



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**Uma Contribuição aos Sistemas de Monitoramento de Integridade
Estrutural Baseados na Impedância Eletromecânica sob
Aplicações de Baixa Relação Sinal-Ruído**

Bruno Albuquerque de Castro

Bauru
2019



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

“Uma Contribuição aos Sistemas de Monitoramento de Integridade Estrutural Baseados na Impedância Eletromecânica sob Aplicações de Baixa Relação Sinal-Ruído”

BRUNO ALBUQUERQUE DE CASTRO

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia –
UNESP – Campus de Bauru, para obtenção do
título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Fabrício Guimarães Baptista
Coorientador: Prof. Dr. Francesco Ciampa

Bauru
2019

Castro, Bruno Albuquerque de.

Uma Contribuição aos Sistemas de Monitoramento de Integridade Estrutural Baseados na Impedância Eletromecânica sob Aplicações de Baixa Relação Sinal-Ruído / Bruno Albuquerque de Castro, 2019
83 f.

Orientador: Prof. Dr. Fabricio Guimarães Baptista

Tese (Doutorado)- Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2019

1. Impedância eletromecânica. 2. Compensação de ruído. 3. Transformada wavelet. 4. Critério de Hinkley. 4. Correlação cruzada. 5. Técnica cromática. 6. CCSD. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE BRUNO ALBUQUERQUE DE CASTRO, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 01 dias do mês de novembro do ano de 2019, às 14:00 horas, no(a) Anfiteatro da Pós-graduação / FEB, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. FABRICIO GUIMARÃES BAPTISTA - Orientador(a) do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. ANDRE LUIZ ANDREOLI do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. PAULO ROBERTO DE AGUIAR do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. ROSEMAR BATISTA DA SILVA do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade Federal de Uberlândia - UFU, Prof. Dr. BRENO ORTEGA FERNANDEZ do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Centro Universitário de Lins - UNILINS, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da TESE DE DOUTORADO de BRUNO ALBUQUERQUE DE CASTRO, intitulada **UMA CONTRIBUIÇÃO AOS SISTEMAS DE MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL BASEADOS NA IMPEDÂNCIA ELETROMECÂNICA SOB APLICAÇÕES DE BAIXA RELAÇÃO SINAL-RUÍDO**. Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: Aprovado . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. FABRICIO GUIMARÃES BAPTISTA 

Prof. Dr. ANDRE LUIZ ANDREOLI 

Prof. Dr. PAULO ROBERTO DE AGUIAR 

Prof. Dr. ROSEMAR BATISTA DA SILVA 

Prof. Dr. BRENO ORTEGA FERNANDEZ 

Dedico este trabalho em primeiro lugar aos meus pais, José Roberto e Rose, a minha avó Therezinha e a minha tia Cristiane (in memoriam).

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus.

Ao meu orientador, Professor Dr. Fabricio Guimarães Baptista, pelo acolhimento e profundo aprendizado que absorvi durante esta jornada. Agradeço também pela orientação, dedicação, e paciência, que, certamente, me tornaram um melhor acadêmico.

Ao meu coorientador, Professor Francesco Ciampa da *University of Surrey*, Reino Unido, pelo aprendizado, oportunidades concedidas e por contribuir efetivamente com este trabalho. Agradeço ao período de doutorado sanduíche que me proporcionou profundo aprimoramento como pesquisador e ser humano.

Ao apoio dado pelos meus pais, José Roberto e Rose, e meus irmãos, Rafael e Larissa. Agradeço o apoio da minha avó e de todos os meus familiares.

Aos Professores André Luiz Andreoli, José Alfredo Covolan Ulson, Paulo Roberto de Aguiar e Fernando de Souza Campos pelos trabalhos realizados em conjunto e também pelos conselhos valiosos.

Aos meus amigos e companheiros do Laboratório de Transdutores e Aquisição de Dados (LTAD) da Unesp.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, pela bolsa de doutorado e período sanduíche na *University of Surrey*, Reino Unido (Processos 2015/24903-5 e 2018/23737-2).

“Remember to look up at the stars and not down at your feet. Try to make sense of what you see and wonder about what makes the universe exist. Be curious. And however difficult life may seem, there is always something you can do and succeed at. It matters that you don't just give up.”

