

JÚLIO ALMEIDA BORGES

**MODELAGEM E DESENVOLVIMENTO DE
ALGORITMOS PARA PRÉ-PROCESSAMENTO DE
SINAIS EM SISTEMAS MECÂNICOS CUJA
INTEGRIDADE ESTRUTURAL É MONITORADA PELO
MÉTODO DA IMPEDÂNCIA ELETROMECAÂNICA**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

2017

JÚLIO ALMEIDA BORGES

MODELAGEM E DESENVOLVIMENTO DE ALGORITMOS PARA PRÉ-PROCESSAMENTO DE SINAIS EM SISTEMAS MECÂNICOS CUJA INTEGRIDADE ESTRUTURAL É MONITORADA PELO MÉTODO DA IMPEDÂNCIA ELETROMECAÂNICA

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

Área de concentração: Mecânica dos Sólidos e Vibrações.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Mendes Finzi Neto

Uberlândia - MG

2017

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

B732m Borges, Júlio Almeida, 1990-
2017 Modelagem e desenvolvimento de algoritmos para pré-
 processamento de sinais em sistemas mecânicos cuja integridade
 estrutural é monitorada pelo método da impedância eletromecânica /
 Júlio Almeida Borges. - 2017.
 151 f. : il.

Orientador: Roberto Mendes Finzi Neto.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2017.83>
Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Estruturas metálicas - Teses. I.
Finzi Neto, Roberto Mendes. II. Universidade Federal de Uberlândia.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 621



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA



ALUNO: Júlio Almeida Borges

NÚMERO DE MATRÍCULA: 11522EMC008

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Mecânica dos Sólidos e Vibrações

LINHA DE PESQUISA: Dinâmica de Sistemas Mecânicos

PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA: NÍVEL MESTRADO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:

“Modelagem e Desenvolvimento de Algoritmos para Pré-processamento de Sinais em Sistemas Mecânicos cuja Integridade Estrutural é Monitorada pelo Método da Impedância Eletromecânica”

ORIENTADOR: Prof. Dr. Roberto Mendes Finzi Neto

A Dissertação foi **APROVADA** em reunião pública, realizada na Sala 313 - Bloco 1M, Campus Santa Mônica, em 24 de novembro de 2017, às 08:30 horas, com a seguinte Banca Examinadora:

NOME	ASSINATURA
Prof. Dr. Roberto Mendes Finzi Neto	UFU
Prof. Dr. Aldemir Ap. Cavalini Júnior	UFU
Prof. Dr. Quintiliano Siqueira Schrodin Nomelini	UFU
Prof. Dr. José dos Reis Vieira de Moura Júnior	UFG/Catalão

Uberlândia, 24 de novembro de 2017

Dedico esta dissertação de mestrado aos meus pais, aos meus colegas de turma, a todos os meus professores que fizeram parte dessa jornada, minha namorada Dayane, e toda a minha família.

AGRADECIMENTOS

À Deus pela serenidade, saúde e fé, iluminando meus caminhos durante toda a jornada no programa de pós-graduação.

À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Mecânica pela oportunidade de realizar este Curso e principalmente pela confiança a mim depositada.

Aos colegas e professores pela imensa contribuição para o meu conhecimento.

À CAPES pelo apoio financeiro, tornando possível os meus estudos na pós-graduação.

Aos professores Leonardo Sanches, Valder Steffen, Marcos Duarte, Antônio Marcos, Rosenda Valdés pelas excelentes aulas e pelo bom relacionamento com os alunos.

Ao meu orientador, prof. Dr. Roberto Mendes Finzi Neto, pelos ensinamentos, confiança e pelas excelentes contribuições em trabalhos publicados.

Aos amigos do laboratório Lmest pela contribuição intelectual e pessoal, parcerias de trabalho que tornaram possível a conclusão dos meus estudos.

A toda a minha família pelo apoio incondicional em todos os meus estudos e decisões tomadas ao longo desse percurso.

BORGES, J. A. **Modelagem e desenvolvimento de algoritmos para pré-processamento de sinais em sistemas mecânicos cuja integridade estrutural é monitorada pelo método da impedância eletromecânica**. 2017. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil.

Resumo

O Monitoramento da Integridade Estrutural baseado na técnica da Impedância Eletromecânica permite a detecção de alterações em estruturas, possibilitando a identificação e o reparo de danos. A técnica baseia-se em obter assinaturas de impedância da estrutura monitorada, em diversos momentos da operação da mesma. Possíveis danos são identificados pela comparação matemática entre as assinaturas obtidas. Sendo uma técnica bastante precisa, variações na temperatura e efeitos externos como vibrações e campos eletromagnéticos atuantes sobre a estrutura monitorada representam perturbações que tendem a gerar erros no processo de monitoramento. Para tornar o processo de diagnóstico mais robusto, torna-se necessário dissociar os verdadeiros efeitos de alteração estrutural daqueles que são considerados interferências externas. O presente trabalho tem por objetivo mostrar um estudo de caso, usando um painel aeronáutico de alumínio como corpo de prova, em que a influência dos fatores não previstos na técnica da impedância é identificada e caracterizada por meio de modelos estatísticos. Para realizar estas análises, foram executados experimentos utilizando transdutores piezelétricos acoplados ao referido painel. Os experimentos submeteram o painel à variação de temperatura e à inclusão de danos simulados. A partir dos dados de assinatura de impedância obtidos, comprovou-se a eficiência dos modelos estatísticos elaborados, sendo possível tanto separar e identificar a influência do dano simulado e da temperatura quanto estabelecer um intervalo de confiança nas análises desenvolvidas. Com esses resultados, é possível indicar que a técnica de análise estatística proposta torna-se uma útil ferramenta de pré-processamento de dados em aplicações de monitoramento de estruturas baseados no método da impedância eletromecânica.

Palavras chave: ISHM, pré-processamento, assinatura de impedância, PZT, Métodos estatísticos.

Borges, J. A. **Modeling and development of algorithms for signal preprocessing in mechanical systems, including structural integrity and monitored by the electromechanical impedance method.** 2017. M. Sc. Dissertation, Federal University of Uberlandia, Uberlandia, Brazil.

Abstract

Structural Integrity Monitoring based on the Electromechanical Impedance technique allows the detection of changes in structures, allowing the identification and repair of damages. The technique relies on obtaining impedance signatures from the monitored structure, at various moments of its operation. Possible damages are identified by the mathematical comparison between the signatures obtained. As a very precise technique, variations in temperature and external effects such as vibrations and electromagnetic fields acting on the monitored structure represent perturbations that tend to generate errors in the monitoring process. To make the diagnostic process more robust, it becomes necessary to decouple the true structural alteration effects from those that are considered external interferences. The present work aims to show a case study using an aluminum aeronautical panel as a test body, in which the influence of factors not predicted in the impedance technique is identified and characterized by means of statistical models. To perform these analyzes, experiments were performed using piezoelectric transducers coupled to said panel. The experiments subjected the panel to temperature variation and to the inclusion of simulated damages. From the impedance signature data obtained, the efficiency of the elaborated statistical models was verified, being possible to separate and identify the influence of the simulated damage and the temperature, as well as to establish a confidence interval in the developed analyzes. With these results, it is possible to indicate that the proposed statistical analysis technique becomes a useful tool for data preprocessing in structural monitoring applications based on the electromechanical impedance method.

Keyword: ISHM, pre-processing, impedance signature, PZT, statistical methods.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Modelo de integridade estrutural baseado no método da impedância eletromecânica. Fonte: Adaptado de Park et al. (1999).	23
Figura 2.2 – Processo de comparação de critério de rejeição de valores duvidosos. Fonte: Adaptado de Holman 1990.	28
Figura 2.3 – Modelo de distribuição normal. Fonte: Adaptado de Alves 2016.	30
Figura 2.4 – Distribuição de Skewness e Kurtosis. Fonte: Adaptado de Sheskin, 2011 e Westfall 2014.	31
Figura 2.5 – Aplicação do teste de Lilliefors. Fonte: Adaptado de Conover 1999.	34
Figura 2.6 – Exemplo da técnica de limiar de detecção. Fonte: Elaborado pelo autor.	36
Figura 3.1 – Procedimento de pré-processamento. Fonte: Elaborado pelo autor.	38
Figura 3.2 – Processo de rejeição de amostra a partir do critério de Chauvenet. Fonte: Adaptado de Doebelin, 1990.	39
Figura 3.3 – Exemplo de aplicação do limiar de detecção. Fonte: Elaborado pelo autor.	43
Figura 4.1 – Painel de alumínio aeronáutico utilizado no experimento. Fonte: Elaborado pelo autor.	45
Figura 4.2 – Detalhes da pastilha piezelétrica utilizada. Fonte: Elaborada pelo autor.	46
Figura 4.3 – Sensor de temperatura AD590. Fonte: https://www.digikey.com/product-detail/en/analog-devices-inc/AD590JF/AD590JF-ND/611802 (Acessado em 26/10/2017). ...	47
Figura 4.4 – Detalhes do local de acoplamento da massa utilizado no END. Fonte: Elaborado pelo autor.	49
Figura 4.5 – Sistema de aquisição de dados. Fonte: Elaborado pelo autor.	50
Figura 4.6 – Detalhes do local de realização do ensaio. Fonte: Elaborado pelo autor.	52
Figura 4.7 – Resultados dos ensaios. Fonte: Elaborado pelo autor.	53
Figura 4.8 – Exemplo de assinatura de impedância. Fonte: Elaborado pelo autor.	54
Figura 4.9 – Quantidade de baseline por faixa de temperatura. Fonte: Elaborado pelo autor.	56
Figura 4.10 – Efeito da temperatura sobre as IS. Fonte: Elaborado pelo autor.	57
Figura 4.11 - Fluxograma do cálculo de obtenção do baseline estatístico. Fonte: Elaborado pelo autor.	59
Figura 6.1 - RMSD baseline e dano PZT 11 (a) 20.5-21.4°C, (b) 21.5-22.4°C e (c) 22.5-23.4°C. Fonte: Elaborado pelo autor.	78

Figura 6.2 - RMSD baseline e dano PZT 11 (a) 23.5-24.4°C, (b) 24.5-25.4°C e (c) 25.5-26.4°C. Fonte: Elaborado pelo autor.....	79
Figura 6.3 - RMSD baseline e dano PZT 11 (a) 26.5-27.4°C, (b) 27.5-28.4°C e (c) 28.5-29.4°C. Fonte: Elaborado pelo autor.....	80
Figura 6.4 - RMSD baseline e dano PZT 12 (a) 20.5-21.4°C, (b) 21.5-22.4°C e (c) 22.5-23.4°C. Fonte: Elaborado pelo autor.....	82
Figura 6.5 - RMSD baseline e dano PZT 12 (a) 23.5-24.4°C, (b) 24.5-25.4°C e (c) 25.5-26.4°C. Fonte: Elaborado pelo autor.....	83
Figura 6.6 - RMSD baseline e dano PZT 12 (a) 26.5-27.4°C, (b) 27.5-28.4°C e (c) 28.5-29.4°C. Fonte: Elaborado pelo autor.....	84
Figura 6.7 - RMSD baseline e dano PZT 11, agrupamento de 20.5°-23.5°C. Fonte: Elaborado pelo autor.....	85
Figura 6.8 - RMSD baseline e dano PZT 11, agrupamento de 23.6°-26.6°C. Fonte: Elaborado pelo autor.....	86
Figura 6.9 - RMSD baseline e dano PZT 11, agrupamento de 26.7°-29.7°C. Fonte: Elaborado pelo autor.....	87
Figura 6.10 - RMSD baseline e dano PZT 12, agrupamento de 20.5°-23.5°C. Fonte: Elaborado pelo autor.....	88
Figura 6.11 - RMSD baseline e dano PZT 12, agrupamento de 23.6°-26.6°C. Fonte: Elaborado pelo autor.....	89
Figura 6.12 - RMSD baseline e dano PZT 12, agrupamento de 26.7°-29.7°C. Fonte: Elaborado pelo autor.....	90
Figura 6.13 - CCD baseline e dano PZT 11 (a) 20.5-21.4°C, (b) 21.5-22.4°C e (c) 22.5-23.4°C. Fonte: Elaborado pelo autor.....	91
Figura 6.14 - CCD baseline e dano PZT 11 (a) 23.5-24.4°C, (b) 24.5-25.4°C e (c) 25.5-26.4°C. Fonte: Elaborado pelo autor.....	92
Figura 6.15 - CCD baseline e dano PZT 11 (a) 26.5-27.4°C, (b) 27.5-28.4°C e (c) 28.5-29.4°C. Fonte: Elaborado pelo autor.....	93
Figura 6.16 - CCD baseline e dano PZT 12 (a) 20.5-21.4°C, (b) 21.5-22.4°C e (c) 22.5-23.4°C. Fonte: Elaborado pelo autor.....	94
Figura 6.17 - CCD baseline e dano PZT 12 (a) 23.5-24.4°C, (b) 24.5-25.4°C e (c) 25.5-26.4°C. Fonte: Elaborado pelo autor.....	95
Figura 6.18 - CCD baseline e dano PZT 12 (a) 26.5-27.4°C, (b) 27.5-28.4°C e (c) 28.5-29.4°C. Fonte: Elaborado pelo autor.....	96
Figura 6.19 – CCD baseline e dano PZT 11, agrupamento de 20.5°-23.5°C. Fonte: Elaborado pelo autor.....	97

Figura 6.20 - CCD baseline e dano PZT 11, agrupamento de 23.6°-26.6°C. Fonte: Elaborado pelo autor.	98
Figura 6.21 - CCD baseline e dano PZT 11, agrupamento de 26.7°-29.7°C. Fonte: Elaborado pelo autor.	99
Figura 6.22 - CCD baseline e dano PZT 12, agrupamento de 20.5°-23.5°C. Fonte: Elaborado pelo autor.	100
Figura 6.23 - CCD baseline e dano PZT 12, agrupamento de 23.6°-26.6°C. Fonte: Elaborado pelo autor.	101
Figura 6.24 - CCD baseline e dano PZT 12, agrupamento de 26.7°-29.7°C. Fonte: Elaborado pelo autor.	102
Figura 6.25 - M baseline e dano PZT 11 (a) 20.5-21.4°C, (b) 21.5-22.4°C e (c) 22.5-23.4°C. Fonte: Elaborado pelo autor.	103
Figura 6.26 - M baseline e dano PZT 11 (a) 23.5-24.4°C, (b) 24.5-25.4°C e (c) 25.5-26.4°C. Fonte: Elaborado pelo autor.	104
Figura 6.27 - M baseline e dano PZT 11 (a) 26.5-27.4°C, (b) 27.5-28.4°C e (c) 28.5-29.4°C. Fonte: Elaborado pelo autor.	105
Figura 6.28 - M baseline e dano PZT 12 (a) 20.5-21.4°C, (b) 21.5-22.4°C e (c) 22.5-23.4°C. Fonte: Elaborado pelo autor.	106
Figura 6.29 - M baseline e dano PZT 12 (a) 23.5-24.4°C, (b) 24.5-25.4°C e (c) 25.5-26.4°C. Fonte: Elaborado pelo autor.	107
Figura 6.30 - M baseline e dano PZT 12 (a) 26.5-27.4°C, (b) 27.5-28.4°C e (c) 28.5-29.4°C. Fonte: Elaborado pelo autor.	108
Figura 6.31 - M baseline e dano PZT 11, agrupamento de 20.5°-23.5°C. Fonte: Elaborado pelo autor.	109
Figura 6.32 - M baseline e dano PZT 11, agrupamento de 23.6°-26.6°C. Fonte: Elaborado pelo autor.	110
Figura 6.33 - M baseline e dano PZT 11, agrupamento de 26.6°-29.6°C. Fonte: Elaborado pelo autor.	111
Figura 6.34 - M baseline e dano PZT 12, agrupamento de 20.5°-23.5°C. Fonte: Elaborado pelo autor.	112
Figura 6.35 - M baseline e dano PZT 12, agrupamento de 23.6°-26.6°C. Fonte: Elaborado pelo autor.	113
Figura 6.36 - M baseline e dano PZT 12, agrupamento de 26.6°-29.6°C. Fonte: Elaborado pelo autor.	114
Figura 7.1 - Média percentual de acerto do Threshold 1°C. Fonte: Elaborado pelo autor. .	119

Figura 7.2 - Percentual de eliminação de falsos positivos pelo critério de Chauvenet. Fonte:
Elaborado pelo autor. 119

LISTA DE SÍMBOLOS

SÍMBOLOS

i	Corrente elétrica
l	Número de Amostras
t	Tempo
V	Tensão elétrica
δ	Fator de perda dielétrica
ω	Frequência
$\bar{\epsilon}_{33}^T$	Constante dielétrica com deformação nula
\bar{x}	Média aritmética
ϵ_{33}	Constante dielétrica complexa
Z_s	Impedância Mecânica da Estrutura
Z_α	Impedância Mecânica do PZT
α	Constante Geométrica do Transdutor
b	Constante numérica do teste de Shapiro-Wilk
D/l	Diferença cumulativa assumida
D^*	Desvio padrão e médio calculado
d_{3x}	Constante de acoplamento piezelétrico
$DR(X_i)$	Desvio de Rejeição de cada valor amostral
DRo	Desvio de Rejeição Padrão

$F(x)$	Função distribuição cumulativa
$F_n(x)$	Função distribuição empírica cumulativa
$G(X)$	Distribuição hipotética
$j \operatorname{Im}(Y)$	Parte imaginária da Admitância elétrica
JB	Jarque Bera
k	Valor de Kurtosis
M	Massa Mecânica
$\operatorname{Norminv}$	Inverso da Distribuição normal
$\operatorname{Re}(Y)$	Parte real da Admitância elétrica
s	Desvio padrão
S	Skewness
\sin	Função seno
W	Variável Shapiro-Wilk
X_i	Valores amostrais
Y	Admitância elétrica
Y_{xx}^E	Módulo de Young Complexo do PZT com campo Elétrico Nulo
Z	Impedância elétrica
α	Nível de Significância

LISTA DE ABREVIações

ISHM	Monitoramento da Integridade Estrutural baseado na impedância Mecânica.
LMEst	Laboratório de Mecânica de Estruturas “Prof. José Eduardo Tannús Reis”
FEMEC	Faculdade de Engenharia Mecânica
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
IEM	Impedância eletromecânica
SHM	Monitoramento da integridade Estrutural Mecânica
IS	Assinatura de Impedância
RMSD	Desvio Médio da Raiz Quadrada
CCD	Desvio do Coeficiente de Correlação
M	Somatório da Diferença Média
PZT	Titanato-zirconato de chumbo
END	Ensaio não destrutivo

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	16
1. INTRODUÇÃO	16
1.1. JUSTIFICATIVA	16
1.2. MOTIVAÇÃO	17
1.3. OBJETIVOS	18
1.3.1. <i>Objetivos gerais</i>	18
1.3.2. <i>Objetivos específicos</i>	18
1.4. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	18
CAPÍTULO II	20
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1. SHM BASEADO EM I.E.M.	20
2.1.1. <i>Monitoramento da integridade estrutural</i>	20
2.1.2. <i>Efeito da Temperatura</i>	24
2.1.3. <i>Carregamento estático</i>	24
2.1.4. <i>Carregamento Dinâmico</i>	25
2.1.5. <i>Síntese</i>	26
2.2. MÉTODOS ESTATÍSTICOS APLICÁVEIS EM SHM.	26
2.2.1. <i>Critério de Chauvenet</i>	26
2.2.2. <i>Testes de normalidade</i>	29
2.2.2.1. <i>Teste de Jarque-Bera</i>	31
2.2.2.2. <i>Teste de Kolmogorov-Smirnov</i>	32
2.2.2.3. <i>Teste de Lilliefors</i>	33
2.2.2.4. <i>Teste de Shapiro Wilk</i>	34
2.2.3. <i>Limiar de detecção</i>	35
2.2.4. <i>Síntese</i>	36
CAPÍTULO III	37
3. PROCEDIMENTOS TEÓRICOS	37
3.1. APLICAÇÃO DO PRÉ-PROCESSAMENTO	37
3.2. CRITÉRIO DE CHAUVENET	38
3.3. MÉTRICAS DE DANO	40

3.4. EXECUÇÃO DO TESTE DE NORMALIDADE	41
3.5. OBTENÇÃO DO LIMAR DE DETECÇÃO	42
3.6. SÍNTESE	43
CAPÍTULO IV.....	44
4. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....	44
4.1. DESCRIÇÃO DA BANCADA EXPERIMENTAL.....	44
4.1.1. <i>Pastilha Piezelétrica</i>	46
4.1.2. <i>Sensor de temperatura</i>	47
4.1.3. <i>Simulação de danos</i>	48
4.1.4. <i>Circuito eletrônico de aquisição de dados</i>	49
4.2. DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO.....	50
4.2.1. <i>Procedimento experimental</i>	50
4.2.2. <i>Resultados</i>	52
4.2.3. <i>Análise dos resultados</i>	54
4.2.3.1. <i>Critério de agrupamento dos dados</i>	54
4.2.3.2. <i>Efeito da temperatura</i>	56
4.2.3.3. <i>Baseline estatístico</i>	58
4.3. SÍNTESE	60
CAPÍTULO V.....	61
5. PRÉ-PROCESSAMENTO	61
5.1. CÁLCULO DO ÍNDICE DE DANO PARA OS BASELINES.....	61
5.1.1. <i>Métrica RMSD</i>	62
5.1.2. <i>Métrica CCD</i>	63
5.1.3. <i>Métrica M</i>	64
5.2. APLICAÇÃO DO CRITÉRIO DE CHAUVENET	66
5.2.1. <i>Teste de Normalidade</i>	70
5.2.2. <i>Limiar de detecção</i>	72
5.3. SÍNTESE	74
CAPÍTULO VI.....	75
6. RESULTADOS DO PÓS-PROCESSAMENTO.....	75
6.1. ÍNDICE DE DANO DO ESTADO COM DANO	75
6.2. ANÁLISE DO PÓS-PROCESSAMENTO	77
6.2.1. <i>Resultados aplicando a métrica RMSD</i>	77
6.2.2. <i>Resultados aplicando a métrica CCD</i>	90

6.2.3. Resultados aplicando a métrica <i>M</i>	103
6.3. SÍNTESE	114
CAPÍTULO VII.....	117
7. CONCLUSÃO.....	117
7.1. PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES	120
7.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	120
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	122
ANEXOS	129
A.1- Dados técnicos da cola Hysol [®] EA 0151 EN, utilizada para a fixação das pastilhas PZT no painel aeronáutico...	129
A.2- Sensor de temperatura modelo AD590, fabricante Analog Devices [®]	131
A.3- Algoritmo das métricas de dano, teste de normalidade e Threshold desenvolvidos no <i>software</i> MATLAB [®]	132
A.4- Algoritmo de limpeza de dados desenvolvidos no MATLAB [®]	148
A.5- Algoritmo dos cálculos do baseline estatístico desenvolvidos no MATLAB [®]	149

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Este capítulo tem como objetivo apresentar a motivação, objetivos, justificativa e estrutura de escrita da dissertação.

1.1. Justificativa

O monitoramento da integridade de estruturas (*Structural Health Monitoring – SHM*) representa um conjunto de estratégias, técnicas e tecnologias aplicáveis à identificação, localização e prognóstico de danos em estruturas dos mais diversos tipos e aplicações. Existem diversos campos de aplicações, que vão desde o ramo da engenharia civil até estruturas aeroespaciais Mauro et al. (2015). Porém, para todas, o principal objetivo é reduzir custos com processos de manutenção e, ainda, garantir um alto nível de confiança operacional.

Um dos métodos mais eficientes para diagnóstico de dano estrutural é o método não destrutivo, porém para realizar esse método é necessário realizar ensaios para encontrar a assinatura de impedância (IS) da estrutura livre de dano para assim compara-la com a assinatura de impedância na presença de dano simulado. Realizar esses ensaios requer muitos cuidados, pois existem diversos fatores que podem interferir na leitura correta da IS.

Diante deste cenário são inúmeras as variáveis que influem durante os procedimentos experimentais e de aquisição de respostas e dados. Tais dados em grande parte dos estudos são analisados como corretos. No entanto juntamente com os dados ditos corretos, podem haver erros, culminando em grandes equívocos na conclusão de estudos embasados em simulações em ISHM.

A escolha do tema de estudo justifica-se pela importância, sob o ponto de vista tecnológico, da melhoria do nível de amadurecimento das técnicas associadas à ISHM considerando fatores básicos a respeito da pré-avaliação e validação das assinaturas de IEM de maneira a se garantir a correlação com a estrutura monitorada. Dentre os principais tipos de estruturas que podem ser monitoradas, podem-se citar: treliças, estruturas civis tais como pontes, estruturas aeronáuticas, aeroespaciais e redes de tubulações.

Sistemas capazes de informar a existência de danos em estágios incipientes são de grande importância nos ramos como o aeronáutico e o naval. Além da redução em custos de manutenção, reparos críticos podem ser efetuados antes que a estrutura sofra algum colapso estrutural que venha gerar danos materiais e humanos. Mas, para que isto se torne uma realidade, antes é necessário garantir a confiabilidade do sistema, partindo desde a etapa de aquisição de dados, passando pelo pré-processamento até o pós-processamento onde os resultados das análises são apresentados.

A realização do trabalho de pesquisa proporcionará, além de formação geral na metodologia de investigação científica, formação específica no tocante à experimentação e desenvolvimento de técnicas para a modelagem e otimização da resolução de problemas complexos, particularmente no que diz respeito à técnica da impedância eletromecânica para monitoramento de integridade estrutural.

1.2. Motivação

Experimentação científica possibilita estudos com validação prática de seus resultados e modelos teóricos. Contudo, isto incorre em diversas complicações devido à efeitos desconsiderados no modelo teórico, podendo alterar significativamente variáveis de interesse do processo.

Em estudos abrangendo ISHM a experimentação se torna fundamental para a conclusão das análises. Os ensaios são realizados em variados cenários como laboratório, exposto ao ambiente, ou em ambientes controlados.

Verificar a eficiência dos dados gerados a partir dos ensaios é uma necessidade que motivou o autor a investigar e procurar na literatura soluções matemáticas que pudessem garantir um grau de confiança significativo nos resultados das análises, eliminando os possíveis erros gerados por interferências externas causadas durante o procedimento.

1.3. Objetivos

1.3.1. *Objetivos gerais*

Dentre os objetivos gerais destaca-se:

- Desenvolvimento de algoritmo de pré-processamento de sinais em ISHM.

1.3.2. *Objetivos específicos*

Os objetivos específicos desta dissertação são:

- Estudar os métodos estatísticos aplicáveis no pré-processamento de ISHM.
- Verificar a eficácia de cada métrica de índice de dano.
- Verificar se o limiar de detecção é efetivo na identificação de IS com dano.
- Montar um ensaio experimental.
- Obter um grau de confiança nos resultados através dos métodos estatísticos.
- Comparar todos os modelos e escolher o mais adequado para a aplicação apresentada neste trabalho.

1.4. Organização do texto

- II. **Revisão Bibliográfica:** Nesta etapa são avaliadas as técnicas pré-processamento das assinaturas de IEM existentes na literatura bem como um estudo geral sobre os modelos estatísticos aplicáveis a SHM. O resultado desta avaliação fornecerá base para a definição da arquitetura do modelo de pré-processamento a ser desenvolvido, testado e otimizado
- III. **Procedimentos Teóricos:** Nesta fase são investigados de acordo com a literatura da etapa anterior, os melhores métodos estatísticos aplicados ao

ISHM. A partir da escolha dos melhores métodos, será analisada a congruência dos resultados obtidos e, por fim, implementados no algoritmo de pré-processamento.

- IV. **Procedimentos Experimentais:** Esse capítulo descreverá em detalhes os materiais, equipamentos utilizados, procedimentos, planejamento e análise dos resultados obtidos.
- V. **Resultados do Pré-Processamento:** Apresentaram-se os resultados das análises do pré-processamento. Será verificado e discutido se as propostas matemáticas adotadas foram ou não eficazes, na minimização dos fatores causadores de anomalias nas IS
- VI. **Resultados do Pós-Processamento:** São expostos os resultados das métricas de dano, com o objetivo de identificar o comportamento de cada métrica mediante cada condição estabelecida. Ocorrerá a verificação da eficiência das técnicas e procedimentos utilizados com o objetivo de identificar ou não as assinaturas que possuem dano. Em todo o processo conclusivo alguns aspectos serão colocados a prova, como o critério de agrupamento por faixa de temperatura, a quantidade de amostras por faixa, a sensibilidade da métricas de dano e a eficiência da aplicação do critério de Chauvenet.
- VII. **Conclusão:** Finalmente todos os resultados são apresentados, comprovando a eficácia dos métodos implementados, contribuições obtidas e sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são abordados estudos literários e artigos publicados compondo as referências bibliográficas do trabalho.

2.1. SHM baseado em I.E.M.

São apresentados os estudos mais recentes envolvendo o monitoramento de integridade estrutural baseado no método da impedância eletromecânica bem como os principais efeitos que podem provocar erros na aplicação da técnica.

2.1.1. Monitoramento da integridade estrutural

O monitoramento da integridade estrutural representa um conjunto de estratégias, técnicas e tecnologias para identificar, localizar e prognosticar danos a estruturas de vários tipos e aplicações. Existem vários campos de aplicação, desde engenharia civil até estruturas aeroespaciais MAURO et al. (2015). No entanto, para todos, o principal objetivo é reduzir custos com processos de manutenção e também garantir um alto nível de confiança operacional.

Existem diversas formas de monitoramento da integridade estrutural e de análise não-destrutiva usualmente aplicadas. Destas, vale citar a ultrassonografia, análise modal por impacto, inspeção visual e também o ISHM, que são atualmente aplicadas na indústria. As

vantagens do ISHM se dão por nível de confiança significativo, pela dispensa de operador (inspetor) humano, pela responsabilidade e pela facilidade, visto que uma vez que o sistema esteja instalado, pode-se monitorar continuamente a saúde da estrutura de forma não invasiva e totalmente automática.

Dos vários tipos de métodos utilizados no SHM (*Structural Health Monitoring*) Sohn et al. (2004), a técnica baseada na Impedância Eletromecânica (IE) merece atenção especial. Nesta técnica, os transdutores piezelétricos, pequenos, leves e feitos de Titanato-Zirconato de Chumbo (PZT), são colados externamente ou incorporados na estrutura a ser monitorada Chaudhry et al. (1996). Estes transdutores operam no espectro ultrassônico, evitando baixas frequências e ruídos externos comuns, apresentam também nível de energia durante a operação bastante reduzido quando comparado com outros métodos clássicos com base em impactos ou outras formas de excitação mecânica. Desta forma, o ISHM é diretamente dependente da piezeletricidade dos transdutores utilizados.

O efeito piezelétrico une os domínios mecânico e elétrico, sendo possível viajar entre eles em ambas direções. Na mecânica elétrica, uma deformação mecânica gera um deslocamento de carga elétrica entre os terminais do transdutor, sendo este efeito conhecido como “Efeito Piezelétrico Direto”. Já na elétrico-mecânica, a aplicação de uma tensão elétrica gera deformação mecânica no transdutor, o que a caracteriza como “Efeito Piezelétrico Inverso”. No ISHM, ambos os efeitos são utilizados para excitar mecanicamente a estrutura e ainda obter a leitura de impedância eletromecânica acoplada. As bandas de frequência ultrassônica são preferidas e requerem menos energia nos transdutores (PARK, 2003).

A técnica de monitoramento de integridade baseada na chamada impedância eletromecânica (ISHM – *Impedance Based Structural Health Monitoring*) foi desenvolvida e baseada nas propriedades elétricas apresentadas por uma pastilha de PZT colada ou embebida à estrutura sendo monitorada, Sun et. al. (1995). O objetivo da técnica é monitorar variações na assinatura de impedância eletromecânica, do conjunto transdutor-estrutura, causadas pela presença de danos. Medindo-se diretamente a impedância elétrica do transdutor acoplado em diferentes pontos de uma faixa de frequência arbitrária, obtém-se o que se chama de “Assinatura de impedância” (*Impedance Signature – IS*) da estrutura. Essa IS é constante enquanto as características estruturais não se alterarem. O processo de monitoramento decorre da comparação da primeira IS obtida, chamada de *baseline*, com futuras IS obtidas ao longo do tempo de monitoramento da estrutura (GIURGITU, 1997).

Para obter sucesso no uso da técnica, o sistema deve ser capaz de identificar efeitos ambientais que possam gerar alterações estruturais que não representem, necessariamente,

danos estruturais, Moura e Steffen (2006). Particularmente, o efeito da temperatura é o efeito ambiental que mais impacta na técnica de ISHM, Palomino et. al. (2011). Diversos estudos foram desenvolvidos ao longo do tempo, Park et. al. (1999), Rabelo et. al. (2015), para compensar esse efeito e minimizar a taxa de “falso positivos” no processo de detecção de danos, porém, sem se preocupar em identificar e caracterizar, estatisticamente, essa influência. A seção a seguir apresenta a ISHM em detalhes, descrevendo melhor como o efeito da temperatura influencia nas IS.

A ideia por trás do ISHM consiste no monitoramento das mudanças dinâmicas da estrutura causadas pela presença de danos por meio das variações da IS. Pastilhas de PZT são acopladas na estrutura através de colas especiais permitindo a máxima transferência de energia mecânica entre os componentes. As identificações das antirressonâncias estruturais são realizadas com base na variação dos picos de impedância mecânica da estrutura, na presença de danos.

O primeiro método ISHM foi proposto por Liang, et al. (1994), e posteriormente, o método foi complementado por Sun et al. (1995), Chaudry et al. (1996), Park et al. (1999, 2003), a SOH et al. (2000), Giurgiutiu et al. (2003), Park; Inman (2005) Moura; Steffen (2006), Peairs (2006), Moura (2008), Palomino (2008), Liu et al. (2009), Finzi Neto et al. (2011), Palomino et al. (2011), Maio (2011), Oliveira (2013), Roseik (2014), Tahmasebpour (2014), Rabelo et al.(2015), Finzi Neto; Steffen J. (2015), Malafaia et al. (2016), Rabelo et al. (2017) e Tsuruta et al. (2017)

Quando ocorre um dano estrutural, mudanças na resposta dinâmica ocorrem através da pastilha de PZT através de seus sinais de impedância. Para descrever as mudanças mencionadas, desenvolveu-se um modelo eletromecânico que identifica e descreve o processo de medição da impedância eletromecânica para um certo grau de liberdade. Para simplificar o desenvolvimento do modelo, Liang et al. (1994) propuseram-se a trabalhar com a admitância eletromecânica (inverso da impedância), como se vê na Fig. 2.1.

Supondo que as propriedades mecânicas do PZT são invariantes ao longo do tempo, é mostrado que a admitância do sistema $Y(\omega)$ é uma combinação da impedância do atuador, $Z_a(\omega)$, e da estrutura $Z_s(\omega)$, dado na Eq. 01.

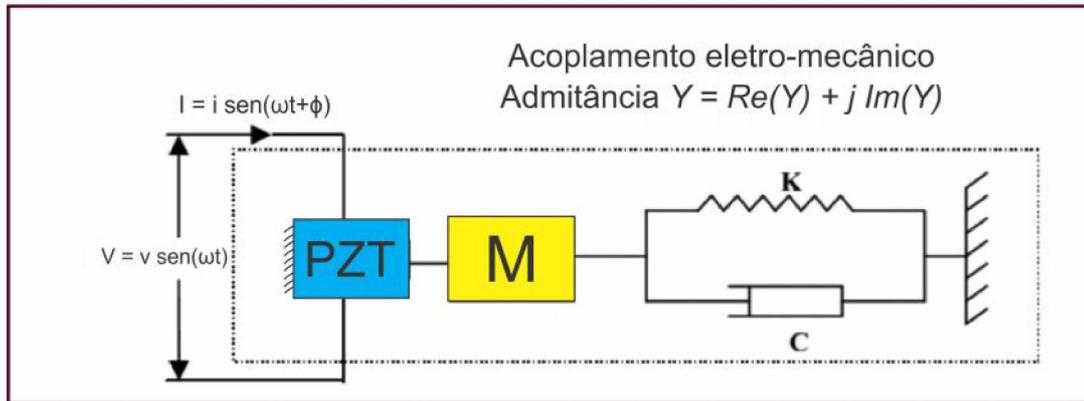


Figura 2.1 – Modelo de integridade estrutural baseado no método da impedância eletromecânica. Fonte: Adaptado de Park et al. (1999).

$$Y(\omega) = i\omega a \left(\bar{\epsilon}_{33}^{-1} (1 - i\delta) - \frac{Z_s(\omega)}{Z_s(\omega) + Z_a(\omega)} d_{3x}^2 \hat{Y}_{xx}^E \right) \quad (01)$$

Sendo: $Y(\omega)$ a admitância elétrica da pastilha PZT; $Z_s(\omega)$ e $Z_a(\omega)$ as impedâncias mecânicas da estrutura e da pastilha PZT, respectivamente; V a tensão aplicada; I a corrente circulante; “ a ” é a constante geométrica do transdutor; Y_{xx}^E o módulo de Young; d_{3x} a constante de acoplamento piezoeletrico; $\bar{\epsilon}_{33}$ a constante dielétrica complexa; e δ o fator de perda dielétrica da pastilha PZT. Tanto o módulo de Young quanto a constante dielétrica complexa da pastilha PZT são afetados pelo efeito da temperatura, que acaba por alterar as medidas de IS.

As faixas de frequências tipicamente utilizadas encontram-se entre 30kHz e 250kHz, segundo Park, *et al* (2003). É comum definir-se uma largura de banda da ordem de 10kHz a 30kHz, dentro da faixa escolhida, onde as frequências inicial e final são arbitradas por métodos de tentativa erro, e/ou procedimentos de otimização, para a identificação de uma determinada classe de danos estruturais, Moura, et al., (2008). Já a sensibilidade de detecção a uma determinada classe de danos estruturais, foi estudada por Park (2003). Em seus estudos, verificou-se que para distâncias radiais de até 0,4 metros, para compósitos, e de até

2 metros, para barras metálicas, danos de pequena extensão podem ser identificados. Para Maio (2011) a melhor faixa de frequência para localizar a posição de um dano é a faixa de 0 kHz a 10 kHz utilizado em testes com viga em balanço.

Nota-se que em todos os estudos houve uma notória variação da faixa de frequência. Diversos autores conseguiram encontrar resultados satisfatórios em faixas de frequências notadamente distantes. Porém ao se aprofundar em cada caso, é possível chegar à conclusão de que dependendo do tipo de material, variações de temperatura, tipo de ensaio entre outros, haverá uma variação da faixa de frequência adequada. Conclui-se ainda que considerar o efeito da temperatura implicará em novas analogias, pois o efeito da temperatura provoca alterações nas propriedades dos materiais e conseqüentemente nas assinaturas de impedâncias obtidas.

2.1.2. Efeito da Temperatura

Da Equação (01), tanto o módulo de *Young* quanto a constante dielétrica complexa da pastilha PZT são afetados pelo efeito da temperatura. Isto implica dizer que tanto os transdutores quanto a estrutura mecânica acabam por alterar suas propriedades. As IS acabam alterando a forma dos picos de ressonância, vales das antirressonâncias e deslocamentos horizontais e verticais da IS. Trabalhos recentes como o de Rabelo *et al*, (2014), Malafaia et al. (2016) objetivam compensar essa influência danosa à técnica.

Em diversos estudos não foram considerados os efeitos da variabilidade da temperatura. No entanto os efeitos podem provocar equívocos na conclusão de diversos trabalhos. Oliveira (2013), Malafaia et al. (2016) aborda a técnica de detecção de dano em uma estrutura, como base um painel de alumínio e em seus estudos concluem que o efeito da temperatura pode ser confundido com um dano, se o mesmo não for isolado da verdadeira assinatura de impedância do sistema. Estudos recentes Tsuruta et al. (2017), Rabelo et al. (2017) utilizam técnicas de normalização e algoritmo de otimização híbrido para compensar o efeito provocado pela variação da temperatura sobre o corpo de prova.

2.1.3. Carregamento estático

Outro efeito que influencia a leitura das IS é o carregamento estático, pois, entende-se que a carga estática é uma carga adicionada gradualmente aplicada à estrutura sem causar mudanças no tempo. Utiliza-se esse tipo de carga para simular danos à estrutura, os chamados danos simulados.

A influência da carga estática, causa variações na magnitude dos picos e vales, utiliza-se esse tipo de carregamento na prática de ensaios não destrutivos (END), onde uma determinada massa é integrada a estrutura por meio de acoplamento mecânico e ou adesivos plásticos, permitindo assim realizar testes de integridade estrutural sem danificar o corpo de prova. (REBILLAT et al., 2016).

A técnica RMSD é utilizada para compensar essa influência. Para Oliveira (2013), Maio (2011), Malafaia et al. (2016) as técnicas estatísticas bem como as métricas de dano, são ferramentas eficazes para a detecção de danos pois possuem uma excelente sensibilidade e robustez na compensação de tal interferência.

Os danos simulados permitem quantificar, identificar e caracterizar a influência do dano na estrutura através de testes estatísticos. Palomino (2008) sugeriu testes não destrutivos em painel aeronáutico para validar métricas de dano que pudessem reduzir as influências ambientais bem como testes com a adição de massa e perda de rebite. Este estudo concluiu que as métricas estatísticas são eficazes na redução de tais interferências de acordo com o tipo de ensaio e corpo de prova utilizado.

2.1.4. Carregamento Dinâmico

Diferentemente do carregamento estático, carregamentos dinâmicos são aqueles cuja magnitude, direção e posição de aplicação podem sofrer variações ao longo do tempo, implicando em deslocamento, velocidade e aceleração de resposta da estrutura. A ação dinâmica do vento, impacto de objetos entre outros, são exemplos de fontes geradoras de carregamento dinâmico Silva (2011). Ao realizar ensaios em ambiente não controlado, em termos de temperatura, vento, impactos gerados por humanos e vibrações do solo, a estrutura ou corpo de prova analisado podem ser alterados, o que implica em erros na assinatura de impedância obtida a partir da estrutura.

Tais erros dificultam a obtenção e identificação das reais respostas do sistema, implicando em resultados com confiabilidade comprometida. Identificar e eliminar esses possíveis erros podem aumentar significativamente a confiança dos resultados envolvendo estudos aplicando o método de ISHM. Outras fontes de erro são interferências indesejadas, que podem alterar as propriedades da estrutura por consequência a leitura dos PZTs, gerando assim uma grande perturbação durante a análise dos resultados obtidos a partir do experimento. Estes podem ser impactos ou vibrações externas, carregamentos dinâmicos ou transientes e campos eletromagnéticos próximos aos sensores e sua fiação durante a aquisição. Faz-se necessário buscar na literatura métodos matemáticos que possibilitem a

identificação e eliminação das perturbações provocadas por carregamentos dinâmicos (RABELO et al., 2014).

2.1.5. Síntese

Finalmente pode-se concluir que existem muitas variáveis que podem interferir nos verdadeiros resultados de um experimento. Identificar, separar ou mesmo eliminar esses erros é extremamente importante para assegurar a confiabilidade dos resultados.

Outra análise importante é a verificação do tipo de sensor utilizado. Vale salientar que podem existir variações consideráveis em frequência de operação, propriedades mecânicas, térmicas e eletromagnéticas, dependendo do tipo de PZT usados. Com o avanço da tecnologia cada sensor-atuador (PZT), que possui uma sensibilidade e deformação características dependendo do formato e composição do material. Isto implica que, em uma mesma aplicação dependendo do sensor-atuador utilizado, os resultados e métricas podem ou não ser eficazes (BAPTISTA, 2010).

Para solucionar esse problema propôs-se a utilização de modelos matemáticos que possam identificar, separar e ou eliminar as causas geradores de interferência. Na próxima etapa a teoria apresentada nesse capítulo será aliada a modelos estáticos aplicáveis em ISHM com a finalidade de encontrar na literatura modelos eficazes na compensação dos verdadeiros efeitos causadores de alterações nas IS.

2.2. Métodos estatísticos aplicáveis em SHM.

Este tópico tem como finalidade, buscar na literatura modelos estatísticos aplicáveis ao pré-processamento de SHM. Os modelos funcionam de maneira similar, mas apresentam características e resultados distintos, tornando a investigação fundamental para encontrar o modelo que mais se aproxima dos resultados corretos.

2.2.1. Critério de Chauvenet

Experimentos como os realizados em ISHM são suscetíveis a interferências externas que causam uma coleta inadequada de dados, no caso da IS. Essa assinatura pode ser diferente do padrão observado nas outras amostras de IS cuja diferença poderia ser verificada, por exemplo, através dos índices de dano calculados a partir da definição de

alguma métrica de dano. Para minimizar o efeito da interferência no resultado, pode-se fazer uma limpeza dos dados de acordo com o comportamento tendencial das amostras. Para fazer isso, propõe-se na literatura a utilização do critério Chauvenet, descrito nos parágrafos seguintes.

O critério de Chauvenet é uma ferramenta estatística usada para eliminar amostras consideradas errôneas ('*outliers*') para a curva em uma experiência. Sua análise consiste em comparar cada valor calculado a partir da Eq. (04) e comparando-os com o valor encontrado da tabela do critério de rejeição, determinando os valores aceitos e rejeitados (DOEBELIN, 2000).

A média da amostra para um conjunto de dados de tamanho n é dada pela Equação (01), onde X_i representa cada um dos valores. O desvio padrão s da amostra é descrito pela Eq. (02). A partir dos valores obtidos, é estabelecido um desvio relativo à média, DR , apresentado na Eq. (03).

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (02)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (03)$$

$$DR(X_i) = \frac{|X_i - \bar{X}|}{s} \quad (04)$$

Para definir se uma amostra está dentro dos valores esperados, cada valor de $DR(X_i)$ é comparado ao valor padrão DRo . O último é caracterizado como a taxa padrão de desvio da média da amostra, definida por Chauvenet, através da Eq. (04), onde $norminv$ é o inverso da distribuição normal (GERMANO, 2013).

$$DRo = norminv\left(1 - \frac{1}{4n}\right) \quad (05)$$

Se, para algum X_i , $DR(X_i) > DRo$, então este X_i é considerado divergente do conjunto de dados. Por consequência, esta amostra é retirada e os valores da média e desvio padrão

são recalculados. Este processo só pode ser aplicado uma vez no conjunto de dados como ilustrado no fluxograma da Fig. 2.1.

