



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"  
Campus de Ilha Solteira

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

***METODOLOGIAS PARA RECONHECIMENTO DE PADRÕES EM  
SISTEMAS SHM UTILIZANDO A TÉCNICA DA IMPEDÂNCIA  
ELETROMECAÂNICA (E/M)***

Camila Gianini Gonsalez

**Orientador:** Prof. Dr. Vicente Lopes Junior

**Co-Orientador:** Prof. Dr. Samuel da Silva

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia - UNESP – Campus de Ilha Solteira, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.  
Área de Conhecimento: Mecânica dos Sólidos

Ilha Solteira – SP

02/2012

## FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação  
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da UNESP - Ilha Solteira.

C639m	<p>Gonsalez, Camila Gianini. Metodologias para reconhecimento de padrões em sistemas SHM utilizando a técnica da Impedância Eletromecânica (E/M) / Camila Gianini Gonsalez. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2012 116 f. : il.</p> <p>Dissertação (mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de Conhecimento: Mecânica dos Sólidos, 2012</p> <p>Orientador: Vicente Lopes Junior Co-orientador: Samuel da Silva</p> <p>1. Materiais piezelétricos. 2. Monitoramento da integridade estrutural. 3. Impedância (Eletricidade). 4. Técnica da impedância eletromecânica. 5. Agrupamento <i>Fuzzy c-means</i>. 6. Análise de variância. 7. Análise de variância (ANOVA).</p>
-------	--



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Metodologias para Reconhecimento de Padrões em Sistemas SHM Utilizando a Técnica da Impedância Eletromecânica (E/M)

AUTORA: CAMILA GIANINI GONSALEZ

ORIENTADOR: Prof. Dr. VICENTE LOPES JUNIOR

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. SAMUEL DA SILVA

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica,  
Área: MECANICA DOS SÓLIDOS, pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. VICENTE LOPES JUNIOR  
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. MICHAEL JOHN BRENNAN

Prof. Dr. CARLOS ALBERTO CIMINI JUNIOR  
Universidade Estadual de Campinas / Departamento de Projeto Mecânico

Data da realização: 24 de fevereiro de 2012.

---

*Aos meus pais, Miguel e Iracema,  
ao professor Samuel e,  
a um anjo, Douglas.*

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus e a toda minha família por, de várias maneiras, sempre estarem junto a mim.

Aos membros da banca examinadora; professores Vicente Lopes Junior, Mike Brennan e Carlos Alberto Cimini Junior. Obrigada pela participação e contribuição para este trabalho.

Ao professor Vicente Lopes Junior pelos cinco anos de orientação, por todo o apoio, pelas ajudas e oportunidades que me proporcionou.

Ao professor Samuel da Silva pelas orientações, conversas, inúmeras idéias para este trabalho, ajudas e oportunidades.

Ao professor Mike Brennan e sua esposa, Laura Brennan, pelas orientações, por toda atenção, apoio e carinho que sempre tiveram comigo, principalmente durante o período que estive em *Southampton*.

Jamais poderia deixar de agradecer a duas pessoas muito importantes que me receberam no grupo GMSInt e me ensinaram muito, principalmente no início dos meus estudos; Douglas D. Bueno e Clayton R. Marqui, obrigada por cada minuto que se dedicaram aos meus estudos.

Em especial, agradeço ao Douglas por toda compreensão e atenção. E por sempre me motivar muito.

Aos meus colegas de grupo que, direta ou indiretamente, fizeram parte dos meus trabalhos; Simone Nishimoto de Souza, Victor Ramos Franco, Aldemir Ap. Cavalini Jr., Efrain Perini, Fabricio G. Baptista e Flavilene de Souza. Obrigada pela força!

Aos técnicos do Departamento de Engenharia Mecânica, Carlos José Santana (Grilo) e Reginaldo da Silva pelas inúmeras vezes que me ajudaram com meus experimentos.

Aos professores Gustavo Abreu, Gilberto Pechoto, João Antônio Pereira, Luiz de Paula do Nascimento, Eduardo Turra, Marcio Bazani, Josué Vieira Filho e Nobuo Oki por adicionais orientações durante o período do mestrado.

A alguns amigos e colegas especiais que foram muito importantes pra mim nessa fase; Andréia Brasil Ferreira, Aline Takiy, Flavilene de Souza, Manuel Rodrigo, José Carlos Ugaz, Renzo Grover, Miguel Parades, Cleiton Lazaro, Fabrício Lobato e Carlos Ilário. Obrigada pessoal!

Em especial, nessa última etapa, ao Yuri A. Ribeiro, a Alice R. Botteon e a Alexandra J. Norato. Obrigada pelo apoio!

A Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, a Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, ao Departamento de Engenharia Mecânica e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

*A University of Southampton e ao Institute of Sound and Vibration Research (ISVR).*

Ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq) e a FAPEMIG, através do INCT-EIE, pelos auxílios financeiros.

A ZF Sachs e a GM do Brasil pelo apoio recebido para finalização deste trabalho.

A Embraer S.A. pela doação do painel aeronáutico utilizado em parte dos estudos experimentais.

***“...Como ser humano, tenho uma responsabilidade ainda bem maior  
para com a família humana inteira.  
Na realidade, todos nós temos...”***

*Dalai –Lama*

## **Resumo**

Pesquisadores de diversas partes do mundo se empenham em desenvolver técnicas capazes de monitorar a integridade de máquinas, veículos e estruturas, principalmente as que a ruptura ou destruição possa provocar acidentes e catástrofes. Neste contexto, várias técnicas não destrutivas podem ser utilizadas para monitorar estes sistemas permitindo a realização de reparos e, evitando maiores prejuízos econômicos e danos sociais. A técnica da Impedância Eletromecânica está entre as técnicas baseadas na utilização de materiais piezelétricos e, particularmente, utiliza-se de uma curva sensível a pequenas variações na estrutura, característica que faz a técnica ser eficiente na detecção de danos incipientes. No entanto, sob variações das condições ambiente e de teste, a sensibilidade da técnica pode produzir falsos diagnósticos. Desta forma, o desafio atual é aplicar a técnica da Impedância Eletromecânica em sistemas de monitoramento considerando condições mais próximas às condições de operação reais dos sistemas a serem monitorados. Este trabalho apresenta duas metodologias para sistemas *SHM*, a primeira consiste em utilizar a técnica de agrupamento *Fuzzy c-means* para entender e considerar o efeito da temperatura nos sinais da Impedância Eletromecânica. A segunda metodologia utiliza análise de variância (*ANOVA*) para propor uma metodologia de detecção mais robusta, e assim, incorporar variações aleatórias nos sistemas de medição e aquisição sem comprometer o diagnóstico *SHM*.

**Palavras-chave:** Materiais Piezelétricos. Monitoramento da integridade estrutural. Técnica da impedância eletromecânica. Agrupamento *Fuzzy c-means*. Análise de variância (*ANOVA*).

## **Abstract**

*Researchers around the world are engaged to develop techniques for structural health monitoring of machinery, vehicles and structures, especially systems where damage or destruction could induce accidents and disasters. In this context, several non-destructive techniques can be used to monitor these systems allowing repairs and avoiding major economic losses or social losses. The electromechanical impedance technique is among the techniques based on piezoelectric materials use and it is sensible to small variations in the structure which makes it efficient in detecting incipient damages. However, variations in the ambient or test conditions can cause false diagnoses. Therefore, the current challenge is to apply the electromechanical impedance technique considering monitoring conditions closer to real operating conditions of the systems to be monitored. This work presents two methodologies for SHM systems. The first one uses Fuzzy c-means clustering to distinguish the temperature effect on impedance signal. The second method uses analysis of variance (ANOVA) to propose a more robust detection methodology and thus incorporate random variations in measurement systems and acquisition without loss of SHM diagnostic.*

**Keywords:** Piezoelectric Materials. Structural health monitoring. Electromechanical impedance. Fuzzy c-means clustering. Analysis of variance (ANOVA).

## LISTA DE FIGURAS

- 1 – Buraco no *Boeing 737-300* (N632SW) da companhia aérea *Southwest Airlines*. (a) Parte externa (Foto: Don Nelson / AP); (b) Parte interna da aeronave (Foto: Christine Ziegler / AP).....22
- 2 - Ilustração da relação cargas elétricas *versus* variações dimensionais; (a) Efeito direto, característico de sensores; (b) Efeito inverso, característico de atuadores .....23
- 3 – Ilustração da relação cargas elétricas *versus* variações dimensionais; (a) Cristal piezelétrico cilindro; (b) Efeito direto; (c) Efeito Indireto .....27
- 4 – Desenho esquemático de um sistema de controle ativo .....28
- 5 – Desenho esquemático de sistemas *SHM* .....29
- 6 – Desenho esquemático ilustrando um sistema de aproveitamento de energia ambiental .....30
- 7 – Nanotecnologia que utiliza nanofitas de PZT proposta por Qi et al. (2010).....31
- 8 - Estrutura perovkista de uma cerâmica piezelétrica; (a) Forma simétrica; (b) Forma assimétrica .....32
- 9 - Processo de fabricação de uma cerâmica piezelétrica; (a) aquecimento em alta temperatura; (b) aplicação de um campo elétrico elevado e (c) orientação final dos dipolos .....33
- 10 - Modelo utilizado para representar um sistema eletromecânico acoplado .....38
- 11 - Modelo de um sistema eletromecânico acoplado considerando a camada de adesivo .....39
- 12 - Aparatos Experimentais utilizados por alguns pesquisadores para implementação da técnica da impedância E/M; (a) Viga composta (Peairs et al., 2004); (b) Aerofólio Vertical de um UAV (Moura e Steffen, 2006) ; (c) Rede de tubulações (Park et al., 2001) ; (d) Parede de concreto armado (Park e Inman, 2007) .....41
- 13 - Sistema de medição da Impedância E/M proposto por Baptista e Vieira Filho (2009) .....42

14 - <i>Clusters</i> com diferentes formas e dimensões no espaço $R^2$ ; (a) Esférico; (b) Alongado; (c) Concêntrico; (d) Concêntrico .....	46
15 – Viga de alumínio na condição livre-livre .....	50
16 – Propriedades geométricas dos <i>buzzers</i> .....	50
17 – Montagem experimental utilizada na aplicação.....	51
18 - Imagens dos componentes utilizados para simular os danos; (a) Dano 1 - grampo (massa = 1.1g); (b) Dano 2 - dois imãs (massa total = 4.1g).....	52
19 - Impedância E/M; (a) Módulo; (b) Parte real; (c) Parte imaginária .....	53
20 - Distribuição dos índices ( $I_R$ vs. $I_I$ ).....	54
21 - Porcentagem de cada elemento pertencer a um determinado <i>cluster</i> .....	55
22 - Esboço do mapa de <i>baselines</i> secundários.....	58
23 - Índice de diagnose da condição estrutural ( $\vec{I}_{sc}$ ) para o <i>i-ésimo cluster</i> .....	59
24 - Região no mapa de <i>baselines</i> em torno de um <i>cluster</i> qualquer .....	60
25 - Imagem do componente utilizado para simular o dano 1 (massa = 3g).....	61
26 - Impedância E/M; (a) módulo; (b) parte real; (c) parte imaginária .....	63
27 - Mapa de <i>baselines</i> construídos a partir dos valores de referencia .....	64
28 - Probabilidade de cada ponto de referência pertencer a um <i>cluster</i> .....	65
29 - Índices referentes aos testes com a inclusão do dano 1.....	67

30 - Índices referentes aos testes com a inclusão do dano 2 .....	67
31 - Índices referentes aos testes de verificação de falso positivo (sem de dano) .....	68
32 - Propriedades geométricas dos <i>buzzers</i> .....	81
33 - Imagens do painel aeronáutico utilizado nos testes experimentais; (a) Vista frontal - posições dos <i>PZTs</i> e do dano; (b) Vista mostrando o suporte metálico – condições de contorno do painel.....	82
34 - <i>Setup</i> experimental utilizado (dimensões em mm) .....	83
35 - Sinais experimentais utilizados para compor o sinal <i>baseline</i> para o <i>PZT1</i> ; (a) Módulo dos sinais de impedância; (b) Parte real; (c) Parte imaginária e (d) Fase do sinal .....	85
36 - Sinais experimentais utilizados para compor o sinal <i>baseline</i> para o <i>PZT2</i> ; (a) Módulo dos sinais de impedância; (b) Parte real; (c) Parte imaginária e (d) Fase do sinal .....	86
37 - Sinais experimentais utilizados para compor o sinal <i>baseline</i> para o <i>PZT3</i> ; (a) Módulo dos sinais de impedância; (b) Parte real; (c) Parte imaginária e (d) Fase do sinal .....	87
38 - Índices RMSD calculados a partir dos sinais extraídos do <i>PZT1</i> utilizando; (a) o módulo dos sinais de impedância; (b) Parte real; (c) Parte imaginária e (d) Fase do sinal .....	89
39 - Índices RMSD calculados a partir dos sinais extraídos do <i>PZT2</i> utilizando; (a) o módulo dos sinais de impedância; (b) Parte real; (c) Parte imaginária e (d) Fase do sinal .....	90
40 - Índices RMSD calculados a partir dos sinais extraídos do <i>PZT3</i> utilizando; (a) o módulo dos sinais de impedância; (b) Parte real; (c) Parte imaginária e (d) Fase do sinal .....	91
41 - Resíduos calculados a partir dos índices RMSD para o <i>PZT1</i> utilizando; (a) o módulo dos sinais de impedância; (b) Parte real; (c) Parte imaginária e (d) Fase do sinal .....	93

- 42 - Resíduos calculados a partir dos índices RMSD para o PZT2 utilizando; (a) o módulo dos sinais de impedância; (b) Parte real; (c) Parte imaginária e (d) Fase do sinal .....94
- 43 - Resíduos calculados a partir dos índices RMSD para o PZT3 utilizando; (a) o módulo dos sinais de impedância; (b) Parte real; (c) Parte imaginária e (d) Fase do sinal .....95
- 44 - Comparação de médias (teste de Tukey) a partir dos resultados obtidos na ANOVA dos dados aquisitados do PZT1, utilizando; (a) Módulo do sinal de impedância E/M; (b) Parte real; (c) Parte imaginária; (d) Fase do sinal.....100
- 45 - Comparação de médias (teste de Tukey) a partir dos resultados obtidos na ANOVA dos dados aquisitados do PZT2, utilizando; (a) Módulo do sinal de impedância E/M; (b) Parte real; (c) Parte imaginária; (d) Fase do sinal.....102
- 46 - Comparação de médias (teste de Tukey) a partir dos resultados obtidos na ANOVA dos dados aquisitados do PZT3, utilizando; (a) Módulo do sinal de Impedância E/M; (b) Parte real; (c) Parte imaginária; (d) Fase do sinal.....104

## LISTA DE TABELAS

1 -	Propriedades geométricas da viga.....	50
2 -	Resumo das condições de testes: agrupamento por temperatura .....	51
3 -	Dados para a construção do mapa de <i>baselines</i> .....	51
4 -	Descrição e objetivo dos testes .....	62
5 -	Valores de $\ \vec{p}\ $ para cada <i>cluster</i> .....	64
6 -	Resultados dos testes obtidos com a nova metodologia .....	66
7 -	Índices obtidos para cada sinal .....	73
8 -	<i>ANOVA table</i> para um experimento .....	76
9 -	Condições estruturais testadas (a posição do dano pode ser observada na Fig.4.3).....	83
10 -	Faixas de sensibilidade (em frequência) para cada <i>PZT</i> .....	88
11 -	<i>ANOVA table</i> para os índices calculados a partir dos módulos dos sinais extraídos do <i>PZT1</i> .....	96
12 -	<i>ANOVA table</i> para os índices calculados a partir das partes reais dos sinais extraídos do <i>PZT1</i> .....	96
13 -	<i>ANOVA table</i> para os índices calculados a partir das partes imaginárias dos sinais extraídos do <i>PZT1</i> .....	96
14 -	<i>ANOVA table</i> para os índices calculados a partir das fases dos sinais extraídos do <i>PZT1</i> .....	97

15 - ANOVA table para os índices calculados a partir dos módulos dos sinais extraídos do PZT2 .....	97
16 - ANOVA table para os índices calculados a partir das partes reais dos sinais extraídos do PZT2.....	97
17 - ANOVA table para os índices calculados a partir das partes imaginárias dos sinais extraídos do PZT2.....	97
18 - ANOVA table para os índices calculados a partir das fases dos sinais extraídos do PZT2 .....	98
19 - ANOVA table para os índices calculados a partir dos módulos dos sinais extraídos do PZT3.....	98
20 - ANOVA table para os índices calculados a partir das partes reais dos sinais extraídos do PZT3.....	98
21 - ANOVA table para os índices calculados a partir das partes imaginárias dos sinais extraídos do PZT3.....	98
22 - ANOVA table para os índices calculados a partir das fases dos sinais extraídos do PZT3 .....	99
23 - p-valores encontrados nas análises de variâncias .....	99

## LISTA DE SÍMBOLOS

$u, k, q, z$ e $p$	Contadores
$j$	Número complexo imaginário puro (0,1)
$D$	Deslocamento elétrico
$T$	Tensão mecânica,
$E$	Campo elétrico
$\varepsilon$	Permissividade dielétrica
$\bar{\varepsilon}_{33}^T$	Constante dielétrica sob campo de tensão nulo
$e$	Constante piezolétrica
$S$	Deformação do material
$c$	Constante de rigidez elástica
$d_{3x}^2$	Constante de acoplamento piezolétrico na direção $x$
$\hat{Y}_{xx}^E$	Módulo de Young complexo do <i>PZT</i> submetido a um campo elétrico nulo
$V$	Diferença de potencial
$I$	Corrente elétrica
$\omega$	Frequência
$Z_E$	Impedância elétrica
$Z_M$	Impedância mecânica
$Z_s(\omega)$	Impedância mecânica da estrutura
$Z_a(\omega)$	Impedância mecânica do atuador
$F$	Força
$U$	Velocidade
$Y$	Admitância

$a$	Constante geométrica do PZT
$\delta$	Fator de perda dielétrica do PZT
$f_{iz}$	função associada com o $z$ -ésimo objeto do $i$ -ésimo <i>cluster</i>
$C_i$	Centróide do $i$ -ésimo <i>cluster</i>
$c$	Número de <i>clusters</i>
$m$	Constante que determina as posições relativas dos <i>clusters</i>
$x_z$	Característica representativa
$N$	Número de objetos
$A$	Matriz com norma-induzida
$I_A$	Índice de Sensibilidade da amplitude do sinal de Impedância Eletromecânica
$I_I$	Índice de Sensibilidade da parte Imaginária do sinal de Impedância Eletromecânica
$I_R$	Índice de Sensibilidade da parte real do sinal de Impedância Eletromecânica
$I_\phi$	Índice de Sensibilidade da fase do sinal de Impedância Eletromecânica
$\bar{I}_R$	Índice local relacionado a parte real
$\bar{I}_I$	Índice local relacionado a parte imaginária
$Am()$	Amplitude do sinal de Impedância Eletromecânica
$Re()$	Parte real do sinal de Impedância Eletromecânica
$Im()$	Parte imaginária do sinal de Impedância Eletromecânica
$\phi()$	Representa a fase do sinal de Impedância Eletromecânica
$Z_{p,base}$	Impedância Eletromecânica na condição <i>baseline</i>
$Z_{p,unk}$	Impedância Eletromecânica na condição estrutural desconhecida
$T_{min}$	Temperatura mínima
$T_{max}$	Temperatura máxima

$T_{ref}^i$	Temperatura de referência do <i>i</i> -ésimo intervalo
$N_{ref}$	Número de intervalos de Temperatura de referência
$N_T$	Número total de sinais medidos para cada temperatura
$N_{base}$	Número de sinais utilizados para determinar o <i>baseline</i> na temperatura de referência
$N_{unk}$	Número de sinais na condição desconhecida
$\mathbb{D}_{unk}$	Domínio que contém os sinais na condição estrutural desconhecida
$\vec{p}_i$	Vetor raio do <i>i</i> -ésimo <i>cluster</i>
$r_i$	Raio do <i>i</i> -ésimo <i>cluster</i>
$P_N$ e $P_{unk}$	Pontos contidos no plano $I_R \times I_I$
$I_{sc}$	Índice de diagnose da condição estrutural
$H_0$	Hipótese da nulidade
$H_1$	Hipótese alternativa
$\mu_h$	Valores médios - médias verdadeiras
$k$	Número de tratamentos
$\alpha$	Nível de significancia do teste
$GL_{trat}$	Graus de liberdade de tratamento
$GL_{tot}$	Graus de liberdade total
$GL_{res}$	Graus de liberdade de resíduo
$r$	Número de repetições
$n$	Número total de dados
$C$	Correção
$SQT$	Soma de quadrados do valor de correção
$SQT_r$	Soma de quadrados de tratamentos

$SQR$	Soma de quadrados de resíduo
$QMT_r$	Quadrado médio de tratamentos
$QMR$	Quadrado médio de resíduo
$F$	Valor $F$
$Y_{hl}$	Valor do dado real
$y_h$	Valor médio - estimativas das médias verdadeiras
$\varepsilon_{hl}$	Erros – valores verdadeiros
$e_{hl}$	Resíduos
$Z_h$	Resíduos padronizados
$\Delta$	Diferença mínima que deve haver entre duas médias
$q$	Amplitude estudentizada
$C$	Símbolo de contido

## SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - 21INTRODUÇÃO .....	21
1.1 Objetivo do trabalho .....	24
1.2 Organização do trabalho .....	24
CAPÍTULO 2 - INTRODUÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	26
2.1 Conceitos básicos .....	26
2.2 Cerâmicas Piezelétricas .....	31
2.3 Equações Constitutivas da Piezeletricidade Linear .....	33
2.4 Monitoramento da Integridade Estrutural ( <i>SHM</i> ) .....	34
2.5 Técnica da Impedância Eletromecânica (E/M) aplicada a sistemas <i>SHM</i> .....	37
2.6 Conclusões e Considerações finais .....	43
CAPÍTULO 3 - RECONHECIMENTO DE PADRÕES CONSIDERANDO VARIAÇÕES DA TEMPERATURA AMBIENTE.....	44
3.1 Agrupamento <i>Fuzzy c-means</i> .....	45
3.1.1 Algoritmo <i>Fuzzy c-means</i> .....	46
3.2 Índices de Sensibilidades.....	47
3.2.1 Índice de Sensibilidade da parte Imaginária ( $I_I$ ) .....	48
3.2.2 Índice de Sensibilidade da parte real ( $I_R$ ).....	48
3.3 Separação dos Sinais em <i>Clusters</i> .....	29
3.3.1 Descrição dos Testes Experimentais .....	29
3.3.2 Resultados e Discussões .....	52
3.3.3 Conclusões.....	55
3.4 Separação dos <i>Baselines</i> em <i>Clusters</i> .....	56
3.4.1 Mapa de <i>Baselines</i> secundários.....	57
3.4.2 Regras de Decisão .....	58

<i>3.4.3</i>	<i>Descrição dos Testes Experimentais</i>	<i>60</i>
<i>3.4.4</i>	<i>Resultados e Discussões</i>	<i>62</i>
<i>3.4.5</i>	<i>Conclusões e considerações finais</i>	<i>68</i>
	<b>CAPÍTULO 4 - RECONHECIMENTO DE PADRÕES USANDO ANÁLISE DE VARIÂNCIA</b>	<b>70</b>
<b>4.1</b>	<b>Análise de Variância (ANOVA)</b>	<b>71</b>
<i>4.1.1</i>	<i>Procedimentos de Cálculo da ANOVA</i>	<i>73</i>
<i>4.1.2</i>	<i>Pressupostos básicos para se fazer uma ANOVA</i>	<i>76</i>
<i>4.1.3</i>	<i>Comparação de Médias</i>	<i>59</i>
<b>4.2</b>	<b>Índices de sensibilidades</b>	<b>80</b>
<b>4.3</b>	<b>Descrição do experimento</b>	<b>81</b>
<b>4.4</b>	<b>Resultados e Discussões</b>	<b>84</b>
<b>4.5</b>	<b>Conclusões e Considerações finais</b>	<b>106</b>
	<b>CAPÍTULO 5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>107</b>
<b>5.1</b>	<b>Conclusões</b>	<b>107</b>
<b>5.2</b>	<b>Propostas de Continuidade</b>	<b>108</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>110</b>
	<b>APÊNDICE A - TRABALHOS PUBLICADOS</b>	<b>115</b>

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

Diante da constante busca por desenvolvimento tecnológico, um dos maiores desafios atuais relacionados à integridade de estruturas civis e mecânicas consiste em impedir que grandes acidentes ocorram, como por exemplo, acidentes envolvendo meios de transporte em massa que podem provocar a morte de dezenas de pessoas e gerar desperdícios econômicos. Sem falar, em catástrofes ambientais que podem resultar em contaminações e mortes de seres vivos.

Motivados por este contexto, pesquisadores de diversas partes do mundo se empenham em desenvolver técnicas capazes de monitorar a integridade de estruturas, cuja ruptura ou destruição, mesmo que parcial, possa provocar acidentes.

Monitorar a integridade estrutural consiste em detectar danos em estados incipientes, intervir na sua propagação e, conseqüentemente, impedir a ocorrência de falha no funcionamento da estrutura (rompimento). Esta importante e atual área de pesquisa é denominada Monitoramento da Integridade Estrutural, ou *SHM* (do inglês, *Structural Health Monitoring*).

O exemplo recente de um acidente poderia ter causado grandes perdas ocorreu em um *Boeing 737-300* (N632SW) da companhia aérea *Southwest Airlines*. Um buraco aberto na parte superior da aeronave, Figura 1, fez com que a aeronave perdesse pressão logo após a

decolagem. Após o pouso em segurança, a tripulação descobriu um buraco de cerca de um metro e meio no teto da aeronave. Essa não foi a primeira vez que uma fuselagem de um *Boeing 737* se rompeu durante o voo. Em 2009, no Voo 2294 da *Southwest Airlines*, um outro *Boeing 737-300*, passou por uma rápida descompressão após um buraco ter sido aberto na fuselagem (VALDUGA, 2011).

Figura 1 – Buraco no *Boeing 737-300* (N632SW) da companhia aérea *Southwest Airlines*.



(a) Parte externa (Foto: Don Nelson / AP); (b) Parte interna da aeronave (Foto: Christine Ziegler / AP).  
Fonte: Valduga (2011).

Neste caso, sistemas de monitoramento da integridade estrutural instalados na fuselagem das aeronaves poderiam ter evitado os acidentes. Estes sistemas detectariam a possível presença de danos (em estado inicial) e alertaria o comando de voo da necessidade de parada para manutenção. Tal sistema de monitoramento poderia ser capaz não apenas de indicar a presença do possível dano, mas também indicar a possível localização do mesmo.

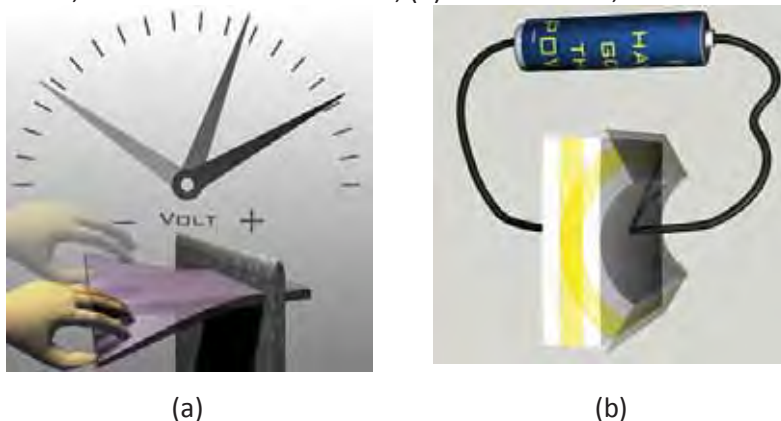
Basicamente, os sistemas de monitoramento da integridade estrutural são constituídos de sensores distribuídos pela estrutura, que enviam sinais para uma central de processamento, responsável por analisar os dados e apresentar um diagnóstico. É possível fazer uma analogia entre um sistema *SHM* e o sistema nervoso humano. Os sensores são como os terminais nervosos e a central de processamento como o cérebro humano, capaz de perceber alterações e, até mesmo, intervir na solução de problemas.

O monitoramento de uma estrutura, dependendo do tipo de aplicação (estrutura monitorada), pode se basear em diversas técnicas não destrutivas, denominadas *NDE* (*Non-*

*Destructive Evaluation*). Dentre elas, podemos citar inspeção por partículas magnéticas, correntes de *Eddy*, análise de deformações, técnicas utilizando fibras óticas, emissões acústicas, vácuo comparativo, propagação de ondas (ondas de *Lamb*) e impedância eletromecânica.

A técnica de monitoramento estrutural baseada na análise da impedância Eletromecânica pode utilizar um mesmo transdutor piezelétrico como sensor e atuador. No geral, este transdutor é uma cerâmica piezelétrica conhecida como *PZT* (*Leads Zirconate Titanate*). A ação dos transdutores piezelétricos é baseada na relação: cargas elétricas *versus* variações dimensionais do transdutor, que pode ser qualitativamente vista na Figura 2.