Stephen Hawking

RESUMO

Os sistemas de monitoramento de estruturas aeroespaciais, civis e navais, também conhecidos como sistemas de SHM (“*Structural Health Monitoring*”), têm como objetivo a detecção de danos estruturais em estágio inicial e, desta forma, se garantir a segurança dos usuários e reduzir os custos com manutenção. Entre as várias técnicas existentes para a detecção de danos, a técnica da impedância eletromecânica (E/M) se destaca pela sua metodologia simples e por utilizar transdutores piezelétricos de baixo custo. Basicamente, o diagnóstico de falhas estruturais se dá pela extração da impedância elétrica de um transdutor acoplado em uma estrutura hospedeira, e o diagnóstico estrutural é realizado pela aplicação de índices estatísticos como o desvio da raiz média quadrática – *root mean square deviation* (RMSD) – que é baseado na norma Euclidiana e o desvio do coeficiente de correlação – *correlation coefficient deviation metric* (CCDM) – baseado no coeficiente de correlação. Apesar de ser uma técnica promissora e eficaz, as pesquisas envolvendo a técnica da impedância eletromecânica são realizadas em laboratórios sob condições ideais. Todavia, na prática, durante a medição de impedância, é inevitável a contaminação dos sinais por ruído, o que pode influenciar e prejudicar significativamente o diagnóstico de danos estruturais, limitando a aplicabilidade da técnica E/M. Tomando como base essa questão, o objetivo deste trabalho é explorar novas técnicas de processamento de sinais oriundos das medições de impedância de transdutores piezelétricos, em ambientes que produzem baixa relação sinal-ruído (SNR), visando a expansão da aplicabilidade dessa técnica de monitoramento. Para isto, utilizou-se estruturas de alumínio e fibra de carbono, muito utilizadas pela indústria aeroespacial. Foi realizado um estudo da influência do ruído nos sinais de impedância, bem como nas técnicas tradicionais de caracterização de falha. Como a finalidade é desenvolver métodos inéditos de caracterização e diagnóstico de danos para aplicações em ambientes onde o ruído estrutural se faz presente, três diferentes técnicas de processamento digital de sinais foram propostas como métodos de diagnóstico de falhas para este tipo de aplicação. Essas técnicas avançadas para o tratamento dos sinais dos transdutores piezelétricos, tiveram como base o critério estatístico de Hinkley, a correlação cruzada de sinais e técnica cromática de separação de dados. Os resultados obtidos indicaram que os novos métodos propostos foram eficazes no diagnóstico de falhas estruturais expandindo esta promissora técnica de monitoramento estrutural em aplicações onde o ruído estrutural não é controlado, como nas aplicações reais.

Palavras-chave: impedância eletromecânica, compensação de ruído, transformada wavelet, critério de Hinkley, correlação cruzada, técnica cromática, CCSD.

ABSTRACT

Structural Health Monitoring (SHM) systems aim to avoid and detect structural damages at the initial stage in order to promote human safety and reduction of maintenance costs. Among numerous SHM methods for damage detection, the electromechanical impedance (EMI) technique stands out to be a simple methodology that uses low-cost piezoelectric transducers. Basically, the structural damage diagnosis is achieved by extracting the electrical impedance of a transducer attached to a host structure and the failure quantification is accomplished by traditional statistical indices such as the root mean square deviation (RMSD) and the correlation coefficient deviation metric (CCDM). Although the EMI stands out to be an effective and promising SHM technique, research involving the electromechanical impedance is commonly performed in laboratories under ideal conditions. However, in practical applications, during the impedance measurements, it's inevitable the signal contamination by noise, which can significantly influence and impair the diagnosis of structural condition, limiting the applicability of the EMI. Based on this issue, the objective of this work is to explore new signal processing techniques from impedance measurements of piezoelectric transducers, aiming to expand the applicability of this promising SHM approach for low signal-to-noise ratio inspections conditions. Experimental tests were carried out on a carbon fiber reinforced plate and an aluminum component, which are widely used in the aerospace and naval industry. A study of the noise influence on the traditional damage characterization was accomplished and three types of noise compensation techniques were proposed in this work that aims to expand the applicability of EMI technique in noisy inspections. These advanced signal processing techniques were based on the Hinkley statistical criterion, the cross-correlation function and the chromatic technique of data cluster. The results indicated that the newly proposed methods were effective in the diagnosis of structural failure, expanding the applicability of this promising structural monitoring technique for inspections where structural noise is not controlled, as in real applications.