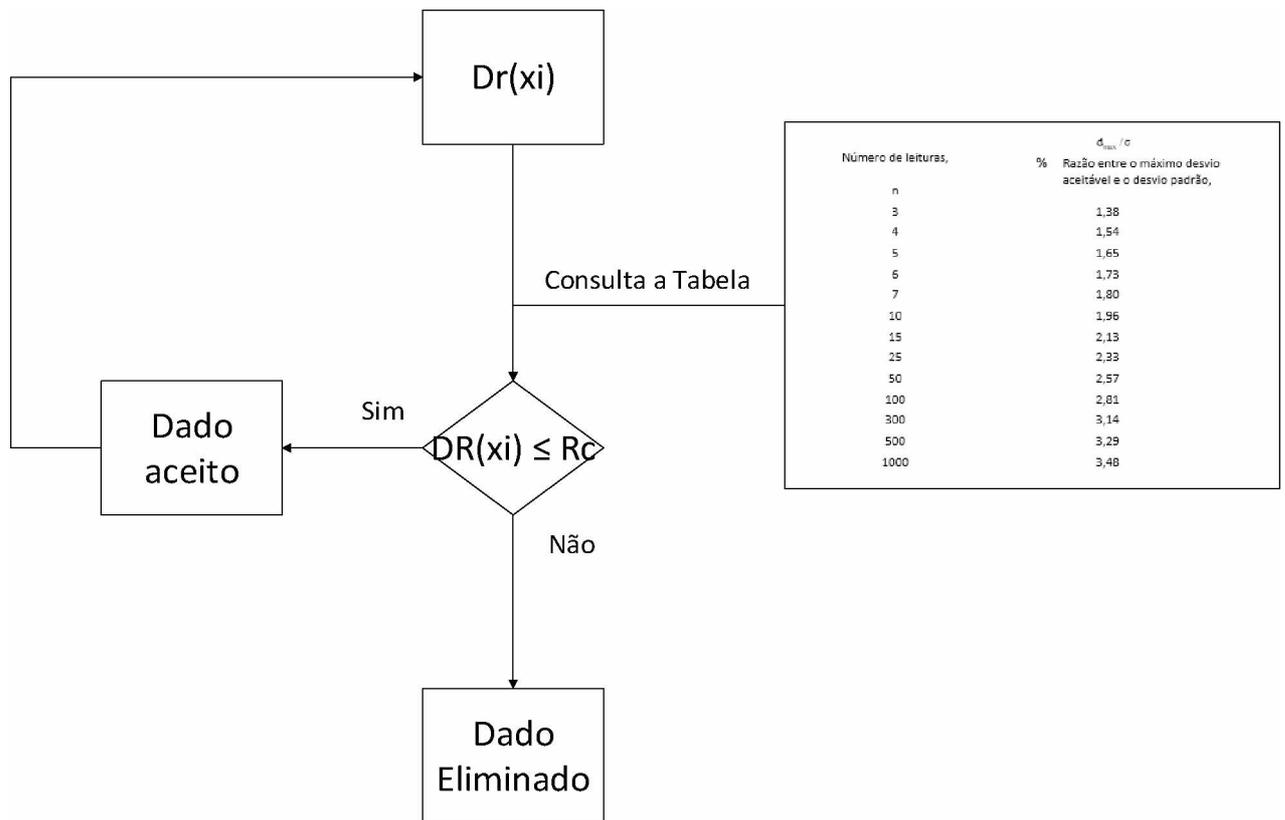


Figura 2.2 – Processo de comparação de critério de rejeição de valores duvidosos. Fonte: Adaptado de Holman 1990.

Na Tabela 2.1 é ilustrado em detalhes os valores de RC de acordo com o número de amostras analisadas.

Tabela 2.1 - Tabela do critério de rejeição de Chauvenet. Fonte: Adaptado de Doebelin, 2000.

Número de leituras, n	Razão entre o máximo desvio aceitável
	e o desvio padrão, d_{\max}/σ
3	1,38
4	1,54
5	1,65
6	1,73
7	1,80
10	1,96
15	2,13
25	2,33
50	2,57
100	2,81
300	3,14
500	3,29
1000	3,48

2.2.2. Testes de normalidade

A distribuição normal é utilizada em várias áreas como base para inferências estatísticas sobre populações. Para validar tais conclusões, é importante confirmar a normalidade da distribuição amostral dos dados, que ocorre através de testes. Estes, por sua vez, possuem vários parâmetros que devem ser analisados para se adequarem melhor à amostra. Assim, para uma escolha apropriada de teste a ser usada, alguns testes são descritos a seguir (TRIOLA, 2008).

Para que uma distribuição seja considerada normal, 68,26% dos valores de desvio padrão independentemente do sinal, devem estar entre a sua média, 95,44% precisão estar dentro de dois desvios padrão de sua média e 99,72% dos valores devem estar dentro de três desvios padrão da média Lopes (2013). A distribuição normal tem como característica a representação gráfica em forma de sino como ilustrado na Fig. 2.3 (TRIOLA, 2008)

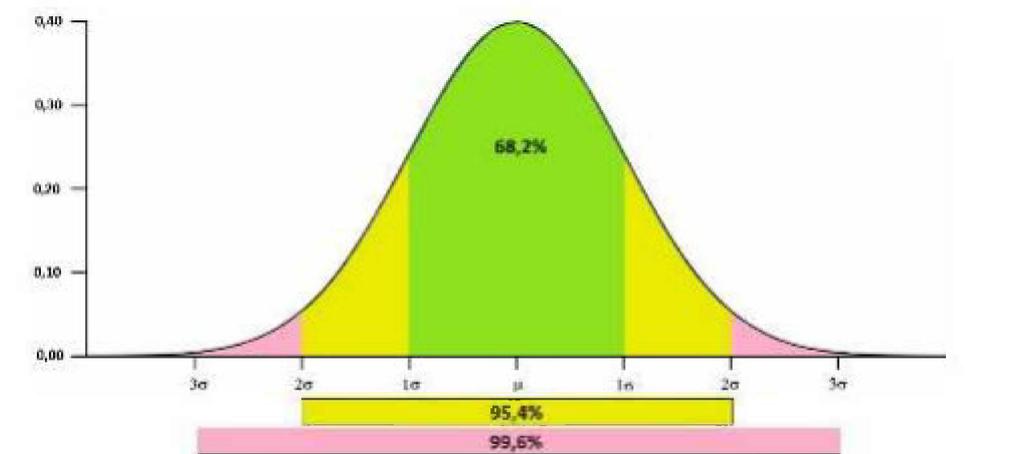


Figura 2.3 – Modelo de distribuição normal. Fonte: Adaptado de Alves 2016.

De acordo com RABELO et al. (2016), o desvio padrão de uma amostra pode ser interpretado de acordo com a regra de Chebyshev, aplicável a qualquer conjunto de dados de amostra, independentemente do formato da distribuição de frequência dessas amostras.

- Nenhuma informação útil é fornecida dentro do intervalo $(\bar{X} - s, \bar{X} + s)$.
- Pelo menos 75% ficará dentro do intervalo $(\bar{X} - 2s, \bar{X} + 2s)$ para amostras.
- Pelo menos 88,98% das medidas ficaram dentro do intervalo $(\bar{X} - 3s, \bar{X} + 3s)$.
- Geralmente, para qualquer número k maior que 1, pelo menos $(1 - 1/k^2)$ das medidas cairão dentro do desvio padrão da média, isto é, dentro do intervalo $(\bar{X} - ks, \bar{X} + ks)$.

Outra interpretação do desvio padrão pode ser realizada pela regra empírica, aplicada em conjuntos de dados com distribuições de frequência em forma de sino e simétricas.

- Aproximadamente 68% das medidas estarão na faixa $(\bar{X} - s, \bar{X} + s)$.

- b) Cerca de 95% das medidas cairão de $(\bar{X} - 2s, \bar{X} + 2s)$.
 c) Aproximadamente 99,7% das medidas serão dentro de três desvios padrão da média.

2.2.2.1. Teste de Jarque-Bera

O teste de Jarque-Bera é assintótico, tendo como parâmetros o número de amostras n , e os valores de *Skewness* (s), *Kurtosis* (k). *Skewness* descreve a assimetria de uma distribuição, enquanto a *Kurtosis* caracteriza o achatamento de sua curva como ilustrado na Fig. 2.4. A estatística de teste é mostrada pela Eq. (06).

$$JB = \frac{n}{6} \left(s^2 + \frac{(k-3)^2}{4} \right) \quad (06)$$

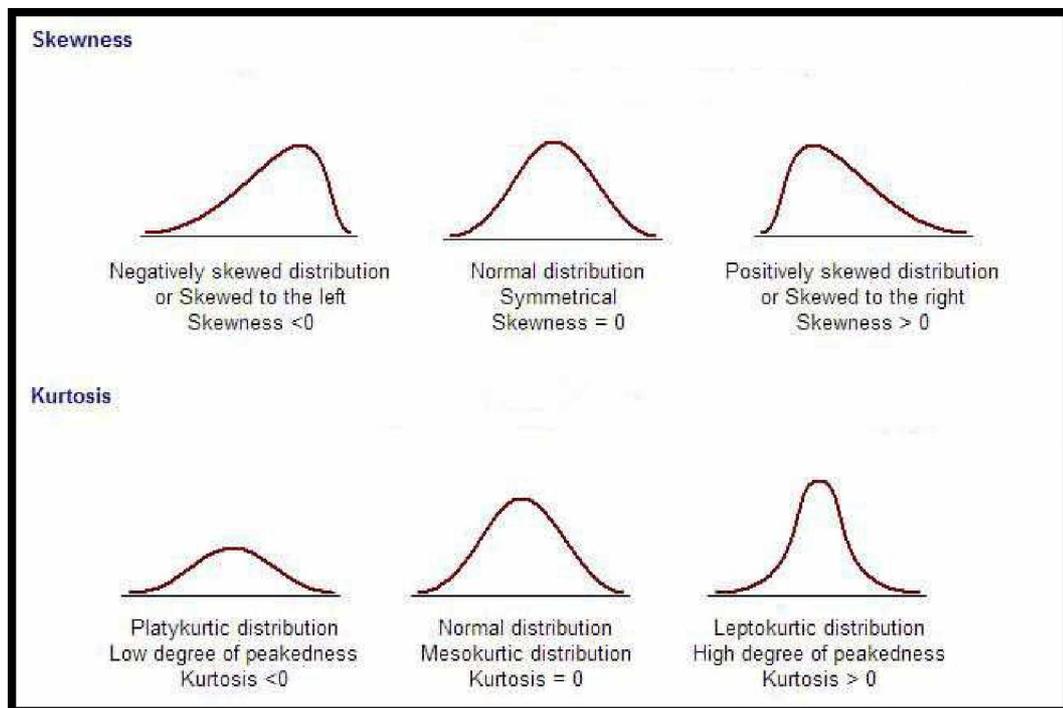


Figura 2.4 – Distribuição de Skewness e Kurtosis. Fonte: Adaptado de Sheskin, 2011 e Westfall 2014.

A decisão de teste é feita de acordo com duas hipóteses: H_0 , segundo a qual os dados da amostra especificada obedecem a uma distribuição normal; e H_1 , que rejeita H_0 . O

resultado retornado pelo teste é 0 quando H_0 é aceito ou 1 quando rejeitado. Uma variável importante do teste é o nível de significância adotado no mesmo. Esse item determina a probabilidade máxima de se aceitar a hipótese H_0 quando ela é falsa. No teste padrão, com $\alpha = 0,05$, admite-se uma probabilidade de 95% de a decisão tomada estar acertada. Para aceitação ou rejeição das hipóteses, os valores da estatística do teste, $jbstat$, e do valor crítico para determinado nível de significância, $critval$, são comparados. Caso $jbstat > critval$, há a rejeição da hipótese nula.

A recomendação de uso do teste de Jarque-Bera é para amostras de tamanho maior ou igual a 2000. Nessas, é utilizada uma distribuição quiquadrado para estabelecer uma comparação entre os valores de $critval$ e $jbstat$ e analisar as hipóteses. Em caso de amostras de $n < 2000$, o valor crítico é determinado por simulação. São gerados cem mil dados com os mesmos valores de média e desvio padrão do dado original, e o teste gera uma distribuição de referência, no processo de Simulação de Monte Carlo (JARQUE et al., 1987)

Como explicado por Giles (2014), o motivo dessa mudança na análise para $n < 2000$ amostras se dão pelas pequenas quantidades de amostras, a distribuição do qui-quadrado pode ser muito sensível, rejeitando a hipótese nula quando é verdadeira. Em pequenas situações de amostragem, o nível de significância pode ser distorcido além do pretendido. Assim, o teste pode apresentar baixa eficiência quando o número de amostras não respeita o limite inferior, de 2000, pré-estabelecido.

2.2.2.2. Teste de Kolmogorov-Smirnov

O teste de Kolmogorov-Smirnov baseia-se na diferença absoluta entre a função de distribuição cumulativa assumida para os dados, no caso a normal, e a função de distribuição empírica destes, conforme descrito na Eq. (07) (LEOTTI, 2005).

$$D_n = \sup |F(x) - F_n(x)| \quad (08)$$

Onde $F(x)$ é a função de distribuição cumulativa assumida para os dados, e $F_n(x)$ é a função de distribuição empírica cumulativa.

As hipóteses testadas são $H_0: F(x) = F$ e $H_1: F(x) \neq F$. O teste fornece o valor do teste, p -valor, que pode ser interpretado como o grau de concordância entre os dados e a hipótese

nula. Quanto menor for o valor de p , menor será a relação entre a distribuição dos dados e aquela descrita pela hipótese nula. Assim, a regra de decisão tomada é: se o valor p for maior do que o nível de significância α escolhido, a hipótese H_0 é aceita e a distribuição assumida para o conjunto de dados é normal. Caso contrário, H_0 é rejeitada. (ÖZTUNA et al., 2006)

O teste pode ser aplicado a qualquer amostra, independentemente do número de observações. Além disso, não depende da função de distribuição cumulativa testada.

2.2.2.3. Teste de Lilliefors

O teste de Lilliefors é uma adaptação do teste de Kolmogorov-Smirnov. Há uma diferença significativa entre os dois testes, enquanto o último faz uso da média e desvio padrão fornecidos para testar o desvio padrão, Lilliefors usa o desvio padrão e médio calculado no próprio conjunto de dados. A estatística do teste é dada pela Eq. (09) (RAZALI, 2011).

$$D^* = \max|\hat{F}(x) - G(x)|, \quad (09)$$

Onde $\hat{F}(x)$ é a distribuição cumulativa empírica dos dados da amostra e $G(x)$ é a distribuição hipotética com os parâmetros estimados iguais às amostras.

Semelhante ao teste de Jarque-Bera, para calcular o valor crítico, o Lilliefors interpola para uma tabela de valores críticos pré-calculados usando simulação de Monte Carlo para amostras menores que 1000. O teste é recomendado para aplicações quando a hipótese H_0 é mais aceita do que deveria, para resolver esse problema Lilliefors foi desenvolvida para corrigir o teste de Kolmogorov-Smirnov, como ilustrado no exemplo da Fig. 2.5.

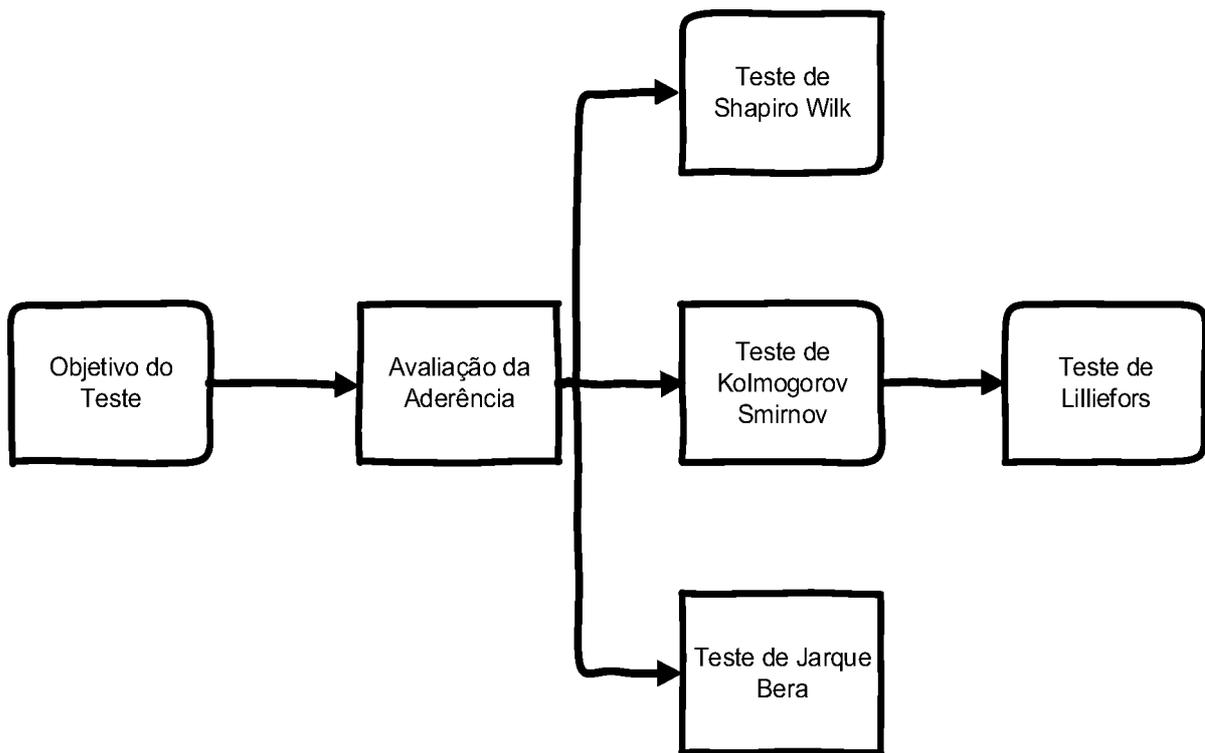


Figura 2.5 – Aplicação do teste de Lilliefors. Fonte: Adaptado de Conover 1999.

Como ilustrado no diagrama o teste de Lilliefors foi implementado para resolver o problema de aceitação de H_0 do teste de Kolmogorov-Smirnov e sua aplicação é realizada normalmente em análises cujo o número de amostras obtidas é inferior a 1000.

2.2.2.4. Teste de Shapiro Wilk

O teste de Shapiro-Wilk é baseado na Equação (10).

$$W = \frac{b^2}{\sum_1^n (x_{(i)} - \bar{x})^2}, \quad (10),$$

Onde x_i são os valores de amostra ordenados e a constante b é determinada pela Eq. (11) e (12):

$$b = \begin{cases} \sum_{i=1}^{n/2} a_{n-i+1} * (x_{(n-i+1)} - x_{(i)}), & \text{se } n \text{ é par} \\ \sum_{i=1}^{(n+1)/2} a_{n-i+1} * (x_{(n-i+1)} - x_{(i)}), & \text{se } n \text{ é ímpar} \end{cases} \quad (12)$$

Onde a_{n-i+1} são as constantes geradas pelas médias, variâncias e covariâncias de acordo com o tamanho da amostra e seus valores são tabelados. Se n for um número par então utiliza-se $\sum_{i=1}^{n/2}$ e quando o número de amostras forem ímpar então é aplicado o somatório $\sum_{i=1}^{(n+1)/2}$.

Para Lopes et al. (2013), Razali (2011) e Yap (2011), este teste é considerado o melhor teste de aderência à normalidade, sendo eficiente para diferentes distribuições e tamanhos de amostra quando comparado, por exemplo, com Kolmogorov. Para amostras menores de 30, em particular, é recomendado. Para Torman et. al, (2012) em todas as distribuições exceto a t-student e no percentual de acertos o teste Shapiro Wilk obteve os melhores resultados se comparada aos demais testes presentes na literatura. É importante ressaltar que a eficiência do teste depende da quantidade amostral utilizada na análise.

O procedimento de aplicação do teste consiste primeiramente em formular o teste de hipótese, identificando H_0 e H_1 , estabelecer um nível de confiança e posteriormente realizar os cálculos. Se o valor de $W > W_{tabelado}$ então com nível de significância previamente estabelecido pode-se dizer que as amostras provem de uma distribuição normal (SHAPIRO, 1965).

2.2.3. Limiar de detecção

Um conceito importante nas análises de ISHM é o chamado de *Limiar de Detecção*. Seu valor estima o ponto a partir do qual a existência de uma mudança significativa na estrutura é considerada, com base nos dados experimentais. O limiar ou *threshold* é uma ferramenta fundamental para a detecção de danos na estrutura, ideal para indicar uma ocorrência ou não de dano na estrutura (RABELO, 2016)

São então definidas duas formas de calcular o limiar para esta análise. Na primeira, na qual a amostra é considerada normal pelo teste de Shapiro-Wilk, o limiar é dado pela Eq. (13). Para o segundo, a normalidade da amostra sendo negada, o cálculo é feito pela Eq. (14), de acordo com a regra de Chebyshev.

$$threshold = \bar{X} + 3s \quad (13)$$

$$threshold = \bar{X} + 18s \quad (14)$$

Para ambas as estimativas, espera-se que pelo menos 99,7% das medidas estejam abaixo do valor limiar para o mesmo estado estrutural. Na Figura 2.6 é ilustrado uma aplicação do limiar de detecção em monitoramento de integridade estrutural baseado no método da impedância eletromecânica *ISHM*.

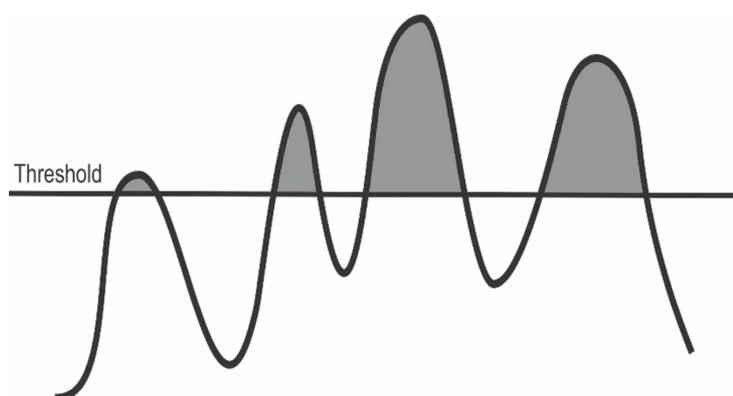


Figura 2.6 – Exemplo da técnica de limiar de detecção. Fonte: Elaborado pelo autor.

Neste exemplo pode-se visualizar que o traço do limiar passa através dos gráficos, significando que o limiar identificou neste caso que as assinaturas de impedância possuem danos. No próximo capítulo é discutido qual é o melhor modelo aplicável ao pré-processamento de *ISHM* de acordo com as condições realizadas durante as simulações.

2.2.4. Síntese

Neste capítulo investigou-se na literatura soluções aplicáveis ao monitoramento da integridade estrutural. Foram mapeados diversos estudos como, as técnicas baseadas em SHM, os possíveis efeitos que podem causar interferências nas assinaturas de impedância e métodos e modelos estatísticos aplicáveis em SHM.

CAPÍTULO III

PROCEDIMENTOS TEÓRICOS

Neste capítulo, é investigado o modelo estatístico a ser aplicado aos dados adquiridos por um sistema de SHM, levando em consideração o tipo e condições apresentadas durante o monitoramento da integridade estrutural baseado no método da impedância eletromecânica. Como visto no capítulo anterior, existem muitos métodos estatísticos na literatura, cada qual com suas características e tipo de aplicações.

3.1. Aplicação do pré-processamento

Escolhido o tipo de experimento e as condições ambientais envolvidas, é necessário escolher na literatura as métricas que melhor se adequam ao pré-processamento dos dados. Na Fig. 3.1 é ilustrado o processo desde a aquisição das assinaturas até o resultado pré-processado.

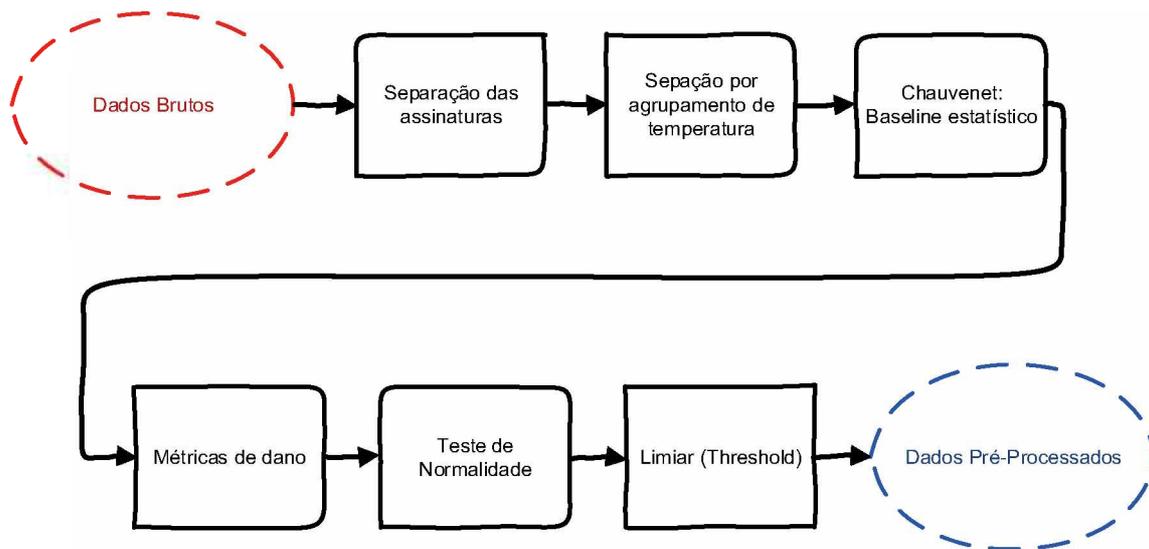


Figura 3.1 – Procedimento de pré-processamento. Fonte: Elaborado pelo autor.

As assinaturas (dados brutos) adquiridas durante o experimento são separadas entre IS com e sem dano e posteriormente por intervalos de temperatura. O Processo de Limpeza de Dados é realizado sobre o baseline em cada intervalo de temperatura, então são implementadas as métricas de dano juntamente com o critério de Chauvenet. Finalmente é aplicado o teste de normalidade e determinado o limiar de detecção que indicará se as assinaturas analisadas possuem ou não dano.

3.2. Critério de Chauvenet

A partir da coleta dos dados originais são realizadas ações que possam identificar e eliminar possíveis anomalias. Diante das possibilidades da literatura a técnica escolhida para identificar e eliminar as possíveis alterações indesejadas presentes nos sinais de impedância adquiridos foi o critério de Chauvenet. A aplicação do critério de Chauvenet segue algumas regras demonstradas através do fluxograma da Fig. 3.2.

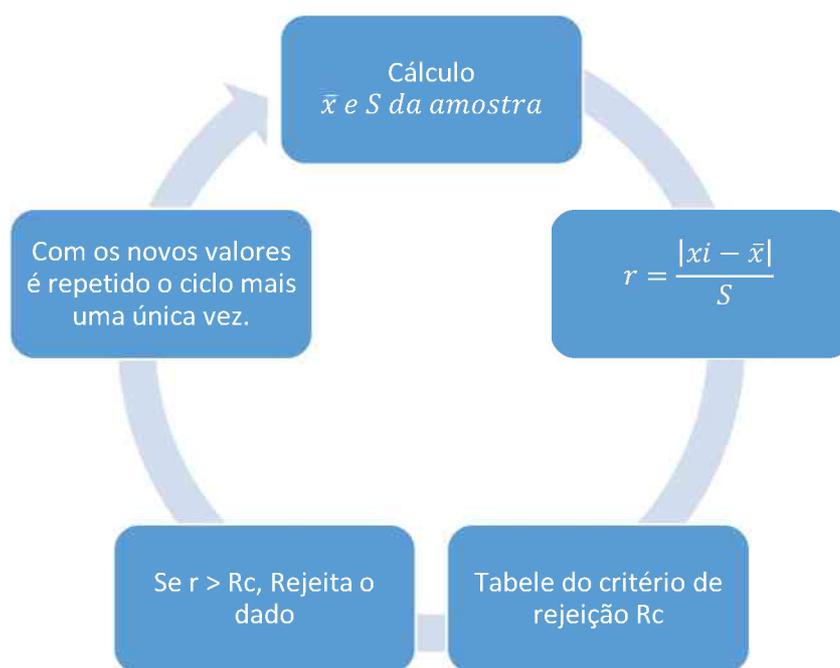


Figura 3.2 – Processo de rejeição de amostra a partir do critério de Chauvenet. Fonte: Adaptado de Doebelin, 1990.

Primeiramente calcula-se a média e o desvio padrão da amostra. Após o cálculo é necessário determinar o número de desvios padrão que diferem da média calculada. E finalmente consulta-se a tabela pré-definida do critério de rejeição comprando o seu valor com o desvio padrão da medida analisada. Se o valor do desvio padrão dos valores calculados forem superiores ao valor tabelado do critério de rejeição, então esses ou esse valor é eliminado.

Após eliminar o (s) valor (s) da amostra, como recomendado pela literatura o processo é repedido mais uma única vez, e os resultados recalculados e comparados a tabela novamente, eliminando ou não os demais valores anômalos presentes na amostra.

Para execução dos testes de normalidade utilizou-se um algoritmo fornecido e licenciado para uso do software de código aberto MATLAB[®] desenvolvido por Rod Letchford, 2016, disponível no anexo A5.

Com a aplicação do critério espera-se obter resultados com grau de confiança significativo, removendo prováveis erros e sem a presença de interferências que possam ser interpretadas erroneamente, comprometendo a validade dos dados.

3.3. Métricas de dano

Com as assinaturas obtidas são iniciados os testes da métrica de dano. A métrica de dano determinará numericamente a incidência de dano de cada assinatura obtida, cada qual com uma característica específica.

Para essa análise foram utilizados três métricas de dano a RMSD (Desvio médio da raiz quadrada), CCD (Desvio do coeficiente de correlação) e M (Somatória da diferença média).

A métrica RMSD é bastante empregada quando se tem duas amostras a serem comparadas, ela calcula a diferença entre os valores previstos e observados resultando em um valor numérico de dano.

$$RMSD = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{(Re(Z_{1,i}) - Re(Z_{2,i}))^2}{n} \right)} \quad (15)$$

Onde n é o número de frequências utilizadas na comparação, $Re(Z_{1,i})$ é a parte real do baseline, impedância sem dano em uma frequência i , $Re(Z_{2,i})$ é a parte da impedância na frequência i para a nova configuração da estrutura. (PEAIRS,2006)

Já a métrica CCD não mede a relação causa e efeito entre as assinaturas e sim o relacionamento linear entre os dois sinais, estabelecendo um nível de relação entre eles. (GIURGIUTIU,2005)

$$CCD = 1 - CC \quad (16)$$

Onde CCD é o desvio do coeficiente de correlação e CC é o coeficiente de correlação Eq. (17)

$$CC = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(Re(Z_{1,i}) - Re(\bar{Z}_1))(Re(Z_{2,i}) - Re(\bar{Z}_2))}{S_{z1}S_{z2}} \quad (17)$$

Onde S_{z1} é o desvio padrão do sinal de impedância de referência e S_{z2} é o desvio padrão do sinal de impedância a ser comparado. Se o coeficiente de correlação for igual a 1 os sinais possuem total correlação e quanto maior a diferença entre os sinais, menor é o valor de CC (SOH, 2003).

A mais simples de todas as métricas a M não utiliza nenhuma relação entre os valores das assinaturas analisados, apenas realiza a somatória da diferença média entre os sinais para estabelecer o índice de dano (PALOMINO, 2008)

$$M = \sum_{i=1}^n ((Re(Z_{1,i}) - Re(Z_{2,i}))^2) \quad (18)$$

Com as métricas devidamente aplicadas, espera-se que alguma destas consiga identificar variações de temperatura nas assinaturas de impedância com robustez e sensibilidade na detecção dessas variações de temperatura para IS sem e com a presença de dano.

Após calculados os índices de dano é imprescindível estabelecer um limiar que irá separar as IS que não possuem dano das que possuem, objetivando-se comprovar que o pré-processamento dos sinais foram eficazes eliminando possíveis erros e estabelecendo um grau de confiança dos resultados.

3.4. Execução do teste de normalidade

Os testes de normalidade têm a proposta de identificar o tipo de distribuição através de alguns métodos estatísticos com o objetivo de encontrar a limiar de detecção ou *threshold*, Eq.13 e Eq. 14.

Existem muitas técnicas que verificam a normalidade dos dados, se as distribuições com base na inferência estatística sobre a população apresentam normalidade ou não. Porém

cada métrica possui uma característica de aplicação com base no número de amostras obtidas. Neste presente trabalho planejou-se obter um número de amostras próximo a 30 (TRIOLA, 2008).

Na literatura o teste de Shapiro-Wilk foi o teste mais recomendado para essa quantidade de amostra. Após definir a técnica, os dados são analisados através de um algoritmo e seus resultados demonstraram se determinada informação apresenta normalidade ou não. De acordo com a resposta do teste, cálculos são realizados para identificar o limiar de dano das assinaturas verificadas.

O sucesso na implementação do teste de Shapiro-Wilk pode ser confirmado nos resultados do pré-processamento descritos no próximo capítulo.

3.5. Obtenção do Limiar de Detecção

Identificado o tipo de distribuição das assinaturas de impedância, um limiar de detecção habilitado é necessário para apontar a partir de quais valores uma estrutura possui ou não dano. Com essas características essa técnica é muito importante para a obtenção de conclusões sobre a estrutura, sendo de fundamental importância a sua aplicação durante etapa de pré-processamento.

O limiar de detecção é caracterizado através de uma reta horizontal que atravessa o gráfico e sua localização depende da distribuição da amostra. Caso o teste de normalidade através dos testes de Shapiro-Wilk validar as informações como variáveis contínuas, então o cálculo do Threshold utiliza a Eq. (13). Caso esta identifique as assinaturas como sendo não normais, então a Eq. (14) é implementada para identificar a posição exata do eixo y de origem da reta, como ilustrado no exemplo da Fig. 3.3.

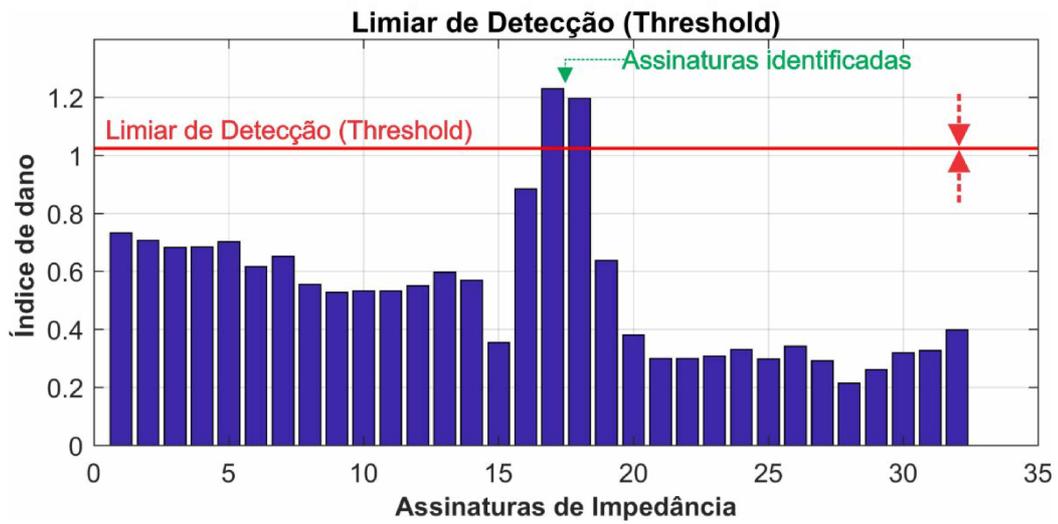


Figura 3.3 – Exemplo de aplicação do limiar de detecção. Fonte: Elaborado pelo autor.

3.6. Síntese

Nesta etapa foram escolhidos os melhores métodos e técnicas aplicáveis a SHM, encontrados na literatura. Assim objetivou-se incorporar esses métodos e técnicas nas etapas de pré-processamento, com a finalidade de identificar e remover possíveis perturbações oriundas dos testes, entregando finalmente resultados confiáveis para análises e conclusões sobre o real estado de uma determinada estrutura.

CAPÍTULO IV

PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Após extensa revisão bibliográfica, identificou-se diversos métodos e modelos matemáticos adequados à abordagem proposta. Foram então feitos ensaios experimentais utilizando PZT's acoplados à um painel aeronáutico de alumínio para identificar seu comportamento dinâmico. Neste capítulo aborda-se em detalhes a descrição do experimento e os procedimentos experimentais empregados durante a etapa de testes.

4.1. Descrição da Bancada Experimental

O ensaio para determinar o comportamento dinâmico da estrutura através de suas assinaturas de impedância foi realizado em um painel aeronáutico de alumínio, (Alumínio 2024-T3), fornecido pela companhia Embraer. Grampos de retenção foram usadas com o propósito de proteger os feixes de alumínio como ilustrado na Fig. 4.1.

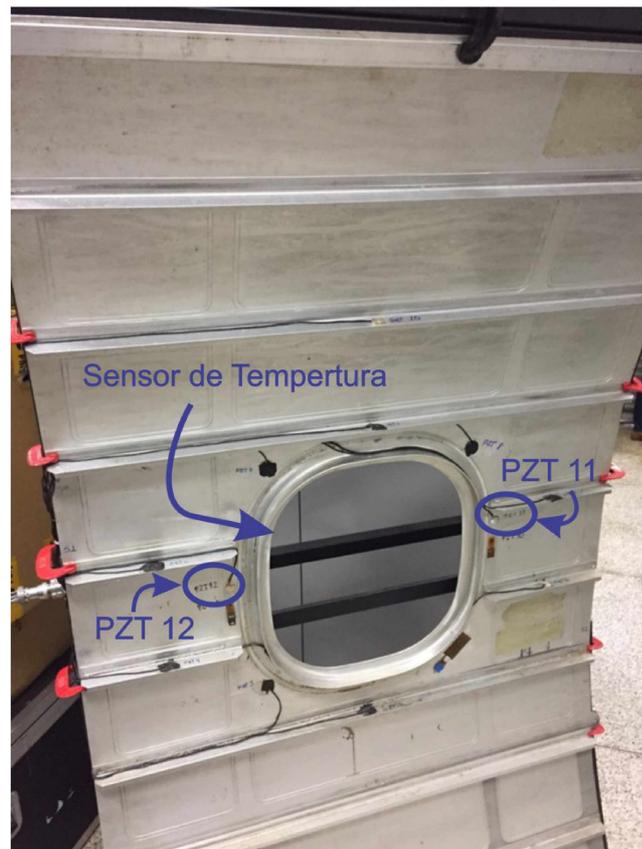


Figura 4.1 – Painel de alumínio aeronáutico utilizado no experimento. Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 4.1 pode-se visualizar as propriedades do Alumínio aeronáutico.

Tabela 4.1 - Propriedades do Alumínio 2024-T3. Fonte:

http://www.imperiodosmetais.com.br/downloads/download_ficha_tecnica/aluminio/2024.pdf (Acesso em 26/10/2017)

Propriedades do Alumínio Aeronáutico 2024-T3	
DESCRIÇÃO	
Condutibilidade Elétrica	30% I.A.C.S
Condutibilidade Térmica	0,29 cal/cms°C
Densidade	2,78 g/cm ³
Expansão Térmica	23 x 10 ⁻⁶ x1/°C
Ponto de Fusão	500 – 640°C

4.1.1. Pastilha Piezelétrica.

No painel foram acopladas duas pastilhas Piezelétricas (Fabricante Sparkles), do tipo 5H (15mm x 0,5mm de espessura), em dois locais próximos a janela, como Representado na Fig. 4.2. Uma cola especial modelo Hysol[®] EA0151 EN composta por adesivo epóxi com característica rígida, tempo de cura de aproximadamente 8h em temperatura ambiente (25°C) e 1h na temperatura de 180°F com ponto de inflamação a 196°F (91,11°C), foi utilizada para aderir os PZT's na estrutura.

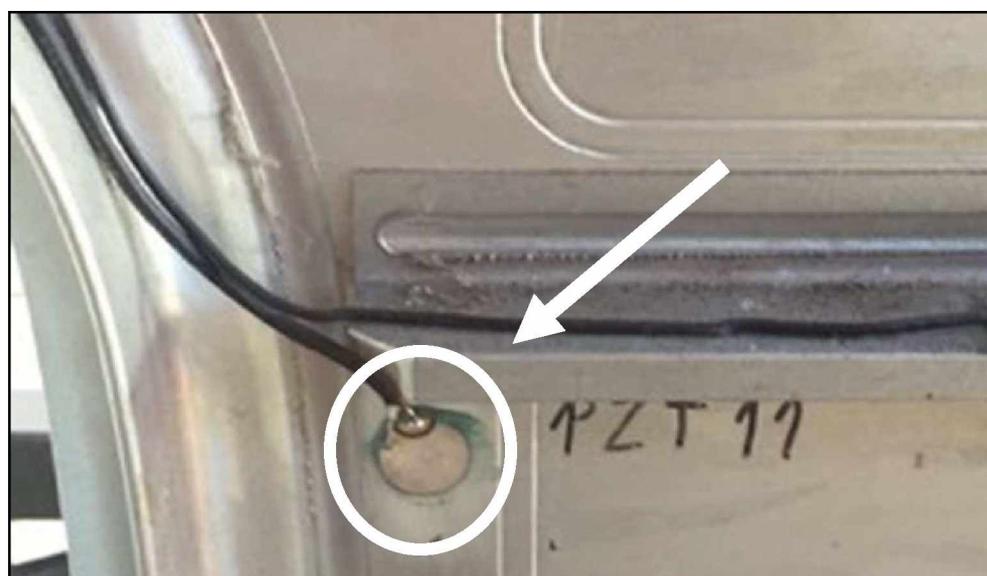


Figura 4.2 – Detalhes da pastilha piezelétrica utilizada. Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 4.2 apresenta as propriedades da pastilha de PZT Sparkles Ceramics.

Tabela 4.2 – Dados técnicos da pastilha piezelétrica da Sparkles Ceramics. Fonte:

<http://www.sparklceramics.co.in/piezo-electric-disctype-element.html> (Acesso em: 26/10/2017)

Dados técnicos da pastilha piezelétrica da Sparkles Ceramics	
DESCRIÇÃO	
Diâmetro	$\pm 15\text{mm}$

Espessura	$\pm 0,5\text{mm}$
Frequência	Até 2MHZ - $\pm 7\%$; Acima de 2MHZ - $\pm 10\%$

4.1.2. Sensor de temperatura

A temperatura do painel aeronáutico foi adquirida por meio de um sensor de temperatura modelo AD590 do fabricante ANALOG DEVICES®, acoplada por meio de adesivo Hysol® EA0151 EN e pasta térmica (Fabricante Impastec), com condução térmica de 0,4 w/mk, aplicada entre o sensor e a estrutura para garantir a transmissão de calor. O sensor de temperatura pode ser visualizado na Fig. 4.3.



Figura 4.3 – Sensor de temperatura AD590. Fonte: <https://www.digikey.com/product-detail/en/analog-devices-inc/AD590JF/AD590JF-ND/611802> (Acessado em 26/10/2017).

Na Tabela 4.3 pode-se visualizar as características técnicas do sensor de temperatura AD590.

Tabela 4.3 - Propriedades do sensor de temperatura AD590. Fonte: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD590.pdf> (Acesso em: 26/10/2017)

Dados técnicos do sensor de temperatura AD590 Flatpack	
DESCRIÇÃO	
Faixa de temperatura	- 55°C a + 150°C
Faixa de alimentação	4 a 30V
Linear current output	1 μ A/K
Nominal current Output	298.2 μ A (25°C)

4.1.3. Simulação de danos

Optou-se por utilizar a técnica de ensaio não destrutivo (END) com adição de massa para simular danos a estrutura. As massas com 3,02 e 6,04g cada foram acopladas ao painel próximos aos PZT's, em lados opostos a janela através de adesivo composto por cianocrilato com propriedade de colagem instantânea. Na Fig. 4.4 é ilustrado o local de acoplamento das massas.

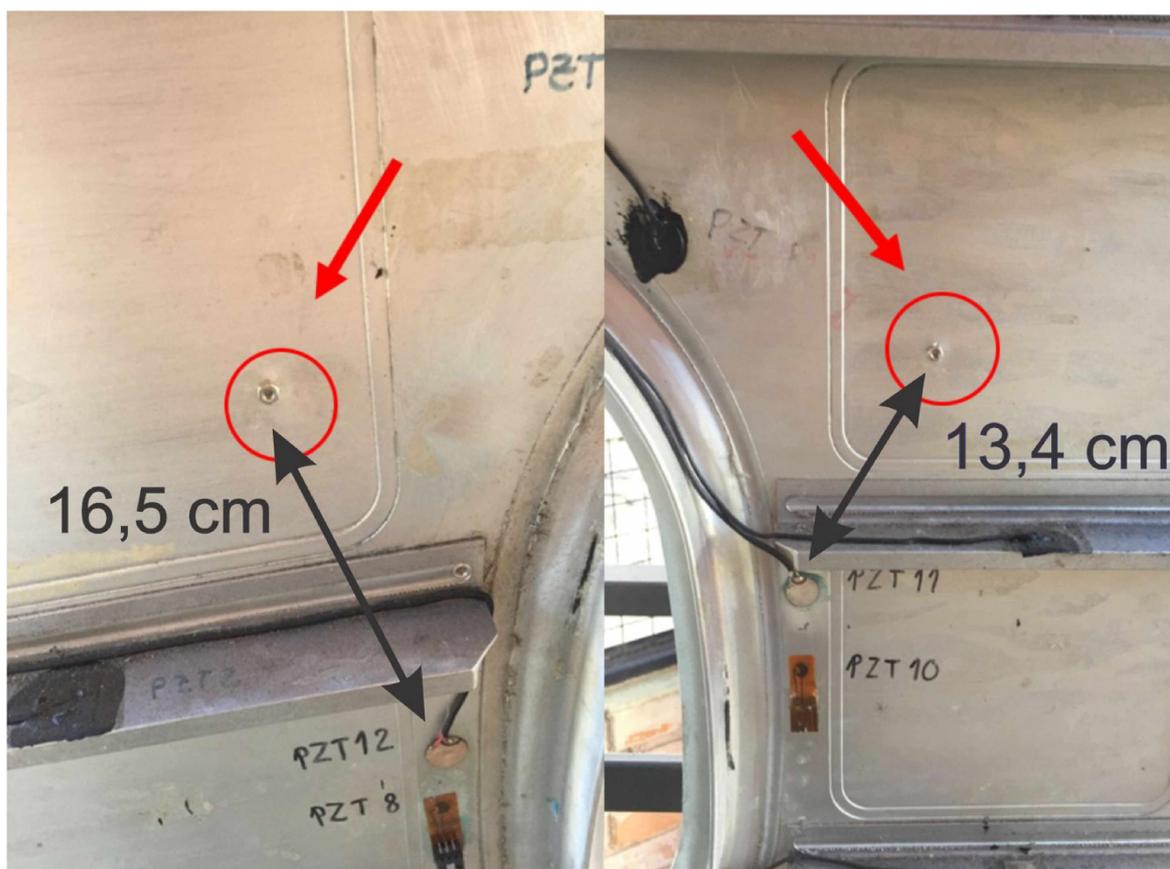


Figura 4.4 – Detalhes do local de acoplamento da massa utilizado no END. Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.4. Circuito eletrônico de aquisição de dados

Para adquirir os dados, foi utilizado um circuito eletrônico acoplado aos sensores e a um computador. Na parte de acoplamento dos sensores foi utilizado um cabo de material condutor Cobre com isolamento de PVC blindado e conector de uso restrito, fornecido pela companhia aérea Embraer. Este foi utilizado no encaixe no painel Fig. 4.5(c), a outra ponta do cabo foi conectada a um circuito eletrônico analisador de impedância, desenvolvido pelo laboratório Lmest, representado na Fig. 4.5(b). Finalmente, através de um cabo USB, o analisador de impedância é conectado a um computador que, através de um *software* também desenvolvido no Lmest Fig. 4.5(a), armazena todas as medidas realizadas durante o ensaio.