Figura 2 – Ilustração da relação cargas elétricas *versus* variações dimensionais; (a) Efeito direto, característico de sensores; (b) Efeito inverso, característico de atuadores.



Fonte: Marqui (2007)

A curva da impedância Eletromecânica é sensível a variações estruturais e, por isso, alterações geradas pelos danos podem ser detectadas. Com isto, de forma superficial, o sistema *SHM* consiste em comparar um sinal de impedância Eletromecânica obtido para uma condição estrutural desconhecida com um sinal de referência obtido a partir da estrutura sem dano. Este sinal de referência é denominado sinal *baseline*.

Por outro lado, o sinal de impedância Eletromecânica também é sensível as variações das condições ambientais, como diferenças de pressão, temperatura, entre outras. Dessa

forma, a técnica exige algumas considerações para ser empregada no projeto de um sistema *SHM* em sistemas reais buscando robustez a variações ambientais e operacionais.

Visando atingir tal robustez, uma variedade de fatores e condições ainda deve ser considerada pela comunidade acadêmica. Entretanto, as variáveis que podem comprometer o desempenho de um sistema *SHM* são inúmeras e, então, analisar todas essas variáveis pode se tornar inviável.

Desta forma, metodologias capazes de considerar as influências geradas nos sistemas *SHM* devido a fatores não relacionados a danos, garantindo as coerências dos diagnósticos e decisões dos sistemas *SHM*, estão entre os grandes desafios atuais.

## **1.1 Objetivo do trabalho**

Este trabalho tem por objetivo aplicar a técnica da impedância Eletromecânica no monitoramento de estruturas considerando influência de alguns fatores externos durante a aquisição dos sinais. Duas aplicações experimentais são apresentadas visando se aproximar de situações reais de operação dos sistemas *SHM* e, desta forma, explorar a técnica de impedância Eletromecânica no contexto das influências externas. Algoritmos para tomada de decisões, técnicas estatísticas, bem como, regras de análise e interpretação dos resultados são utilizadas para propor metodologias de detecção de danos considerando a influência de alguns fatores externos.

## **1.2 Organização do trabalho**

Durante o período de mestrado os estudos desenvolvidos foram direcionados a produção de dois artigos científicos. Desta forma, os capítulos de aplicações estão estruturados de forma semelhante a tais artigos técnicos e, devido a esse motivo, grande parte das figuras é apresentada em língua inglesa.

A dissertação está estruturada em cinco capítulos, referências bibliográficas e um apêndice. Em detalhes, tem-se:

- Capítulo 1 – **Introdução**: apresenta uma introdução ao trabalho, objetivos e estrutura da dissertação;
- Capítulo 2 – **Introdução Teórica e Revisão Bibliográfica**: apresenta revisão dos princípios básicos relacionados aos principais temas envolvidos no trabalho: materiais piezelétricos, *SHM* e a técnica de impedância Eletromecânica, além de uma discussão relacionando os trabalhos existentes na literatura com a contribuição desse trabalho;
- Capítulo 3 – **Reconhecimento de Padrões Considerando Variações da Temperatura Ambiente**: apresenta uma metodologia de detecção de danos considerando variações da temperatura ambiente. Tal metodologia utiliza a técnica de agrupamento *Fuzzy c-means* e no decorrer do capítulo são apresentados, de forma sequencial, todos os estudos realizados para desenvolvimento da metodologia;
- Capítulo 4 – **Reconhecimento de Padrões Considerando Análise de Variâncias (ANOVA)**: apresenta uma metodologia de detecção de danos considerando influências aleatórias nas condições de teste. Tal metodologia utiliza análise de variância (*ANOVA*) aplicada a um conjunto de dados (amostras) visando aumentar a confiabilidade das características observadas, ou seja, do diagnóstico do sistema de monitoramento;
- Capítulo 5 – **Conclusões e Considerações finais**;
- **Referencias Bibliográficas**;
- **Apêndice A – Trabalhos Publicados**: Publicações em congressos e periódico durante o período do mestrado.

## CAPÍTULO 2

### INTRODUÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma introdução teórica e breve revisão bibliográfica dos tópicos gerais relacionados com o tema da dissertação: cerâmicas piezelétricas, monitoramento da integridade estrutural (*SHM*) e a técnica da impedância eletromecânica (*E/M*). Conceitos adicionais para o entendimento das técnicas abordados nos estudos de aplicações (próximos capítulos) são apresentados nos respectivos capítulos.

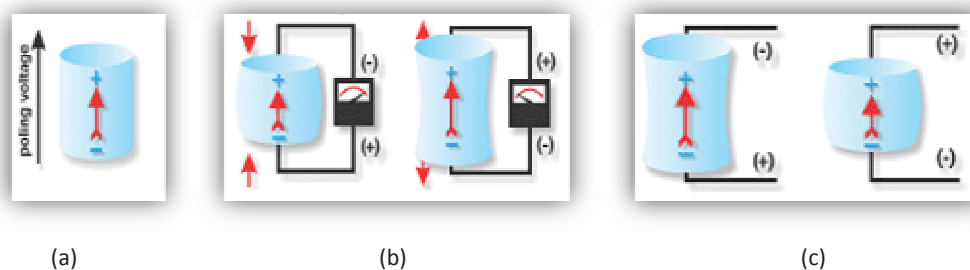
#### 2.1 Conceitos básicos

Materiais inteligentes ou materiais multifuncionais referem-se a um grupo de materiais específicos que possuem a habilidade de responder significativamente a estímulos de diferentes naturezas físicas (PREUMONT, 2006). Entre os materiais que pertencem ao grupo dos materiais inteligentes, se destacam as ligas de memória forma (*Shape Memory Alloy - SMA*), os materiais magnetorreológicos, as fibras óticas e os materiais piroelétrico e piezelétricos. Mais informações e particularidades a respeito de materiais inteligentes podem ser encontradas nos trabalhos de Clark et al. (1998), Smith (2005) e Leo (2007).

Os materiais piezelétricos são uma classe de materiais inteligentes por possuírem a capacidade de desenvolver cargas elétricas ao sofrerem alterações em suas dimensões (LEO, 2007), resultando em um fenômeno conhecido como efeito direto. De forma recíproca, denomina-se efeito indireto (inverso ou reverso) quando a aplicação de um campo elétrico

no material proporciona variações em suas dimensões. A Figura 3 ilustra o efeito direto e inverso de um cristal piezelétrico cilíndrico. Na Figura 3(a) o cristal está livre de campos elétricos ou de tensões. Na Figura 3(b) o cristal sofre variações de suas dimensões decorrentes da aplicação de forças (compressivas e trativas), devido às variações nas dimensões do cristal é desenvolvida uma polarização relacionada ao tipo de força aplicado no material, esse comportamento ilustra o Efeito Direto. Na Figura 3(c) o cristal sofre alterações em suas dimensões devido a aplicação de campos elétricos, esse comportamento ilustra o efeito inverso dos materiais piezelétricos.

Figura 3 – Ilustração da relação cargas elétricas *versus* variações dimensionais; (a) Cristal piezelétrico cilindro; (b) Efeito direto; (c) Efeito Indireto.



Fonte: APC International (2011).

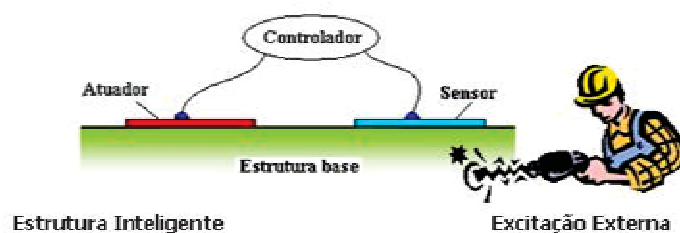
A demonstração experimental do efeito piezelétrico ou efeito direto foi feita por Pierre e Paul Jacques Curie em 1880, físicos franceses e irmãos, são hoje considerados, por muitos autores, como os descobridores da piezeletricidade.

O efeito direto permite que materiais piezelétricos sejam utilizados como sensores e o efeito indireto está associado à função de atuadores. Por apresentarem tais propriedades, os materiais piezelétricos são empregados em diversas áreas de aplicações.

Acelerômetros são utilizados em ampla variedade de testes relacionados a medições de vibrações estruturais, como por exemplo, análise de vibrações e análise modal. Já os atuadores são, normalmente, empregados em aplicação nas quais ocorre controle ativo de sistemas. Este trabalho destaca as seguintes grandes áreas de aplicações dos materiais piezelétricos:

▪ **Controle Ativo de Vibrações:** as técnicas de controle ativo de vibração utilizam forças secundárias aplicadas a estrutura por um controlador que adquire as informações obtidas por um sensor (BUENO, 2007). Desta forma, sistemas de controle ativo empregam materiais piezelétricos como sensores e/ou atuadores. Sensores são utilizados nesses sistemas para obter informações a respeito do comportamento da estrutura. Atuadores são utilizados para induzir movimentos ou esforços no sistema visando reduzir a vibração estrutural causada por uma fonte de vibração primária. A Figura 4 apresenta um desenho esquemático de um sistema de controle ativo. Clark et al. (1998) abordam a utilização de matérias piezelétricos em controle ativo de vibrações;

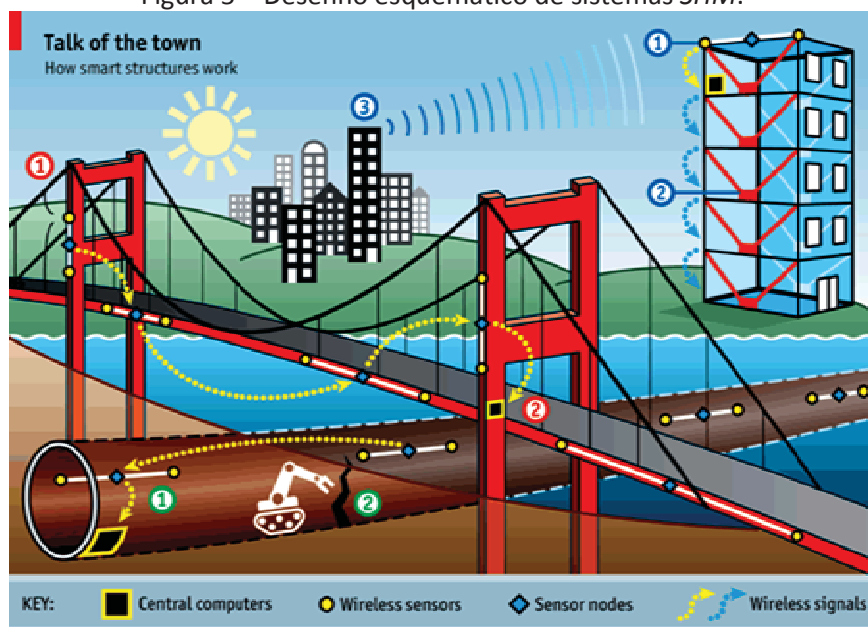
Figura 4 – Desenho esquemático de um sistema de controle ativo.



Fonte: Bueno (2007)

▪ **Monitoramento da Integridade Estrutural (SHM):** sistemas de monitoramento estrutural consistem, basicamente, em obter informações de uma estrutura a ser monitorada para enviá-las a uma central de processamento e análise capaz de processar o sinal e emitir um diagnóstico da estrutura. Cada técnica de monitoramento consiste em um procedimento particular. Algumas técnicas de monitoramento da integridade estrutural empregam sensores e/ou atuadores piezelétricos para obter parâmetros específicos dos sistemas monitorados. A Figura 5 apresenta um esboço de sistemas SHM presentes em estruturas do tipo prédio, ponte e túnel. Note que os sinais dos sensores são transmitidos para a central de processamento via *wireless*, essa forma de transmissão de sinais recebe, atualmente, especial atenção pela comunidade científica, visto que, representa uma potencial solução para problemas com cabeamentos. GIURGIUTIU (2008) apresenta um livro texto sobre transdutores piezelétricos (PWAS – do inglês; *Piezoelectric Wafer Active Sensors*) aplicados a sistemas de monitoramento da integridade estrutural;

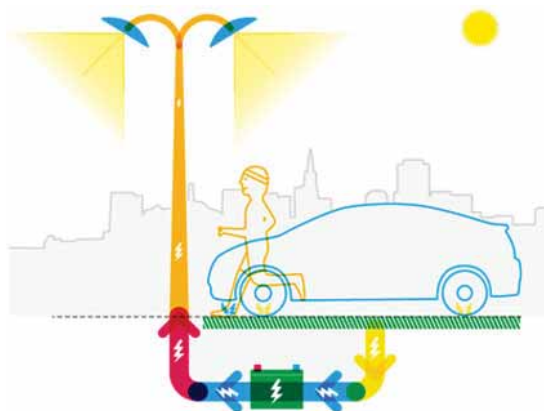
Figura 5 – Desenho esquemático de sistemas SHM.



Fonte: The Economist (2010).

▪ **Aproveitamento de energia** ou em inglês, **Energy Harvesting** ou **Power Harvesting**: técnicas de *energy harvesting* têm como objetivo aproveitar a energia ambiental, convertendo formas alternativas de energia em energia elétrica. O termo energia ambiental engloba as formas de energia existentes no ambiente, podem estar na forma de energia solar, eólica, de correntes marinhas e de movimentos vibracionais. Transdutores eletrostático, eletromagnéticos e piezelétricos podem ser utilizados para converter energia mecânica (vibracional) em energia elétrica a partir de estruturas vibrantes. Essa energia elétrica pode ser diretamente utilizada ou armazenada. A Figura 6 apresenta um desenho esquemático de um sistema de aproveitamento de energia. Erturk e Inman (2011) apresentam um livro com vários trabalhos sobre transdutores piezelétricos utilizados para *Energy Harvesting*.

Figura 6 – Desenho esquemático ilustrando um sistema de aproveitamento de energia ambiental.



Fonte: Powerleap (2012).

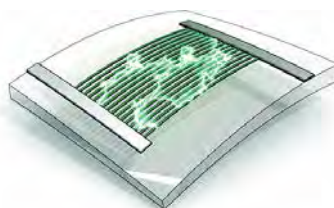
Dentre os materiais piezelétricos, as cerâmicas piezelétricas se destacam por apresentarem melhores (elevadas) propriedades piezelétricas quando comparada com outros materiais (naturais e/ou sintéticos) piezelétricos. Outra importante característica é a variedade de formas e tamanhos que as cerâmicas podem assumir devido ao seu processo de produção que, segundo Venet e Pereira (2004), consiste na sinterização de pó cerâmico conformados via prensagem ou extrusão.

Apesar dos pontos favoráveis, também existem alguns fatores que limitam as aplicações práticas de materiais cerâmicos, principalmente fatores relacionados à alta rigidez e baixa resiliência mecânica (diretamente relacionada a quantidade de energia que o material é capaz de absorver no regime elástico). Como alternativas a tais limitações apresenta-se os chamados polímeros piezelétricos, por exemplo, o *Poly(vinylidene fluoride)*, PVDF ( $C_2H_2F_2$ )<sub>n</sub>, que apresentam menor rigidez e maior flexibilidade que as cerâmicas.

A alternativa para as limitações apresentadas pelos materiais cerâmicos, é a utilização de bases flexíveis (poliméricas) para aglomerar cerâmicas piezelétricas em pequenas porções, conhecido como compósitos piezelétricos, isto porque, em pequenas porções as propriedades piezelétricas das cerâmicas são aproveitadas e o risco de ruptura da cerâmica é reduzido. Nesta direção, atualmente encontram-se pesquisas na área da nanotecnologia. Qi et al. (2010) desenvolveram um sensor que utiliza nanofitas de *PZT*, Figura 7. As nanofitas são fabricadas sobre um substrato de óxido de magnésio, de onde são

retiradas para serem incorporadas a uma base de silicone. Outros trabalhos na área de nanotecnologias utilizando materiais piezelétricos pode ser encontrada em Xu et al. (2008, 2010) e Zhu et al. (2010).

Figura 7 – Nanotecnologia que utiliza nanofitas de PZT proposta por Qi et al.



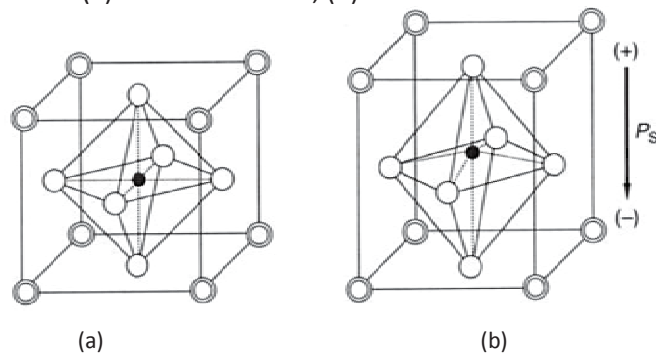
Fonte: Qi et al. (2010).

## 2.2 Cerâmicas Piezelétricas

Atualmente as cerâmicas piezelétricas tipo *PZT* ( $\text{Pb}[\text{Zr}_x \text{Ti}_{1-x}]\text{O}_3$  com  $0 < x < 1$ ), em suas diversas variações, são predominantes no mercado. Também é possível encontrar outros tipos de cerâmicas, como por exemplo, o *PT* ( $\text{PbTiO}_3$ ) e o *PMN* ( $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ ), utilizados em dispositivos que exigem propriedades especiais e muito específicas, como transdutores para alta temperatura, para imagem e para ensaios não destrutivos (VENET; PEREIRA, 2004).

As cerâmicas piezelétricas fazem parte de uma classe de dielétricos e não apresentam naturalmente propriedades piezelétricas. Para que as cerâmicas possam apresentar tais propriedades, primeiramente, deve pertencer à classe dos ferroelétricos e, apresentar uma estrutura cristalina denominada perovkista, Figura 8. Estas células cristalinas passam a ter um momento de dipolo quando adquire uma forma assimétrica (tetragonal ou romboédrica), Figura 8(b).

Figura 8 - Estrutura perovkista de uma cerâmica piezelétrica;  
(a) Forma simétrica; (b) Forma assimétrica.

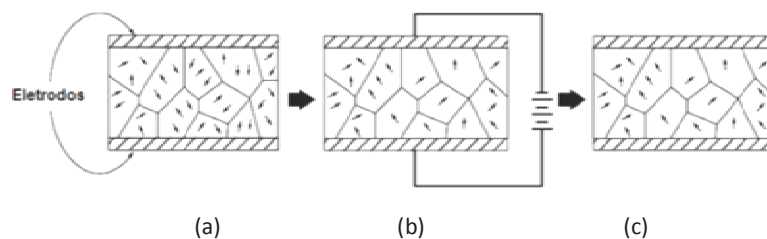


Fonte: Giurgiutiu (2008).

Dipolos adjacentes com os mesmos alinhamentos formam regiões denominadas domínios, desta forma, cada domínio apresenta determinado alinhamento, ou seja, específica polarização em cada domínio. As orientações destes domínios dentro do material são randômicas, o que não proporciona uma polarização macroscópica do material.

Visto que, os dipolos possuem orientações randômicas, para que a cerâmica assuma propriedades piezelétricas macroscópicas é preciso submetê-la a um processo conhecido como polarização. Durante a polarização, a cerâmica é submetida a elevadas temperaturas e fortes campos elétricos, normalmente, 2000 V/mm (LEO, 2007). Após a polarização, o material apresenta um alinhamento remanescente ou residual nos domínios, caracterizando uma polarização macroscópica do material, ou seja, garantindo as propriedades piezelétricas a cerâmica. A Figura 9 apresenta o alinhamento dos dipolos elétricos antes, durante e após o processo de polarização.

Figura 9. Processo de fabricação de uma cerâmica piezelétrica; (a) aquecimento em alta temperatura; (b) aplicação de um campo elétrico elevado e (c) orientação final dos dipolos.



Fonte: Baptista (2010).

Análogo as características dos materiais ferromagnéticos, um material ferroelétrico polarizado possui um ciclo de histerese. E para que a cerâmica mantenha as características piezelétricas é imprescindível que os limites térmicos do material não sejam ultrapassados. A temperatura de Curie é conhecida como a temperatura acima da qual a cerâmica perde as propriedades piezelétricas, ou seja, perde a polarização devido a perda da polarização dos cristais voltando a apresentar uma estrutura cristalina simétrica.

### 2.3 Equações Constitutivas da Piezeletricidade Linear

A relação entre campo elétrico e deformação é aproximadamente linear para baixas intensidades do campo elétrico. Entretanto, para maiores intensidades do campo elétrico, ocorre o fenômeno de saturação da polarização. O material é levado à significativa histerese e relações não lineares entre o campo elétrico e a deformação. Desta forma, a maioria das aplicações práticas limita-se a leis lineares formuladas por Voigt em 1910 (BANKS et al., 1996). (MOURA JUNIOR, 2008).

As equações constitutivas da piezeletricidade linear são obtidas a partir da Primeira Lei da Termodinâmica. Em notação reduzida, ou matricial, segundo o ANSI - *IEEE Standard on Piezoelectricity* (1987) são escritas como:

$$D_u = e_{uq} S_q + \varepsilon_{uk}^S E_k \quad (1)$$

$$T_p = c_p^E S_q - e_{kp} E_k \quad (2)$$

onde  $u$  e  $k$  assumem os valores [1,3],  $q$  e  $p$  assumem os valores [1,6],  $D$  é o deslocamento elétrico,  $T$  é a tensão mecânica,  $E$  é o campo elétrico,  $\varepsilon$  é a permissividade dielétrica,  $e$  é a constante piezoeétrica,  $S$  é a deformação do material,  $c$  é a constante de rigidez elástica. Os sobrescritos  $E$  e  $S$  significam submetido a campo elétrico constante e a deformação constante, respectivamente. Informações complementares para entender melhor os termos das equações acima podem ser encontradas em alguns livros texto, como Leo (2007).

Existem formas alternativas das equações constitutivas que podem ser encontradas no ANSI - *IEEE Standard on Piezoelectricity* (1987).

## 2.4 Monitoramento da Integridade Estrutural (SHM)

Antes de definir um processo de monitoramento da integridade estrutural, do inglês *Structural Health Monitoring* (SHM), é preciso entender o conceito de dano. Danos são alterações significativas de massa, rigidez ou propriedades de dissipação de energia do sistema (FARRAR; WORDEN, 2007). Em outras palavras, pode ser entendidos como trincas, corrosões, cortes, afrouxamento de parafusos, delaminações, aderência de massas (incrustações) em estruturas, dentre outros. A concentração de danos em uma estrutura pode desencadear o surgimento de falhas e comprometer o funcionamento do sistema.

Existem várias maneiras de descrever um processo SHM. A descrição apresentada neste trabalho segue as prévias descrições observadas em Farrar et al. (2001) e Farrar e Worden (2007). Segundo os autores citados, um processo de reconhecimento de padrões para monitoramento de integridade estrutural consiste de quatro passos sequenciais, são eles:

1. Avaliação Operacional;
2. Aquisição, normalização e seleção de dados;
3. Reconhecimento de padrões e condensação das informações;
4. Desenvolvimento de modelo estatístico.

As avaliações operacionais consistem em uma avaliação prévia que procura responder questões relacionadas a aptidão da implementação de uma sistema de identificação de danos, entre elas:

- I. Qual é a justificativa para a implementação de um sistema *SHM*?
- II. Qual a definição de dano ou múltiplos danos para o sistema a ser investigado?  
E qual caso deverá receber mais atenção?
- III. Quais são as condições (operacional e ambiental) em que o sistema será monitorado?
- IV. Quais são as limitações para aquisição de dados nas condições de operação do sistema *SHM*?

Já a etapa de aquisição, normalização e seleção de dados consiste em um delicado processo de seleção da cadeia de medição do sistema *SHM*, seleção das técnicas que serão abordadas para distinguir ou eliminar dos sinais, as influências geradas devido às condições ambientais e de operação do sistema e, finalmente, a definição de técnicas que são responsáveis pela seleção dos dados que serão destinados ao processo de determinação de padrões. Esta última fase consiste em selecionar, de acordo com critérios de escolhas relacionados a experiências adquiridas sobre o sistema, os sinais que serão destinados a próxima etapa do processo *SHM*. Técnicas de processamento de sinais como filtragem e reamostragem podem fazer parte do processo de seleção dos dados.

Contudo, é possível notar que a etapa de aquisição, normalização e seleção de dados é muito importante e exige uma dinâmica constante relacionada a implementação de aprendizados e técnicas que vão sendo desenvolvidas ou aprimoradas.

Na etapa de reconhecimento de padrões e condensação das informações são utilizados padrões para correlacionar os sinais, ou as informações extraídas dos sinais, a um diagnóstico da estrutura, como por exemplo, aos padrões: estrutura com dano, sem dano ou estrutura com danos múltiplos. Essa é a área do processo SHM que mais recebe atenção na literatura técnica.

Por fim, a fase de desenvolvimento de modelo estatístico consiste na implementação de algoritmos que possam dizer se as mudanças nas características selecionadas (para identificar os sistemas danificados) são estatisticamente significativas. Outra finalidade é a implementação dos algoritmos que operam sobre os dados extraídos para quantificar o estado dos danos na estrutura.

O estado do dano de uma estrutura pode ser classificado em uma categoria dentre cinco, discutidas em Rytter (1993) e que podem ser representadas pelas seguintes questões:

1. Existência. O dano existe no sistema?
2. Localização. Onde o dano está no sistema?
3. Tipo. Qual o tipo de dano presente?
4. Severidade. Quão severo é o dano?
5. Prognóstico. Qual é o tempo útil restante da estrutura?

Modelos estatísticos também são utilizados para minimizar a ocorrência de falsos alarmes, que consistem em indicar, equivocadamente, a presença de dano(s), conhecido como falso-positivo. Ou, por outro lado, de não indicar a presença do(s) dano(s) quando o(s) mesmo(s) existe(m) na estrutura, denominado falso-negativo.

A partir dos estados de danos apresentados acima, um sistema *SHM* pode ser classificado em níveis, diretamente relacionados à capacidade do mesmo, conforme a clássica referência de Doebling et al. (1998):

- NÍVEL 1 – Detecta o dano;
- NÍVEL 2 – Detecta e localiza o dano;
- NÍVEL 3 – Detecta, localiza e quantifica o dano;
- NÍVEL 4 – Detecta, localiza, quantifica o dano e estima a vida útil restante.

Incorporando Materiais Inteligentes no sistema de detecção, Inman (2001) propôs mais três níveis:

- NÍVEL 5 – Combina o nível 4 com Estruturas Inteligente para auto-diagnóstico de danos estruturais;
- NÍVEL 6 – Combina o nível 4 com Estruturas Inteligentes e Controle para formar um sistema de auto-reparo estrutural;
- NÍVEL 7 – Combina o nível 1 com Controle Ativo e Estruturas Inteligentes para obtenção de um sistema simultâneo de controle e monitoramento.

## 2.5 Técnica da Impedância Eletromecânica (E/M) aplicada a sistemas SHM

A técnica de monitoramento estrutural baseada na Impedância Eletromecânica utiliza um ou mais transdutores eletromecânico como sensor(es) e atuador(es). Na maioria dos trabalhos encontrados na literatura e neste trabalho, o transdutor utilizado é a cerâmica piezolétrica tipo *PZT*.

Acoplado a estrutura, o *PZT* atuador é submetido a um campo elétrico alternado que excita o transdutor e induz vibrações na estrutura. A resposta da estrutura influencia a corrente que passa pelo *PZT* sensor. Em termos elétricos, a impedância elétrica é dada por:

$$Z_E(\omega) = \frac{V(\omega)}{I(\omega)} \quad (3)$$

sendo  $V(\omega)$  a diferença de potencial aplicada no *PZT* atuador e  $I(\omega)$  é a corrente elétrica que passa pelo *PZT* sensor e  $\omega$  é a frequência.

Em termos mecânicos, a impedância mecânica é dada pela relação:

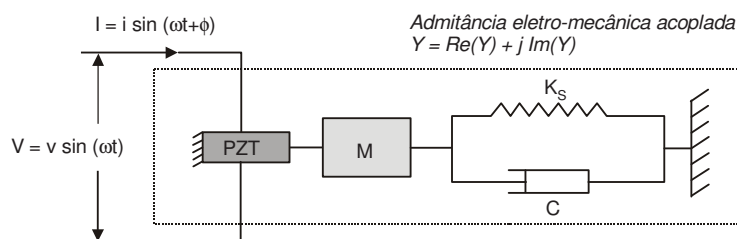
$$Z_M(\omega) = \frac{F(\omega)}{U(\omega)} \quad (4)$$

na qual  $F(\omega)$  é a força e  $U(\omega)$  é a velocidade. Maiores detalhes sobre impedância e mobilidade de sistemas mecânicos podem ser encontrados em Gardonio e Brennan (2004).

Desta forma, a propriedade de acoplamento eletromecânico do *PZT* permite que as informações da impedância mecânica da estrutura sejam extraídas pelas medições de impedância elétrica. Sendo assim, é possível monitorar as variações da impedância mecânica de uma estrutura. Sabendo que, a impedância mecânica está relacionada às características que descrevem o comportamento dinâmico da estrutura, e que, a impedância elétrica é relacionada a impedância mecânica da estrutura, torna-se possível detectar a presença de danos na estrutura a partir do sinal de impedância elétrica.