Keywords: electromechanical impedance, noise compensation, wavelet transform, Hinkley criterion, cross-correlation, chromatic technique, CCSD.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Configuração básica da técnica E/M.	20
Figura 2 - Sistema utilizado para medição de impedância e geração de ruído branco.	23
Figura 3 - Diagrama de decomposição wavelet.	27
Figura 4 - Diafragmas piezelétricos acoplados na placa de material compósito.	32
Figura 5 – Sinal de resposta. Domínio do tempo (a) e FFT (b) para inspeção sem ruído estrutural.	34
Figura 6 - Curvas para (a) parte real, (b) imaginária para uma inspeção íntegra com e sem ruído estrutural.	35
Figura 7 - Curvas para (a) coeficientes de aproximação e (b) coeficientes de detalhe para uma inspeção íntegra com e sem ruído estrutural. Nível 3 de decomposição.	35
Figura 8 - CCDM para a parte (a) real e (b) imaginária para uma inspeção controlada (sem a presença de ruído estrutural).	36
Figura 9 - CCDM para a parte (a) real e (b) imaginária para inspeções com ruído estrutural e baseline extraída em ambiente controlado.	37
Figura 10 - CCDM para os (a) níveis de aproximação e (b) níveis de detalhe em uma inspeção controlada.	39
Figura 11 - CCDM para os níveis de (a) aproximação e (b) detalhe para inspeções com ruído estrutural e baseline extraída em ambiente controlado.	39
Figura 12 - CCDM para a parte (a) real e (b) imaginária para inspeções e baseline extraída com ruído estrutural.	41
Figura 13 - CCDM para os níveis de (a) aproximação e (b) detalhe para inspeções e baseline extraída com ruído estrutural.	42
Figura 14 – Influência do ruído na curva de Hinkley.	43
Figura 15 - CCDM para análise de Hinkley em uma inspeção controlada (sem a presença de ruído estrutural).	44
Figura 16 - CCDM para a análise de Hinkley com baseline extraída (a) sem e (b) com a presença de ruído estrutural.	44
Figura 17 - CCDM para a análise de Hinkley com baseline extraída (a) sem e (b) com a presença de ruído estrutural.	46
Figura 18 – Procedimento experimental para (a) estrutura compósita e (b) metálica.	49
Figura 19 – Técnica cromática tradicional para (a) estrutura compósita e (b) metálica. Técnica modificada para (c) estrutura compósita e (d) metálica.	51
Figura 20 – Representação da técnica cromática para o material compósito em mapas bidimensionais formados por: (a) BxH_i , (b) $Bx\omega_c$ e (c) $H_ix\omega_c$	53
Figura 21 – Representação da técnica cromática para a estrutura de alumínio em mapas bidimensionais formados por: (a) BxH_i , (b) $Bx\omega_c$ e (c) $H_ix\omega_c$	54
Figura 22 - Procedimento experimental.	59
Figura 23 - Diferença da correlação cruzada para a banda de 0 a 10 kHz. Baselines extraídas para nível de ruído de 1 Vp e inspeções com ruídos de (a) 0,1 Vp e (b) 10Vp. Baselines extraídas para nível de ruído de 10 Vp e inspeções com ruídos de (c) 0,1 Vp e (d) 10Vp.	61
Figura 24 - CCSD para baseline extraída em nível de ruído de 0,1 V para as bandas de (a) 0 – 10 kHz e (b) 60 – 70 kHz.	63

Figura 25 - CCSD médio normalizado para <i>baseline</i> extraída em nível de ruído de 0,1 V.	64
Figura 26 - CCSD para <i>baseline</i> extraída em nível de ruído de 1 V para as bandas de (a) 0 – 10 kHz e (b) 60 – 70 kHz.	65
Figura 27 - CCSD médio normalizado para <i>baseline</i> extraída em nível de ruído de 1 V.	66
Figura 28 - CCSD para <i>baseline</i> extraída em nível de ruído de 10 V para as bandas de (a) 0 – 10 kHz e (b) 60 – 70 kHz.	67
Figura 29 - CCSD para médio normalizado para <i>baseline</i> extraída em nível de ruído de 10 V.	68
Figura 30 - Diferença da correlação cruzada para a nível wavelet de aproximação 12. <i>Baselines</i> extraídas para nível de ruído de 1 Vp e inspeções com ruídos de (a) 0,1 Vp e (b) 10Vp. <i>Baselines</i> extraídas para nível de ruído de 10 Vp e inspeções com ruídos de (c) 0,1 Vp e (d) 10Vp.	69
Figura 31 – CCSD obtido para uma <i>baseline</i> extraída com a presença de ruído de 0,1 V e nível wavelet 7 e (b) 19; (c) com ruído de 1 V e nível wavelet 7 e (d) 19; (e) com ruído de 10 V e nível wavelet 7 e (f) 19.	71
Figura 32 – CCSD médio normalizado para <i>baselines</i> extraídas com (a) 0,1 V, (b) 1V e (c) 10 V de ruído estrutural.	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Nível de ruído em estrutura íntegra que produz valores de CCDM semelhantes aos valores encontrados para inspeções sem ruído, quando a estrutura sofre os danos inseridos (análise de impedância).....	38
Tabela 2 – Nível de ruído em estrutura íntegra que produz valores de CCDM semelhantes aos valores encontrados para inspeções sem ruído, quando a estrutura sofre os danos inseridos (análise de aproximação).....	40
Tabela 3 – Nível de ruído em estrutura íntegra que produz valores de CCDM semelhantes aos valores encontrados para inspeções sem ruído, quando a estrutura sofre os danos inseridos (análise de detalhe)	41
Tabela 4 – Nível de ruído em estrutura íntegra que produz valores de CCDM semelhantes aos valores encontrados para inspeções sem ruído, quando a estrutura sofre os danos inseridos (análise de Hinkley)	45

