
Total		40	20	20	
PZT8	✓	33	15	20	18,75%
	X	7	8	0	
Total		40	20	20	
PZT9	✓	33	15	20	11,25%
	X	7	5	0	
Total		40	20	20	

6.7.2. Análise de cluster para a janela da estrutura aeronáutica para classificação de danos

Na Fig. 6.36 pode-se observar o grau de pertinência de cada medição para cada estado considerado (*baseline*, Dano1 e Dano2) para as nove pastilhas de PZT. Quando o algoritmo C-means é inicializado, o grau de pertinência é atribuído aleatoriamente, procurando não favorecer a nenhum dos estados. Depois de 141 iterações para o PZT1, 519 iterações para o PZT2, 1854 iterações para o PZT3, 197 iterações para o PZT4, 147 iterações para o PZT5, 68 iterações para o PZT6, 26 iterações para o PZT7, 188 iterações para o PZT8 e 57 iterações para o PZT9 (Tab. 6.23) o algoritmo foi interrompido pela convergência do processo. Pode-se, então, observar os graus de pertinência final, conforme mostrados nas Fig. 6.37.



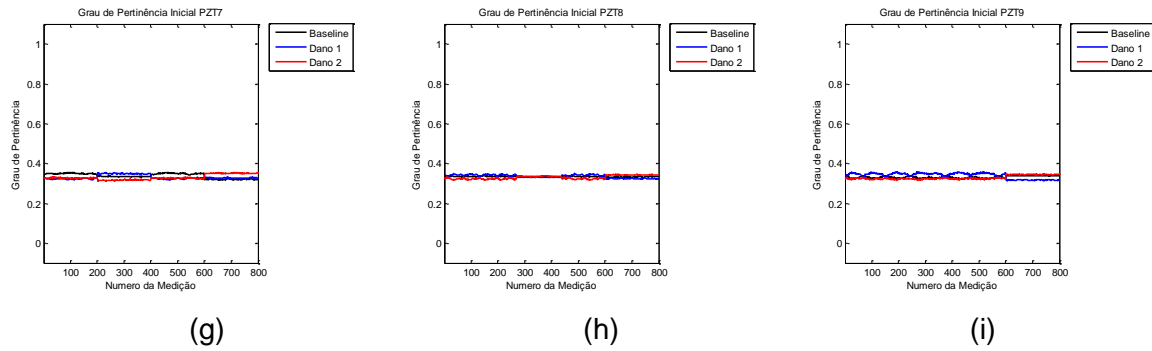
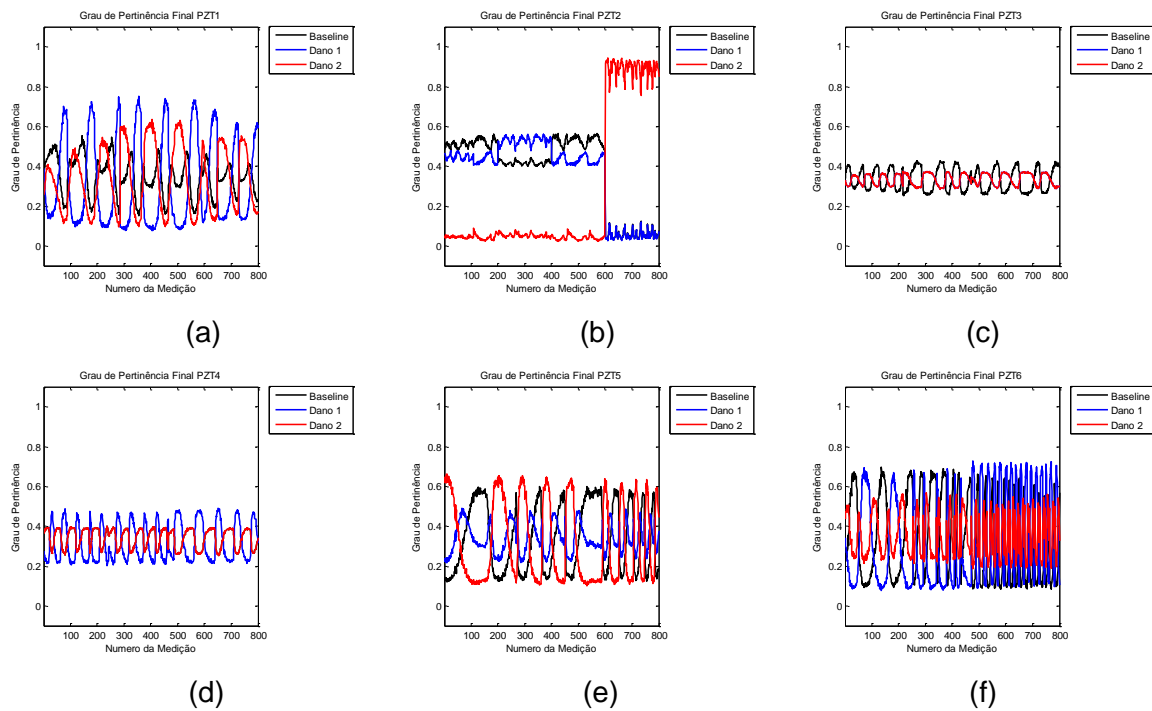


Figura 6.36– Graus de pertinência inicial para a janela da estrutura aeronáutica; Algoritmo *Fuzzy C-means*

Os resultados do PZT1, do PZT3, do PZT4, PZT5 e do PZT6 mostram que o algoritmo *Fuzzy C-means* não conseguiu classificar corretamente os dados, conforme se verificou, também, para o caso da rede neural probabilística e da métrica de dano. No PZT2, no PZT 8 e no PZT9 o Dano2 foi bem classificado, com graus de pertinência maiores que 60%. Já o *baseline* e o Dano1 não conseguiram ser classificados corretamente. Finalmente, para o PZT7, o algoritmo *Fuzzy C-means* conseguiu classificar corretamente todas as medições com um grau de pertinência superior a 60%.



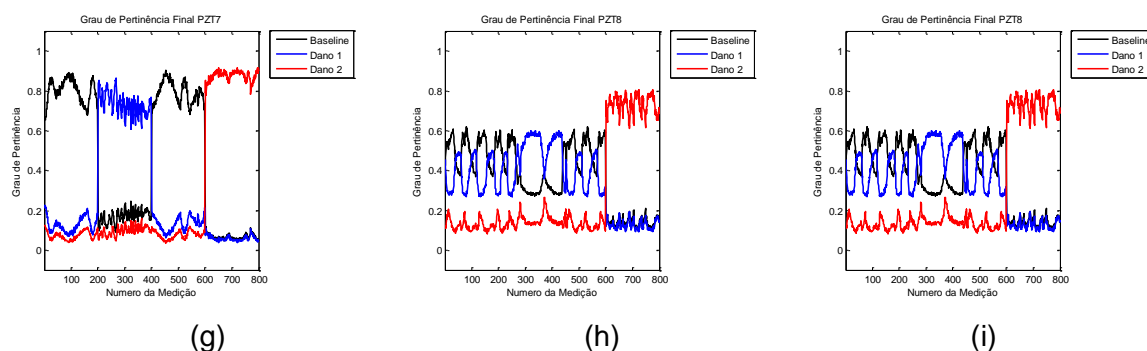


Figura 6.37– Graus de pertinência final para a janela da estrutura aeronáutica; Algoritmo *Fuzzy C-means*

Tabela 6.23 – Algoritmo *Fuzzy C-means*; janela da estrutura aeronáutica

	Iterações	Função Objetivo Inicial	Função Objetivo Final
PZT1	141	2054,319	1930,768
PZT2	519	2885,065	1582,022
PZT3	1854	1802,04	1801,53
PZT4	197	1798,781	1796,133
PZT5	147	1907,307	1799,7398
PZT6	68	2100,957	1891,052
PZT7	26	2399,355	1662,078
PZT8	188	2169,444	1998,425
PZT9	57	2065,635	1658,905

Na Fig. 6.38 pode-se observar como o algoritmo conseguiu ajustar os sinais de cada um dos estados para o PZT7 (os sinais dos centroides ajustados das demais pastilhas de PZT podem ser encontrados no anexo I).

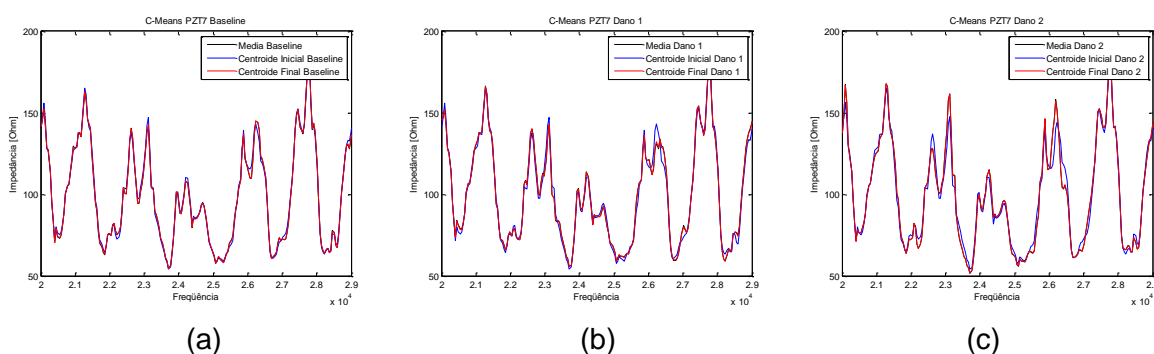


Figura 6.38– Centroides de cada um dos estados do PZT7 da janela da estrutura aeronáutica; Algoritmo *Fuzzy C-mean*

Os graus de pertinência inicial para o algoritmo de Gustafson-Kessel são apresentados na Fig.6.39. Depois de algumas iterações (Tab. 6.24) o algoritmo foi interrompido pela convergência do processo para cada uma das pastilhas de PZT. Pode-se, então, observar os graus de pertinência final conforme mostrados nas Fig. 6.40.

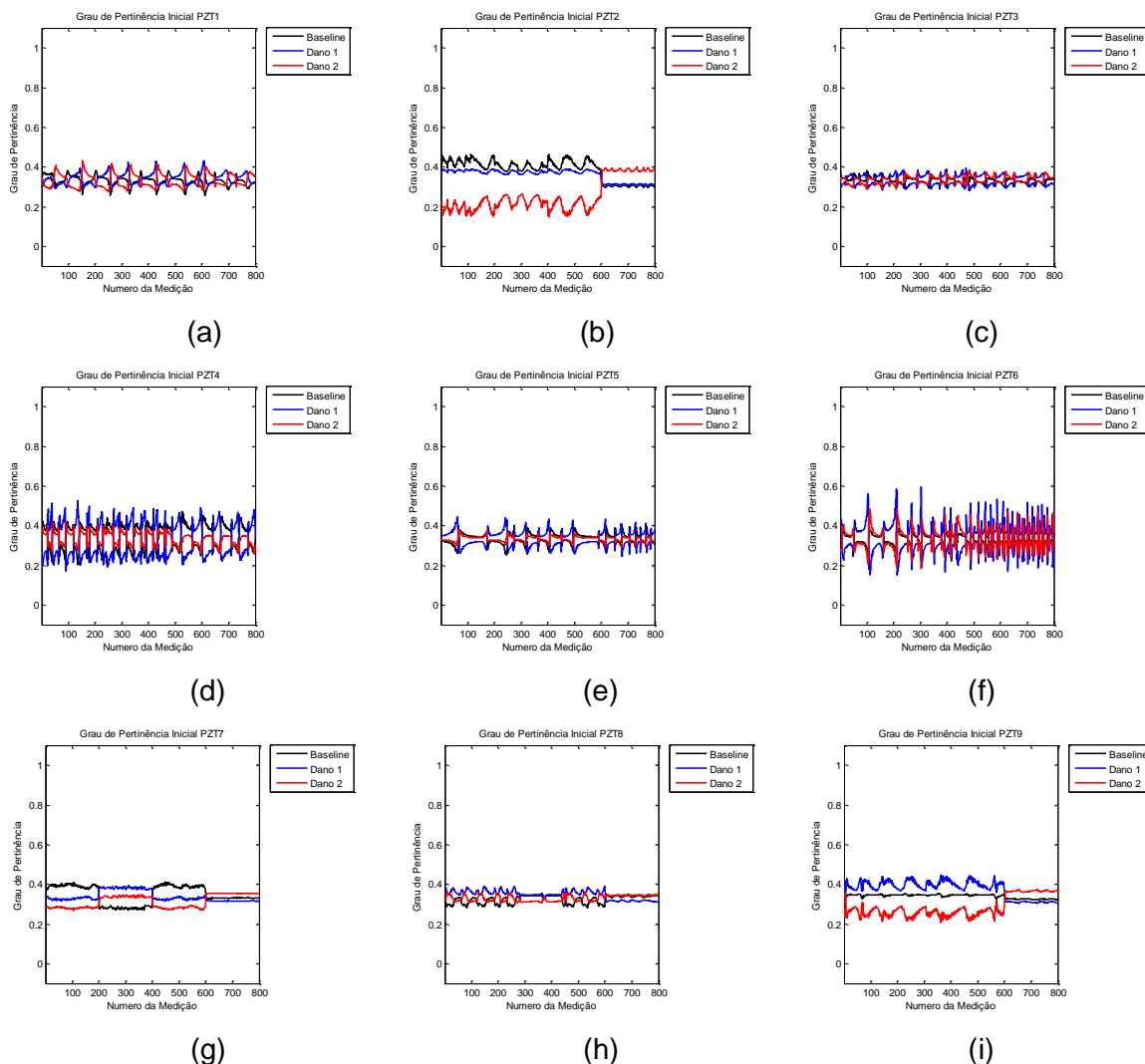


Figura 6.39– Graus de pertinência inicial para a janela da estrutura aeronáutica; Algoritmo de Gustafson-Kessel

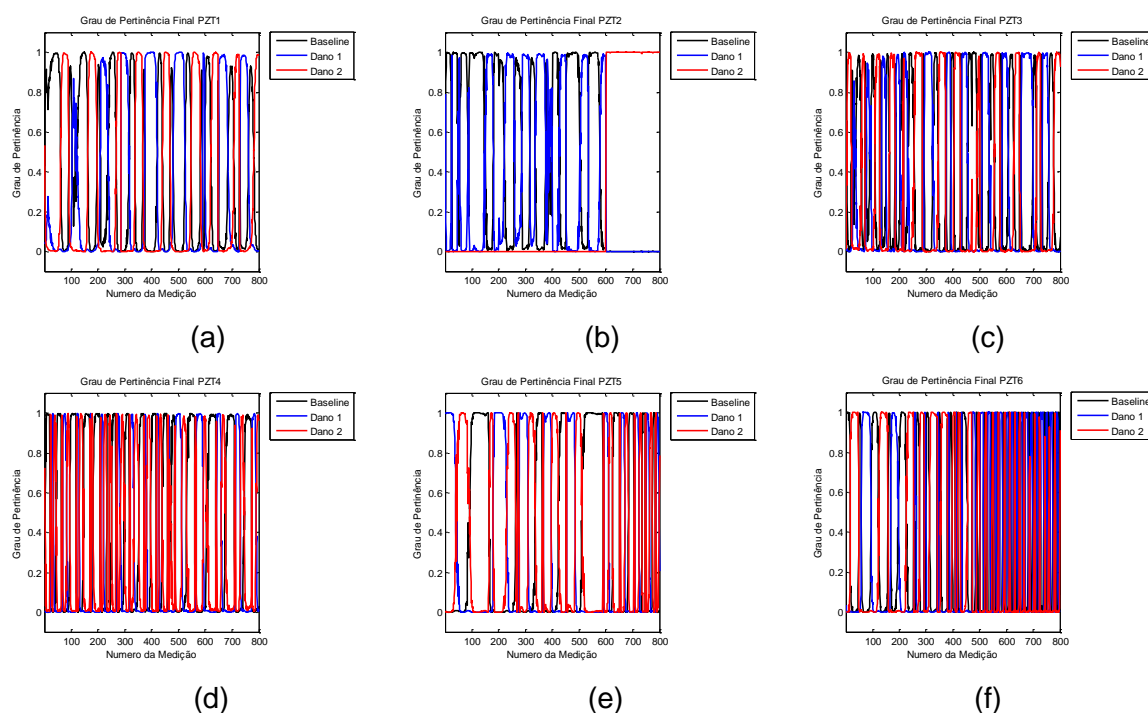
Os resultados do PZT1, do PZT3, do PZT4, do PZT5 e do PZT6 confirmam novamente que estes PZTs não conseguiram enxergar os danos e, assim, a classificação não foi possível devido à posição das pastilhas na estrutura. O PZT2, o PZT8 e o PZT9 classificaram corretamente o Dano 2 com um grau de pertinência de 99%. Entretanto, o Dano1 foi impossível de ser separado do *baseline*. Finalmente, para o PZT7, o algoritmo de Gustafson-Kessel conseguiu classificar corretamente todas as medições com um grau de pertinência superior a 95%, ficando assim claro que este algoritmo é bem mais eficiente que

o algoritmo *Fuzzy C-means* para classificação de danos no método de monitoramento de integridade estrutural baseado na impedância eletromecânica.

Tabela 6.24 – Algoritmo de Gustafson-Kessel; Janela da estrutura aeronáutica

	Iterações	Função Objetivo Inicial	Função Objetivo Final
PZT1	130	107992,545	13922,783
PZT2	44	1951882,844	3723,708
PZT3	112	11418,915	1011,319
PZT4	131	14063,77	1106,733
PZT5	105	73130,147	3914,543
PZT6	83	187017,9	8330,349
PZT7	9	209498,097	1474,566
PZT8	101	71861,057	7189,752
PZT9	40	149831,047	652,42

Na Fig. 6.41 pode-se observar como o algoritmo de Gustafson-Kessel conseguiu ajustar os sinais dos estados para o PZT7 (os sinais dos demais PZTs estão no Anexo I).



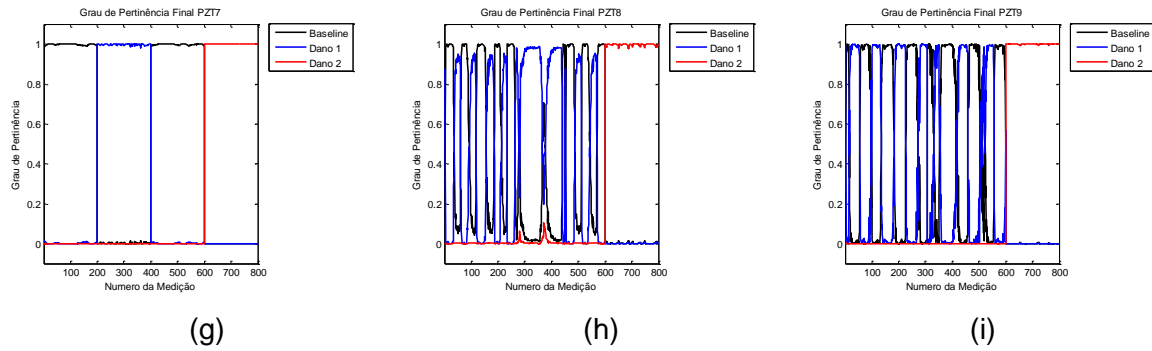


Figura 6.40– Graus de pertinência final para a janela da estrutura aeronáutica; Algoritmo de Gustafson-Kessel

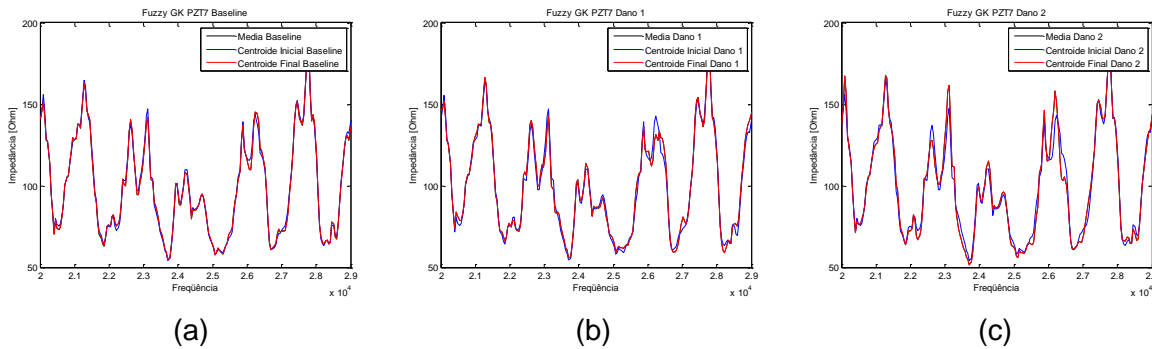


Figura 6.41– Centroides de cada um dos estados do PZT7 da janela da estrutura aeronáutica; Algoritmo de Gustafson-Kessel

6.8. Estudo de Caso #5: Posição do Dano

Outra aplicação das técnicas de inteligência artificial no monitoramento de integridade estrutural baseado na impedância eletromecânica tem a ver com a determinação da posição do dano. Para avaliar este aspecto foram utilizadas duas estruturas simples. A primeira estrutura é uma viga de alumínio de 60x3,2x0,3, com três parafusos, como mostra a Fig. 6.42. As distâncias entre o PZT e os parafusos podem ser observadas na Fig. 6.42(a). Para simular danos incipientes foram removidos os parafusos, um de cada vez, conforme descrito na Tab.6.25.

Duzentas (200) medições foram tomadas para cada um dos estados utilizando o sistema de medição de impedância descrito no capítulo V deste trabalho. Cada sinal foi medido com 200 pontos e a faixa utilizada foi de 20 kHz até 35 kHz. As médias dos sinais medidos para cada estado são apresentadas na Fig. 6.43(a).

Tabela 6.25 - Estados da Viga com Parafusos

No.	Estado	Descrição	No. Medição
1	Baseline	A viga com todos os parafusos	1-200
2	Posição1	A viga sem o PARAFUSO1	201-400
1	Baseline	A viga com todos os parafusos	401-600
3	Posição2	A viga sem o PARAFUSO2	601-800
1	Baseline	A viga com todos os parafusos	801-1000
4	Posição3	A viga sem o PARAFUSO3	1001-1200

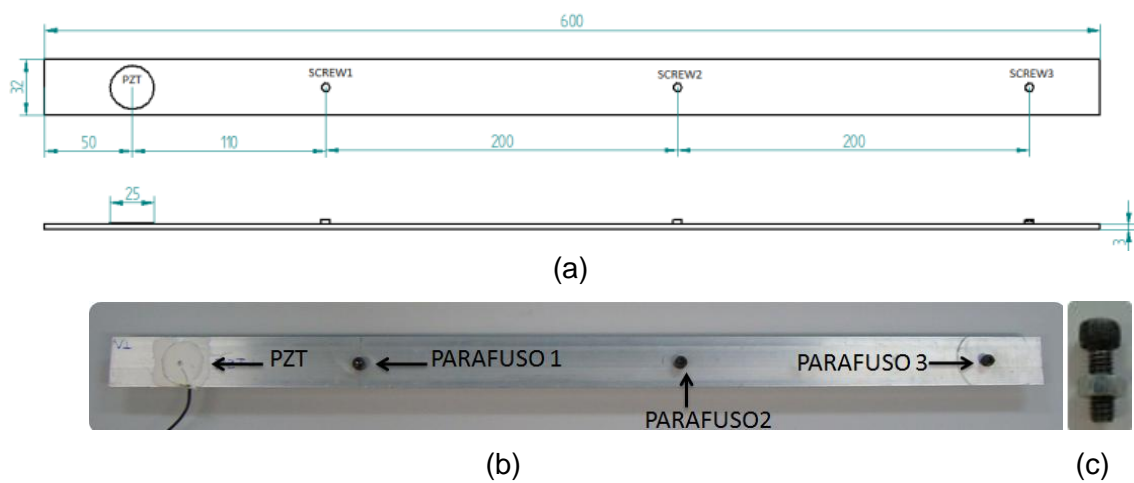


Figura 6.42 - Viga com parafusos

Para quantificar a diferença dos sinais foi utilizada a mesma métrica de dano descrita pelas Eq. (2.19). Os resultados correspondentes são apresentados na Fig. 6.43(b). Pode-se perceber que não é fácil diferenciar a Posição1 da Posição2.

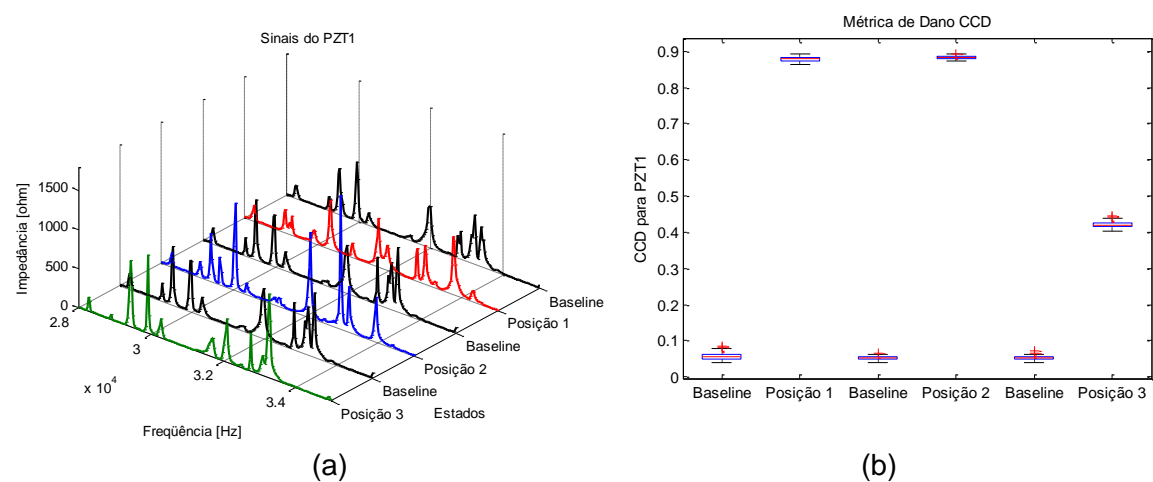


Figura 6.43 – Sinais e métrica de dano da viga com parafusos

Para determinar a posição dos danos simulados, os sinais de impedância medidos na viga foram utilizados primeiramente como sendo as entradas de uma rede neural probabilística. A descrição da rede e dos conjuntos de treinamento e de teste da rede pode ser observada na Tab. 6.26. Semelhantemente ao caso anterior, 90% das medições foram usadas para treinar a rede e as outras 10% foram usadas para testar a rede.

Tabela 6.26 – Rede Neural Probabilística para localização de dano

Camada	Numero de Neurônios			
Entrada	190			
Padrões	760			
Soma	4			
Saída	1			
	Baseline	Posição1	Posição 2	Posição3
Conjunto de treinamento	540	180	180	180
Conjunto de Teste	60	20	20	20

Os resultados para o conjunto de teste da viga com parafusos são apresentados na Tab. 6.27. A porcentagem de erro para a localização de dano foi de 0,83%, sendo esta porcentagem menor que as obtidas nos casos anteriores. Isto se deve, provavelmente, ao fato dos sinais analisados apresentarem-se mais estáveis (conforme caracterizados por um desvio padrão pequeno, Fig. 6.43(b)).

Tabela 6.27 – Resultados do Conjunto de Teste da Rede Neural Probabilística para a viga com parafusos

	PZT		Total
	✓	X	
Baseline	60	0	60
Posição1	20	0	20
Posição2	20	0	20
Posição3	19	1	20
Erro %	0,83%		

Tendo avaliado a rede neural probabilística para a posição do dano, a seguir são apresentados os resultados obtidos com a análise de cluster. Na Fig. 6.44(a) pode-se observar o grau de pertinência de cada medição para cada estado considerado (*baseline*, Posição1, Posição2 e Posição3) para a pastilha de PZT quando o algoritmo C-means é

inicializado. Depois de 21 iterações (Tab. 6.28) o algoritmo foi interrompido pela convergência do processo. Pode-se, então, observar os graus de pertinência final conforme mostrados nas Fig. 6.44(b). Todos os sinais foram classificados corretamente (Ver Tab.6.27) com uma porcentagem superior a 85%, à exceção das 100 primeiras medições que ficaram com graus de pertinência por volta de 50%.