A interação entre um transdutor piezelétrico e a estrutura a ser monitorada pode ser observada a partir de um sistema de um grau de liberdade utilizando um transdutor piezelétrico como atuador e sensor, Figura 10, apresentado por Liang et al. (1994, 1996).

Figura 10 - Modelo utilizado para representar um sistema eletromecânico acoplado.



Fonte: Inman et al. (2005).

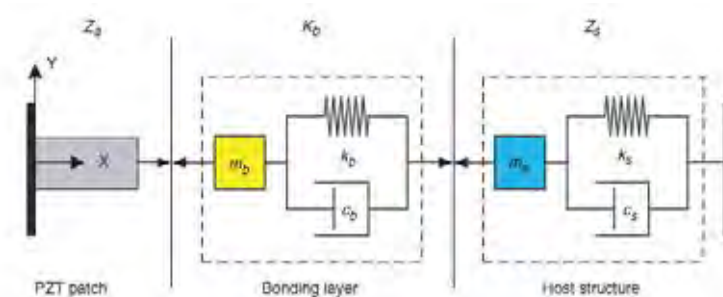
A partir do modelo apresentado na figura acima é possível encontrar uma equação para representar a Impedância E/M em termos de admitância:

$$Y(\omega) = j\omega a \left( \bar{\epsilon}_{33}^T (1 - i\delta) - \frac{Z_s(\omega)}{Z_s(\omega) - Z_a(\omega)} d_{3x}^2 \hat{Y}_{xx}^E \right) \quad (5)$$

onde  $Y(\omega)$  é a admitância (inverso da Impedância),  $a$  é a constante geométrica do PZT,  $\bar{\epsilon}_{33}^T$  é a constante dielétrica sob campo de tensão nulo,  $\delta$  é o fator de perda dielétrica do PZT,  $d_{3x}^2$  é a constante de acoplamento piezelétrico na direção  $x$  submetido a campo de tensão nulo,  $\hat{Y}_{xx}^E$  é o módulo de Young complexo do *PZT* submetido a um campo elétrico nulo,  $j$  representa o número imaginário puro (0,1),  $Z_s(\omega)$  e  $Z_a(\omega)$  são, respectivamente, impedância mecânica da estrutura e do *PZT*.

No modelo de um grau de liberdade apresentado por Liang et al. (1994) a influência da camada de adesivo (cola) entre o transdutor e a estrutura base não é considerado. Em contrapartida, Xu e Liu (2002) propõem um modelo de impedância E/M considerando a camada de adesivo (Figura 11). Bhalla e Soh (2004) investigaram o efeito gerado pelo modulo de cisalhamento do adesivo nos sinais de admitância elétrica.

Figura 11 - Modelo de um sistema eletromecânico acoplado considerando a camada de adesivo.



Fonte: Xu e Liu (2002).

Park et al. (2009) apresenta uma revisão dos modelos de Impedância Eletromecânica visando a investigação das influências geradas nos sinais de admitância medidos devido aos efeitos gerados pelo sensor e pelo acoplamento (colagem) entre transdutor e estrutura base. Os autores apresentam novos parâmetros incorporados no modelo tradicional de Impedância Eletromecânica com o objetivo de avaliar a qualidade do transdutor e a degradação da camada de cola entre a estrutura e o PZT.

Zagrai e Giurgiutiu (2001) apresenta uma modelo 2-D para obtenção da Impedância Eletromecânica de uma placa fina. O estudo também considera dados experimentais para validação do modelo.

Peairs (2006) apresenta uma técnica de modelagem da impedância Eletromecânica, combinando o método de elementos espectrais (*SEM*) com análise de um circuito elétrico de baixo custo, previamente proposto.

Uma grande vantagem apresentada pela técnica da impedância Eletromecânica quando comparada com outras técnicas de monitoramento utilizadas em sistemas *SHM* é a possibilidade de detectar falhas em estado incipiente, ou seja, inicial. Isso ocorre devido ao fato dos sinais serem analisados em altas frequências e, conseqüentemente, estarem relacionados aos comprimentos de ondas pequenos, sensíveis o bastante para detectar pequenas variações na estrutura.

É intuitivo pensar que a faixa de frequência selecionada para ser monitorada deve estar relacionada a faixa de frequência mais sensível às variações estruturais. Desta forma, é coerente dizer que a sensibilidade da técnica é dependente da faixa de frequência selecionada. Segundo Park et al. (2003) para a técnica da Impedância Eletromecânica a faixa de frequência tipicamente utilizada se encontra entre 30kHz a 400kHz. A faixa de frequência selecionada deve conter de 20 a 30 picos, uma vez que, os picos no sinal da impedância elétrica estão diretamente relacionados a uma alta interação dinâmica com a estrutura na respectiva faixa de frequência.

Uma desvantagem da técnica da impedância eletromecânica é que o sinal de impedância elétrica é sensível não só a presença de danos estruturais, mas também aos níveis de ruído nos sinais e de variações das condições ambientais, como diferenças de pressão e temperatura. Desta forma, para ser implementada em sistemas reais, a técnica ainda exige várias considerações para garantir robustez.

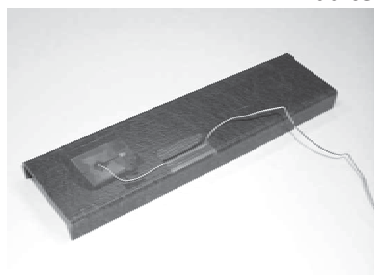
Park et al. (1999) apresentam um estudo das influências geradas pelas variações de temperatura nos sinais da impedância elétrica. Os estudos abrangem a faixa de temperatura em 25°C e 75°C. Os autores propõem uma técnica para compensação das influencias geradas nos sinais utilizando apenas a parte real do sinal da impedância.

Uma opção para aplicações em estruturas submetidas a temperaturas extremas como componentes de turbinas, é a utilização dos denominados *HT-PWAS* (*High-Temperature Piezoelectric Wafer Active Sensors*). Giurgiutiu et al. (2010) apresentam um *HT-PWAS* baseado em  $\text{GaPO}_4$  (ortofosfato de gálio) para sistemas *SHM* que utilizam a técnica da Impedância E/M. Os sensores conservaram suas propriedades piezelétricas até 705°C,

segundo os autores, sensores convencionais piezelétricos (*PZT*) perdem suas propriedades aproximadamente a 260°C (próximo a temperatura de Curie).

Trabalhos publicados mostram que a técnica *SHM* baseada na Impedância E/M vem sendo implementada experimentalmente em várias tipos de estruturas, dentre elas, treliças (SUN et al., 1995), estruturas civis como pontes e concretos (AYRES et al., 1998; PARK; INMAN, 2007; PARK et al., 2000; SOH et al., 2000), estruturas aeronáuticas (MOURA JUNIOR; STEFFEN, 2006), aeroespaciais (GIURGIUTIU; ZAGRAI, 2005) e redes de tubulações (PARK et al., 2001; PEAIRS et al., 2004). A Figura 12 apresenta algumas imagens de aparatos utilizados por alguns desses pesquisadores.

Figura 12. Aparatos Experimentais utilizados por alguns pesquisadores para implementação da técnica da impedância E/M.



(a)



(b)



(c)



(d)

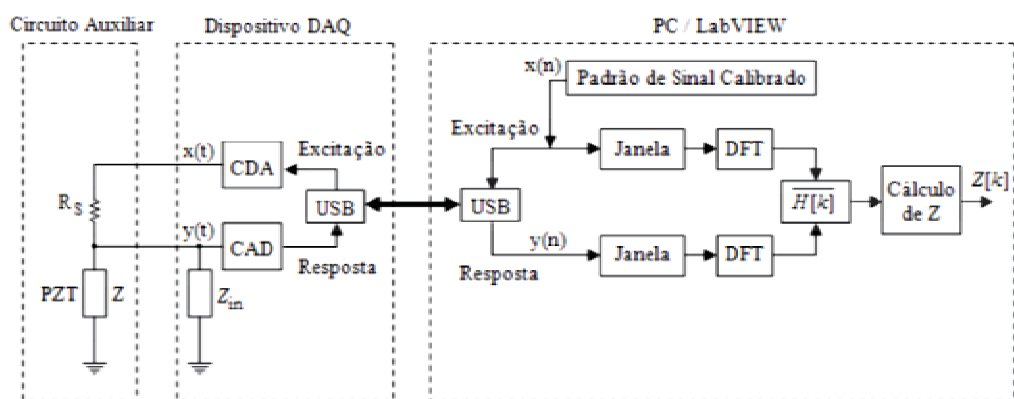
Fonte: (a) Viga composta (PEAIRS et al., 2004); (b) Aerofólio Vertical de um UAV (MOURA JUNIOR; STEFFEN, 2006); (c) Rede de tubulações (PARK et al., 2001); (d) Parede de concreto armado (PARK; INMAN, 2007).

Lopes Junior et al. (2000) combinam a técnica da Impedância Eletromecânica com redes neurais artificiais para detectar, localizar e caracterizar danos estruturais em estruturas do tipo secção de ponte (escala 1:4) e treliça espacial.

Park et al. (2003, 2008) apresentam as questões relacionadas com *hardware* e *software* para a obtenção da impedância Eletromecânica no contexto de *SHM*.

Este trabalho utiliza um novo sistema para medição da Impedância E/M proposto por Baptista e Vieira Filho (2009). A metodologia de medição apresentada é uma vantajosa alternativa as desvantagens apresentadas por antigos sistemas de medições de impedância (analisadores de impedância, por exemplo, HP4192A). Dentre tais desvantagens estão a elevada massa e o alto volume dos tradicionais equipamentos, além do alto consumo de potência. A Figura 13 apresenta o sistema completo proposto.

Figura 13. Sistema de medição da impedância E/M proposto por Baptista e Vieira Filho (2009).



Fonte: Baptista (2010).

Bhalla et al. (2009) apresentaram adaptações para redução de custo com *hardware* de medição de admitância absoluta.

## 2.6 Conclusões e Considerações finais

Este capítulo apresenta embasamento teórico e revisão bibliográfica das grandes áreas envolvidas neste trabalho e algumas áreas adjacentes, que podem ser facilmente correlacionadas.

Para a técnica da impedância Eletromecânica, uma revisão bibliográfica mais crítica mostra o histórico dos estudos na área e ressalta a necessidade de explorar condições mais reais de operação nos sistemas *SHM* que utilizam impedância E/M. Desta forma, é preciso entender o comportamento dos sistemas para as diferentes condições de operação e, desenvolver metodologias capazes de considerar tais influências externas e garantir o desempenho dos sistemas *SHM*.

Neste contexto, duas metodologias utilizando a técnica da impedância Eletromecânica são propostas nos próximos capítulos. Entretanto, as lógicas englobadas nas metodologias propostas neste trabalho também podem ser utilizadas em conjunto com outras técnicas de monitoramento, como por exemplo, utilizando as ondas de *Lamb*. Para a técnica descrita no capítulo 3 (agrupamento utilizando o algoritmo *Fuzzy c-means* para eliminação do efeito da temperatura ambiente) estudos de Lopes Junior et al. (2011) mostraram resultados coerente utilizando as ondas de *Lamb* ao invés da impedância Eletromecânica.

## CAPÍTULO 3

# RECONHECIMENTO DE PADRÕES CONSIDERANDO VARIACIONES DA TEMPERATURA AMBIENTE

Estruturas reais naturalmente estão sujeitas a variações ambientais como de temperatura, umidade relativa do ar e pressão. Estruturas como pontes, edifícios, navios e automóveis, estão sujeitas a pequenas variações de pressão atmosférica quando comparadas a estruturas aeronáuticas que, particularmente, são submetidas a grandes variações da altitude de trabalho e, conseqüentemente, de pressão. Tais fatores afetam diretamente a resposta dinâmica da estrutura e podem comprometer o diagnóstico dos sistemas *SHM*.

Neste contexto, destacam-se as variações de temperatura que, geralmente, alteram a densidade do material e algumas propriedades do *piezo*. Além disso, tais variações ocorrem de forma significativa para diversas estruturas, uma vez que, a temperatura varia tanto em função do espaço como em tempo (é função da estação do ano, da ação do homem no meio, das posições geográficas, dentre outros). Sendo assim, a variação da temperatura ambiente pode ser entendida como um dos fatores ambientais críticos que podem alterar o diagnóstico de sistemas *SHM*.

Diante dessa preocupação, este capítulo apresenta uma seqüência de estudos realizados com o objetivo de obter metodologias *SHM* com capacidade de minimizar as

influências causadas nos sinais da impedância Eletromecânica devido a variações da temperatura ambiente.

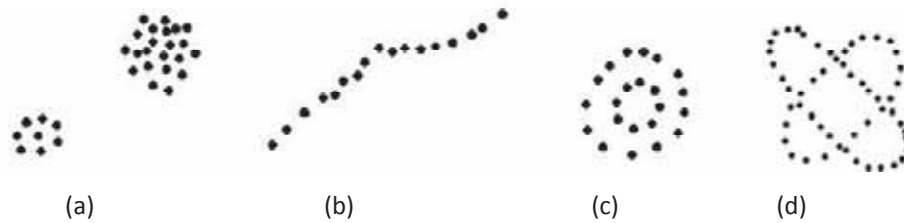
A metodologia proposta, neste capítulo, utiliza um algoritmo que permite a separação dos sinais por faixas, ou grupo de temperatura. A técnica utilizada para fazer tal separação é o agrupamento clássico *Fuzzy c-means (FCM)*, por ser um método de agrupamento do tipo não-supervisionado, sem necessidade de treinamento em padrões pré-estabelecidos de temperatura.

Utilizando o algoritmo *FCM* duas metodologias são ilustradas neste capítulo. A primeira visa agrupar os dados em grupos relacionados com as temperaturas ambientais em que os sinais foram amostrados. Esta é uma importante característica desta técnica de agrupamento que torna factível a implementação da primeira aplicação apresentada neste capítulo. No entanto, como discutido na aplicação experimental, este agrupamento não é suficiente para a metodologia *SHM* detectar o dano estrutural, ou seja, não possibilita separar, dentro do mesmo grupo de temperatura, sinais que representem a estrutura com danos de sinais que represente a estrutura sem danos. Motivada por esta limitação, a segunda metodologia é baseada na construção de um mapa de sinais de referências (*baselines*) no qual, cada faixa de temperatura possui seu respectivo valor de referência. Além disto, para permitir o correto diagnóstico de uma condição estrutural desconhecida, é proposto o índice de condição estrutural em forma de número complexo, ao invés de um número real – como é amplamente empregado na literatura. As vantagens desta notação modificada são discutidas no decorrer do capítulo.

### **3.1 Agrupamento *Fuzzy c-means***

Os métodos de agrupamentos são capazes de classificar dados de acordo com a similaridade entre eles, organizando-os em grupos, também conhecidos como *clusters*. Os *clusters* podem possuir diferentes formas, densidades e geometrias. A Figura 14 mostra algumas formas básicas de *clusters*.

Figura 14 - *Clusters* com diferentes formas e dimensões no espaço  $R^2$ ; (a) Esférico; (b) Alongado; (c) Concêntrico; (d) Concêntrico.



Fonte: Silva (2008)

O objetivo de um agrupamento *FCM* é encontrar um número finito de *clusters* capazes de representar certa quantidade de dados. Neste procedimento a permanência de um elemento em determinado *cluster* é uma decisão *fuzzy*. Neste contexto, as aplicações abordadas neste capítulo utilizam o método de agrupamento *Fuzzy c-means (FCM)* para separar os dados de acordo com a similaridade entre eles, que neste caso, é a faixa de temperatura ambiente em que os sinais de Impedância Eletromecânica foram obtidos.

### 3.1.1 Algoritmo *Fuzzy c-means*

A metodologia de agrupamento *Fuzzy c-means* consiste em um problema de minimização, sendo que a função objetivo, a ser minimizada, é dada por:

$$\min_{f_i, C_i} J = \sum_{z=1}^N \sum_{i=1}^c f_{iz}^m \|x_z - C_i\|^2 \quad (6)$$

assumindo que:

$$0 \leq f_{iz} \leq 1 \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^c f_{iz} = 1 \quad \forall z \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (8)$$

$$0 < \sum_{z=1}^N f_{iz} < N \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, c\} \quad (9)$$

sendo  $f_{iz}$  a função associada com o  $z$ -ésimo objeto do  $i$ -ésimo cluster,  $C_i$  é o centróide do  $i$ -ésimo cluster,  $c$  é o número de clusters (neste trabalho, o número de faixas de temperatura), e  $m > 1$  é a constante que determina as posições relativas dos clusters ( $m$  é adotado como 2),  $x_z$  é a característica representativa (índices *RMSD*, desvio da raiz média quadrática, do inglês *Root Mean Square Deviation*); e  $N$  é o número de objetos (número de sinais que são amostrados).

A norma da distância pode ser dada por:

$$D_{ziA}^2 = \|x_z - C_i\|^2 = (x_z - C_i)^T A (x_z - C_i) \quad (10)$$

sendo  $A$  uma matriz com norma-induzida (matriz identidade para o algoritmo *FCM*). Assim, pode-se detectar somente grupos com a mesma forma e orientação. A solução para o problema de otimização descrito pela Equação (6) é obtida das equações ótimas via multiplicadores de Lagrange. Detalhes sobre este procedimento pode ser encontrado em Bezdek e Pal (1992).

### 3.2 Índices de Sensibilidades

Em geral, uma forma de quantificar e representar as alterações nos sinais da Impedância Eletromecânica (assim como, em outros sinais) é adotar índices que concentrem estas alterações em um número escalar. Este escalar, denominado índice de sensibilidade, neste trabalho, consiste no cálculo do índice *RMSD* a partir de dois sinais de impedância: sendo o primeiro, sinal *baseline* à temperatura ambiente ( $\sim 25^\circ\text{C}$ ); e o segundo, um sinal sem dano obtido à temperatura de interesse (para a construção do mapa de *baselines*), ou um sinal de condição estrutural desconhecida (no caso do monitoramento da estrutura). Como apresentados a seguir, baseados nas partes real e imaginária dos sinais de impedância Eletromecânica, dois índices de sensibilidade são definidos.

### 3.2.1 Índice de Sensibilidade da parte Imaginária ( $I_I$ )

De acordo com Park et al. (1999) as alterações na parte imaginária, ou reativa, do sinal de Impedância Eletromecânica estão mais relacionadas aos efeitos de cargas aplicadas, variações de temperatura e comprimento dos cabos elétricos do sistema *SHM*. Desta forma, é esperado que o índice de sensibilidade  $I_I$  seja mais sensível a temperatura. O índice é definido como o *RMSD* obtido a partir da parte reativa do sinal, como segue:

$$I_I = \sum_{p=1}^t \sqrt{\frac{[Im(Z_{p,base}) - Im(Z_{p,unk})]^2}{[Im(Z_{p,base})]^2}} \quad (11)$$

sendo que  $Im( )$  se refere a parte imaginária do sinal,  $Z_{p,base}$  representa o sinal da Impedância Eletromecânica na condição *baseline* e  $Z_{p,unk}$  é o sinal da Impedância Eletromecânica, obtido do mesmo *PZT*, na condição estrutural desconhecida na *p-ésima* amostra (ou valor de frequência). Neste trabalho, este índice sempre é calculado considerando o sinal *baseline* obtido a temperatura ambiente ( $\sim 25^\circ\text{C}$ ).

### 3.2.2 Índice de Sensibilidade da parte real ( $I_R$ )

É entendido e provado pela literatura que a parte real dos sinais da impedância E/M é mais sensível as alterações estruturais, ou seja, é mais indicada para detecções de danos (PARK et al., 1999). Sendo assim, é esperado que o índice  $I_R$  seja mais sensível a danos. O índice é definido como o *RMSD* calculado a partir da parte real do sinal, como segue:

$$I_R = \sum_{p=1}^q \sqrt{\frac{[Re(Z_{p,base}) - Re(Z_{p,unk})]^2}{[Re(Z_{p,base})]^2}} \quad (12)$$

sendo que  $Re( )$  e representa a parte real do sinal.

### 3.3 Separação dos Sinais em *Clusters*

Os índices de sensibilidade definidos anteriormente apresentam características quantitativas que serão usadas na separação de classes com o algoritmo *FCM*. Assim, é possível separar os dados em grupos que representam adequadamente as temperaturas em que cada sinal é obtido, sem necessariamente ser preciso medir a temperatura de cada teste. Para validação desta propriedade de agrupamento foi utilizada uma estufa térmica para controlar e obter sinais de impedância em diferentes temperaturas ambientes. Como mencionado a seguir, este trabalho contribui para viabilizar a aplicação da técnica em um maior número de aplicações reais de engenharia.

Embora grandes avanços tenham sido obtidos por diversos pesquisadores de *SHM*, verifica-se na literatura que o monitoramento estrutural baseado na técnica de impedância Eletromecânica ainda apresenta, relativamente, baixo nível de prontidão tecnológica (*TRL\**), visto que a grande maioria dos trabalhos está restrita a aplicações acadêmicas. Entre os fatores em investigação, algumas restrições de aplicabilidade estão relacionadas com a faixa de temperatura ambiente em que é mantido o comportamento linear entre entrada e saída do transdutor *PZT*. Assim, com o interesse de contribuir para a generalização da metodologia, foram realizados testes experimentais para uma faixa de temperatura superior a que comumente tem sido explorada em outros trabalhos. Os detalhes são discutidos nas próximas seções.

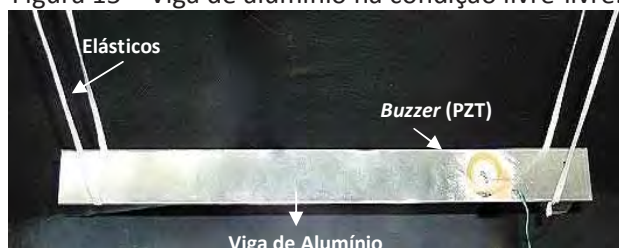
\*De acordo com a *NASA* (Agencia Espacial Americana), o *TRL* (*Technology Readness Level*) é o nível de prontidão de uma tecnologia. Detalhes e definições podem ser obtidos em Mankins (1995).

#### 3.3.1 *Descrição dos Testes Experimentais*

Para os testes experimentais foi utilizada uma viga de alumínio com um elemento piezelétrico acoplado. Durante os testes, a viga permaneceu horizontalmente suspensa por dois elásticos, simulando uma condição de contorno livre-livre (Figura 15). O elemento piezelétrico acoplado a superfície da viga é conhecido como *Buzzer* (modelo 7BB-35-3,

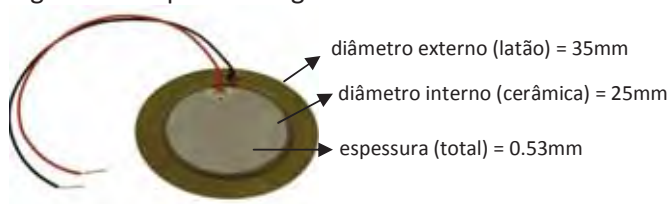
fabricante *Murata Manufacturing*) e consiste de uma piezocerâmica em formato circular acoplada a uma base de latão, Figura 16. Os parâmetros geométricos da viga são apresentados na Tabela 1.

Figura 15 – Viga de alumínio na condição livre-livre.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 16 Propriedades geométricas dos buzzers.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

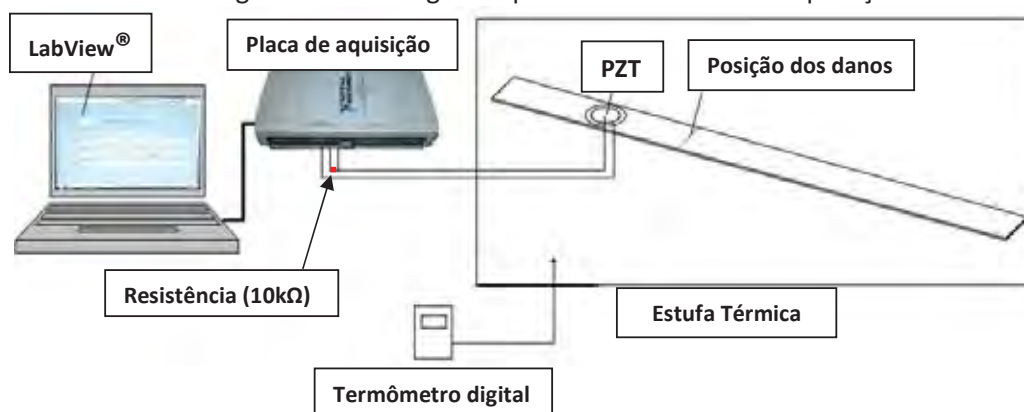
Tabela 1 - Propriedades Geométricas da viga.

Propriedades	Dimensão [mm]
Comprimento	500
Largura	40
Espessura	2

Fonte: Elaboração do próprio autor.

O sistema de aquisição e pré-processamento dos sinais foram controlados pelo *software LabView* utilizando uma placa de aquisição da *National Instruments*, modelo NI-USB 6211, 16 bits. Detalhes sobre o sistema de aquisição podem ser encontrados em Baptista e Vieira Filho (2009). A Figura 17 apresenta um esquema da montagem experimental utilizada.

Figura 17 - Montagem experimental utilizada na aplicação.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Como sinal de excitação foi utilizado um varredura senoidal em frequência (*chirp*) com amplitude de saturação entre +/- 0.5 V, com uma faixa de frequência variando de 0 até 62.5kHz. Os testes foram realizados em três temperaturas diferentes (25°C, 65°C e 95°C) e em cada temperatura foram simuladas três condições: sem dano, com dano 1 e com dano 2 – sendo coletados dois sinais para cada caso. A Tabela 2 apresenta o resumo destas condições de testes.

Tabela 2 – Resumo das condições de testes: agrupamento por temperatura.

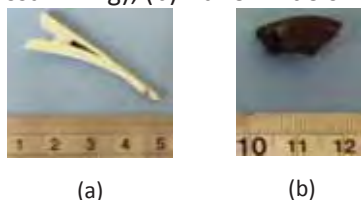
Testes	Número de sinais	Condições estruturais	Temperatura do ambiente (°C)
1	2	Sem dano	25
2	2	Sem dano	65
3	2	Sem dano	95
4	2	Com dano 1	25
5	2	Com dano 2	25
6	2	Com dano 1	65
7	2	Com dano 2	65
8	2	Com dano 1	95
9	2	Com dano 2	95

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Para simular os danos estruturais foi utilizado um grampo e dois pequenos imãs; predominantemente que correspondem a acréscimos de massas no sistema. Esta simulação com incremento de massa, embora não seja característica de um dano real, é utilizada por diversos autores principalmente por permitir retornar estrutura à condição sem dano. Estes

danos fictícios foram posicionadas a 150mm do centro do *PZT* e a Figura 18 apresenta as respectivas imagens dos componentes.

Figura 18 - Imagens dos componentes utilizados para simular os danos;  
(a) Dano 1 - grampo (massa = 1.1g); (b) Dano 2 - dois imãs (massa total = 4.1g).



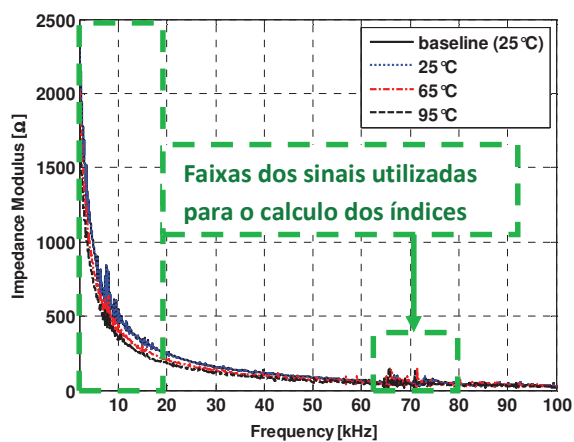
Fonte: Elaboração do próprio autor.

### 3.3.2 Resultados e Discussões

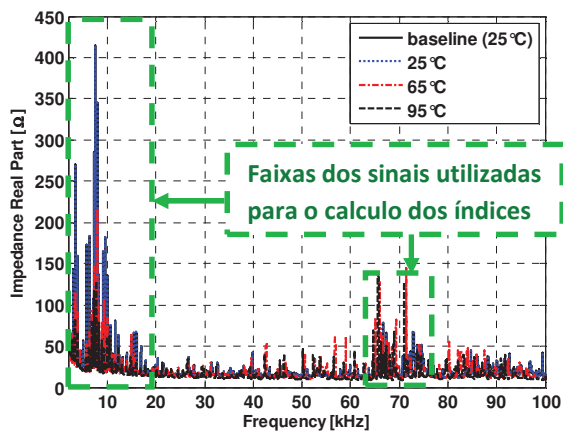
A Figura 19 apresenta as curvas da Impedância Eletromecânica (módulo) obtidas para as três temperaturas consideradas e a curva do sinal *baseline*. O sinal *baseline* foi extraído a temperatura ambiente ( $\sim 25^{\circ}\text{C}$ ) e adotado para o cálculo dos índices de sensibilidade a temperatura ( $I_T$ ). Esta imposição é parte da metodologia proposta e foi feita para calcular todos os índices na mesma referência, sendo matematicamente o equivalente a projetar os cálculos em um mesmo sistema de coordenadas.