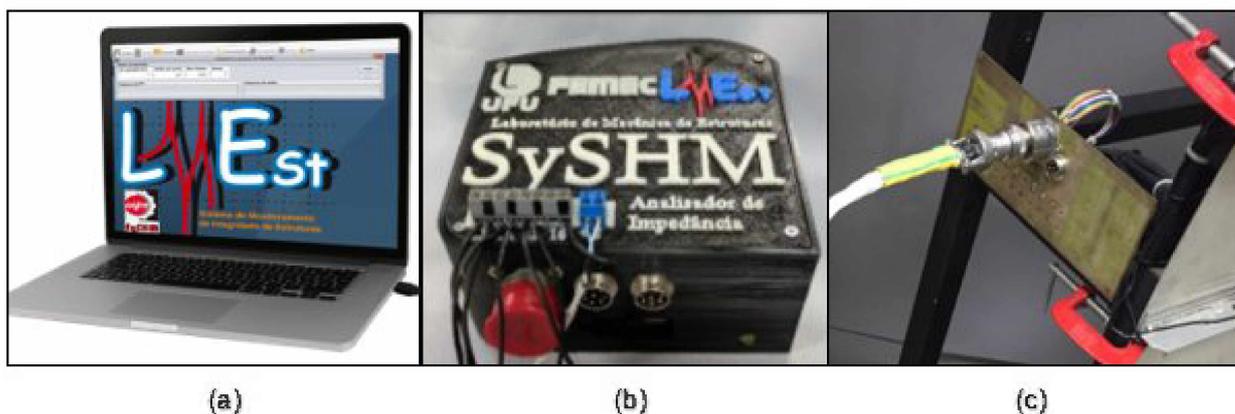


Figura 4.5 – Sistema de aquisição de dados. Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2. Descrição do Experimento

Definidos todos os equipamentos usados no experimento, apresentam-se os resultados dos ensaios, confrontando o planejamento experimental com os resultados obtidos.

4.2.1. Procedimento experimental

Após o levantamento e montagem de todos os equipamentos o ensaio foi realizado com o objetivo de antecipar inconvenientes que possam afetar a integridade e confiabilidade dos resultados.

Em experimentos que possuem erros aleatórios consideráveis, a repetição é um fator muito importante para garantir um bom nível de confiabilidade dos resultados. Button (2016). Segundo a teoria de Ashrae (1975) considera-se um número grande de mostras ($n > 20$). Porém Triola (1998) indica que para obter um número considerável de amostras, o número de repetições precisa ser superior a 30.

Como visto na literatura um dos pontos fundamentais em planejamentos experimentais é a repetição, sendo que quanto maior o número de repetição maior será a confiabilidade das respostas geradas. Além do número de repetições para a realização do planejamento experimental foi necessário identificar outras características como, equipamentos utilizados para caracterizar o comportamento do corpo de prova e armazenar essas informações, duração do experimento, local do experimento, variáveis envolvidas, tempo de coleta dos dados, grandezas medidas e identificação de fontes de erro que poderiam influenciar nas medições.

Nesse sentido foi realizado um levantamento das características do ensaio para a realização de um planejamento experimental objetivando principalmente identificar quais são as variáveis influentes e qual quantidade adequada de amostras, levando em consideração as regras de números de repetições e identificação das fontes de erro. Na Tab. 4.4. é ilustrado em detalhe as características do planejamento.

Tabela 4.4 - Característica do planejamento experimental. Fonte: Elaborado pelo autor.

PLANEJAMENTO	DESCRIÇÃO
Equipamentos Utilizados	1 x computador 1 x Analisador de impedância 2 x Pastilhas de PZT (PZT 11 e PZT 12) 1 x Sensor de temperatura 1 x Painel aeronáutico de alumínio 2 x Massas de 3,02g e 6,04g
Tempo do experimento	Planeja-se executar o ensaio durante 7 dias
Número de Repetições	Espera-se obter um número superior a 20 repetições por faixa de temperatura do Baseline (sem dano).
Local do experimento	Local semi-controlado exposto ao ambiente, restringindo o acesso a pessoas.
Tempo de coleta dos dados	Foi estabelecido um tempo coleta de aproximadamente 140 segundo de intervalo entre cada medição
Medições	Durante o experimento serão coletadas as medidas de frequência, impedância, Tensão elétrica, temperatura, potência elétrica e corrente. Porém para a análise dos sinais serão utilizados somente a frequência, impedância e temperatura.
Antecipação de inconvenientes	Espera-se que a temperatura e os efeitos eletromagnéticos possam gerar interferências nos verdadeiros sinais adquiridos.
Número de pontos por IS	Escolheu-se realizar a aquisição de 1000 pontos por IS

Após planejado, o ensaio foi executado durante um período de 7 dias. Foi feita uma variação de somente 10°C de ΔT . Optou-se também por realizar os testes em ambiente semi-controlado, como ilustrado na Fig. 4.6 com o objetivo de representar uma aplicação realista, em condições similares às encontradas na indústria.

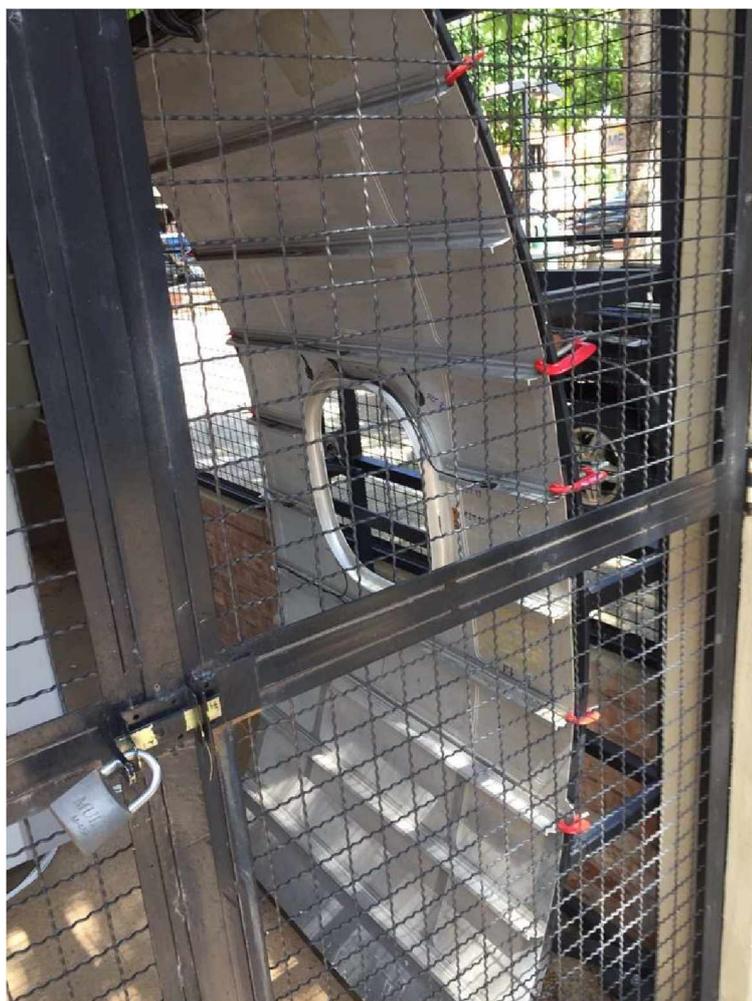


Figura 4.6 – Detalhes do local de realização do ensaio. Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.2. Resultados

Decorrido o experimento os dados foram armazenados em formato de arquivo .txt pelo *Software* de aquisição instalado no computador, adquirindo um total de 604 IS para cada um dos PZT's, sendo que metade das assinaturas com dano e a outra metade sem a presença de dano (Baseline). Na Fig. 4.7. é ilustrado o esquemático em detalhes do arquivo resposta bem como as IS adquiridas para cada PZT.

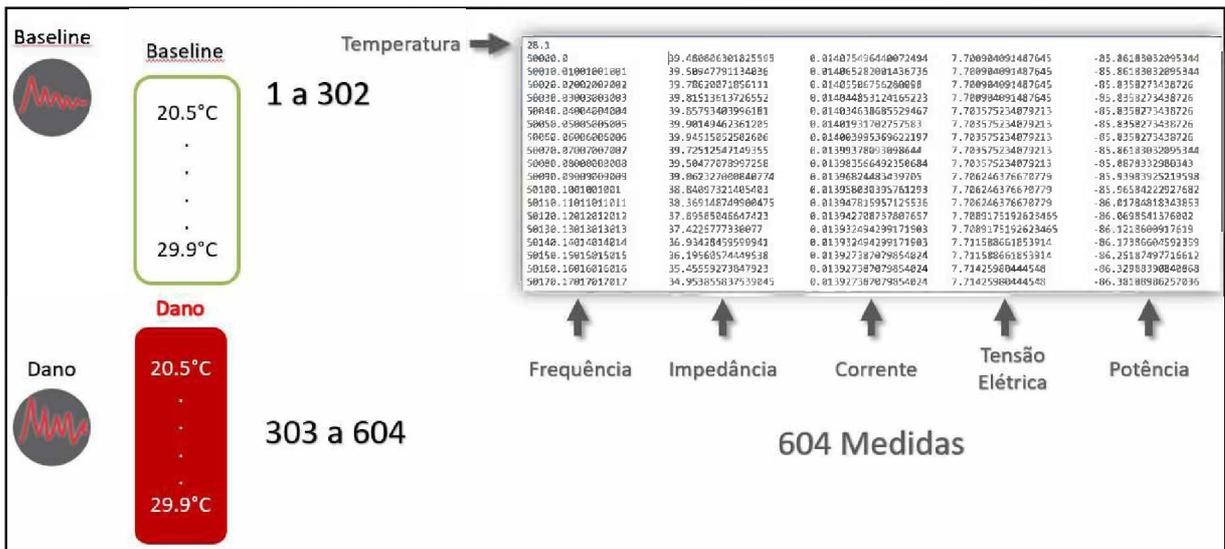


Figura 4.7 – Resultados dos ensaios. Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados obtidos no ensaio são apresentados através dos sinais, representados pela frequência no eixo das ordenadas e impedância no eixo das abcissas, o que caracteriza uma assinatura de impedância representando o comportamento dinâmico da estrutura, visualizado através da Fig. 4.8.

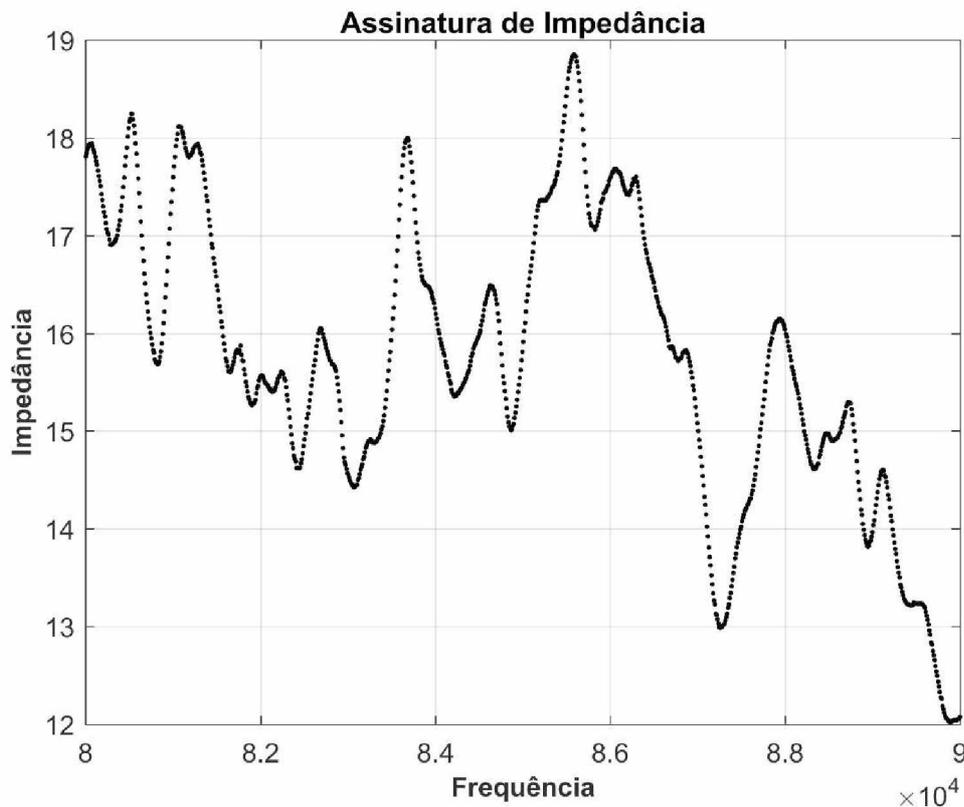


Figura 4.8 – Exemplo de assinatura de impedância. Fonte: Elaborado pelo autor.

Foram obtidas, somando-se os dois PZT's considerados, 1208 IS semelhantes à Fig. 4.7, abrangendo um range de frequência de 50 a 80kHz e variação de amplitude resistiva da impedância de 15 a 60 Ohm.

4.2.3. Análise dos resultados

É importante observar se os resultados são congruentes com os encontrados na literatura. Portanto nesta etapa é observado se os resultados obtidos se assemelham dos resultados esperados no planejamento experimental.

4.2.3.1. Critério de agrupamento dos dados

O critério de agrupamento dos dados por faixa de temperatura é uma estratégia que tem por finalidade de minimizar a ocorrência de erros como falsos positivos e falsos negativos gerados pela influência da temperatura sobre a estrutura e conseqüentemente sobre as IS. Neste trabalho optou-se por agrupar os sinais em dois grupos distintos, baseados em

diferentes divisões de ΔT , sendo estes com intervalos de 1°C e 3°C. Na Tab. 4.5 pode-se visualizar os dois ranges escolhidos e suas respectivas faixas de temperatura.

Tabela 4.5 - Detalhes dos agrupamentos de temperatura. Fonte: Elaborado pelo autor.

Intervalo 1°C	Intervalo 3°C
20.5 °C a 21.4°C	20.5 °C a 23.4°C
21.5 °C a 22.4°C	23.5 °C a 26.4°C
22.5 °C a 23.4°C	26.5 °C a 29.4°C
23.5 °C a 24.4°C	
24.5 °C a 25.4°C	
25.5 °C a 26.4°C	
26.5 °C a 27.4°C	
27.5 °C a 28.4°C	
28.5 °C a 29.4°C	

Um dos objetivos do planejamento era obter um número significativo de IS Baseline para garantir um número significativo de amostras para cada intervalo ΔT , e assim evitar erros provindos da ausência de repetição. Porém pode-se observar através da Fig. 4.9 que para o intervalo de 1°C, algumas faixas de temperatura restaram com um número reduzido de amostras. No entanto, diante desse resultado, surgiu uma oportunidade de analisar se a quantidade de IS pode ser um fator que contribui significativamente para a ocorrência de erros.

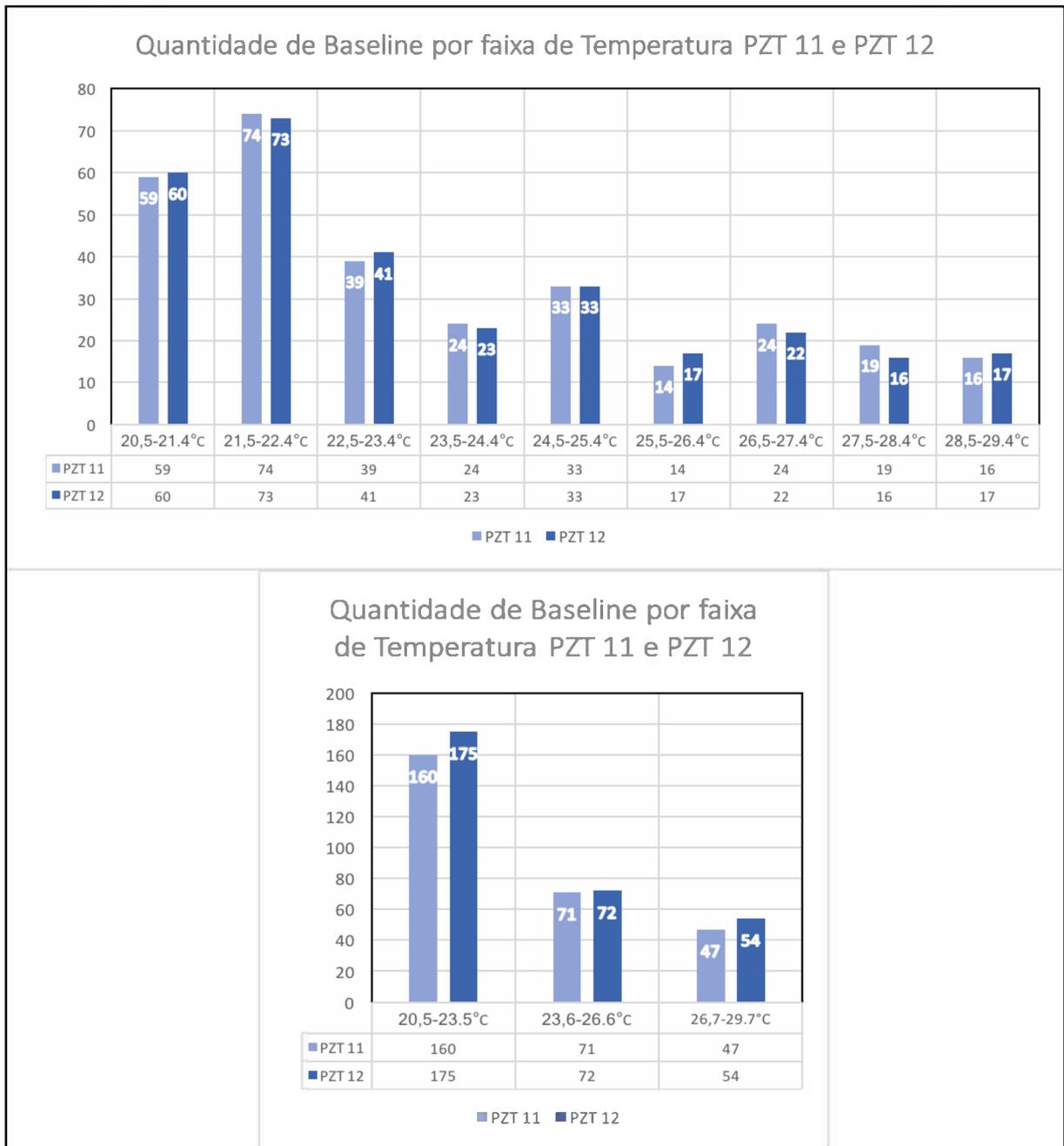


Figura 4.9 – Quantidade de baseline por faixa de temperatura. Fonte: Elaborado pelo autor.

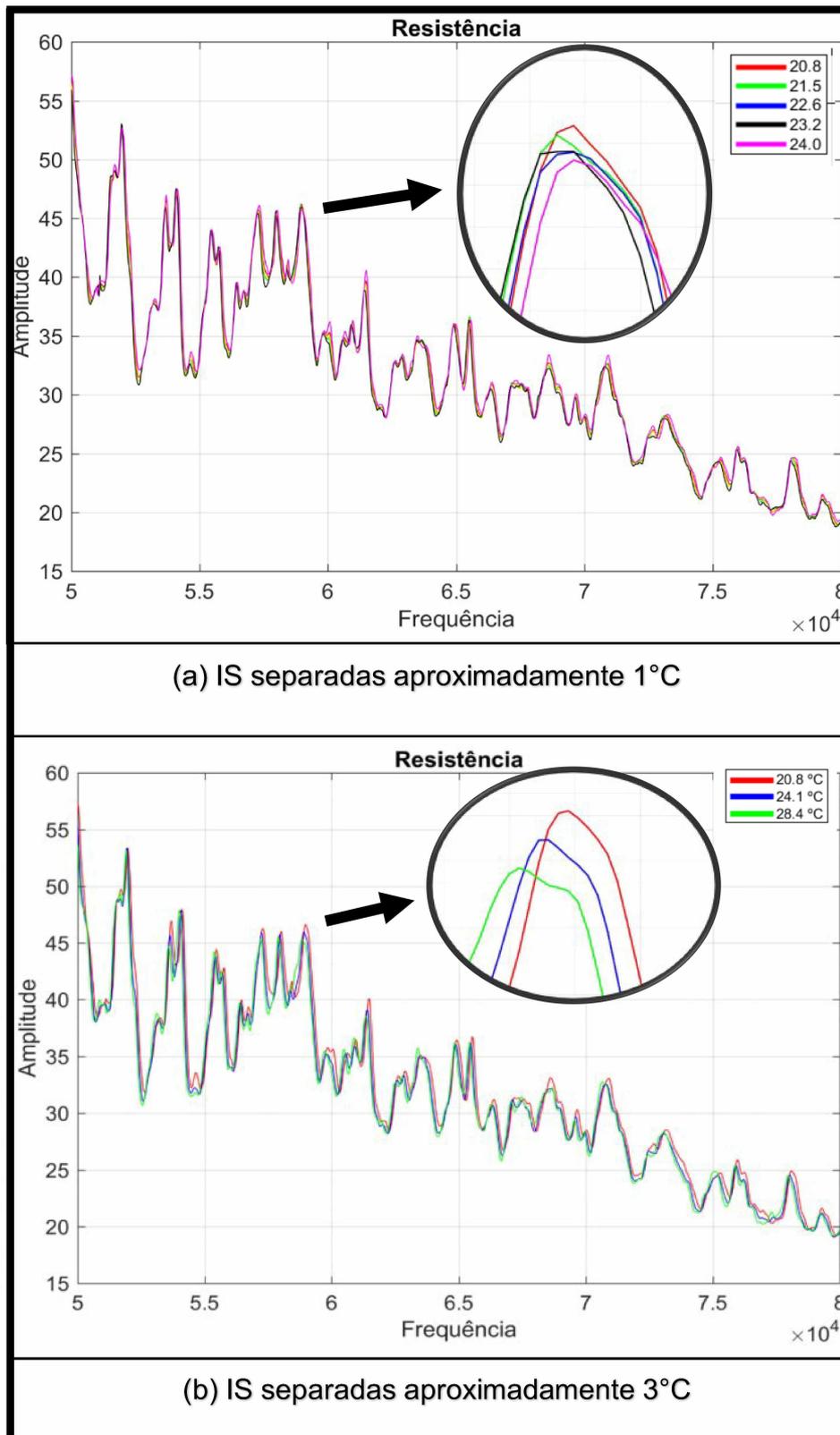
Contudo espera-se que o critério de agrupamento minimize a ocorrência de falsos positivos ou falsos negativos gerados por meio da variabilidade da temperatura ou possíveis interferências eletromagnéticas.

4.2.3.2. Efeito da temperatura

O efeito da temperatura foi um dos efeitos antecipados no procedimento experimental, que é uma variável ambiental que altera as propriedades dinâmicas de estruturas. Com os

dados devidamente separados realizou-se duas plotagens de diferentes ranges com o intuito de observar se de fato ocorre essa interação.

Na Figura 4.10(a) foram realizados o emparelhamento de várias IS separadas aproximadamente 1°C de intervalo, enquanto que na Fig. 4.10(b) é demonstrado as IS com gradientes de aproximadamente 3°C.



Nota-se que em ambas os intervalos o deslocamento tanto no eixo da frequência, quanto no eixo da amplitude é significativo. É evidente que a temperatura influencia nas assinaturas de impedância, evidenciando que é necessário utilizar-se de técnicas para a correta identificação de incidência ou não de danos, e que o critério de agrupamentos pode ser uma solução eficiente para essa finalidade.

4.2.3.3. *Baseline estatístico*

O baseline estatístico é um nome que se dá as IS que não possuem dano com o objetivo usa-las como referência na comparação de IS na iminência de danos. Esse método é utilizado para minimizar possíveis erros das IS, aplicando a média de cada ponto de um conjunto de assinaturas como solução. Neste método quanto mais amostras obtiver por intervalo analisado a probabilidade de erro será menor, e quanto menor o número de amostras maior será o impacto do erro sobre a média consequentemente maior será o erro.

Considerando a faixa de temperatura obtida durante os testes, que possui um intervalo de 20,5°C a 29,4°C para a faixa de temperatura de 1°C serão calculadas cerca de nove baselines e 3 baselines estatísticos para o ΔT de 3°C, para ambos PZT's. A técnica fundamenta-se em somar cada ponto das IS e dividir pelo número de IS concentradas em cada ΔT como ilustrado no fluxograma da Fig. 4.11.

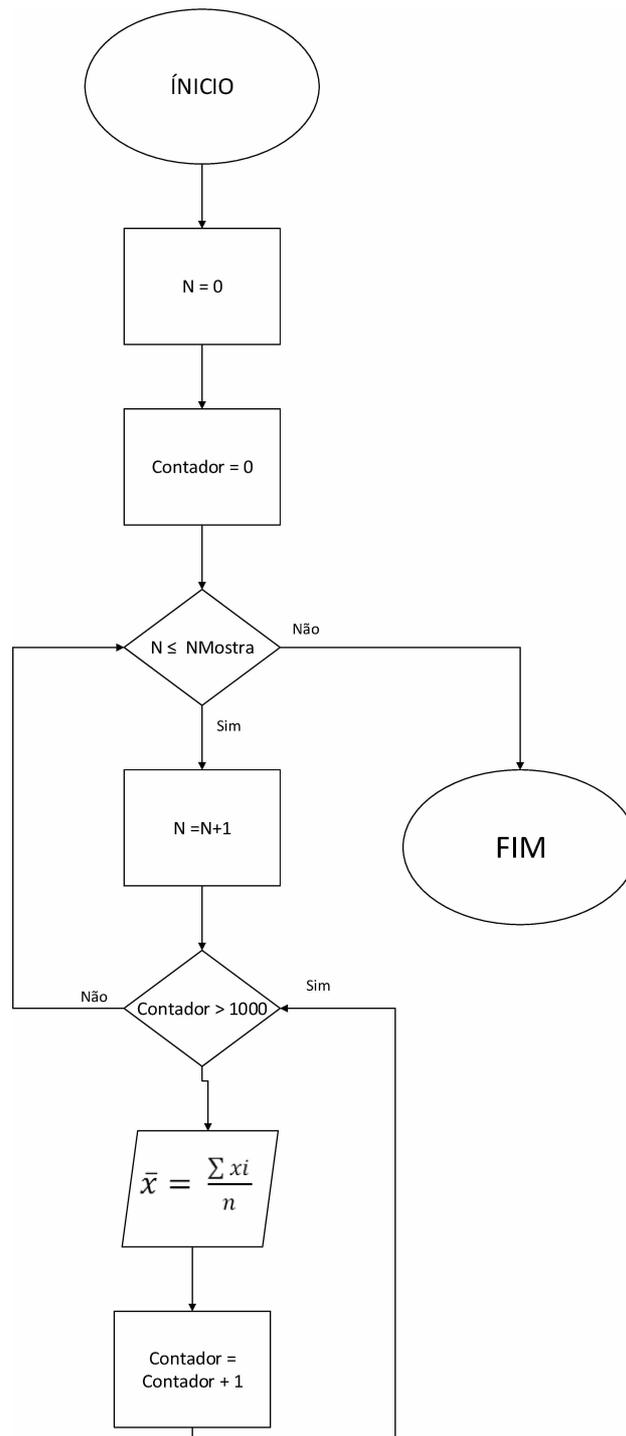


Figura 4.11 - Fluxograma do cálculo de obtenção do baseline estatístico. Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando o fluxograma onde n é o número de amostras e a variável *contador* é o número de pontos, é realizada a média de cada ponto de todas as amostras presentes até que se complete o total de pontos de cada assinatura. A média então é calculada somando a amplitude de cada um dos 1000 pontos e dividindo pelo total amostral. O resultado desse

cálculo é o que chamado de baseline estatístico, que são utilizados como referências durante o estudo.

4.3. Síntese

Como observado no procedimento experimental o efeito da temperatura é uma interferência real e esperada que necessita de uma atenção especial. Com o uso do critério de agrupamento espera-se que o erro causado por tal efeito diminua. As duas faixas de temperatura escolhidas serão uma importante ferramenta de análise do peso dessa influência sobre os erros gerados por falsos positivos e falsos negativos. Finalmente a quantidade de *Baselines* por faixa de temperatura observadas na Fig. 4.10 será um fator de grande relevância para verificar se de fato a quantidade de IS contribui significativamente para a minimização dos erros falsos positivos das IS de referências (*Baseline*).

CAPÍTULO V

PRÉ-PROCESSAMENTO

Neste capítulo são apresentados os resultados das análises do pré-processamento e posteriormente do pós-processamento dos dados, obtidos por meio de um algoritmo desenvolvido pelo autor no *software* MATLAB[®], disponível no anexo A3 deste trabalho. É verificado e discutido se as propostas matemáticas adotadas foram ou não eficazes, na minimização dos fatores que pudessem causar anomalias nas IS.

O pré-processamento dos dados é uma etapa crucial nas análises dos resultados gerados através dos ensaios. O principal objetivo é assegurar que as assinaturas de referência, as chamadas *Baselines*, não contenha nenhuma anomalia.

Haja vista que foram identificados fatores externos, principalmente a temperatura, e possivelmente efeitos eletromagnéticos que poderiam influenciar nas verdadeiras assinaturas de impedância. Estes poderiam por consequência causar erros, falsos positivos e ou falsos negativos, comprometendo o objetivo do sistema na identificação de danos estruturais pelo END.

5.1. Cálculo do índice de dano para os baselines

Neste tópico são apresentados os resultados dos índices de dano do **Baseline** nos intervalos de temperatura propostos para ambos PZT's. Os cálculos foram realizados utilizando as métricas RMSD, CCD e M, implementadas em um algoritmo desenvolvido pelo autor no *software* MatLab[®], disponível no anexo A5 do trabalho. Objetivou-se utilizar os

resultados sem nenhum tratamento nesse primeiro momento, para efeito de comparação após a aplicação da técnica de limpeza dos dados.

Os resultados das métricas de dano podem ser apresentadas de várias maneiras, mas para o melhor entendimento do leitor os dados foram apresentados utilizando a média de cada métrica e distribuídas em forma de tabela. Esse modo foi atribuído para que os dados pudessem ser comparados após a limpeza. Para melhor entendimento nas seções de pós-processamento pode-se visualizar os resultados das métricas em forma de gráficos.

5.1.1. Métrica RMSD

Na Tabela 5.1 é apresentado o índice de dano RMSD no intervalo de temperatura de 1°C para ambos PZT's.

Tabela 5.1 - Resultados das médias do agrupamento de 1°C, PZT11 e 12 para a métrica RMSD.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Baseline Intervalo de 1°C		
	PZT 11	PZT 12
TEMPERATURA	RMSD	RMSD
20,5-21.4°C	0.2123	0.1876
21.5-22.4°C	0.2657	0.2014
22.5-23.4°C	0.2357	0.1866
23.5-24.4°C	0.2760	0.1978
24.5-25.4°C	0.2770	0.2274
25.5-26.4°C	0.2612	0.2395
26.5-27.4°C	0.3009	0.2889
27.5-28.4°C	0.2481	0.1591
28.5-29.4°C	0.1751	0.1589

Na Tabela 5.2 é apresentado o índice de dano RMSD no intervalo de temperatura de 3°C para ambos PZT's.

Tabela 5.2 - Resultados das médias do agrupamento de 3°C, PZT11 e 12 para a métrica RMSD.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Baseline intervalo de 3°C		
	PZT 11	PZT 12
TEMPERATURA	RMSD	RMSD
20,5-23.4°C	0.5019	0.5297
23,5-26.4°C	0.6483	0.4695
26,5-29.4°C	0.3382	0.6536

5.1.2. Métrica CCD

Na Tabela 5.3 é apresentado o índice de dano RMSD no intervalo de temperatura de 1°C para ambos PZT's.

Tabela 5.3 - Resultados das médias do agrupamento de 1°C, PZT11 e 12 para a métrica CCD. Fonte:

Elaborado pelo autor.

Baseline Intervalo de 1°C		
	PZT 11	PZT 12
TEMPERATURA	CCD	CCD
20,5-21.4°C	0.1299	0.1988
21.5-22.4°C	0.1287	0.1801
22.5-23.4°C	0.1353	0.2016
23.5-24.4°C	0.1504	0.2298
24.5-25.4°C	0.1441	0.2466
25.5-26.4°C	0.1532	0.3023

26.5-27.4°C	0.1617	0.3925
27.5-28.4°C	0.1464	0.1972
28.5-29.4°C	0.1273	0.1939

Na Tabela 5.4 é apresentado o índice de dano RMSD no intervalo de temperatura de 3°C para ambos PZT's.

Tabela 5.4 - Resultados das médias do agrupamento de 3°C, PZT11 e 12 para a métrica CCD. Fonte: Elaborado pelo autor.

Baseline intervalo de 3°C		
	PZT 11	PZT 12
TEMPERATURA	CCD	CCD
20,5-23.4°C	0.1516	1.0243
23,5-26.4°C	0.4569	0.8740
26,5-29.4°C	0.1952	1.4785

5.1.3. Métrica M

Na Tabela 5.5 é apresentado o índice de dano M no intervalo de temperatura de 1°C para ambos PZT's.

Tabela 5.5 - Resultados das médias do agrupamento de 1°C, PZT11 e 12 para a métrica M. Fonte:
Elaborado pelo autor.

Baseline Intervalo de 1°C		
	PZT 11	PZT 12
TEMPERATURA	M	M
20,5-21.4°C	53.1113	37.6870
21.5-22.4°C	75.7693	42.7291
22.5-23.4°C	64.8568	38.7104
23.5-24.4°C	88.5339	42.4799
24.5-25.4°C	82.4496	55.4928
25.5-26.4°C	74.8503	64.5950
26.5-27.4°C	93.3488	92.9723
27.5-28.4°C	77.7836	30.7843
28.5-29.4°C	33.2960	29.3058

Na Tabela 5.6 é apresentado o índice de dano M no intervalo de temperatura de 3°C para ambos PZT's.

Tabela 5.6 – Resultados das médias do agrupamento de 3°C, PZT11 e 12 para a métrica M. Fonte:
Elaborado pelo autor.

Baseline intervalo de 3°C		
	PZT 11	PZT 12
TEMPERATURA	M	M
20,5-23.4°C	279.2304	293.9527
23,5-26.4°C	424.8309	239.6053

26,5-29.4°C

127.0744

438.3278

5.2. Aplicação do Critério de Chauvenet

Repetição das medições são usualmente feitas em experimentos, com objetivo de minimizar possíveis erros sistemáticos ocorridos durante os testes. Porém caso existam medidas realizadas que possuam uma diferença numérica considerável, levando em conta as demais medidas, então essa medida precisa ser identificada e rejeitada. Essa rejeição deverá ser implementada através de critérios estatísticos consagrados, que comprove se o valor deve ou não ser rejeitado. (HOLMAN, 1990)

Uma determinada amostra pode conter valores duvidosos, que podem culminar em erros relevantes. O critério de Chauvenet tem a proposta de eliminar esses possíveis erros duvidosos empregando cálculos matemáticos (DOEBELIN, 1990). Neste presente trabalho o critério teve como objetivo eliminar possíveis erros oriundos das interferências de variáveis não controláveis ao longo da experimentação implementados através das métricas de índice de danos.

Desta forma, os resultados da aplicação do critério de Chauvenet foi implementado sobre cada métrica de índice de dano objetivando e os resultados da aplicação através do critério foram comparados com os dados antes da limpeza e suas respectivas médias apresentadas conforme ilustrado nas Tab. 5.7, Tab. 5.8, Tab. 5.9 para o intervalo de 1°C, e 3°C nas Tab. 5.10, Tab. 5.11 e Tab. 5.12.

A Tabela 5.7 ilustra o resultado da comparação antes e após a aplicação do critério de Chauvenet sobre os índices de dano RMSD para ambos PZT's.

Tabela 5.7 - Tabela de comparação antes e após o critério de Chauvenet para o Agrupamento de 1°C, métrica RMSD. Fonte: Elaborado pelo autor.

Intervalo de Temperatura de 1°C						
Temperatura	PZT 11			PZT 12		
	RMSD	RMSD	Valores	RMSD	RMSD	Valores
		Chauvenet	Eliminados		Chauvenet	Eliminados
20,5-21,4°C	0.2123	0.1927	55	0.1876	0.1849	58
21.5-22.4°C	0.2657	0.2657	75	0.2014	0.2014	75
22.5-23.4°C	0.2357	0.2289	38	0.1866	0.1815	39
23.5-24.4°C	0.2760	0.2496	23	0.1978	0.1978	22
24.5-25.4°C	0.2770	0.2698	31	0.2274	0.2274	33
25.5-26.4°C	0.2612	0.2612	13	0.2395	0.2395	23
26.5-27.4°C	0.3009	0.3009	23	0.2889	0.2889	14
27.5-28.4°C	0.2481	0.2047	16	0.1591	0.1439	16
28.5-29.4°C	0.1751	0.1665	14	0.1589	0.1472	14

Com os resultados obtidos, pode-se notar que, em ambos os PZT's nos intervalos de temperatura de 21.5-22.4°C, 25.5-26.4°C e 26.5-27.4°C não ocorreram limpeza dos dados, no entanto nos outros intervalos de temperatura ocorreram a rejeição de valores duvidosos, verificado entre a diferença das médias antes e após a aplicação do critério. Diferentemente da métrica anterior os índices de dano da métrica CCD apresentaram melhores resultados na sensibilidade, como visto na Tab. 5.8.

Tabela 5.8 - Tabela de comparação antes e após o critério de Chauvenet para o Agrupamento de 1°C, métrica CCD. Fonte: Elaborado pelo autor.

Intervalo de Temperatura de 1°C						
Temperatura	PZT 11			PZT 12		
	CCD	CCD	Valores	CCD	CCD	Valores
		Chauvenet	Eliminados		Chauvenet	Eliminados
20,5-21,4°C	0.1299	0.1290	58	0.1988	0.1988	59
21.5-22.4°C	0.1287	0.1277	73	0.1801	0.1782	74
22.5-23.4°C	0.1353	0.2289	37	0.2016	0.1933	39
23.5-24.4°C	0.1504	0.1451	24	0.2298	0.2195	21

24.5-25.4°C	0.1441	0.1428	31	0.2466	0.2403	32
25.5-26.4°C	0.1532	0.1461	12	0.3023	0.2766	15
26.5-27.4°C	0.1617	0.1617	23	0.3925	0.3925	23
27.5-28.4°C	0.1464	0.1306	16	0.1972	0.1720	14
28.5-29.4°C	0.1273	0.1240	14	0.1939	0.1764	14

Nota-se que nos intervalos de 26.5-27.4°C, em ambos PZT's e no intervalo de 20,5-21.4°C somente no PZT12 não houve rejeição de dados. No restante dos intervalos observa-se a eliminação de valores. Na Tab. 5.9 é exibido os índices de dano da métrica M.

Tabela 5.9 - Tabela de comparação antes e após o critério de Chauvenet para o Agrupamento de 1°C, métrica M. Fonte: Elaborado pelo autor.

Intervalo de Temperatura de 1°C						
Temperatura	PZT 11			PZT 12		
	M	M	Valores	M	M	Valores
		Chauvenet	Eliminados		Chauvenet	Eliminados
20,5-21.4°C	53.1113	40.1167	55	37.6870	35.3760	57
21.5-22.4°C	75.7693	74.1805	74	42.7291	41.9728	74
22.5-23.4°C	64.8568	55.6142	37	38.7104	35.8335	39
23.5-24.4°C	88.5339	67.0037	23	42.4799	39.4394	21
24.5-25.4°C	82.4496	77.0379	31	55.4928	55.4928	33
25.5-26.4°C	74.8503	65.9481	12	64.5950	56.9311	15
26.5-27.4°C	93.3488	93.3488	23	92.9723	92.9723	23
27.5-28.4°C	77.7836	43.1857	16	30.7843	23.0945	14
28.5-29.4°C	33.2960	29.4578	14	29.3058	24.0114	14

Na métrica M apresentou resultados semelhante à CCD, no intervalo de 26.5-27.4°C, em ambos PZT's e no intervalo de 24.5-25.4°C somente no PZT12 não houve rejeição de dados.

Com os resultados obtidos pode-se concluir que as métricas CCD e M foram as que tiveram melhor resultado na sensibilidade de rejeição de valores, contudo o índice RMSD apresentou bons resultados. Um detalhe importante na inspeção dos resultados foi a

observação de uma peculiaridade, no intervalo de 26.5-27.4°C em todas as métricas em ambos PZT's o critério não rejeitou nenhum valor, fato que merece uma atenção especial.

Nas Tab. 5.10, Tab. 5.11 e Tab. 5.12 são exibidos os resultados para o intervalo de temperatura de 3°C para as métricas RMSD, CCD e M respectivamente.

Tabela 5.10 - Tabela de comparação antes e após o critério de Chauvenet para o Agrupamento de 3°C, métrica RMSD. Fonte: Elaborado pelo autor.

Intervalo de Temperatura de 3°C						
TEMPERATURA	PZT 11			PZT 12		
	RMSD	RMSD	Valores	RMSD	RMSD	Valores
		Chauvenet	Eliminados		Chauvenet	Eliminados
20,5-23.4°C	0.5019	0.4707	159	0.5297	0.5259	119
23.5-26.4°C	0.6483	0.6483	20	0.4695	0.4507	36
26.5-29.4°C	0.3382	0.3382	46	0.6536	0.6536	37

Tabela 5.11 - Tabela de comparação antes e após o critério de Chauvenet para o Agrupamento de 3°C, métrica CCD. Fonte: Elaborado pelo autor.

Intervalo de Temperatura de 3°C						
TEMPERATURA	PZT 11			PZT 12		
	CCD	CCD	Valores	CCD	CCD	Valores
		Chauvenet	Eliminados		Chauvenet	Eliminados
20,5-23.4°C	0.1516	0.1475	153	1.0243	1.0063	119
23.5-26.4°C	0.4569	0.4569	20	0.8740	0.7805	36
26.5-29.4°C	0.1952	0.1952	46	1.4785	1.4785	37

Tabela 5.12 - Tabela de comparação antes e após o critério de Chauvenet para o Agrupamento de 3°C, métrica M. Fonte: Elaborado pelo autor.

Intervalo de Temperatura de 3°C						
TEMPERATURA	PZT 11			PZT 12		
	M	M	Valores	M	M	Valores
		Chauvenet	Eliminados		Chauvenet	Eliminados
20,5-23.4°C	279.2304	244.7321	159	293.9527	288.3149	119
23.5-26.4°C	424.8309	424.8309	20	239.6053	209.7600	36
26.5-29.4°C	127.0744	127.0744	46	438.3278	438.3278	37

Nota-se que no intervalo de 26,5-29.4°C de ambos PZT's e 23,5-26.4°C do PZT 11 o critério de rejeição não identificou nenhum valor duvidoso em nenhuma das métricas aplicadas, que é relevante na consideração do critério de agrupamentos de dados por faixa de temperatura.

5.2.1. Teste de Normalidade

O teste de normalidade foi efetuado sobre todos os conjuntos de dados pertencentes aos intervalos propostos, nas faixas de 1°C e 3°C de temperatura. Objetivou-se verificar o tipo de distribuição de cada IS para assim efetuar o cálculo estatístico apropriado para cada situação. O teste de normalidade foi executado empregue sobre os dados limpos, ou seja, após a aplicação do critério de Chauvenet visto no capítulo anterior.

O teste de normalidade foi executado utilizando o teste de Shapiro-Wilk implementados através das Eq. (08) e Eq. (09). Para demonstração, utilizou-se o teste de hipótese como mostrado na Tab. 5.13. O teste consiste, no seguinte procedimento: se a hipótese H_0 representada pelo número "0" for aceita, então as IS do intervalo aferido apresentam normalidade, por outro lado, se a hipótese for rejeitada, é ilustrado por meio do numeral "1", significando que o intervalo não possui aderência a normalidade. Esse procedimento foi realizado em todos os intervalos de temperatura para as métricas RMSD, CCD e M, como visto nas Tab. 5.13 e Tab. 5.14 nos intervalos de 1° e 3°C respectivamente.

Tabela 5.13 - Resultados do teste de normalidade Shapiro-Wilk, agrupamento de 1°C. Fonte:
Elaborado pelo autor.

Intervalo de Temperatura de 1°C						
Temperatura	PZT 11			PZT 12		
	RMSD	CCD	M	RMSD	CCD	M
	Norm	Norm	Norm	Norm	Norm	Norm
20,5-21.4°C	1	1	1	0	0	0
21.5-22.4°C	1	0	1	0	0	1
22.5-23.4°C	1	0	1	0	0	1
23.5-24.4°C	1	1	1	0	0	0
24.5-25.4°C	0	0	0	0	0	0
25.5-26.4°C	0	0	0	0	0	0
26.5-27.4°C	0	0	0	0	0	0
27.5-28.4°C	0	0	0	0	0	0
28.5-29.4°C	0	0	0	0	0	0

Com os resultados obtidos pode-se observar que nos intervalos de 20,5-21.4°C e 23.5-24.4°C para todas as métricas, e nos intervalos 20,5-21.4°C e 23.5-24.4°C para as métricas RMSD e M, as IS não apresentaram aderência à normalidade. Nos outros intervalos as IS de todas as métricas apresentam aderência à normalidade para o PZT 11. Já para o PZT 12 todas as IS apresentaram aderência a normalidade, no entanto somente nos intervalos de 21.5-22.4°C e 22.5-23.4°C para a métrica M as IS não apresentaram normalidade.