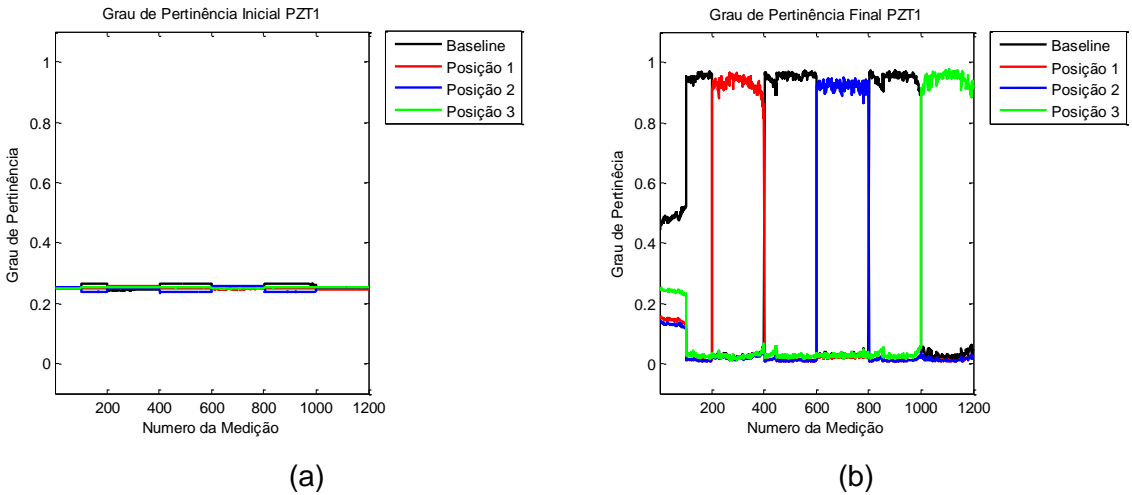
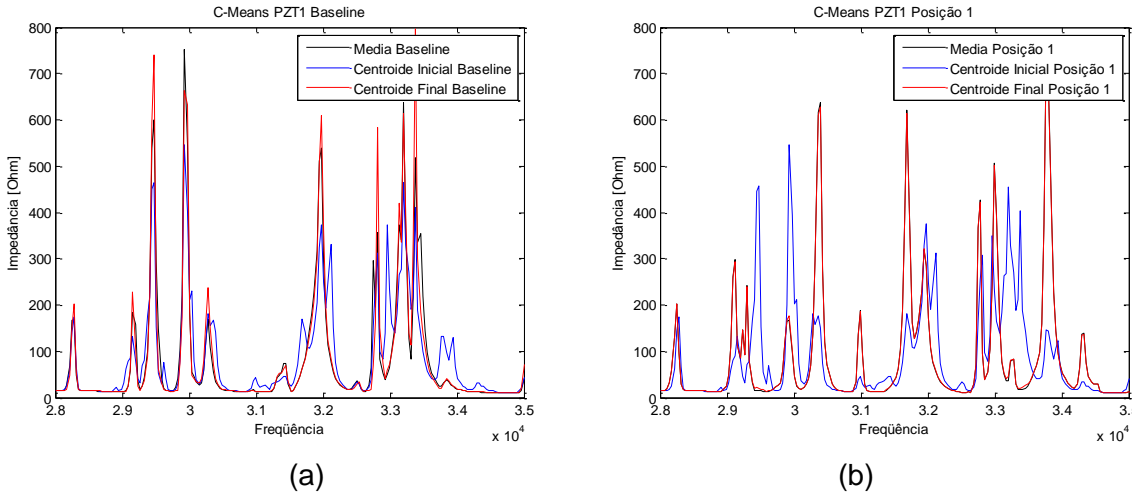


Figura 6.44 – Graus de pertinência da pastilha de PZT da viga com parafusos; Algoritmo C-means

Tabela 6.28 – Algoritmo *Fuzzy* C-means; viga com parafusos

	Iterações	Função Objetivo Inicial	Função Objetivo Final
PZT1	21	4602,891	1585,699

Na Fig. 6.45 pode-se observar como o algoritmo conseguiu ajustar os sinais de cada um dos estados para a pastilha de PZT colada na viga com parafusos.



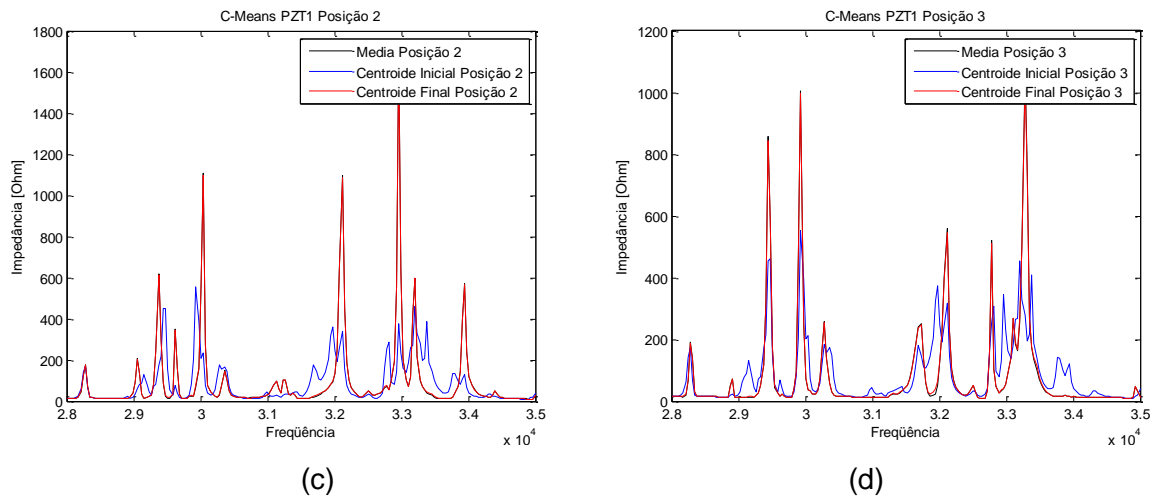


Figura 6.45– Centroides de cada um dos estados do PZT da viga com parafusos; Algoritmo *Fuzzy C-means*

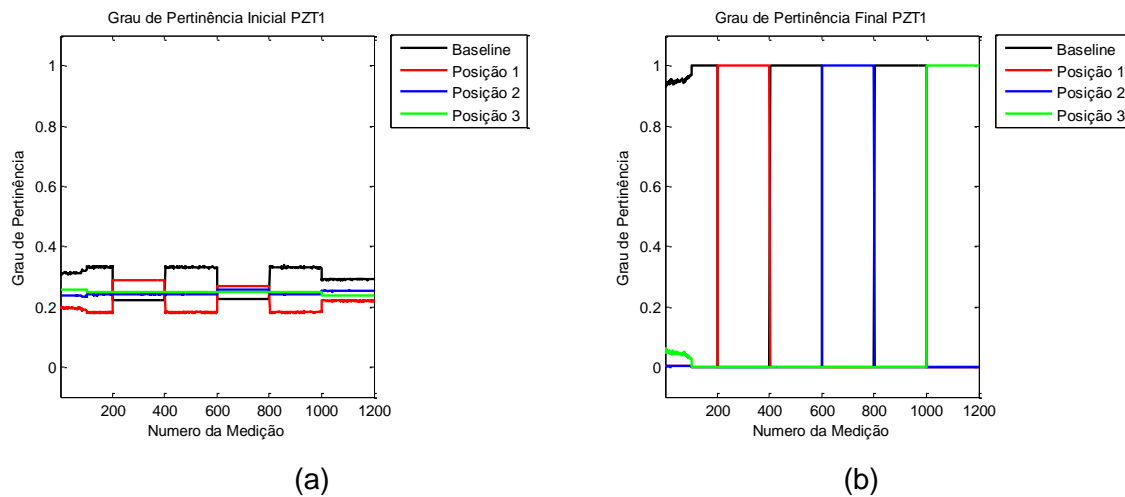


Figura 6.46 – Graus de pertinência para a viga com parafusos; Algoritmo de Gustafson-Kessel

Os graus de pertinência inicial para o algoritmo de Gustafson-Kessel são apresentados na Fig.6.46(a). Depois de 16 iterações (Tab. 6.29) o algoritmo foi interrompido pela convergência do processo. Pode-se, então, observar os graus de pertinência final conforme mostrados nas Fig. 6.46(b). Todos os sinais foram classificados corretamente (ver Tab.6.25) com um percentual superior a 95%.

Tabela 6.29 – Algoritmo de Gustafson-Kessel; viga com parafusos

	Iterações	Função Objetivo Inicial	Função Objetivo Final
PZT1	16	2317563,749	16909,296

Na Fig. 6.47 pode-se observar como o algoritmo de Gustafson-Kessel conseguiu ajustar os sinais dos estados para a pastilha de PZT colada na viga estudada.

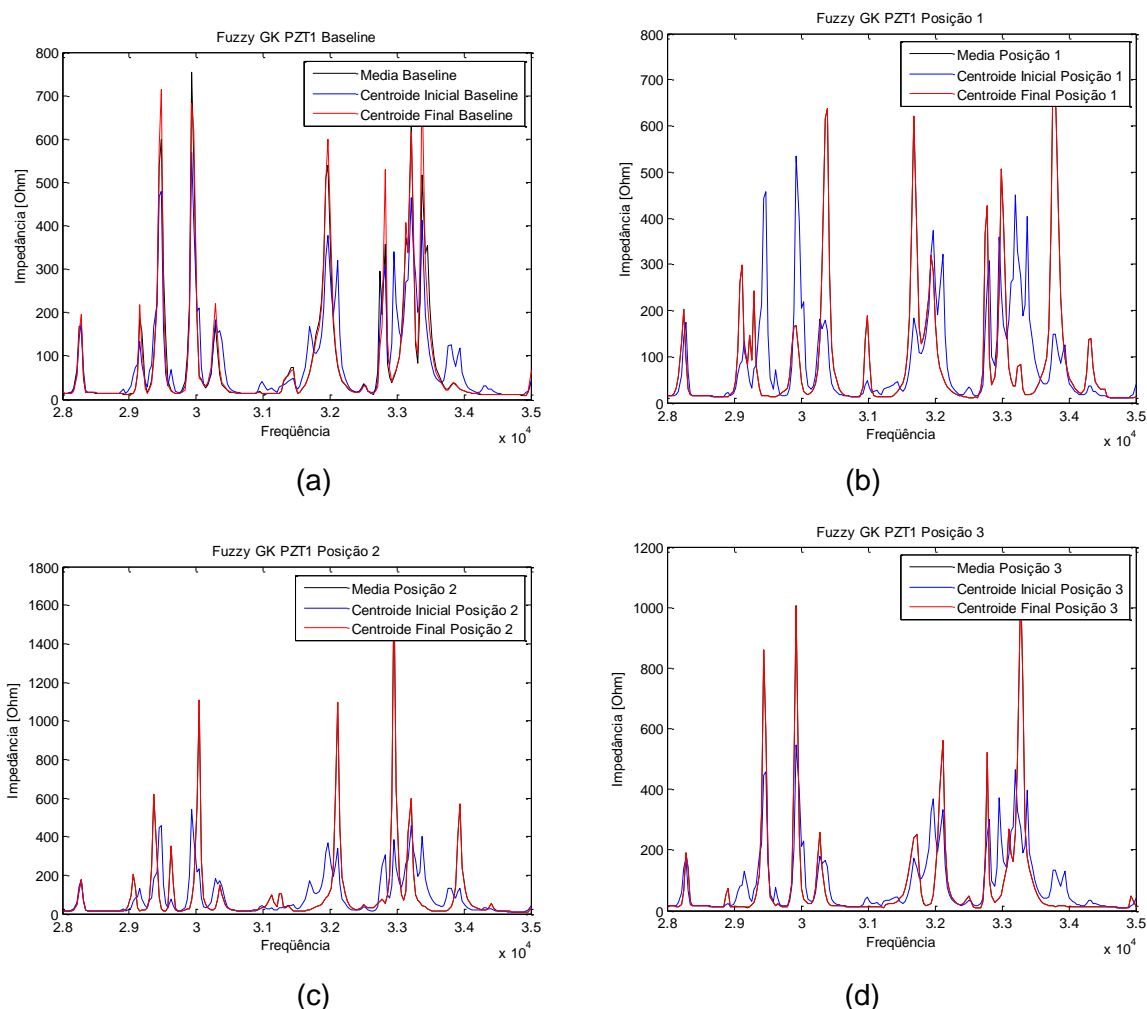


Figura 6.47– Centroides de cada um dos estados do PZT7 da viga com parafusos; Algoritmo de Gustafson-Kessel

A segunda estrutura utilizada para avaliar as técnicas de inteligência artificial no monitoramento de integridade estrutural baseado na impedância eletromecânica para detectar posição do dano foi uma placa de alumínio de 100 x 100 x 3cm, conforme ilustrado na Fig. 6.48(a) e (b). Para simular um dano foi adicionada uma pequena massa em três posições diferentes como mostram as Fig. 48(c), (d) e (f) (ver Tab. 6.30). Duzentas (200) medições foram tomadas para cada um dos estados, utilizando o sistema de medição de impedância descrito no capítulo V deste trabalho. Neste caso foram utilizados todos os canais do referido sistema. Cada sinal medido tinha 200 pontos.

Tabela 6.30 - Estados da placa com 16 PZTs

No.	Estado	Descrição	No. Medição
1	Baseline	Placa sem massa	1-200
2	Posição1	Placa com massa na Posição1	201-400
1	Baseline	Placa sem massa	401-600
3	Posição2	Placa com massa na Posição2	601-800
1	Baseline	Placa sem massa	801-1000
4	Posição3	Placa com massa na Posição3	1001-1200

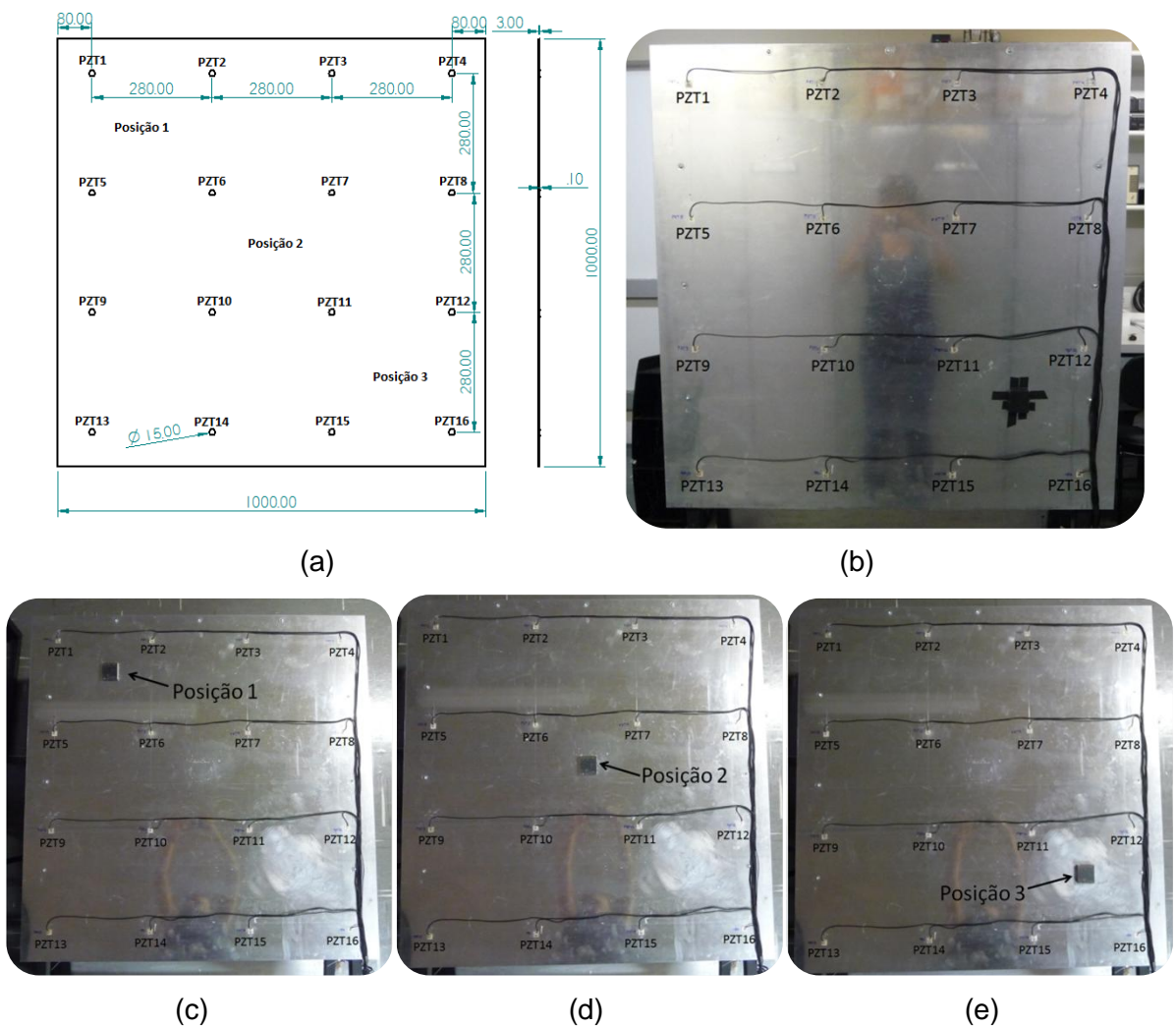
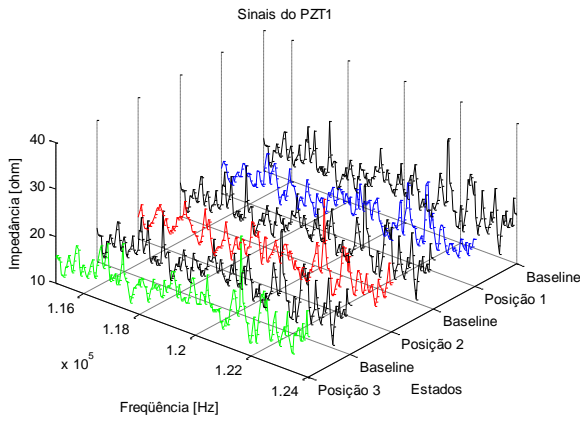
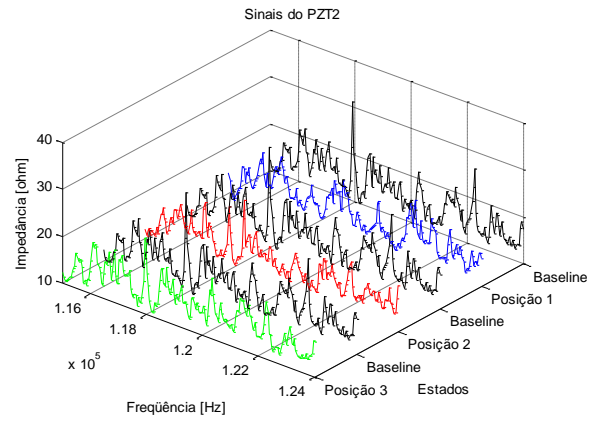


Figura 6.48–Placa com 16 pastilhas de PZT

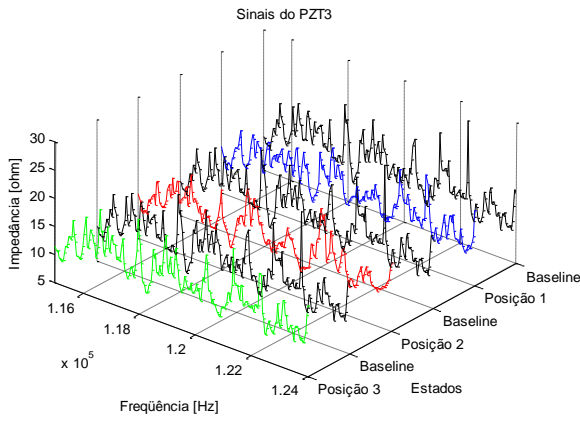
As médias dos sinais medidos para cada estado são apresentadas na Fig. 6.49 (a). Para quantificar a diferença dos sinais foi utilizada a mesma métrica de dano descrita pelas Eq. (2.19) (ver Fig. 6.50). Pode-se observar que não é fácil diferenciar a Posição1 da Posição2. A Posição 3 apresenta um desvio padrão considerável para vários dos PZTs.



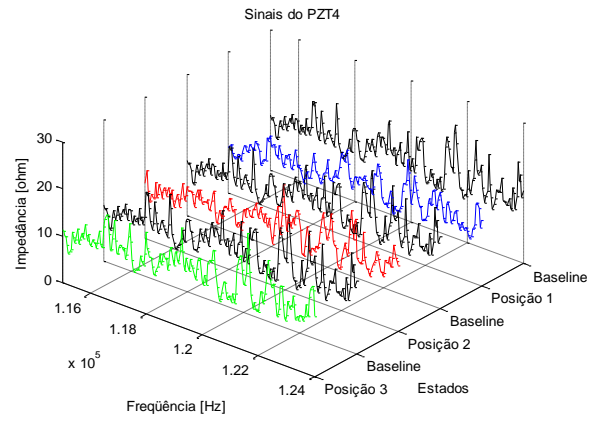
(a)



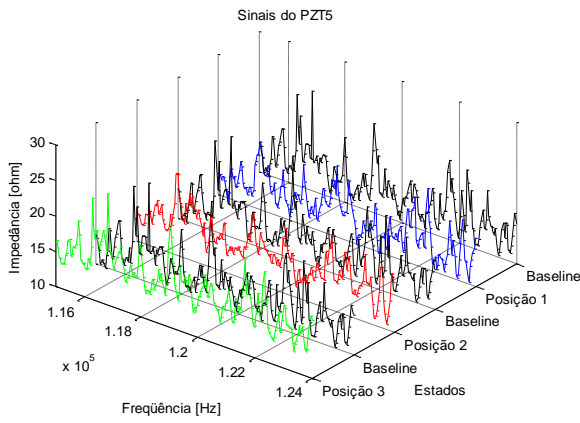
(b)



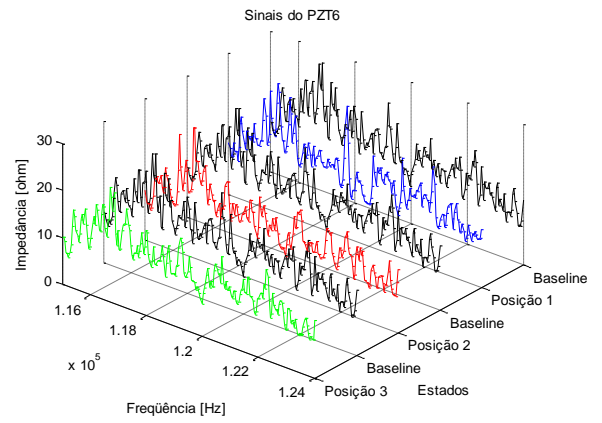
(c)



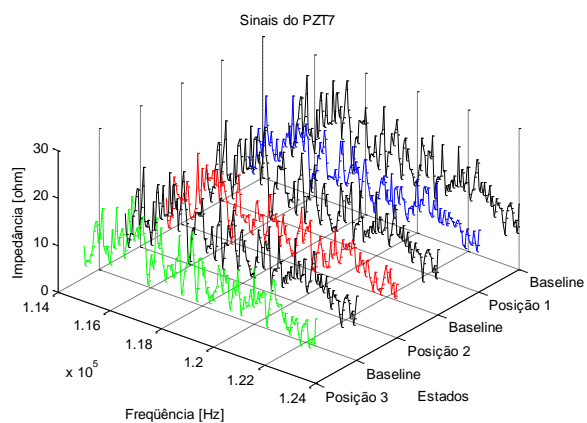
(d)



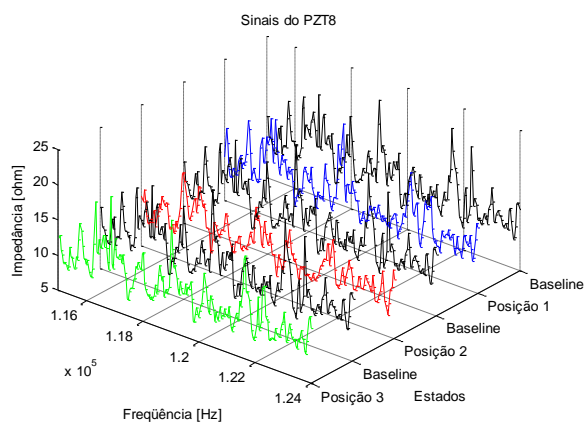
(e)



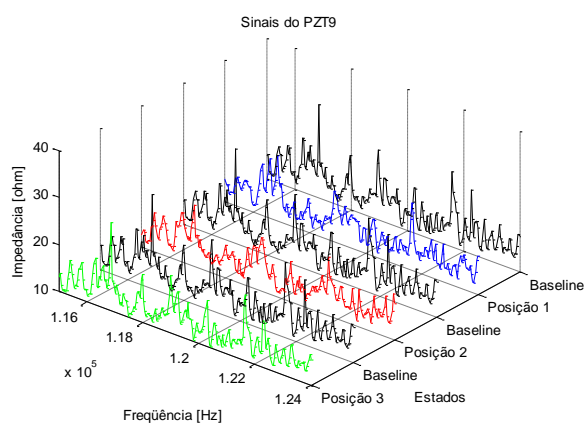
(f)



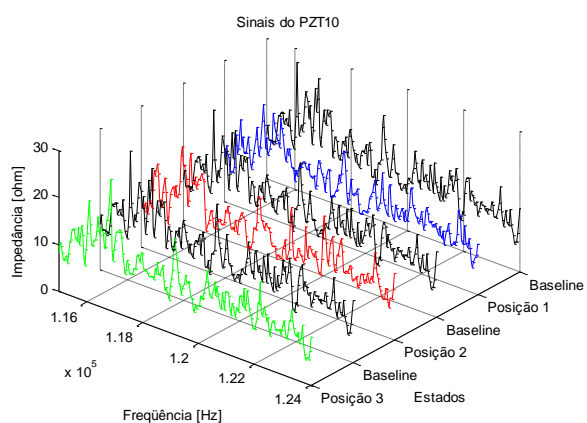
(g)



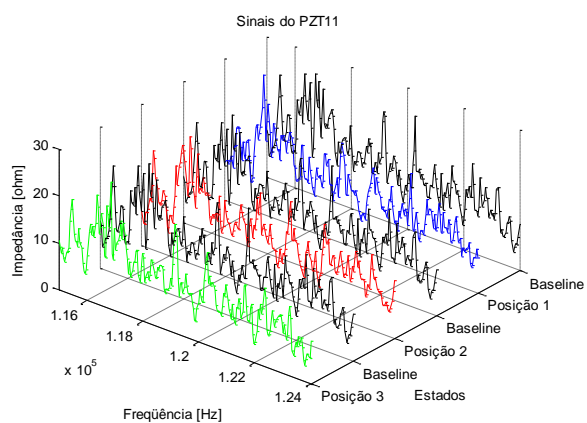
(h)



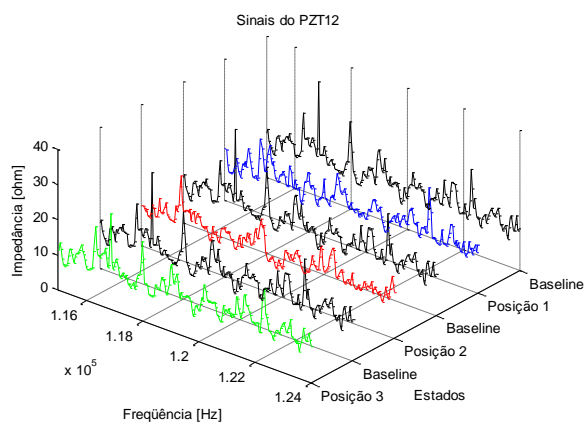
(i)



(j)



(k)



(l)