A faixa de frequência selecionada para o cálculo dos índices tem extrema relevância para se obter o correto diagnóstico e, por isto, diversos autores se dedicam a este tema. Neste trabalho, foi feita uma seleção visual considerando a maior faixa de frequência possível com concentração de picos nos sinais. Desta forma, foram selecionadas duas faixas de sensibilidades (de 2kHz a 20kHz e de 65kHz a 75kHz), as quais estão indicadas na Figura 19.

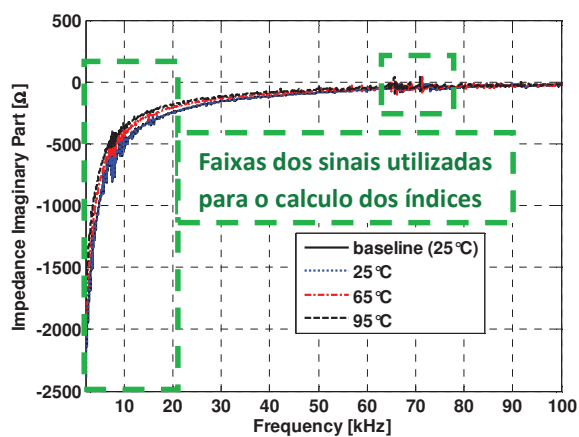
Figura 19 - Impedância Eletromecânica; (a) Módulo; (b) Parte real; (c) Parte imaginária.



(a)



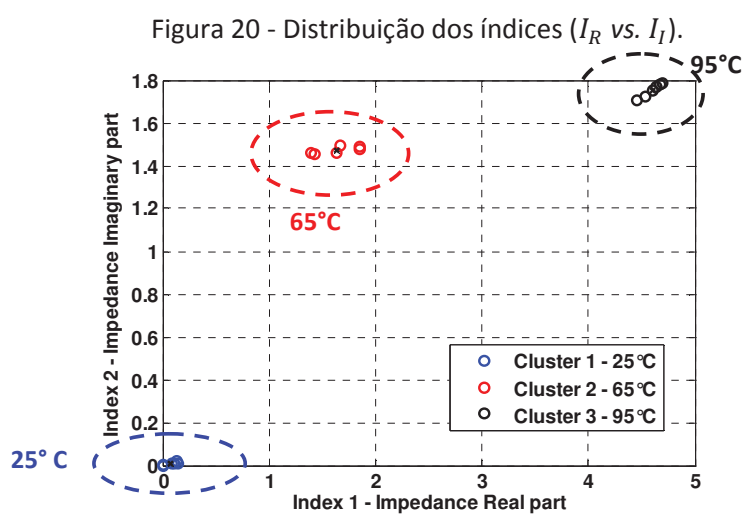
(b)



(c)

Fonte: Elaboração do próprio autor.

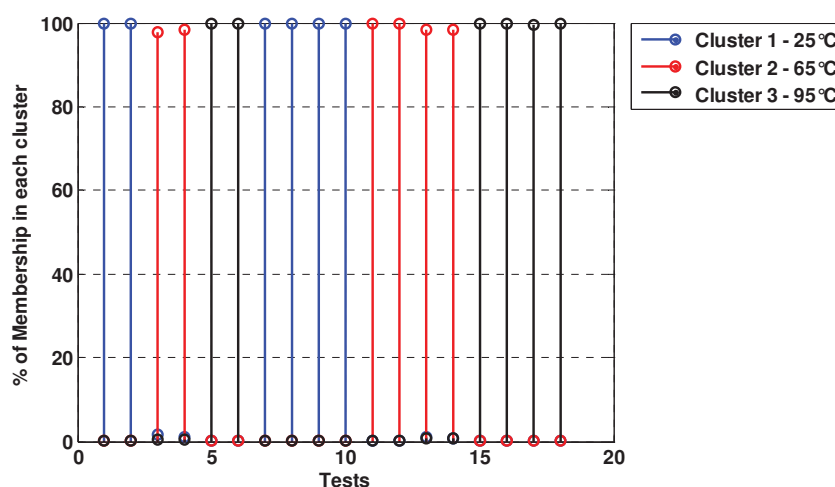
A Figura 20 apresenta a distribuição dos índices  $I_I$  e  $I_R$  no plano. Neste gráfico, cada objeto representa um sinal, na abscissa está o valor do  $I_R$  e na ordenada o  $I_I$ . Também é possível observar os centros de cada *cluster*, representados por “x”. Observando tal figura é possível notar a separação dos dados em três *clusters*, correspondentes as temperaturas empregadas nos experimentos e, ainda, que  $I_I$  tem relação de proporcionalidade direta com a temperatura. No entanto, o índice  $I_R$  também apresentou relação direta com a temperatura, o que não era esperado.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A Figura 21 apresenta a porcentagem da função de pertinência de cada elemento (índices  $I_I$  e  $I_R$  de um dado sinal) pertencer ou não a um *cluster*. Com o auxílio da Tabela 2 é possível obter a condição de cada sinal numerado na abscissa. Desta forma se obtém informações quantitativas sobre o agrupamento dos dados, o que permite a generalização das verificações anteriores.

Figura 21 - Porcentagem de cada elemento pertencer a um determinado *cluster*.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Embora a literatura indique que a parte imaginária da impedância Eletromecânica apresente maior sensibilidade a variações de temperatura quando comparada com a parte real (PARK et al., 1999), não foi possível confirmar tal afirmação a partir dos índices calculados para os sinais analisados.

### 3.3.3 Conclusões

Para o estudo realizado foi possível separar os dados em suas respectivas temperaturas sem a necessidade do acompanhamento da medição da temperatura ambiente. Claramente se verificou uma acentuada variação nos índices  $I_I$  e  $I_R$  com a temperatura.

Desta forma, apenas a separação dos dados em *clusters* não é suficiente para gerar um diagnóstico do sistema. Buscando suprir tal carência, a próxima seção apresenta uma metodologia de análise que utiliza a técnica de agrupamento apresentada para separar apenas os *baselines* em *clusters*, ou seja, fornecendo ao algoritmo dados da estrutura saudável em várias temperaturas diferentes, serão obtidos *clusters* por faixas de temperatura. Estes *clusters* serão utilizados para gerar um mapa de *baselines* que será tomado como base para fazer o julgamento de cada sinal desconhecido.

### 3.4 Separação dos *Baselines* em *Clusters*

A aplicação anterior verificou que o índice  $I_R$ , calculado para a estrutura sem dano, pode apresentar significativa diferença quando computado a partir de sinais obtidos a diferentes temperaturas ambientais. Isto implica na necessidade de entender com mais detalhes o comportamento destas variações nos índices.

Desta forma, é proposta uma metodologia cuja primeira etapa consiste na definição de valores ou faixas de temperatura de referência. Ou seja, uma importante quantidade de medições de impedância Eletromecânica deve ser realizada para a estrutura saudável visando a obtenção de um mapa de valores de referência. Esse mapa é denominado mapa de *baselines* e é obtido utilizando o método de classificação *FCM*. A partir dos mapa mencionado, os índices dos sinais nas condições desconhecidas são posicionados de forma a serem comparados com o *cluster* que representa a respectiva faixa de temperatura ambiente dos sinais medidos.

Contudo, apresenta-se a seguir uma metodologia de processamento, análise e interpretação dos índices de sensibilidade, cuja premissa é conhecer a temperatura ambiental para qualquer que seja o sinal obtido na condição estrutural desconhecida.

### 3.4.1 Mapa de Baselines secundários

Considere que a estrutura monitorada opera em uma faixa de temperatura e que esta faixa de temperatura pode ser dividida em  $N_{ref}$  subintervalos a partir de uma definição do projetista do sistema *SHM*, tal que:

$$[T_{min}, T_{max}] = [T_{min}, T_2]_1 \cup [T_2, T_3]_2 \dots \cup [T_{Nref}, T_{max}]_{Nref} \quad (13)$$

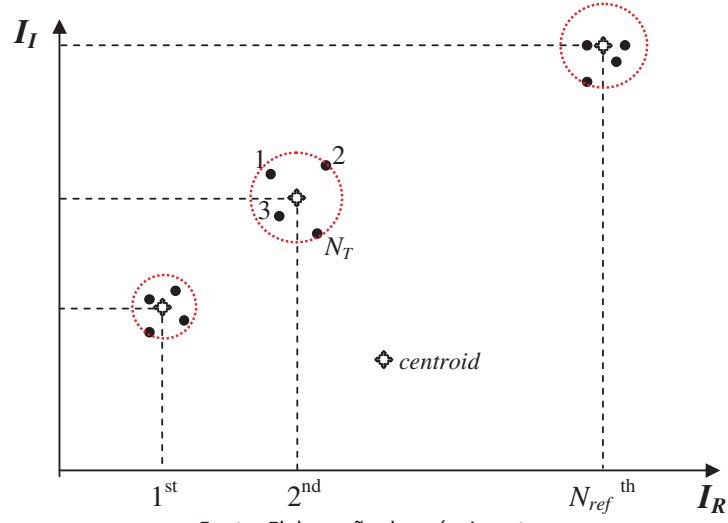
sendo  $\cup$  a notação para união dos intervalos.

Para a estrutura na condição saudável, para cada subintervalo de temperatura são medidos  $N_T$  sinais de Impedância Eletromecânica de maneira que:

$$T_{ref}^i \ C [T_i, T_{i+1}]_i \quad (14)$$

onde  $T_{ref}^i$  indica a temperatura de referência do  $i$ -ésimo intervalo e  $C$  é o símbolo de contido. Para a temperatura de referência (neste trabalho, a temperatura ambiente) são medidos  $N_T + N_{base}$  sinais, sendo que,  $N_{base}$  são utilizados para obter o sinal *baseline* utilizado nos cálculos dos índices  $I_I$  e  $I_R$  para todos os sinais restantes, em todas as temperaturas. Observe que o total de aquisições dos sinais para a estrutura saudável é  $N_T * N_{ref} + N_{base}$ .

A idéia do mapa de *baselines* secundários é construir uma distribuição de *clusters* no plano  $I_R \times I_I$  de maneira que, cada *cluster* irá representar o *baseline* para a faixa de temperatura que está contido. Cada *cluster* possui um centróide, cujas coordenadas serão utilizadas nos próximos passos do processamento. A Figura 22 apresenta um esboço do plano  $I_R \times I_I$ , os *clusters* e os respectivos centróides.

Figura 22 - Esboço do mapa de *baselines* secundários.

### 3.4.2 Regras de Decisão

Uma vez gerado o mapa de *baselines* secundários, para cada centróide  $i$  é obtido o vetor  $\vec{p}_i$  tal que  $r_i = \|\vec{p}_i\|$  corresponde ao raio de uma circunferência que contém p% dos pontos de referência ( $N_T$ ) – sendo  $p = 100\%$ . Considerando a origem da coordenado local de cada *cluster* no seu respectivo centróide, os pontos contidos no *cluster* podem ser definidos em como:

$$P_N = \bar{I}_R + j\bar{I}_I \quad (15)$$

sendo  $N = 1, \dots, N_T$  e  $j$  o número complexo imaginário puro (0,1). Desta forma,  $\|\vec{p}_i\|$  é entendido como o valor limiar (*threshold*) do  $i$ -ésimo *cluster*.

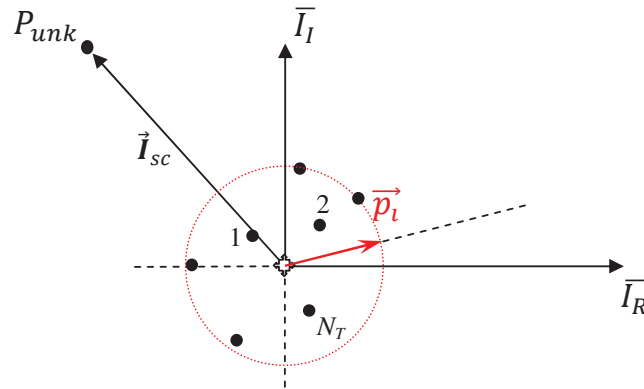
Para cada teste de monitoramento estrutural, considere o domínio  $\mathbb{D}_{unk}$  que contém  $N_{unk}$  medidas de Impedância Eletromecânica para uma condição desconhecida. Note que, para qualquer que seja a temperatura de aquisição dos  $N_{unk}$  sinais, existe um centróide com seu respectivo vetor  $\vec{p}_i$ . A cada medida, o ponto  $P_{unk} = I_R + jI_I$  é posicionado sobre o mapa

de *baselines*, e em seguida é obtido um índice complexo a partir das coordenadas locais do *cluster* mais próximo ao  $P_{unk}$ :

$$\|I_{sc}\|_{unk} = \|\bar{I}_R + j\bar{I}_I\|_{unk} \quad (16)$$

no qual  $I_{sc}$  é definido como o índice de diagnose da condição estrutural,  $\bar{I}_R$  é o Índice local relacionado a parte real (com origem no centróide do *cluster*) e  $\bar{I}_I$  é o Índice local relacionado a parte imaginária (com origem no centróide do *cluster*). Observe que  $\|I_{sc}\|_{unk}$  geometricamente corresponde ao vetor posição do ponto  $P_{unk}$  escrito no sistema local de coordenadas do  $i$ -ésimo centróide. A Figura 23 apresenta o vetor  $\vec{I}_{sc}$ , com origem no centróide do  $i$ -ésimo *cluster* e extremidade no ponto  $P_{unk}$ .

Figura 23 - Índice de diagnose da condição estrutural ( $\vec{I}_{sc}$ ) para o  $i$ -ésimo *cluster*.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A partir do índice de diagnóstico da condição estrutural,  $\vec{I}_{sc}$ , são apresentadas as regras de decisões que devem ser aplicadas para cada teste. Para clareza de entendimento a Figura 24 apresenta a região do mapa de *baselines* secundários associada a cada regra de decisão particularmente em torno de um dado *cluster*.

**Diagnóstico 1** : Presença de dano estrutural  $\Leftrightarrow \exists P_{unk} \in \mathbb{D}_{unk} / I_{sc} = \bar{I}_R + j\bar{I}_I$  associado à  $\forall P_{unk}$  :

$$\|I_{sc}\|_{unk} = \|\bar{I}_R + j\bar{I}_I\|_{unk} > \|\vec{p}_i\| \text{ e } |\text{real}(I_{sc})|_{unk} > \|\vec{p}_i\|, \forall i - \text{ésimo cluster} \quad (17)$$

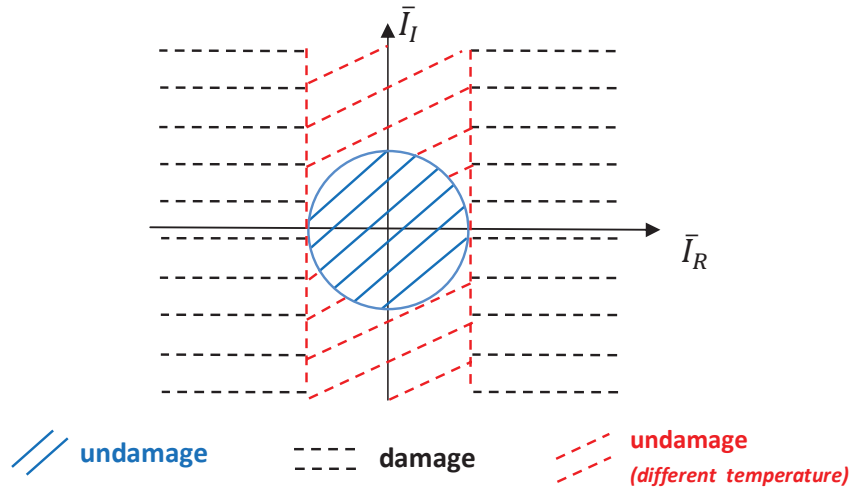
**Diagnóstico 2** : Ausência de dano estrutural, mas com variação de temperatura ( $\exists \Delta T$ )  $\Leftrightarrow$   
 $\exists P_{unk} \in \mathbb{D}_{unk} / :$

$$\|I_{sc}\|_{unk} = \|\bar{I}_R + j\bar{I}_I\|_{unk} > \|\vec{p}_i\|, \text{ mas } |\text{real}(I_{sc})|_{unk} \leq \|\vec{p}_i\|, \quad \forall i - \text{ésimo cluster} \quad (18)$$

**Diagnóstico 3** : Ausência de dano estrutural se

$$\|I_{sc}\|_{unk} = \|\bar{I}_R + j\bar{I}_I\|_{unk} \leq \|\vec{p}_i\| \quad \forall i - \text{ésimo cluster} \quad (19)$$

Figura 24 - Região no mapa de *baselines* em torno de um *cluster* qualquer.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

### 3.4.3 Descrição dos Testes Experimentais

Os experimentos foram realizados na mesma estrutura e aparato experimental descritos anteriormente (Figuras 15 e 17), no entanto, as temperaturas de referência adotadas e os danos inseridos foram diferentes. Os testes abordaram seis temperaturas diferentes (24°C, 40°C, 55°C, 70°C, 85°C e 100°C). A Tabela 3 apresenta os dados para a construção do mapa de *baselines*, onde os valores de *baselines* 1 a 6 devem ser entendidos como valores de referência para a estrutura saudável.

Tabela 3 - Dados para a construção do mapa de *baselines*.

Classificação do sinal	Condição Estrutural	Quantidade de sinais ( $N_{base}$ e $N_T$ )	Temperatura de referência (°C)
<i>baseline</i>	Saudável	5	24
<i>baseline 1</i>	Saudável	4	24
<i>baseline 2</i>	Saudável	4	40
<i>baseline 3</i>	Saudável	4	55
<i>baseline 4</i>	Saudável	4	70
<i>baseline 5</i>	Saudável	4	85
<i>baseline 6</i>	Saudável	4	100

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Desta forma, temos  $N_{base} = 5$  (cinco sinais medidos a temperatura ambiente),  $N_T = 4$  (quatro sinais medidos para construção de cada *cluster*) e  $N_{ref} = 6$  (seis faixas de temperaturas).

Em cada temperatura foram inseridas duas condições de dano. O dano 1 correspondeu a adição de um prendedor (Figura 25) e o dano 2 é resultante de um pequeno corte inserido na estrutura (3mm de profundidade e 1mm largura).

Figura 25 - Imagem do componente utilizado para simular o dano 1 (massa = 3g).



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Durante os testes experimentais verificou-se que a estufa térmica utilizada não apresentava perfeita isolamento térmica. Desta forma, a temperatura dos sinais obtidos variou em pequenas faixas ao redor da temperatura de referência especificada ( $T_{ref}^i \pm \delta T$ ). No entanto, para aplicações práticas, devido aos ambientes não serem controlados, as aquisições dos sinais de impedância eletromecânica são realizadas sob variações da temperatura ainda maiores do que as observadas nos testes. Contudo, a metodologia foi

testada e validada com dezoito testes experimentais. A Tabela 4 apresenta as descrições e os respectivos objetivos.

Tabela 4 - Descrição e objetivo dos testes.

Testes	Número de sinais	Condições	$T_{ref}$ (°C)	Objetivo do Teste
1	2	Dano 1	24	Detecção
2	2	Dano 1	40	Detecção
3	2	Dano 1	55	Detecção
4	2	Dano 1	70	Detecção
5	2	Dano 1	85	Detecção
6	2	Dano 1	100	Detecção
7	2	Dano 2	24	Detecção
8	2	Dano 2	40	Detecção
9	2	Dano 2	55	Detecção
10	2	Dano 2	70	Detecção
11	2	Dano 2	85	Detecção
12	2	Dano 2	100	Detecção
13	1	Sem dano	24	VFP
14	1	Sem dano	40	VFP
15	1	Sem dano	55	VFP
16	1	Sem dano	70	VFP
17	1	Sem dano	85	VFP
18	1	Sem dano	100	VFP

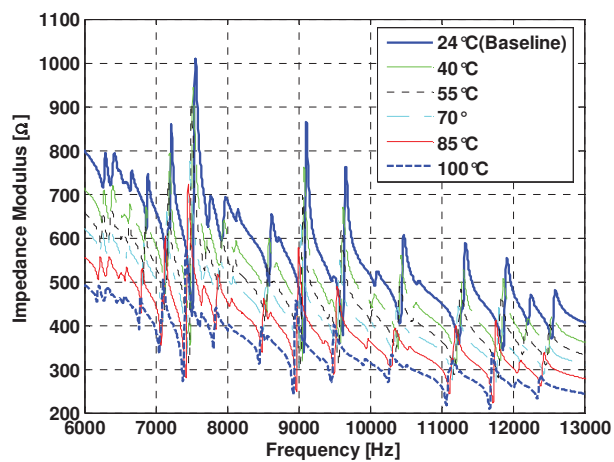
\*VFP – Verificação de Falso Positivo

Fonte: Elaboração do próprio autor.

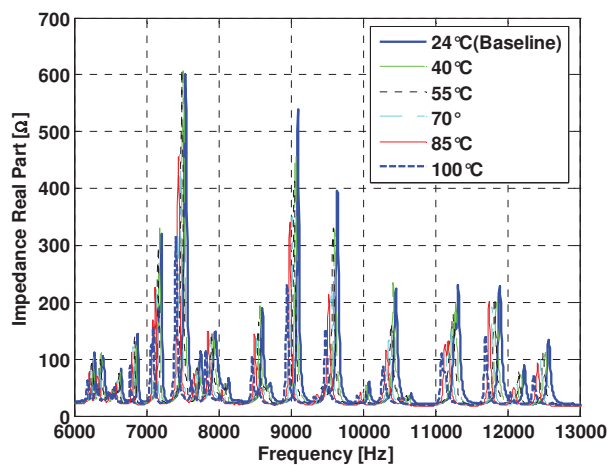
#### 3.4.4 Resultados e Discussões

As Figuras 26 (a), (b) e (c) apresentam o módulo, a parte real e a parte imaginária dos sinais da Impedância Eletromecânica para a faixa de frequência selecionada (de 6000Hz a 13000Hz), a partir do mesmo critério mencionado anteriormente.

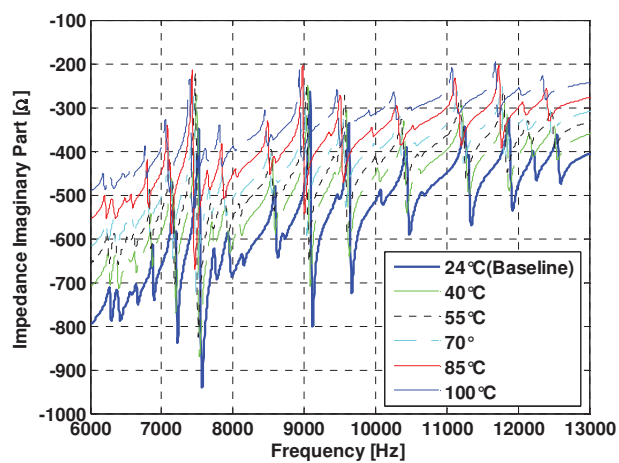
Figura 26 - Impedância Eletromecânica; (a) Módulo; (b) Parte real; (c) Parte imaginária.



(a)



(b)



(c)

Fonte: Elaboração do próprio autor.

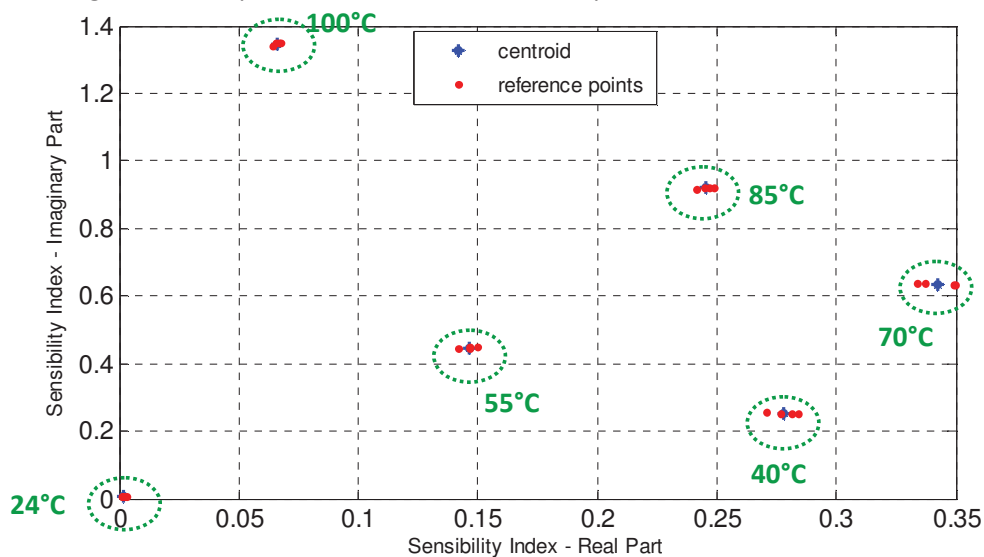
A Tabela 5 apresenta os valores de  $\|\vec{p}\|$  para cada *cluster* e a Figura 27 apresenta a distribuição no mapa de *baselines*. A Figura 28 apresenta um gráfico em barras que apresenta a probabilidade de cada sinal pertencer a determinado *cluster*. Note na Figura 28 que são os 24 sinais mencionados na Tabela 3 como *baselines* 1 a 6.

Tabela 5 – Valores de  $\|\vec{p}\|$  para cada *cluster*.

Temperatura de referência (°C)	$\vec{p} = I_R + jI_I$	$\ \vec{p}\ $
24	0,00172 + 0,00832i	0,00114
40	0,27802 + 0,25446i	0,00770
55	0,14615 + 0,44722i	0,00602
70	0,34251 + 0,63582i	0,00891
85	0,24543 + 0,92092i	0,00466
100	0,06596 + 1,34788i	0,00569

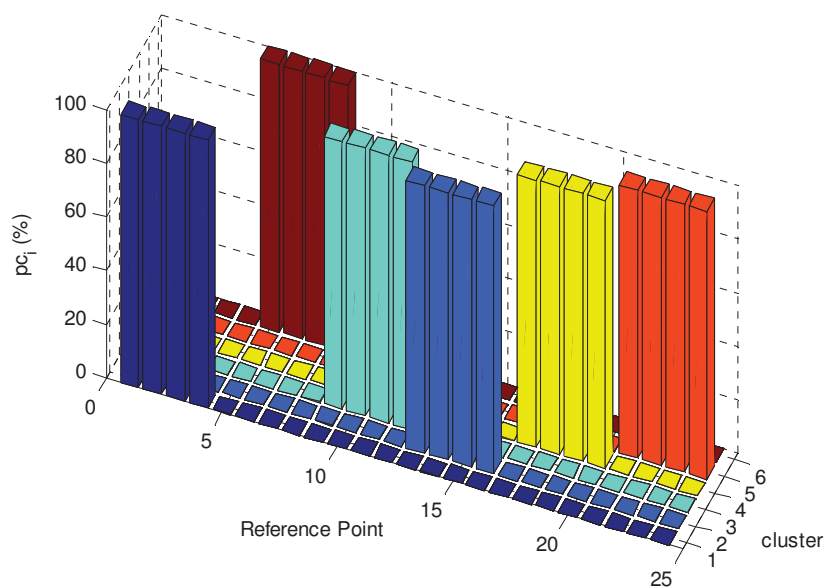
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 27 - Mapa de *baselines* construídos a partir dos valores de referência.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 28 - Probabilidade de cada ponto de referência pertencer a um *cluster*.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

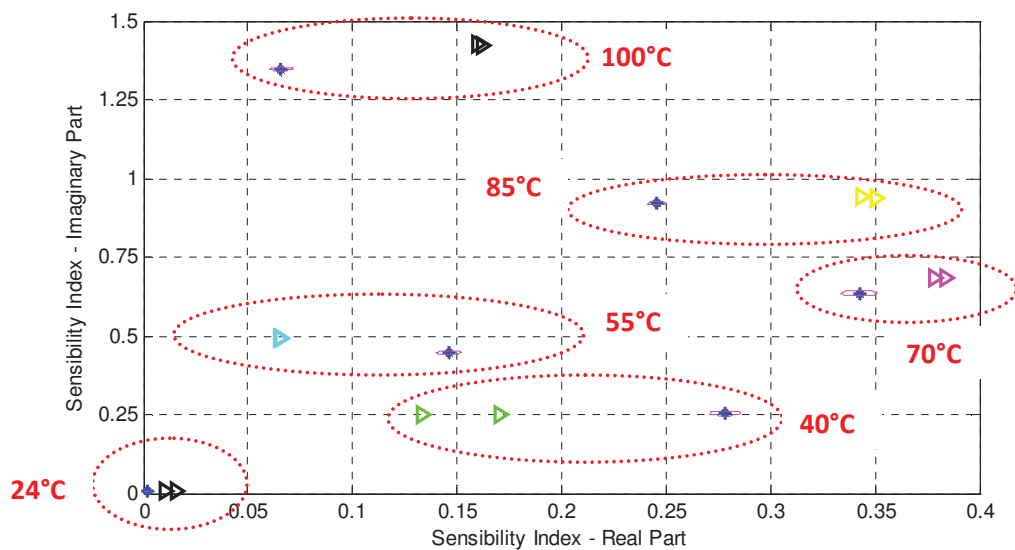
A metodologia proposta foi aplicada para os 18 testes indicados na Tabela 4. O objetivo foi verificar se o resultado de cada teste, obtido aplicando as regras de decisão, indicava o correto diagnóstico do teste. Na Tabela 6 estão os resultados obtidos para os testes executados e claramente se verifica que o diagnóstico para cada um é corretamente realizado. Para compreensão geométrica, a Figura 29 apresenta a visualização dos índices referentes aos testes com a presença do dano 1 (do primeiro ao sexto teste). Similarmente, as Figuras 30 e 31 apresentam os testes com dano 2 (do sétimo ao décimo segundo); e dos testes de verificação de falso positivo (do décimo terceiro ao décimo oitavo), respectivamente.