Na Tabela 5.14 são mostradas as respostas do teste de normalidade Shapiro Wilk para o intervalo de 3°C

Tabela 5.14 - Resultados do teste de normalidade Shapiro-Wilk, agrupamento de 3°C. Fonte: Elaborado pelo autor.

Intervalo de Temperatura de 3°C						
TEMPERATURA	PZT 11			PZT 12		
	RMSD	CCD	M	RMSD	CCD	M
	Norm	Norm	Norm	Norm	Norm	Norm
20,5-23.4°C	1	1	1	1	1	1
23.5-26.4°C	0	0	0	1	1	1
26.5-29.4°C	1	1	1	0	0	0

Como pode ser constatado, somente no intervalo de 23.5-26.4°C do PZT 11 e 26.5-29.4°C do PZT 12, para todas as métricas, as assinaturas de impedância aderiram à normalidade.

5.2.2. Limiar de detecção

Identificado o tipo de distribuição das assinaturas de impedância, um limiar de detecção adequado é necessário para apontar a partir de quais valores uma estrutura possui ou não dano. Com estes requisitos, essa técnica é adequada para inferir conclusões sobre a estrutura, sendo de fundamental importância a sua aplicação durante o processo de pré-processamento.

O cálculo do limiar de detecção foi aplicado levando em conta a distribuição das assinaturas de referência (*Baselines*) após a rejeição dos *outliers*, executado pelo critério de Chauvenet. O cálculo do limiar é realizado de acordo com a distribuição das amostras como visto nas Tab. 5.13 e 5.14. Se a distribuição apresentar normalidade é utilizado o cálculo da Eq. (9), caso contrário cálculo da Eq. (10) é utilizado.

Na Tabela 5.15 e Tabela 5.16 são ilustrados os resultados dos cálculos do limiar de detecção no intervalo de temperatura de 1°C e 3°C respectivamente.

Tabela 5.15 - Resultados dos valores do limiar de detecção para o agrupamento de 1°C. Fonte:

Elaborado pelo autor.

Intervalo de Temperatura de 1°C						
Temperatura	PZT 11			PZT 12		
	RMSD	CCD	M	RMSD	CCD	M
	Threshold	Threshold	Threshold	Threshold	Threshold	Threshold
20,5-21.4°C	1.1858	0.3389	593.4013	0.3303	0.3076	87.3604
21.5-22.4°C	1.5731	0.1517	803.1735	0.3424	0.2770	391.1199
22.5-23.4°C	1.8358	0.1788	861.4992	0.3459	0.3267	436.6539
23.5-24.4°C	1.5164	0.6489	901.0418	0.3758	0.4283	106.1135
24.5-25.4°C	0.4702	0.1833	190.4598	0.4152	0.4210	144.5568
25.5-26.4°C	0.5166	0.2270	190.1275	0.5037	0.6676	170.4874
26.5-27.4°C	0.4645	0.2204	192.0092	0.5887	0.9545	264.3603
27.5-28.4°C	0.3162	0.1718	91.7177	0.2966	0.3398	72.7437
28.5-29.4°C	0.2969	0.1673	79.7727	0.2979	0.3290	71.4538

Tabela 5.16 - Resultados dos valores do limiar de detecção para o agrupamento de 3°C. Fonte:

Elaborado pelo autor.

Intervalo de Temperatura de 3°C						
TEMPERATURA	PZT 11			PZT 12		
	RMSD	CCD	M	RMSD	CCD	M
	Threshold	Threshold	Threshold	Threshold	Threshold	Threshold
20,5-23.4°C	3.5035	0.6541	3202	2.5022	8.1384	2532
23.5-26.4°C	0.8631	0.6994	695	1.9553	5.5996	1769

26.5-29.4°C	2.3949	1.2809	1670	0.9793	2.9121	862
-------------	--------	--------	------	--------	--------	-----

Os resultados obtidos dos ajustes do limiar de detecção são de fundamental importância. No próximo capítulo essas informações compõe a solução final determinística que comprova graficamente se as assinaturas estão ou não com dano.

5.3. Síntese

Constatou-se que há diferenças significativas nos resultados dos cálculos do índice de dano de cada métrica realizado através da comparação entre as médias. Observou-se que pela comparação da média, e valores eliminados visto nas Tab. 5.7, Tab. 5.8, Tab. 5.9 para o intervalo de 1°C, e 3°C e nas Tab. 5.10, Tab. 5.11 e Tab. 5.12, que o critério de Chauvenet pode ter eliminado possíveis anomalias das assinaturas de impedância do *Baseline*, fato que será comprovado ou não no próximo capítulo. Realizou-se o teste de normalidade e a partir da descoberta do tipo de distribuição de cada IS, os cálculos do limiar de detecção de danos foram efetuados e seus respectivos valores encontrados, concluindo o procedimento de pré-processamento.

CAPÍTULO VI

RESULTADOS DO PÓS-PROCESSAMENTO

Neste tópico são expostos os resultados das métricas de dano, com o objetivo de identificar o comportamento de cada métrica mediante cada condição estabelecida nos capítulos anteriores. É identificado se os limiares de detecção calculados anteriormente são capazes de identificar ou não as assinaturas que possuem dano. Em todo o processo de determinação alguns aspectos serão colocados a prova, como o critério de agrupamento por faixa de temperatura, a quantidade de amostras por faixa, a sensibilidade da métricas de dano e a eficiência da aplicação do critério de Chauvenet.

6.1. Índice de dano do estado com dano

Foram aplicadas as métricas de índices de dano no estado com dano e os resultados serão ilustrados neste tópico. Objetivou-se demonstrar numericamente para efeito de comparação, se de fato as métricas de índice de dano puderam identificar a diferença entre as IS referência (Baseline) e as IS com dano. Pode-se visualizar os resultados através das Tab. 6.1 e Tab. 6.2, para os intervalos de 1° e 3°C respectivamente.

Tabela 6.1 – Resultados das médias do índice de dano RMSD da IS com dano, para o agrupamento de 1°C. Fonte: Elaborado pelo autor.

Intervalo de Temperatura de 1°C						
Temperatura	PZT 11			PZT 12		
	RMSD	CCD	M	RMSD	CCD	M
	Dano	Dano	Dano	Dano	Dano	Dano
20,5-21.4°C	0.4689	0.2621	219.7086	0.4314	0.6863	187.4790
21.5-22.4°C	0.5203	0.3163	270.9450	0.4595	0.7662	211.4506
22.5-23.4°C	0.4556	0.2982	251.8607	0.5198	0.9752	287.6390
23.5-24.4°C	0.4307	0.2796	207.6675	0.4307	0.6937	185.6755
24.5-25.4°C	0.4813	0.2981	232.2541	0.4039	0.6335	163.1837
25.5-26.4°C	0.5803	0.3434	340.5428	0.4161	0.6499	173.2035
26.5-27.4°C	0.5807	0.3331	333.4327	0.4828	0.8127	234.6386
27.5-28.4°C	0.6708	0.4499	463.5760	0.6437	1.4171	416.9700
28.5-29.4°C	0.7132	0.4779	515.9224	0.6019	1.2040	362.5230

Ao comparar os valores obtidos com as Tab. 5.7, Tab. 5.8 e Tab. 5.9 do *Baseline*, foi identificado que todas as métricas de dano de ambos os PZT, em todos os intervalos de temperatura apresentaram bons resultados na identificação de dano na IS. Ao analisar numericamente a performance de cada métrica nota-se que a métrica M é a mais sensível em relação a RMSD e CCD.

Tabela 6.2 - Resultados das médias do índice de dano RMSD da IS com dano, para o agrupamento de 3°C. Fonte: Elaborado pelo autor.

Intervalo de Temperatura de 3°C						
TEMPERATURA	PZT 11			PZT 12		
	RMSD	CCD	M	RMSD	CCD	M
	Dano	Dano	Dano	Dano	Dano	Dano
20,5-23.5°C	0.7110	0.3265	510.8840	0.2656	0.3122	78.3023
23.6-26.6°C	0.5653	0.3693	329.6805	0.3110	0.4333	108.9496

26.7-29.7°C	0.6401	0.4355	411.297	0.3739	0.6246	162.3497
-------------	--------	--------	---------	--------	--------	----------

Observa-se que no intervalo de 3°C ao se comparar as IS de referência (*Baseline*) visto nas Tab. 5.10, Tab. 5.11 e Tab. 5.12 para os intervalos de 20,5-23.5°C e 26.7-29.7°C, que para todas métricas somente para o PZT11 e no intervalo de 20,5-23.5°C para a métrica CCD do PZT 12, houve a detecção de dano analisando numericamente. Resultados que serão melhores analisados na etapa seguinte.

6.2. Análise do pós-processamento

Neste tópico são expostos todos os resultados obtidos ao longo do trabalho em forma de gráficos. Objetivou-se analisar e discutir em detalhes os resultados obtidos ao longo do trabalho com ajuda de ilustrações gráficas, permitindo uma melhor abordagem e entendimento de cada situação.

6.2.1. Resultados aplicando a métrica RMSD

Para a métrica RMSD foram analisados os resultados dos PZT's 11 e 12 para cada intervalo de temperatura contrapondo os resultados do baseline e assinaturas com dano. Nas Fig. 6.1, Fig. 6.2, Fig. 6.3, Fig. 6.4, Fig. 6.5 e Fig. 6.6 são ilustrados os resultados para o intervalo de 1°C, Fig. 6.7, Fig. 6.8, Fig. 6.9, Fig. 6.10, Fig. 6.11 e Fig. 12, para o intervalo de 3°C para ambos PZT's.

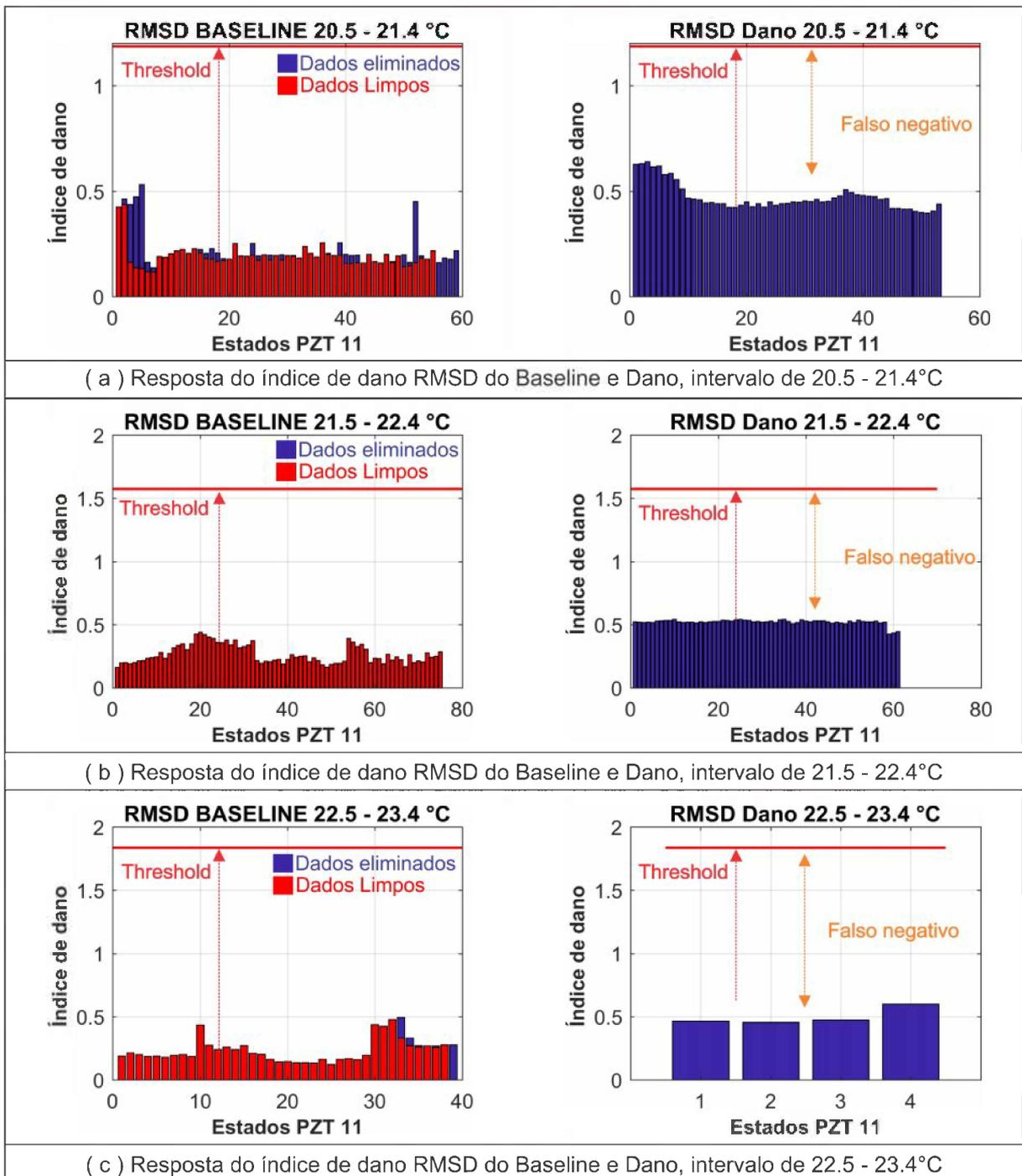


Figura 6.1 - RMSD baseline e dano PZT 11 (a) 20.5-21.4°C, (b) 21.5-22.4°C e (c) 22.5-23.4°C. Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se na Figura 6.1 que o limiar de detecção (*Threshold*), não conseguiu identificar nenhuma assinatura com dano nos respectivos intervalos analisados do PZT 11, ocorrendo o erro de falso negativo.

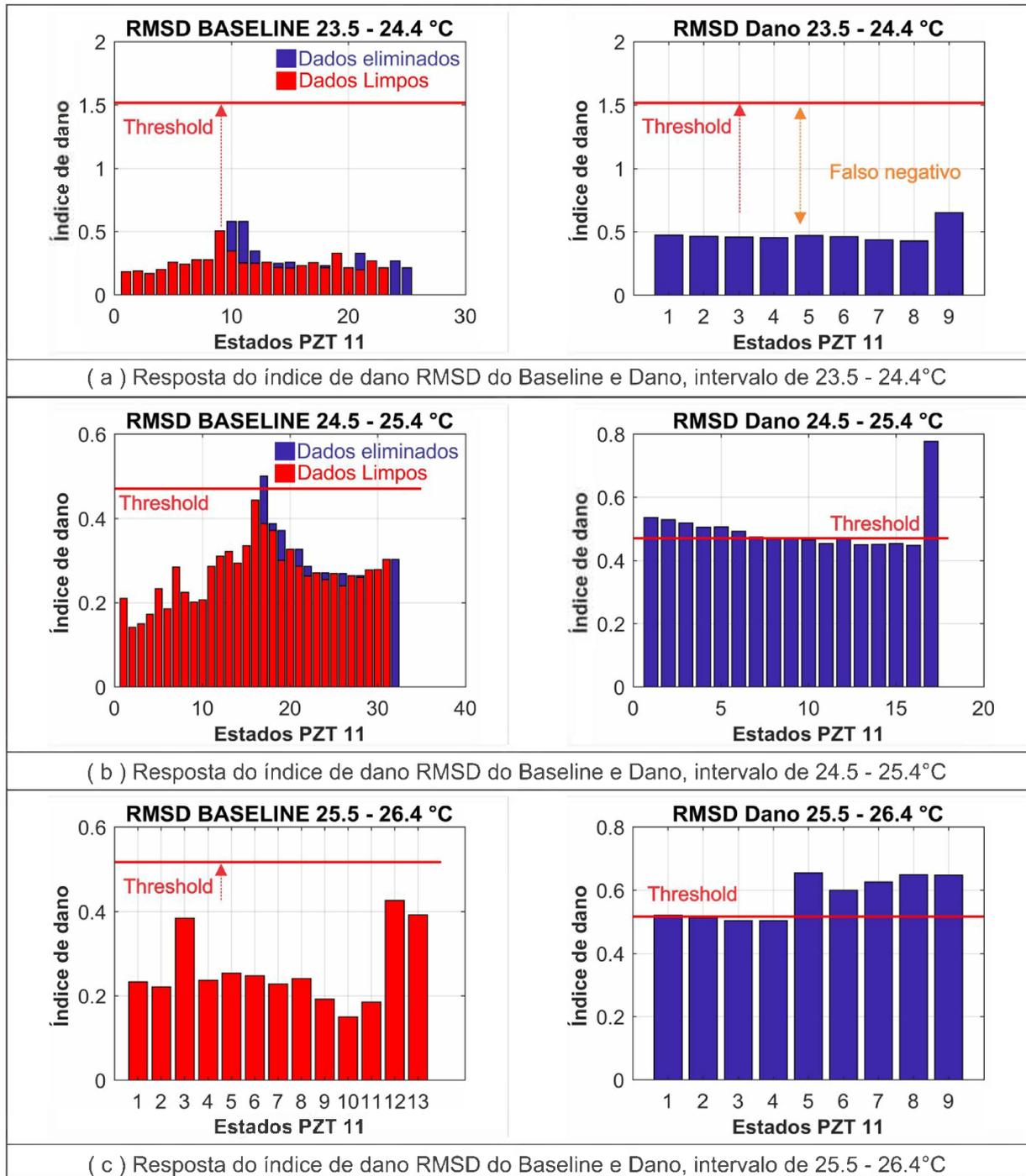


Figura 6.2 - RMSD baseline e dano PZT 11 (a) 23.5-24.4°C, (b) 24.5-25.4°C e (c) 25.5-26.4°C. Fonte:

Elaborado pelo autor.

Nota-se na Fig. 6.2 (a) que no intervalo de 23.5-24.4°C o limiar de detecção não foi eficaz na identificação do dano, causando um falso negativo. E nos intervalos 24.5-25.4°C, Fig.6.2 (b) e 25.5-26.4°C, Fig.6.2 (c), houve a detecção parcial de dano em algumas IS. Pode-se identificar que no *Baseline* do intervalo de 24.5-25.4°C o critério de rejeição foi efetivo na eliminação de um valor duvidoso que causaria um falso positivo.

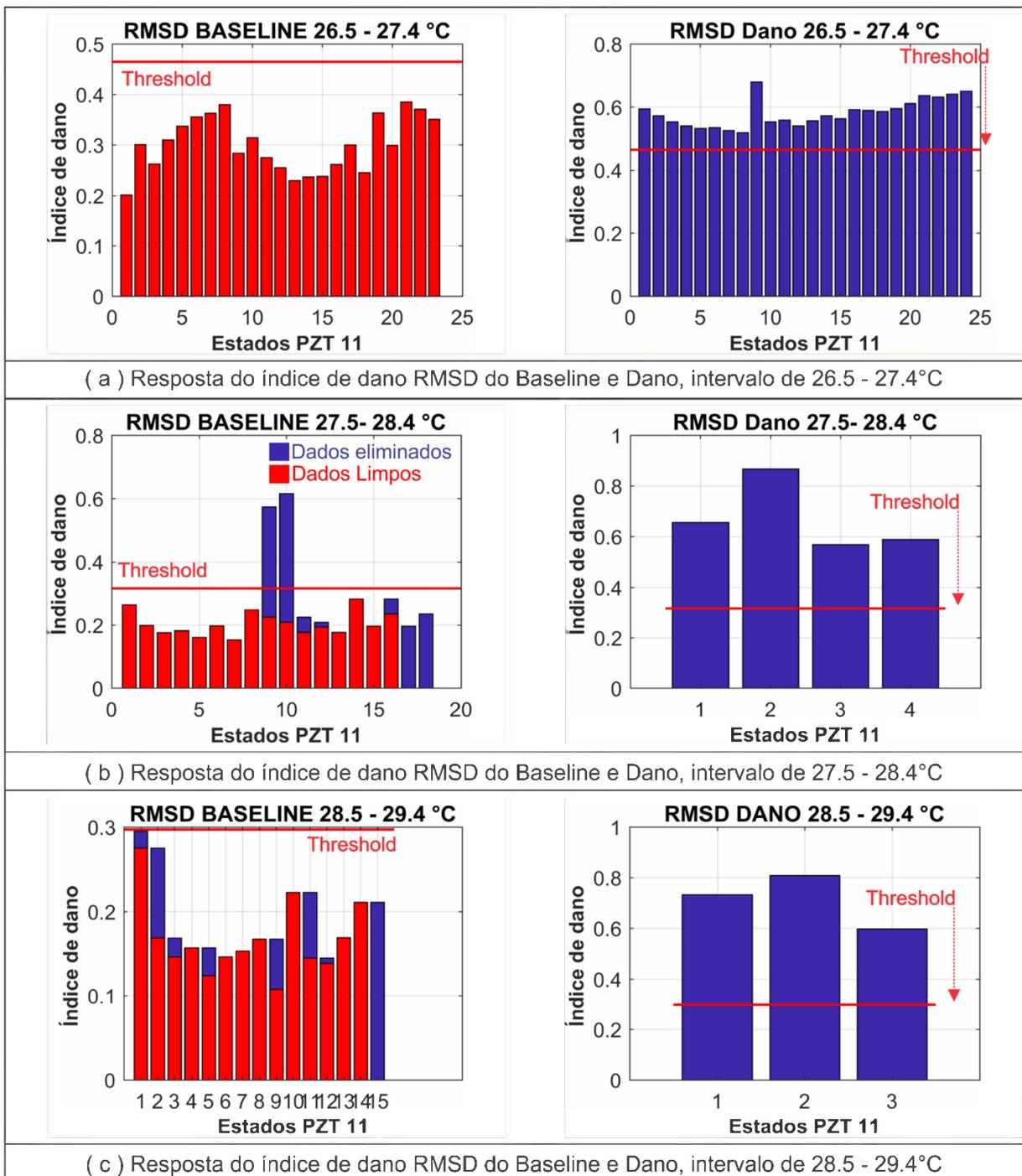


Figura 6.3 - RMSD baseline e dano PZT 11 (a) 26.5-27.4°C, (b) 27.5-28.4°C e (c) 28.5-29.4°C. Fonte: Elaborado pelo autor.

Verifica-se na Figura 6.3 nos respectivos intervalos, que todas as IS com dano foram identificadas pelo limiar de detecção (Threshold). No intervalo de 27.5-28.4°C pode-se visualizar que duas IS que poderiam ser identificados como falsos positivos, sinalizadas em azul foram eliminadas pelo critério de rejeição.

Nas Figura 6.4, Figura 6.5 e Figura 6.6 são demonstrados os resultados para o PZT 12 no intervalo de 1°C

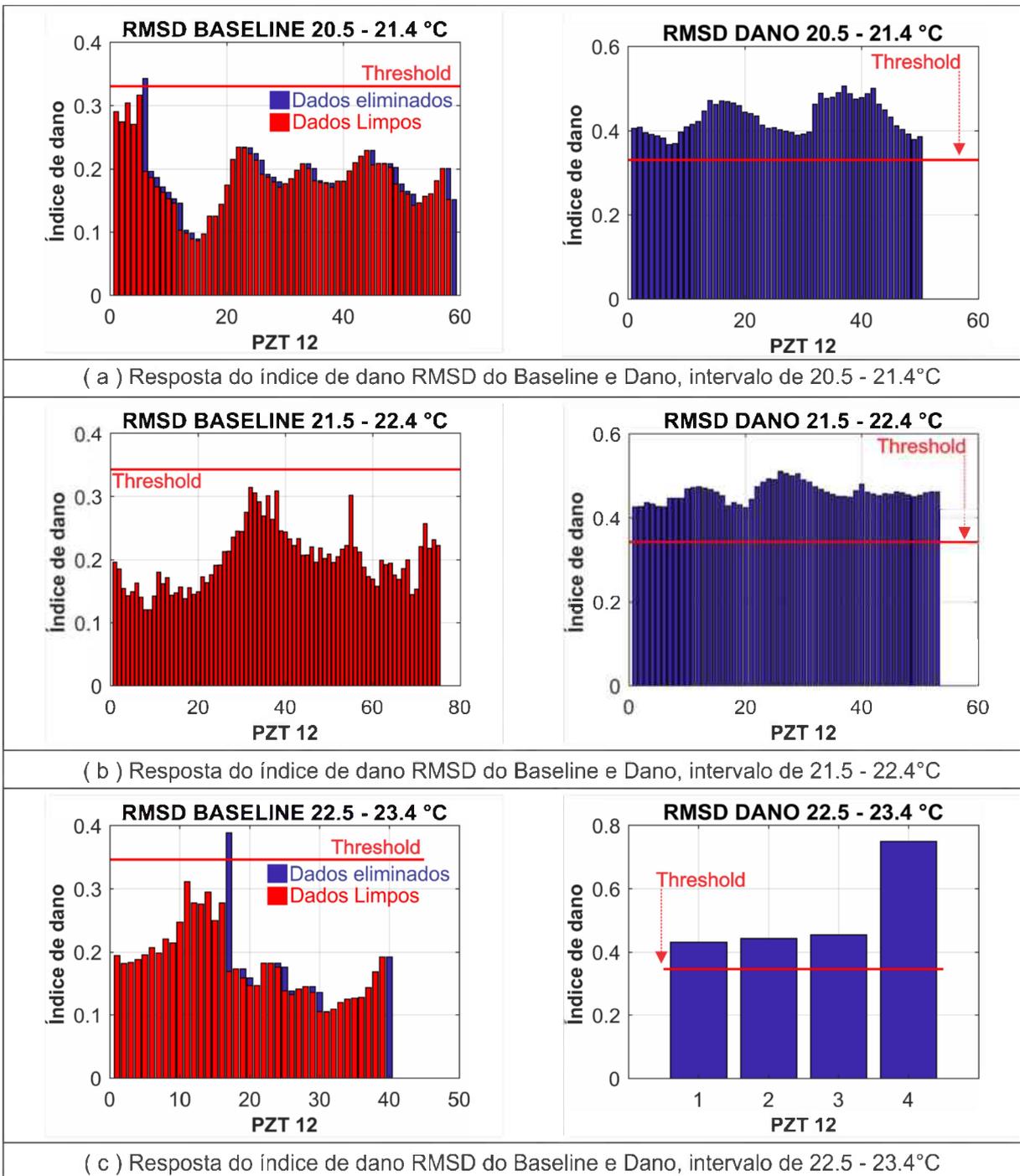


Figura 6.4 - RMSD baseline e dano PZT 12 (a) 20.5-21.4°C, (b) 21.5-22.4°C e (c) 22.5-23.4°C. Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se que nos intervalos de 20.5-21.4°C, 21.5-22.4°C e 22.5-23.4°C do PZT 12 Fig. 6.4, que o limiar de detecção obteve êxito na identificação das IS com dano. E nos intervalos de 20.5-21.4°C e 21.5-22.4°C o critério de rejeição foi crucial, eliminando dados que causariam erros de falso positivo.

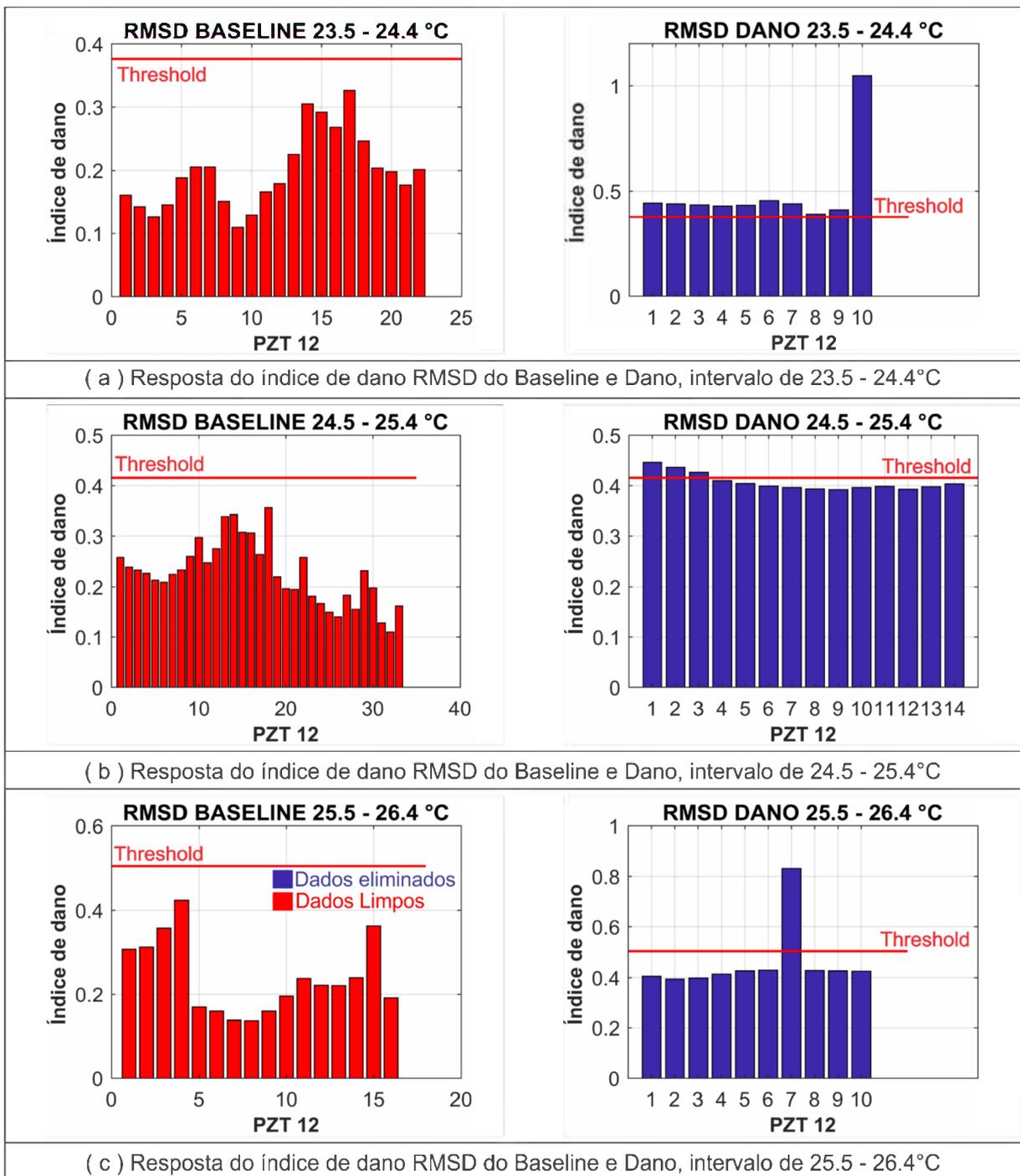


Figura 6.5 - RMSD baseline e dano PZT 12 (a) 23.5-24.4°C, (b) 24.5-25.4°C e (c) 25.5-26.4°C. Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 6.5 somente no intervalo de 23.5-24.4°C o limiar de detecção atingiu seu objetivo na detecção das IS com dano. No intervalo de 24.5-24.4°C ocorreu o erro de falso negativo e apenas três IS foram apontadas como dano.

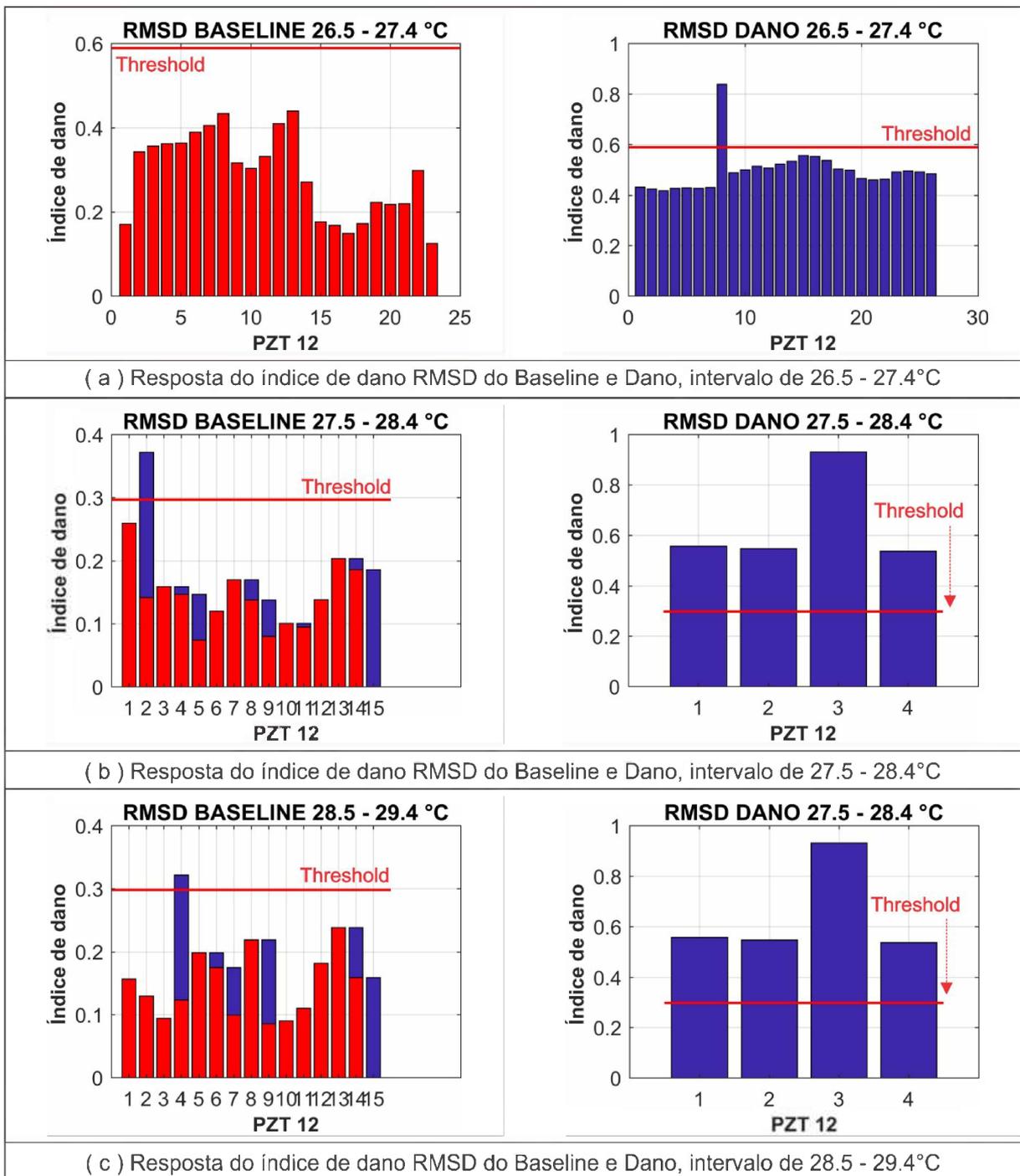


Figura 6.6 - RMSD baseline e dano PZT 12 (a) 26.5-27.4°C, (b) 27.5-28.4°C e (c) 28.5-29.4°C. Fonte: Elaborado pelo autor.

Constata-se na Figura 6.6 no intervalo de 26.5-27.4°C apenas uma assinatura foi identificada com dano, sinalizando o erro de falso negativo nas demais IS. Nos intervalos de 27.5-28.4°C e 28.5-29.4°C as IS com dano foram identificadas pelo limiar de detecção (Threshold).

Na Figura 6.7, Figura 6.8 e Figura 6.9 são demonstrados os resultados para o intervalo de 3°C, 20.5-23.5°C, 23.6-26.6°C e 26.7-29.7°C do PZT11.

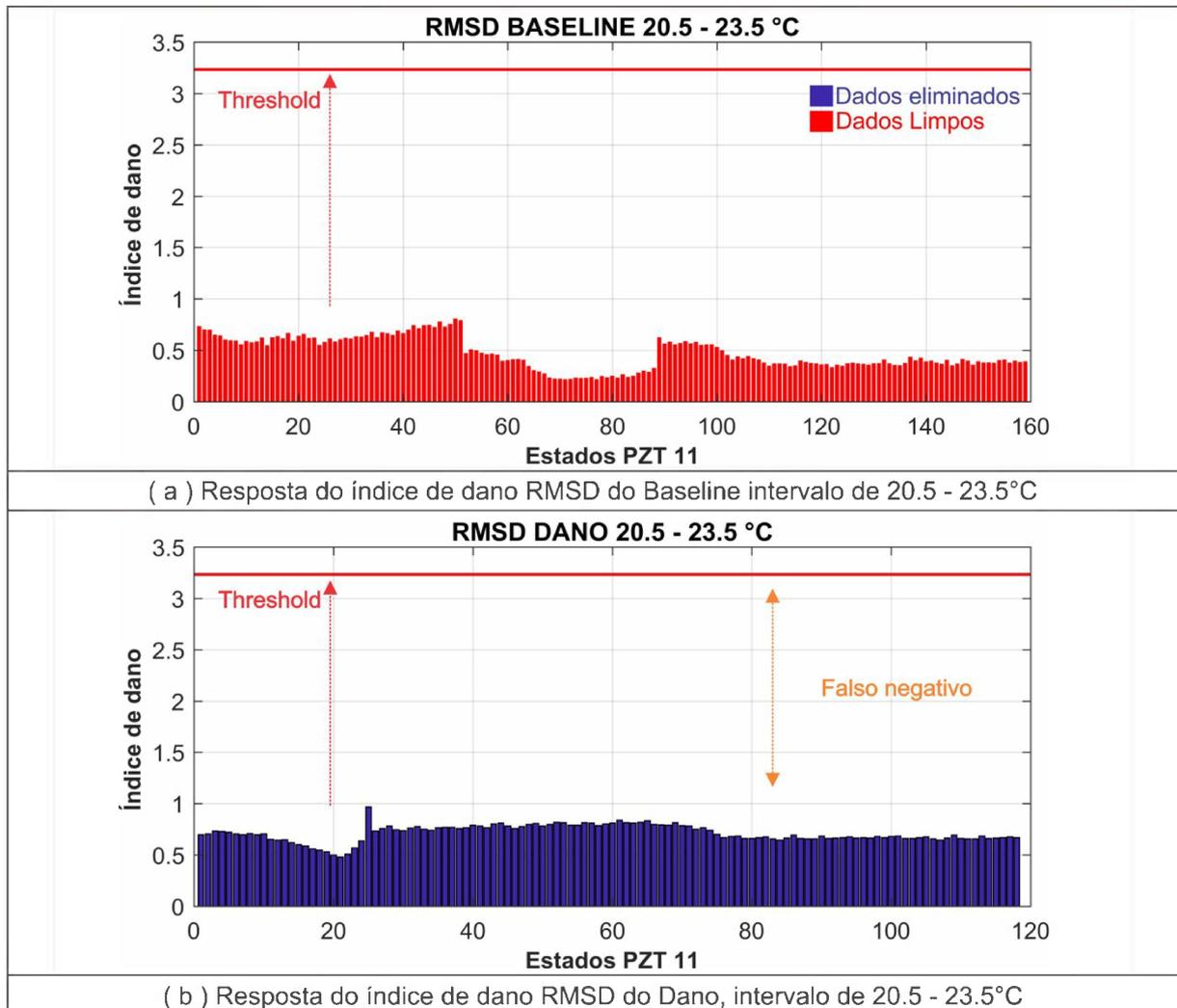


Figura 6.7 - RMSD baseline e dano PZT 11, agrupamento de 20.5°-23.5°C. Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota-se que o que no intervalo de 20.5-23.5°C houve a ocorrência do erro falso negativo, onde nenhum IS com dano foi identificado através do limiar de detecção.

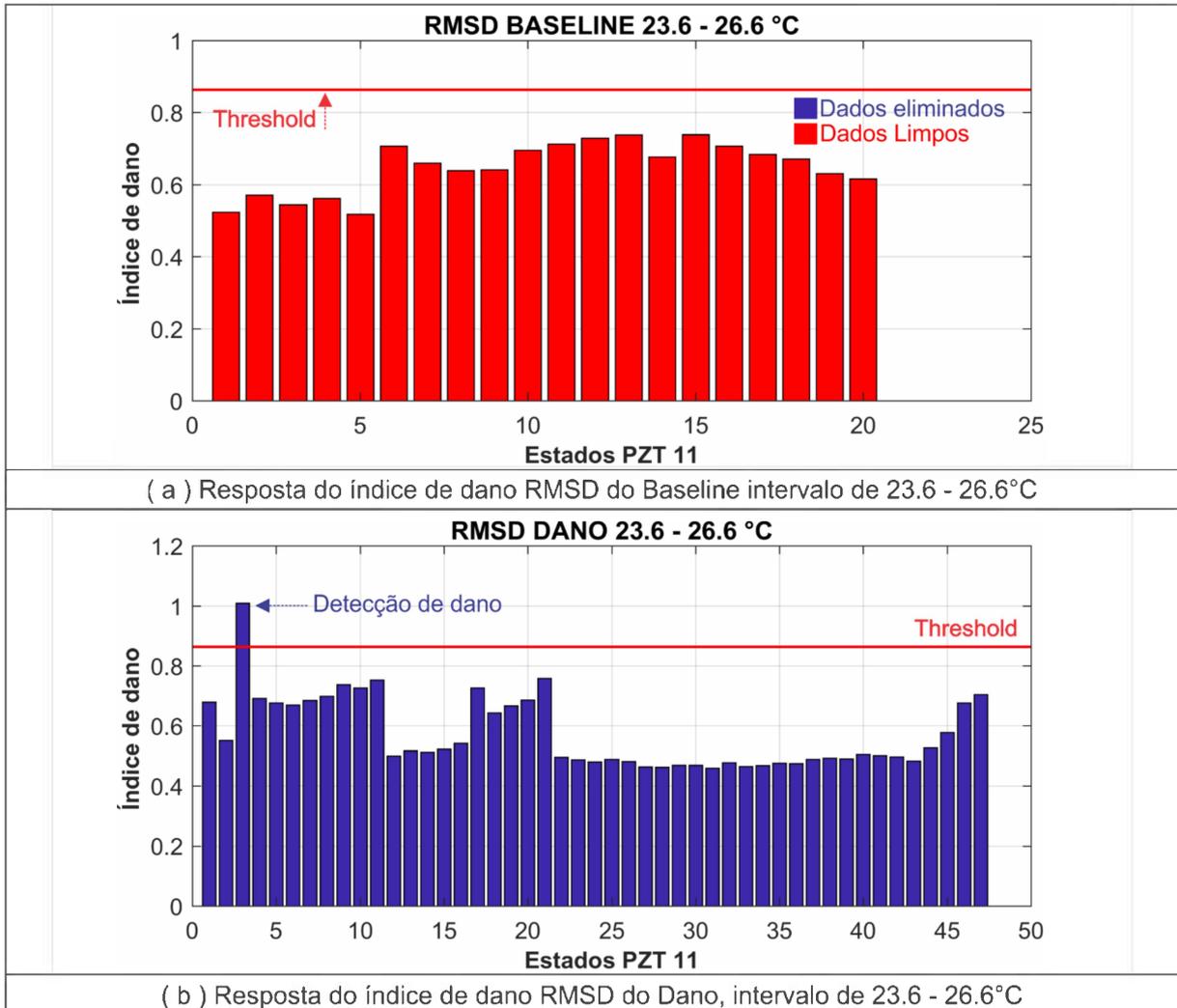


Figura 6.8 - RMSD baseline e dano PZT 11, agrupamento de 23.6°-26.6°C. Fonte: Elaborado pelo autor.

No intervalo de 23.6-26.6°C pode-se visualizar na Fig. 6.8 que apenas uma IS foi identificada pelo limiar de detecção, ocorrendo também o erro de falso negativo nas demais assinaturas.

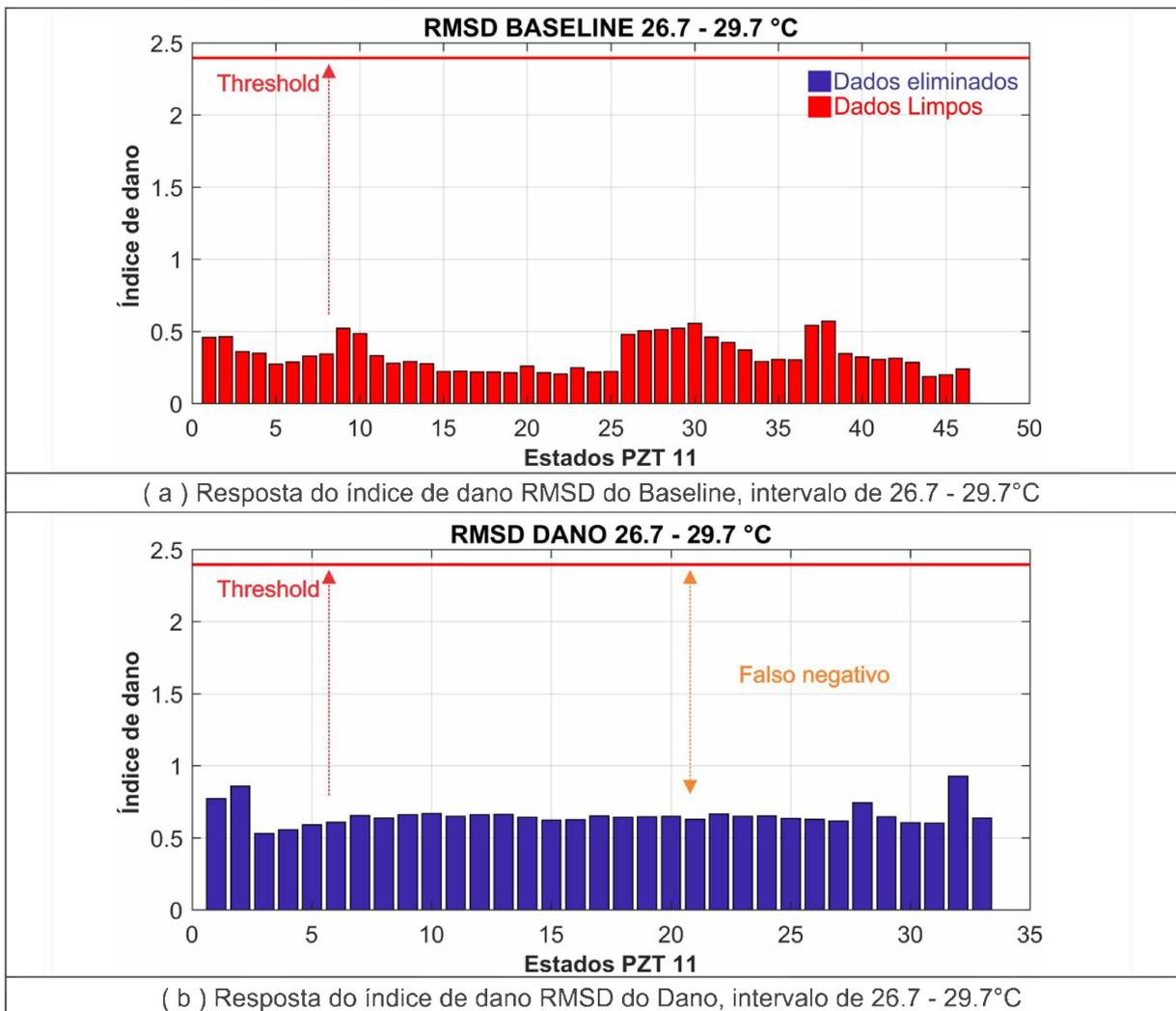


Figura 6.9 - RMSD baseline e dano PZT 11, agrupamento de 26.7°-29.7°C. Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 6.9 como nos demais intervalos houve a ocorrência do erro de falso negativo para o PZT 11.