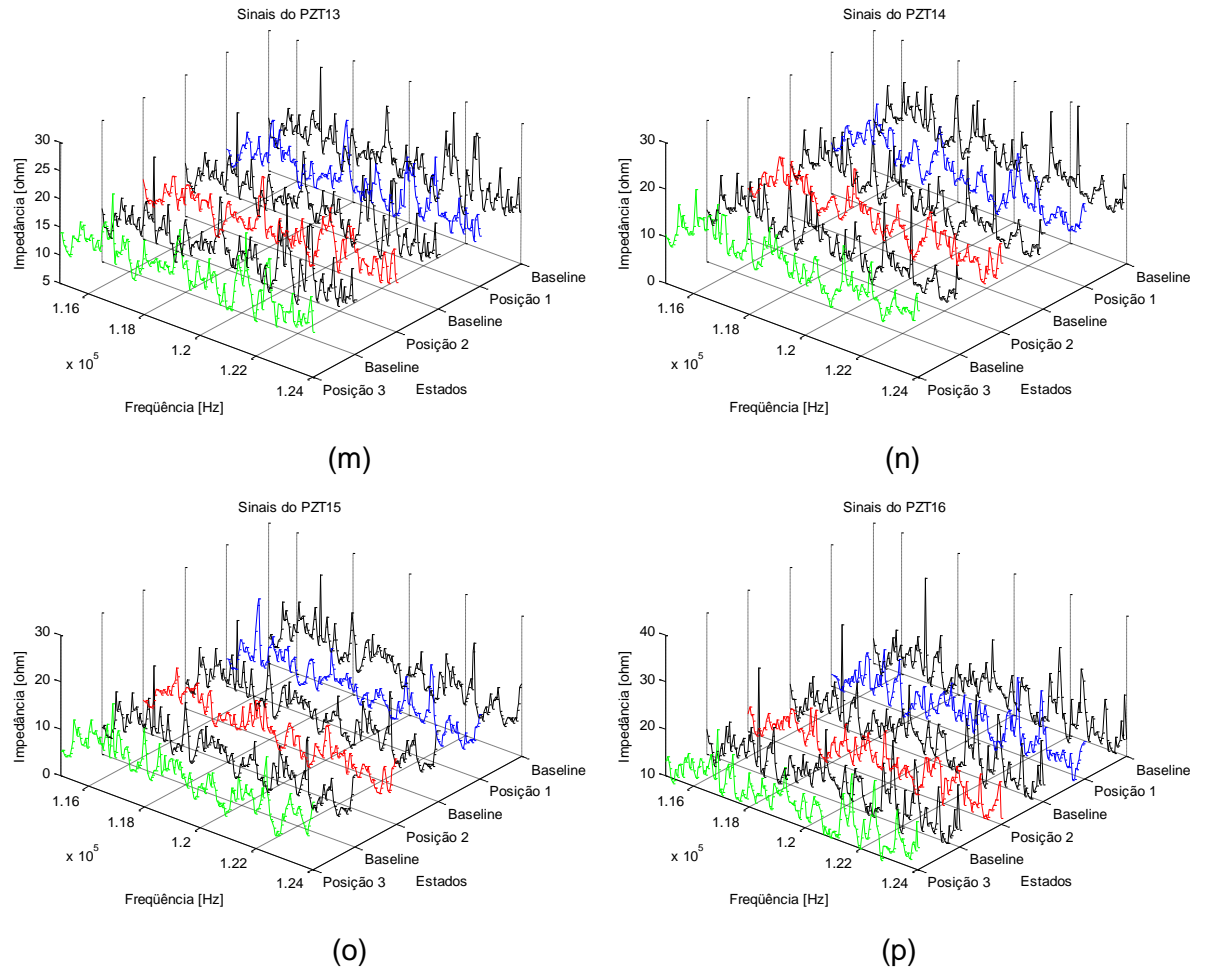
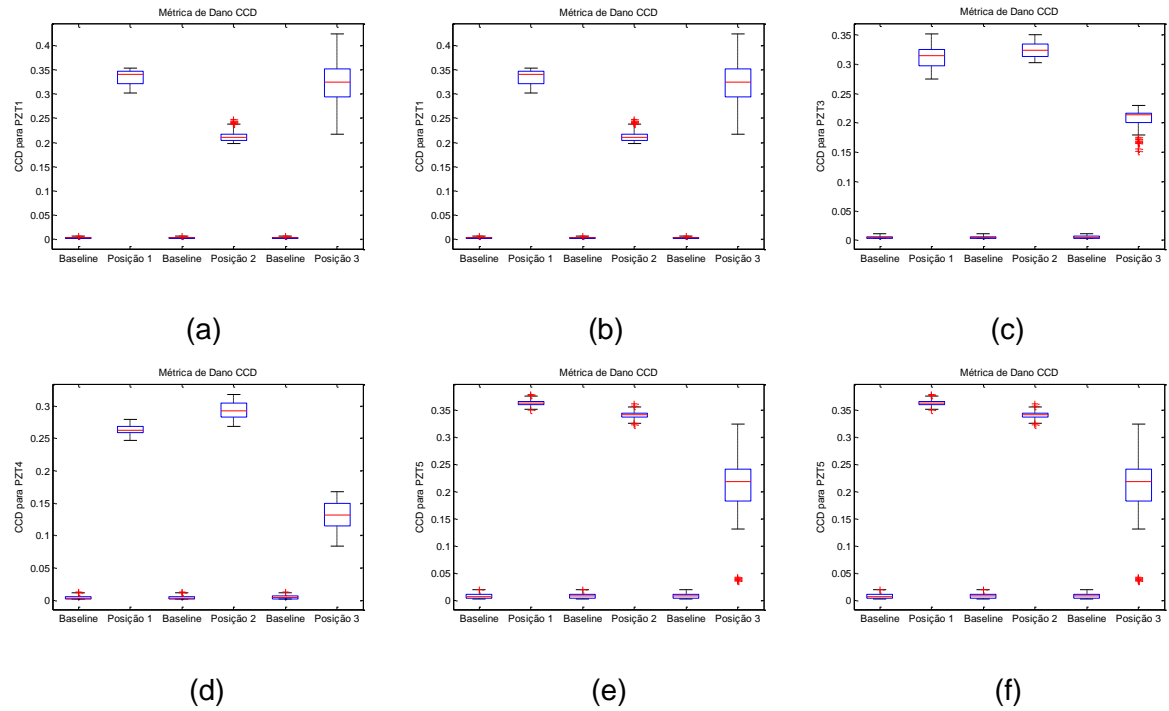


Figura 6.49 – Sinais de impedância; placa com 16 pastilhas de PZT



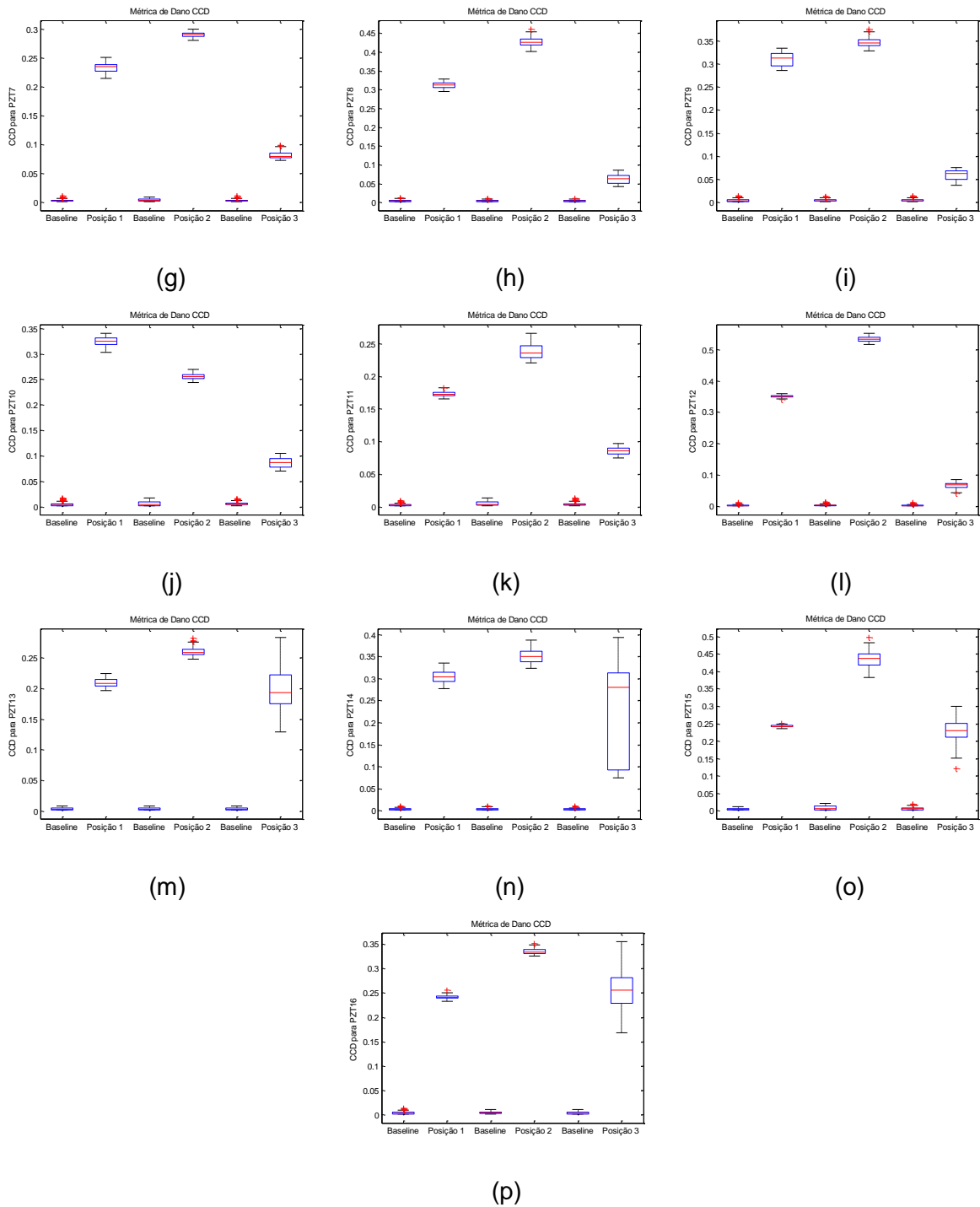


Figura 6.50 – Métrica de dano CCD para a placa com 16 pastilhas de PZT

Para determinar a posição dos danos simulados, os sinais de impedância medidos na placa foram utilizados primeiramente como sendo as entradas de 16 redes neurais probabilísticas, uma rede para cada uma das pastilhas de PZT. A descrição das redes e dos conjuntos de treinamento e teste da mesma pode ser observada na Tab. 6.26.

Semelhantemente ao caso anterior, 90% das medições foram usadas para treinar a rede e as outras 10% foram usadas para testar a rede.

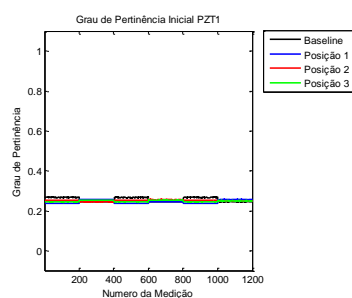
Os resultados para o conjunto de teste da viga com parafusos são apresentados na Tab. 6.31. A porcentagem de erro para a localização de dano foi de 0% para o PZT3; já o PZT6, o PZT7, o PZT9, o PZT10, o PZT11 e o PZT12 foram capazes de classificar corretamente todos os sinais. O PZT1, o PZT2, o PZT5 e o PZT8 tiveram erro inferior a 3.75%, como nos casos anteriores. Finalmente, tem-se que o PZT4, o PZT13, o PZT14, o PZT15 e o PZT16 que tiveram porcentagens de erro entre 4% e 8%, no presente caso apontou para um erro na posição 3, ou seja, aquela que exibe um valor maior para o desvio padrão (ver Fig. 6.50).

Tabela 6.31 – Classificação do Conjunto de Teste das Redes Neurais Probabilísticas para cada pastilha de PZT da placa com 16 PZTs

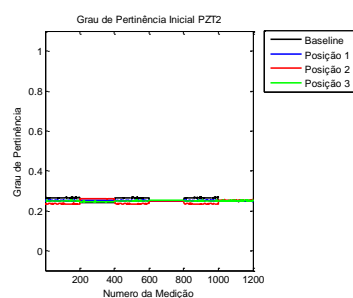
		Baseline	Posição 1	Posição 2	Posição 3	Erro%
PZT1	✓	60	20	20	16	3,33%
	X	0	0	0	4	
Total		60	20	20	20	
PZT2	✓	60	20	20	18	1,67%
	X	0	0	0	2	
Total		60	20	20	20	
PZT3	✓	60	20	20	20	0%
	X	0	0	0	0	
Total		60	20	20	20	
PZT4	✓	60	16	20	15	7,5%
	X	0	4	0	5	
Total		60	20	20	20	
PZT5	✓	60	20	20	18	1,67%
	X	0	0	0	2	
Total		60	20	20	20	
PZT6	✓	60	20	20	20	0%
	X	0	0	0	0	
Total		60	20	20	20	
PZT7	✓	60	20	20	20	0%
	X	0	0	0	0	
Total		60	20	20	20	

		Baseline	Posição 1	Posição 2	Posição 3	Erro%
PZT8	✓	60	20	17	20	2,5%
	X	0	0	3	0	
Total		60	20	20	20	
PZT9	✓	60	20	20	20	0%
	X	0	0	0	0	
Total		60	20	20	20	
PZT10	✓	60	20	20	20	0%
	X	0	0	0	0	
Total		60	20	20	20	
PZT11	✓	60	20	20	20	0%
	X	0	0	0	0	
Total		60	20	20	20	
PZT12	✓	60	20	20	20	0%
	X	0	0	0	0	
Total		60	20	20	20	
PZT13	✓	60	20	20	14	5%
	X	0	0	0	6	
Total		60	20	20	20	
PZT14	✓	60	20	20	15	4,17%
	X	0	0	0	5	
Total		60	20	20	20	
PZT15	✓	60	20	20	12	6,66%
	X	0	0	0	8	
Total		60	20	20	20	
PZT16	✓	60	20	20	11	7,5%
	X	0	0	0	9	
Total		60	20	20	20	

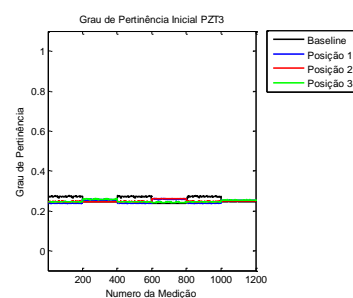
A seguir serão apresentados os resultados obtidos com a análise de cluster. Na Fig. 6.51 mostra-se o grau de pertinência de cada medição para cada estado considerado (*baseline*, Posição1, Posição2 e Posição3) quando o algoritmo C-means é inicializado.



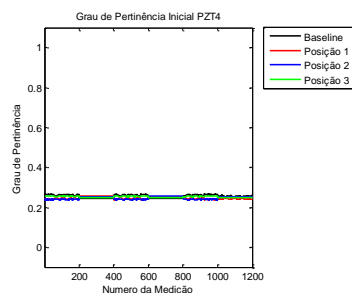
(a)



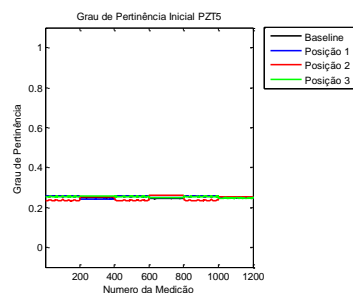
(b)



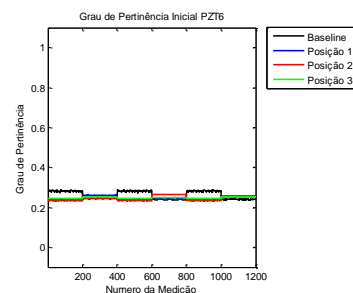
(c)



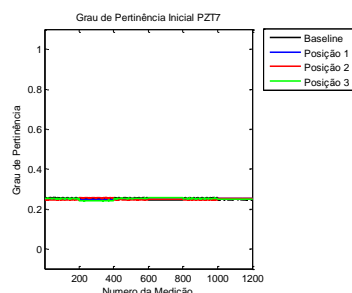
(d)



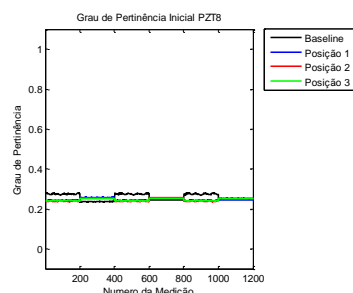
(e)



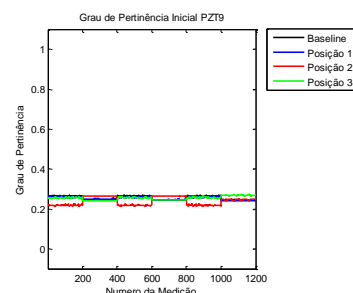
(f)



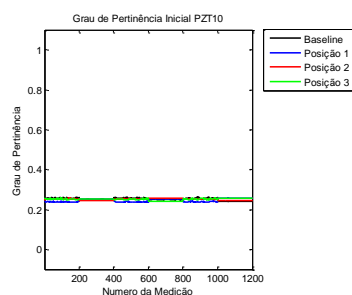
(g)



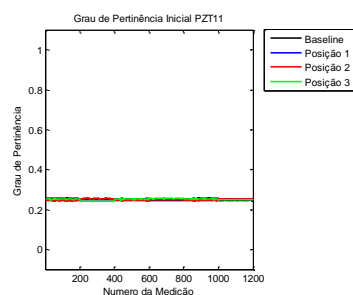
(h)



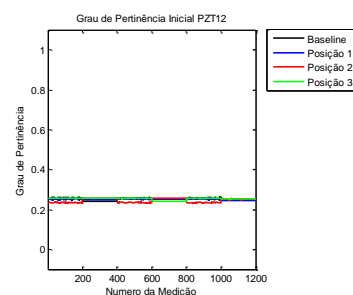
(i)



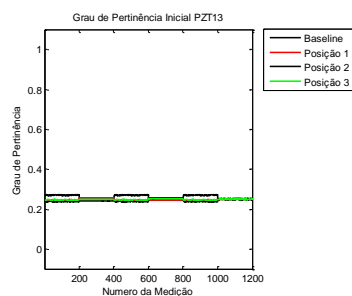
(j)



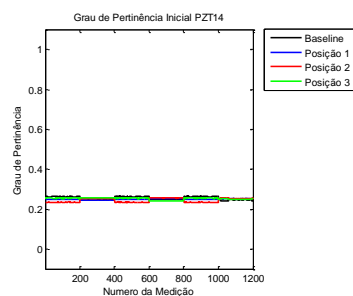
(k)



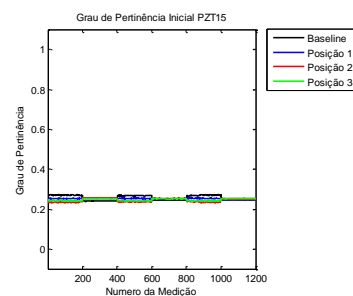
(l)



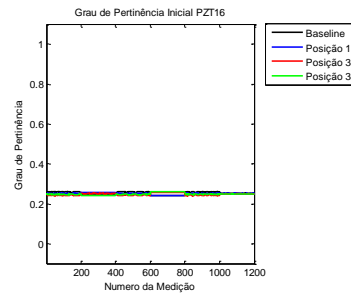
(m)



(n)



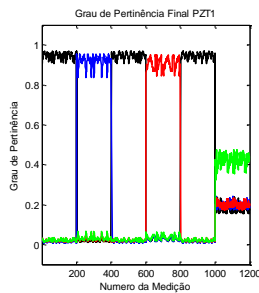
(o)



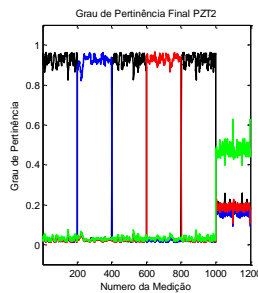
(p)

Figura 6.51 – Graus de pertinência inicial para a placa com 16 PZTs; Algoritmo *Fuzzy C-means*

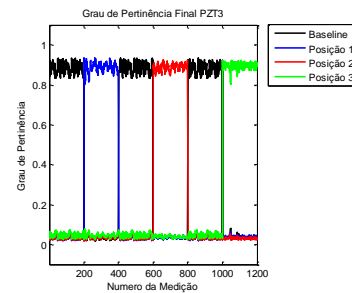
Depois de várias iterações (Tab. 6.32) o algoritmo foi interrompido pela convergência do processo. Pode-se, então, observar os graus de pertinência final conforme mostrados nas Fig. 6.52.



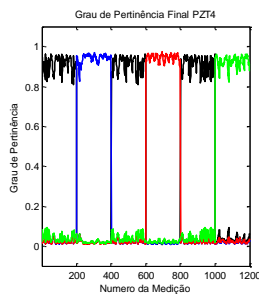
(a)



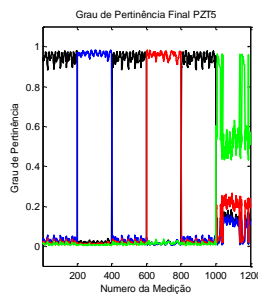
(b)



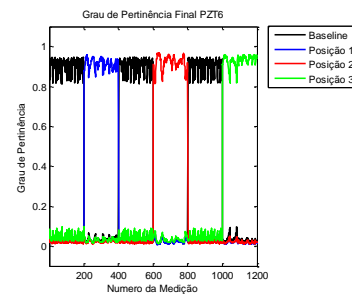
(c)



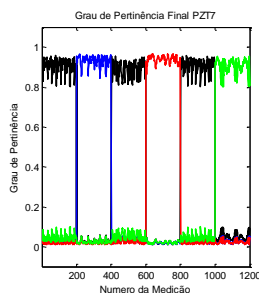
(d)



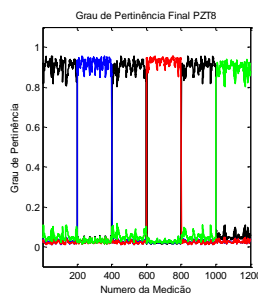
(e)



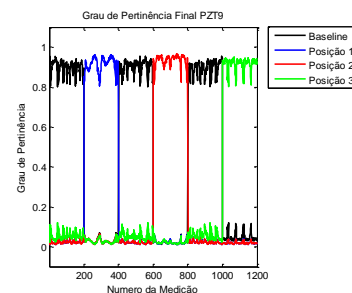
(f)



(g)



(h)



(i)

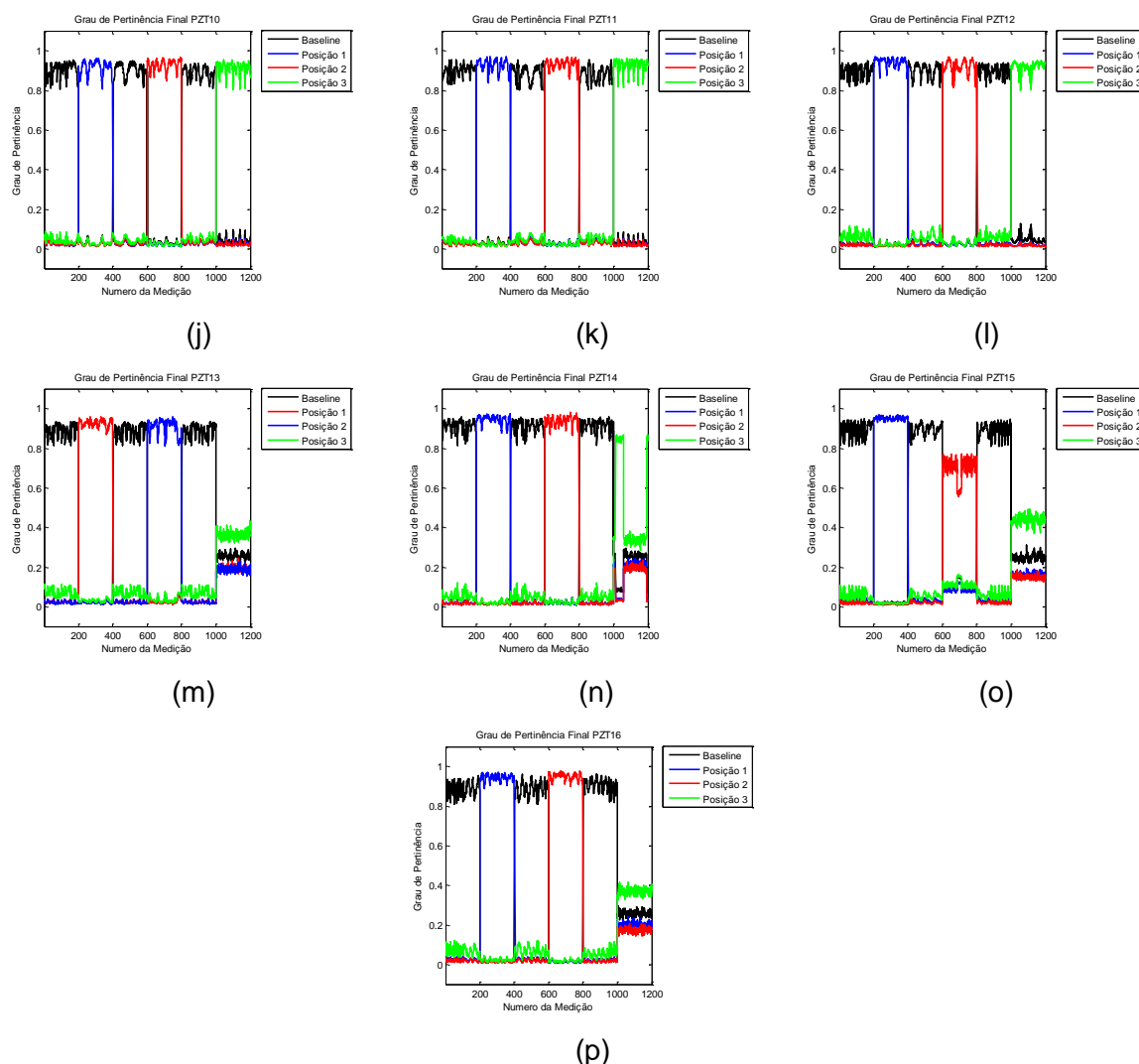


Figura 6.52 – Graus de pertinência inicial para a placa com 16 pastilhas de PZT; Algoritmo *Fuzzy C-means*

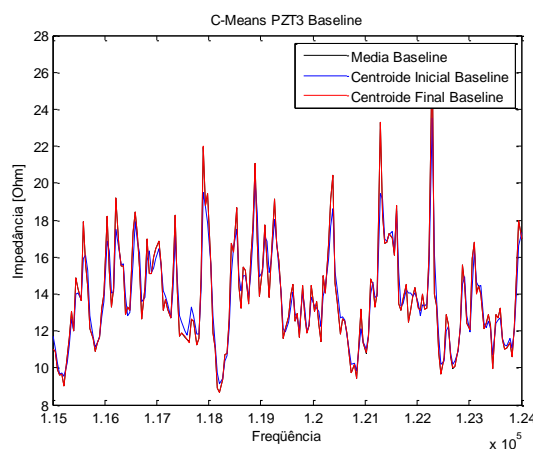
Todos os sinais foram classificados corretamente (ver Tab. 6.30) para todos os PZTs. O PZT3, o PZT4, o PZT6, o PZT7, o PZT8, o PZT9, o PZT10, o PZT11 e o PZT12 classificaram corretamente as medições com porcentagens de pertinência superiores a 80%. Já os demais PZTs apresentaram dificuldade de classificar a Posição 3 com grau de pertinência elevado, uma vez que as medições apresentavam um desvio padrão muito elevado (ver. Fig.6.50).

Na Fig. 6.53 pode-se observar como o algoritmo conseguiu ajustar os sinais de cada um dos estados para o PZT3 (os demais centroides ajustados para as várias pastilhas de PZT podem ser encontrados no anexo I).

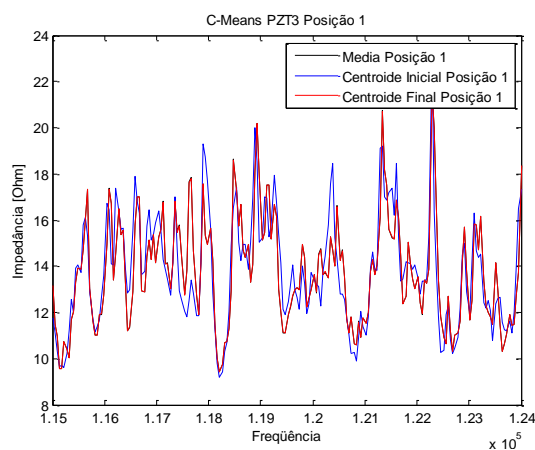
Tabela 6.32 – Algoritmo *Fuzzy C-means*; placa com 16 pastilhas de PZT

	Iterações	Função Objetivo Inicial	Função Objetivo Final
PZT1	20	1721,636	949,207
PZT2	22	1957,846	1067,841
PZT3	18	35,95,884	1437,382
PZT4	19	4075,039	1125,616
PZT5	21	1861,898	817,356
PZT6	18	3721,285	1170,974
PZT7	20	3898,269	1192,978
PZT8	20	3849,552	1214,925
PZT9	21	3767,825	1181,634
PZT10	23	3686,785	1243,099
PZT11	21	3833,162	1268,973
PZT12	24	3927,45	1110,932
PZT13	28	1120,962	704,111
PZT14	33	1049,852	594,197
PZT15	28	1543,747	1052,829
PZT16	25	1141,233	689,866

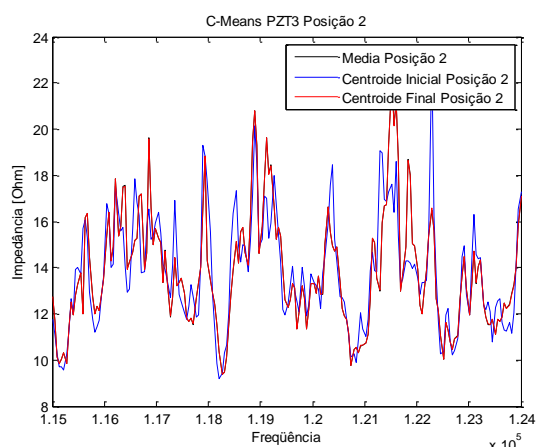
Os graus de pertinência inicial para o algoritmo de Gustafson-Kessel são apresentados na Fig.6.54. Depois de várias iterações (Tab. 6.33) o algoritmo foi interrompido pela convergência do processo. Pode-se, então, observar os graus de pertinência final, mostrados nas Fig. 6.55. Todos os sinais foram classificados corretamente (ver Tab. 6.30) para todas as pastilhas de PZT.