Tabela 6 - Resultados dos testes obtidos com a nova metodologia.

Testes	Número de sinais	$ real(I_{sc}) $	$\ I_{sc}\ $	Objetivo do Teste	Resultado Indicado pelas Regras de Decisão
1	2	0,01399 0,00864	0,01415 0,00871	Detecção	Diagnóstico 1
2	2	0,14519 0,10763	0,14522 0,10770	Detecção	Diagnóstico 1
3	2	0,08021 0,08158	0,09196 0,09301	Detecção	Diagnóstico 1
4	2	0,03612 0,04128	0,06076 0,06294	Detecção	Diagnóstico 1
5	2	0,10498 0,09782	0,10628 0,09989	Detecção	Diagnóstico 1
6	2	0,09346 0,09617	0,12090 0,12137	Detecção	Diagnóstico 1
7	2	0,13401 0,13645	0,14614 0,14791	Detecção	Diagnóstico 1
8	2	0,04217 0,04022	0,11392 0,11328	Detecção	Diagnóstico 1
9	2	0,09699 0,09990	0,09810 0,10102	Detecção	Diagnóstico 1
10	2	0,22288 0,21560	0,22653 0,21938	Detecção	Diagnóstico 1
11	2	0,13191 0,13644	0,13976 0,14427	Detecção	Diagnóstico 1
12	2	0,30165 0,30716	0,30527 0,31004	Detecção	Diagnóstico 1
13	1	0,00060	0,00153	VFP	Diagnóstico 2
14	1	0,00072	0,00094	VFP	Diagnóstico 3
15	1	0,00537	0,00537	VFP	Diagnóstico 3
16	1	0,00205	0,00214	VFP	Diagnóstico 3
17	1	0,00216	0,00541	VFP	Diagnóstico 2
18	1	0,00461	0,00474	VFP	Diagnóstico 3

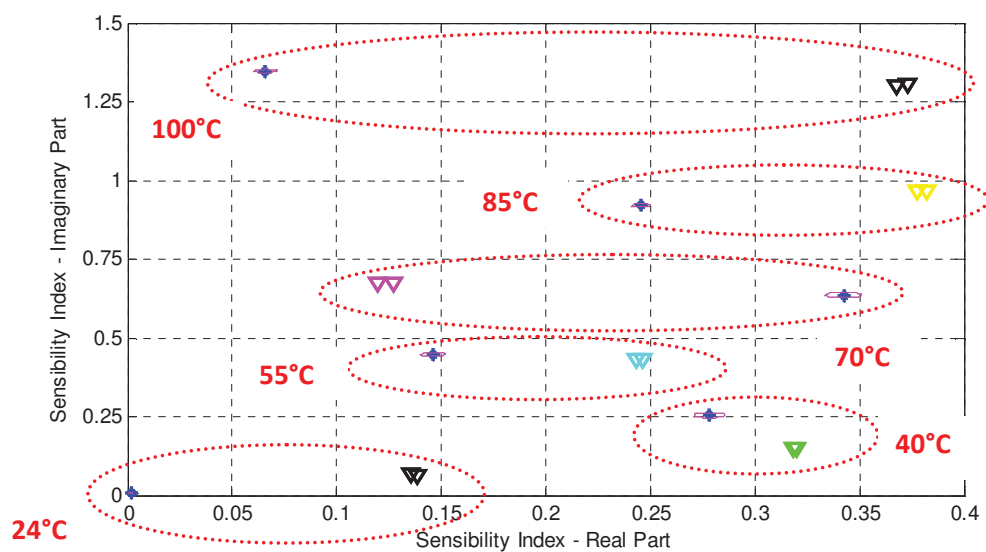
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 29 - Índices referentes aos testes com a inclusão do dano 1.



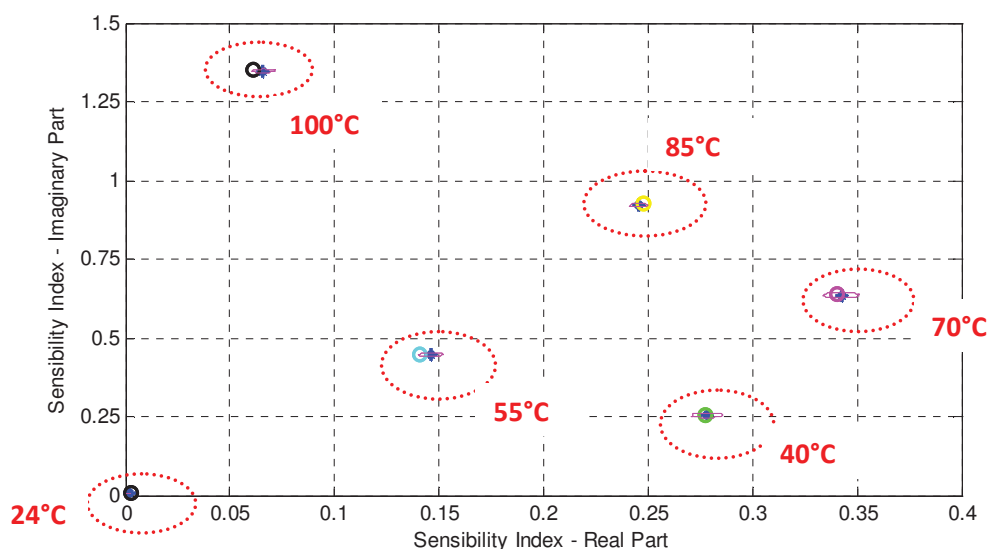
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 30 - Índices referentes aos testes com a inclusão do dano 2.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 31 - Índices referentes aos testes de verificação de falso positivo (sem de dano).



Fonte: Elaboração do próprio autor.

### 3.4.5 Conclusões e considerações finais

Este capítulo apresentou uma metodologia para considerar os efeitos causados nos diagnósticos de sistemas *SHM* devido às variações da temperatura ambiente. O agrupamento *Fuzzy c-means* foi utilizado para obter o mapa de *baselines*. Também foi definido um índice complexo para diagnóstico da integridade estrutural e, a partir dele, foram apresentadas três regras de decisões para caracterizar condições desconhecidas das estruturas.

A Tabela 6 apresentou o diagnóstico correto para cada um dos dezoito testes. Com isto, entende-se que os estudos apresentados neste capítulo constituem uma relevante contribuição para os projetos de sistemas *SHM* que visam minimizar o número de falsos alarmes induzidos por variações na temperatura ambiente. Além disto, a técnica proposta neste trabalho excede as faixas de temperatura em que os *PZTs* apresentam comportamento necessariamente linear, sendo então uma formulação mais abrangente. No entanto, a metodologia está em desenvolvimento inicial e necessita de estudos complementares, especialmente em:

- Emprego de outras métricas para cálculo dos índices de sensibilidade;
- Estudo de faixas de frequência que possam ser apenas sensíveis a variações de temperatura, mesmo na presença de danos;
  - Testes com funções custo no algoritmo *FCM*, visando desenvolver um mapa de *baselines* que possa permitir sobreposições de *clusters* ou, de forma mais geral, avaliar resultados obtidos a partir de mapas de *baselines* construídos por diferentes metodologias de agrupamento;
  - Melhor identificação das propriedades do sinal (módulo, parte real, imaginária e fase) visando entender melhor a sensibilidade da temperatura em cada componente do sinal;
  - Testar condições de testes com temperaturas inferiores a temperatura ambiente, de preferência, atingindo temperaturas negativas;
  - Estudo da propagação de danos e posicionamento de danos associados ao efeito da temperatura ambiente.

## **CAPÍTULO 4**

# **RECONHECIMENTO DE PADRÕES USANDO ANÁLISE DE VARIÂNCIA**

Um ponto crítico em sistemas de monitoramento da integridade estrutural utilizando a técnica da Impedância Eletromecânica é a compreensão, consideração e eliminação das influências geradas nos sinais de Impedância Eletromecânica devido a variações não relacionadas aos danos estruturais, como por exemplo, variações das condições de teste ou do meio ambiente.

Desta forma, considerando os mesmos parâmetros do sistema de aquisição e processamento dos sinais, variações aleatórias podem ser entendidas por alterações observadas nos sinais da Impedância E/M que não estejam diretamente relacionadas à presença de danos estruturais ou de danos no sistema de aquisição dos sinais. Tais alterações nos sinais podem ser geradas por variações de temperatura, pressão, umidade do ambiente, condições de carregamentos, comprimento e/ou espessura dos cabos de testes, dentre outras.

Portanto, é intuitivo concluir que a presença de tais influências aleatórias nos sinais medidos, além de dificultar a interpretação dos dados, pode levar a falsos diagnósticos. Assim, considerando um conjunto finito (de amostras) formado pelas medições de impedância Eletromecânica, para uma condição estrutural desconhecida, um desafio

adicional do sistema *SHM* é avaliar o diagnóstico obtido da análise deste conjunto de dados e fazer inferência ao conjunto formado pelo “universo” das medições para esta mesma condição estrutural, ou seja, para todas as medições feitas para esta determinada condição estrutural.

Em estatística, inferência estatística caracteriza-se por estender ao universo determinada característica observada em uma amostra (conjunto representativo). Em outras palavras, para possibilitar a inferência das características apresentadas pela amostra é preciso utilizar ferramentas de estatística para generalizar as características observadas em experimentos particulares. Ou seja, quando se usa estatística adequadamente em processos experimentais para tratamento dos resultados, os padrões observados em um número limitado de medições podem ser entendidos como os que verdadeiramente representam o universo em questão.

Visando fazer inferência do diagnóstico *SHM* observado em um experimento utilizando uma estrutura de painel aeronáutico, uma ferramenta estatística conhecida como *ANOVA*, do inglês *Analyse Of Variance* (ou análise de variância), foi utilizada para avaliar os índices de sensibilidade ao dano. O índice utilizado neste trabalho foi o *RMSD* (do inglês, *Root Mean Square Deviation*), que foi calculado a partir de um conjunto de sinais de impedância Eletromecânica considerando variações aleatórias nas condições de teste, nesse caso, variações na condição do meio ambiente, pois os sinais foram medidos em horários e dias variados (aleatórios).

Desta forma, este trabalho apresenta uma metodologia complementar para o desenvolvimento de sistemas reais de monitoramento da integridade estrutural compreendendo influências aleatórias nos sinais de Impedância E/M.

#### **4.1 Análise de Variância (ANOVA)**

Análise de variância é uma extensão do teste t de Student, o qual compara duas e apenas duas médias (VIEIRA, 2006). Desta forma, embora a *ANOVA* compreenda o estudo da variância dos índices obtidos nos experimentos, ela tem como finalidade comparar as

médias obtidas para as condições que estão sendo testadas (tratamentos). Essa comparação é feita por meio do teste F, que é apresentado na seção 4.1.1. Maiores detalhes da teoria apresentada nessa seção podem se encontradas no livro-texto Vieira (2006).

Tratamento é o termo utilizado em estatística para se referir ao que está em teste em um determinado experimento. Neste trabalho, tratamentos são representados pelas condições estruturais testadas (estrutura saudável, com dano 1, com dano 2, com danos múltiplos). Os danos podem ser numerados para facilitar a referência das falhas ou tipos de falhas introduzidas na estrutura.

Um teste de médias consiste em um teste de hipóteses que avalia a hipótese de todas as amostras terem a mesma média ( $H_0$ ) contra a hipótese de as médias dos grupos serem diferentes ( $H_1$ ). Sendo assim, se  $\mu_h$  é o valor médio de  $h = 1, 2, \dots, k$  onde  $k$  é o número de tratamentos, o teste de hipóteses consiste:

$$\begin{cases} H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k \\ H_1: \text{nem todas } \mu_h \text{ são iguais} \end{cases} \quad (20)$$

da qual  $H_0$  e  $H_1$  são chamadas, respectivamente, de hipótese da nulidade e hipótese alternativa.

O nível de significância do teste ( $\alpha$ ) é a probabilidade de se rejeitar  $H_0$  quando  $H_0$  é verdadeira. No século XX, existia certa dificuldade para se fazer cálculos rapidamente. Desta forma, estatísticos padronizaram tabelas com níveis de significância de 0,01 e 0,05. Estes valores acabaram sendo tradicionalmente adotados nos testes. Para o estudo apresentado neste texto, adotou-se  $\alpha = 0.05$ .

Para entender melhor a lógica de uma análise de variância aplicada a sistemas SHM considere um exemplo numérico: imagine que foram testadas quatro condições físicas em uma estrutura, por exemplo, estrutura sem dano, estrutura com dano 1, estrutura com dano 2 e estrutura com danos múltiplos (dano 1 e 2 ao mesmo tempo). Considerando que para cada uma das condições estruturais foram adquiridos cinco sinais em dias aleatórios, os

sinais foram processados, analisados e um índice foi calculado utilizando a parte do sinal selecionada para a análise de danos. A Tabela 7 apresenta os valores dos índices normalizados obtidos em cada situação.

Tabela 7 – Índices obtidos para cada sinal

	TRATAMENTOS			
	Estrutura sem dano ( <i>baseline</i> )	Estrutura com dano 1	Estrutura com dano 2	Estrutura com danos múltiplos
Índices obtidos a partir das medições	0,20	0,30	0,40	1,00
	0,15	0,35	0,50	1,10
	0,18	0,25	0,60	0,90
	0,10	0,20	0,56	0,94
	0,12	0,40	0,49	1,06
Médias	0,15	0,30	0,50	1,00

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A partir das médias apresentadas na Tabela 7 ainda não é possível concluir que as médias entre os tratamentos são diferentes, pois, isso consiste em fazer inferência a partir de um experimento, e para fazer inferência é preciso aplicar um teste estatístico.

A diferença entre as médias dos tratamentos tanto podem ser justificadas pelo acaso (por exemplo, variações não conhecidas nos testes), como pelo fato das condições estruturais serem diferentes em cada tratamento. Desta forma, a análise de variância dos dados será capaz de apontar até que ponto as diferenças observadas entre os tratamentos são suficientemente grandes para serem tomadas como evidências de que as médias desses tratamentos são mesmo diferentes. Desta forma, a análise de variância compara variações devido aos tratamentos com as variações devido ao acaso.

#### **4.1.1 Procedimentos de Cálculo da ANOVA**

Considerando um experimento inteiramente ao acaso o procedimento de cálculo de uma análise de variância consiste em:

1. Cálculo dos graus de liberdades (relacionados as fontes que geram variações);

De tratamentos:

$$GL_{trat} = k - 1 \quad (21)$$

Do total:

$$GL_{tot} = n - 1 = kr - 1 \quad (22)$$

Do resíduo:

$$GL_{res} = (n - 1) - (k - 1) = n - k \quad (23)$$

onde  $k$  é o número de tratamentos,  $r$  é o número de repetições  $n$  é o número total de dados. Neste trabalho tratamentos são as condições estruturais que foram medidas e o número de repetições refere-se ao número de vezes que o sinal foi medido para cada condições estrutural (para cada tratamento).

2. Cálculo do valor  $C$ , denominado correção;

$$C = \frac{(\sum y)^2}{n} \quad (24)$$

onde  $y$  é o valor do dado amostrado. Para esse trabalho,  $y$  corresponde aos valores dos índices extraídos a partir de cada sinal medido.

3. Cálculo da soma de quadrados do valor de correção. Este parâmetro estima as variações em torno de uma média geral;

$$SQT = \left(\sum y\right)^2 - C \quad (25)$$

4. Cálculo da soma de quadrados de tratamentos que estima a variação devido aos tratamentos;

$$SQTr = \frac{(\sum y)^2}{r} - C \quad (26)$$

5. Cálculo da soma de quadrados de resíduo que estima variação aleatória:

$$SQR = SQT - SQTr \quad (27)$$

6. Cálculo do quadrado médio de tratamentos;

$$QMTr = \frac{SQTr}{k - 1} \quad (28)$$

7. Cálculo do quadrado médio de resíduo;

$$QMR = \frac{SQR}{n - k} \quad (29)$$

8. Cálculo do valor de  $F$ ;

$$F = \frac{QMTr}{QMR} \quad (30)$$

Os resultados encontrados, normalmente, são apresentados em uma tabela de análise de variância (*ANOVA table*).

Tabela 8. ANOVA table para um experimento.

Causa de Variação	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrados médios	valor $F$
Tratamentos	$k - 1$	$SQTr$	$QMT_r$	$F$
Resíduo	$n - k$	$SQR$	$QMR$	
Total	$n - 1$	$SQT$		

Fonte: Vieira (2006).

Calculado o valor de  $F$  a partir dos dados experimentais é possível fazer a comparação com o valor crítico de  $F$ , que é obtido a partir do nível de significância selecionado e dos graus de liberdade envolvidos. O valor de  $F$  é tabelado, mas utilizando algoritmos em *softwares* específicos para as análises em questão, é comum obter o p-valor, que representa a probabilidade de valor tão grande, ou maior do que o obtido, ocorrer por acaso sob a hipótese de que as médias são iguais. Logo, basta comparar o p-valor com o nível de significância. Quando o p-valor for menor que o nível de significância estabelecido rejeita-se a hipótese de que as médias são iguais.

#### 4.1.2 Pressupostos básicos para se fazer uma ANOVA

Uma análise de variância só pode ser feita se foram satisfeitas algumas pressuposições. Considerando um experimento inteiramente ao acaso, os dados obtidos podem ser escritos na forma de um modelo:

$$Y_{hl} = \mu_h + \varepsilon_{hl} \quad (31)$$

onde  $\mu_h$  é a média verdadeira de todas as respostas possíveis e  $\varepsilon_{hl}$  é o erro.

Para garantir a validade dos resultados obtidos pela análise de variância é necessário fazer algumas pressuposições sobre os erros:

- os erros são variáveis aleatórias independentes;
- a variância é constante;
- a distribuição dos erros é normal ou aproximadamente normal.

Entretanto, não é possível saber a média verdadeira dos tratamentos,  $\mu_h$ , as médias obtidas a partir dos experimentos,  $y_h$ , são estimativas das médias verdadeiras. De mesma forma, não é possível saber os valores verdadeiros dos erros,  $\varepsilon_{hl}$ , mas a partir das médias estimadas,  $y_h$ , é possível calcular os erros estimados que recebem o nome de resíduos:

$$e_{hl} = Y_{hl} - y_h \quad (32)$$

A partir da estimação dos erros (resíduos), é possível fazer estudos do resíduos para verificar se a análise de variância feita é aceitável. A análise dos resíduos é extremamente útil, mas é gráfica, devendo-se verificar:

- **presença de dados discrepantes** – dados discrepantes são valores muito maiores ou muito menores que os esperados. É mais fácil visualizar dados discrepantes se for plotado um gráfico com os resíduos padronizados (standardized residuals) obtidos pela formula:

$$Z_h = \frac{e_{hl}}{\sqrt{QMR}} \quad (33)$$

67% dos resíduos padronizados devem cair no intervalo de -1 a +1, 95% dos resíduos padronizados devem cair no intervalo de -2 a +2 e valores fora do intervalo de -3 a +3 são suspeitos. Se ocorrer valores discrepantes uma avaliação detalhada deve ser feita para a amostra em questão;

- **se os resíduos são variáveis aleatórias independentes** – para que os resíduos sejam independentes é preciso que não haja correlações que gere tendências nas medições ao longo da ordem de aquisição dos dados. Para checar a independência dos dados é preciso plotar um gráfico dos resíduos padronizados pela ordem em que os dados foram coletados, se houver uma tendência dos resíduos correlacionados com a ordem da aquisição dos dados ocorre não-independência dos dados;

- **se a distribuição dos erros é normal** – a preocupação com a não normalidade na distribuição dos erros só ocorre quando existe curtose positiva ou assimetria na distribuição dos erros. Para esses dois casos, se for considerada normalidade na distribuição dos erros, pode ocorrer alterações no nível de significância do teste. Para analisar se os erros possuem distribuição normal é preciso fazer um gráfico de probabilidades normais (resíduos padronizados *versus* valores esperados da distribuição normal), se as pressuposições a respeito dos erros forem válidas e se não existirem valores discrepantes, no gráfico, os pontos ficarão distribuídos em torno de uma reta que passa pela origem e tem coeficiente angular igual a um. A não normalidade da distribuição dos resíduos também pode ser testada pelos denominados testes de aderência, os mais conhecidos são: teste de  $\chi^2$ , teste de Kolmogorov-Smirnov e teste de Shapiro- Wilks. Nos dados apresentados neste capítulo ocorreu heterocedasticidade de alguns conjuntos de amostras.
- **se a variância é constante (homocedasticidade)** – para verificar se as variâncias dos resíduos dos tratamentos são iguais utiliza-se algumas regras básicas. Segundo Dean e Voss (1999) uma análise de variância é considerada válida se a maior variância não exceder em três vezes a menor. Outra forma de pressupor variâncias iguais é garantir que os tratamentos sejam similares e que tenham o mesmo número de repetições. Também foram desenvolvidos vários testes para testar a homocedasticidade dos dados, dentre eles, os mais conhecidos são: teste de Cochran, teste de Bartlett e teste de Levene. O teste de Bartlett é sensível em relação a hipótese de normalidade dos dados. Para verificar se as variâncias são iguais foi selecionado o teste de Levene que consiste em transformar os dados originais e aplicar o teste da ANOVA aos dados transformados. Mais detalhes sobre o teste de Levene podem ser encontrados em Vieira (2006).

Entretanto, as análises de variância ainda podem ser aplicadas quando existem pequenos desvios das pressuposições apresentadas.

### 4.1.3 Comparação de Médias

A análise de variância é o primeiro passo na análise dos dados, posteriormente, é efetuado um exame das médias para se determinar a diferença entre elas.

Existem vários testes para comparação de médias que, normalmente, levam o nome de seus autores. Estes testes podem ser divididos em três grupos:

- para comparação de médias, duas a duas – exemplo: teste de Tukey;
- para comparação de médias de grupos tratados com o controle – exemplo: teste de Dunnet;
- para comparações múltiplas – exemplo: teste de Scheffé.

Este trabalho utiliza o teste de Turkey para comparação das médias. Para efetuar o teste é preciso calcular a diferença mínima,  $\Delta$ , que deve haver entre duas médias para que elas possam ser consideradas diferentes ao nível de significância selecionado:

$$\Delta = q \sqrt{\frac{QMR}{r}} \quad (34)$$

onde  $q$  é a amplitude estudentizada (valor tabelado),  $QMR$  é o quadrado médio do resíduo e  $r$  é o número de repetições de cada um dos tratamentos. Essa diferença mínima também é chamada de diferença honestamente significativa ou pela sigla *HSD*, do inglês *honestly significant difference*. A partir valor *HSD*:

$$\text{se } \mu_h - \mu_{h+1} > \Delta \longrightarrow \mu_h \neq \mu_{h+1} \quad (35)$$

$$\text{se } \mu_h - \mu_{h+1} \leq \Delta \longrightarrow \mu_h = \mu_{h+1} \quad (36)$$

Lembrando que, este trabalho apresenta uma metodologia para diagnóstico de estruturas que realiza análise de variância dos índices obtidos a partir dos sinais de impedância eletromecânica extraídos da estrutura em condições desconhecidas. O índice utilizado foi o *RMSD*. É importante lembrar também que para a metodologia *ANOVA* os

índices *RMSD* consistem nas grandezas obtidas em cada um dos experimentos,  $y_{hl}$ , cada condição estrutural representa um tratamento estatístico e que, o número de repetições representa o número de vezes que um sinal foi extraído para cada condição estrutural.

## 4.2 Índices de sensibilidades

Uma forma de quantificar e representar as alterações nos sinais da Impedância Eletromecânica (assim como, em outros sinais) é adotar índices que concentrem essas alterações em um número escalar. Este escalar pode ser denominado Índice de sensibilidade e, neste trabalho, consiste no índice *RMSD*. Analisando todas as partes do sinal de Impedância Eletromecânica (amplitude, parte real, parte imaginária, e fase dos sinais) são definidos quatro índices de sensibilidade:

$$I_A = \sum_{p=1}^t \sqrt{\frac{[Am(Z_{p,base}) - Am(Z_{p,unk})]^2}{[Am(Z_{p,base})]^2}} \quad (37)$$

onde  $Am()$  refere ao módulo do sinal,  $Z_{p,base}$  representa o sinal da Impedância Eletromecânica na condição *baseline* e  $Z_{p,unk}$  é o sinal da Impedância Eletromecânica, obtido do mesmo PZT, na condição estrutural desconhecida na  $p$ -ésima amostra (ou valor de frequência).

$$I_I = \sum_{p=1}^t \sqrt{\frac{[Im(Z_{p,base}) - Im(Z_{p,unk})]^2}{[Im(Z_{p,base})]^2}} \quad (38)$$

onde  $Im()$  representa a parte imaginária do sinal de Impedância Eletromecânica.

$$I_R = \sum_{p=1}^t \sqrt{\frac{[Re(Z_{p,base}) - Re(Z_{p,unk})]^2}{[Re(Z_{p,base})]^2}} \quad (39)$$

onde  $Re()$  representa a parte real do sinal de Impedância Eletromecânica.

$$I_{\phi} = \sum_{p=1}^t \sqrt{\frac{[\phi(Z_{p,base}) - \phi(Z_{p,unk})]^2}{[\phi(Z_{p,base})]^2}} \quad (40)$$

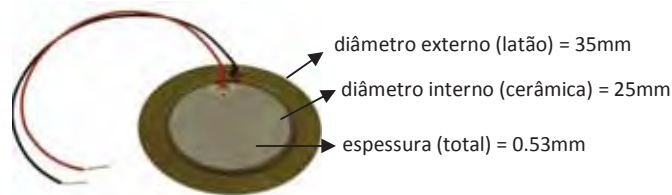
onde  $\phi()$  representa a fase do sinal de Impedância Eletromecânica.

Foram realizadas distintas análises de variâncias para todos os quatro índices de sensibilidades apresentados. Em outras palavras, para o mesmo conjunto de amostras (sinais) foram calculados os quatro índices para cada sinal amostrado e quatro análises de variância foram realizadas, uma para cada conjunto de índices referentes a determinada parte do sinal de Impedância Eletromecânica.

### 4.3 Descrição do experimento

A estrutura utilizada para os testes foi um painel aeronáutico com três *PZTs* acoplados. Os *PZTs* utilizados foram do tipo *buzzer*, modelo 7BB-25-3 da Murata Manufacturing. A Figura 32 apresenta uma imagem de um *PZT* tipo *buzzer* com a indicação das dimensões.