Nas Figura 6.10, Figura 6.11 e Figura 6.12 são demonstrados os resultados para o intervalo de 3°C, 20.5-23.5°C, 23.6-26.6°C e 26.7-29.7°C do PZT12.

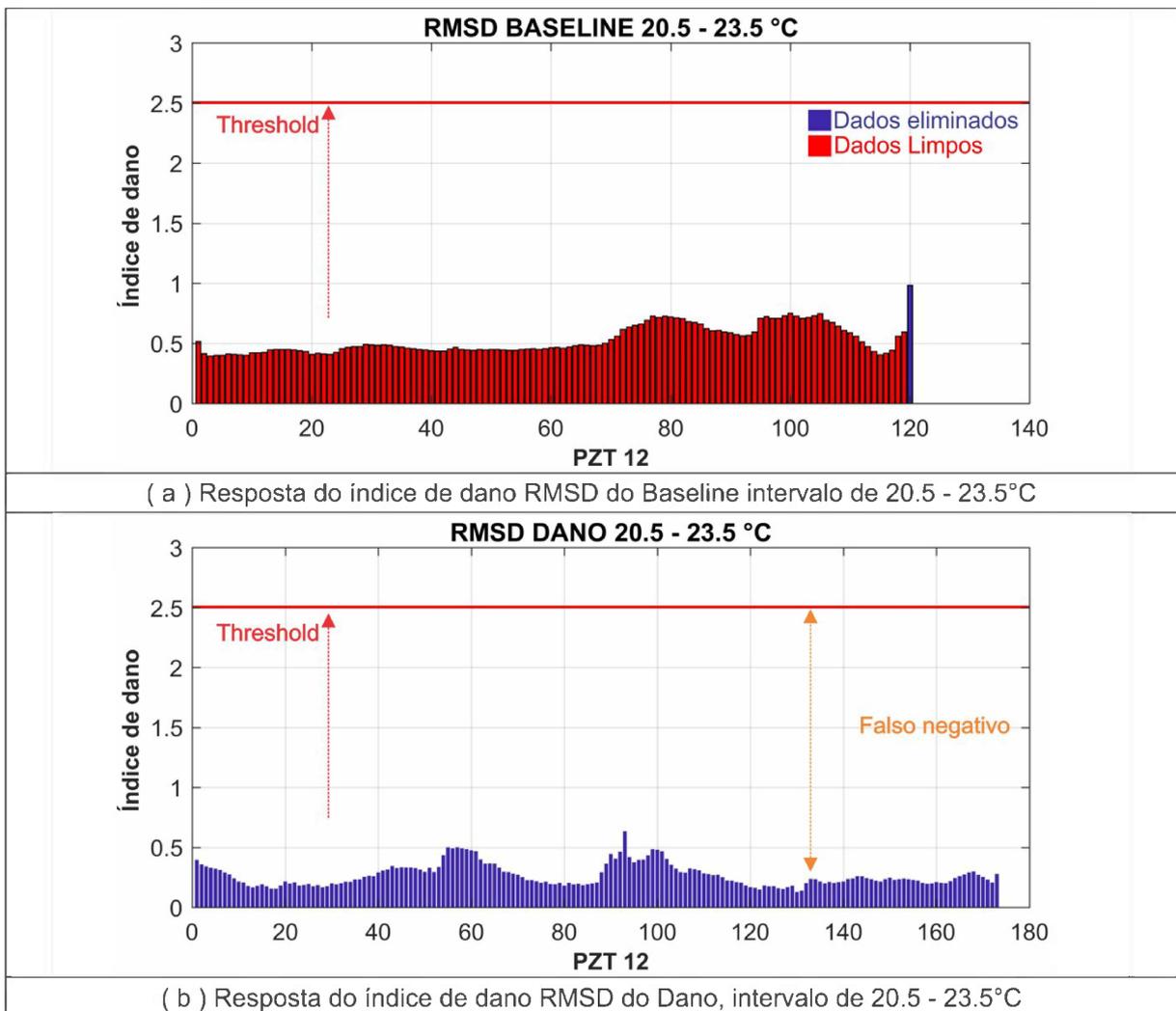


Figura 6.10 - RMSD baseline e dano PZT 12, agrupamento de 20.5°-23.5°C. Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se na Fig. 6.10 que houve novamente ocorrência de falso negativo, o limiar não conseguiu identificar nenhuma assinatura com dano.

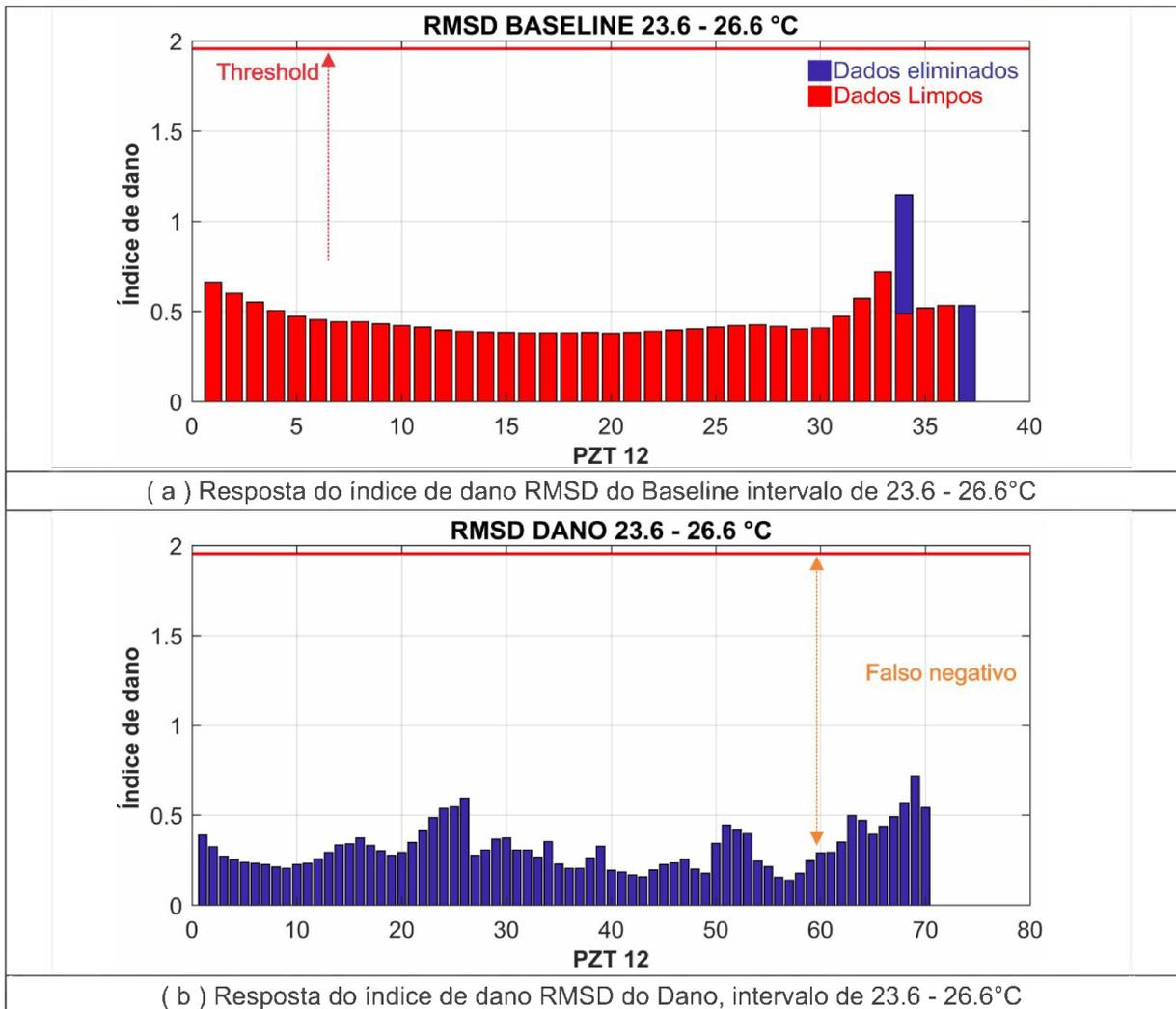


Figura 6.11 - RMSD baseline e dano PZT 12, agrupamento de 23.6°-26.6°C. Fonte: Elaborado pelo autor.

No intervalo de 23.6-26.6°C também houve a ocorrência do erro de falso negativo, o limiar de detecção não obteve sucesso na identificação das IS com dano.

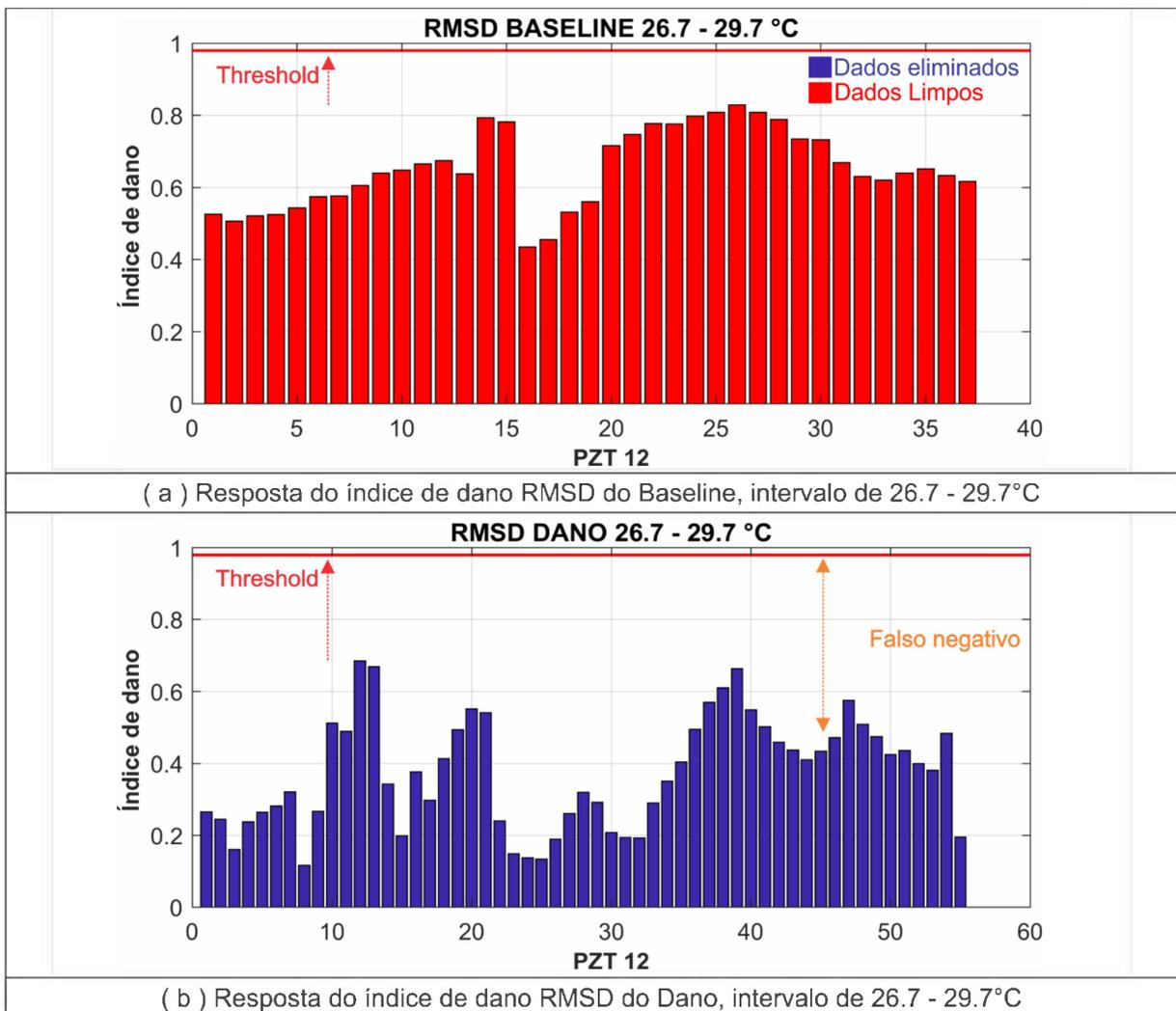


Figura 6.12 - RMSD baseline e dano PZT 12, agrupamento de 26.7°-29.7°C. Fonte: Elaborado pelo autor.

Como observado em todos os intervalos de 3°C para ambos os PZT's o limiar de detecção não foi efetivo na identificação das IS com dano.

6.2.2. Resultados aplicando a métrica CCD

A seguir são demonstrados os resultados da métrica CCD. Nas Fig. 6.13, Fig. 6.14, Fig. 6.15, Fig. 6.16, Fig. 6.17 e Fig. 6.20 podem ser observados os resultados para o intervalo de 1°C. Já nas Fig. 6.21, Fig. 6.22, Fig. 6.23, Fig. 6.24, Fig. 6.25 e Fig. 6.26, para o intervalo de 3°C, nos dois casos para ambos os PZT's.

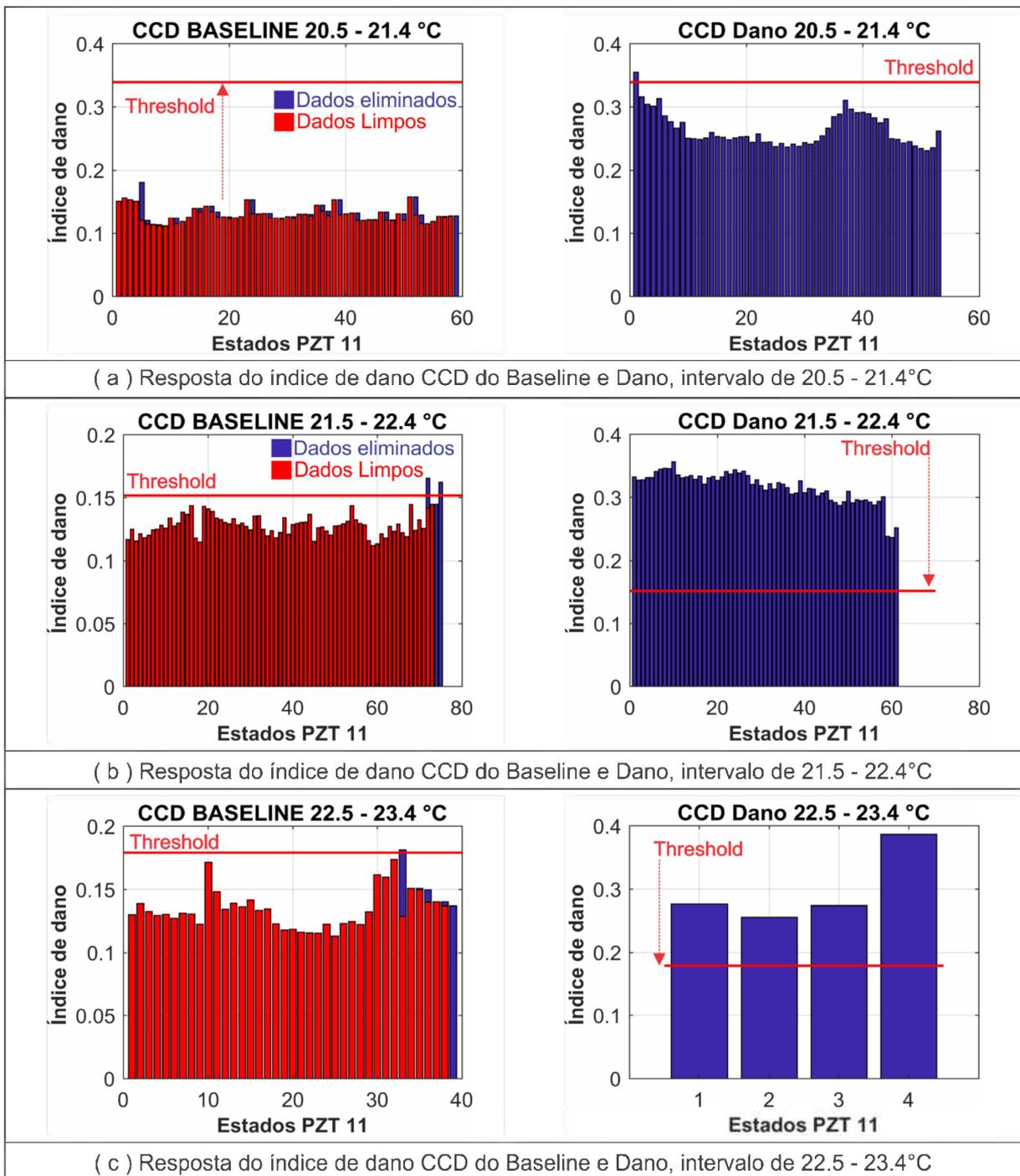


Figura 6.13 - CCD baseline e dano PZT 11 (a) 20.5-21.4°C, (b) 21.5-22.4°C e (c) 22.5-23.4°C. Fonte: Elaborado pelo autor.

Como observado na Figura 6.13 no intervalo de 20.5-21.4°C houve erro de falso negativo na identificação das IS com dano. Porém nos intervalos de 21.5-22.4°C e 22.5-23.4°C o limiar de detecção identificou todas as IS com dano.

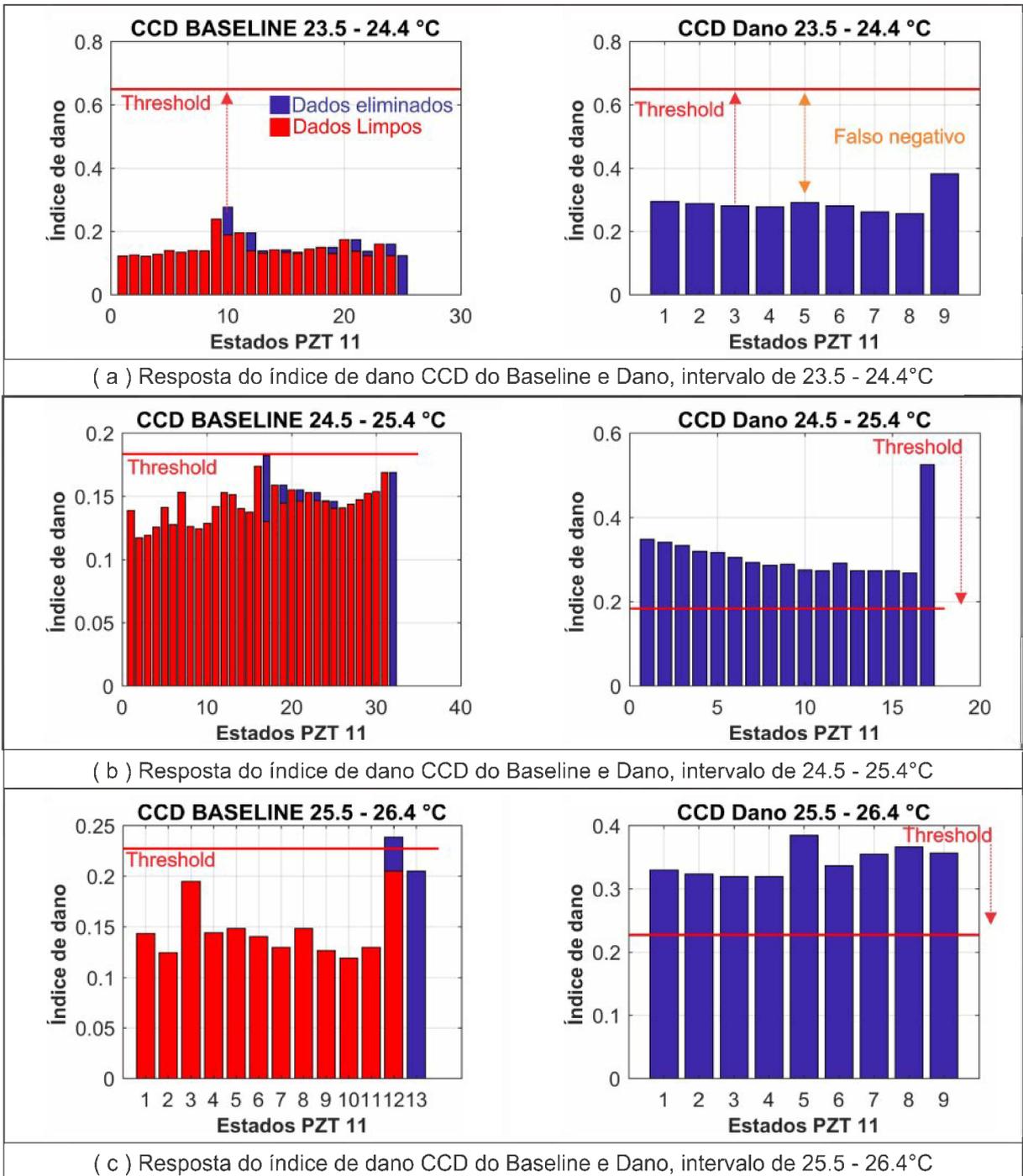


Figura 6.14 - CCD baseline e dano PZT 11 (a) 23.5-24.4°C, (b) 24.5-25.4°C e (c) 25.5-26.4°C. Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 6.14 no intervalo de 23.5-24.4°C ocorreu o erro de falso negativo, onde nenhum IS com dano foi identificado. E nos intervalos de 24.5-25.4°C e 25.5-26.4°C o limiar

de detecção obteve sucesso identificando as IS com dano. Vale ressaltar que o critério de rejeição dos valores duvidosos evitou a ocorrência de um falso positivo no intervalo de 25.5-26.4°C.

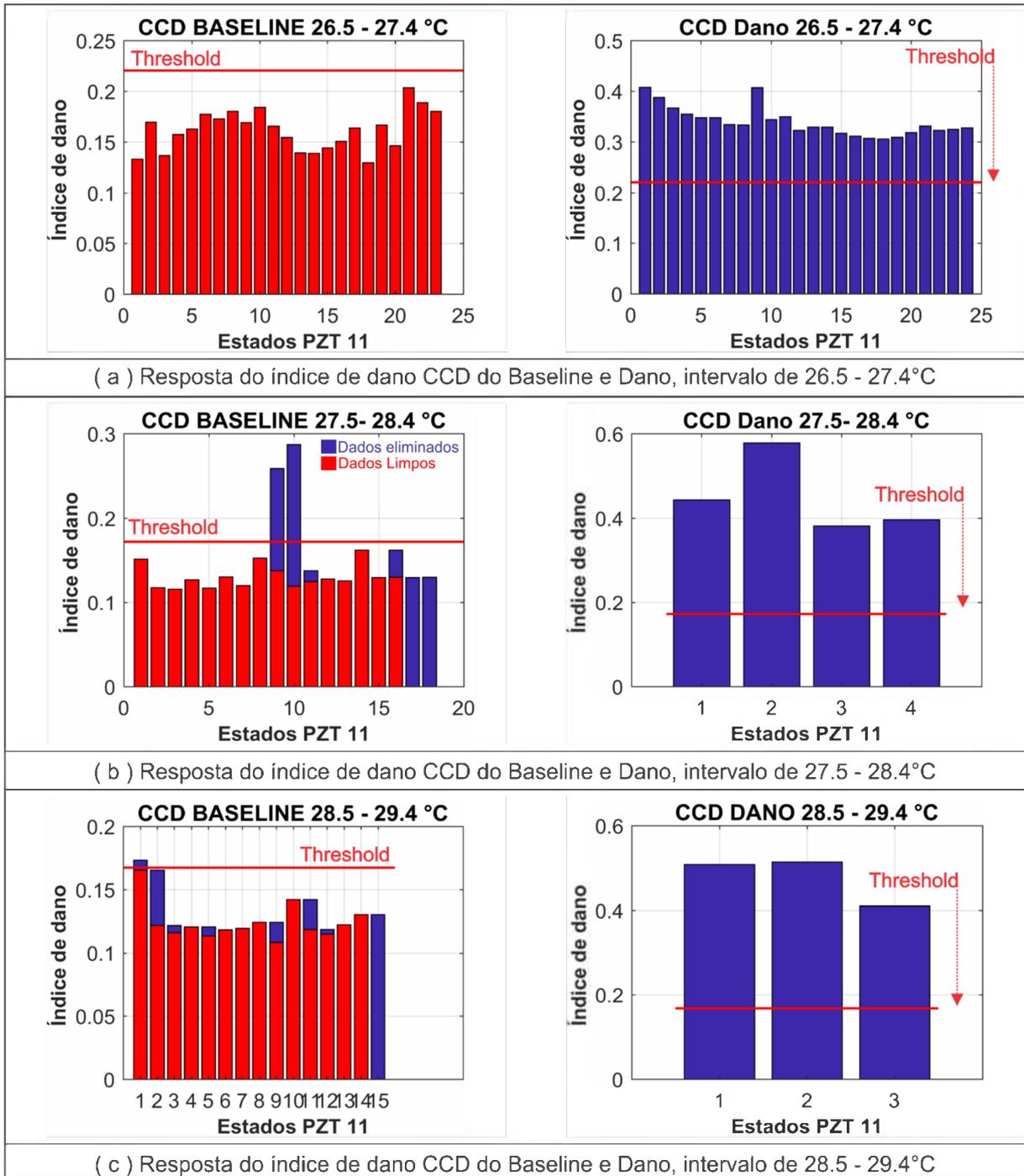


Figura 6.15 - CCD baseline e dano PZT 11 (a) 26.5-27.4°C, (b) 27.5-28.4°C e (c) 28.5-29.4°C. Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se que o limiar de detecção obteve sucesso no reconhecimento de todas as IS com dano ilustrado na Fig. 6.15, e o critério de rejeição impediu a ocorrência de falsos positivos como visto na Fig. 6.15(b) e Fig. 6.15 (c) ilustrado em azul.

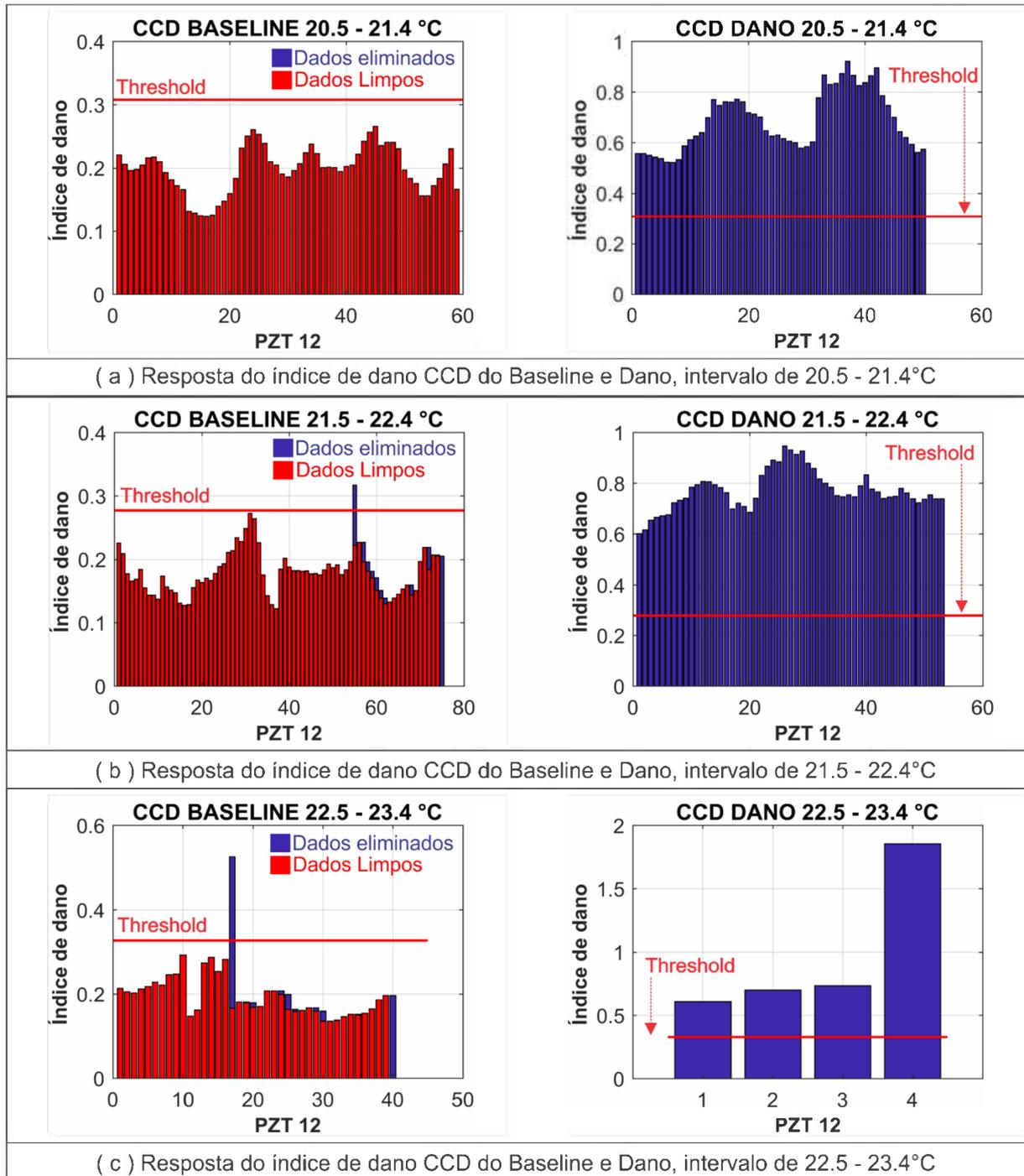


Figura 6.16 - CCD baseline e dano PZT 12 (a) 20.5-21.4°C, (b) 21.5-22.4°C e (c) 22.5-23.4°C. Fonte:

Elaborado pelo autor.

Para o PZT 12 em todos os intervalos de temperatura o limiar de detecção atingiu o objetivo de reconhecer todas as IS com dano. Nos intervalos de 21.5-22.4°C e 22.5-23.4°C pode-se visualizar que o critério de Chauvenet eliminou ocorrências de falsos positivos.

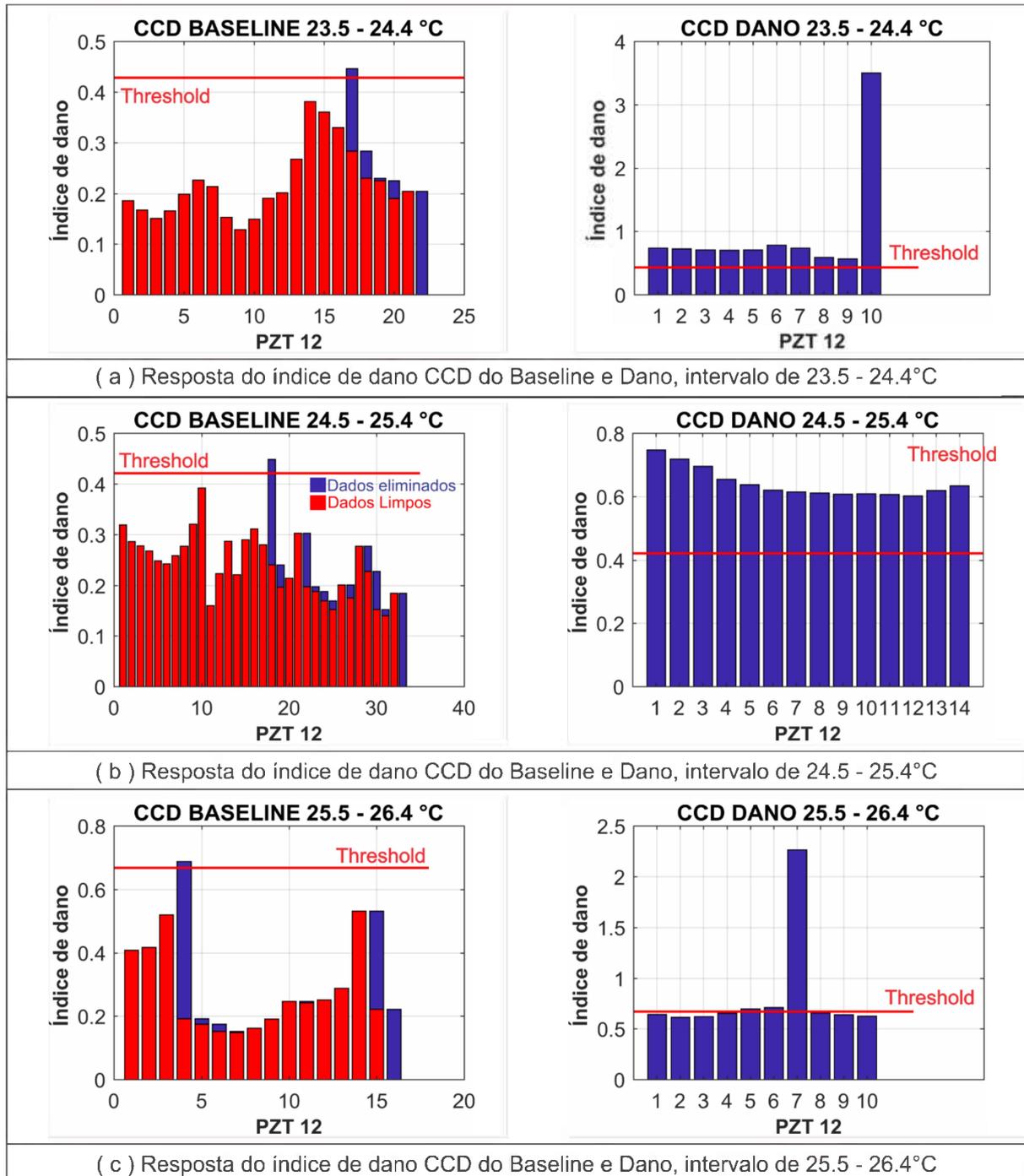


Figura 6.17 - CCD baseline e dano PZT 12 (a) 23.5-24.4°C, (b) 24.5-25.4°C e (c) 25.5-26.4°C. Fonte:

Elaborado pelo autor.

Na Figura 6.17 somente no intervalo de 25.5-26.4°C o limiar de detecção identificou parcialmente as IS com dano. Nos outros intervalos os danos foram identificados.

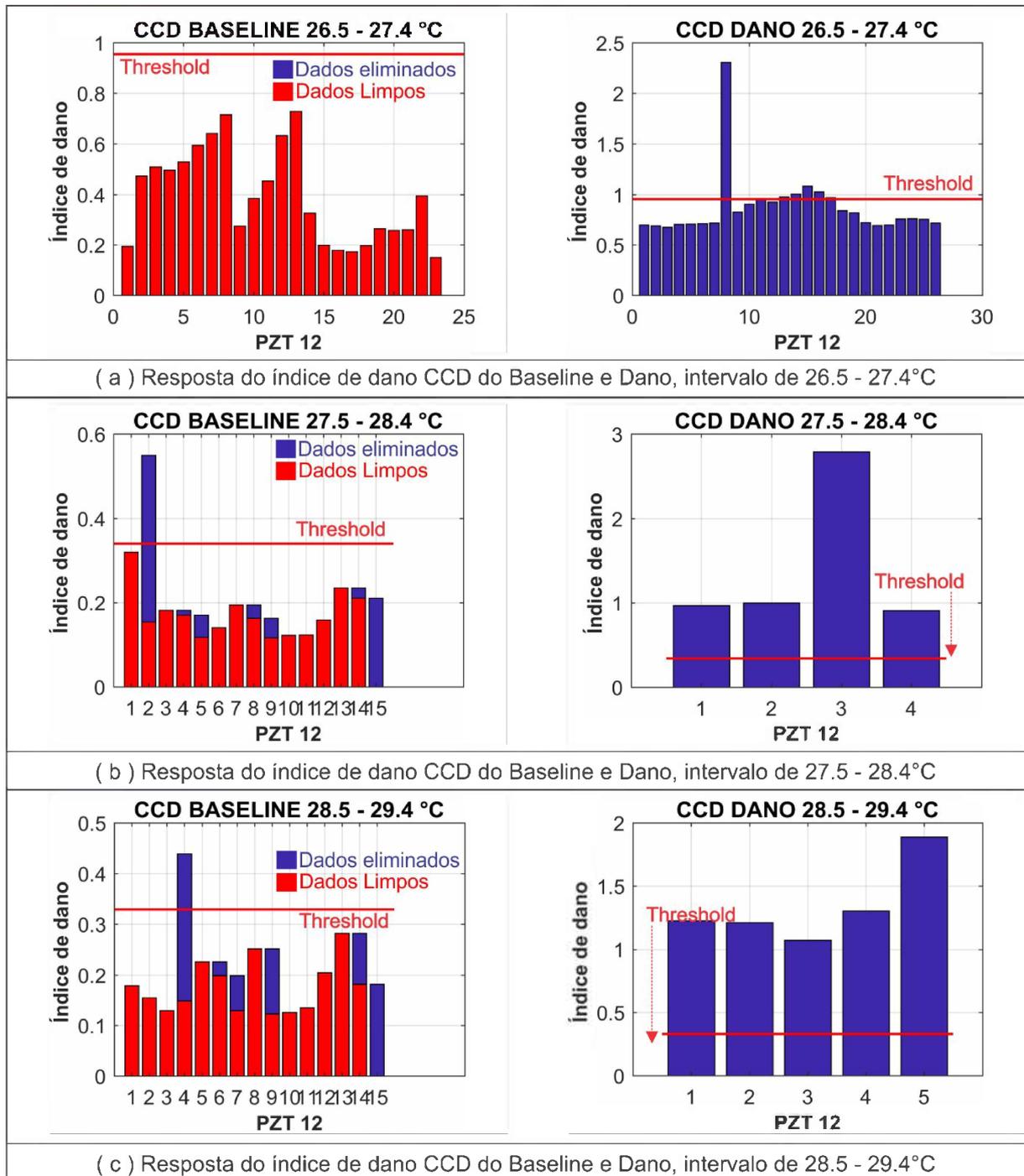


Figura 6.18 - CCD baseline e dano PZT 12 (a) 26.5-27.4°C, (b) 27.5-28.4°C e (c) 28.5-29.4°C. Fonte:

Elaborado pelo autor.

Nota-se que no intervalo de 26.5-27.4°C as IS com dano foram identificadas parcialmente, e nos intervalos 27.5-28.4°C e 28.5-29.4°C as IS com danos foram identificadas pelo limiar.

Na Figura 6.19, Figura 6.20 e Figura 6.21 são demonstrados os resultados para o intervalo de 3°C, 20.5-23.5°C, 23.6-26.6°C e 26.7-29.7°C do PZT11.

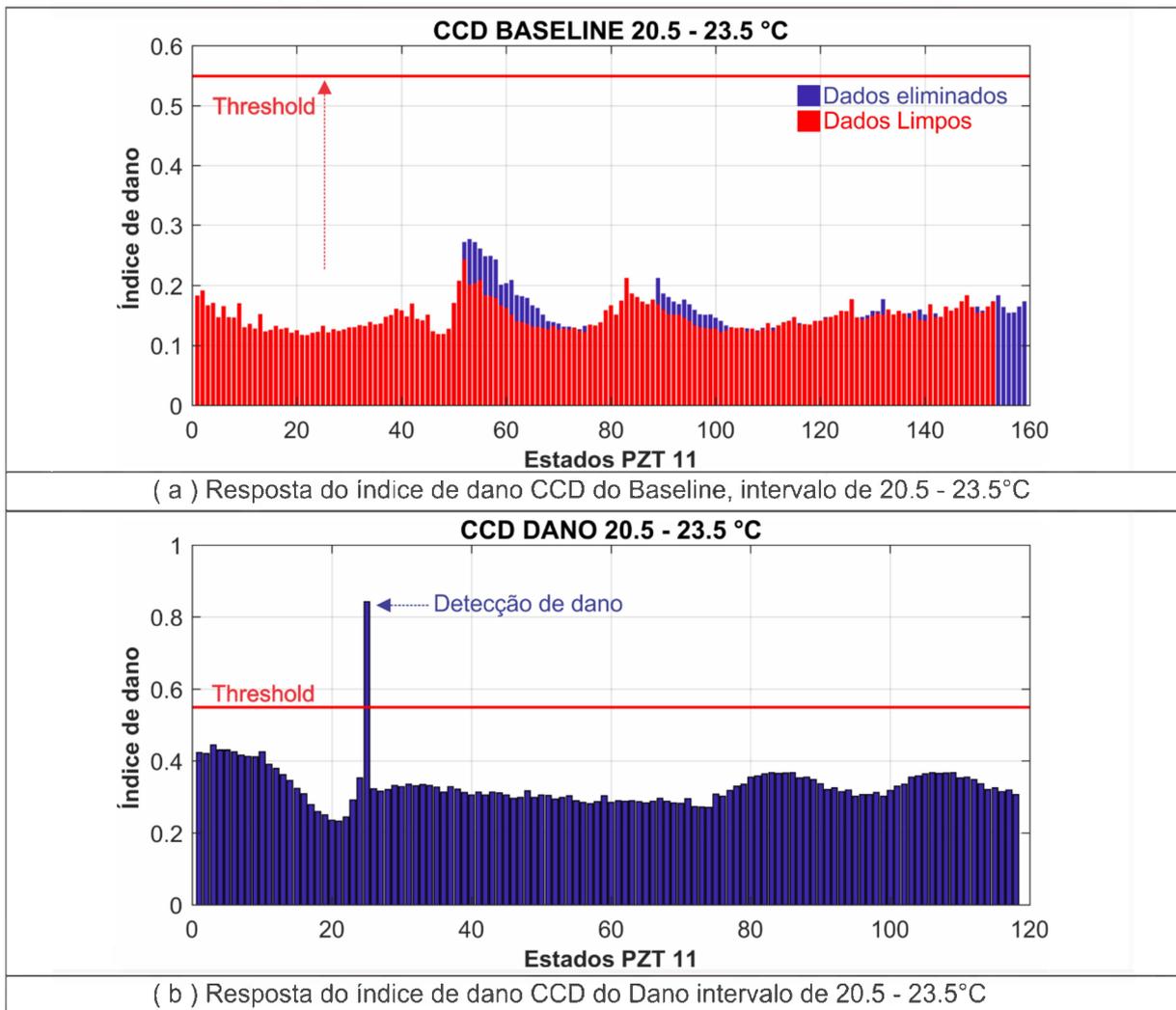


Figura 6.19 – CCD baseline e dano PZT 11, agrupamento de 20.5°-23.5°C. Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota-se que no intervalo de 20.5-23.5°C houve a ocorrência de falso negativo, no entanto somente uma assinatura foi detectada como dano.

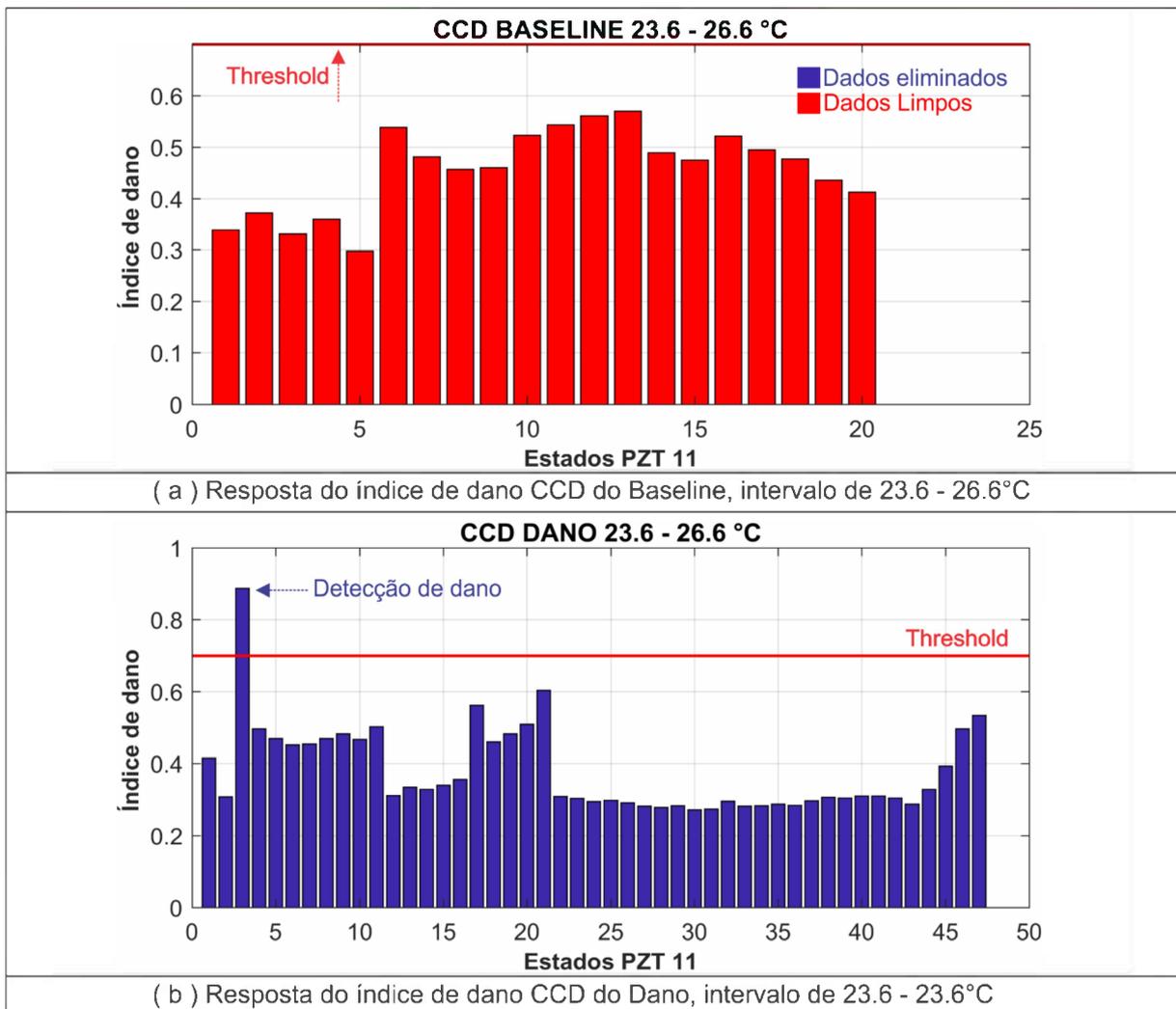


Figura 6.20 - CCD baseline e dano PZT 11, agrupamento de 23.6°-26.6°C. Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se que o que no intervalo de 23.5-26.5°C também houve a ocorrência do erro falso negativo, no entanto somente uma assinatura foi detectado como dano.