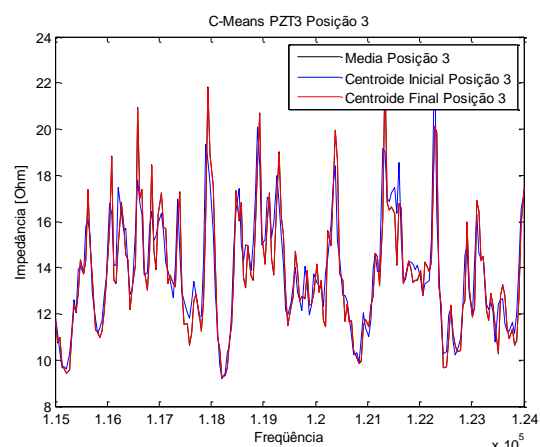
(a)



(b)

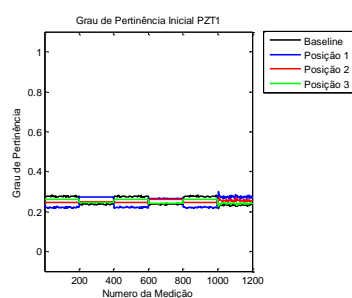


(c)

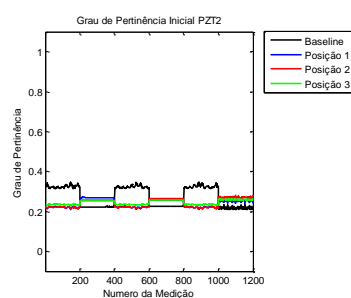


(d)

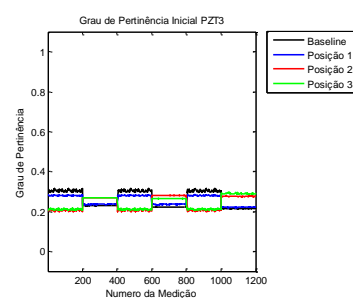
Figura 6.53– Centroides de cada um dos estados do PZT3 da placa com 16 PZTs; Algoritmo Fuzzy C-means



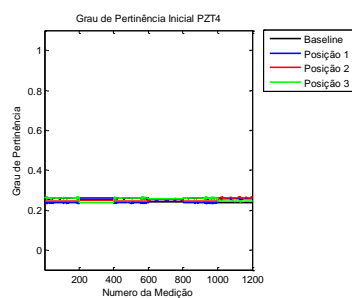
(a)



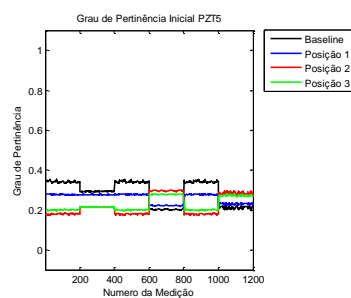
(b)



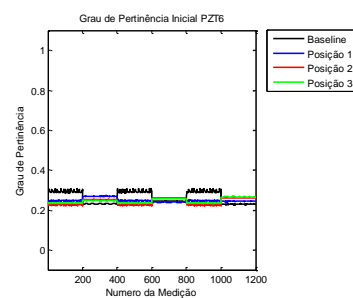
(c)



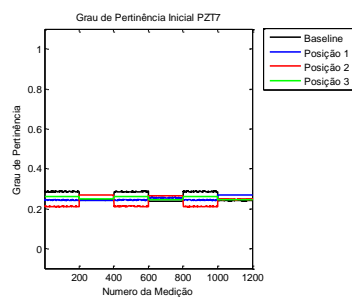
(d)



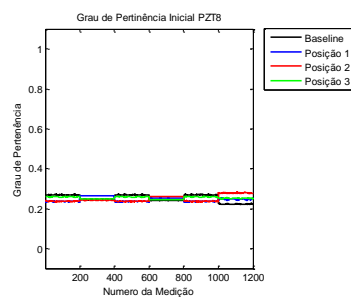
(e)



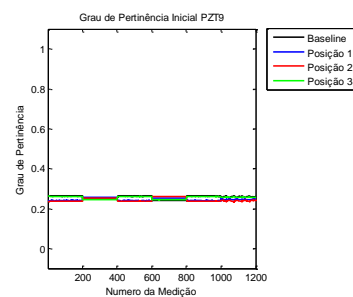
(f)



(g)



(h)



(i)

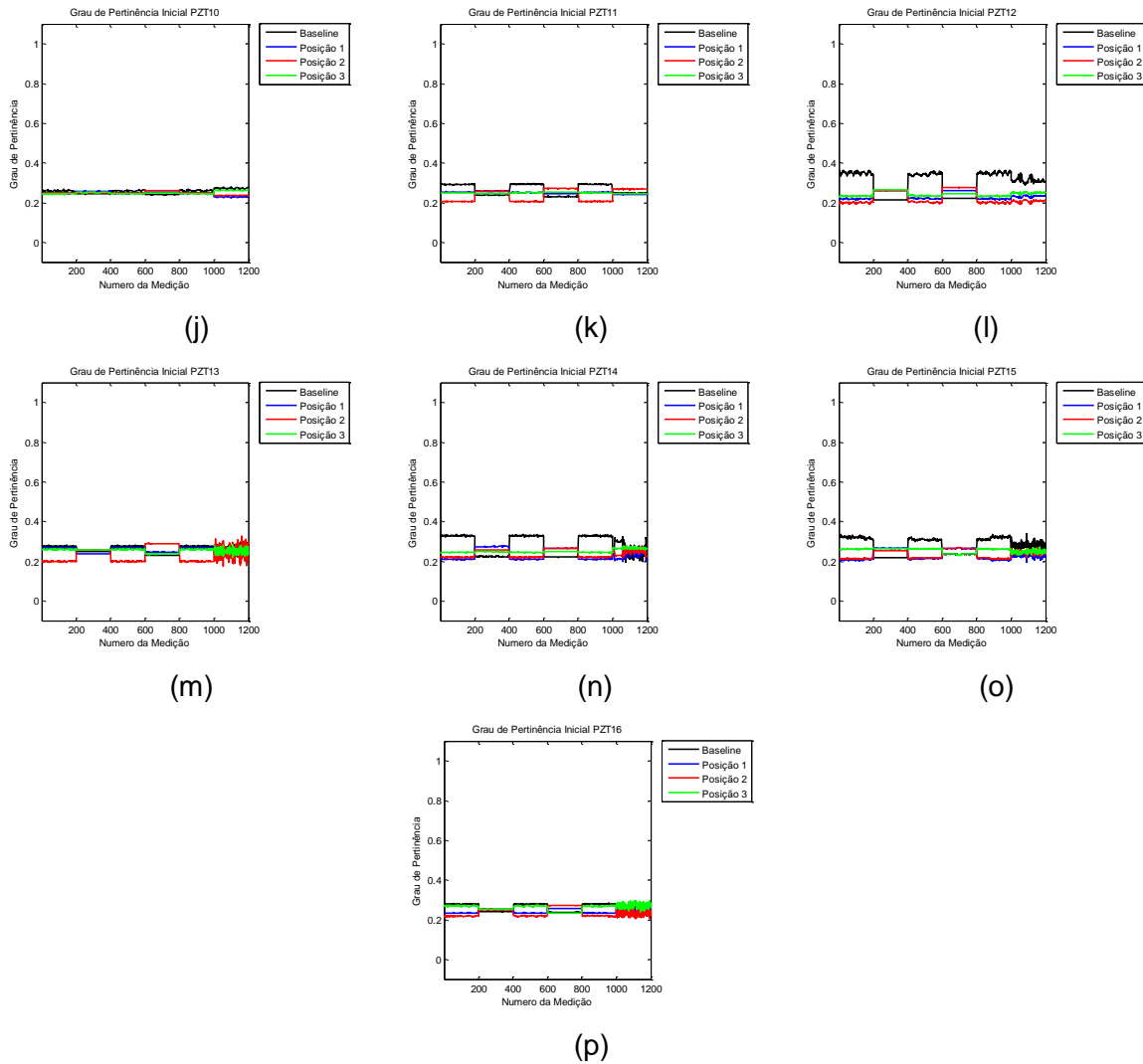
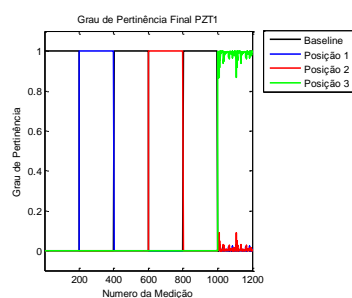
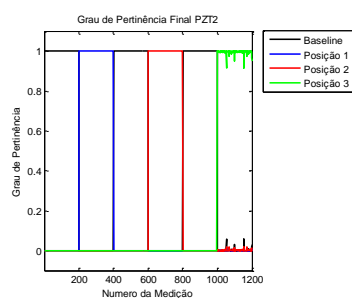


Figura 6.54– Graus de pertinência inicial para a placa com 16 pastilhas de PZT; Algoritmo de Gustafson-Kessel

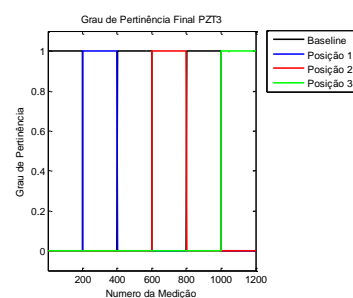
O PZT3, o PZT4, o PZT6, o PZT7, o PZT8, o PZT9, o PZT10, o PZT11 e o PZT12 classificaram corretamente as medições com porcentagens de pertinência iguais a 100%. Já as demais pastilhas de PZT conseguiram classificar o *baseline*, a Posição 1 e a Posição 2 com porcentagem superior a 95%. A Posição 3 obteve graus de pertinência da ordem de 80%.



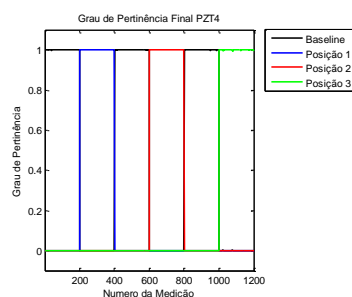
(a)



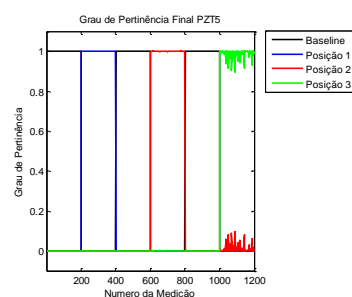
(b)



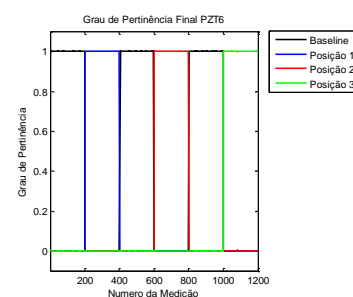
(c)



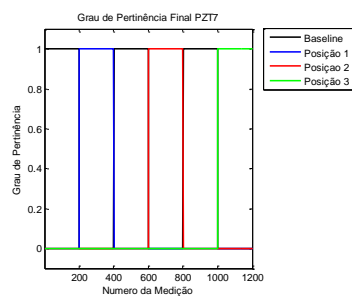
(d)



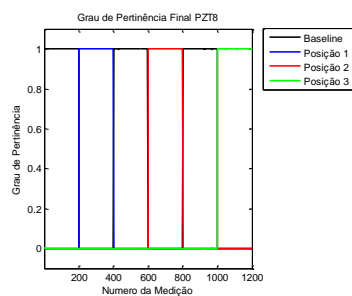
(e)



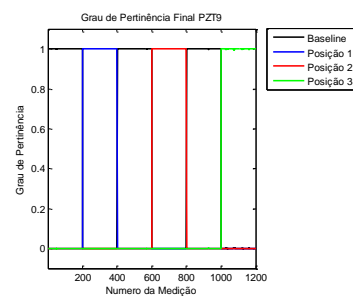
(f)



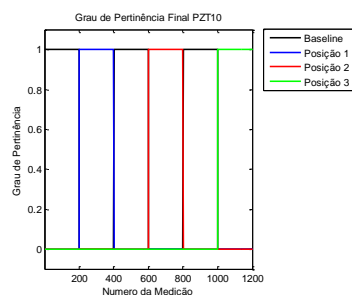
(g)



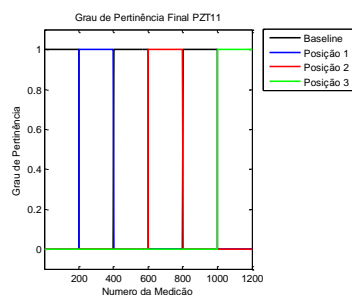
(h)



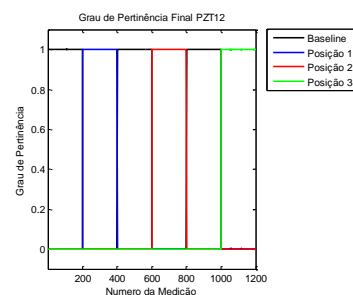
(i)



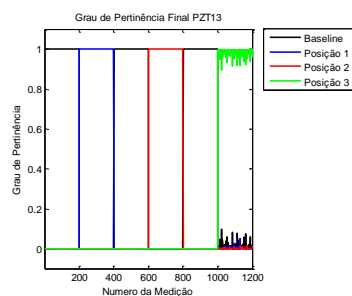
(j)



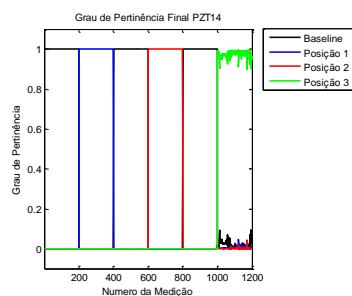
(k)



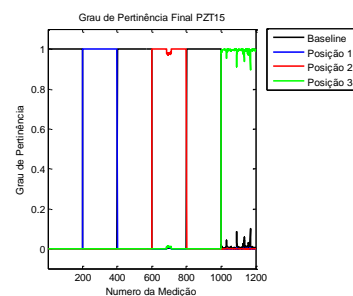
(l)



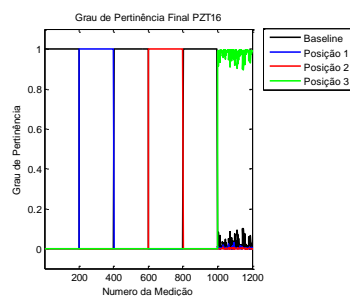
(m)



(n)



(o)



(p)

Figura 6.55 – Graus de pertinência final placa 16 PZTs; Algoritmo de Gustafson-Kessel

Tabela 6.33 – Algoritmo *Fuzzy C-means*; Placa com 16 pastilhas de PZT

	Iterações	Função Objetivo Inicial	Função Objetivo Final
PZT1	14	24168,935	93,852
PZT2	12	34531,568	86,404
PZT3	9	7690,87,006	369,94
PZT4	20	1587967,51	1020,342
PZT5	14	80875,294	377,354
PZT6	10	1192646,125	790,557
PZT7	9	1383408,904	57,678
PZT8	8	1456288,158	245,116
PZT9	10	1321830,859	215,398
PZT10	10	861775,426	167,242
PZT11	9	960424,348	186,084
PZT12	11	1820492,023	162,578
PZT13	15	3050,832	9,592
PZT14	14	2658,477	14,201
PZT15	11	15288,915	57,174
PZT16	12	3393,372	10,689

Na Fig. 6.56 pode-se observar como o algoritmo de Gustafson-Kessel conseguiu ajustar os sinais dos estados para a pastilha PZT4 colada na placa estudada.

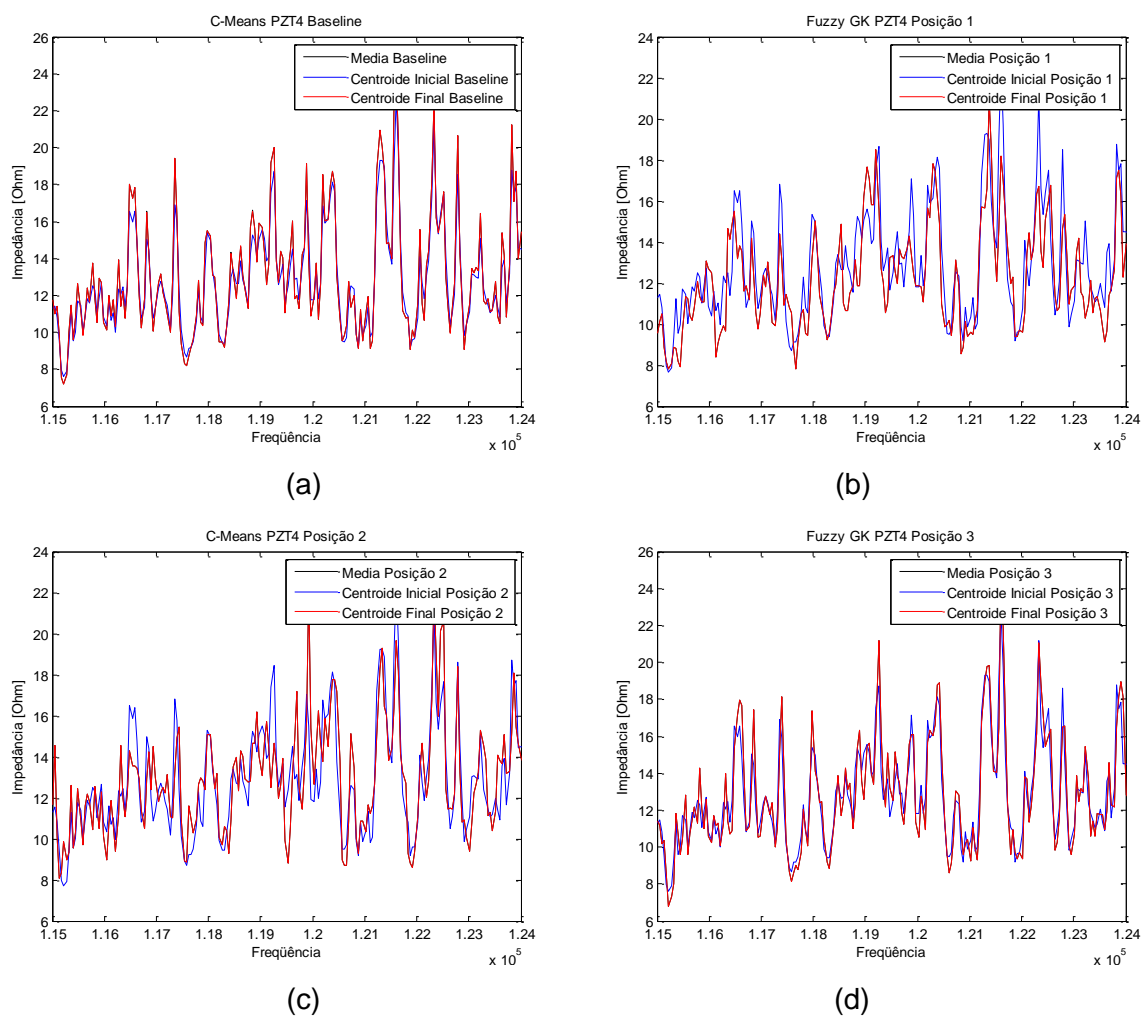


Figura 6.56– Centroides de cada um dos estados do PZT4 da placa com 16 pastilhas de PZT; Algoritmo de Gustafson-Kessel

CAPÍTULO VII

Conclusão

O trabalho realizado nesta tese permite desenhar algumas conclusões, todas elas importantes do ponto de vista de aplicações da técnica de monitoramento da integridade estrutural através da impedância eletromecânica. Os aspectos mais importantes destas conclusões são comentados a seguir, juntamente com algumas perspectivas para a sequência deste esforço de pesquisa.

Quanto ao estudo realizado na viga de alumínio com carga dinâmica, os resultados mostram que a técnica de monitoramento de integridade estrutural baseado na impedância eletromecânica apresenta bons resultados ao monitorar estruturas com cargas em baixa frequência. De uma maneira geral a literatura menciona que a técnica é útil para estruturas submetidas a cargas, porém os trabalhos que tratam deste tema são ainda escassos. No caso da viga, ao comparar os resultados obtidos para o caso em repouso e para o caso dinâmico, pode-se observar que são bastante similares. Sendo assim, pode-se afirmar que a técnica pode ser utilizada em estruturas reais que estejam submetidas a cargas dinâmicas de baixa frequência, sem que isto prejudique sua eficiência.

Esta pesquisa, à vista do potencial de aplicação da técnica de monitoramento proposta, preocupou-se em estudar a influência das condições ambientais e também da geometria dos sensores-atuadores e também de sua posição na estrutura, sobre os sinais de impedância. Inicialmente, deve-se lembrar que, em trabalho anterior, verificou-se que a pressão não influencia o processo de monitoramento e, semelhantemente, a técnica da impedância eletromecânica não é influenciada quando utilizada em baixas temperaturas. No que diz respeito aos efeitos das cargas eletromagnéticas nos sinais de impedância mostrou-se que o aumento da intensidade do campo eletromagnético não prejudica as medições. Neste sentido, analisando o modelo de regressão, uma influência significativa da pequena massa adicionada (dano simulado) foi detectada facilmente no processo de monitoramento. Para os ensaios voltados para o meio iônico, uma influência significativa da quantidade de

sal de aquário foi detectada no processo de monitoramento. Ao se considerar as variáveis envolvidas, isto é, a quantidade de sal (sem sal, 50% saturado, com 100% saturado) e adicionando a massa (1% e 2% da massa da estrutura) para simular danos, é possível notar que o efeito deste último é desprezível quando comparado com o primeiro. Isso significa que o meio iônico acaba por impedir a correta leitura dos sinais de impedância afetados pela inserção de dano. Este comportamento parece ser confirmado pelo meta-modelo adotado. No entanto, quando a pastilha de PZT está protegida por um material isolante, o efeito do meio iônico é significativamente reduzido, dando lugar à boa interpretação dos sinais de impedância associados ao dano. Quanto ao formato da pastilha de PZT foi mostrado que a técnica baseada em impedância eletromecânica conseguiu detectar os danos simulados tanto na viga e na placa, normalmente. Os meta-modelos mostram que o formato da pastilha de PZT não tem influência significativa nas medidas de impedância nas estruturas testadas. Assim sendo, é indiferente o formato da pastilha de PZT utilizada nos ensaios. Finalmente, os ensaios relacionados à posição da cerâmica piezelétrica mostraram que a capacidade de detecção dos sensores-atuadores está diretamente relacionada com a posição que se encontram em relação ao dano. Por outro lado, pastilhas de PZT que se encontram a 90 graus do dano tem maior dificuldade de detectar o mesmo, embora estejam localizadas mais próximas do dano. Assim sendo, a geometria do ensaio (posição do dano e das pastilhas piezelétricas) é um ponto que merece atenção ao se utilizar a técnica aqui explorada.

Neste trabalho também se apresenta um sistema de medição de impedância de baixo custo, desenvolvido na plataforma *LabView*. Como de uma forma geral os valores das métricas associadas ao dano foram superiores aos valores obtidos para os casos sem dano, pode-se concluir que o método desenvolvido funciona de maneira satisfatória para identificação da presença de danos em estruturas. Consequentemente, pode ser aplicado para monitoramento da integridade estrutural, cumprindo assim o objetivo para o qual foi desenvolvido. O software, desenvolvido especialmente para este trabalho, possui a funcionalidade de coletar simultaneamente dados de impedância de até 16 pastilhas de PZT, sem a necessidade da intervenção humana. O procedimento é realizado de maneira recorrente após cada leitura, ou seja, tem-se um sistema autônomo, importante para aplicações reais em sistemas de engenharia, particularmente quando se considera as estruturas aeronáuticas. Os valores das métricas indicam que o sistema de medição desenvolvido apresenta resultados muito próximos dos encontrados por um analisador de impedância comercial. Os desvios padrão das métricas de dano garantem ainda que o sistema desenvolvido é suficientemente estável para as aplicações de interesse exploradas neste trabalho.

No que tange à necessidade de se identificar os vários tipos de danos associados aos sinais de impedância coletados, duas técnicas de inteligência artificial foram avaliadas para classificação de danos. A primeira é a rede neural probabilística, tendo apresentado bons resultados, com erros inferiores a 5% para as pastilhas de PZT que conseguem detectar o dano. O erro observado indica um “falso negativo”, aspecto não conveniente em aplicações reais. Isto provavelmente ocorreu porque, para todos os ensaios realizados, se contava com um número maior de medições para o *baseline* do que para os demais estados considerados para as estruturas. Verificou-se que a técnica das redes neurais probabilísticas foi capaz de classificar os danos inseridos nas estruturas estudadas (viga e placa) de maneira eficiente, abrindo perspectivas para utilização ampla em situações reais. A segunda técnica aplicada para classificação foi a análise *fuzzy* de *cluster*, tendo sido testados dois algoritmos, a saber, o *fuzzy C-means* e o de Gustafson-Kessel. O primeiro algoritmo apresentou bons resultados na viga, mas ao se considerar estruturas mais complexas seu desempenho diminuiu. Tudo indica que este comportamento esteja ligado ao fato deste algoritmo procurar criar *clusters* do mesmo tamanho e de formato circular; como em todos os casos apresentados os estados não tinham o mesmo tamanho, o rendimento o rendimento se viu prejudicado. Já o algoritmo de Gustafson-Kessel apresentou excelente desempenho em todas as estruturas estudadas. Este aspecto bastante positivo está associado ao fato deste algoritmo ser desenhado para obter *clusters* de formatos e tamanhos diferentes, ou seja, o algoritmo consegue criar mais facilmente *clusters* de diferentes tamanhos. Quando as técnicas *fuzzy* de análise de *cluster* foram testadas para várias estruturas iguais (placas e vigas), os resultados não foram satisfatórios, uma vez que não conseguiram classificar os danos adequadamente nem para a viga e nem para a placa. Outra aplicação potencial para estas técnicas de classificação seria a detecção da posição do dano, conforme foi possível demonstrar com os ensaios usando a viga com parafusos e a placa com 16 pastilhas de PZT.

Assim sendo, pode-se considerar que a principal contribuição deste trabalho tem a ver com a realização de estudos inéditos sobre a influência de condições ambientais no monitoramento de integridade estrutural, além de se avaliar através de muitos ensaios experimentais a influência do formato e da posição dos sensores para detectar o dano. Estes estudos brindam uma perspectiva concreta de possível aplicação da metodologia utilizada em estruturas reais, com interesse especial nas estruturas aeronáuticas. Outro ponto importante foi o desenvolvimento e teste de um sistema de medição portátil e de baixo custo, o que torna a técnica da impedância eletromecânica mais apropriada para uso industrial. Acrescenta-se ainda que, sendo portátil e leve, o sistema de aquisição dos sinais de impedância podem ser facilmente embarcados.

Outra contribuição interessante e não menos importante decorre do uso das técnicas de inteligência artificial para classificação de danos, aqui testadas tanto em estruturas simples como em estruturas reais, dando assim um passo significativo na direção do prognóstico de danos. Deve-se lembrar aqui da importância da realização de prognóstico de danos na engenharia atual, sendo, entretanto, algo ainda a ser consolidado.

Finalmente, deve-se observar que o trabalho realizado implicou a realização de inúmeros ensaios experimentais com sistemas mecatrônicos inteligentes, desenvolvimento de software para aquisição de dados, além de códigos computacionais dedicados ao cálculo de métricas de dano com sua correspondente análise estatística, para fins de comparação e decisão. Técnicas de meta-modelagem estatística foram usadas nos casos em que modelos matemáticos não eram possíveis de ser desenvolvidos, pelo menos nesta fase do avanço do estado da arte. Foram utilizadas técnicas de inteligência artificial para classificação de danos, exigindo a manipulação de dados provenientes dos sinais de impedância. É ainda importante mencionar que todo o trabalho foi realizado dentro de um laboratório de pesquisa para atender a um projeto específico de interesse da indústria aeronáutica. Este conjunto de atividades de pesquisa científica aplicada, juntamente com o contexto de sua execução, revelou-se extremamente formador e capaz de fornecer à doutoranda uma oportunidade ímpar.