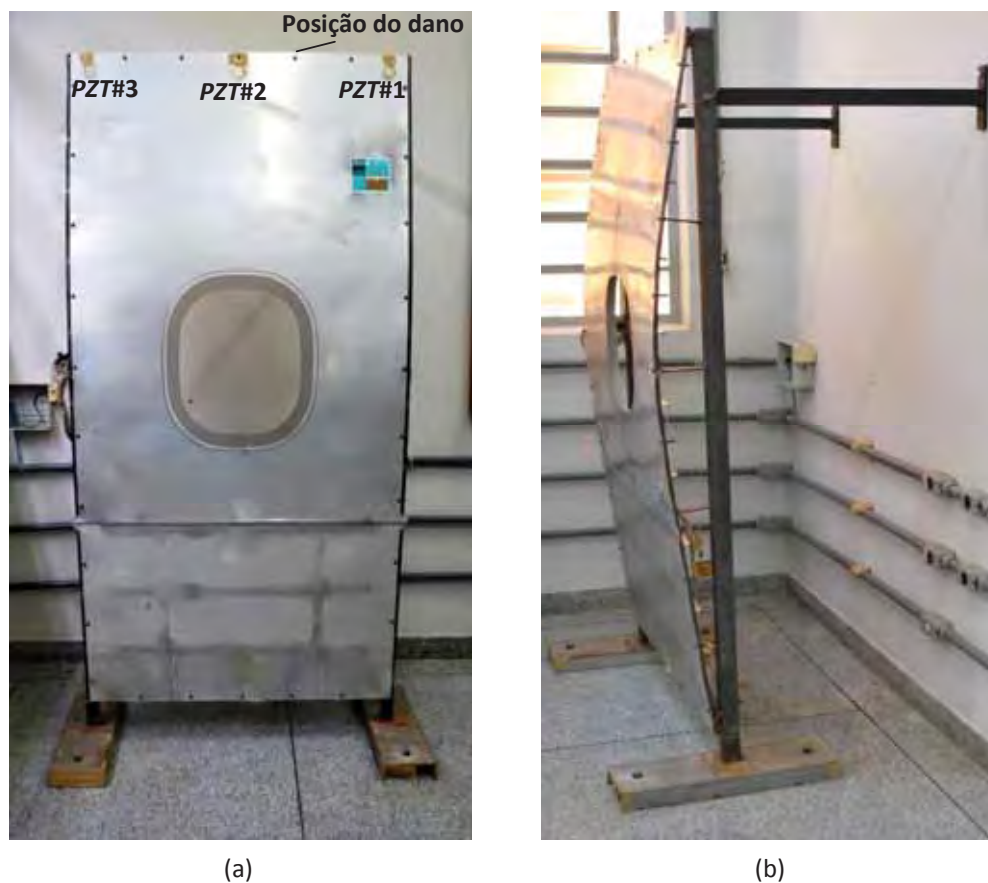
Figura 32 - Propriedades geométricas dos *buzzers*.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os danos foram simulados na estrutura soltando os parafusos de fixação do painel no suporte metálico. Imagens da estrutura utilizada, posicionamento dos *PZTs* e dos danos, assim como, as condições de contorno (suporte de fixação do painel) podem ser vistos na Figura 33.

Figura 33 - Imagens do painel aeronáutico utilizado nos testes experimentais; (a) Vista frontal - posições dos PZTs e do dano; (b) Vista mostrando o suporte metálico – condições de contorno do painel.



(a)

(b)

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os sinais foram adquiridos utilizando o *software* de medição da Impedância Eletromecânica proposto por Baptista e Viera Filho (2009). A Figura 34 apresenta um esboço do *setup* de medição utilizado.

Figura 34 - Setup experimental utilizado (dimensões em mm).



Fonte: Elaboração do próprio autor.

As curvas de Impedância Eletromecânica do sistema foram medidas em diferentes dias buscando considerar variações ambientais aleatórias nos sinais. Para cada PZT foi definido um sinal *baseline* a partir de oito medições aquisitadas aleatoriamente, porém, sem a presença de danos na estrutura. Definido o *baseline*, três condições estruturais foram testadas. A Tabela 9 apresenta a descrição de tais condições.

Tabela 9. Condições estruturais testadas (a posição do dano pode ser observada na Fig.4.3)

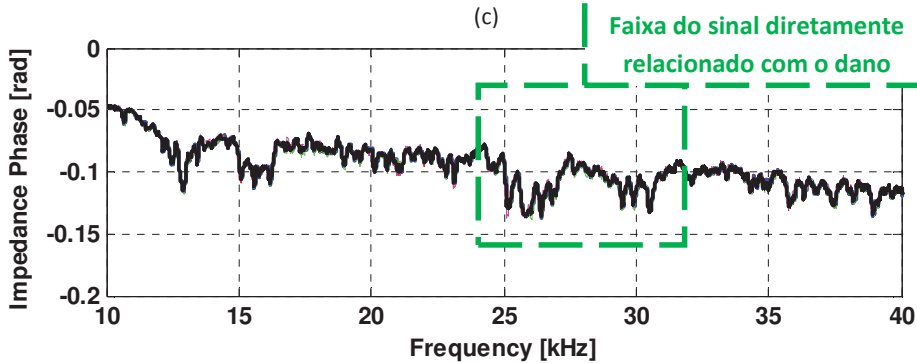
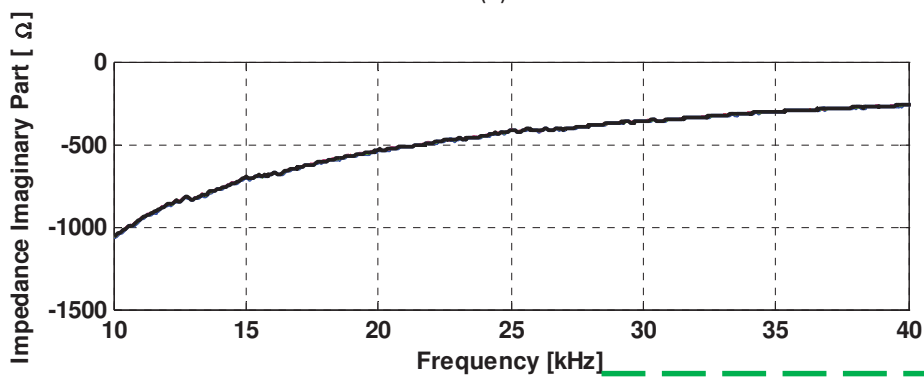
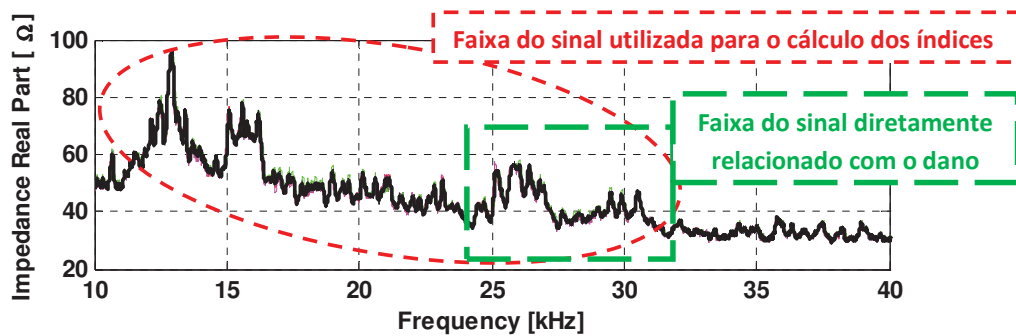
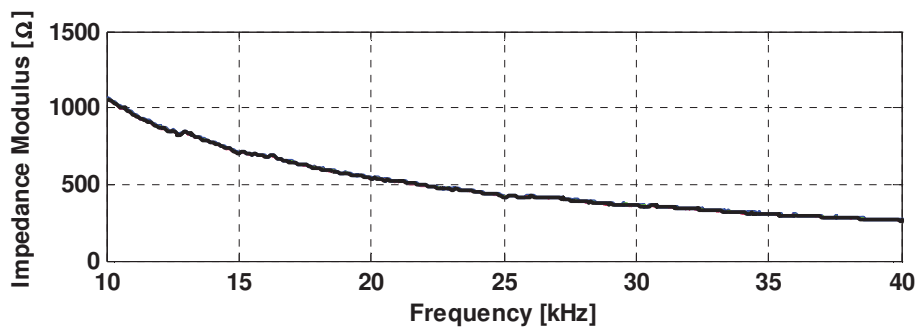
Condições	Número de sinais medidos para cada PZT	Descrição
Referência (sem dano)	13	<i>baseline</i>
Sem dano	8	Teste de falso positivo
Com dano 1	8	Parafuso solto (1 volta)
Estrutura Reparada	8	Parafuso reapertado para retornar a condição inicial (1 volta)

Fonte: Elaboração do próprio autor.

#### **4.4 Resultados e Discussões**

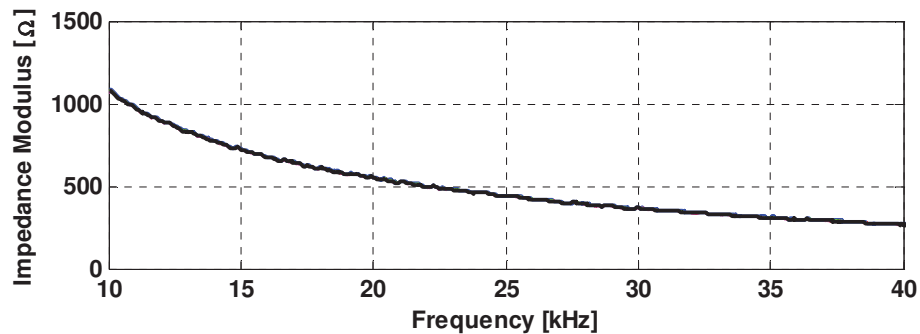
As Figuras 35, 36 e 37 apresentam os sinais experimentais extraídos de cada *PZT*, respectivamente, e utilizados para calcular sinais *baselines* que serão posteriormente utilizados para calcular os índices de sensibilidade ao dano.

Figura 35 - Sinais experimentais utilizados para compor o sinal *baseline* para o PZT1; (a) Módulo dos sinais de impedância; (b) Parte real; (c) Parte imaginária e (d) Fase do sinal.

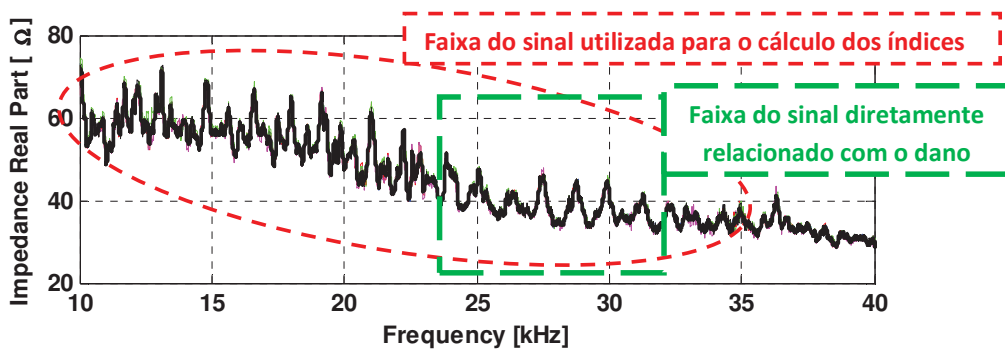


Fonte: Elaboração do próprio autor.

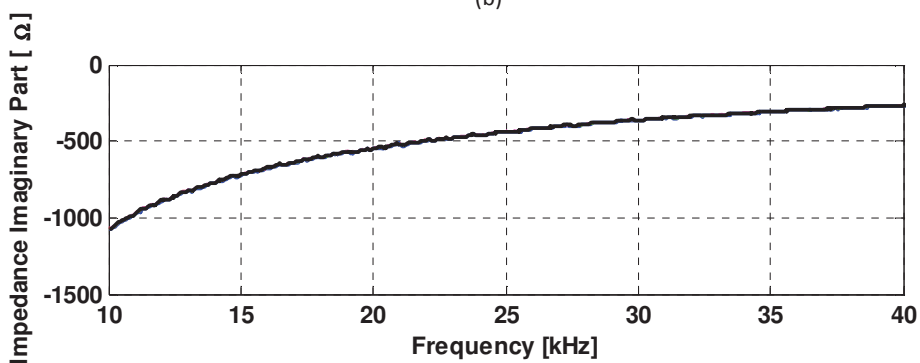
Figura 36 - Sinais experimentais utilizados para compor o sinal *baseline* para o *PZT2*; (a) Módulo dos sinais de impedância; (b) Parte real; (c) Parte imaginária e (d) Fase do sinal



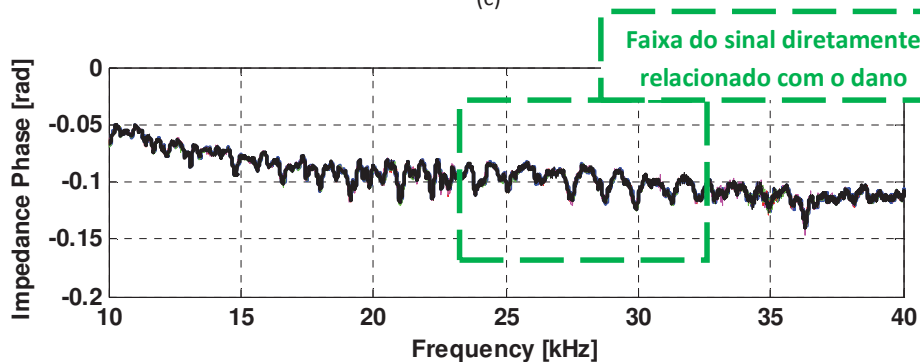
(a)



(b)



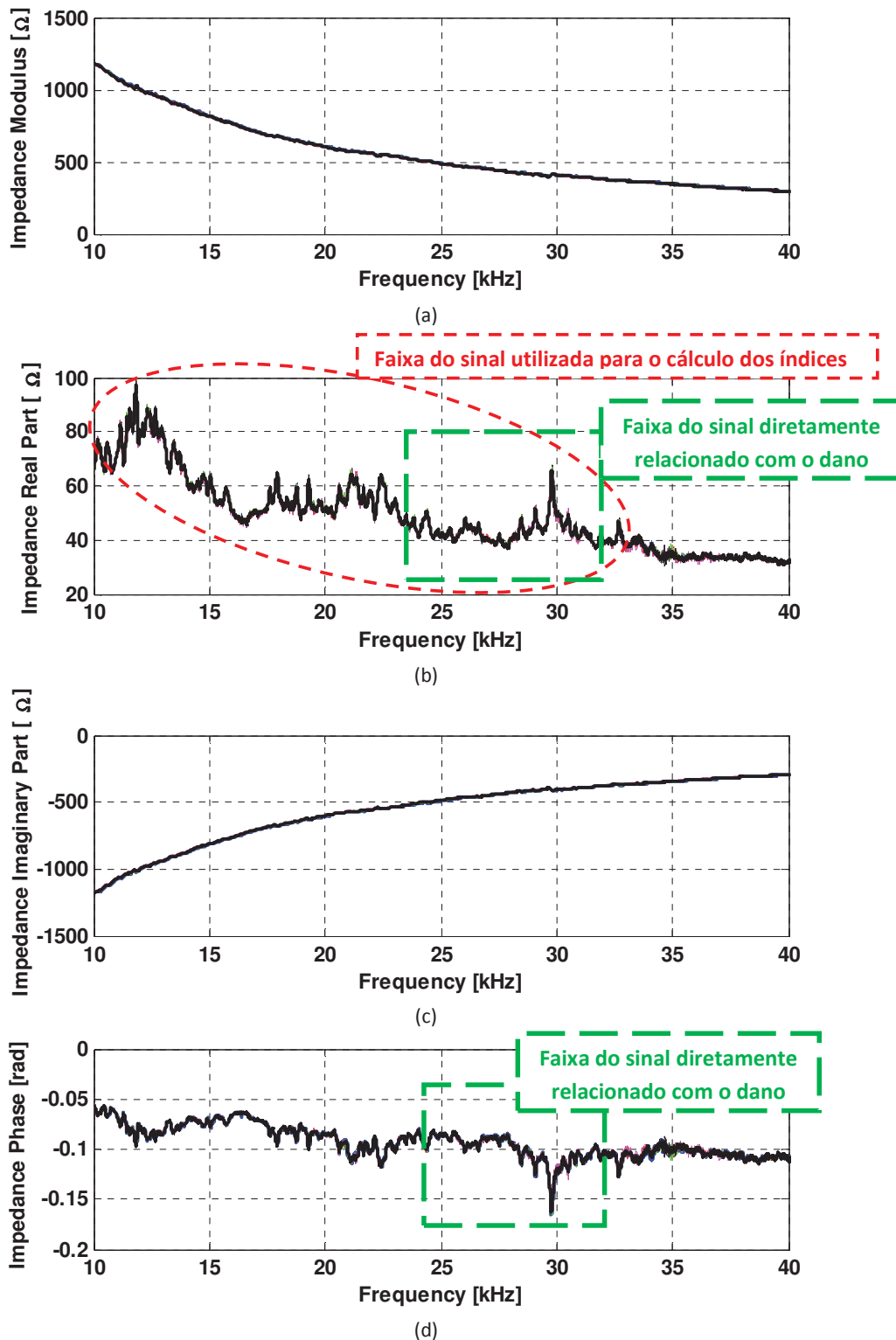
(c)



(d)

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 37 - Sinais experimentais utilizados para compor o sinal *baseline* para o *PZT3*; (a) Módulo dos sinais de impedância; (b) Parte real; (c) Parte imaginária e (d) Fase do sinal



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A partir dos sinais apresentados foi selecionada uma faixa de frequência ou faixa de sensibilidade, em destaque nas figuras acima, para ser utilizada no cálculo dos índices. A Tabela 10 destaca as regiões selecionadas para cada *PZT*.

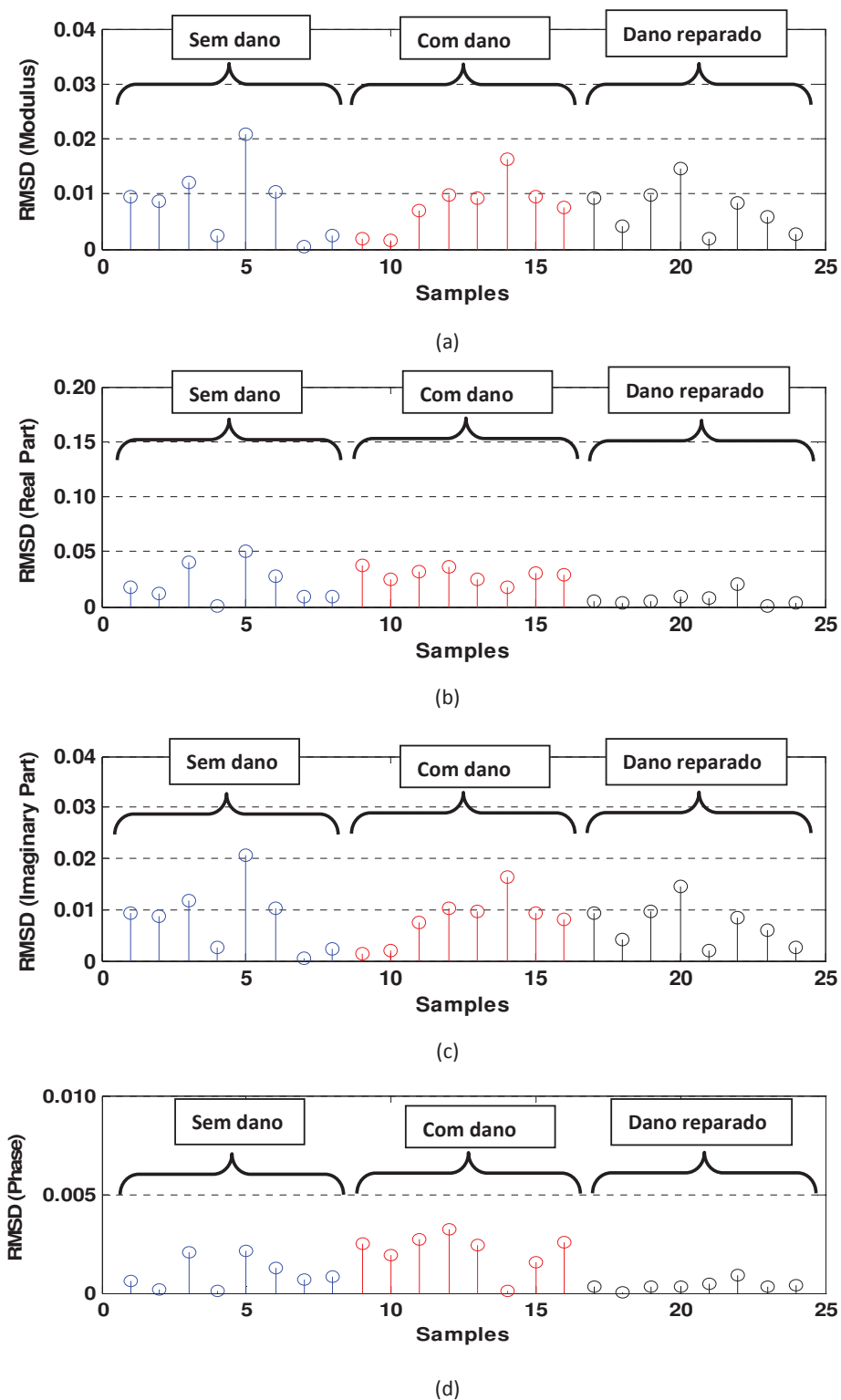
Tabela 10. Faixas de sensibilidade (em frequência) para cada *PZT*.

<b>Sensor/Atuador</b>	<b>Faixas de sensibilidade selecionadas</b>
PZT1	11kHz – 31kHz
PZT2	10kHz – 37kHz
PZT3	10kHz – 32kHz

Fonte: Elaboração do próprio autor.

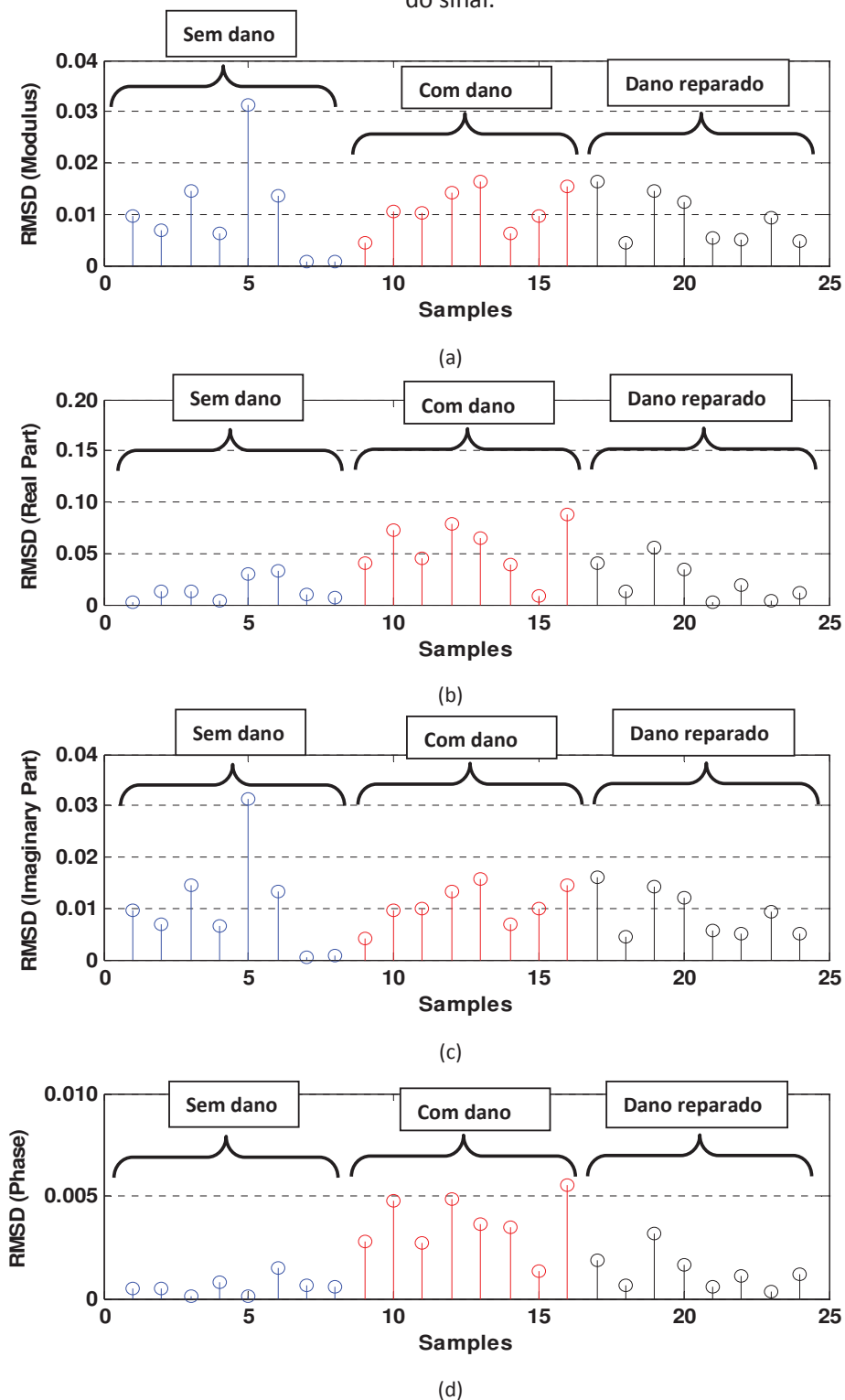
A partir das partes selecionadas dos sinais experimentais é possível calcular os índices *RMSD* utilizando as Eqs. (37), (38), (39) e (40). As Figuras 38, 39 e 40 apresentam a distribuição de tais índices para cada *PZT*, respectivamente.

Figura 38 - Índices *RMSD* calculados a partir dos sinais extraídos do *PZT1* utilizando; (a) o módulo dos sinais de impedância; (b) Parte real; (c) Parte imaginária e (d) Fase do sinal.



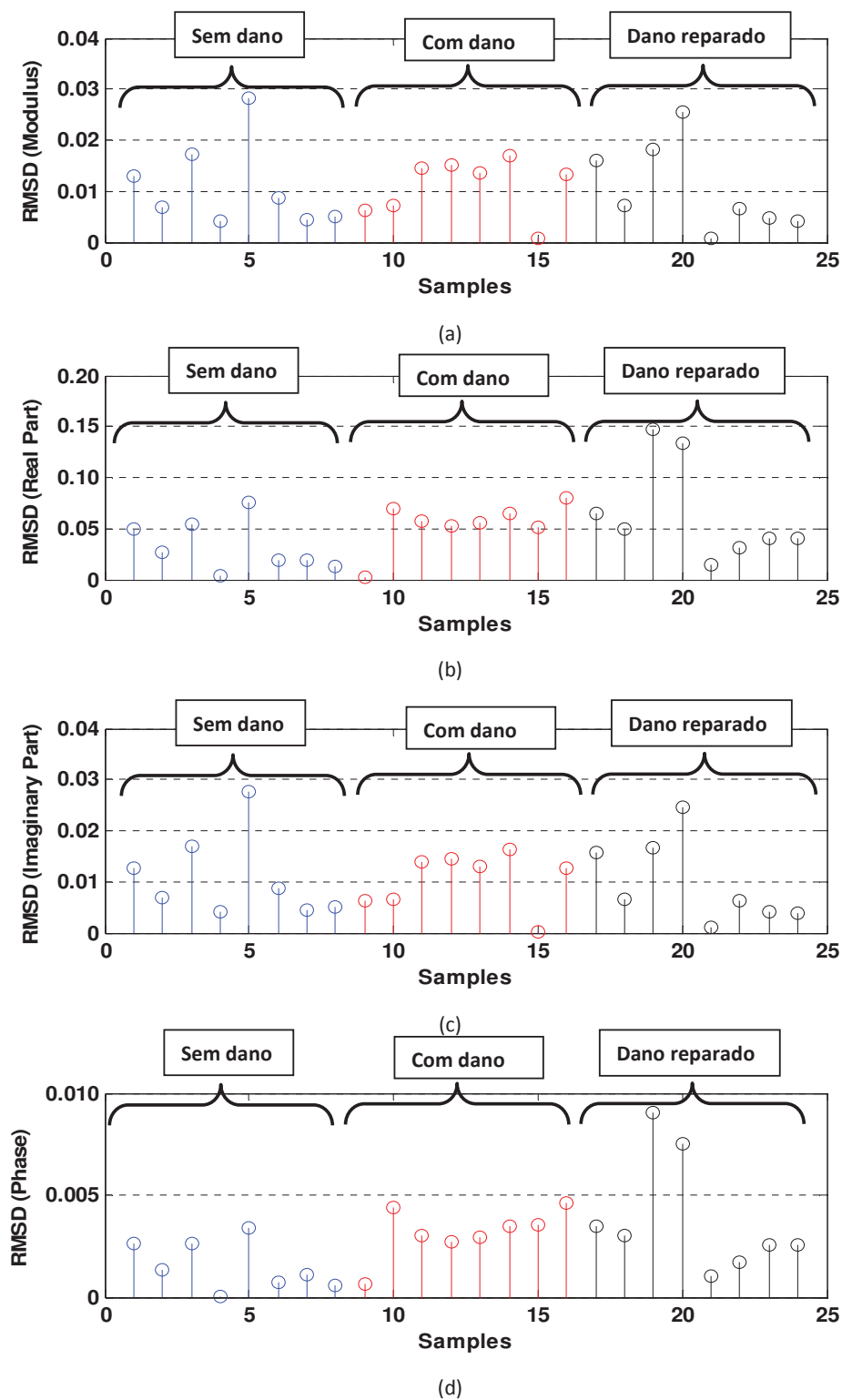
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 39 - Índices  $RMSD$  calculados a partir dos sinais extraídos do  $PZT2$  utilizando; (a) o módulo dos sinais de impedância; (b) Parte real; (c) Parte imaginária e (d) Fase do sinal.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 40 - Índices  $RMSD$  calculados a partir dos sinais extraídos do  $PZT3$  utilizando; (a) o módulo dos sinais de impedância; (b) Parte real; (c) Parte imaginária e (d) Fase do sinal.