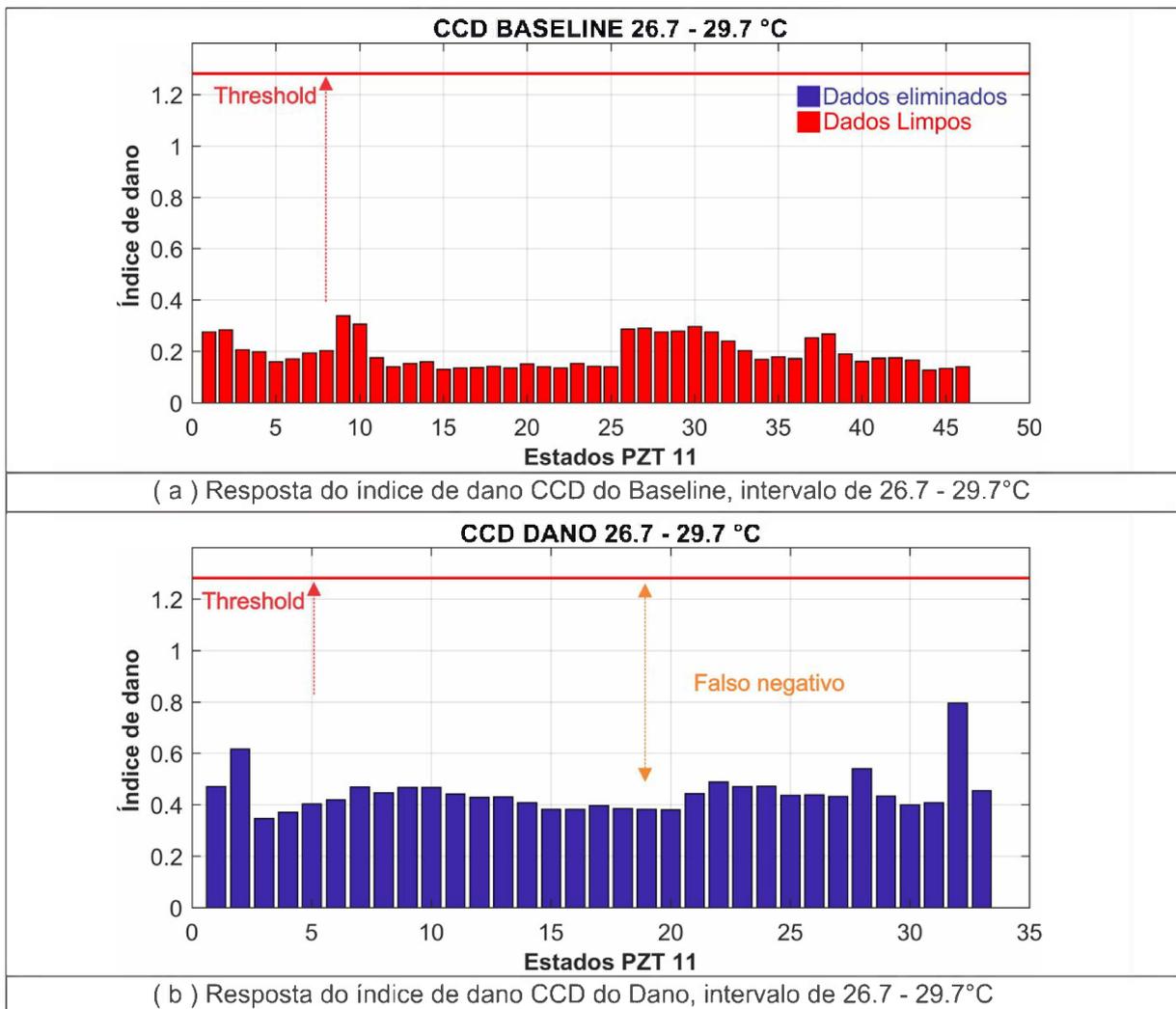


Figura 6.21 - CCD baseline e dano PZT 11, agrupamento de 26.7°-29.7°C. Fonte: Elaborado pelo autor.

Como nas outras ilustrações no intervalo de 3°C, na Fig. 6.21, houve a ocorrência do erro falso negativo, onde nenhum IS com dano foi identificado através do limiar de detecção.

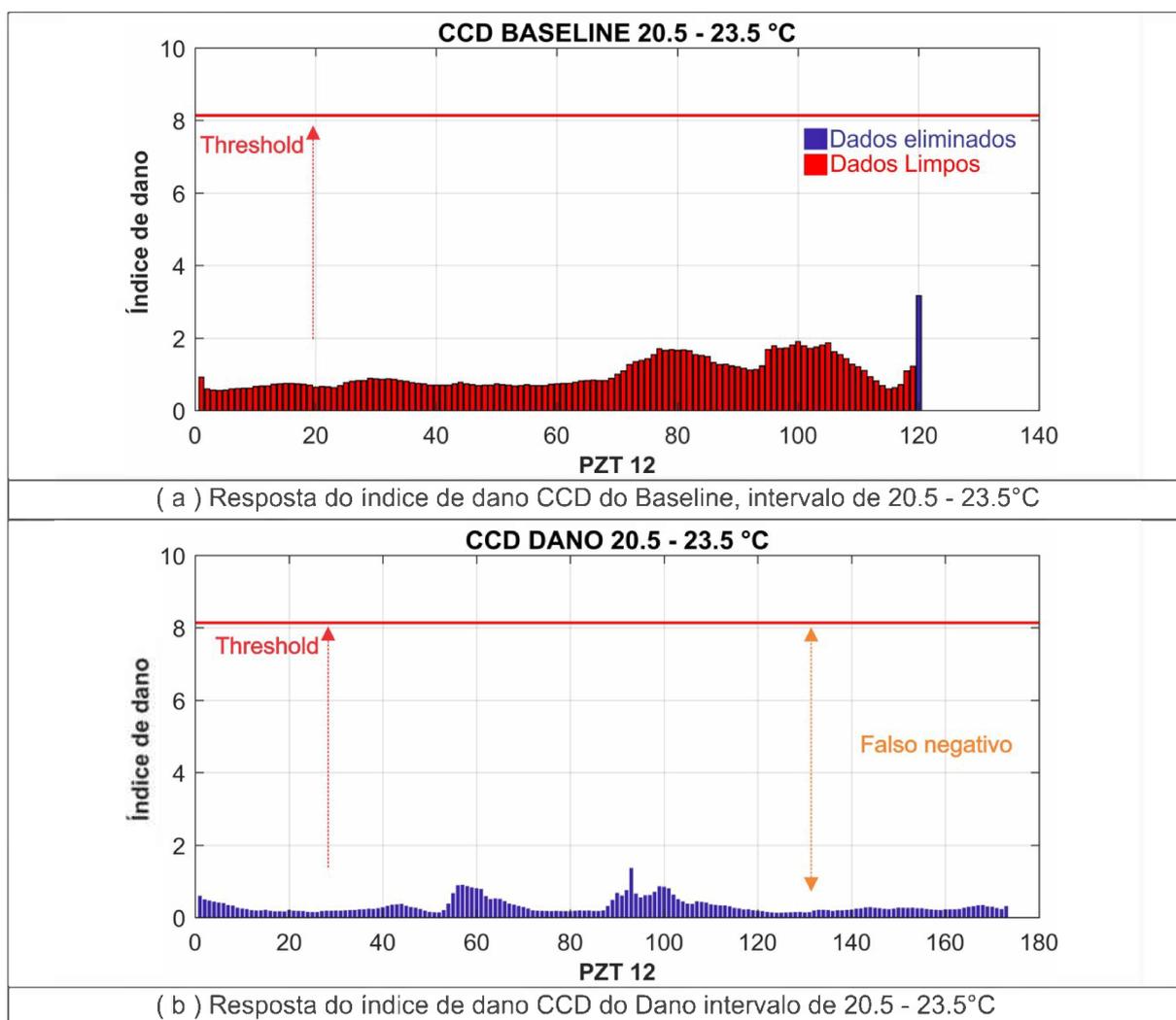


Figura 6.22 - CCD baseline e dano PZT 12, agrupamento de 20.5°-23.5°C. Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se na Figura 6.22 no intervalo de 20.5-23.5°C do PZT 12, houve a ocorrência do erro falso negativo, onde nenhum IS com dano foi identificado através do limiar de detecção.

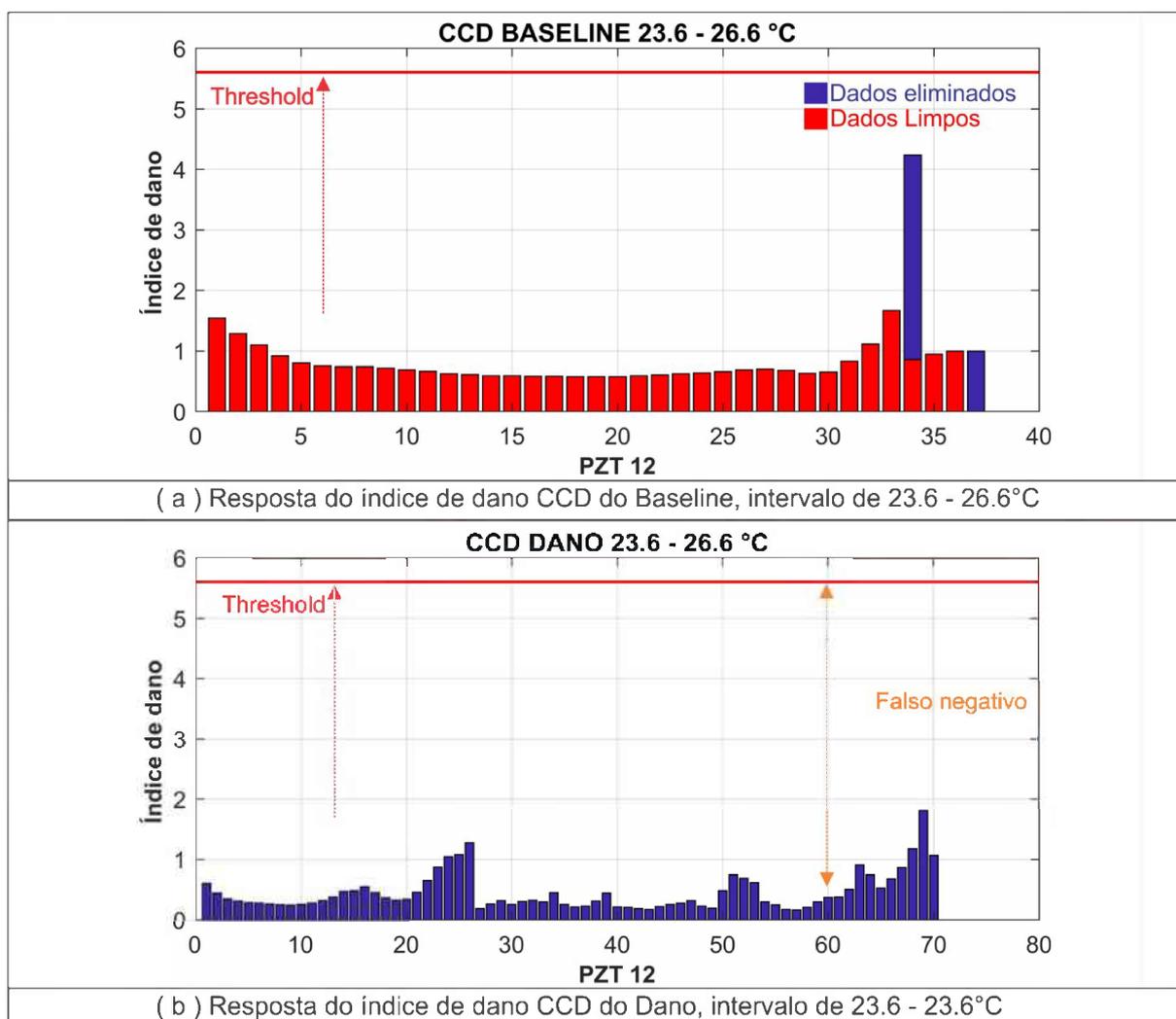


Figura 6.23 - CCD baseline e dano PZT 12, agrupamento de 23.6°-26.6°C. Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 6.23 como está sendo identificado no intervalo de 3°C, o limiar não alcançou seu objetivo na detecção de danos.

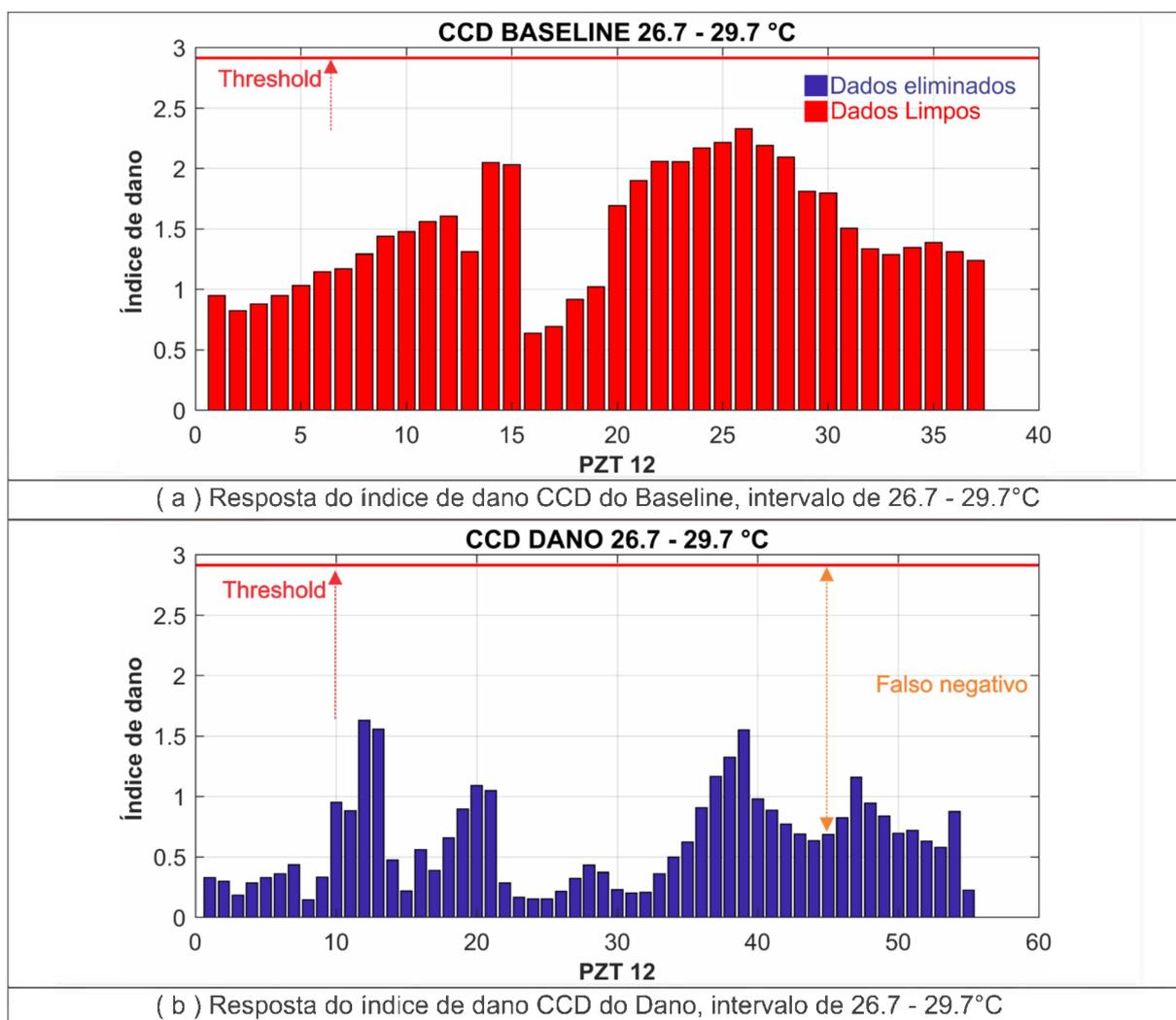


Figura 6.24 - CCD baseline e dano PZT 12, agrupamento de 26.7°-29.7°C. Fonte: Elaborado pelo autor.

No intervalo de 26.7-29.7°C o limiar de detecção como nos demais intervalos não obteve êxito no reconhecimento as IS com dano.

6.2.3. Resultados aplicando a métrica M

A seguir são apresentados os resultados da métrica M. Nas Fig. 6.25, Fig. 5.26, Fig. 5.27, Fig. 5.28, Fig. 5.29 e Fig. 5.30 podem ser observados os resultados para o intervalo de 1°C. Já nas Fig. 5.31, Fig. 5.32, Fig. 5.33, Fig. 5.34, Fig. 5.35 e Fig. 36, para o intervalo de 3°C, novamente para ambos PZT's.

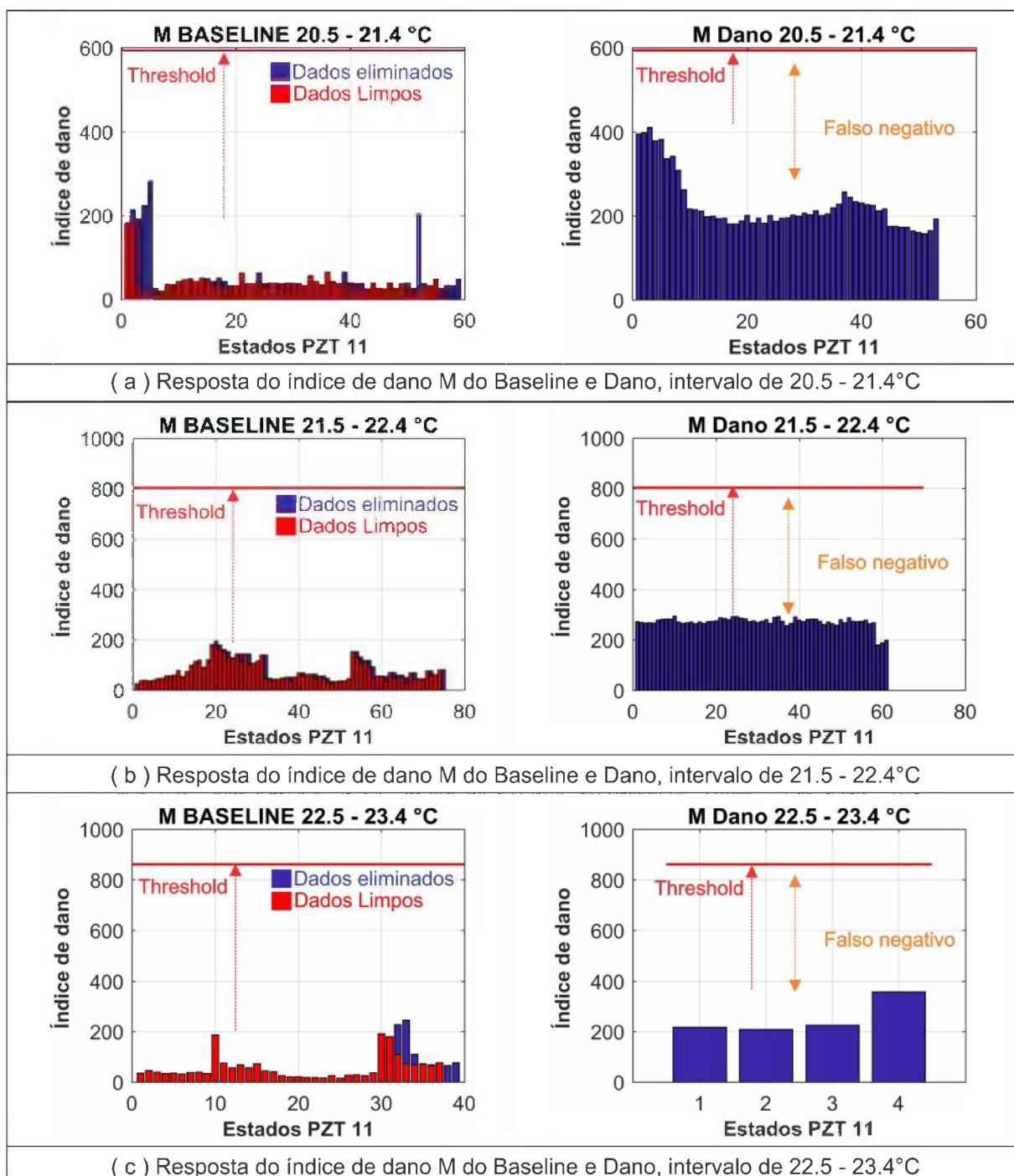


Figura 6.25 - M baseline e dano PZT 11 (a) 20.5-21.4°C, (b) 21.5-22.4°C e (c) 22.5-23.4°C. Fonte:

Elaborado pelo autor.

O PZT 11 o limiar falhou em detectar danos nas assinaturas, ocorrendo o erro do falso negativo como pode-se visualizar Fig.6.25.

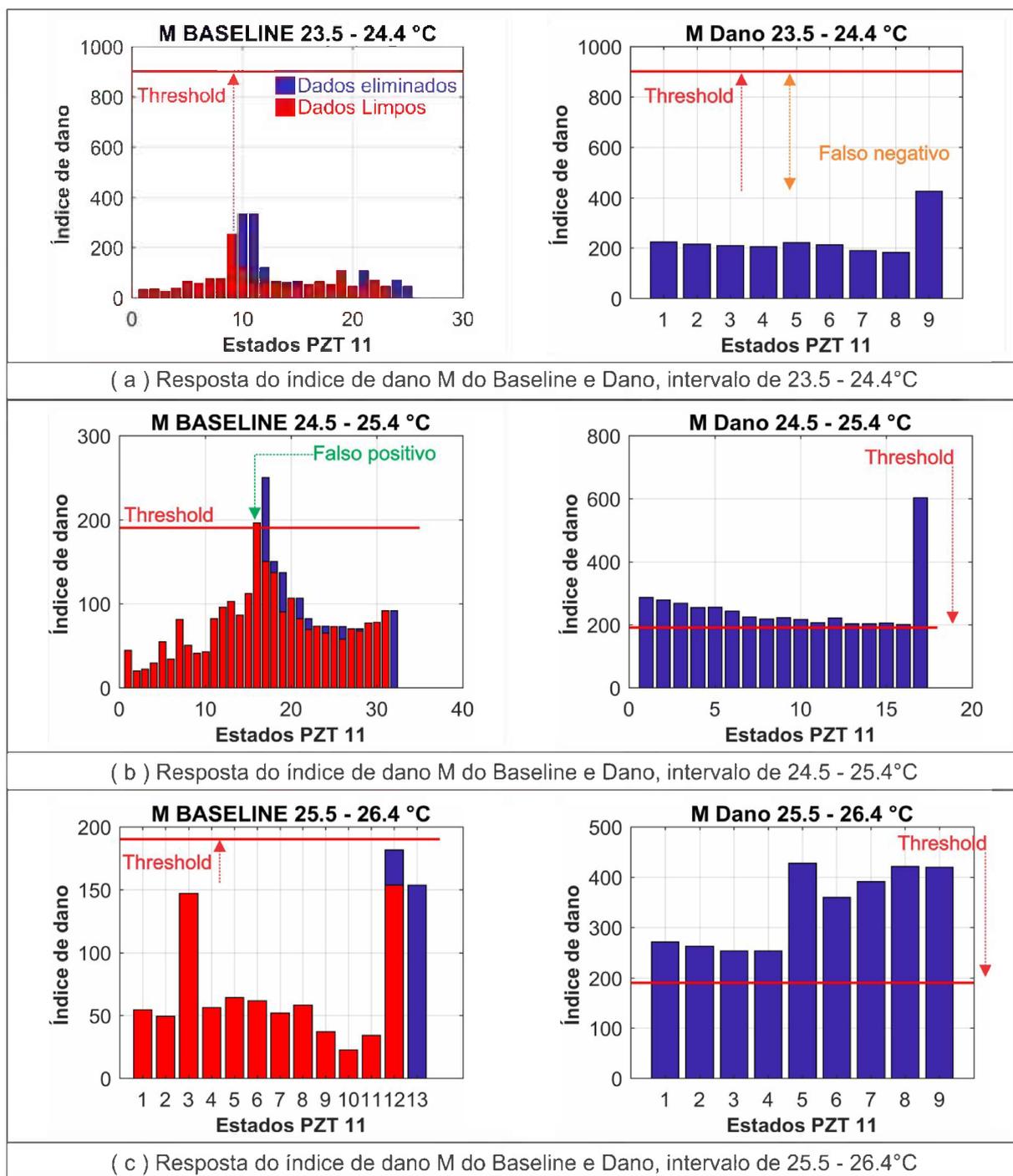


Figura 6.26 – M baseline e dano PZT 11 (a) 23.5-24.4°C, (b) 24.5-25.4°C e (c) 25.5-26.4°C. Fonte:

Elaborado pelo autor.

Na Figura 6.26, pela primeira vez na análise no intervalo de 24.5-25.5°C pode-se identificar o erro de falso positivo na métrica M. Porém o erro não impediu que o limiar identificasse as IS com dano como ocorrido no intervalo de 25.5-26.5°C, no entanto no intervalo de 23.5-24.5°C nenhuma IS com dano foi identificada.

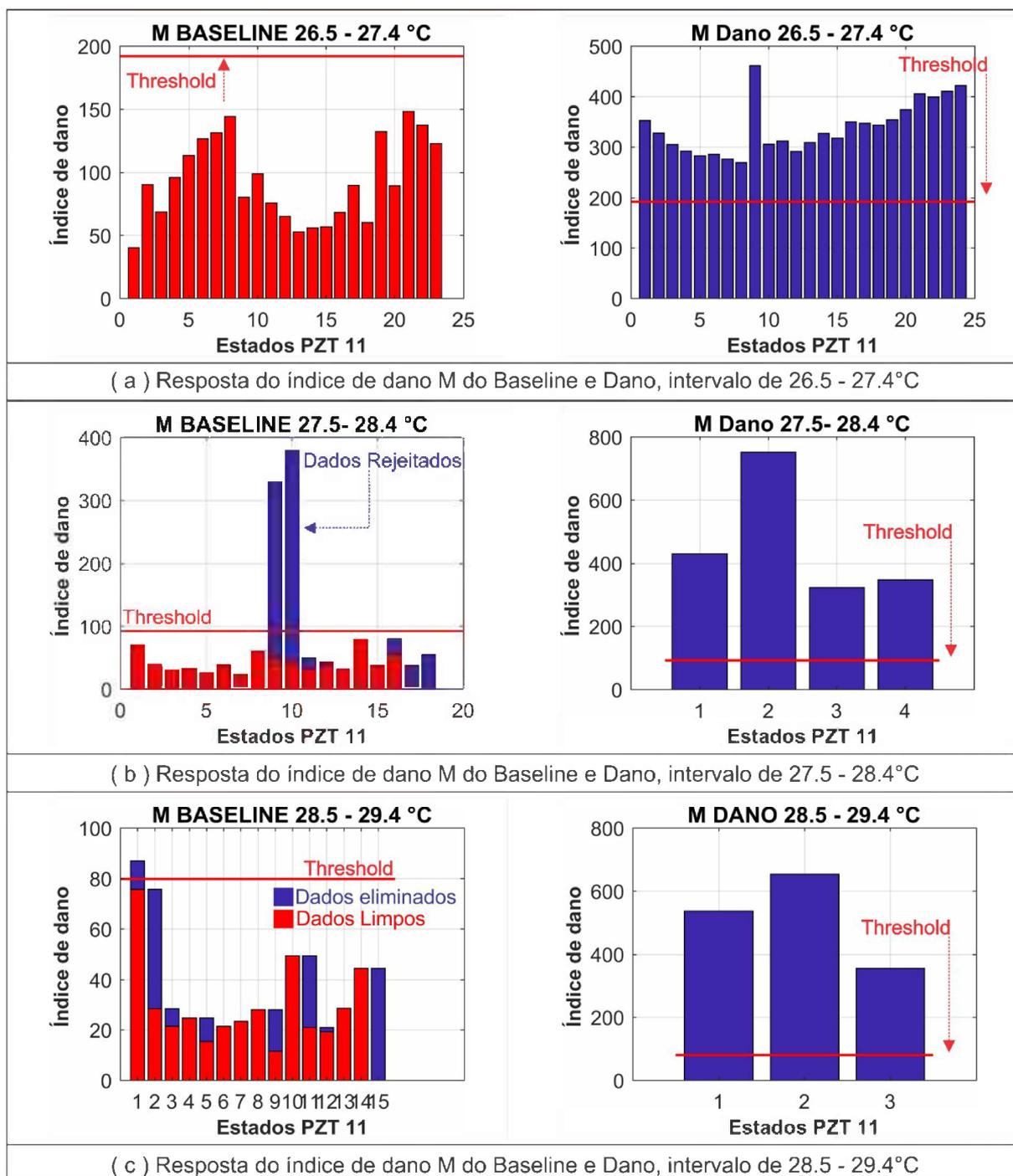


Figura 6.27 - M baseline e dano PZT 11 (a) 26.5-27.4°C, (b) 27.5-28.4°C e (c) 28.5-29.4°C. Fonte:

Elaborado pelo autor.

Na Fig. 6.27 todas as IS com danos foram identificadas e o critério de rejeição no intervalo de 27.5-28.5°C foi fundamental para eliminar duas assinaturas que seriam identificadas como falsos positivos, ilustrado em azul na Fig. 27 (b) e (c).

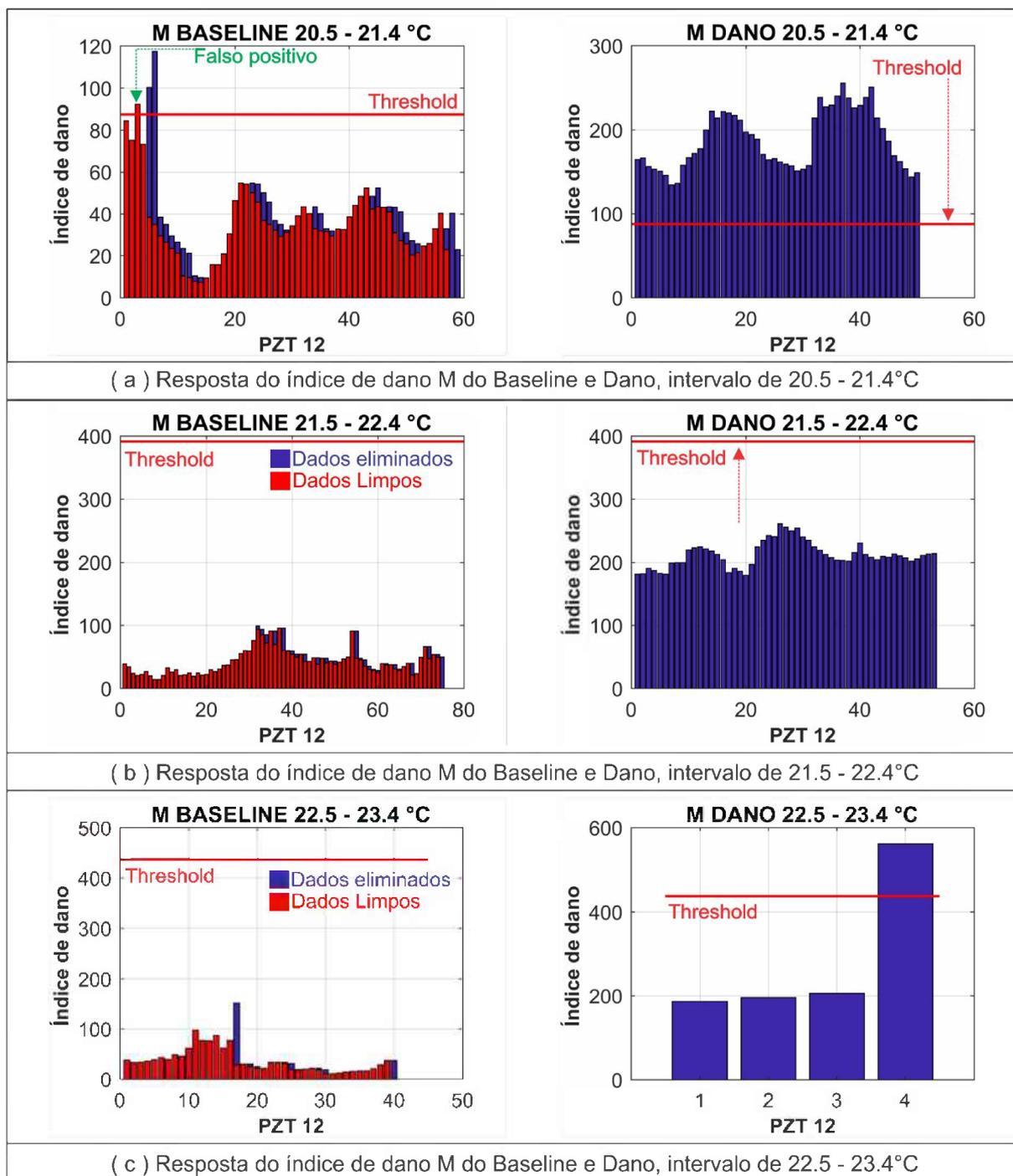


Figura 6.28 - M baseline e dano PZT 12 (a) 20.5-21.4°C, (b) 21.5-22.4°C e (c) 22.5-23.4°C. Fonte:

Elaborado pelo autor.

Constata-se que no intervalo 20.5-21.4°C pode-se identificar a ocorrência de um falso positivo no baseline, mas as IS com dano foram identificadas com sucesso, Fig. 5.28 (a). No intervalo de 21.5-22.4°C e 22.5-23.4°C nenhuma IS com dano foram detectadas exceto uma.

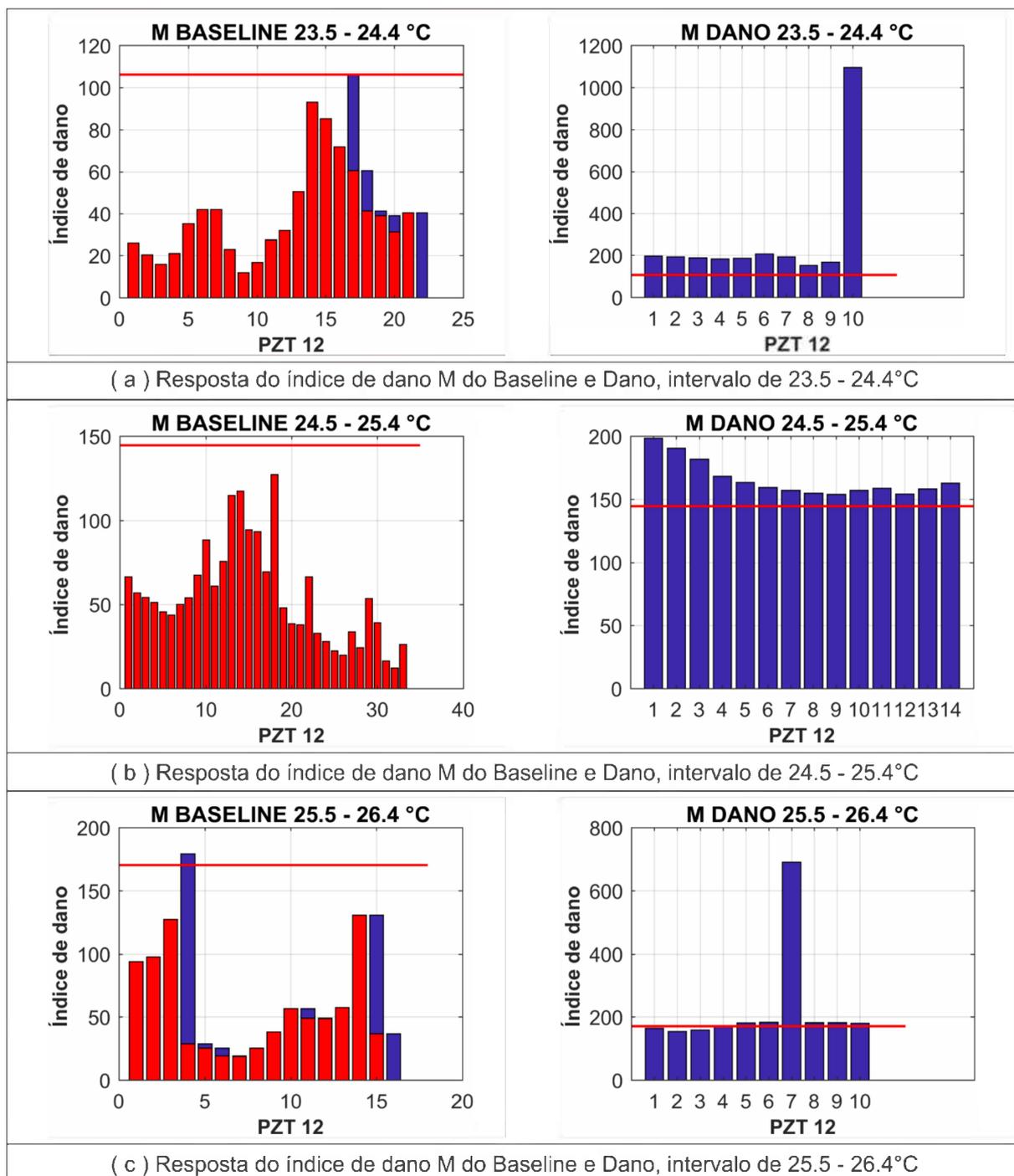


Figura 6.29 - M baseline e dano PZT 12 (a) 23.5-24.4°C, (b) 24.5-25.4°C e (c) 25.5-26.4°C. Fonte:

Elaborado pelo autor.

Nota-se na Fig. 6.29 nos intervalos de 23.5-24.4°C e 23.5-24.4°C que as IS com dano foram identificadas e no intervalo de 24.5-25.4°C que as IS com dano foram parcialmente detectadas.

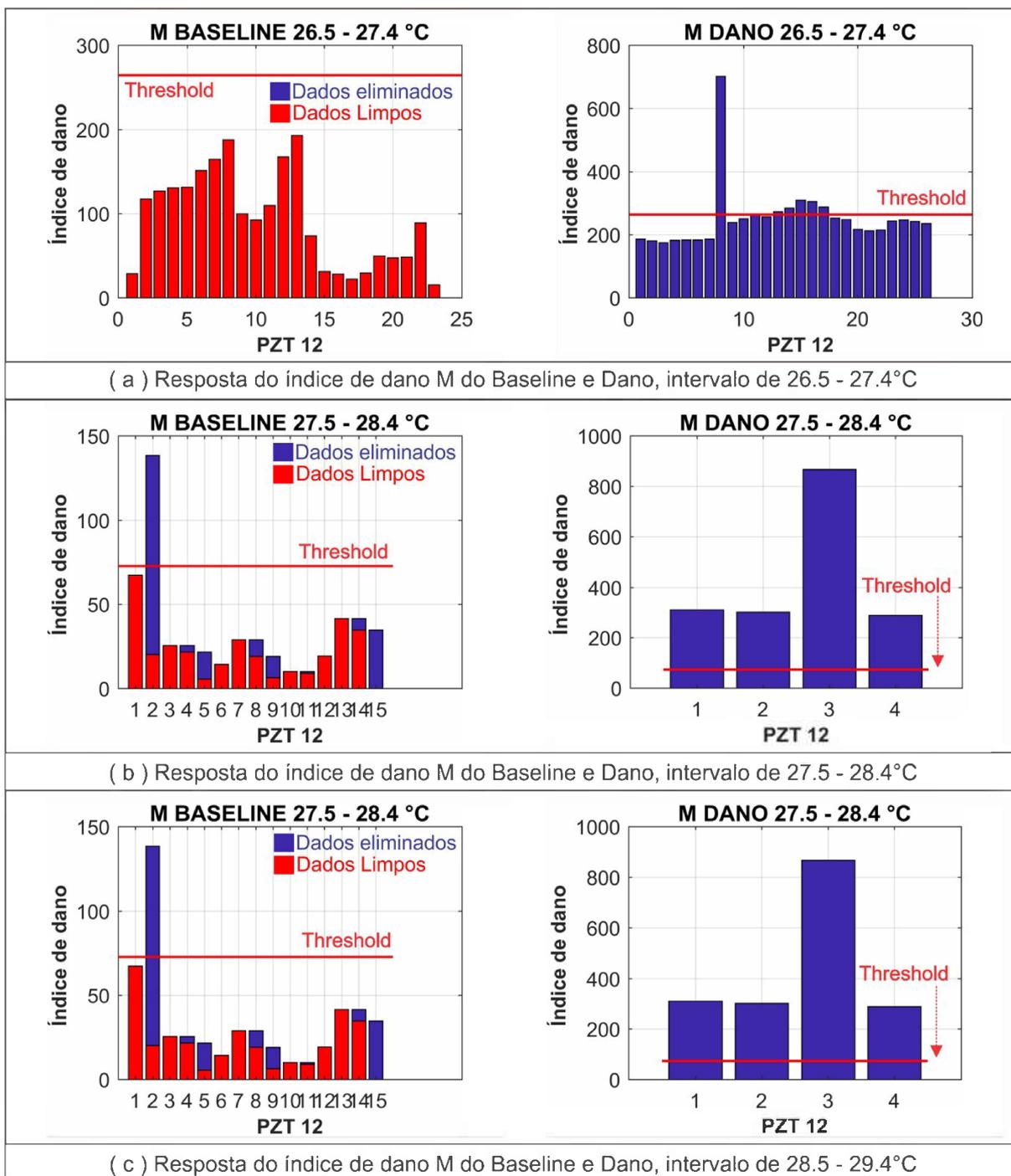


Figura 6.30 - M baseline e dano PZT 12 (a) 26.5-27.4°C, (b) 27.5-28.4°C e (c) 28.5-29.4°C. Fonte:

Elaborado pelo autor.

Verifica-se na Figura 6.30 que o limiar de detecção identificou todas as IS com dano exceto para o intervalo de 26.5-27.5°C, onde foram parcialmente identificadas.

Na Figura 6.31, Figura 6.32 e Figura 6.33 são demonstrados os resultados para o intervalo de 3°C, 20.5-23.5°C, 23.6-26.6°C e 26.7-29.7°C do PZT11.

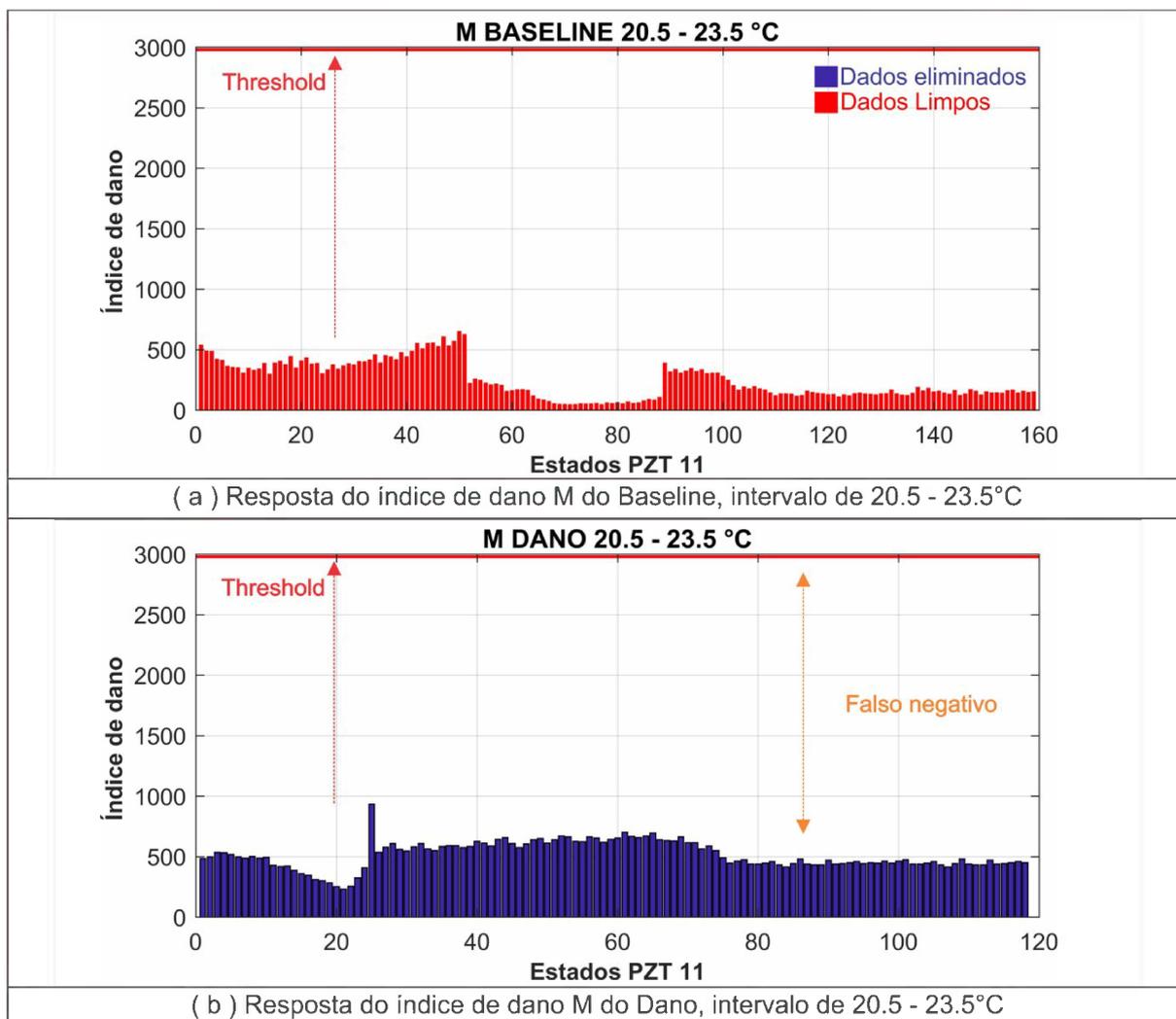


Figura 6.31 - M baseline e dano PZT 11, agrupamento de 20.5°-23.5°C. Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 6.31 nenhuma IS com dano foi reconhecida pelo limiar de detecção.