Como perspectivas para trabalhos futuros, pode-se mencionar:

- Estudo do comportamento da técnica em estruturas submetidas a cargas em frequências mais altas e na presença de ruído. Este empreendimento, entretanto, deverá ser precedido do estudo do comportamento da mesma em estruturas reais no contexto industrial.
- Desenvolver um sistema de medição de impedância imune a alterações de temperatura. Neste sentido, técnicas de compensação deverão ser objeto de estudo intenso para vencer as dificuldades em temperaturas próximas da temperatura ambiente e, também em temperaturas elevadas.
- Desenvolver um sistema completamente autônomo para medição de impedância sem a necessidade utilização de plataformas comerciais (tais como o LabView, por exemplo).
- Promover a evolução das técnicas de inteligência artificial para uso em conjunto com o método de monitoramento de integridade estrutural baseado em impedância eletromecânica, visando a detecção, localização e classificação de danos.

- Desenvolvimento de um sistema de SHM para uso específico em estruturas aeronáuticas. Para tanto, etapas como a certificação aeronáutica, realizada pelas autoridades competentes, se torna indispensável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agilent Technologies. **Impedance Measurement Handbook**. 2006.

ANTOGNETTI, P.; MILUTINOVIC, V. **Neural Networks: Concepts, Applications, and Implementations**. 1 Edição. New Jersey: Prentice Hall, 1991. 310p.

BAPTISTA, F.G.; VIEIRA, J. Influence of excitation Signal on Impedance-based Structural Health Monitoring. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**. v. 21, n.14, p. 1409-1416, nov. 2010.

BHALLA, S.; NAIDU, A. S. K.; SOH, C. K. Influence of Structure– Actuator Interactions and Temperature on Piezoelectric Mechatronic Signatures for NDE. In: **Proceedings of ISSS-SPIE 2002 International Conference on Smart Materials Structures and Systems**, December 12–14 de 2002, Bangalore, India (paper no ISSS-SA-502).

BHALLA, S.; NAIDU, A.S.K.; ONG, C.W.; SOH, C.K. Practical Issues in the Implementation of Electromechanical Impedance Technique for NDE. In **Proceedings of the SPIE International Symposium on Smart Materials, Nano-, and Micro-Smart Systems**. December 16-18 de 2002, Melbourne, Australia.

BANKS, H.T.; SMITH, R.C.; WANG, Y. **Smart Materials Structures – Modeling, Estimation and Control**. Paris: John Wiley & Sons, 1996.

BRAGA, A.P.; CARVALHO, A.C.P.L.F.; LUDERMIR, T.B. **Redes Neurais Artificiais: Teoria e aplicações**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e científicos Editora S. A., 2000. 262p,

BRANCO, C. A. G. M.; **Mecânica dos Materiais**. 2.ed. Lisboa: Fundação Calouste Guelbenkian, 1994. 1098 p.

BRAY, D. E.; McBRIDE, D. **Nondestructive Testing Techniques**. N.Y.: AWiley-Interscience Publication, 1992. 765 p.

CHAUDHRY, Z.; JOSEPH, T.; SUN, F.; ROGERS, C. Local-Area Health Monitoring of Aircraft via Piezoelectric Actuator/Sensor Patches. In: **Smart Structures and Integrated Systems, SPIE Conference**. 1995. San Diego, CA. Proceedings of the SPIE. Vol.2443.

CHAUDHRY, Z.; LALANDE, F.; GANINO, A.; ROGERS, C. **Monitoring the Integrity of Composite Patch Structural Repair via Piezoelectric Actuators/Sensors**. 1996. AIAA-1996-1074-CP.

CLAYTON R. Paul. **Eletromagnetismo Para Engenheiros: com aplicações**. Ed.1. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2006.400p.

DOSCH, J.J.; INMAN, D. J.; GARCIA, E. A Self sensing piezoelectric actuator for collocated control. **Journal of Intelligent Material System and Structures**, n.3, p. 166-185. 1992.

FARRAR, C.R.; LIEVEN, N.A.J.; BEMENT, M.T., An Introduction to Damange Prognosis. **Damage Prognosis for Aerospace, Civil and Mechanical System**, Wiley, Cap.1, pp. 1-12. 2005.

FILHO, J.; Baptista, F.A. 'New Impedance Measurement System for PZT Based Structural Health Monitoring. **IEEE Transactions on Instrumentation & Measurements**. V.58, n. 10, p. 3602-3608, 2008..

FURTADO, R.M. **Identificação de Falhas Estruturais Usando Sensores e Atuadores Piezelétricos e Redes Neurais Artificiais**. 2004. 152 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira.

GIBILISCO, S. **Manual de Eletrônica e de Telecomunicações**. Reichmann e Affonso Editores, Brasil. 2002.

GIURGIUTIU, V.; ZAGRAI, A. Characterization of Piezoelectric Wafer Active Sensors. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**. Vol. 11. p. 959-976. 2000.

GIURGIUTIU, V.; ZAGRAI, A. Embedded Self-Sensing Piezoelectric Active Sensors for On-Line Structural Identification. **Journal of Vibration and Acoustics**. Vol. 124. p. 1-10. 2002.

GIURGIUTIU, V.; ZAGRAI, A.; BAO, J.J. Piezoelectric Wafer Embedded Active Sensors for Aging Aircraft Structural Health Monitoring. **International Journal of Structural Health Monitoring**. Vol. 1. p. 41–61. 2002.

GIURGIUTIU, V.; ZAGRAI, A. N.; BAO, J.; REDMOND, J.; ROACH, D.; RACKOW, K. Active Sensors for Health Monitoring of Aging Aerospace Structures. **International Journal of the Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management**. Vol. 6. NO. 1. p. 3–21. 2003.

GIURGIUTIU, V.; ZAGRAI, A. Damage Detection in Thin Plates and Aerospace Structure with the Electro-Mechanical Impedance Method. **Structural Health Monitoring**. V. 4(2), p. 99-118, 2005.

GRISSE, B. L. **Considerations of the Impedance Method, Wave Propagation, and Wireless Systems for Structural Health Monitoring**. 2004. 108 f. Tese de Mestrado – Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia.

GRISSE, B.; INMAN, D. Temperature Corrected Sensor Diagnostics for Impedance-based SHM. **Journal Sound and Vibration**. V.329, n.12, p. 2323-2336, 2010.

HÖPPNER, F.; KLAUWONN, F.; KRUSE, R.; RUNKLER, T. **Fuzzy Cluster Analysis: Method for Classification, Data Analysis and Image Recognition**. New York: John Wiley & Son, 1999. 289 p.

LEUCAS, L.F. **Utilização das Técnicas de Impedância eletromecânica e Ondas de Lamb para Identificação de Dano em Estruturas com Rebite**. 2009. 58f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

LIANG, C., SUN, F.P., and ROGERS, C.A. Coupled Electromechanical Analysis of Adaptive Material Systems – Determination of the Actuator Power Consumption and

System Energy Transfer. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**. 1994. Vol. 5. p 12–20.

LIU, X.; PAUROBALLY, R. Robust Damage Metric in Terms of Magnitude and Phase for Impedance-based Structural Health Monitoring. **Structural Health Monitoring**. V.8, n.4, p. 303-309, mar. 2009.

MAHALANOBIS, P. C. **On the generalised distância in statistics**. Proceedings of the National Institute of Sciences of India, Vol. 2, No.1, pp. 49–55. 1936

MASSOUD, M. **Impedance Methods for Machine Analysis: Modal Parameters Extraction Techniques**. Université de Sherbrooke, Quebec, Canada, 1985. p. 4-14.

MINGOTI, S. A. **Análise de Dados Através de métodos de estatística multivariada: Uma abordagem Aplicada**. 1 Ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005. 295 p.

Montgomery, D.C. **Design and Analysis of Experiments**. 3rd Edition, John Wiley & Sons, Inc., USA., 1991.

MOURA Jr, J. R. V.; STEFFEN Jr, V. **Impedance-Based Health Monitoring: Frequency Band Evaluation**. XXII IMAC. Dearborn, MI, USA. 2004.

MOURA JR., J. R. V. **Métodos de Identificação de Falhas em Estruturas Aeronáuticas Utilizando Meta-Modelagem Aliada às Técnicas de Impedância e Estruturas Inteligentes**. 2004. 158 F. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

MOURA, J.R.V.; STEFFEN, V.; INMAN, D. Influence of Environmental Changes in Structural Health Monitoring Analysis as Applied to Aeronautical Structures. XXV IMAC, 25, 2007, USA. **Proceeding of XXV IMAC**.

MOURA JR., J. R. V. **Uma Contribuição aos Sistemas de Monitoramento de Integridade Estrutural Aplicada a Estruturas Aeronáuticas e Espaciais**. 2008. 264 F. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

NAIDU, A. S. K.; SOH, C. K. Damage severity and propagation characterization with admittance signatures of piezo transducers. **Journal Smart Materials and Structures**. V. 13, p. 393-403, fevereiro, 2004.

MARTINS, L.G.A.; NETO, R.M.F.; GALLO, C. A.; PALOMINO, L.V.; MONEDA, P.; RADE, D. A.; STEFFEN, V. Architecture of a Remote Impedance-based Structural Health Monitoring System Used in Aircrafts. 8th International Workshop on Structural Health Monitoring, 8, 2011, Stanford. **Proceeding of 8th International Workshop on Structural Health Monitoring**, p. 1-8.

NETO, B. B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como Fazer Experimentos: Pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. 2 ed.Campinas: Editora Unicamp, 2003. 401 p.

NETO, R. M. F.; STEFFEN, V.; RADE, D.A.; GALLO, C.A.; PALOMINO, L.V. A Low-cost Electromechanical Impedance-based SHM Architecture for Multiplexed Piezoceramic Actuators. **Structural Health Monitoring**. v.10, n. 4, p. 391-401, 2011.

OLIVEIRA, H. A.; CALDEIRA, A. M.; MARCHADO, M. A. S.; SOUZA, R. C.; TANCHEIT, R. **Inteligência Computacional: Aplicada à Administração, Economica e Engenharia em Matlab**. São Paulo: Thomson, 20007, 370p.

PALOMINO, L.V. **Análise das Métricas de Dano Associadas à Técnica da Impedância Eletromecânica para o Monitoramento de Integridade Estrutural**. 2008. 117 f. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

PALOMINO, L.V.; TSURUTA, K.M.; MOURA, J.R.V.; RADE, D.A.; STEFFEN, V.; INMAN, D. Evaluation of the Influence of the Influence of Sensor Geometry and PhysicalParameters on Impedance-based Structural Health Monitoring. **Shock and Vibration**. v. 19, p. 1-13, 2012.

PARK, G.; KABEYA, K.; CUDNEY, H. H.; INMAN, D. J. Impedance- Based Structural Health Monitoring for Temperature Varying Applications. **JSME International Journal**. Vol. 42. No. 2. p. 249–258. 1999a.

PARK, G.; CUDNEY, H.; INMAN, D. J. Impedance-Based Health Monitoring Technique for Massive Structures and High-Temperature Structures. In **Smart Structures and Materials 1999: Sensory Phenomena and Measurement Instrumentation for Smart Structures and Materials**. Proceedings of the SPIE. Vol. 3670. p. 461–469. 1999b.

PARK, G.; CUDNEY, H.; INMAN, D. J. Impedance-Based Health Monitoring of Civil Structural Components. **ASCE Journal of Infrastructure Systems**. Vol. 6. No. 4. p. 153–160. 2000a.

PARK, G.; CUDNEY, H.; INMAN, D. J. An Integrated Health Monitoring Technique Using Structural Impedance Sensors. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**. Vol. 11. No. 6. p. 448–455. 2000b.

PARK, G.; CUDNEY, H.; INMAN, D. J. Feasibility of Using Impedance-Based Damage Assessment for Pipeline Systems. **Earthquake Engineering and Structural Dynamics Journal**. Vol. 30. No. 10. p. 1463–1474. 2001.

PARK, G.; SOHN, H.; FARRAR, C. R.; INMAN, D. J. Overview of Piezoelectric Impedance-Based Health Monitoring and Path Forward. **The Shock and Vibration Digest**. V.35, Issue 6. 2003. p. 85-92.

PARK, G.; INMAN, D. J. Impedance-Based Structural Health Monitoring. **Damage Prognosis for Aerospace, Civil and Mechanical System**, Wiley, Cap.1, pp. 1-12. 2005.

PEAIRS, D. M., **Development of a Self-Sensing and Self-Healing Bolted Joint**. 2002.93 f. Tese de Mestrado - Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia.

PEAIRS, D. M. **High Frequency Modeling and Experimental Analysis for Implementation of Impedance-based Structural Health Monitoring**. 2006. 150 f. Tese de Doutorado – Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia.

RADIL, T., RAMOS, P.M., SERRA, A.C. Impedance Measurement With Sine-Fitting Algorithms Implemented in a DSP Portable Device. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**. v. 57, n. 1, 2008.

RAGHAVAN, A.; CESNIK, C.E.S. Effects of Elevated Temperature on Guided-Wave Structural Health Monitoring. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**. v.19, n.12, p. 1383-1398, Dez. 2008.

RAJU, V. **Implementing Impedance – Based Health Monitoring**. 1997. 224 f. Tese de Mestrado – Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia.

SOH, C.K.; TSENG, K.; BHALLA, S.; GUPTA, A. Performance of Smart Piezoceramic Patches in Health Monitoring of a RC Bridge. **Smart Materials and Structures**. Vol. 9. p. 533–542. 2000.

SPECHT, D. F. Probabilistic Neural Networks, **Neural Networks**, Vol.3, pp.109-118, USA, 1990.

SUN, F.P.; CHAUDHY, Z.; LIANG, C.; ROGERS, C.A. Truss Structure Integrity Identification Using PZT Sensor–Actuator. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**. Vol. 6. p134–139. 1995.

TSENG, K. K-H.; NAIDU, A. S. K. Non-parametric damage detection and characterization using smart piezoceramic material. **Journal Smart Material and Structures**. V.11, p. 317-329, maio. 2002.

TSURUTA, K. M. **Monitoramento de Integridade Estrutural de Materiais Compostos Sujetos a Impactos Empregando a Técnica de Impedância Eletromecânica**. 2008. 114 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

WISHAW, M; BARTON, D.P. Comparative Vacuum Monitoring: a New Method of In-Situ Real-Time Crack Detection and Monitoring. In: 10TH ASIA-PACIFIC CONFERENCE ON NON-DESTRUCTIVE TESTING, 10, 2001, Brisbane, Australia. **Proceeding of 10th Asia-Pacific Conference on Non-Destructive Testing**, www.ndt.net/apcndt2001/index.htm.

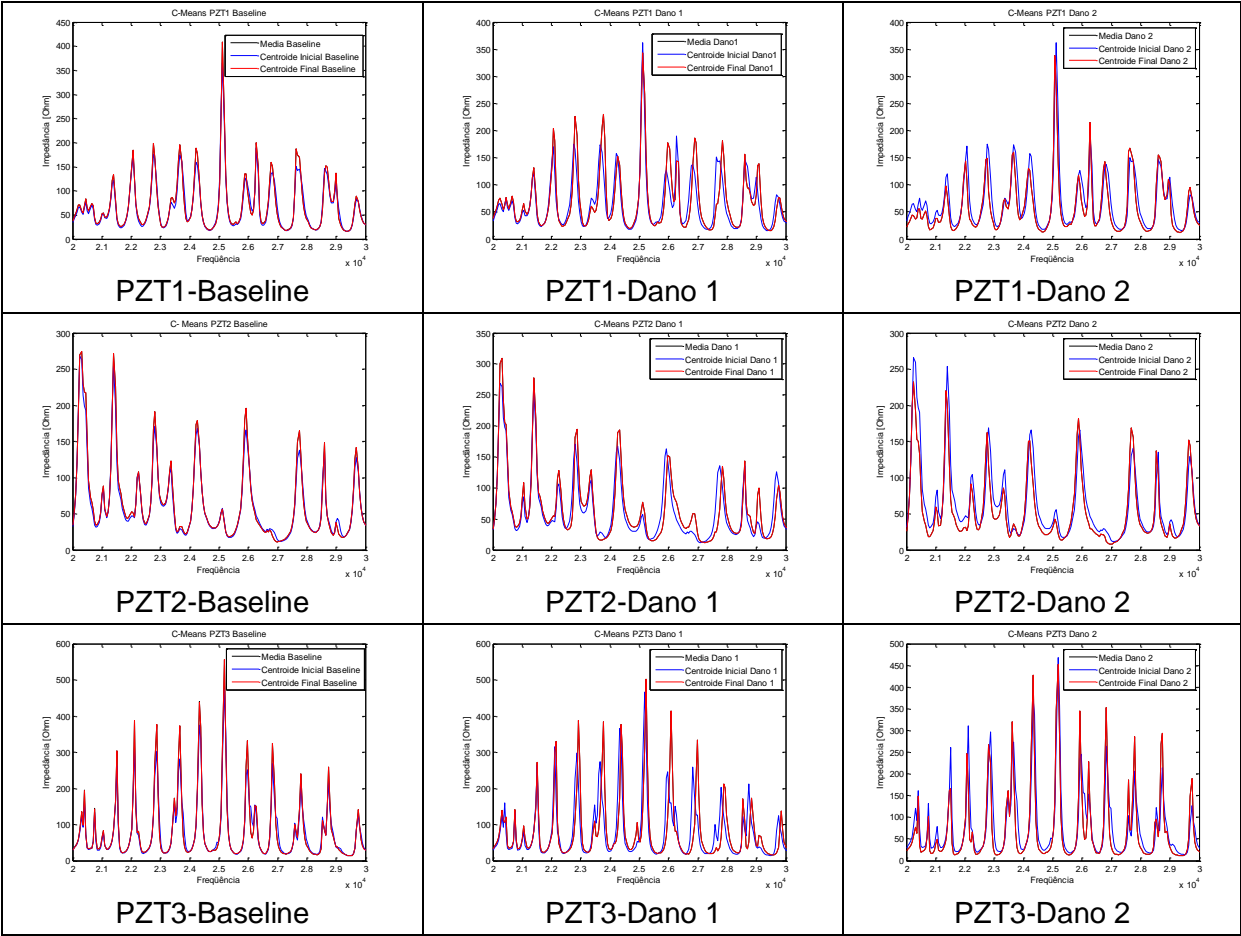
XU, B.; GIURGIUTIU, V. Efficient Electromechanical (E/M) Impedance Measuring Method for Active Sensor Structural Health Monitoring . 12th International Symposium on Smart Structures and Materials, 12, 2005, San Diego, CA. **Proceeding of 12th International Symposium on Smart Structures and Materials**, p.1-10.

Anexo I

CENTROIDES DOS ALGORITMOS DE ANALISE DE CLUSTER FUZZY

Neste Anexo são apresentados os gráficos dos sinais ajustados pelos centroides dos algoritmos de análise de *cluster*.

Tabela AI.1 – Gráficos dos centroides de cada um dos estados das pastilhas de PZT das vigas rebitadas; Algoritmo *Fuzzy C-means*



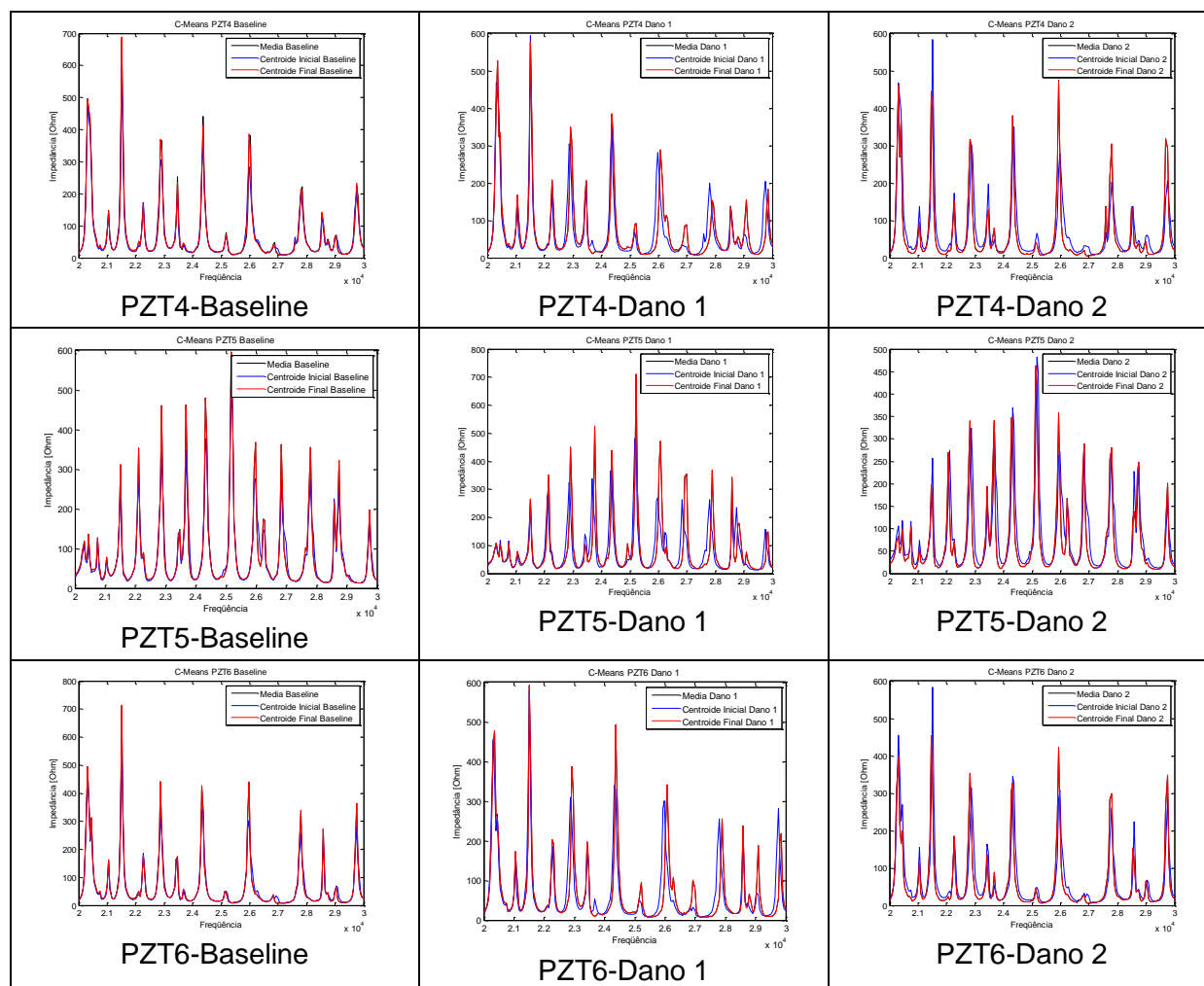
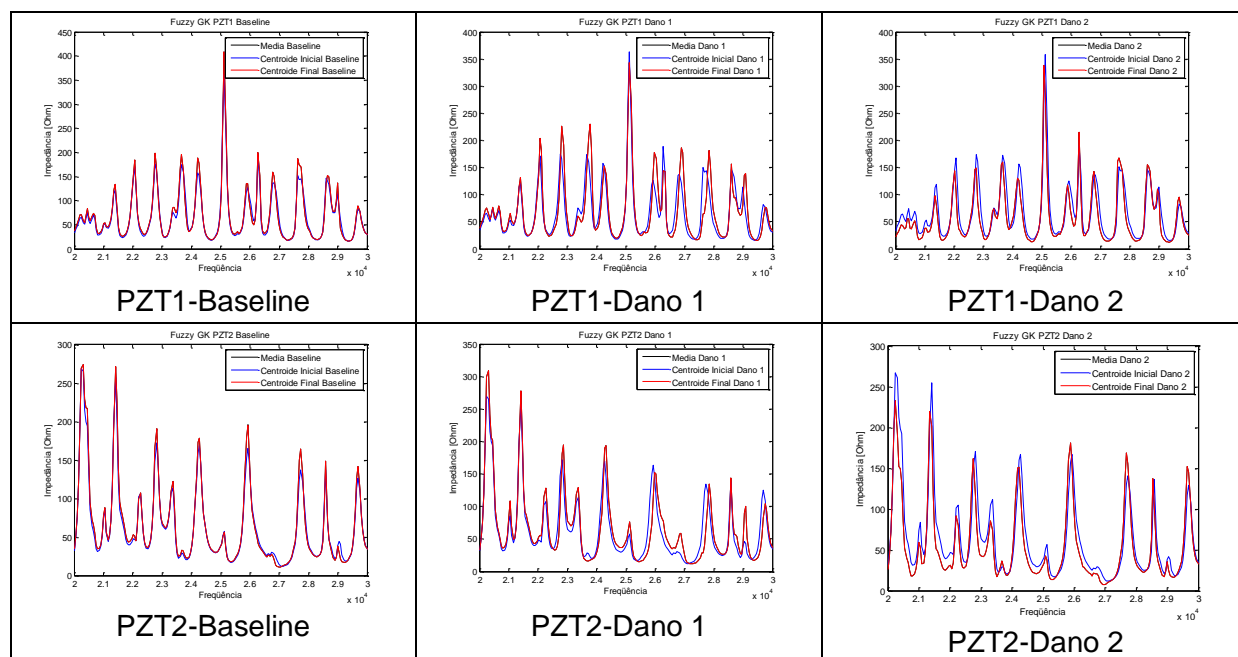


Tabela A1.2 – Gráficos dos centroides de cada um dos estados das pastilhas de PZT das vigas rebitadas; Algoritmo de Gustafson-Kessel