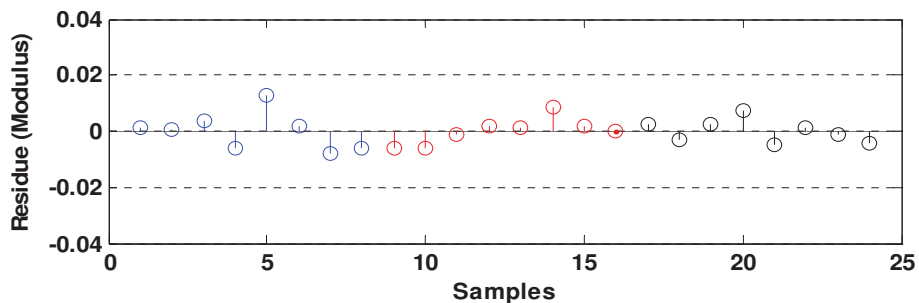
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os índices apresentados acima representam as amostras,  $y_i$ , para a análise de variância. Lembrando que cada condição estrutural corresponde a um tratamento, para cada condições estrutural é calculada uma média que corresponde a estimativa do valor real do índice na determinada condição,  $Y_{ij}$ . A partir do calculo das médias é realizado o cálculo dos resíduos. A distribuição dos resíduos,  $e_{ij}$ , é apresentada nas Figuras 41, 42 e 43.

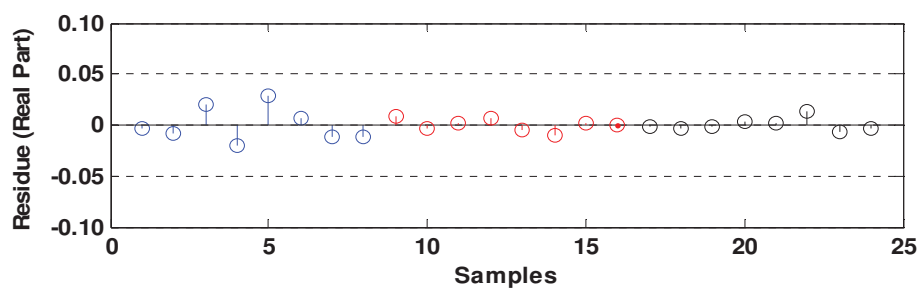
Como foi apresentado na seção 4.1.2, existem alguns pressupostos básicos para garantir a validade de uma ANOVA, são eles:

- **presença de dados discrepantes** – 100% dos resíduos padronizados estão na faixa de -1 a 1 ;
- **se os resíduos são variáveis aleatórias independentes** - Observando os gráficos da distribuição dos resíduos é possível notar que não existe correlação dos resíduos com a ordem das medições, ou seja, podemos considerar que os resíduos são variáveis aleatórias independentes.;
- **se a distribuição dos erros é normal** - Para verificar a distribuição normal dos resíduos foi efetuado o teste de Lilliefors (CONOVER, 1980). Verificar a normalidade dos resíduos implica em garantir que o teste efetivamente terá o nível de significância selecionado, neste caso 0,05. No entanto, para os conjuntos das amostras em destaque nas Figuras 41 (b) e 43 (a, b e d) ocorre distribuição não normal dos resíduos;
- **se a variância é constante (homocedasticidade)** - Para verificar se as variâncias são constantes, foi efetuado o testes de Levene que não descartou a hipótese das variâncias serem iguais. Desta forma, as análises de variâncias podem ser efetuadas sem problemas.

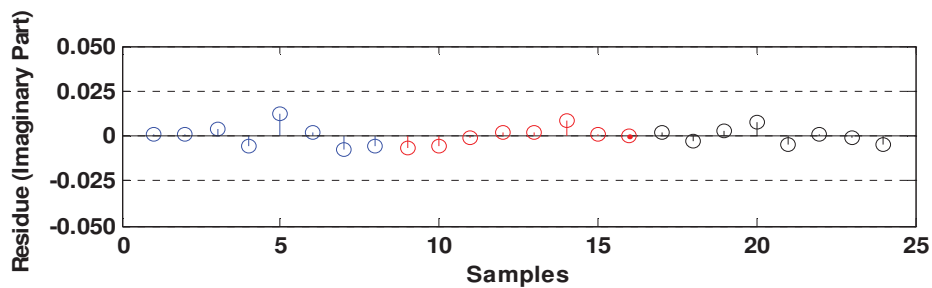
Figura 41 - Resíduos calculados a partir dos índices *RMSD* para o *PZT1* utilizando; (a) o módulo dos sinais de impedância; (b) Parte real; (c) Parte imaginária e (d) Fase do sinal.



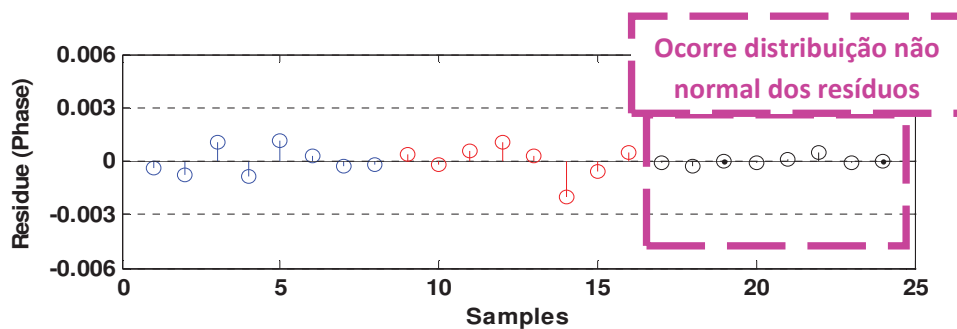
(a)



(b)



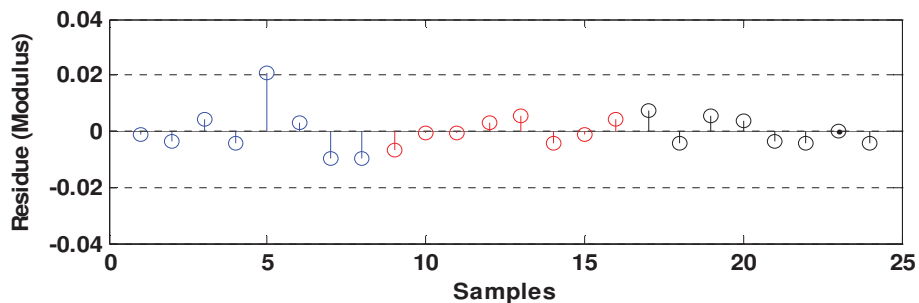
(c)



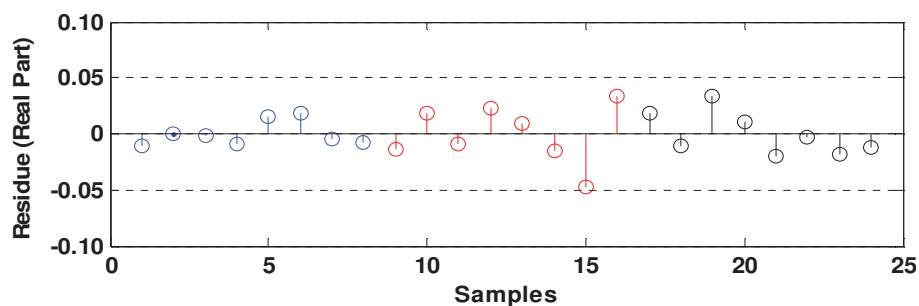
(d)

Fonte: Elaboração do próprio autor.

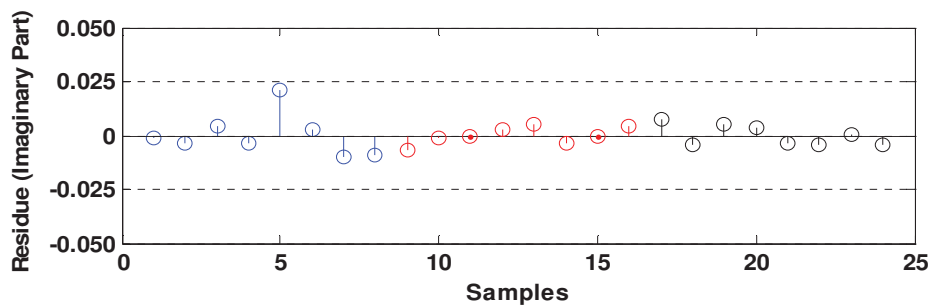
Figura 42 - Resíduos calculados a partir dos índices *RMSD* para o *PZT2* utilizando; (a) o módulo dos sinais de impedância; (b) Parte real; (c) Parte imaginária e (d) Fase do sinal.



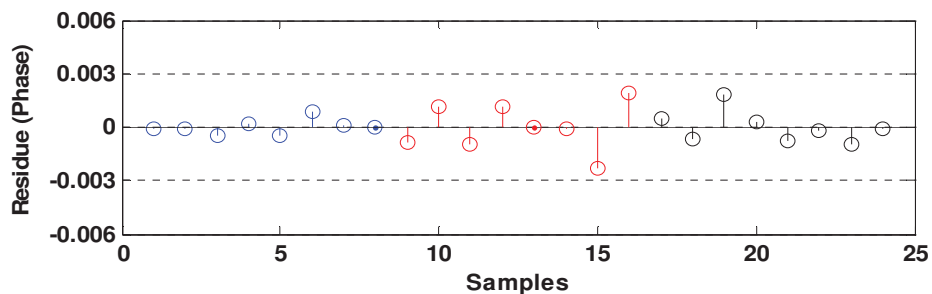
(a)



(b)



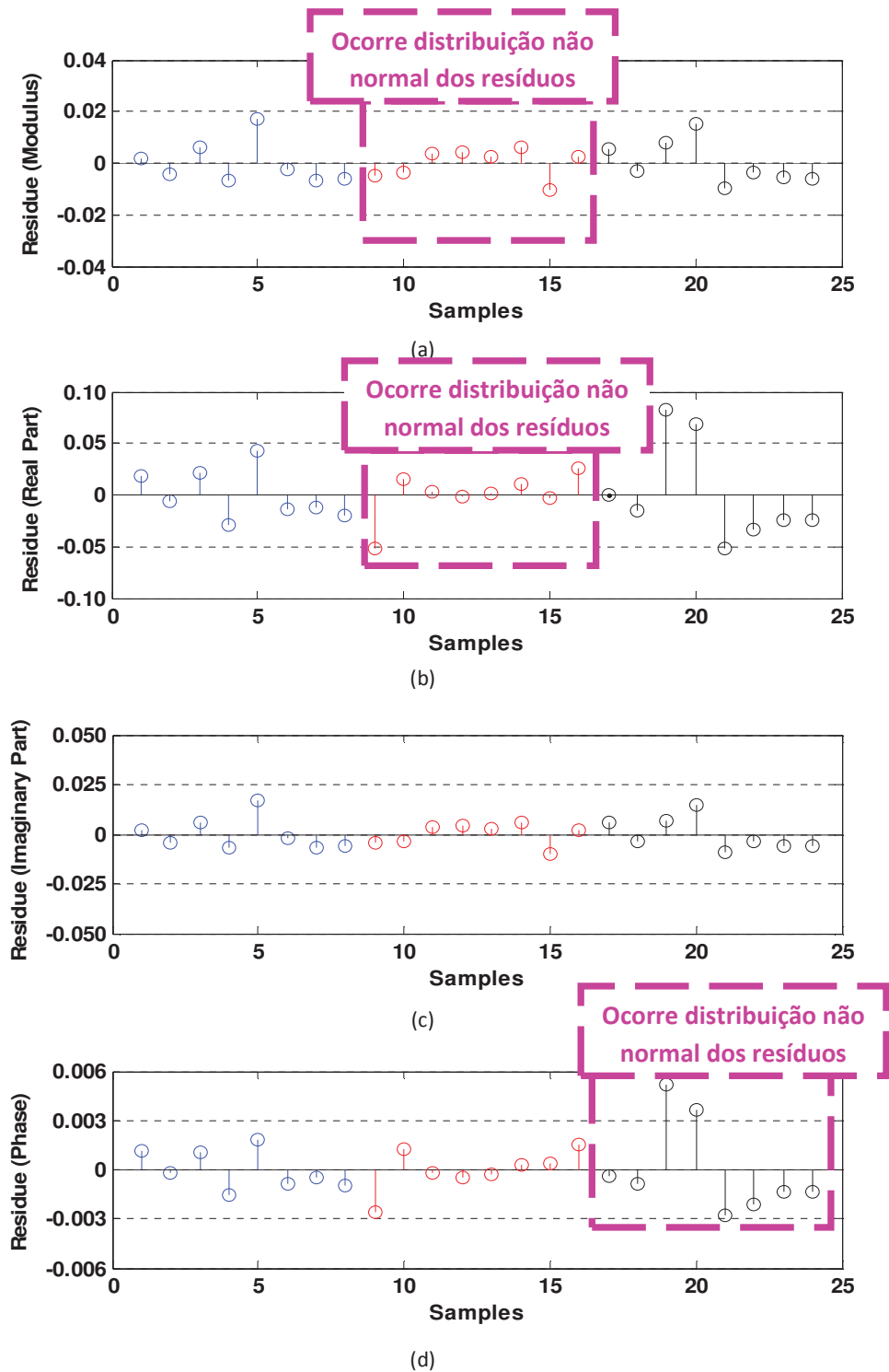
(c)



(d)

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 43 - Resíduos calculados a partir dos índices *RMSD* para o *PZT3* utilizando; (a) o módulo dos sinais de impedância; (b) Parte real; (c) Parte imaginária e (d) Fase do sinal.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Aplicando a ANOVA nos dados apresentado, para cada PZT é obtida 4 ANOVA table, uma para cada parcela dos sinais (módulo, parte real, parte imaginária e fase) extraídos para cada PZT. Os resultados obtidos para o PZT1 podem ser vistos nas Tabelas 11, 12, 13 e 14. Os resultados obtidos para o PZT2 podem ser vistos nas Tabelas 15, 16, 17 e 18. E os resultados da análise de variância obtidos para os sinais aquisitados a partir do PZT3 podem estão nas Tabelas 19, 20, 21 e 22

Tabela 11. ANOVA table para os índices calculados a partir dos módulos dos sinais extraídos do PZT1.

Causa de Variação	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrados médios	valor F	p value
Tratamentos	2	0,00001	0,0000064	0,12	0,8838
Resíduo	21	0,00109	0,0000510		
Total	23	0,00110			

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 12. ANOVA table para os índices calculados a partir das partes reais dos sinais extraídos do PZT1.

Causa de Variação	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrados médios	valor F	p value
Tratamentos	2	0,00329	0,00164	2,20	0,1359
Resíduo	21	0,01571	0,00075		
Total	23	0,01899			

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 13. ANOVA table para os índices calculados a partir das partes imaginárias dos sinais extraídos do PZT1.

Causa de Variação	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrados médios	valor F	p value
Tratamentos	2	0,00001	0,0000066	0,13	0,8766
Resíduo	21	0,00105	0,0000500		
Total	23	0,00106			

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 14. ANOVA table para os índices calculados a partir das fases dos sinais extraídos do PZT1.

Causa de Variação	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrados médios	valor F	p value
Tratamentos	2	0,000020	0,0000102	6,49	<b>0,0064</b>
Resíduo	21	0,000033	0,0000016		
Total	23	0,000054			

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 15. ANOVA table para os índices calculados a partir dos módulos dos sinais extraídos do PZT2.

Causa de Variação	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrados médios	valor F	p value
Tratamentos	2	0,00001	0,0000073	0,16	0,8541
Resíduo	21	0,00096	0,000046		
Total	23	0,00098			

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 16. ANOVA table para os índices calculados a partir das partes reais dos sinais extraídos do PZT2.

Causa de Variação	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrados médios	valor F	p value
Tratamentos	2	0,00739	0,0037	9,37	<b>0,0012</b>
Resíduo	21	0,00829	0,00039		
Total	23	0,01568			

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 17. ANOVA table para os índices calculados a partir das partes imaginárias dos sinais extraídos do PZT2.

Causa de Variação	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrados médios	valor F	p value
Tratamentos	2	0,00001	0,0000062	0,14	0,8708
Resíduo	21	0,00093	0,000044		
Total	23	0,00095			

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 18. ANOVA table para os índices calculados a partir das fases dos sinais extraídos do PZT2.

Causa de Variação	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrados médios	valor F	p value
Tratamentos	2	0,00004	0,00002	21,06	<b>0,00001</b>
Resíduo	21	0,00002	0,00000095		
Total	23	0,00006			

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 19. ANOVA table para os índices calculados a partir dos módulos dos sinais extraídos do PZT3.

Causa de Variação	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrados médios	valor F	p value
Tratamentos	2	0	0,00000083	0,01	0,9858
Resíduo	21	0,00121	0,000058		
Total	23	0,00121			

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 20. ANOVA table para os índices calculados a partir das partes reais dos sinais extraídos do PZT3.

Causa de Variação	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrados médios	valor F	p value
Tratamentos	2	0,00435	0,00217	1,87	0,1792
Resíduo	21	0,02445	0,00116		
Total	23	0,0288			

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 21. ANOVA table para os índices calculados a partir das partes imaginárias dos sinais extraídos do PZT3.

Causa de Variação	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrados médios	valor F	p value
Tratamentos	2	0	0,0000018	0,03	0,9683
Resíduo	21	0,00114	0,000054		
Total	23	0,00114			

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 22. ANOVA table para os índices calculados a partir das fases dos sinais extraídos do PZT3.

Causa de Variação	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrados médios	valor F	p value
Tratamentos	2	0,00002	0,000011	3,03	0,0696
Resíduo	21	0,00008	0,0000037		
Total	23	0,0001			

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Como discutido anteriormente comparando o  $p$ -valor com o nível de significância do teste, no caso 0,05, é possível saber se as médias são iguais ou diferentes. Desta forma, a Tabela 23 sintetiza os  $p$ -valores encontrados e o diagnóstico obtido.

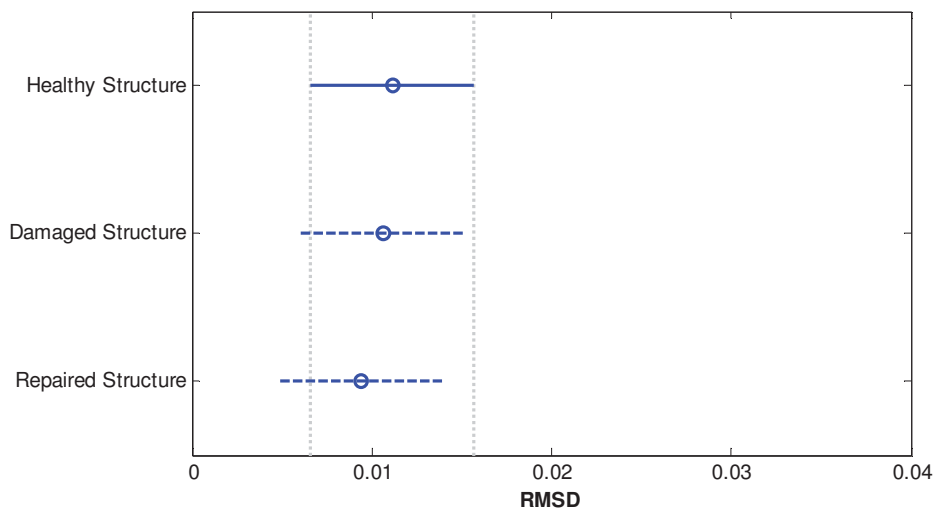
Tabela 23.  $p$ -valores encontrados nas análises de variâncias.

Sensor/Atuador	Parte do sinal utilizada	$p$ -valor	Conclusão
<b>PZT1</b>	Módulo	0,8838 ( $\geq 0,05$ )	Médias iguais
	Parte real	0,1359 ( $\geq 0,05$ )	Médias iguais
	Parte imaginária	0,8766 ( $\geq 0,05$ )	Médias iguais
	Fase	<b>0,0064</b> ( $\leq 0,05$ )	Médias diferentes
<b>PZT2</b>	Módulo	0,8541 ( $\geq 0,05$ )	Médias iguais
	Parte real	<b>0,0012</b> ( $\leq 0,05$ )	Médias diferentes
	Parte imaginária	0,8708 ( $\geq 0,05$ )	Médias iguais
	Fase	<b>0,00001</b> ( $\leq 0,05$ )	Médias diferentes
<b>PZT3</b>	Módulo	0,9858 ( $\geq 0,05$ )	Médias iguais
	Parte real	0,1792 ( $\geq 0,05$ )	Médias iguais
	Parte imaginária	0,9683 ( $\geq 0,05$ )	Médias iguais
	Fase	0,0696 ( $\geq 0,05$ )	Médias iguais

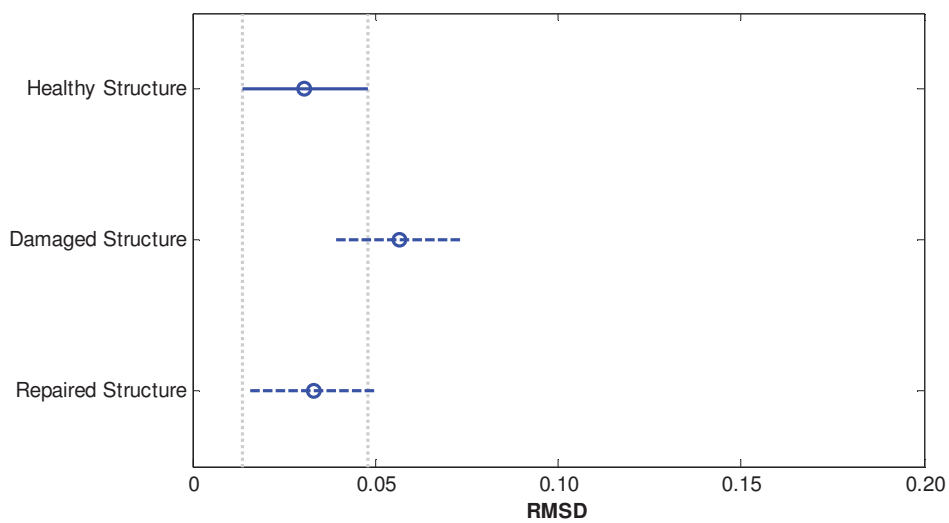
Fonte: Elaboração do próprio autor.

A partir dos resultados observados na Tabela 23 ainda não é possível saber quais médias são diferentes entre si, apenas é possível saber que existem médias diferentes entre os tratamentos de determinada análise de variância. Para descobrir quais médias são diferentes entre si é preciso efetuar uma comparação de médias, como apresentado na seção 4.1.6. As Figuras 44, 45 e 46 apresentam os resultados do teste de Tukey efetuado utilizando os dados de cada ANOVA realizada. É possível observar que o dano foi detectado pelo PZT1, utilizando a fase do sinal e, pelo PZT2 utilizando parte real e fase do sinal da impedância E/M.

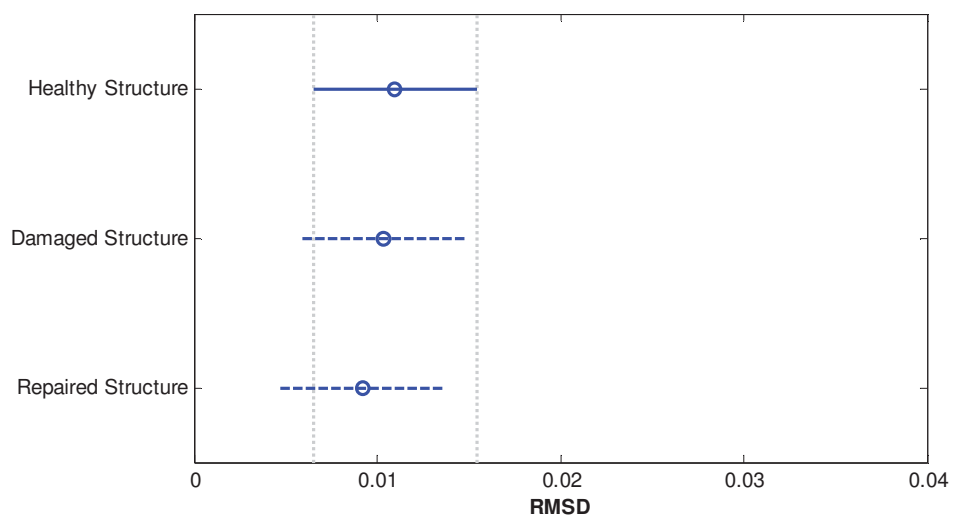
Figura 44 - Comparação de médias (teste de Tukey) a partir dos resultados obtidos na ANOVA dos dados aquisistados do PZT1, utilizando; (a) Módulo do sinal de impedância E/M; (b) Parte real; (c) Parte imaginária; (d) Fase do sinal.



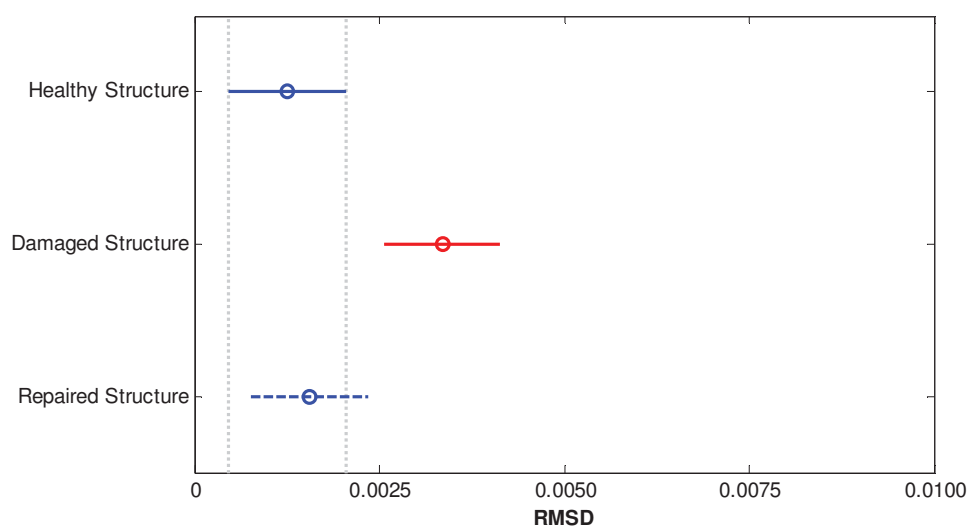
(a)



(b)



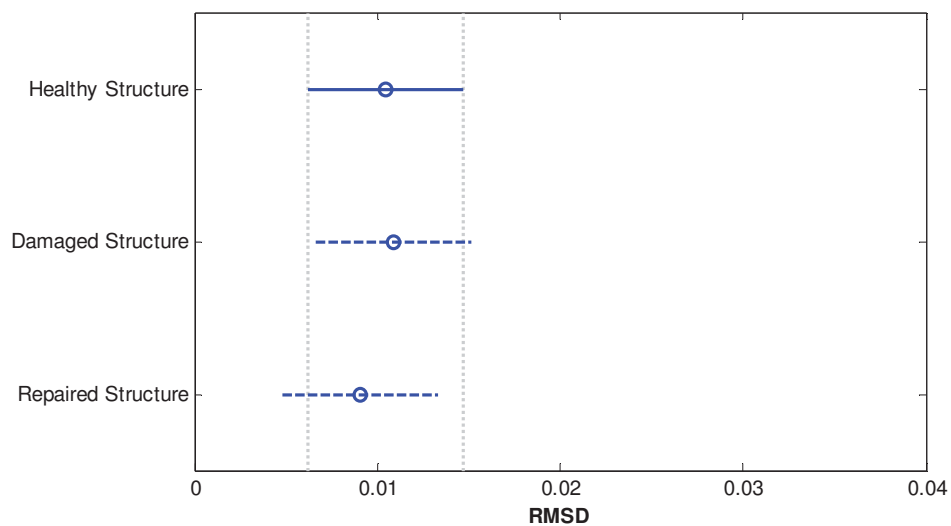
(c)



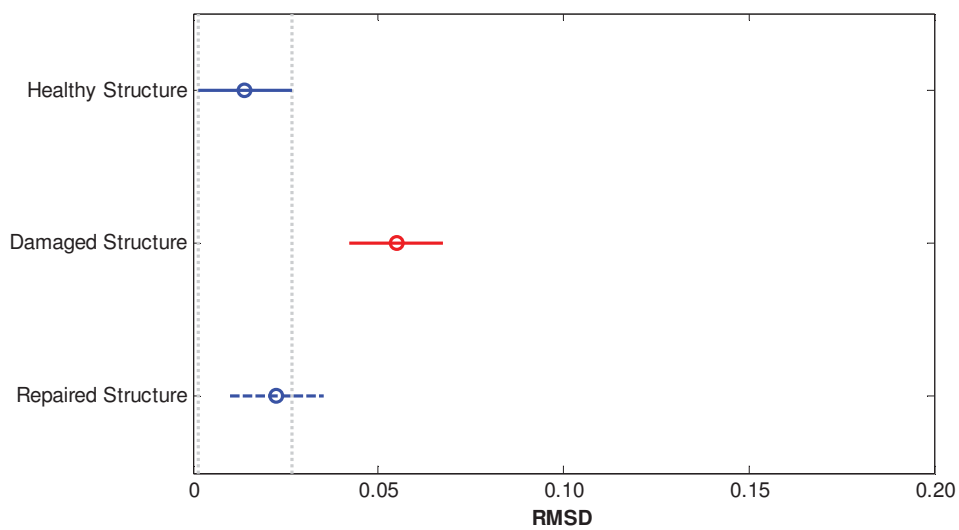
(d)

Fonte: Elaboração do próprio autor.