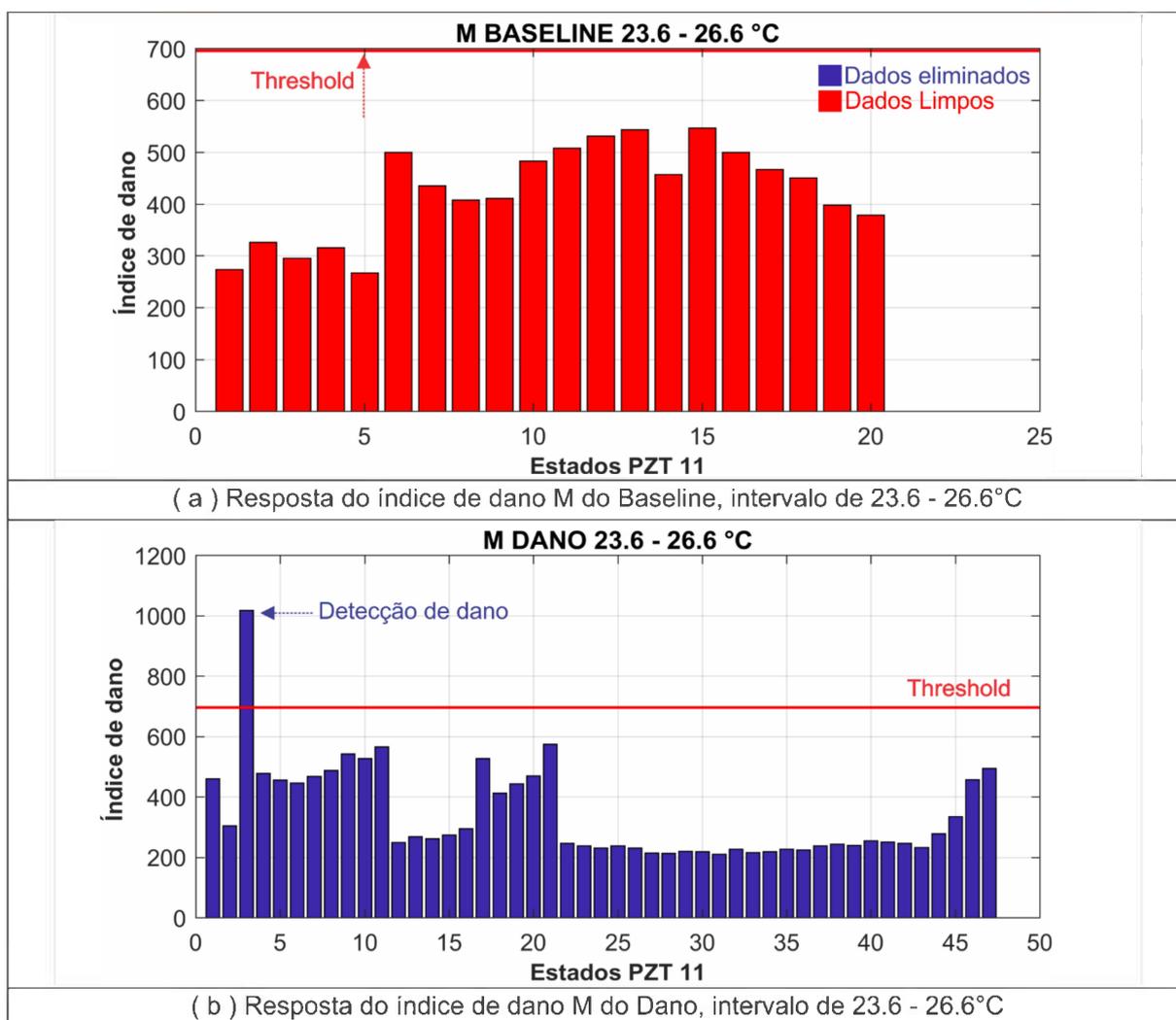


Figura 6.32 - M baseline e dano PZT 11, agrupamento de 23.6°-26.6°C. Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se que somente uma IS com dano foi reconhecida pelo limiar, como ilustrado na Fig. 6.32.

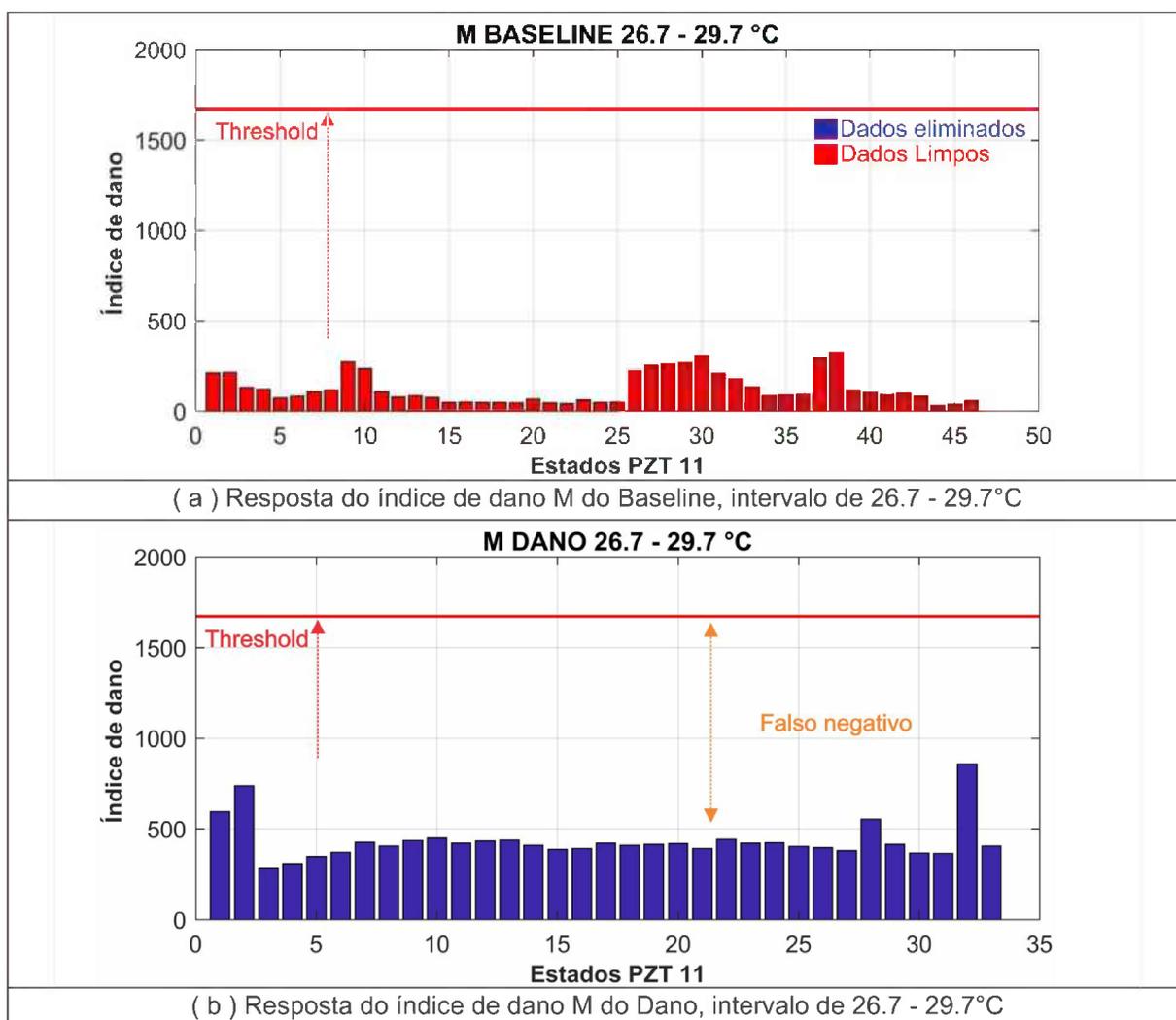


Figura 6.33 - M baseline e dano PZT 11, agrupamento de 26.6°-29.6°C. Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o PZT 11 no intervalo de 3°C na métrica M o limiar de detecção não atingiu o objetivo na detecção das IS com dano, inclusive no intervalo de 26.7-29.7°C ilustrado na Fig. 6.33.

Nas Figura 6.34, Figura 6.35 e Figura 6.36 são demonstrados os resultados para o intervalo de 3°C, 20.5-23.5°C, 23.6-26.6°C e 26.7-29.7°C do PZT12.

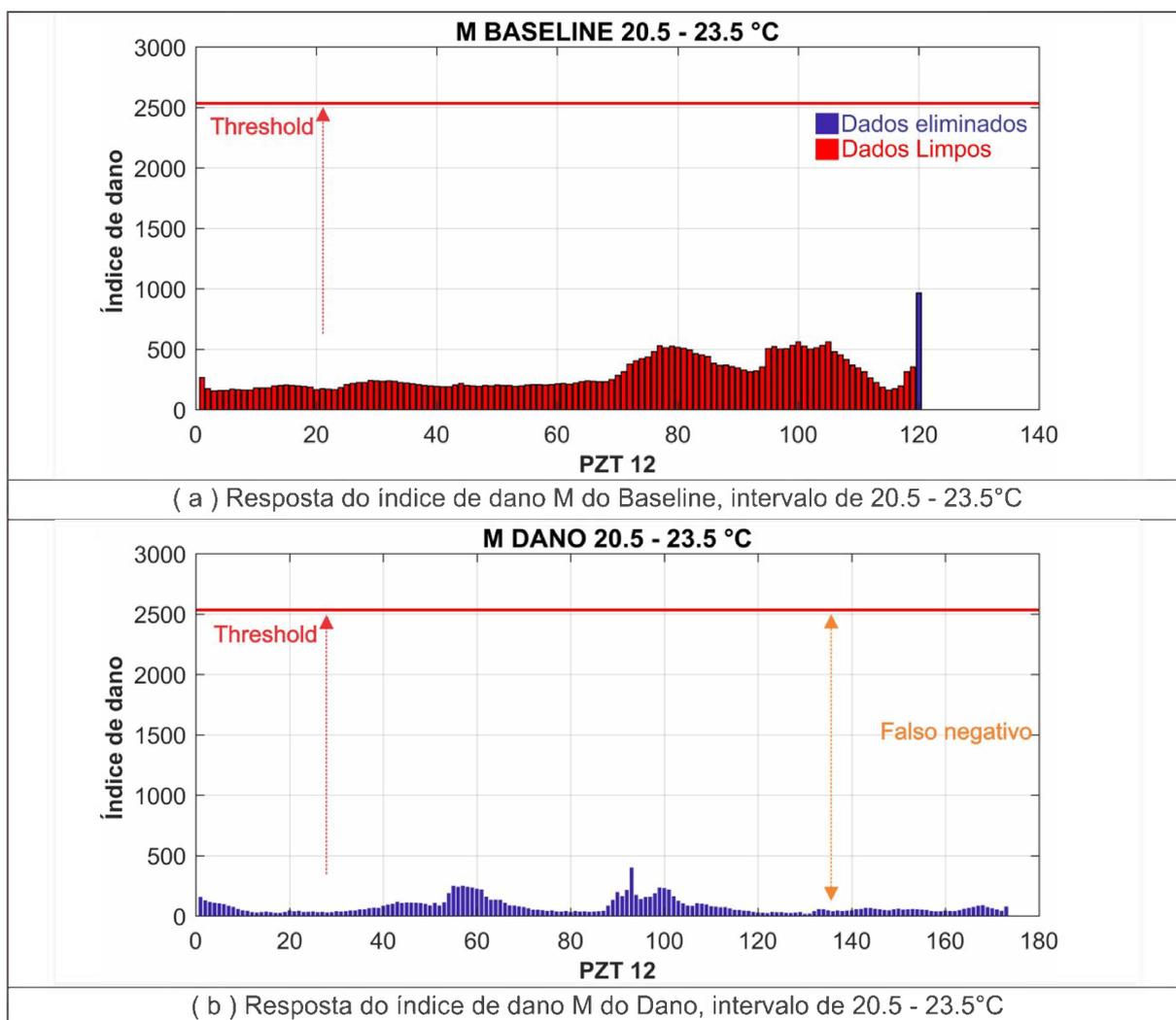


Figura 6.34 - M baseline e dano PZT 12, agrupamento de 20.5°-23.5°C. Fonte: Elaborado pelo autor.

No intervalo de 20.5-23.5°C o limiar não conseguiu identificar as IS com dano, como observado na Fig. 6.34.

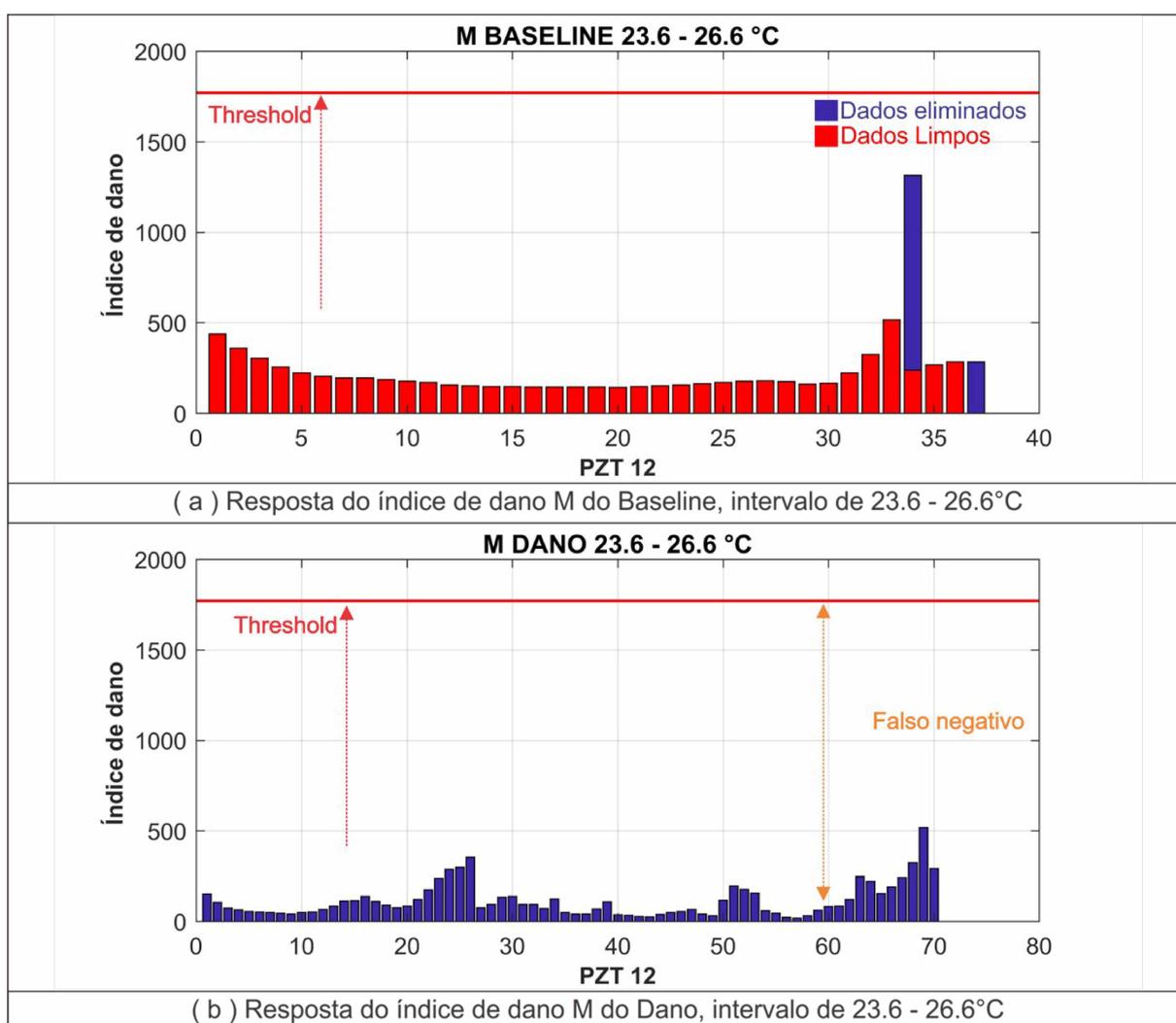


Figura 6.35 - M baseline e dano PZT 12, agrupamento de 23.6°-26.6°C. Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim como na Figura 5.35 como na Figura 5.34 o limiar de detecção não identificou nenhuma IS com dano como ilustrado no Fig. 36.

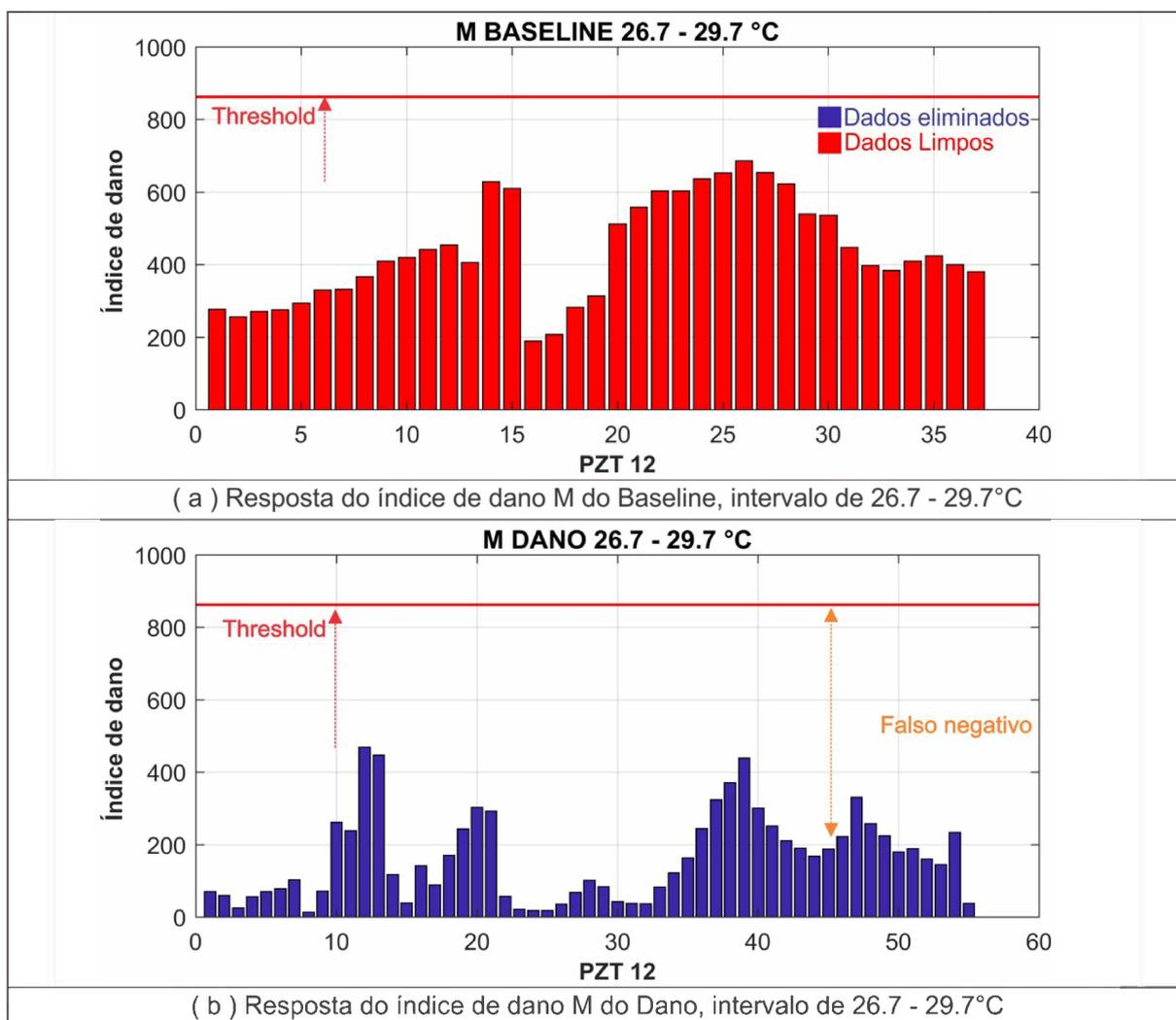


Figura 6.36 - M baseline e dano PZT 12, agrupamento de 26.6°-29.6°C. Fonte: Elaborado pelo autor.

Não obstante no intervalo de 26.7-29.7°C como nos demais o limiar não foi efetivo, o que pode ser identificado através da Fig. 5.36.

6.3. Síntese

Neste capítulo foram observados os resultados numéricos da média da IS com dano e demonstrados graficamente todos os resultados dos cálculos do pré-processamento de todas as métricas de índice de dano, tanto do *Baseline*, quanto das IS com dano. Com estas informações pôde-se analisar se houve ou não sucesso na identificação de danos estruturais. Finalmente, pode-se avaliar se as técnicas atingiram o objetivo de eliminar os erros de falsos

positivos e falsos negativos que poderiam comprometer a obtenção das verdadeiras respostas do sistema.

Para realizar uma análise adequada dos resultados fez-se necessário confrontar os resultados dos testes de normalidade e agrupamentos de temperatura relacionando a técnica de detecção de assinaturas com a presença de dano. E por fim averiguar se o critério de Chauvenet teve o potencial de evitar a ocorrência de erros falsos positivos.

Primeiramente verificou-se para a métrica RMSD do PZT 11, no intervalo de 20.5-21.4°C, 21.5-22.4°C, 22.5-23.4°C e 23.5-24.4°C que as IS (*Baseline*) **não apresentaram normalidade e o limiar de detecção não obteve sucesso na identificação das IS com dano**. Nos intervalos de 24.5-25.4°C e 25.5-26.4°C as IS (*Baseline*) apresentaram normalidade, porém o limiar de detecção identificou parcialmente as IS com dano. Para finalizar, os intervalos de 26.5-27.4°C, 27.5-28.4°C e 28.5-29.4°C as IS **apresentaram aderência a normalidade e o limiar detectou todas IS com dano**. Para a métrica RMSD no agrupamento de 3°C do PZT 11, intervalos de 20.5-23.5°C e 29.7-29.7°C não apresentaram normalidade na distribuição, somente o intervalo de 23.6-26.6°C aderiu à normalidade. No entanto, em nenhum dos intervalos salvo uma IS, o limiar de detecção reconheceu dano na estrutura.

Para a métrica CCD somente os intervalos de 20.5-21.4°C e 23.5-24.4°C as IS não aderiram à normalidade e o limiar de detecção para esses intervalos não obteve sucesso na identificação dos danos, salvo somente a detecção de uma IS com dano. **Todos os outros intervalos aderiram a normalidade e o limiar de detecção identificou todas IS com dano**. No agrupamento de 3°C, os intervalos de 20.5-23.5°C e 29.7-29.7°C não apresentaram normalidade na distribuição, somente o intervalo de 23.6-26.6°C aderiu à normalidade. No entanto, a métrica conseguiu identificar somente duas assinaturas com dano em todos os intervalos.

Tanto na métrica M como na RMSD os intervalos de 20.5-21.4°C, 21.5-22.4°C, 22.5-23.4°C e 23.5-24.4°C, as IS não apresentaram normalidade e o limiar de detecção **não obteve sucesso na identificação das IS com dano**. Nos outros intervalos as distribuições aderiram a normalidade e **o limiar conseguiu identificar todas as IS com dano**. No agrupamento de 3°C os intervalos de 20.5-23.5°C e 29.7-29.7°C não apresentaram normalidade na distribuição. Somente o intervalo de 23.6-26.6°C aderiu à normalidade detectando **somente uma** assinaturas com dano.

Já no PZT 12 na métrica de dano RMSD para o agrupamento de 1°C todas as assinaturas aderiram à normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk e **o limiar de detecção obteve**

êxito na identificação de dano na maior parte dos intervalos, exceto para os intervalos de 24.5-25.4°C, 25.5-26.4°C e 26.5-27.4°C, que as IS com danos foram parcialmente identificadas. Para o agrupamento de 3°C, os intervalos de 20.5-23.5°C e 23.6-26.6°C as IS não aderiram a normalidade, mas no intervalo de 26.7-29.7°C as IS aderiram a normalidade, entretanto **nenhuma IS com dano** foi identificada pelo limiar de detecção.

Aplicando a métrica CCD todos os intervalos para o agrupamento de 1°C as IS de referência aderiram a normalidade e somente nos intervalos de 24.5-25.4°C e 25.5-26.4°C as IS com dano foram parcialmente identificadas. Entretanto, para os outros intervalos **todas as IS com dano foram identificadas pelo limiar de detecção**. No agrupamento de 3°C os intervalos de 20.5-23.5°C e 23.6-26.6°C as IS não aderiram a normalidade, mas no intervalo de 29.7-29.7°C as IS aderiram a normalidade, porém nenhuma IS com dano foi identificada pelo limiar de detecção.

Na métrica M no agrupamento de 1°C somente nos intervalos de 21.5-22.4°C e 22.5-23.4°C as IS de referência não aderiram a normalidade. O limiar de detecção identificou as IS com dano em todos os intervalos exceto no de 21.5-22.4°C e nos de 25.5-26.4°C e 26.5-27.4°C, nos quais foram parcialmente identificadas. Para o agrupamento de 3°C os resultados foram semelhante as demais métricas do PZT 12, **nenhuma IS com dano foi identificada**.

Encerrando as considerações, constatou-se que o critério de Chauvenet é uma ferramenta eficaz na eliminação de valores duvidosos que podem ocasionar em erros de falso positivo, principalmente quando aplicado na métrica de índice de dano CCD e RMSD. Finalmente pode-se afirmar que existe uma relação entre as métricas de índice de dano, o tipo de distribuição da amostra, agrupamento de temperatura, técnica de eliminação de valores duvidosos e o sucesso da técnica do limiar de detecção.

CAPÍTULO VII

CONCLUSÃO

O objetivo geral da dissertação foi a implementação de metodologias de pré-processamento das assinaturas de Impedância eletromecânica (IEM), em aplicações de Análise da Integridade de Estruturas Mecânica (SHM), que garantissem a alta correlação entre os sinais adquiridos e o estado em que a estrutura se encontra. Foram previstas aplicações experimentais visando aproximar situações reais de operação dos sistemas SHM baseados em Impedância Eletromecânica (ISHM) e, desta forma, explorar a técnica de IEM no contexto das influências externas. Foram assim implementados algoritmos visando: tomada de decisões com base em reconhecimento de padrões, técnicas estatísticas, bem como regras de análise e interpretação dos resultados para propor metodologias de detecção de danos considerando a influência de fatores externos que poderiam prejudicar a confiabilidade dos dados obtidos. Neste sentido, outros fatores foram também incluídos na análise, a saber, a quantidade amostral do experimento e o agrupamento de temperatura que se fizeram pertinentes ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

A presente dissertação objetivou identificar e corrigir os fatores ambientais, falsos positivos e falsos negativos que provocam interferência nos verdadeiros efeitos de alteração estrutural na presença de danos, através da elaboração de métodos estatísticos. Verificou-se na literatura que as temperaturas modificam as propriedades dos materiais e, portanto, as interferências ambientais prejudicam a correta análise do monitoramento de integridade estrutural baseado na técnica da impedância. Com base na descrição do problema propôs-se o uso de modelos estatísticos que possibilitam dissociar as interferências indesejadas, da

correta leitura estrutural na presença de danos. Para validação da proposta do modelo, foram executados experimentos utilizando transdutores piezelétricos acoplados a um corpo de prova submetido à variação de temperatura e à inclusão de danos simulados.

Ficou evidente que existe uma sensibilidade considerável ao se analisar distintos agrupamentos de temperatura. Diante dos resultados apresentados no capítulo VI, observou-se que para minimizar o erro causado pelo efeito da temperatura, o agrupamento das IS por faixa de ΔT mostrou-se ser uma técnica eficiente. Verificou-se que quanto menor o gradiente de ΔT menor foi a influência provocadora do erro, e quanto maior a diferença de temperatura maior foi o erro causado. Comprovou-se que o tipo de distribuição é fundamental para determinar a sensibilidade do limiar de detecção, e que o mesmo não é eficaz quando as IS (*Baseline*) não aderem à normalidade.

A métrica CCD mostrou-se muito promissora, superando as demais técnicas na sensibilidade e robustez na detecção de danos. Ficou evidente a excelente precisão da técnica na eliminação de valores duvidosos realizado através do critério de Chauvenet, podendo-se concluir que a métrica é a mais robusta na eliminação dos erros falsos positivos e falsos negativos diante das condições analisadas. A métrica RMSD apresentou resultados intermediários, porém significativos em relação as métricas CCD e M.

Já na métrica M os resultados não foram tão satisfatórios como os da CCD e RMSD, principalmente na eliminação de falsos negativos. Este foi o único modelo que não eliminou todos os erros provocados por valores duvidosos, ocasionando a presença de erros falsos positivos nas assinaturas de referência (*Baseline*).

Na Figura 7.1 é ilustrado a média percentual de acerto das três métricas utilizadas no trabalho. Nota-se que no PZT 12 o percentual de acerto foi maior que no PZT 11 e nos dois últimos intervalos de temperatura para ambos PZT's o Limiar de detecção obteve uma eficiência de 100%.

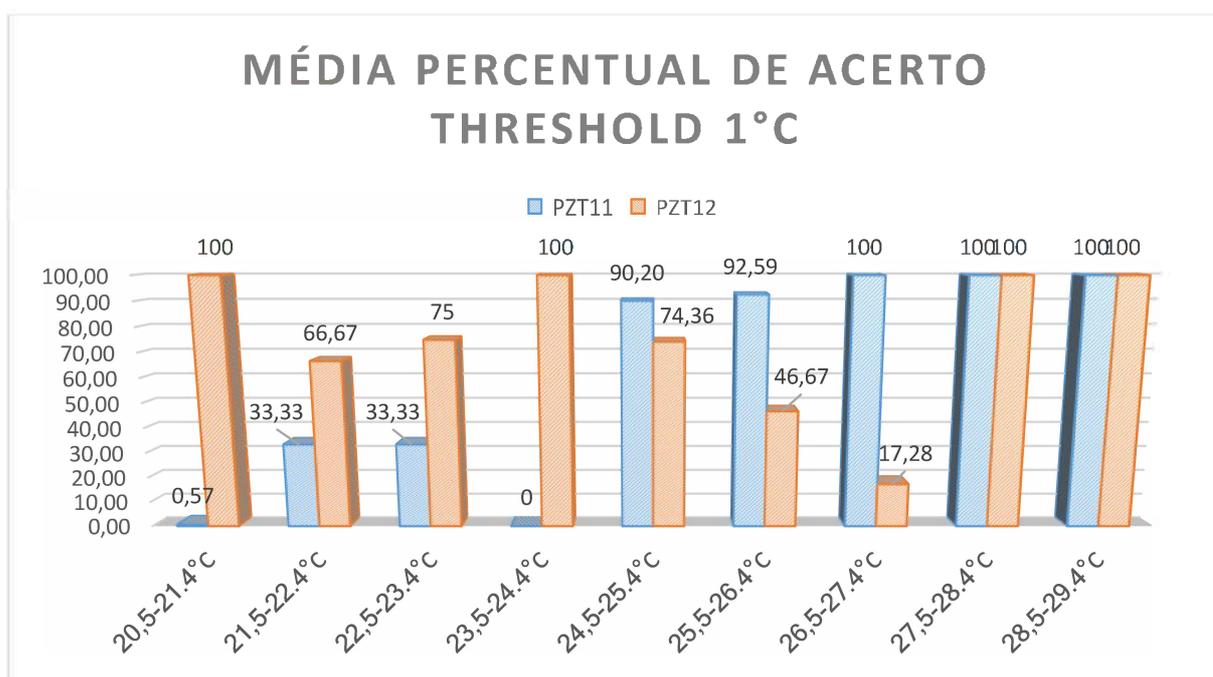


Figura 7.1 – Média percentual de acerto do Threshold 1°C. Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 7.2 é demonstrado graficamente a eficiência do critério de Chauvenet na eliminação de possíveis erros falsos positivos para cada métrica do intervalo de 1°C, para i intervalo de 3°C não houve eliminação de falsos positivos.

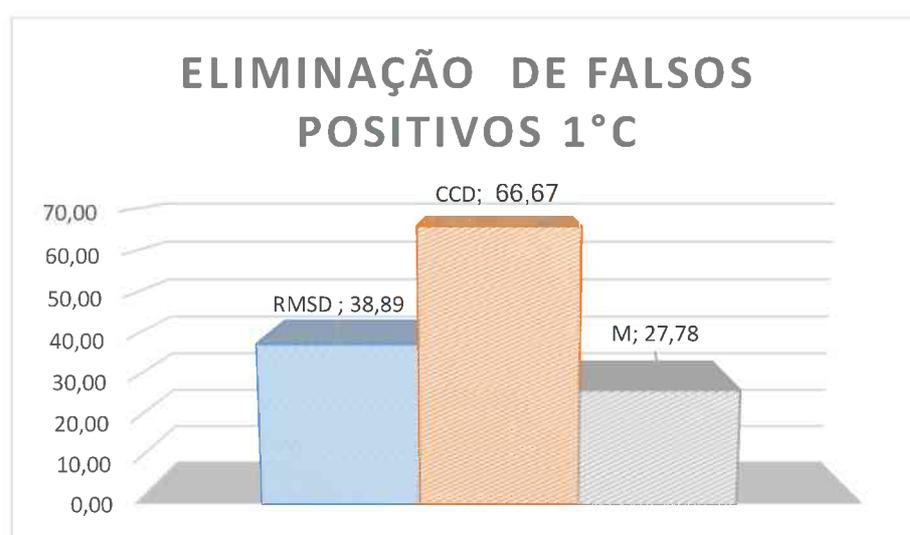


Figura 7.2 - Percentual de eliminação de falsos positivos pelo critério de Chauvenet. Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir dos modelos estatísticos elaborados, foi possível tanto separar e identificar a influência do dano simulado e da temperatura quanto estabelecer um intervalo de confiança nas análises desenvolvidas. Os resultados se provaram muito bons, sendo possível indicar que a técnica de análise estatística proposta é uma excelente ferramenta de pré-processamento de dados em aplicações de monitoramento de estruturas baseados no método da impedância eletromecânica.

7.1. Principais contribuições

Dentre as principais contribuições deste trabalho, destaca-se a identificação e modelagem de todo o sistema de pré-processamento, contribuindo para futuros estudos dos pesquisadores do laboratório LMEst (Laboratório de Mecânica de Estruturas) e leitores interessados. O algoritmo desenvolvido poderá ser utilizado como filtro de pré-processamento do software que compõem o sistema de aquisição dos dados durante a experimentação, tornando o sistema mais robusto e confiável.

Essa dissertação também servirá como base para o desenvolvimento de estudos mais elaborados sobre a necessidade de identificar uma quantidade maior de efeitos externos que possam comprometer a aquisição de dados adequado. Finalmente, pode-se atentar os pesquisadores sobre a indispensabilidade de questionar a validade dos resultados proveniente das experimentações.

Por fim, os resultados dos algoritmos produzidos neste trabalho demonstram que as técnicas de modelagem estatística são ferramentas eficazes para o pré-processamento de ISHM. Estes estudos e técnicas podem ser replicados e utilizadas como base para estudos e publicações futuras.

7.2. Sugestões para trabalhos futuros

Com o intuito de contribuir nos avanços de estudos futuros segue algumas possibilidades e sugestões.

- Realizar experimentos durante períodos mais longos, tendo em vista um maior número de leituras por faixa de temperatura, conseqüentemente diminuindo as chances de erros provenientes de quantidade insuficiente de dados.
- Incorporar no software de aquisição utilizado durante a experimentação, o algoritmo gerado nesta dissertação. O objetivo é eliminar os possíveis erros ou interferências já durante os procedimentos de aquisição de dados, realizados durante o ensaio.
- Estudar novas formas e métodos que possam verificar a integridade dos dados obtidos durante a experimentação.
- Aplicar técnicas de otimização para verificar até qual intervalo de temperatura consegue-se obter assinaturas de impedância com graus de confiança significativos, sem a presença de erros gerados por falsos positivos e falsos negativos.
- Criar um analisador de impedância juntamente com um software contendo o pré-processamento que possibilite identificar danos estruturais com agilidade e confiança. Isto objetiva troca de produtos e financiamento de pesquisas futuras entre universidades e empresas que necessitem realizar testes de vibrações estruturais. Desta forma seria oferecido um produto que agrega toda a aquisição em um equipamento e processa as informações em *bigdata*, com interação entre sistemas como o LUIS (Language Understanding Intelligent Service) da Microsoft ou o Watson da IBM, onde a própria máquina comunique um alerta a qualquer comportamento fora do padrão.
- Fabricar máquinas inteligentes já com esse sistema aprimorado, onde ela própria solicitará reparos antecipados a um determinado setor de acordo com o tipo de anomalia detectada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A TIPLER, Paul; Mosca, Gene. Física para cientistas e engenheiros: Mecânica, oscilações e ondas, termodinâmica. 6. Ed. Rio de Janeiro, 2009.

Analog. AD590. Disponível em:< <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad590.pdf>>. Acesso em: 26 out. 2017.

Baptista, F. G., Budoya, D. E. Almeida, V. A. Ulson, J. A. C. 2014. "An Experimental Study on the Effect of Temperature on Piezoelectric Sensors for Impedance-Based Structural Health Monitoring" J. Intell. Matls. Sys. & Struct., v. 21 no. 14.

CAVALCANTE, Amanda Malafaia; BORGES, Júlio Almeida; NETO, Roberto Mendes Finzi. Modelos estatísticos aplicados ao monitoramento de integridade estrutural baseado na técnica da impedância eletromecânica. Congresso nacional de engenharia mecânica, Fortaleza-CE, p. 12, nov. 2016.

CAVALCANTE, Amanda Malafaia; BORGES, Júlio Almeida; NETO, Roberto Mendes Finzi. Modelos estatísticos aplicados ao monitoramento de integridade estrutural baseado na técnica da impedância eletromecânica. Iberian Latin American Congress on Computational methods in Engineering, Brasília-DF-Brasil, p. 18, nov. 2016.

Chaudhry, Z., Lalande, F., Ganino, A. and Rogers, C., 1996. "Monitoring the integrity of composite patch structural repair via piezoelectric actuators/sensors. AIAA-1996-1074-CP

CONOVER, W.J., 1999. Practical Nonparametric Statistics. 3rd Edition. New York: John Wiley & Sons. 592 pp.

DIGIKEY. Sensor de temperatura ad590. Disponível em: <<https://www.digikey.com/product-detail/en/analog-devices-inc/ad590jf/ad590jf-nd/611802>>. Acesso em: 26 out. 2017.

Doebelin, E., 1990, Measurement Systems: Application and Design, International Student Edition, Mcgrall-Hill 4^a th edition.

Finzi Neto, R.M.F., Steffen, V., Rade, D.A., Gallo, C.A. and Palomino, L.V., 2011. "A low-cost electromechanical impedance- based SHM architecture for multiplexed piezoceramic actuators". Structural Health Monitoring, Vol. 10, p. 391. <https://doi.org/10.1177/1475921710379518>

Germano, S.B. Confiabilidade metrológica do banco dinamométrico para ensaio de motores do CTEEx. 2013. 205p. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ.

Giles, Dave. More On the Limitations of the Jarque-Bera Test. Disponível em: <<http://davegiles.blogspot.com.br/2014/04/more-on-limitations-of-jarque-beratest.html>>. Acesso em: 12 out. 2016.

Giurgiutiu V, Rogers CA (1997) The electro-mechanical (E/M) impedance method for structural health monitoring and non- destructive evaluation. Proceedings of the International Workshop on Structural Health Monitoring; Stanford, USA.

Giurgiutiu, V.I., Zagrai, A. and Bao, J.J., 2003. "Active sensors for health monitoring of aging aerospace structures". International Journal o the Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management. Vol. 6, p. 3.

Holman, J.P., 1994, *Experimental Methods for Engineers*, McGraw-Hill, New York, 6th ed.

Implastec. Ficha técnica, pasta térmica de Silicone Implastec. Disponível em: <<http://implastec.com.br/revenda-eletronica/pasta-termica-de-silicone>>. Acesso em: 26 out. 2017.

IMPERIODOSMETAIS. Ficha técnica alumínio 1024-t3. Disponível em: <http://www.imperiodosmetais.com.br/downloads/download_ficha_tecnica/aluminio/2024.pdf>. Acesso em: 26 out. 2017.

Jarque, C. & Bera, A. (1987). "A test for normality of observations and regression residuals". *International Statistical Review* 55: 163–172
<https://doi.org/10.2307/1403192>

Liang, C., Sun, F.P. and Rogers, C.A., 1994. "Coupled electromechanical analysis of adaptative material systems – determination of the actuator power consumption and system energy transfer". *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. Vol. 5, p. 740
<https://doi.org/10.1177/1045389X9400500102>

Leotti, V. B; A. R. Birck e J. Riboldi (2005) Comparação dos Testes de Aderência à Normalidade Kolmogorov-smirnov, AndersonDarling, Cramer–Von Mises e Shapiro-Wilk por Simulação. 11º Simpósio de Estatística Aplicada à Experimentação Agronômica e a 50ª Reunião Anual da Região Brasileira da Sociedade Internacional de Biometria (RBRAS). Anais. Londrina, PR, Brasil

Lopes, branco, soares. Utilização dos testes estatísticos de KolmogorovSmirnov e Shapiro-Wilk para verificação da normalidade para materiais de pavimentação. *Transportes*, [s.l.], v. 21, n. 1, p.59-66, 30 abr. 2013. Programa de Pós-Graduação em

Arquitetura e Urbanismo. <http://dx.doi.org/10.4237/transportes.v21i1.566>.
<https://doi.org/10.4237/transportes.v21i1.566>

Maio, C.E.B. Técnicas para monitoramento de integridade estrutural usando sensores e atuadores piezelétricos. 2011. 113 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos-SP.

Mauro, I. I.; GIACHERO, G.; Steffen Jr, V; FINZI NETO, R. M. 2015. Electromechanical Impedance - Based Structural Health Monitoring Instrumentation System Applied to Aircraft Structures and Employing a Multiplexed Sensor Array. Journal of Aerospace Technology and Management (Online), v. 7, p. 294-306, 2015.

Moura Jr., J.R.V., 2008. "A contribution to structural health monitoring systems applied to aeronautics and space structures". Ph.D. thesis, Federal University of Uberlandia, Brazil.

Oliveira, M. A. Monitoramento da integridade estrutural baseada em sensores piezelétricos e análise de sinais no domínio do tempo. 2013. 131p. Tese (Doutorado) – UNESP - Campus de Ilha Solteira.

Öztuna, D.; A. H. Elhan e E. Tüccar (2006) Investigation of Four Different Normality Tests in Terms of Type 1 Error Rate and Power under Different Distributions. Journal of Medicine Cincinnati.v.36, n. 3, p. 171 –176

PALOMINO, L.V. Análise das métricas de dano associadas a técnica da impedância eletromecânica para o monitoramento de integridade estrutural. 2008. 133p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG

Palomino, L.V., Moura Jr., J.R.V., Tsuruta, K.M., Rade, D.A. and Steffen Jr., V., 2011. "Impedance-based health monitoring and mechanical testing of structures". *Smart Structures and Systems*, Vol. 7, p.15. <https://doi.org/10.12989/sss.2011.7.1.015>

Park, G., Sohn, H., Farrar, C. R., Inman, D. J., 2003, "Overview of Piezoelectric Impedance-Based Health Monitoring and Path Forward" *The Shock and Vibration Digest*, V.35, Issue 6, pp. 85-92. <https://doi.org/10.1177/05831024030356001>

Peairs, D.M. 2006. "High frequency modeling and experimental analysis for implementation of impedance-based structural health monitoring". Ph.D. thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, USA.

Rébillat, 2016. "High frequency modeling and experimental analysis for implementation of impedance-based structural health monitoring". <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01382898>, Paris, France.

Rabelo, 2006. "Simultaneous Influence of Static Load and Temperature on the Electromechanical Signature of Piezoelectric Elements Bonded to Composite Aeronautic Structures". International congress of mechanical engineering, Rio de Janeiro, Brazil.

Rabelo, 2015. "Impedance-based structural health monitoring incorporating compensation of temperature variation effects". Ph.D. thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, USA.

Razali, Nonadiah Mohd; WAH, Yap Bee. Power comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smornov, Lilliefors and Anderson-Darling tests. *Journal Of Statistical Modeling And Analytics*, Malasia, p. 21-33. 1 jan. 2011.

R.M. et al. probability of detection of damage for an electromechanical impedance based SHM system. *Diagnostyka*, Poland, v. 15, n. 4, nov, 2014.

Shapiro SS, Wilk MB. An Analysis of Variance Test for Normality (complete samples). Philadelphia: *Biometrika*; 1965, v. 52, p. 591-611.
<https://doi.org/10.1093/biomet/52.3-4.591>

SILVA, T.M. Ensaio de carregamento dinâmico em estacas no complexo de suape. 2011. 94p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Católica de Pernambuco, Recife-PE.

Soh, C.K., Tseng, K., Bhalla, S. and Gupta, A., 2000. "Performance of smart piezoceramic patches in health monitoring of a RC bridge". *Smart Materials and Structures*. Vol. 9 p. 533.
<https://doi.org/10.1088/0964-1726/9/4/317>

Sohn, H., Farrar, C.R, Hemez, F.M., Shunk, D.D., Stinemates, D.W., Nadler, B.R. and Czarnecki, J.J. 2004 "A Review of Structural Health Monitoring Literature: 1996-2001," Los Alamos National Laboratory Report, LA-13976-MS.

SPARKLERCERAMICS. Piezo electric disctype. Disponível em: <<http://www.sparklerceramics.co.in/piezo-electric-disctype-element.htm>>. Acesso em: 26 out. 2017.

Sun, F.P., Chaudhry, Z., Liang, C. and Rogers, C.A., 1995. "Truss structure integrity identification using PZT sensoractuator". *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*.
<https://doi.org/10.1177/1045389X9500600117>

Tahmasebpour, Kamyar. Finite element modeling of electromechanical impedance technique for structural health monitoring. 2014. 24p. Dessertation – Kulliyah of Engineering International Islamic University Malaysia, Malaysia.

TAYLOR, J. R., Introdução à Análise De Erros - O Estudo De Incertezas Em Medições Físicas. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012.

Triola, M.F., 1998, Introdução à Estatística, LTC-Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro-RJ.

TSURUDA, K. M. et al. Electromechanical impedance-based fault detection in a rotating machine by using an operation condition compensation approach. A tribute Conference Honoring Daniel Inman, Universidade federal de Uberlândia, p. 17, fev./mar. 2012.

Vanessa Bielefeldt Leot Iorman; COSTER, Rodrigo; RIBOLDI., João. Normalidade de variáveis: métodos de verificação e comparação de alguns testes não-paramétricos por simulação. Revista HCPA, Porto Alegre-RS, v. 32, n. 2, p. 227-234, fev./mar. 2012.

ANEXOS

A.1- Dados técnicos da cola Hysol® EA 0151 EN, utilizada para a fixação das pastilhas PZT no painel aeronáutico.



Product Description Sheet

LOCTITE® EA 0151

Known as
Hysol® Product 0151
August 2015

Description

LOCTITE® EA 0151 is a clear two-component epoxy having optical clarity when used in small quantities. LOCTITE® EA 0151 is easy to mix and has a long pot life.