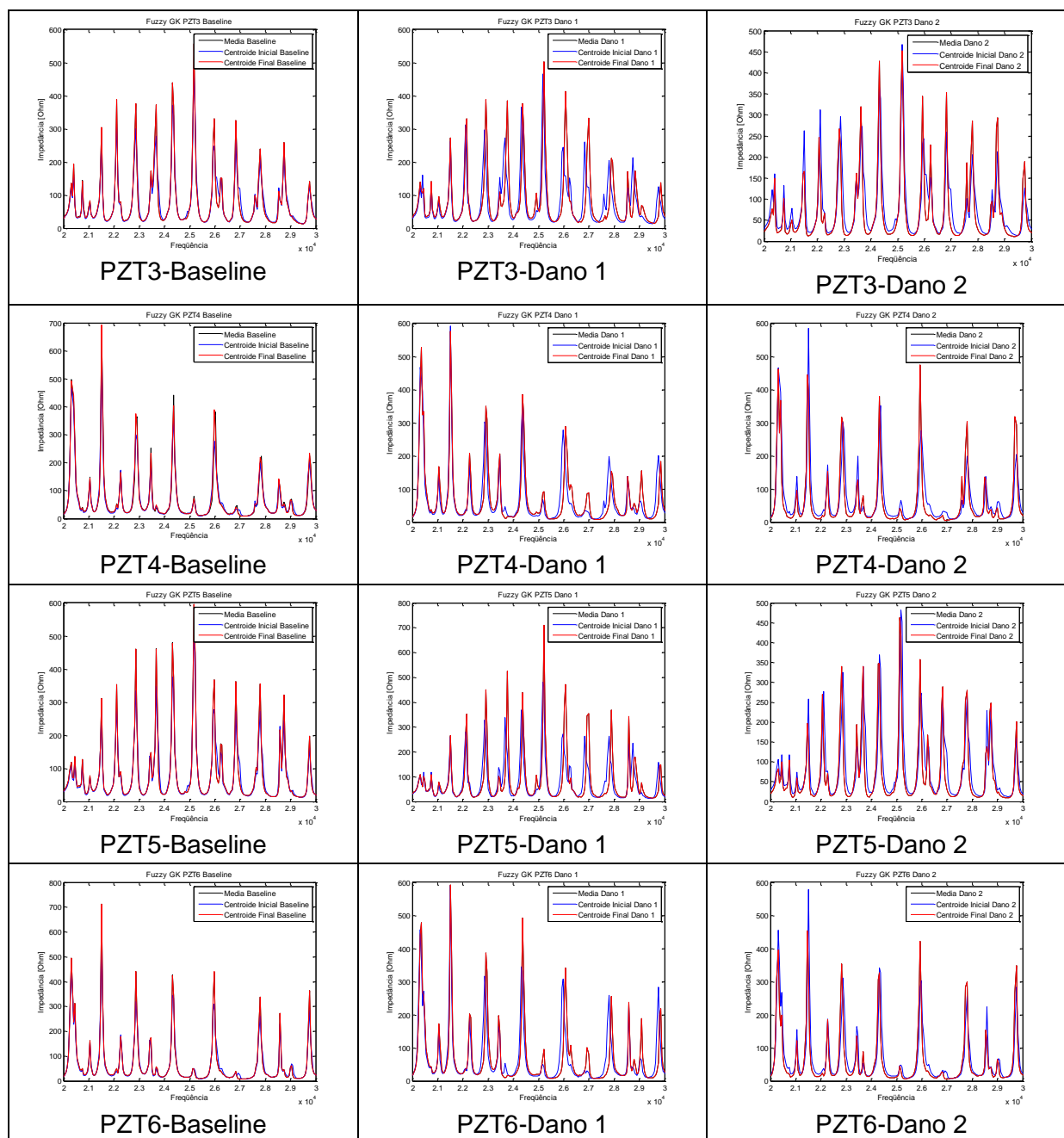
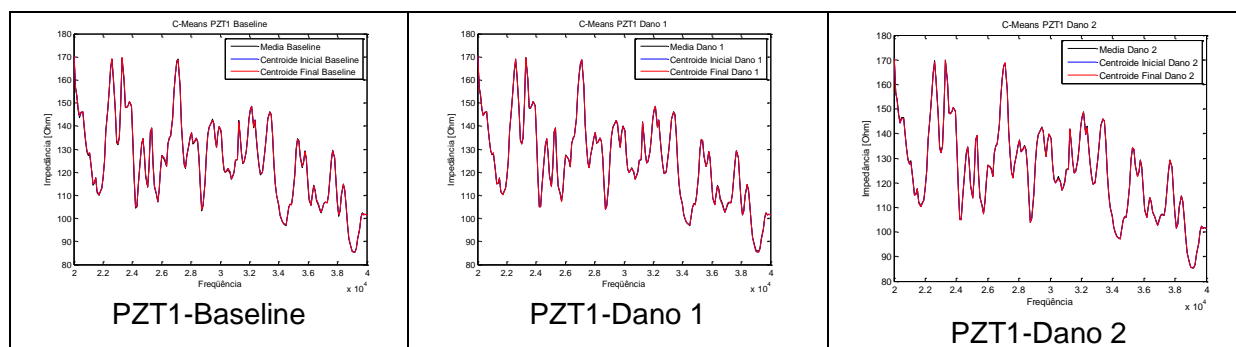
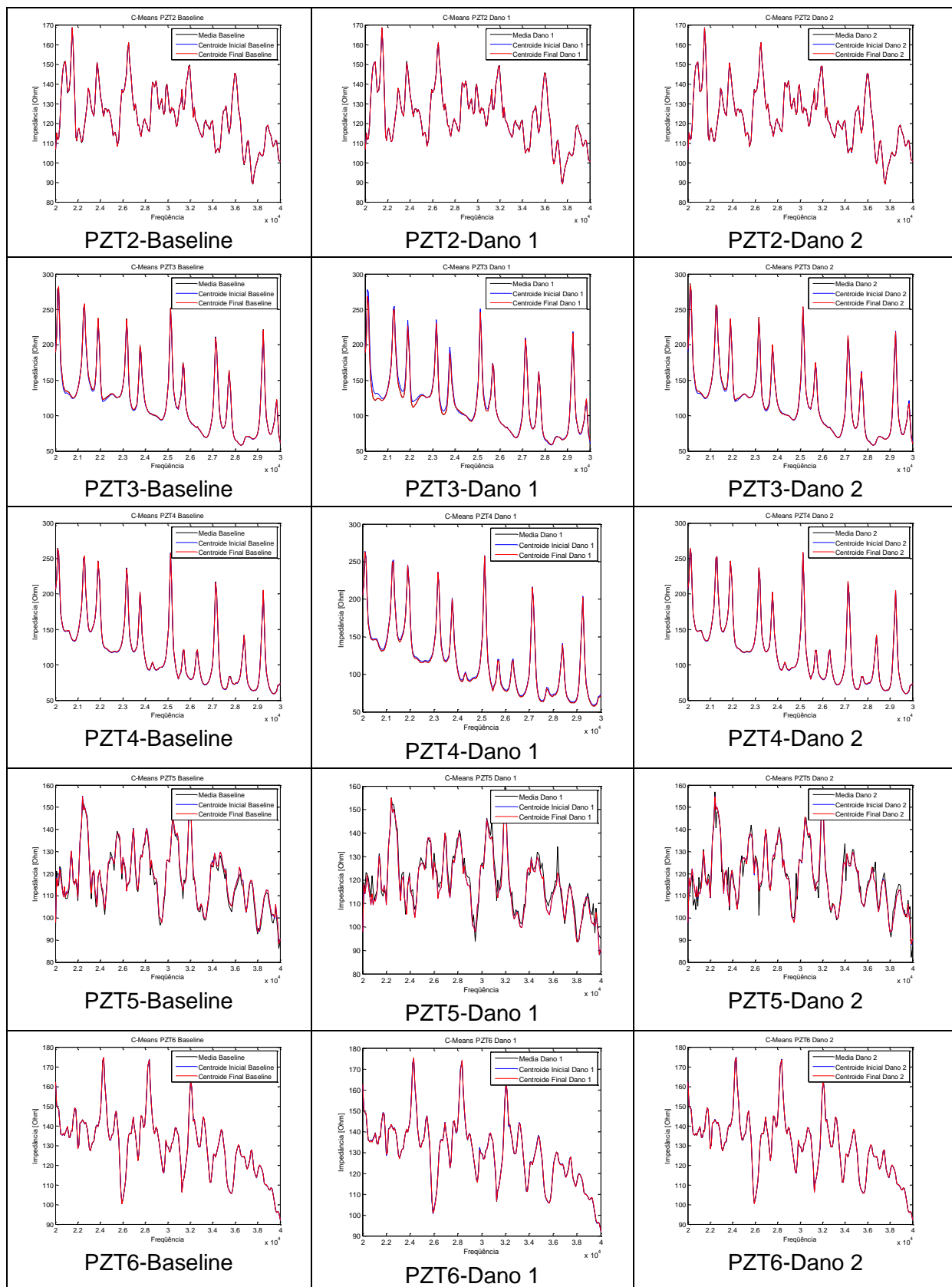


Tabela A1.3 – Gráficos dos centroides de cada um dos estados das pastilhas de PZT do painel aeronáutico; Algoritmo *Fuzzy C-means*





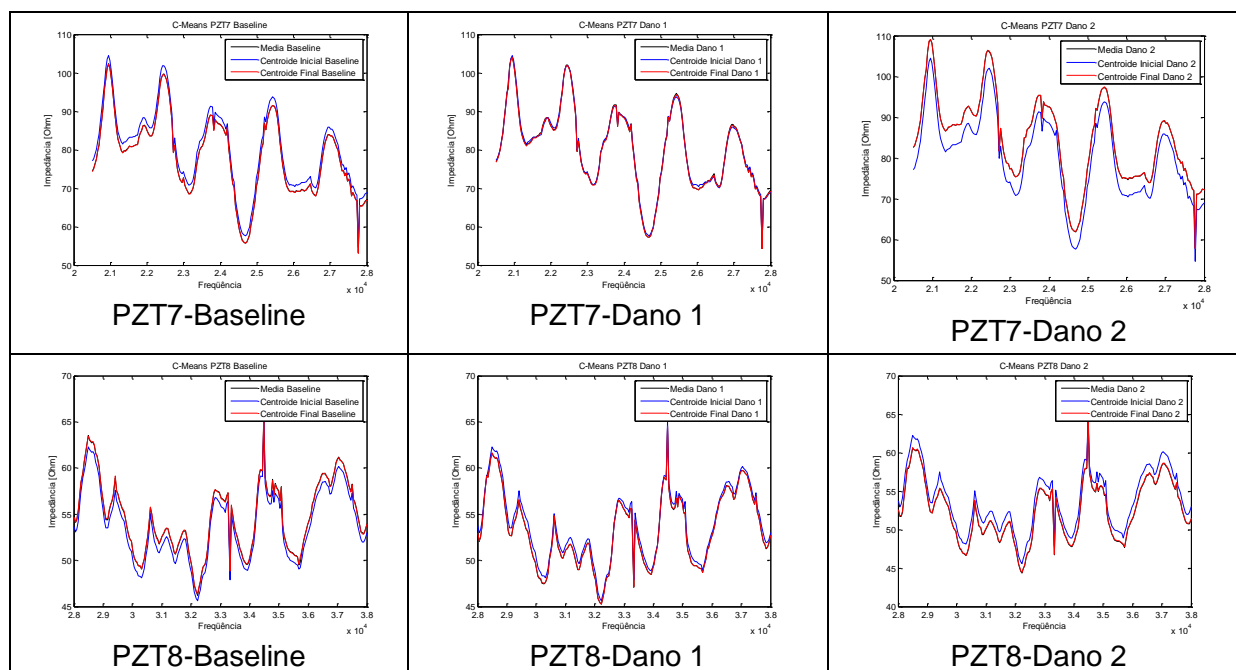
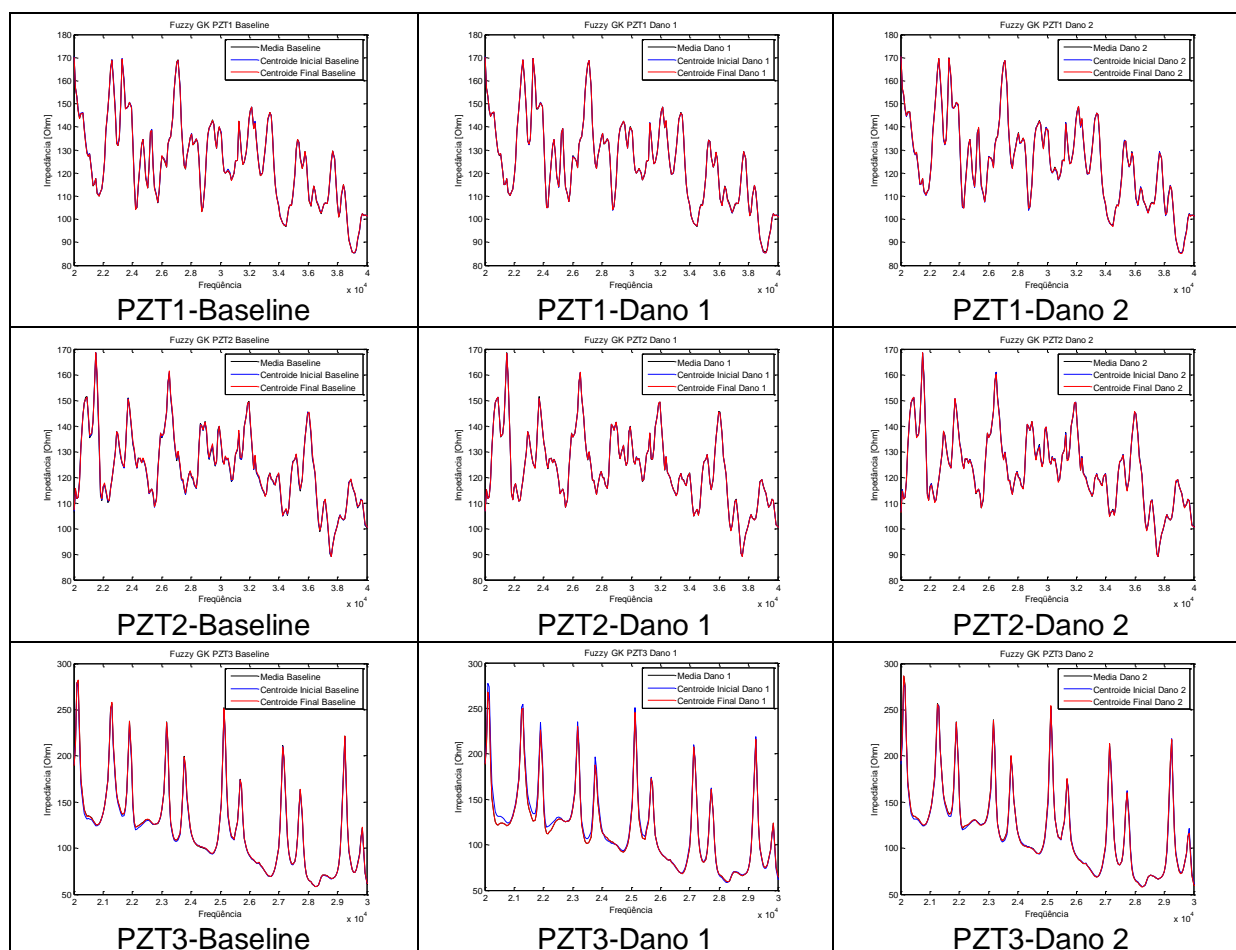


Tabela A1.4 – Gráficos dos centroides de cada um dos estados das pastilhas de PZT do painel aeronáutico; Algoritmo de Gustafson-Kessel



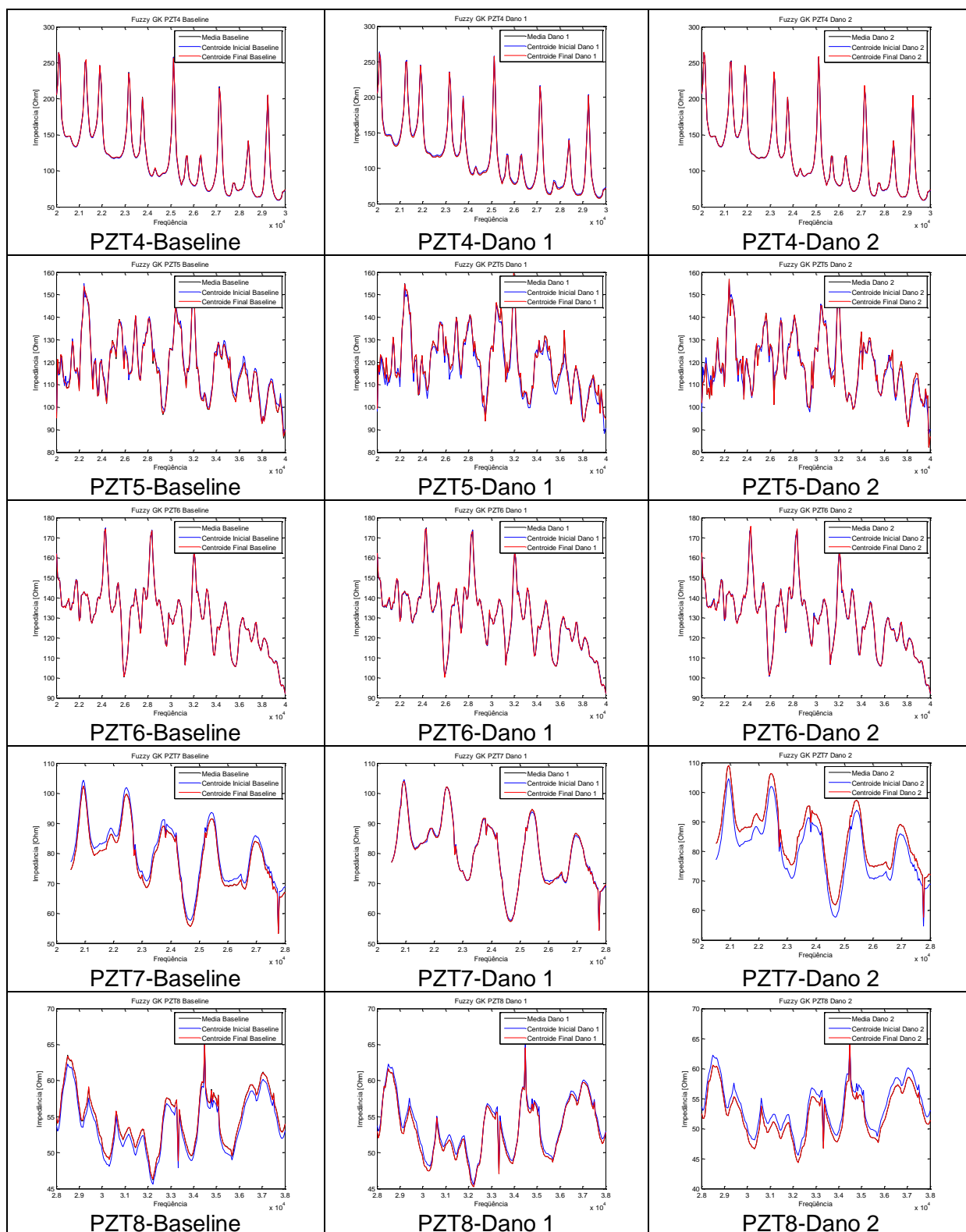
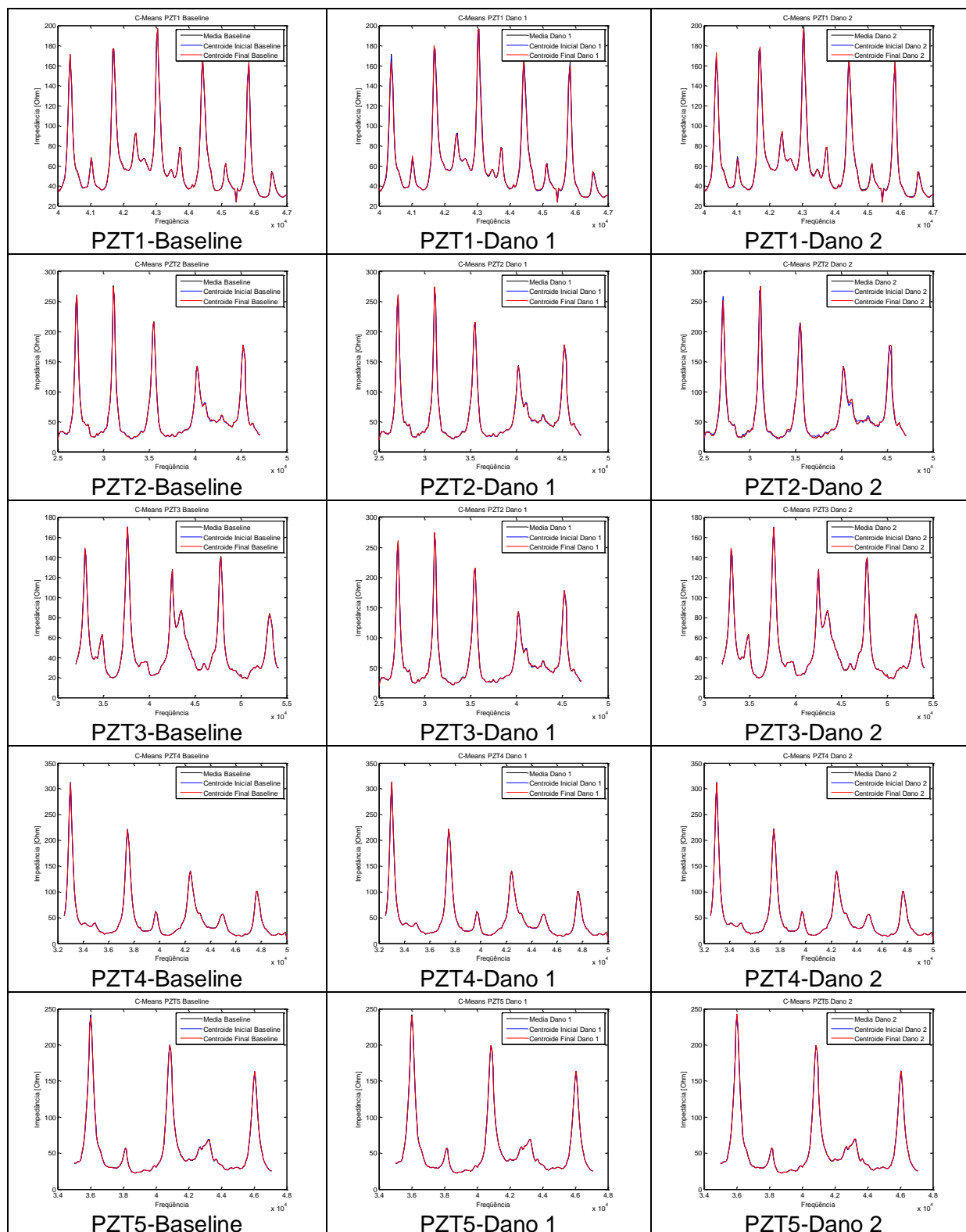


Tabela A1.5 – Gráficos dos centroides de cada um dos estados das pastilhas de PZT da janela da estrutura aeronáutica; Algoritmo *Fuzzy C-means*



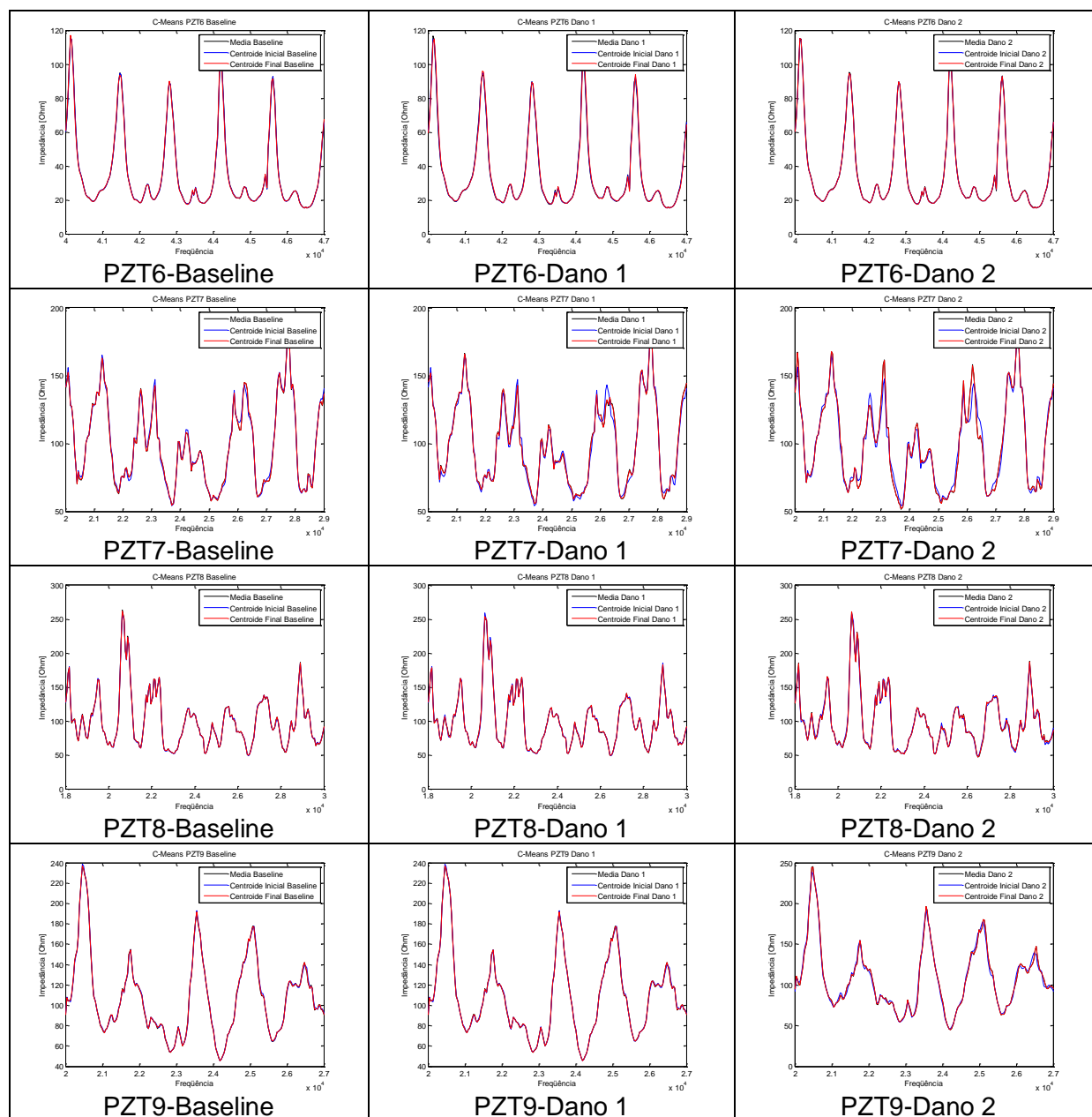
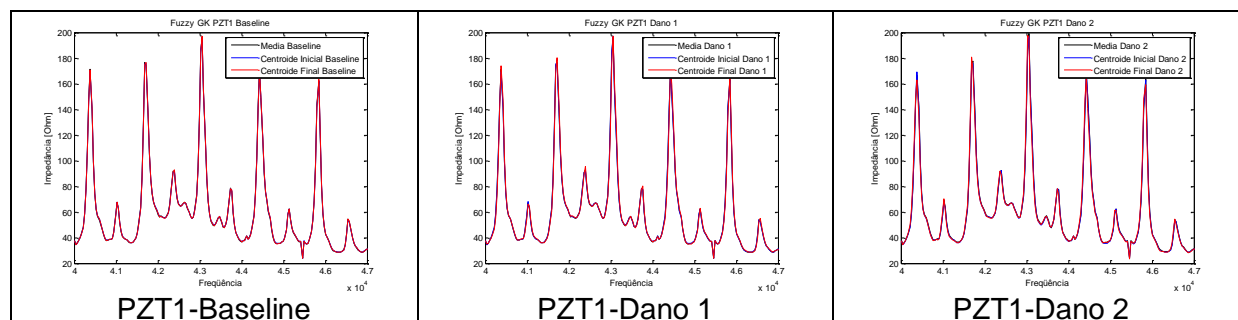
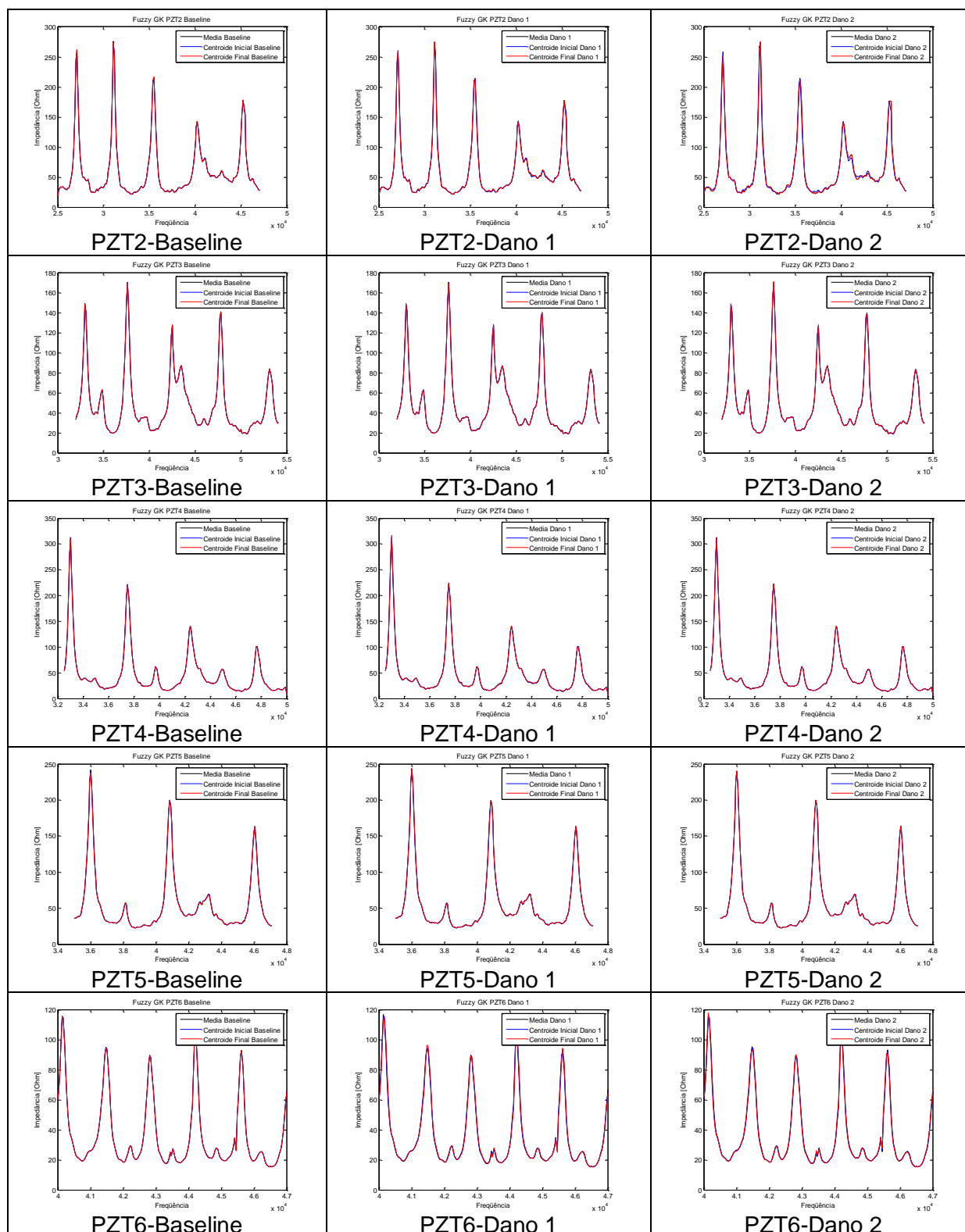