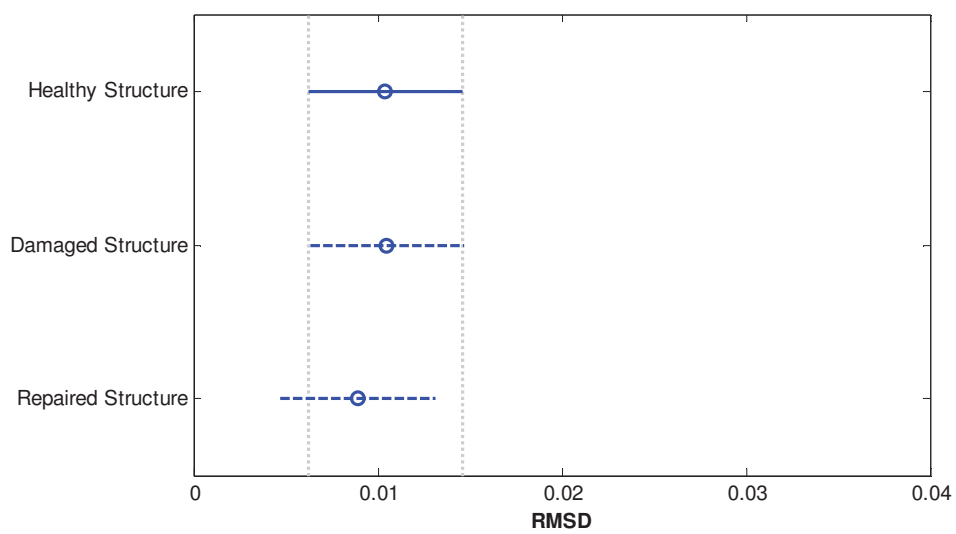
Figura 45 - Comparação de médias (teste de Tukey) a partir dos resultados obtidos na ANOVA dos dados aquisitados do PZT2, utilizando; (a) Módulo do sinal de impedância E/M; (b) Parte real; (c) Parte imaginária; (d) Fase do sinal.



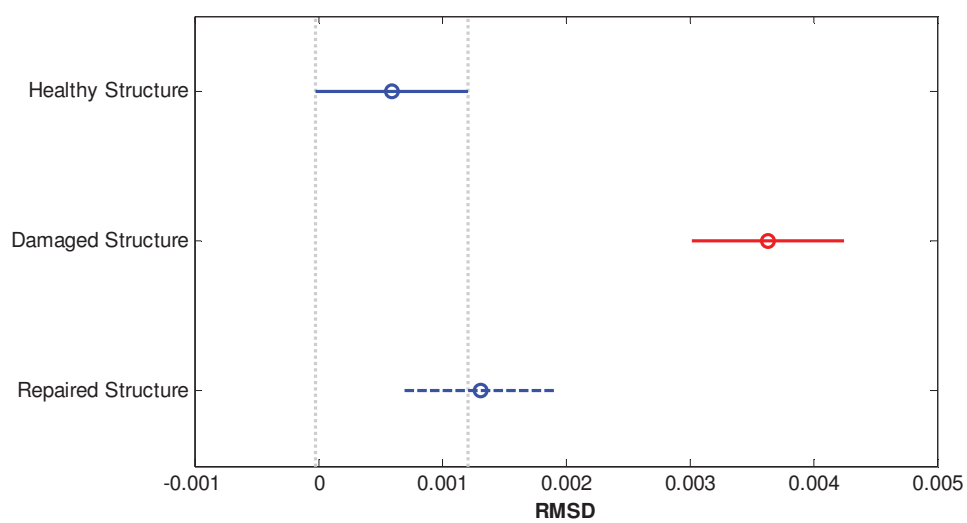
(a)



(b)



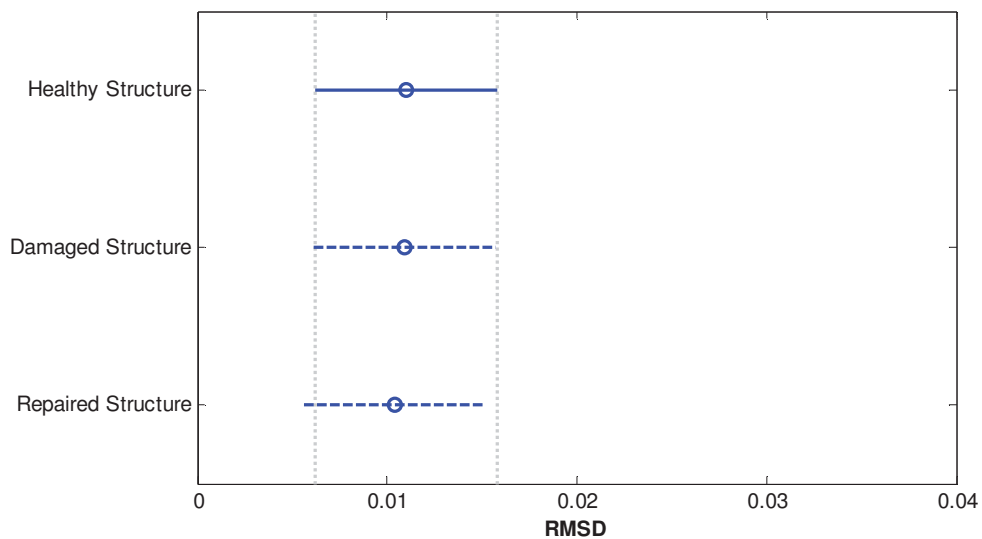
(c)



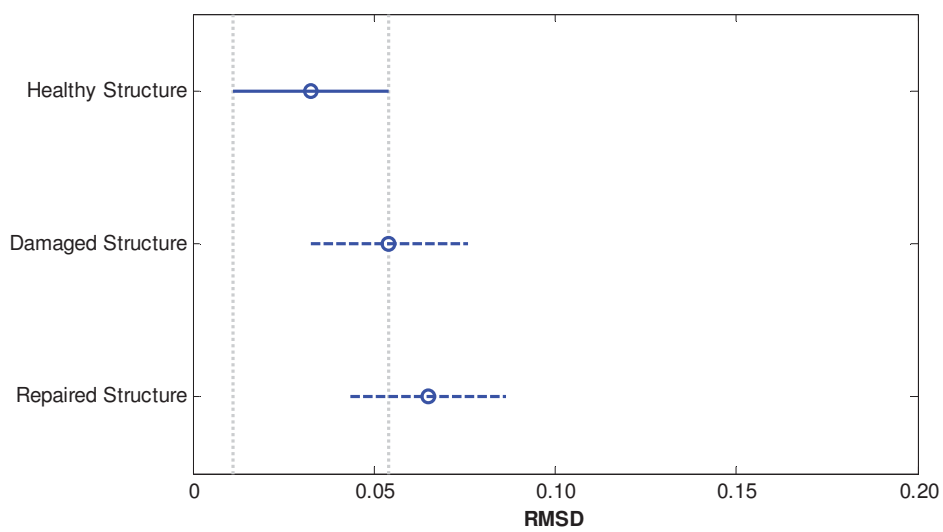
(d)

Fonte: Elaboração do próprio autor.

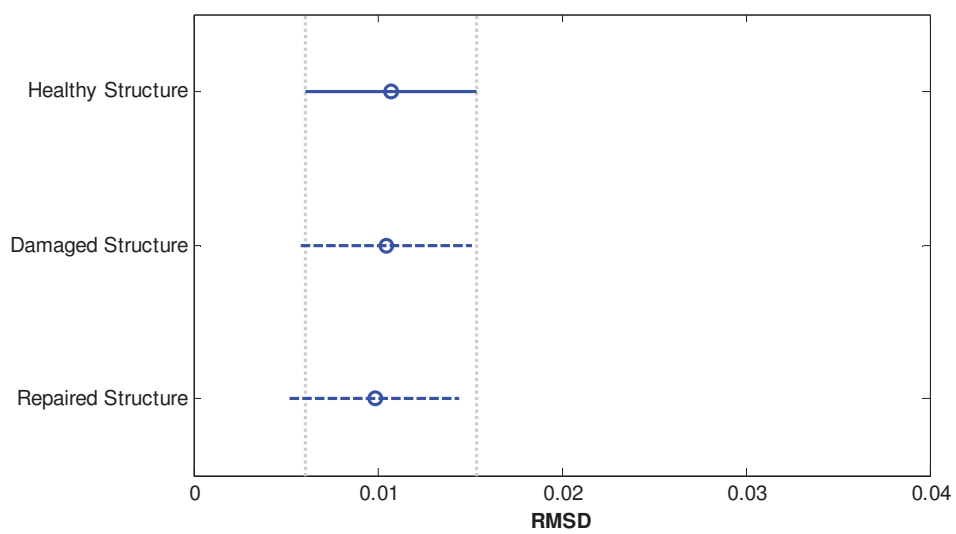
Figura 46 - Comparação de médias (teste de Tukey) a partir dos resultados obtidos na ANOVA dos dados aquisistados do PZT3, utilizando; (a) Módulo do sinal de Impedância E/M; (b) Parte real; (c) Parte imaginária; (d) Fase do sinal.



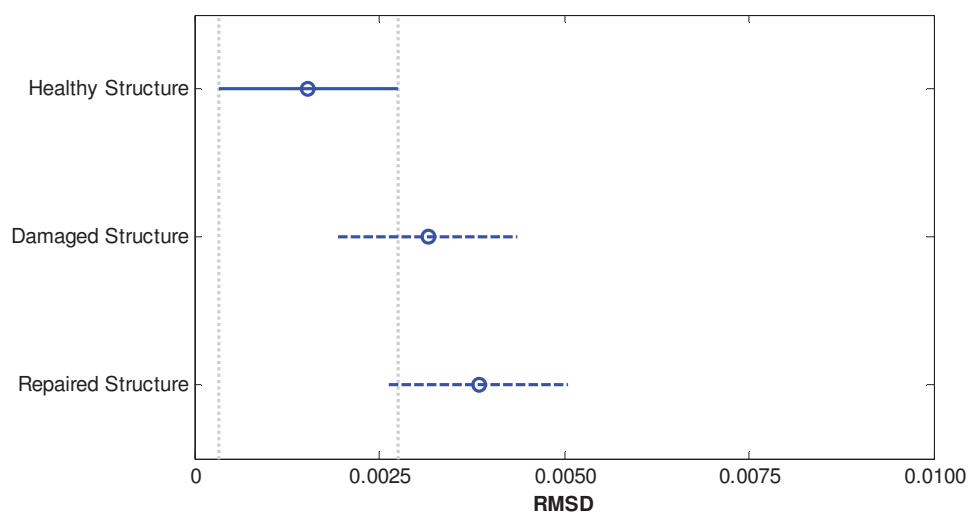
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Elaboração do próprio autor.

## 4.5 Conclusões e Considerações finais

A metodologia proposta neste capítulo de aplicação envolveu análise de variância e influências aleatórias nas condições de testes para descobrir se as médias dos índices de sensibilidade ao dano podem ser consideradas diferentes das médias quando existe dano na estrutura. A condição de dano reparado também é avaliada.

Os procedimentos para realizar uma análise de variância foram amplamente apresentados, e todas as partes do sinal (módulo, parte real, parte imaginária e fase) foram analisadas. O método se mostrou robusto quanto a detecção do dano ao utilizar a parte real e a fase do sinal da Impedância  $E/M$ , assim como, em considerar uma faixa de sensibilidade ampla dos sinais adquiridos.

No entanto, outros pontos ainda poderiam ser explorados para entender melhor a robustez da metodologia *SHM* apresentada, dentre eles:

- Emprego de outras métricas para cálculo dos índices de sensibilidade;
- Testar condições de testes mais reais, fora do ambiente de laboratório;

## CAPÍTULO 5

### CONSIDERAÇÕES FINAIS

#### 5.1 Conclusões

O objetivo deste trabalho, acima de apresentar novas técnicas e metodologias para sistemas *SHM*, foi contribuir para a técnica da impedância E/M possa ser empregada em sistemas reais, como aeronaves, estruturas marítimas, espaciais e outras. Desta forma, o foco do trabalho foi buscar explorar condições diferenciadas que a literatura não tem explorado muito e que são de essencial importância para o emprego da técnica da Impedância E/M em sistemas reais.

Desta forma, o capítulo 3 apresentou uma metodologia para considerar os efeitos causados nos diagnósticos de sistemas *SHM* devido às variações da temperatura ambiente. O agrupamento *Fuzzy c-means* foi utilizado para obter o mapa de *baselines*. Também foi definido um índice complexo para diagnóstico da integridade estrutural e, a partir dele, foram apresentadas três regras de decisões para caracterizar condições desconhecidas das estruturas. A técnica proposta neste capítulo excede as faixas de temperatura em que os *PZTs* apresentam comportamento necessariamente linear, sendo então uma formulação mais abrangente. Os resultados apresentados foram favoráveis, no entanto, a metodologia está em desenvolvimento inicial e necessita de estudos complementares.

O capítulo 4 apresentou uma metodologia envolvendo análise de variância e influências aleatórias nas condições de testes para descobrir se as médias dos índices de sensibilidade ao dano podem ser consideradas diferentes das médias quando existe dano na estrutura. O método se mostrou robusto quanto a detecção do dano ao utilizar a parte real e a fase do sinal da Impedância E/M, assim como, em considerar uma faixa de sensibilidade ampla dos sinais aquisitados.

Contudo, este trabalho representa mais um passo para o emprego da técnica da Impedância E/M em sistemas reais, mostrando novas formas para interpretação dos dados aquisitados, utilizando classificação *Fuzzy c-means* e técnica estatística (*ANOVA*) para produzir o diagnóstico do sistema SHM.

## 5.2 Propostas de Continuidade

Para continuidade do estudo apresentado no capítulo 3 é proposto:

- Emprego de outras métricas para cálculo dos índices de sensibilidade;
- Estudo de faixas de frequência que possam ser apenas sensíveis a variações de temperatura, mesmo na presença de danos;
- Testes com funções custo no algoritmo *FCM*, visando desenvolver um mapa de *baselines* que possa permitir sobreposições de *clusters* ou, de forma mais geral, avaliar resultados obtidos a partir de mapas de *baselines* construídos por diferentes metodologias de agrupamento;
- Melhor identificação das propriedades do sinal (módulo, parte real, imaginária e fase) visando entender melhor a sensibilidade da temperatura em cada componente do sinal;
- Testar condições de testes com temperaturas inferiores a temperatura ambiente, de preferência, atingindo temperaturas negativas;
- Estudo da propagação de danos e posicionamento de danos associados ao efeito da temperatura ambiente.

Para continuidade do estudo apresentado no capítulo 4 é proposto:

- Emprego de outras métricas para cálculo dos índices de sensibilidade;
- Testar condições de testes mais reais, fora do ambiente de laboratório;

## REFERÊNCIAS

APC INTERNATIONAL. **Piezoelectricity**. Mackeyville, 2011. Disponível em: <<http://www.americanpiezo.com/knowledge-center/piezo-theory/piezoelectricity.html>>. Acesso em: 19 jan. 2012.

AYRES, J. W. et al. Qualitative impedance-based health monitoring of civil infrastructures. **Smart Materials and Structures**, Bristol, v. 7, p. 599–605, 1998.

BANKS, H. T.; SMITH, R. C.; WANG, Y. **Smart materials structures: modeling, estimation and control**. Hoboken: John Wiley & Sons, 1996.

BAPTISTA, F. G. **Uma contribuição aos sistemas de monitoramento de integridade estrutural baseados na impedância eletromecânica**. 2010. 91 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)- Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista 'Júlio de Mesquita Filho', Ilha Solteira, 2010.

BAPTISTA, F. G.; VIEIRA FILHO, J. A new impedance measurement system for PZT based structural health monitoring. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, Piscataway, v. 58, p. 3602-3608, 2009.

BEZDEK, J. C.; PAL, S. **Fuzzy models for pattern recognition**. Piscataway: IEEE, 1992.

BHALLA, S. et al. Ultra low-cost adaptations of electro-mechanical impedance technique for structural health monitoring. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, London, v. 20, n. 8, p. 991-999, 2009. doi:10.1177/1045389X08100384.

BHALLA, S.; SOH, C. K. Electromechanical impedance modeling for adhesively bonded piezo-transducers. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, London, v. 15, n. 12, p. 955–972, 2004.

BUENO, D. D. **Controle ativo de vibrações e localização ótima de sensores e atuadores piezelétricos**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica – Mecânica dos Sólidos e Projetos) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista 'Júlio de Mesquita Filho', Ilha Solteira, 2007.

CLARK, R. L.; SAUNDERS, W.; GIBBS, G. **Adaptive structures: dynamics and control**. Hoboken: John Wiley & Sons, 1998.

DEAN, A.; VOSS, D. **Design and analysis of experiments**. Wiley: Nova Iorque, 1999

DOEBLING, S. W.; FARRAR, C. R.; PRIME, M. B. A summary review of vibration-based damage identification methods. **Shock and Vibration Digest**, Thousand Oaks, v. 30, n. 2, p. 91–105, 1998.

ERTURK, A.; INMAN, D. J. **Piezoelectric energy harvesting**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011. 412 p.

FARRAR, C. R.; DOEBLING, S. W.; NIX, D. A. Vibration-based structural damage identification. **Philosophical Transactions of Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, London, v. 359, n. 1778, p. 131–149, 2001. doi:10.1098/rsta.2000.0717.

FARRAR, C. R.; WORDEN, K. An introduction to structural health monitoring. **Philosophical Transactions of Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, London, v. 365, n. 1851, p. 303–315, 2007. doi: 10.1098/rsta.2006.1928.

GARDONIO, P., BRENNAN, M. J. Mobility and impedance methods in structural dynamics. In: FAHY, F. K.; WALKER, J. (Eds.) **Advanced applications in acoustics, noise and vibration**. London: Taylor & Francis, 2004. Cap. 9, p. 389–447.

GIURGIUTIU, V. **Structural health monitoring with piezoelectric wafer active sensor**. Philadelphia: Elsevier, 2008. 760 p.

GIURGIUTIU, V.; XU, B.; LIU, W. Development and testing of high-temperature piezoelectric wafer active sensors for extreme environments. **Structural Health Monitoring**, London, v. 9, n. 6, p. 513–525, 2010.

GIURGIUTIU, V.; ZAGRAI, A. Damage detection in thin plates and aerospace structures with the electro-mechanical impedance method. **Structural Health Monitoring**, London, v. 4, n. 2, p. 99–118, 2005. doi: 10.1177/1475921705049752.

INMAN, D. J. Smart structures: examples and new problems. In: BRAZILIAN CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING – COBEM, 16., 2001, Uberlândia. **Proceedings...** Uberlândia: ABCM, 2001.

INMAN, D. J. et al. **Damage prognosis for aerospace, civil and mechanical systems**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2005. 449 p.

LEO, D. **Engineering analysis of smart material systems**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2007. 556 p.

LIANG, C.; SUN, F. P.; ROGERS, C. A. Coupled electromechanical analysis of adaptive material system – determination of actuator power consumption and system energy transfer. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, London, v. 5, p. 21-20, 1994.

LIANG, L.; SUN, F. P.; ROGERS, C. A. Electro-mechanical impedance modeling of active material systems. **Smart Materials and Structures**, Bristol, v. 5, p. 171–186, 1996.

LOPES JUNIOR., V. et al. Characterization of the temperature, load and damage effects using piezoelectric transducer patches based on fuzzy clustering, In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON STRUCTURAL HEALTH MONITORING- IWSHM, 8., 2011, Starford. **Proceedings...** Lancaster: Destech Publications, 2011.

LOPES JUNIOR, V. et al. Impedance based structural health monitoring with artificial neural networking. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, Lonson, v. 11, n. 3, p. 206-214, 2000

MANKINS, J. **Technology readiness levels**. Washington, DC: National Aeronautics and Space Administration – NASA, 1995. (White Paper, 28).

MARQUI, C. R. **Modelagem de estruturas piezelétricas para aplicação em localização de falhas**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica – Mecânica dos Sólidos e Projetos) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP, Ilha Solteira, 2007.

MOURA JUNIOR, J. R. V. **Uma contribuição aos sistemas de monitoramento de integridade estrutural aplicada a estruturas aeronáuticas e espaciais**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.

MOURA JUNIOR, J. R. V.; STEFFEN JUNIOR, V. Impedance-based health monitoring for aeronautic structures using statistical meta-modeling. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, London, v. 17, n. 11, p. 1023-1036, 2006.

PARK, G.; CUDNEY, H.; INMAN, D. J. Impedance-based health monitoring of civil structural components. **ASCE Journal of Infrastructure Systems**, Reston, v. 6, n. 4, p. 153–160, 2000.

PARK, G.; CUDNEY, H.; INMAN, D. J. Feasibility of using impedance-based damage assessment for pipeline systems. **Earthquake Engineering and Structural Dynamics Journal**, West Sussex, v. 30, n. 10, p. 1463–1474, 2001.

PARK, G.; INMAN, D. J. Structural health monitoring using piezoelectric impedance measurements. **Philosophical Transactions of Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, London, v. 365, p. 373-392, 2007. doi: 10.1098/rsta.2006.1934.

PARK, G. et al. Impedance-based structural health monitoring for temperature varying applications. **JSME International Journal, Series A: Solid Mechanics and Material Engineering**, Tokyo, v. 42, n. 2, p. 249-258, 1999.

PARK, G. et al. Overview of piezoelectric impedance-based health monitoring and path forward. **Shock and Vibration Digest**, Thousand Oaks, v. 35, n. 6, p. 451-463, 2003.

PARK, S. et al. Sensor self-diagnosis using a modified impedance model for active sensing-based structural health monitoring. **Structural Health Monitoring**, London, v. 8, n.1, p.71–82, 2009. doi:10.1177/1475921708094792.

PARK, S.; YUN, C. B.; INMAN, D. J. Structural health monitoring using electro-mechanical impedance Sensors. **Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures**, Oxford, v. 31, n. 8, p. 714–724, 2008. doi: 10.1111/j.1460-2695.2008.01248.x.

PEAIRS, D. **High frequency modeling and experimental analysis for implementation of impedancebased structural health monitoring**. 2006. Thesis (Doctoral) - Virginia Polytechnic Institute, State University, Blacksburg, 2006.

PEAIRS, D. M.; PARK, G.; INMAN, D. J. Improving accessibility of the impedance-based structural health monitoring method. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, London, v. 15, n. 2, p. 129-139, 2004. doi: 10.1177/1045389X04039914.

POWERLEAP. **Harvesting energy one step at a time**. Ann Arbor, 2012. Disponível em: <<http://powerleap.net/>>. Acesso em: 19 jan. 2012.

PREUMONT, A. **Mechatronics: dynamics of electromechanical and piezoelectric systems**. Dordrecht: Springer, 2006. (Solid Mechanics and its Applications, v. 136).

QI, Y. et al. Piezoelectric ribbons printed onto rubber for flexible energy conversion. **Nano Letters**, Washington, DC, v. 10, n. 2, p. 524-528, 2010. doi: 10.1021/nl903377u

RYTTER, A. **Vibration based inspection of civil engineering structures**. 1993. Thesis (Ph.D.) - Department of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University, Denmark, 1993.

SILVA, S. **Detecção de danos estruturais usando análise de sèries temporais e atuadores e sensores piezelétricos**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas, 2008.

SMITH, R. C. **Smart material systems: model development**. Philadelphia: SIAM, 2005. 501 p.

SOH, C. K. et al. Performance of smart piezoceramic patches in health monitoring of a RC bridge. **Smart Materials and Structures**, Bristol, v. 9, n. 4, p. 533–542, 2000.

SUN, F. et al. Truss structure integrity identification using PZT sensor-actuator. **Journal of Intelligent Material Systems and Structure**, London, v. 6, n. 1, p. 134-139, 1995.

THE ECONOMIST. **Superstructures**. London, 9 Dec. 2010. Inside Story. Disponível em: <<http://www.economist.com/node/17647603>>. Acesso em: 19 jan. 2012.

VALDUGA, F. **Southwest Airlines suspende operação de suas aeronaves Boeing 737-300 após incidente em voo.** [S.L.]: CAVOK - Asas da Informação, 03 abr. 2011. Seção Comercial. Disponível em: <<http://cavok.com.br/blog/?p=30652#more-30652>>. Acesso em: 19 Jan. 2012.

VENET, M. E.; PEREIRA, A. H. P. **Materiais e dispositivos piezoelétricos:** fundamentos e desenvolvimento: Apostila 1 do curso. São Carlos: ATCP do Brasil, 2004. 18 p. Disponível em: <<http://www.atcp.com.br/pt/produtos/ultra-som/ceramicas-piezoelétricas.html>>. Acesso em: 24 ago. 2011.

VIEIRA, S. **Análise de variância:** anova. São Paulo: Atlas, 2006. 204 p.

XU, S. et al. Self-powered nanowire devices. **Nature Nanotechnology**, London, v. 5, p. 366-373, 2010. doi: 10.1038/NNANO.2010.46.

XU, S. et al. Integrated multilayer nanogenerator fabricated using paired nanotip-to-nanowire brushes. **Nano Letters**, Washington, DC, v. 8, n. 11, p. 4027-4032, 2008. doi: 10.1021/nl8027813.

XU, Y. G.; LIU, G. R. A modified electro-mechanical impedance model of piezoelectric actuator-sensors for debonding detection of composite sensors. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, London, v. 13, n.6, p. 389-396, 2002.

ZAGRAI, A. N.; GIURGIUTIU, V. Electro-mechanical impedance method for crack detection in thin plates. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, London, v. 12, n. 10, p. 709-718, 2001. doi: 10.1177/104538901320560355.

ZHU, G. et al. Integrated multilayer nanogenerator fabricated using paired nanotip-to-nanowire brushes. **Nano Letters**, Washington, DC, v. 10, n. 8, p. 3151-3155, 2010. doi: 10.1021/nl101973h.

## APÊNDICE A

### TRABALHOS PUBLICADOS

SOUZA, F. da S.; GONSALEZ, C. G.; OKI, N. Proposal for a circuit for extracting power piezoelectric transducers using switch-only rectified with DC-DC converter. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING - COBEM, 21., 2011, Natal. **Anais...** Rio de Janeiro: ABECM, 2011.

LOPES JUNIOR., V.; GONSALEZ, C. G.; SILVA, S.; ROY, S.; KODE, K.; SUNOR, F.; CHANG, F.K. Characterization of the temperature, load and damage effects using piezoelectric transducer patches based on fuzzy clustering, In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON STRUCTURAL HEALTH MONITORING- IWSHM, 8., 2011, Starford. **Proceedings...** Lancaster: Destech Publications, 2011.

SILVA, S.; GONSALEZ, C. G.; LOPES JUNIOR, V. Adaptive filter feature identification for structural health monitoring in an aeronautical panel. **Structural Health Monitoring**, London, v. 10, n. 5, p. 481-489, 2011. doi: 10.1177/1475921710379514.

GONSALEZ, C. G.; FRANCO, V. R.; SOUZA, F. S.; SILVA, S.; BRENNAN, M. J.; LOPES JUNIOR, V.; Model of energy harvesting using a piezoelectric transducer. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA - CONEM, 6., 2010, Campina Grande. **Anais...** Rio de Janeiro: ABCM, 2010.

SOUZA, F. da S.; GONSALEZ, C. G.; LOPES JUNIOR, V.; OKI, N. Proposta de um circuito para extração de potência de transdutores piezelétricos usando transistores MOS. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA - CONEM, 6., 2010, Campina Grande. **Anais...** Rio de Janeiro: ABCM, 2010.

FRANCO, V. R.; CAVALINI JUNIOR, A. A.; GONSALEZ, C. G.; LOPES JUNIOR., V. A structural health monitoring system based on lamb waves using wavelets and FFT analysis. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA - CONEM, 6., 2010, Campina Grande. **Anais...** Rio de Janeiro: ABCM, 2010.

GONSALEZ, C. G.; FRANCO, V. R.; BRENNAN, M. J.; SILVA, S.; LOPES JUNIOR, V. Energy harvesting using piezoelectric and electromagnetic transducer. In: BRAZILIAN CONFERENCE ON DYNAMICS CONTROL AND THEIR APPLICATIONS - DINCON, 9., 2010, Serra Negra. **Proceedings...** São Carlos: SBMAC, 2010.

GONSALEZ, C. G.; SILVA, S.; ABREU, G. L. C. M.; BAPTISTA, F. G.; LOPES JUNIOR, V. Fuzzy clustering to distinguish structural damage from temperature effect. In: PAN-AMERICAN CONGRESS OF APPLIED MECHANICS - PACAM, 11., 2010, Foz do Iguaçu. **Proceedings...** São Carlos: EESC-USP, 2010.