Recommended Substrates: Glass, Metals, Circuit Boards, Fiber Optics and many Plastics.

Features

Clear Color
RT or Heat Cure
Bonds Many Materials
Easy to Mix
100% Solids
Thixotropic Paste

Typical Uncured Properties	Part A	Part B	Mixed
Pot Life @ 77°F, 100 grams mins	--	--	60
Color	Milky White	Amber	Clear
Viscosity, cP	40,000 to 100,000	20,000 to 100,000	--
Specific Gravity	1.13	0.98	--
Mix Ratio			
By weight	100	33	
By volume	2.7	1	

Typical Properties	Typical Value
Tensile Strength, psi, ASTM D 638	--
Elongation, %, ASTM D 638	2.4
Tg, °F	136
CTE, ASTM D 696, in/in/°C	47×10^{-6}
Thermal Conductivity, cal x cm/cm ² x secs x °C	5.6×10^{-4}
Shrinkage, %	<0.3
Hardness, Shore D	65

Electrical Properties	Typical Value
Dielectric Strength, ASTM D149, V/mil	1080
Dielectric Constant, MIL 1-16923, K 1kHz	3.88
Dissipation Factor, ASTM D 150 1kHz	5.3×10^{-4}
Volume Resistivity, ASTM D 257 ohm/cm	1.26×10^{15}
Surface Resistivity, ASTM D 257	--

Shear Strength, psi, ASTM D 1002 Etched Aluminum	Cure Schedule	Test Temp °F	Typical Value
3 Days @ 77°F		-67	1600
		77	1850
		180	400
2 Hours @ 140 °F		-67	2700
		77	3000
		180	600
1 Hour @ 180 °F		-67	2700
		77	3000
		180	500

Outgassing Performance	NASA 1124
Total Mass Loss, %	1.51
Collected Volatile Condensable Material, %	0.01

Handling

Mixing: This product requires mixing two components together just prior to application. Complete mixing is necessary. The temperature of the separate components prior to mixing is not critical, but they should be close to room temperature.

Application

Mixing - Bulk: Combine Part A (resin) and Part B (hardener) in the correct ratio and mix thoroughly until the color and consistency are uniform. EPOXI-PATCH® Tube Kits have been designed so that squeezing **EQUAL LENGTH BEADS of Part A & Part B** will give proper ratio. Ratios given above can be used for measuring larger amounts. Mixing the adhesive just prior to use is recommended. Heat buildup during or after mixing is normal. Do not mix quantities greater than two pounds as dangerous heat buildup can occur causing uncontrolled decomposition of the mixed adhesive. Mixing smaller quantities will minimize the heat buildup.

Mixing - Cartridges: Place cartridge in proper dispenser. To begin using a new cartridge, remove cartridge cap and dispense a small amount of adhesive, making sure both Parts A & B are extruding. Attach nozzle and dispense approximately 1-2" before applying onto the part to be bonded. Partially used cartridges can be stored with the mixing nozzle attached. To reuse, remove and discard the old nozzle, attach the new nozzle, and begin dispensing.

****Note**** Mix cartridge dispenses adhesive in a 2:1 ratio. Tests show no significant effect on bond performance compared to 2.7:1 ratio.

Application: Bonding surfaces should be clean and dry. Once the adhesive is applied, the bonded parts should be held in contact until the part has developed handling strength. It is not necessary to clamp the parts unless movement during cure is likely.





Product Description Sheet
LOCTITE® EA 0151

Known as
Hysol® Product 0151
 August 2015

Cure: Complete cure is obtained after three days at room temperature. After 24 hours, approximately 90% of full cure properties are attained. Hysol 0151 will achieve handling strength in 6-8 hours at 77°F (note: this can vary with different bond configurations). Hysol 0151 can also be completely cured with heat such as: 2 hours at 140°F; 1 hour at 180°F; or 30 minutes at 250°F. Heat cures can be modified to achieve a desired degree of cure from handling strength to full cure.

Clean Up: It is important to remove excess adhesive from the work area and application equipment before it hardens. Many common solvents and citrus cleaners are suitable for removing uncured adhesive. Consult with your supplier's information pertaining to the safe and proper use of solvents.

Storage

Store product in unopened container in a cool dry location. Ideal conditions are within the range 8 to 21 degrees C (46 to 70 degrees F) and are recommended for long term storage. Exposure to higher temperatures (greater than 28 degrees C) for prolonged periods should be avoided as extended exposure to warm conditions can adversely affect product properties. For further specific shelf life information, contact your local Technical Service Center.

Note

The information provided in this Technical Data Sheet (TDS) including the recommendations for use and application of the product are based on our knowledge and experience of the product as at the date of this TDS. The product can have a variety of different applications as well as differing application and working conditions in your environment that are beyond our control. Henkel is, therefore, not liable for the suitability of our product for the production processes and conditions in respect of which you use them, as well as the intended applications and results. We strongly recommend that you carry out your own prior trials to confirm such suitability of our product.

Any liability in respect of the information in the Technical Data Sheet or any other written or oral recommendation(s) regarding the concerned product is excluded, except if otherwise explicitly agreed and except in relation to death or personal injury caused by our negligence and any liability under any applicable mandatory product liability law.

In case products are delivered by Henkel Corporation, Resin Technology Group, Inc., or Henkel Canada, Inc. the following disclaimer is applicable:

The data contained herein are furnished for information only and are believed to be reliable. We cannot assume responsibility for the results obtained by others over whose methods we have no control. It is the user's responsibility to determine suitability for the user's purpose of any production methods mentioned herein and to adopt such precautions as may be advisable for the protection of property and of persons against any hazards that may be involved in the handling and use thereof. In light of the foregoing, **Henkel Corporation specifically disclaims all warranties expressed or implied, including warranties of**

merchantability or fitness for a particular purpose, arising from sale or use of Henkel Corporation's products. Henkel Corporation specifically disclaims any liability for consequential or incidental damages of any kind, including lost profits. The discussion herein of various processes or compositions is not to be interpreted as representation that they are free from domination of patents owned by others or as a license under any Henkel Corporation patents that may cover such processes or compositions. We recommend that each prospective user test his proposed application before repetitive use, using this data as a guide. This product may be covered by one or more United States or foreign patents or patent applications.

In case products are delivered by Henkel Belgium NV, Henkel

Electronic Materials NV, Henkel Nederland BV, Henkel Technologies

France SAS and Henkel France SA, please additionally note the

following:

In case Henkel would be nevertheless held liable, on whatever legal ground, Henkel's liability will in no event exceed the amount of the concerned delivery.

In case products are delivered by Henkel Colombiana, S.A.S. the

following disclaimer is applicable:

The information provided in this Technical Data Sheet (TDS) including the recommendations for use and application of the product are based on our knowledge and experience of the product as at the date of this TDS. Henkel is not liable for the suitability of our product for the production processes and conditions in respect of which you use them, as well as the intended applications and results. We strongly recommend that you carry out your own prior trials to confirm such suitability of our product.

Any liability in respect of the information in the Technical Data Sheet or any other written or oral recommendation(s) regarding the concerned product is excluded, except if otherwise explicitly agreed and except in relation to death or personal injury caused by our negligence and any liability under any applicable mandatory product liability law.

Trademark usage

Except as otherwise noted, all trademarks in this document are trademarks of Henkel Corporation in the U.S. and elsewhere. ® denotes a trademark registered in the U.S. Patent and Trademark Office.



A.2- Sensor de temperatura modelo AD590, fabricante Analog Devices®



2-Terminal IC Temperature Transducer

Data Sheet

AD590

FEATURES

Linear current output: 1 $\mu\text{A}/\text{K}$
Wide temperature range: -55°C to $+150^{\circ}\text{C}$
Probe-compatible ceramic sensor package
2-terminal device: voltage in/current out
Laser trimmed to $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ calibration accuracy (AD590M)
Excellent linearity: $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ over full range (AD590M)
Wide power supply range: 4 V to 30 V
Sensor isolation from case
Available in 2-lead FLATPACK, 4-lead LFCSP, 3-pin TO-52, 8-lead SOIC, and die form

GENERAL DESCRIPTION

The AD590 is a 2-terminal integrated circuit temperature transducer that produces an output current proportional to absolute temperature. For supply voltages between 4 V and 30 V, the device acts as a high impedance, constant current regulator passing 1 $\mu\text{A}/\text{K}$. Laser trimming of the chip's thin-film resistors is used to calibrate the device to 298.2 μA output at 298.2 K (25°C).

The AD590 should be used in any temperature-sensing application below 150°C in which conventional electrical temperature sensors are currently employed. The inherent low cost of a monolithic integrated circuit combined with the elimination of support circuitry makes the AD590 an attractive alternative for many temperature measurement situations. Linearization circuitry, precision voltage amplifiers, resistance measuring circuitry, and cold junction compensation are not needed in applying the AD590.

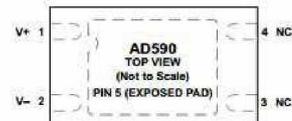
In addition to temperature measurement, applications include temperature compensation or correction of discrete components, biasing proportional to absolute temperature, flow rate measurement, level detection of fluids and anemometry. The AD590 is available in die form, making it suitable for hybrid circuits and fast temperature measurements in protected environments.

The AD590 is particularly useful in remote sensing applications. The device is insensitive to voltage drops over long lines due to its high impedance current output. Any well-insulated twisted pair is sufficient for operation at hundreds of feet from the receiving circuitry. The output characteristics also make the AD590 easy to multiplex: the current can be switched by a CMOS multiplexer, or the supply voltage can be switched by a logic gate output.

PIN CONFIGURATIONS



Figure 1. 2-Lead FLATPACK



NOTES
 1. NC = NO CONNECT. THE NC PIN IS NOT BONDED TO THE DIE INTERNALLY.
 2. TO ENSURE CORRECT OPERATION, THE EXPOSED PAD (EP) SHOULD BE LEFT FLOATING.

Figure 2. 4-Lead LFCSP

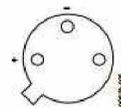


Figure 3. 3-Pin TO-52

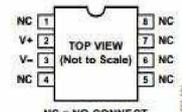


Figure 4. 8-Lead SOIC

PRODUCT HIGHLIGHTS

- The AD590 is a calibrated, 2-terminal temperature sensor requiring only a dc voltage supply (4 V to 30 V). Costly transmitters, filters, lead wire compensation, and linearization circuits are all unnecessary in applying the device.
- State-of-the-art laser trimming at the wafer level in conjunction with extensive final testing ensures that AD590 units are easily interchangeable.
- Superior interface rejection occurs because the output is a current rather than a voltage. In addition, power requirements are low (1.5 mW @ 5 V @ 25°C). These features make the AD590 easy to apply as a remote sensor.
- The high output impedance ($>10\text{ M}\Omega$) provides excellent rejection of supply voltage drift. For instance, changing the power supply from 5 V to 10 V results in only a 1 μA maximum current change, or 1°C equivalent error.
- The AD590 is electrically durable: it withstands a forward voltage of up to 44 V and a reverse voltage of 20 V. Therefore, supply irregularities or pin reversal does not damage the device.

Rev. G

Document Feedback

Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties that may result from its use. Specifications subject to change without notice. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.
 Tel: 781.329.4700 ©2013 Analog Devices, Inc. All rights reserved.
 Technical Support www.analog.com

A.3- Algoritmo das métricas de dano, teste de normalidade e Threshold desenvolvidos no software MATLAB®.

Contents

- ===== INSIRA OS DADOS =====
- títulos automáticos 'plots'
- %% PLOT BASELINES
- Somente calcular as métricas se o número de medidas é superior a 01
- media do critério de chauvenet
- Cálculo RMSD BASELINE
- Teste de Normalidade Shapiro Wilk
- Plot threshold baseline RMSD
- -----
- Critério de Chauvenet para o baseline no índice CCD
- media do critério de chauvenet
- Cálculo CCD BASELINE
- Teste de Normalidade Shapiro Wilk
- Plot threshold baseline
- -----
- media do critério de chauvenet
- Cálculo M BASELINE
- Teste de Normalidade Shapiro Wilk
- Plot threshold baseline
- 3.5 Montar impressão do plot com médias e desvios padrão
- %Plot de todas as assinaturas com dano
- Somente calcular as métricas se o número de medidas é superior a 01
- RMSD
- CCD
- M

```
%1. Limpeza do workspace
clc;
close all;
clear all;
format longg
```

===== INSIRA OS DADOS =====

intervalo de temperatura

```
X='28.5 - 29.4 °C';
Y='PBT 12';
%informações do PBT utilizado e quantidade de sinais adquiridos.
PBT=12;
QTD_SEMDANO = 16;
QTD_DANO = 6;
```

```
T = [ '----- ' num2str(X)];
disp(T)
```

```
----- 28.5 - 29.4 °C
```

títulos automáticos 'plots'

```
title_RMSD_BASELINE = ['RMSD BASELINE ' num2str(X)];
title_CCD_BASELINE = ['CCD BASELINE ' num2str(X)];
title_M_BASELINE = ['M BASELINE ' num2str(X)];
title_RMSD_DANO = ['RMSD DANO ' num2str(X)];
title_CCD_DANO = ['CCD DANO ' num2str(X)];
title_M_DANO = ['M DANO ' num2str(X)];
title_ESTADO = ['M DANO ' num2str(X)];
title_IS_BASELINE = ['Estado ' num2str(Y)];
title_IS_DANO = ['Assinaturas: Dano ' num2str(X)];
%-----
%Baseline
%-----
%2. Dados sobre a análise

ListaPZTs = [PZT];
NumMedidas = QTD_SEMDANO; %Baseline + medidas com falhas

%Variáveis usadas no sistema
NumPZTs = length(ListaPZTs);
umaVez = 1;
valoresI = zeros(10,NumMedidas); %Contém as medidas elétricas de corrente
valoresV = zeros(10,NumMedidas); %Contém as medidas elétricas de voltagem
valoresP = zeros(10,NumMedidas); %Contém as medidas elétricas de potência
temp = zeros(10, 3);
freqVet = zeros(10,NumPZTs);
NumPontos = 0;
%zera variáveis de plotagem
zz=0;
yy=0;
%3. Início do processamento
for contPZTs=1:NumPZTs % Dados de cada PZT.
```

```
for contMedidas=1:NumMedidas % Dados das medidas de um dado PZT
%3.1. Especificar o nome do arquivo
arquivo = ['PZT' num2str(ListaPZTs(contPZTs)) '_' num2str(contMedidas) '.BySAM'];
%3.2.abrir arquivo
temp = importdata(arquivo,'\t',1);%load(arquivo);
%Aloca os dados uma vez
if(umaVez == 1)
NumPontos = length(temp.data);
MediaImpVet = zeros(NumPontos,NumMedidas); %Contém médias de todas as medidas
valoresI = zeros(NumPontos,NumMedidas); %Contém as medidas de corrente
valoresPhase = zeros(NumPontos,NumMedidas); %Contém as medidas de potência
valoresV = zeros(NumPontos,NumMedidas); %Contém as medidas elétricas
freqVet = zeros(NumPontos,NumPZTs);
temperatura = repmat(['Texto'],NumMedidas,1); %cria um vetor de strings
```

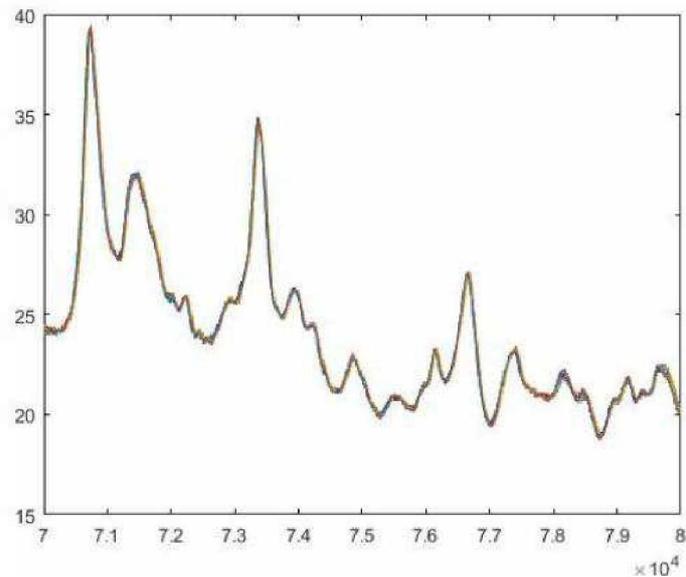
```

umaVez = 0;
end
%3.3 Isolar os vetores com os pontos de frequência, impedância e desvio
FreqVet(:,contPZTs) = temp.data(:,1); %salva o vetor que contém a frequência
MediaImpVet(:,contMedidas) = temp.data(:,2); %salva o vetor que contém a impedância res
istiva
    temperatura(contMedidas) = { cell2mat(temp.textdata) };
end %% fim do for de leitura e processamento dos arquivos de um único PZT
%Obtém o número de pontos do arquivo
clear temp;

%3.5 Montar impressão do plot com médias e desvios padrão
%3.5.1 Preparar localização das janelas
fig = figure; %Posição da plotagem das assinaturas de impedância
scnsize = get(0,'ScreenSize');
position = get(fig,'Position');
outerpos = get(fig,'OuterPosition');
borders = outerpos - position;
edge = -borders(1)/2;
tempe = mod(zz,3);
if tempe == 0
    zz=1;
else
    zz=zz+1;
end
pos1 = [ (zz-1)*scnsize(3)/3 + edge,...
        scnsize(4) * (2/3)-(yy)*scnsize(4) * (1/3),...
        scnsize(3)/3 - edge,...
        scnsize(4)/3];
if(mod(contPZTs,3) == 0)
    yy = yy+1;
end
%set(fig, 'OuterPosition', posi );
%3.5.2 Efetuar a plotagem do gráfico com as assinaturas de
%impedância de todas as medidas
nom = repmat({'Baseline'},NumMedidas,1); %cria um vetor de strings
nom(1) = { strcat('Baseline', '___',cell2mat(temperatura(1)), '°C')};

plot(FreqVet(:,contPZTs), MediaImpVet );
for kkk=2:NumMedidas
    nom(kkk) = { strcat('Estado', num2str(kkk-1), '___',cell2mat(temperatura(kkk)), '°C')};
};
%
    nom(kkk) = { strcat(num2str(Temperaturas(kkk-1)), 'C')};
end
%legend(nom);

```



%% PLOT BASELINES

```

ylabel ('Impedância [ohms]');
xlabel ('Frequência [Hz]');
name = [ 'P2T' num2str(ListaP2Ts(contP2Ts)) - title_IS_BASELINE]; title ( name );
axis tight;
set(gcf,'color','white','paperunits','centimeters','paperposition',[0 0 7.4 6]);
grid on

set(0,'DefaultAxesFontName','Arial')
set(0,'DefaultAxesFontSize',11)
set(gca,'fontSize',11,'FontName','Arial')
set(findall(fig,'type','text'),'fontSize',11,'FontWeight','bold');
set(gcf,'color','white','paperunits','centimeters','paperposition',[0 0 7.4 6]);
print -dtiffn -r300 Original.tif

```

Somente calcular as métricas se o número de medidas é superior a 01

```
if(NumMedidas > 1)
```

```

%3.6 Efetuar o cálculo das MÉTRICAS =====
%3.6.1 RMSD
%3.6.1.1 Obter matriz de diferenças quadráticas entre Matriz e MediaImpVet
for cont = 2:NumMedidas
    Matriz(:,cont-1) = (MediaImpVet(:,1) - MediaImpVet(:,cont)).^2 ./ NumPontos;
end
%3.6.2.3 Calcular o somatório para quantificar. Obtém-se um vetor de
%valores de RMSD (um para cada medida).

```

```

RMSDb = sum(Matriz, 1).^0.5;

%Critério de Chauvenet para o baseline RMSD
x=RMSDb;
mediasemdanoR=mean(RMSDb)
[clean,outlier,index] = chauvenet(x);

```

```

mediasemdanoR =

    0.158918780260957

```

```

x=clean;
if length(x)<3
    fprintf('Não há amostras suficientes que satisfaçam o critério de Chauvenet para realização do teste de normalidade.')
else

```

media do critério de chauvenet

```

mediachauvenetRMSD=mean(x)
% Dados eliminados pelo critério de Chauvenet
RMSDx=x;

```

```

mediachauvenetRMSD =

    0.147287072233874

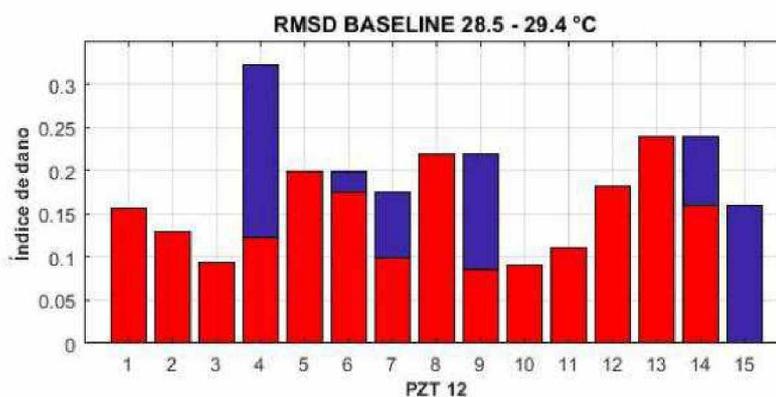
```

Cálculo RMSD BASELINE

```

set(figure, 'OuterPosition', pos1 ); %Cria e posiciona um boxplot de métricas
bar(RMSDb);
name = ['Índice de Dano'];
ylabel (name);
name = [ 'P2T' num2str(ListaP2Ts(contP2Ts)) ' - Matrizes RMSD' ];
title ( name );
nom(kkk) = { ' ' };
for kkk=1:NumMedidas-1
    nom(kkk)= { strcat('R',num2str(kkk))};
end
title(title_RMSD_BASELINE, 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 11, 'fontWeight', 'bold')
xlabel(Y, 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 10, 'fontWeight', 'bold')
ylabel('Índice de dano ', 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 10, 'fontWeight', 'bold')
set(gcf, 'color', 'white', 'paperunits', 'centimeters', 'paperposition',[0 0 8 6])
grid on
hold on
bar(x,'r')
hold on
%set(gca, 'fontsize', 11, 'FontName', 'Arial')

```



Teste de Normalidade Shapiro Wilk

```
alpha=0.001;
[H, pValue, W] = swtest(x, alpha);
HRMSD=H
if H==0
    thresholdR = mean(x) + 3*std(x);
    fprintf('Com 99,9 por cento de confiança o threshold para detecção de dano da métrica RMSD é %d.',thresholdR);
else
    thresholdR = mean(x) + 10*std(x);
    fprintf('Com 88,89 por cento de confiança o threshold para detecção de dano da métrica RMSD é %d.',thresholdR);
end
```

```
HRMSD =
    logical
    0
```

Plot threshold baseline RMSD

```
plot(xlim,[thresholdR thresholdR], 'r', 'linewidth',1.2)
print -dtiffn -r400 RMSDb.tif
```

```
else
```

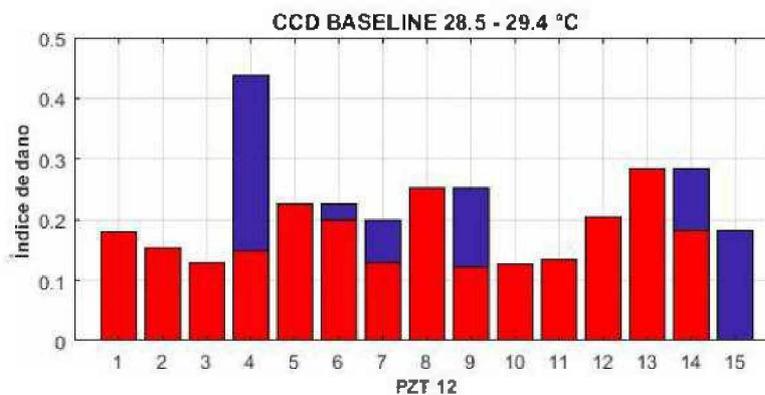
media do critério de chauvenet

```
mediachauvenetCCD=mean(x)
% Dados eliminados pelo critério de Chauvenet
CCDX=x;
```

```
mediachauvenetCCD =
    0.176444522427973
```

Cálculo CCD BASELINE

```
set(figure, 'OuterPosition', pos1 ); %Cria e posiciona um boxplot de métricas
bar(CCDb);
name = ['Índice de dano'];
ylabel (name);
name = [ 'PZT' num2str(ListaPZTs(contPZTs)) ' - Métrica CCD' ];
title ( name );
nom(kkk) = { ' ' };
for kkk=1:NumMedidas-1
    nom(kkk)= [ strcat('R',num2str(kkk))];
end
title(title_CCD_BASELINE, 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 11, 'fontWeight', 'bold')
xlabel(Y, 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 10, 'fontWeight', 'bold')
ylabel('Índice de dano ', 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 10, 'fontWeight', 'bold')
set(gcf, 'color','white','paperunits','centimeters','paperposition',[0 0 8 5])
grid on
hold on
bar(x, 'r')
hold on
```



Teste de Normalidade Shapiro Wilk

```

alpha=0.001;
[H, pValue, W] = swtest(x, alpha);
HCCD=H
if H==0
    thresholdC = mean(x) + 3*std(x);
    fprintf('Com 99,9 por cento de confiança o threshold para detecção de dano da métrica CCD é
    %d.', thresholdC);
else
    thresholdC = mean(x) + 18*std(x);
    fprintf('Com 88,89 por cento de confiança o threshold para detecção de dano da métrica CCD é
    %d.', thresholdC);
end

```

```

HCCD =

    logical

     0

```

```

end

```

```

mediasemdanoC =

    0.193956191883272

```

Plot threshold baseline

```

plot(xlim,[thresholdC thresholdC], 'r', 'linewidth',1.2)
print -dtiffn -r400 CCB.tiff
thresholdC

```

```

%3.6.1.5 Limpa a área da memória
clear Matriz; %Limpa a área da memória

```

```

thresholdC =

    0.328068841895004

```

```

%3.6.3 M - Diferença média
%3.6.3.1 Cálculo da matriz de diferenças
for cont = 2:NumMedidas
    Matriz(:,cont-1) = (MediaImpVet(:,1) - MediaImpVet(:,cont)).^2 ;
end

```

```

%3.6.9.2 Calcular o somatório para quantificar.
Mb = sum(Matriz, 1);

%Critério de Chauvenet para o baseline da métrica M
x=Mb;
mediasemdanoM=mean(Mb)
[clean,outlier,index] = chauvenet(x);
x=clean;
if length(x)<3
    fprintf('Não há amostras suficientes que satisfaçam o critério de chauvenet para realização
do teste de normalidade.')
else

```

media do critério de chauvenet

```

mediachauvenetM=mean(x)
% Dados eliminados pelo critério de Chauvenet
MX=x;

```

```

mediachauvenetM =

    24.011416245704

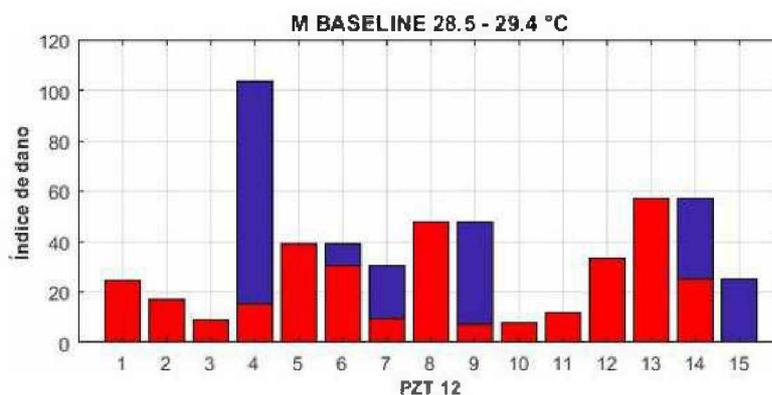
```

Cálculo M BASELINE

```

set(figure, 'OuterPosition', pos1 ); %Cria e posiciona um boxplot de métricas
bar(Mb);
name = ['Índice de Dano'];
ylabel (name);
name = [ 'P2T' num2str(ListaP2Ts(contP2Ts)) ' - Métrica CCD' ];
title ( name );
nom(kkk) = { ' ' };
for kkk=1:NumMedidas-1
    nom(kkk)= { strcat('E',num2str(kkk))};
end
title(title_M_BASELINE, 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 11, 'fontWeight', 'bold')
xlabel(Y, 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 10, 'fontWeight', 'bold')
ylabel('Índice de dano ', 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 10, 'fontWeight', 'bold')
set(gcf, 'color', 'white', 'paperunits', 'centimeters', 'paperposition', [0 0 8 6])
grid on
hold on
bar(x, 'r')
hold on

```



Teste de Normalidade Shapiro Wilk

```
alpha=0.001;
[H, pValue, W] = swtest(x, alpha);
HM=H
if H==0
    thresholdM = mean(x) + 3*std(x);
    fprintf('Com 99,9 por cento de confiança o threshold para detecção de dano da métrica M é %d\n',thresholdM);
else
    thresholdM = mean(x) + 10*std(x);
    fprintf('Com 99,99 por cento de confiança o threshold para detecção de dano da métrica M é %d\n',thresholdM);
end
```

```
HM =
    logical
     0
```

Plot threshold baseline

```
plot(xlim,[thresholdM thresholdM], 'r', 'linewidth',1.2)
print -dtiffn -r400 Mb.tif
thresholdM
```

```
thresholdM =
    71.4538022463088
```

```
end
```

```

%3.6.1.5 Limpa a área da memória
clear Matriz; %Limpa a área da memória

```

```

% =====

```

```

mediasemdanom =

```

```

    29.3058351056335

```

```

end %fim do if que verifica o número de medidas

```

```

end %% fim for de leitura dos arquivos de PZT

```

```

% =====
% =====
% =====
% =====
% =====
% =====
% =====

```

```

% Dano 1

```

```

%2. Dados sobre a análise

```

```

ListaPZTs      = [PZT];
NumMedidas     = QTD_DANO; %Baseline + medidas com falhas
%Variáveis usadas no sistema
NumPZTs        = length(ListaPZTs);
umaVez = 1;
valoresI       = zeros(10,NumMedidas); %Contém as medidas elétricas de corrente
valoresV       = zeros(10,NumMedidas); %Contém as medidas elétricas de voltagem
valoresP       = zeros(10,NumMedidas); %Contém as medidas elétricas de potência
temp           = zeros(10, 3);
freqVet        = zeros(10,NumPZTs);
NumPontos      = 0;
%zerar variáveis de plotagem
zz=0;
yy=0;
%3. Início do processamento
for contPZTs=1:NumPZTs % Dados de cada PZT

```

```

    for contMedidas=1:NumMedidas % Dados das medidas de um dado PZT
        %3.1. Especificar o nome do arquivo
        arquivo = ['PZT' num2str(ListaPZTs(contPZTs)) '_00' num2str(contMedidas) '.SySEM'];
        %3.2.abrir arquivo
        temp = importdata(arquivo,'\t',1);%load(arquivo);
    end
end

```

```

%Aloca as dadas uma vez
if(umaVez == 1)
    NumPontos = length(temp.data);
    MediaImpVet = zeros(NumPontos,NumMedidas); %Contém médias de todas as medidas
    valoresI = zeros(NumPontos,NumMedidas); %Contém as medidas de corrente
    valoresPhase = zeros(NumPontos,NumMedidas); %Contém as medidas de potência
    valoresV = zeros(NumPontos,NumMedidas); %Contém as medidas elétricas
    freqVet = zeros(NumPontos,NumPZTs);
    temperatura = repmat({'Texto'},NumMedidas,1); %cria um vetor de strings
    umaVez = 0;
end
%3.3 Isolar os vetores com os pontos de frequência, impedância e desvio
FreqVet(:,contPZTs) = temp.data(:,1); %salva o vetor que contém a frequência
MediaImpVet(:,contMedidas) = temp.data(:,2); %salva o vetor que contém a impedância res
istiva
    temperatura(contMedidas) = cell2mat(temp.txtdata);
end %% fim do for de leitura e processamento dos arquivos de um único PZT
%Obtém o número de pontos do arquivo
clear temp;

```

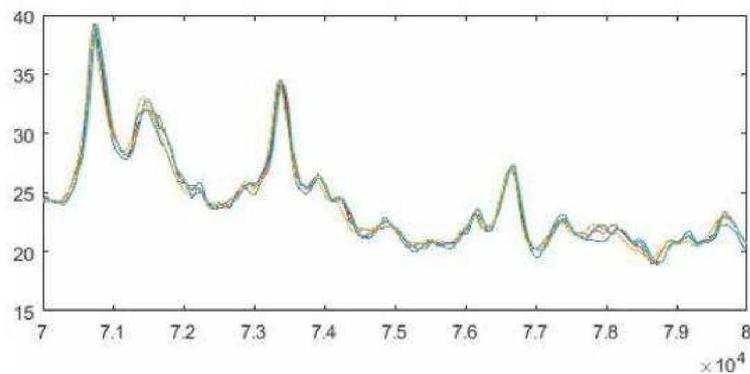
3.5 Montar impressão do plot com médias e desvios padrão

```

%3.5.1 Preparar localização das janelas
fig = figure; %Posição da plotagem das assinaturas de impedância
scnsz = get(0,'ScreenSize');
position = get(fig,'Position');
outerpos = get(fig,'OuterPosition');
borders = outerpos - position;
edge = -borders(1)/2;
tempe = mod(zz,3);
if tempe == 0
    zz=1;
else
    zz=zz+1;
end
pos1 = [ (zz-1)*scnsz(3)/3 + edge,...
        scnsz(4) * (2/3)-(yy)*scnsz(4) * (1/3),...
        scnsz(3)/3 - edge,...
        scnsz(4)/3];
if(mod(contPZTs,3) == 0)
    yy = yy+1;
end
set(fig, 'OuterPosition', pos1);
%3.5.2 Efetuar a plotagem do gráfico com as assinaturas de
%impedância de todas as medidas
nom = repmat({'Baseline'},NumMedidas,1); %cria um vetor de strings
nom(1) = { strcat('Baseline', ' ',cell2mat(temperatura(1)), 'C')};

plot(FreqVet(:,contPZTs), MediaImpVet);
for kkk=2:NumMedidas
    nom(kkk) = { strcat('Estado', num2str(kkk-1), ' ',cell2mat(temperatura(kkk)), 'C')};
};
%
    nom(kkk) = { strcat(num2str(Temperaturas(kkk-1)), 'C')};
end
%legend(nom);

```



%Plot de todas as assinaturas com dano

```

ylabel ('Impedância [ohms]');
xlabel ('Frequência [Hz]');
name = [ 'PZT' num2str(ListaPZTs(contPZTs)) ' - title_IS_DANO]; title ( name );
axis tight;
set(gcf,'color','white','paperunits','centimeters','paperposition',[0 0 7.4 6]);
grid on

set(0,'DefaultAxesFontName','Arial')
set(0,'DefaultAxesFontSize',11)
set(gca,'fontSize',11,'FontName','Arial');
set(findall(fig,'type','text'),'fontSize',11,'fontWeight','bold');
print -dtiffn -r300 Assinaturadeimpdancia.tif

```

Somente calcular as métricas se o número de medidas é superior a 01

```

if(NumMedidas > 1)

    %3.6 Efetuar o cálculo das MÉTRICAS =====
    %3.6.1 RMSD
    %3.6.1.1 Obter matriz de diferenças quadráticas entre Matriz e MediaImpVet
    for cont = 2:NumMedidas
        Matriz(:,cont-1) = ((MediaImpVet(:,1) - MediaImpVet(:,cont)).^2) ./ NumPontos;
    end
    %3.6.2.3 Calcular o somatório para quantificar. Obtém-se um vetor de
    %valores de RMSD (um para cada medida).
    RMSD = sum(Matriz, 1).^0.5;

    %3.6.1.5 Limpa a área da memória
    clear Matriz; %limpa a área da memória

    %-----
    %3.6.6 CCD - Desvio da Correlação cruzada
    %3.6.6.1 Obter as médias de cada medida e seus desvios
    mediasMedidas = mean(MediaImpVet);
    desvioMedidas = std(MediaImpVet);
    %3.6.6.2 Cálculo da matriz de diferenças
    for cont = 2:NumMedidas

```

```

        Matriz(:,cont-1) = ( (MediaImpVet(:,1) - mediasMedidas(1)) .* ( (MediaImpVet(:,con
t) - mediasMedidas(cont)) ) ) ./ (desvioMedidas(1)*desvioMedidas(cont));
    end
    %3.6.6.3 Calcular o somatório para quantificar. Obtém-se um vetor de
    %valores de RMSD4 (um para cada medida).
    CCD = 100*(1 - (1/NumPontos)*sum(Matriz, 1));
    %3.6.5.4 Limpa a área da memória
    clear Matriz; %Limpa a área da memória
%=====
    %3.6.9 M - Diferença média
    %3.6.9.1 Cálculo da matriz de diferenças
    for cont = 2:NumMedidas
        Matriz(:,cont-1) = (MediaImpVet(:,1) - MediaImpVet(:,cont)).^2 ;
    end
    %3.6.9.2 Calcular o somatório para quantificar.
    M = sum(Matriz, 1);

    %3.6.1.5 Limpa a área da memória
    clear Matriz; %Limpa a área da memória
%=====
end %fim do if que verifica o número de medidas

```

```
end %% fim for de leitura dos arquivos de P2T
```

RMSD

```

MediaRMSD=mean(RMSD)

set(figure, 'OuterPosition', pos1 ); %Cria e posiciona um boxplot de métricas
bar(RMSD);
name = ['Índice de Dano'];
ylabel (name);
name = [ 'P2T' num2str(ListaP2Ts(contP2Ts)) ' - Métrica RMSD' ];
title ( name );
nom(kkk) = { ' ' };
for kkk=1:NumMedidas-1
    nom(kkk)= [ strcat('E',num2str(kkk))];
end

%PLOT
title(title_RMSD_DANO, 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 11, 'fontWeight', 'bold')
xlabel(Y, 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 10, 'fontWeight', 'bold')
ylabel('Índice de dano ', 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 10, 'fontWeight', 'bold')
set(gcf,'color','white','paperunits','centimeters','paperposition',[0 0 8 6])
grid on

hold on
plot(xlim,[thresholdR thresholdR], 'r', 'LineWidth',1.2)
print -dtiffn -r400 RMSDthreshold.tif

```

```
MediaRMSD =
```

```
0.633635544500072
```

CCD

```

mediaCCD=mean(x)
%%Plot sem e com Chauvenet + threshold para metrica CCD
%3.6.6.4 Cria a figura com o boxplot e o posiciona na posição da
%assinatura média de impedância
fig = figure;
set(fig, 'OuterPosition', pos1 );
bar(CCD);
name = ['Índice de Dano [%]' ];
ylabel (name);
xlabel ('Estados');
name = [ 'PST' num2str(ListaPZTs(contPZTs)) ' - Métrica CCD' ];
title ( name );
% Alterar dos do eixo X usando a informação das temperaturas
nom(kkk) = { ' ' };
for kkk=1:NumMedidas-1
    nom(kkk)= { strcat('E',num2str(kkk))};
end

% plot CCD
title(title_CCD_DANO, 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 11, 'fontWeight', 'bold')
xlabel(Y, 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 10, 'fontWeight', 'bold')
ylabel('Índice de dano ', 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 10, 'fontWeight', 'bold')
set(gcf, 'color', 'white', 'paperunits', 'centimeters', 'paperposition', [0 0 8 6])
grid on
hold on
plot(xlim,[thresholdC thresholdC], 'r', 'LineWidth',1.2)
print -dtiffn -r400 CCDthreshold.tif

```

```
mediaCCD =
```

```
24.011416245704
```

```
Warning: The requested print was not completed because the figure is invalid.
This may be happening because the figure was closed before the print could
complete.
```

M

```

mediaM=mean(x)
%%Plot sem e com Chauvenet + threshold para metrica M
%3.6.6.4 Cria a figura com o boxplot e o posiciona na posição da
%assinatura média de impedância
fig = figure;
set(fig, 'OuterPosition', pos1 );
bar(M);
name = ['Índice de Dano [%]' ];
ylabel (name);
xlabel ('Estados');
% axis([-0.1 10 0 1]); %Definir as escalas de visualização dos boxplots
name = [ 'PZT' num2str(ListaPZTs(contPZTs)) ' - Métrica M' ];

```

```
title ( name );
% Alterar dos do eixo X usando a informação das temperaturas
nom(kkk) = [ ' ' ];
for kkk=1:NumMedidas-1
    nom(kkk)= ( strcat('E',num2str(kkk)));
end
$PLOT M
title(title_M_DANO, 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 11, 'fontWeight', 'bold')
xlabel(Y, 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 10, 'fontWeight', 'bold')
ylabel('Índice de dano ', 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 10, 'fontWeight', 'bold')
set(gcf,'color','white','paperunits','centimeters','paperposition',[0 0 8 6])
grid on
hold on
plot(xlim,[thresholdM thresholdM], 'r', 'LineWidth',1.2)
print -dtiffn -r400 Mthreshold.tif
```

mediaM ~

24.011416245704

A.4- Algoritmo de limpeza de dados desenvolvidos no MATLAB®.

```
function [clean,outlier,index] = chauvenet(x)

% INPUT = column/row vector
% OUTPUT
% clean = column vector of cleaned x
% outlier = value(s) of outliers
% index = index(es) of outliers
% 1.0, Nov 2016, Rod Letchford
% 2.0, Jan 2017, Rod Letchford

tau = (x-mean(x))./std(x);
chauv = norminv(1-1/4/length(x));
clean = []; outlier = []; index = [];

for n = 1:length(x)
    if tau(n) < chauv
        clean = vertcat(clean,[x(n)]);
    else
        outlier = vertcat(outlier,[x(n)]);
        index = vertcat(index,[n]);
    end
end
```

Not enough input arguments.

Error in chauvenet (line 11)
tau = (x-mean(x))./std(x);

A.5- Algoritmo dos cálculos do baseline estatístico desenvolvidos no MATLAB®.

Contents

- Carregando os arquivos
- Plot da Matriz da Média
- Salvando arquivo da Matriz da média

```
clear all
clc
close all
```

Carregando os arquivos

```
arquivo = fopen('FZT11_00056.SySHM');
A1 = fscanf(arquivo,'%f',[5 1000]);
arquivo = fopen('FZT11_00057.SySHM');
A2 = fscanf(arquivo,'%f',[5 1000]);
arquivo = fopen('FZT11_00058.SySHM');
A3 = fscanf(arquivo,'%f',[5 1000]);
arquivo = fopen('FZT11_00059.SySHM');
A4 = fscanf(arquivo,'%f',[5 1000]);
arquivo = fopen('FZT11_00060.SySHM');
A5 = fscanf(arquivo,'%f',[5 1000]);
arquivo = fopen('FZT11_00061.SySHM');
A6 = fscanf(arquivo,'%f',[5 1000]);
arquivo = fopen('FZT11_00062.SySHM');
A7 = fscanf(arquivo,'%f',[5 1000]);
arquivo = fopen('FZT11_00063.SySHM');
A8 = fscanf(arquivo,'%f',[5 1000]);
arquivo = fopen('FZT11_00064.SySHM');
A9 = fscanf(arquivo,'%f',[5 1000]);
arquivo = fopen('FZT11_00158.SySHM');
A10 = fscanf(arquivo,'%f',[5 1000]);
arquivo = fopen('FZT11_00162.SySHM');
A11 = fscanf(arquivo,'%f',[5 1000]);
arquivo = fopen('FZT11_00163.SySHM');
A12 = fscanf(arquivo,'%f',[5 1000]);
arquivo = fopen('FZT11_00164.SySHM');
A13 = fscanf(arquivo,'%f',[5 1000]);
arquivo = fopen('FZT11_00185.SySHM');
A14 = fscanf(arquivo,'%f',[5 1000]);
arquivo = fopen('FZT11_00196.SySHM');
A15 = fscanf(arquivo,'%f',[5 1000]);
arquivo = fopen('FZT11_00197.SySHM');
A16 = fscanf(arquivo,'%f',[5 1000]);
arquivo = fopen('FZT11_00198.SySHM');
A17 = fscanf(arquivo,'%f',[5 1000]);
arquivo = fopen('FZT11_00199.SySHM');
A18 = fscanf(arquivo,'%f',[5 1000]);

% Cálculo da média
for i=1:1000
```

```

    a = [A1(2,i)] + [A2(2,i)]+[A3(2,i)] +[A4(2,i)]+[A5(2,i)]+[A6(2,i)] +[A7(2,i)]+[A8(2,i)]
    + [A9(2,i)]+[A10(2,i)]+[A11(2,i)] +[A12(2,i)]+[A13(2,i)] + [A14(2,i)]+[A15(2,i)] +[A16(2,i)]+
    [A17(2,i)] +[A18(2,i)];
    [matriz(2,i)] = a/42;

    [matriz(1,i)] = [A1(1,i)];
end

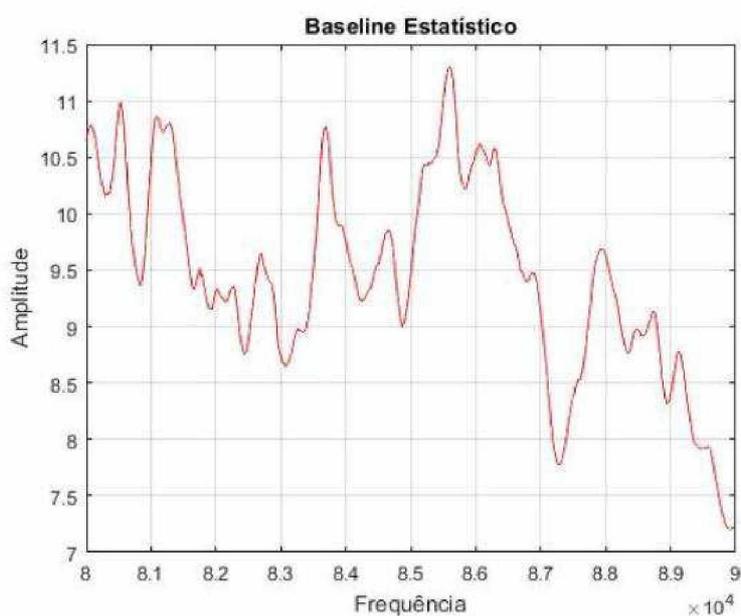
```

Plot da Matriz da Média

```

XX=[matriz(1,:)];
YY=[matriz(2,:)];
plot(XX,YY,'r')
grid on
xlabel('Frequência')
ylabel('Amplitude')
title('Baseline Estatístico')

```



Salvando arquivo da Matriz da média

```

M = matriz';
dlmwrite('P2T11_00001.SySRM',M,'delimiter','\t','precision',8)

```