Tabela A1.6 – Gráficos dos centroides de cada um dos estados das pastilhas de PZT da janela da estrutura aeronáutica; Algoritmo de Gustafson-Kessel





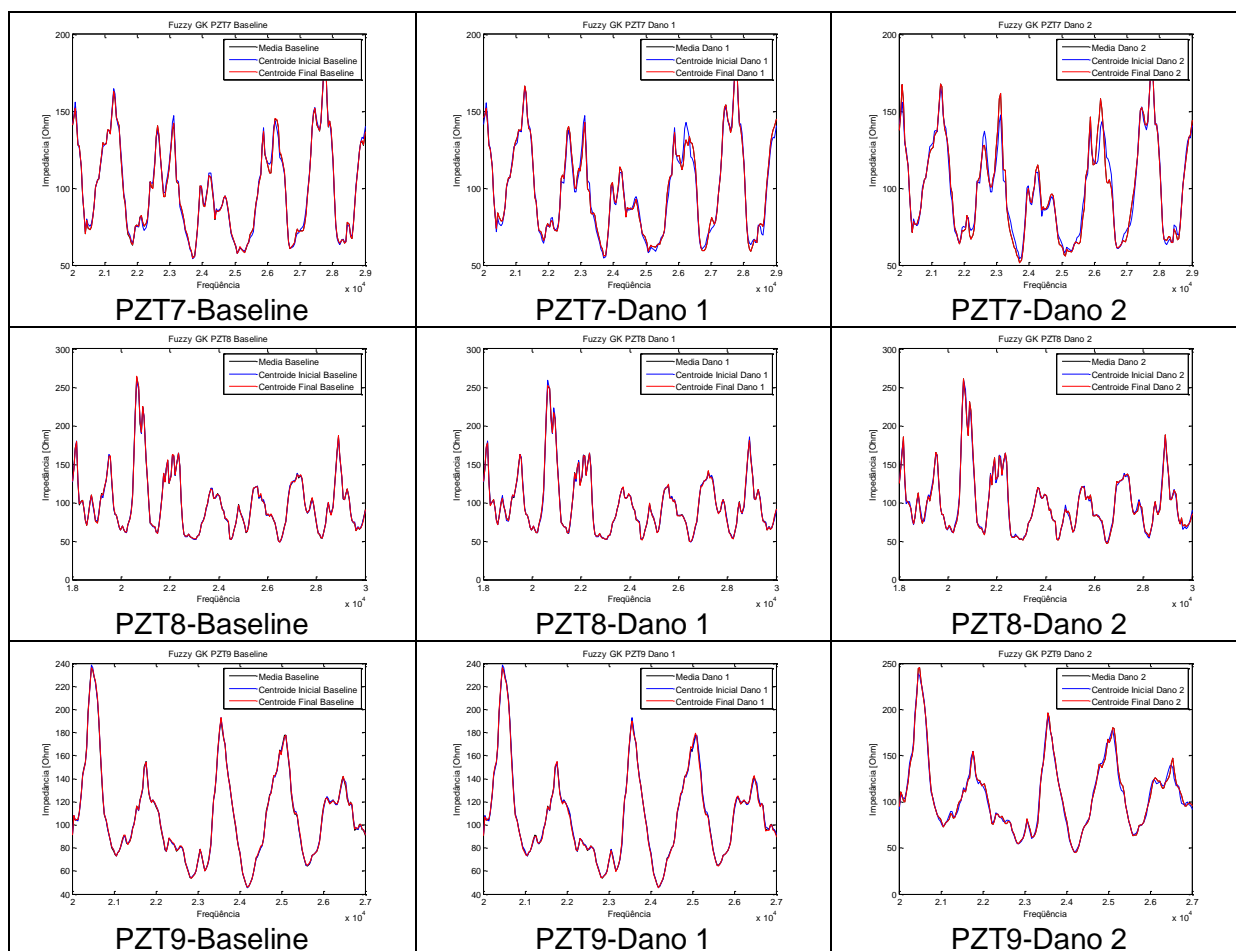
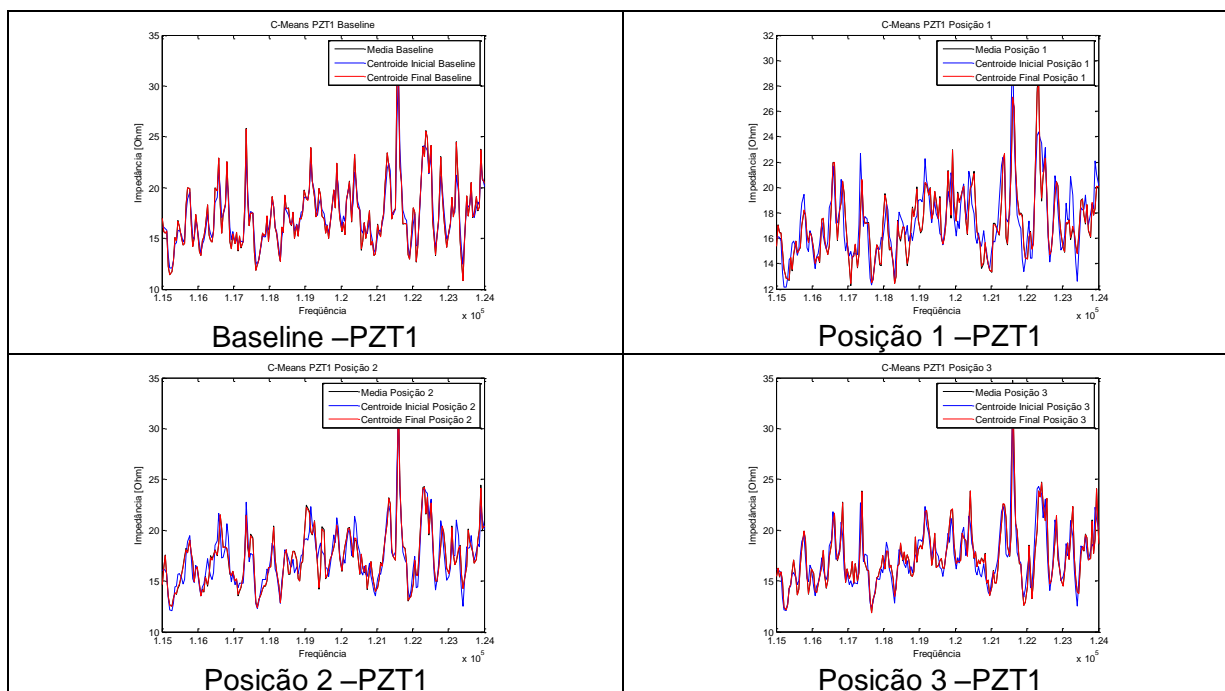
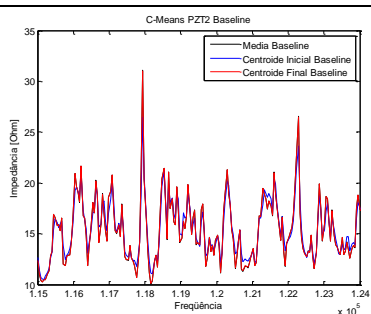
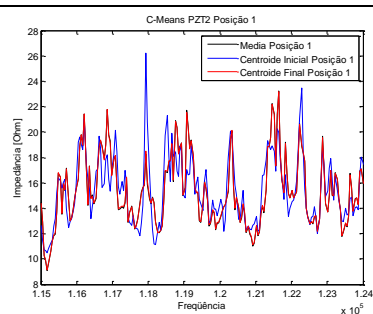


Tabela AI.7 – Gráficos dos centroides de cada um dos estados das pastilhas de PZT da placa com 16 PZTs, Algoritmo *Fuzzy C-means*

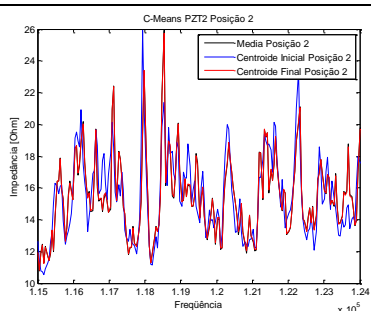




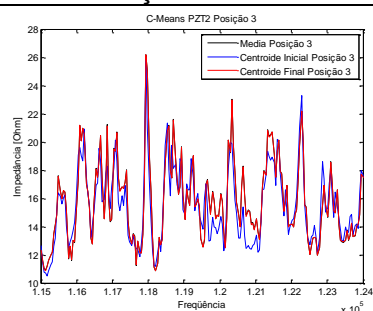
Baseline –PZT2



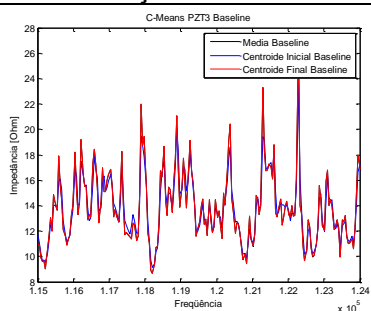
Posição 1 –PZT2



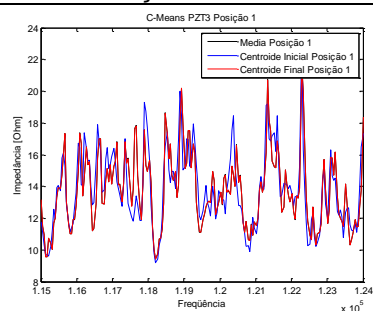
Posição 2 –PZT2



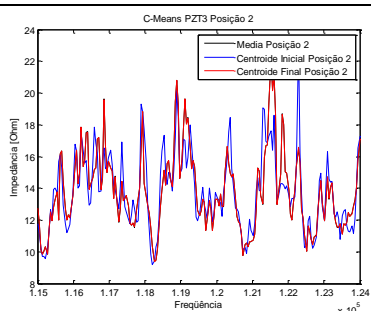
Posição 3 –PZT2



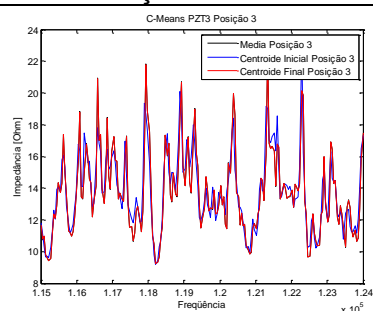
Baseline –PZT3



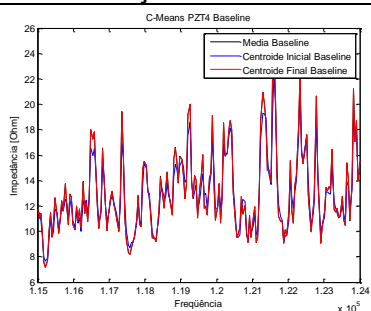
Posição 1 –PZT3



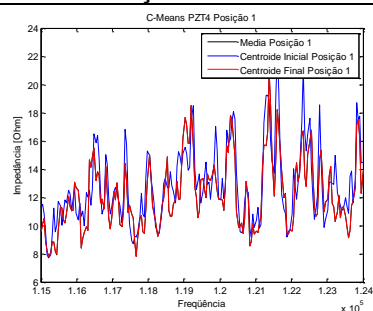
Posição 2 –PZT3



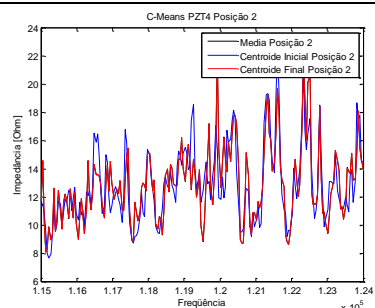
Posição 3 –PZT3



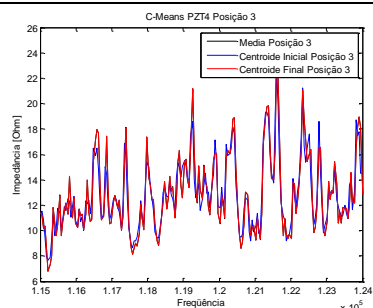
Baseline –PZT4



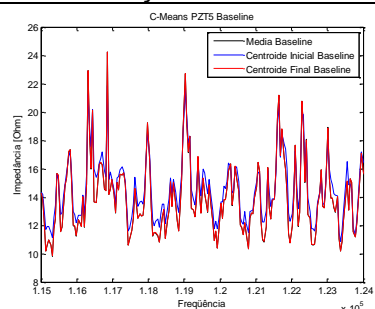
Posição 1 –PZT4



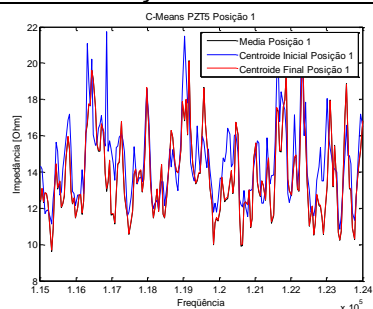
Posição 2 –PZT4



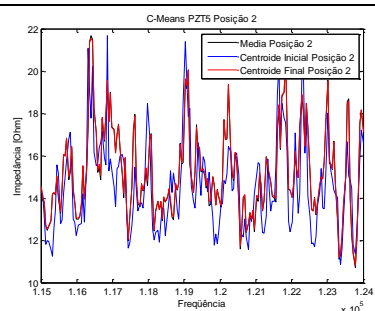
Posição 3 –PZT4



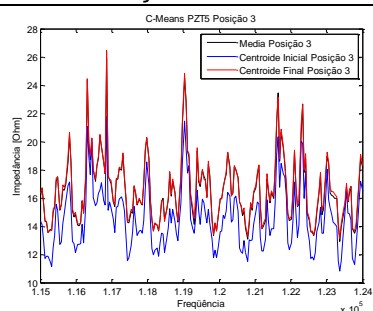
Baseline –PZT5



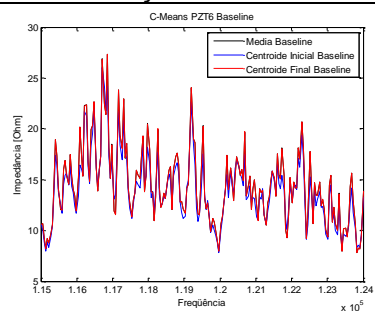
Posição 1 –PZT5



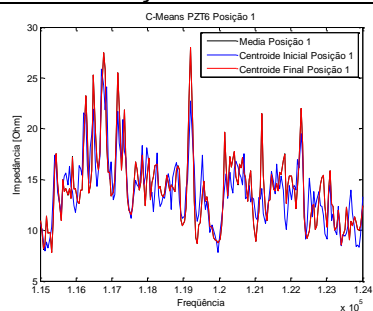
Posição 2 –PZT5



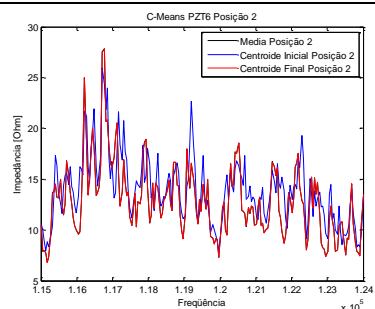
Posição 3 –PZT5



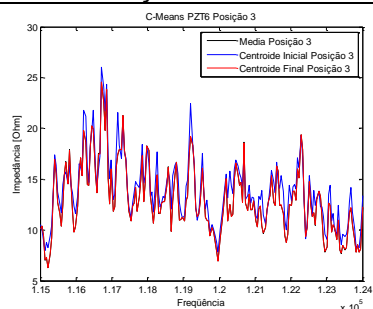
Baseline –PZT6



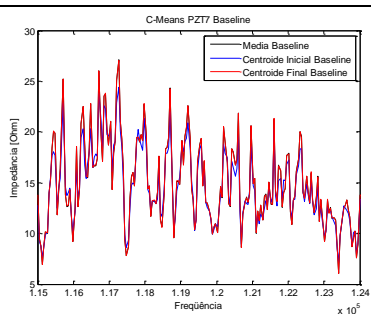
Posição 1 –PZT6



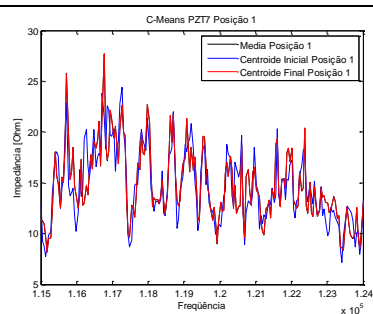
Posição 2 –PZT6



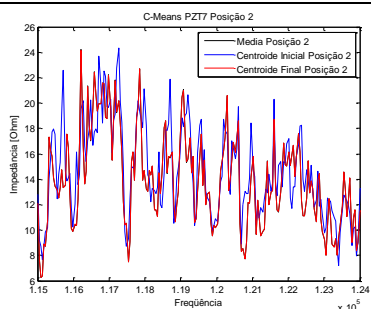
Posição 3 –PZT6



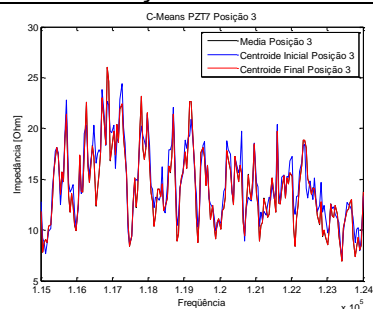
Baseline –PZT7



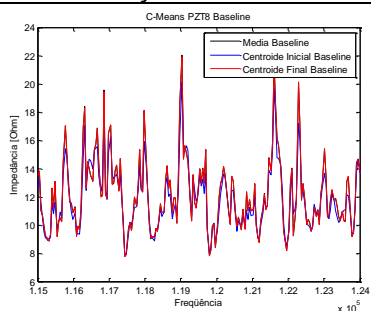
Posição 1 –PZT7



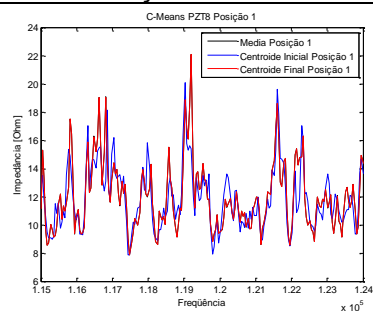
Posição 2 –PZT7



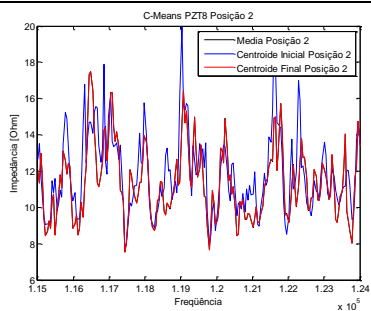
Posição 3 –PZT7



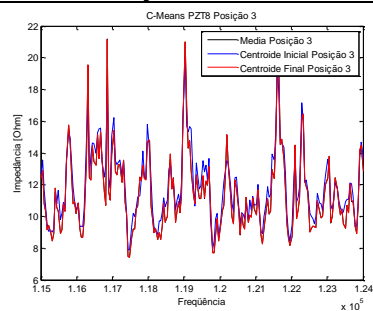
Baseline –PZT8



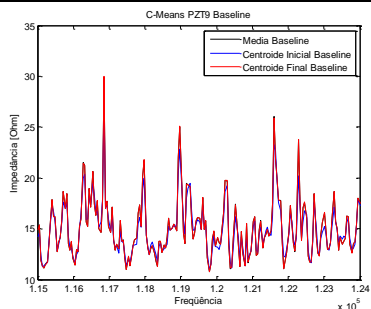
Posição 1 –PZT8



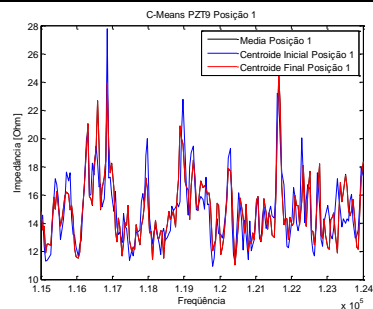
Posição 2 –PZT8



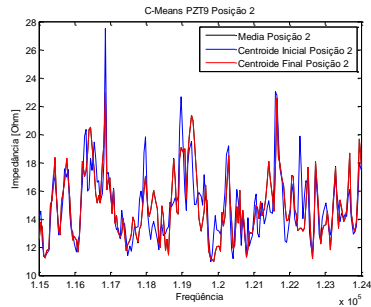
Posição 3 –PZT8



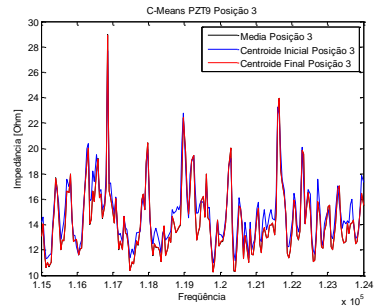
Baseline –PZT9



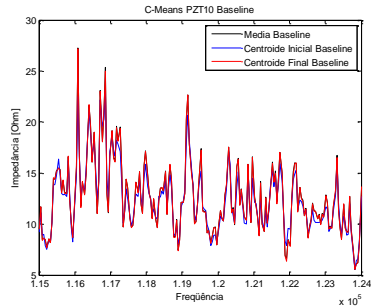
Posição 1 –PZT9



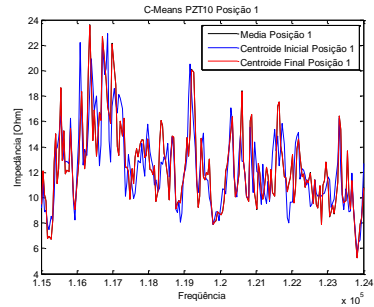
Posição 2 –PZT9



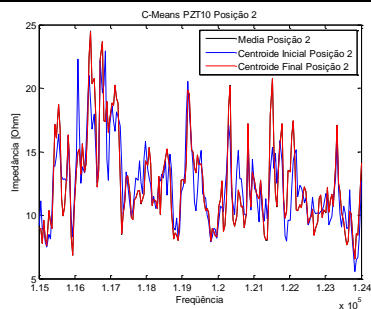
Posição 3 –PZT9



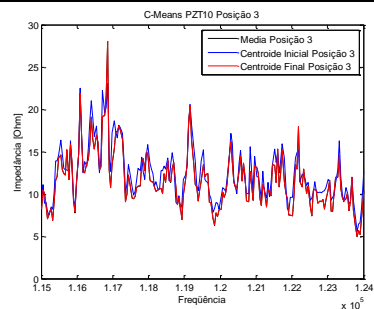
Baseline –PZT10



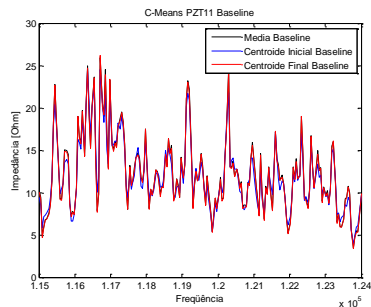
Posição 1 –PZT10



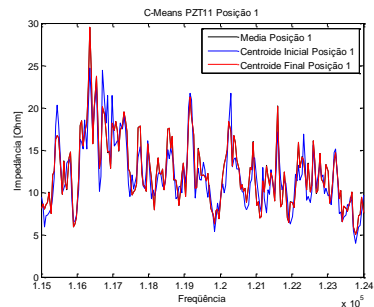
Posição 2 –PZT10



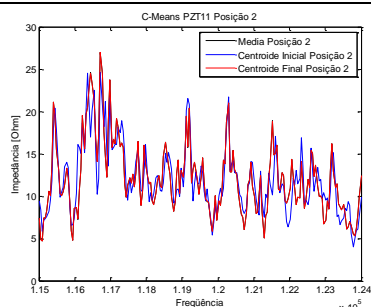
Posição 3 –PZT10



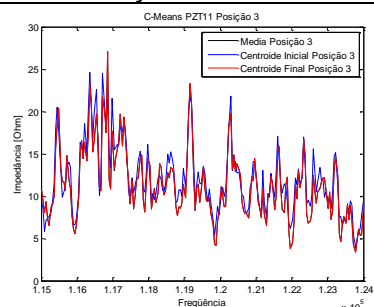
Baseline –PZT11



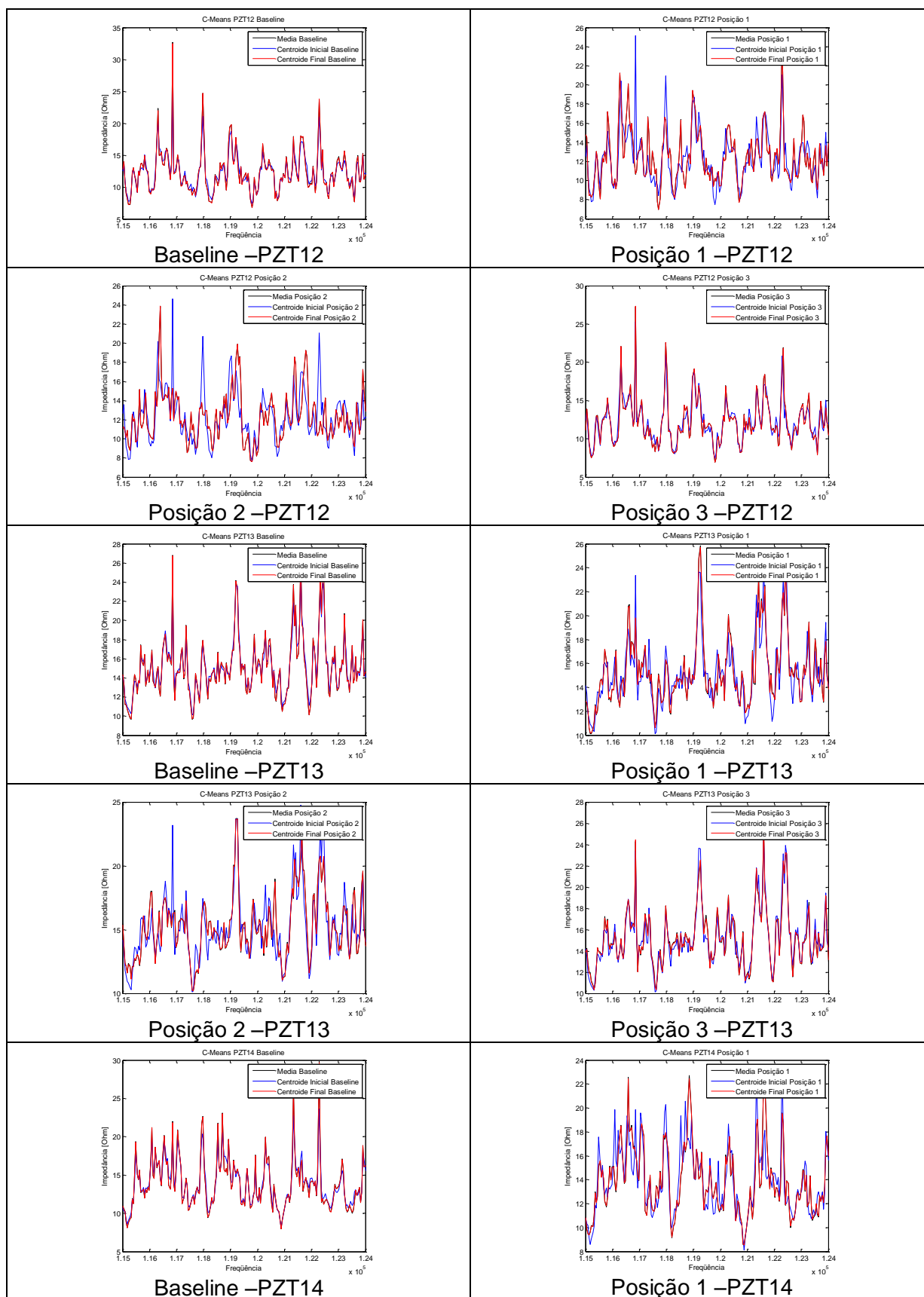
Posição 1 –PZT11

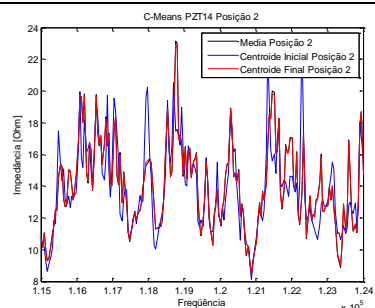


Posição 2 –PZT11

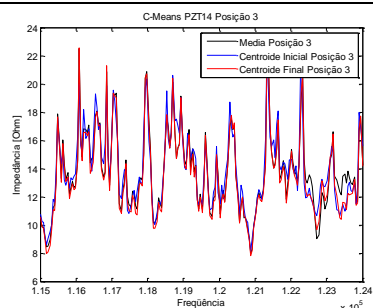


Posição 3 –PZT11

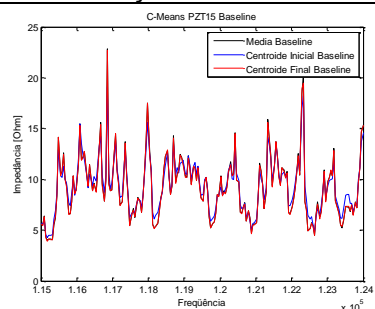




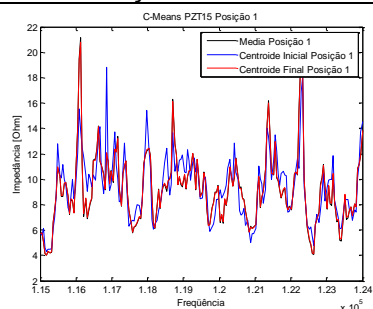
Posição 2 –PZT14



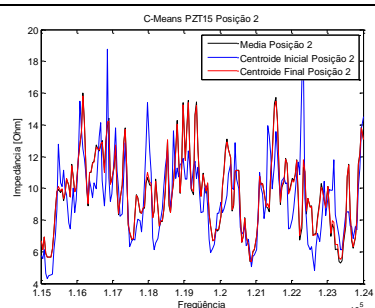
Posição 3 –PZT14



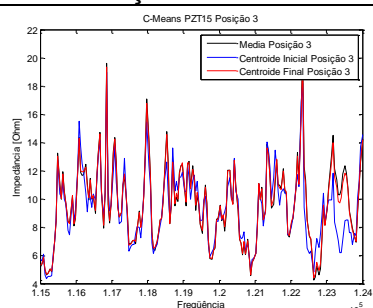
Baseline –PZT15



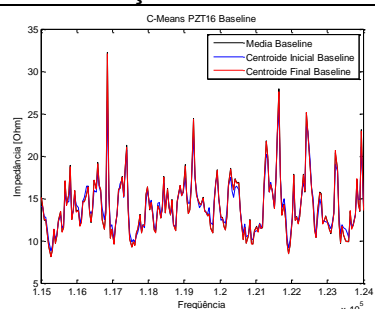
Posição 1 –PZT15



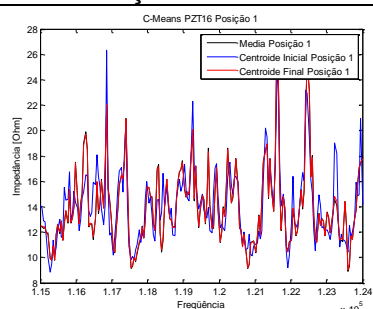
Posição 2 –PZT15



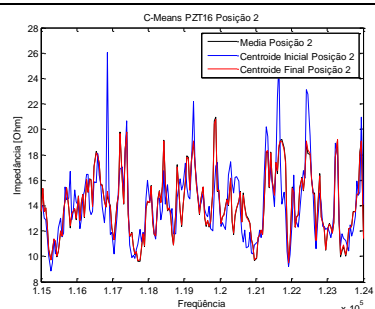
Posição 3 –PZT15



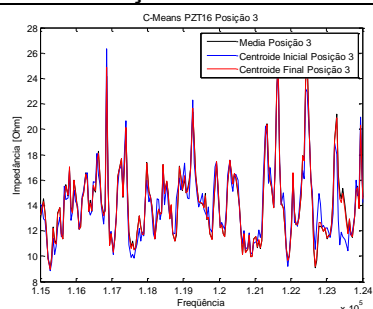
Baseline –PZT16



Posição 1 –PZT16

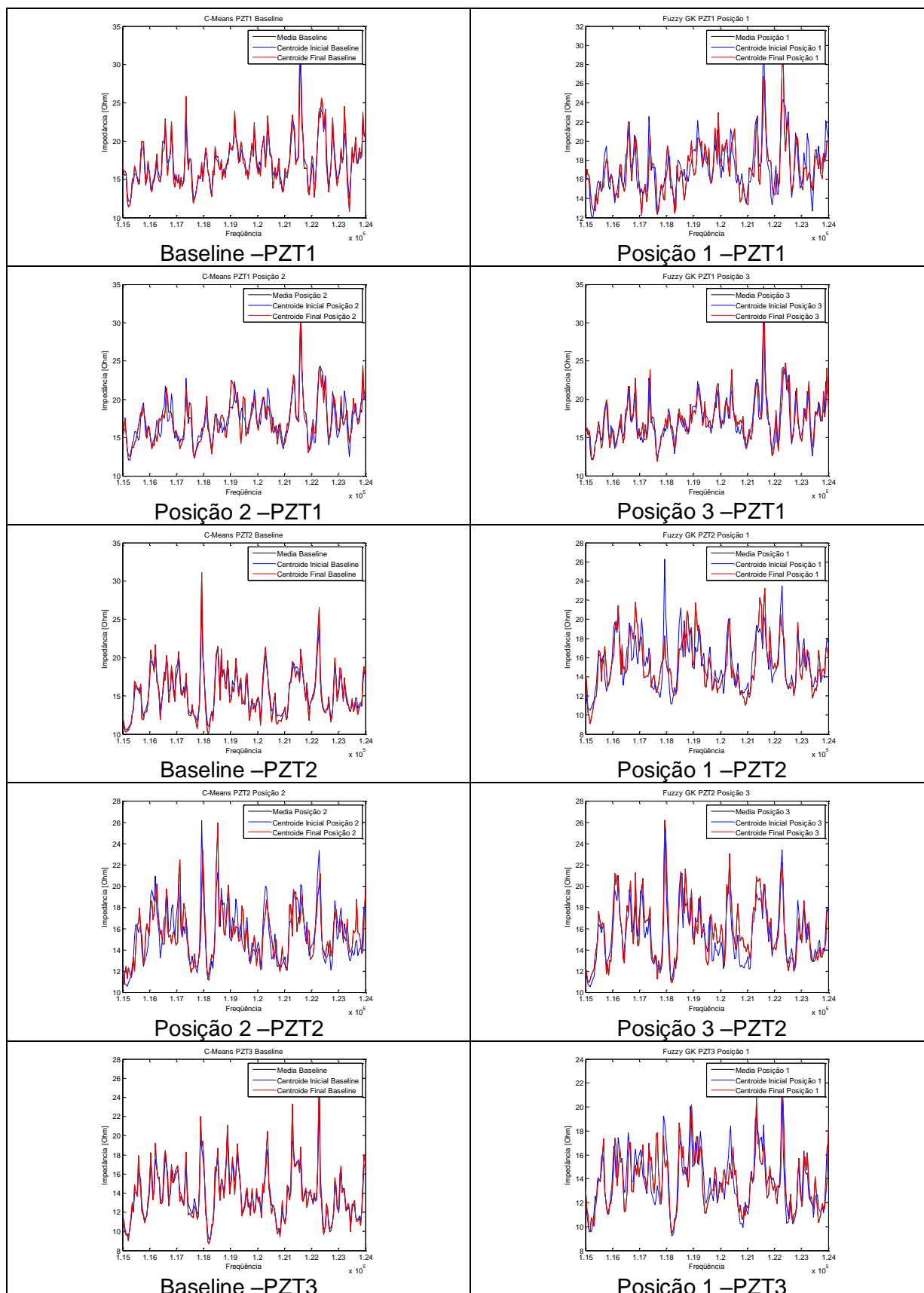


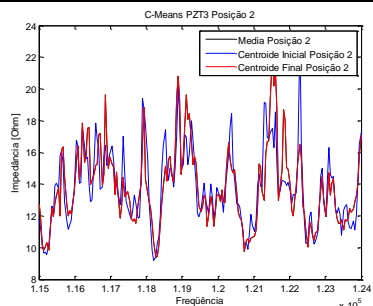
Posição 2 –PZT16



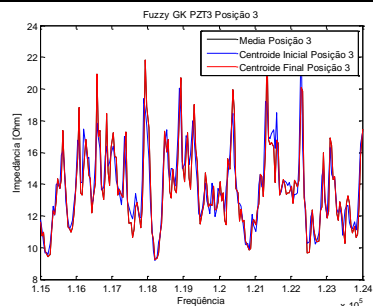
Posição 3 –PZT16

Tabela A1.8 – Gráficos dos centroides de cada um dos estados das pastilhas de PZT da placa com 16 PZTs, Algoritmo de Gustafson-Kessel

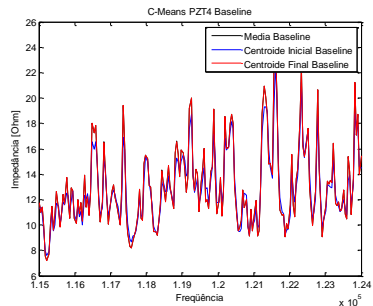




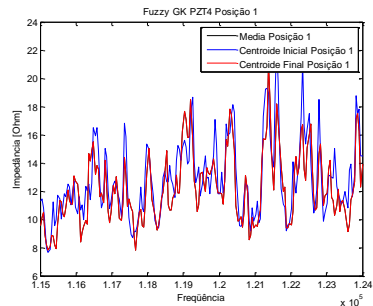
Posição 2 –PZT3



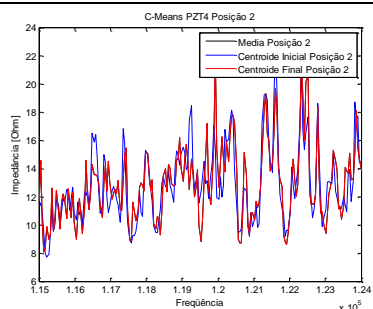
Posição 3 –PZT3



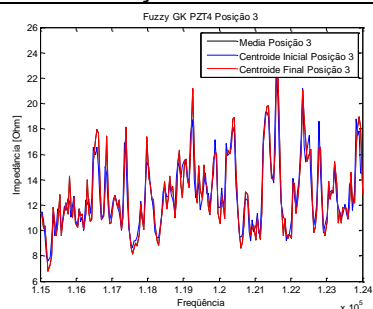
Baseline –PZT4



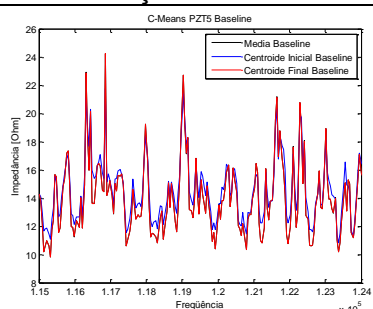
Posição 1 –PZT4



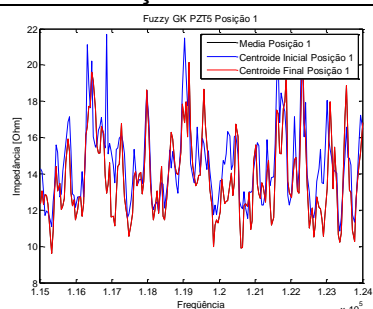
Posição 2 –PZT4



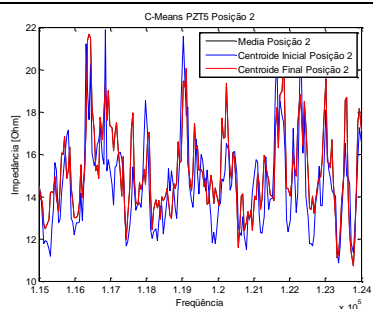
Posição 3 –PZT4



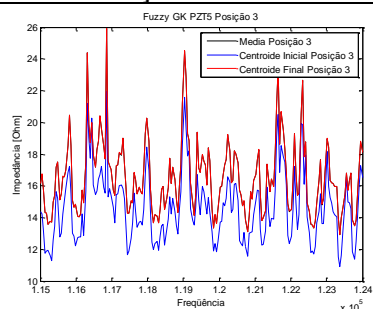
Baseline –PZT5



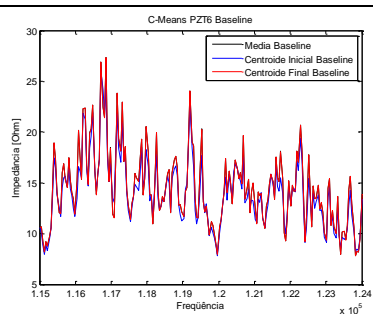
Posição 1 –PZT5



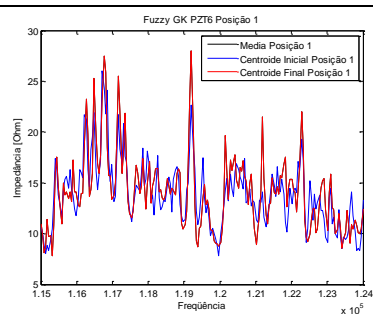
Posição 2 –PZT5



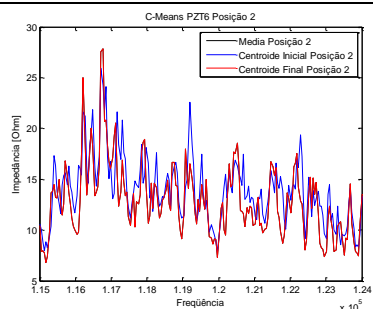
Posição 3 –PZT5



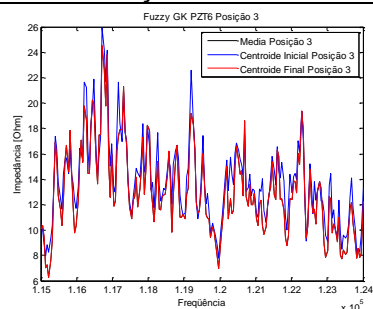
Baseline –PZT6



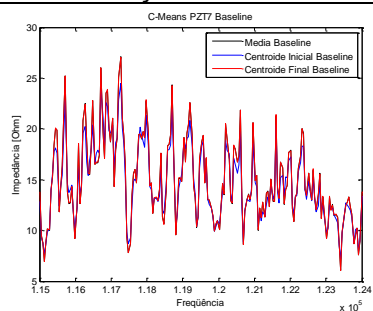
Posição 1 –PZT6



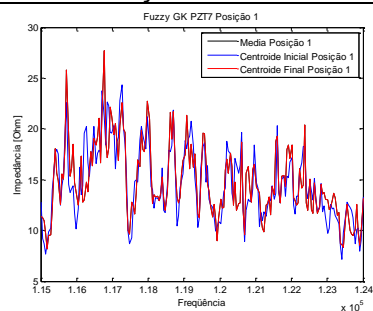
Posição 2 –PZT6



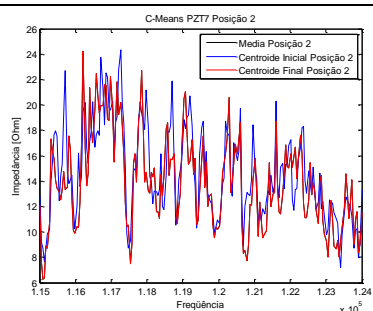
Posição 3 –PZT6



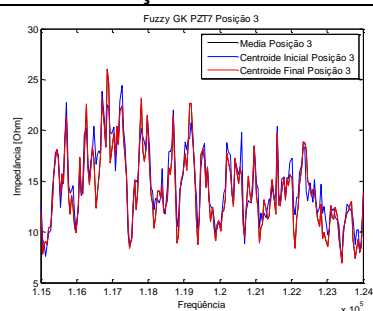
Baseline –PZT7



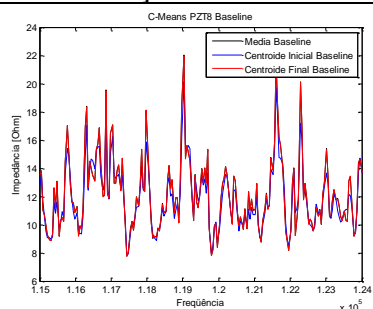
Posição 1 –PZT7



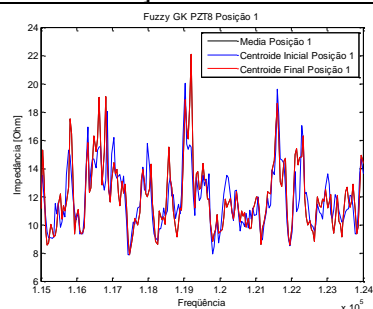
Posição 2 –PZT7



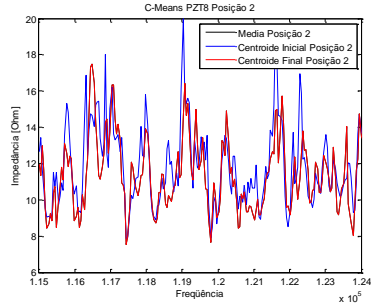
Posição 3 –PZT7



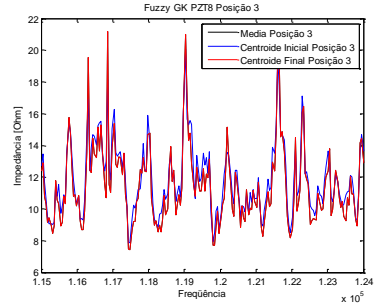
Baseline –PZT8



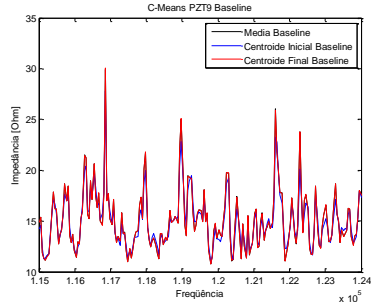
Posição 1 –PZT8



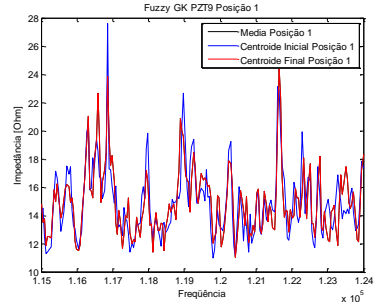
Posição 2 –PZT8



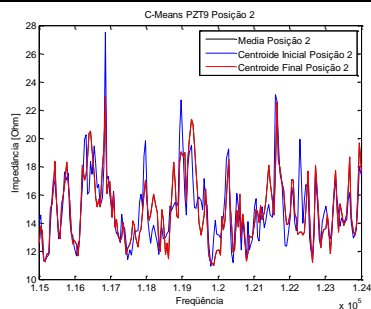
Posição 3 –PZT8



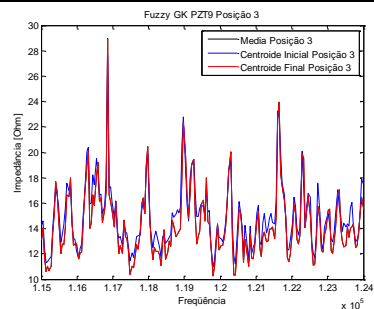
Baseline –PZT9



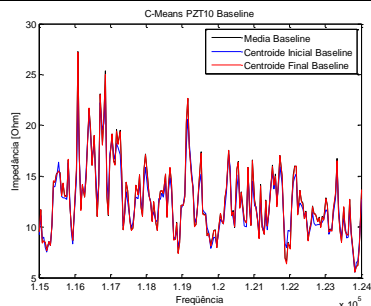
Posição 1 –PZT9



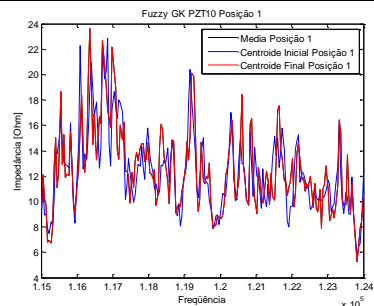
Posição 2 –PZT9



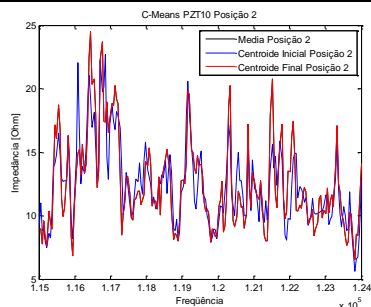
Posição 3 –PZT9



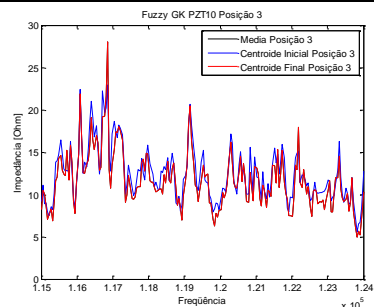
Baseline –PZT10



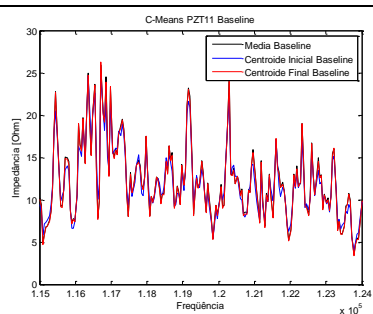
Posição 1 –PZT10



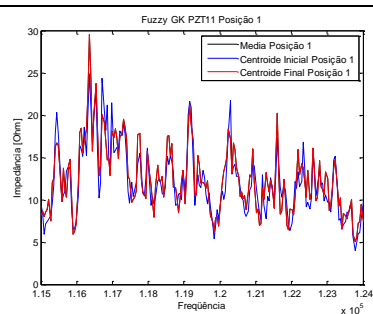
Posição 2 –PZT10



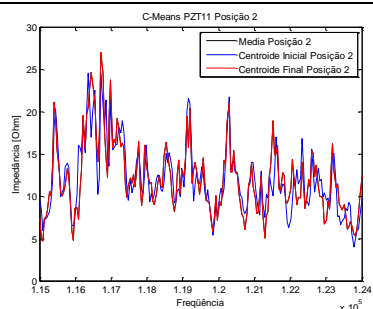
Posição 3 –PZT10



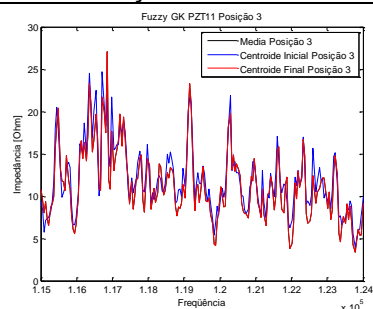
Baseline –PZT11



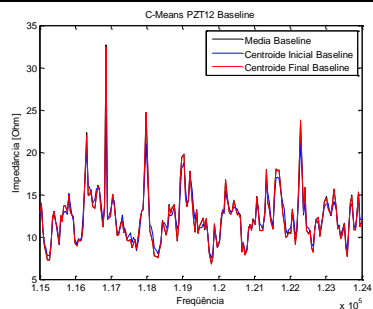
Posição 1 –PZT11



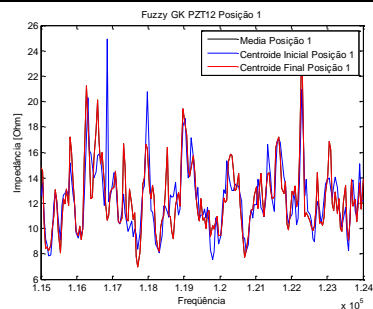
Posição 2 –PZT11



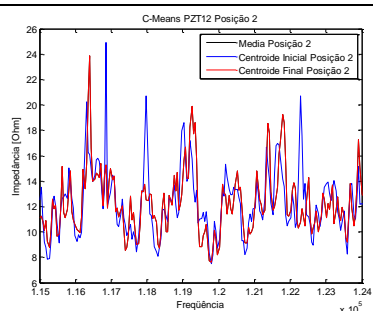
Posição 3 –PZT11



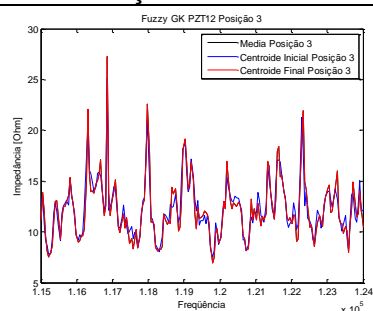
Baseline –PZT12



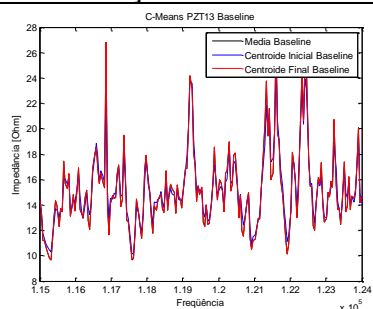
Posição 1 –PZT12



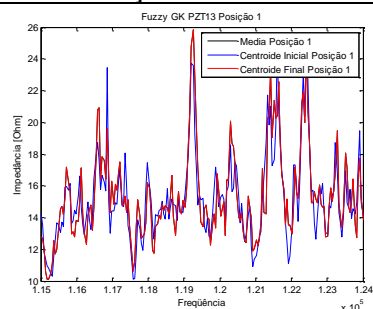
Posição 2 –PZT12



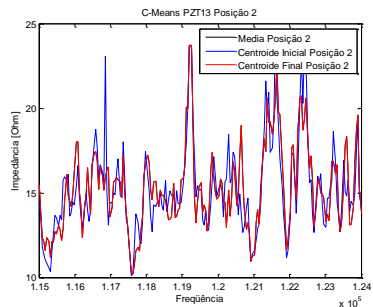
Posição 3 –PZT12



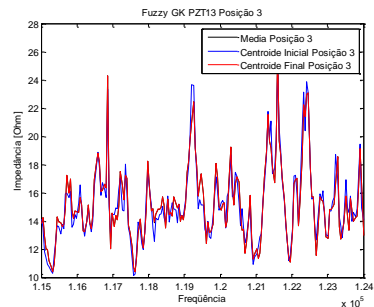
Baseline –PZT13



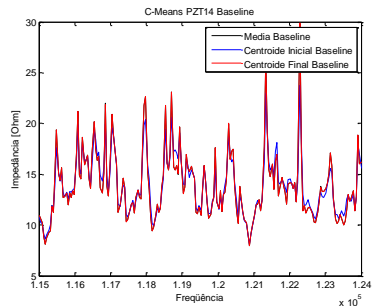
Posição 1 –PZT13



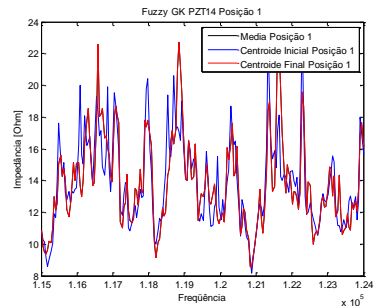
Posição 2 –PZT13



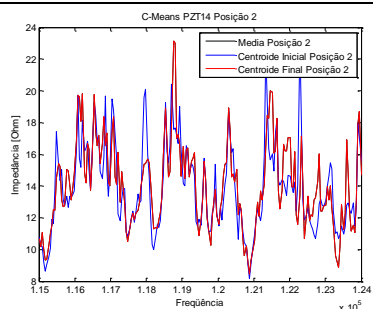
Posição 3 –PZT13



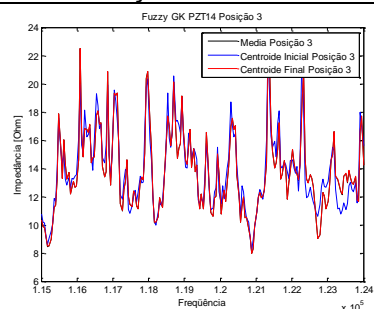
Baseline –PZT14



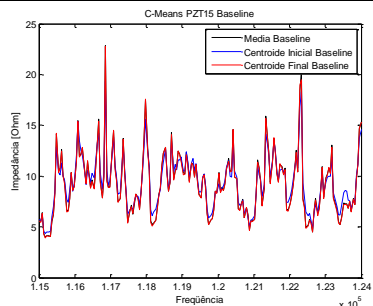
Posição 1 –PZT14



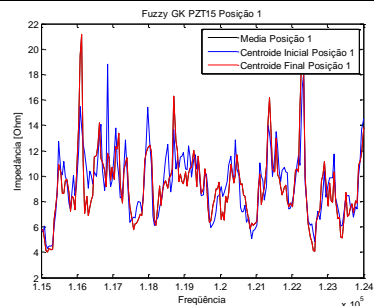
Posição 2 –PZT14



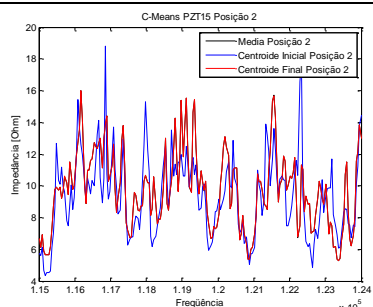
Posição 3 –PZT14



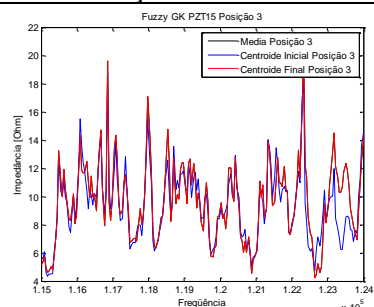
Baseline –PZT15



Posição 1 –PZT15



Posição 2 –PZT15



Posição 3 –PZT15