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ADC	<i>Analog-to-digital converter</i> - Conversor Analógico – Digital
CCDM	<i>Correlation Coefficient Deviation Metric</i> - Desvio do coeficiente de correlação
CCSD	<i>Cross-correlation square deviation</i> – Desvio quadrático da correlação cruzada
DAC	<i>Digital-to-analog converter</i> - Conversor Digital – Analógico
DAQ	<i>Data Acquisition</i> – Dispositivo de aquisição de dados
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i> – Transformada Rápida de Fourier
FIR	<i>Finite impulse response</i> – Resposta Finita ao Impulso
FRF	<i>Frequency Response Function</i> – Função de Resposta em Frequência
E/M	Eletromecânica
EMI	<i>Electromechanical Impedance</i> – Impedância eletromecânica
NDT	<i>Non-Destructive Technique</i> – Testes não destrutivos
PZT	<i>Pb-Lead Zirconate Titanate</i> – Titanato zirconato de chumbo
TC	<i>Técnica Cromática</i>
RMSD	<i>Root Mean Square Deviation</i> – Desvio da raiz média quadrática
SHM	<i>Structural Health Monitoring</i> – Monitoramento de integridade estrutural
SNR	<i>Signal-to-noise ratio</i> – Relação Sinal-Ruído
USB	<i>Universal Serial Bus</i> – Barramento serial universal

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
S	<i>Deformação mecânica ou Strain</i>	<i>Adimensional</i>
V	<i>Campo Elétrico</i>	<i>V / m</i>
$H(f)$	<i>Função de Resposta em Frequência - FRF</i>	<i>Adimensional</i>
N	<i>Número de amostras de um sinal</i>	<i>Adimensional</i>
$S_B(f)$	<i>Assinatura de impedância para a estrutura íntegra</i>	Ω
$S_D(f)$	<i>Assinatura de impedância para a estrutura com dano</i>	Ω
R_s	<i>Resistor Série</i>	Ω
$S_{xx}(f)$	<i>Autoespectro de potência</i>	<i>Adimensional</i>
$S_{xy}(f)$	<i>Espectro de potência cruzado</i>	<i>Adimensional</i>
T	<i>Tensão mecânica ou stress</i>	<i>N / m</i>
E	<i>Energia de uma sequência discreta</i>	J
Y	<i>Transformada de Fourier discreta do sinal de resposta</i>	<i>Adimensional</i>
Z_E	<i>Impedância elétrica do transdutor</i>	Ω
σ_B	<i>Desvio padrão da assinatura de baseline</i>	<i>Adimensional</i>
σ_D	<i>Desvio padrão da assinatura de dano ou monitoramento</i>	<i>Adimensional</i>
Z_P	<i>Impedância mecânica do transdutor</i>	<i>N.s / m</i>
Z_S	<i>Impedância mecânica da estrutura</i>	<i>N.s / m</i>
d	<i>Constante Piezelétrica</i>	<i>m / V</i>
ϵ	<i>Permissividade dielétrica</i>	<i>F / m</i>
f	<i>Frequência</i>	<i>Hz</i>
ω_c	<i>Banda média</i>	<i>Hz</i>
i	<i>Unidade imaginária</i>	<i>Adimensional</i>
F_s	<i>Frequência de amostragem</i>	<i>Hz</i>
$d_1[k]$	<i>Coefficientes wavelet de detalhe</i>	<i>Adimensional</i>

Símbolo	Descrição	Unidade
g_1	<i>Resposta do filtro passa altas ao impulso</i>	<i>Adimensional</i>
$c_1[k]$	<i>Coefficientes wavelet de aproximação</i>	<i>Adimensional</i>
h_1	<i>Resposta do filtro passa baixas ao impulso</i>	<i>Adimensional</i>
H_k	<i>Critério de Hinkley</i>	V^2
B	<i>Largura de banda RMS</i>	Hz
H_i	<i>Índice de Hinkley</i>	V^2
$x(t)$	<i>Sinal de excitação do transdutor na forma contínua</i>	V
$x[n]$	<i>Sinal de excitação do transdutor na forma discreta</i>	V
$y(t)$	<i>Sinal de resposta do transdutor na forma contínua</i>	V
$y[n]$	<i>Sinal de resposta do transdutor na forma contínua</i>	V
$w(t)$	<i>Sinal de ruído branco uniforme na forma contínua</i>	V
$w[n]$	<i>Sinal de ruído branco uniforme na forma discreta</i>	V
$R_{vh}(\tau)$	<i>Função correlação cruzada na forma contínua formada pelos sinais $v(t)$ e $h(t)$.</i>	<i>Adimensional</i>
τ	<i>Deslocamento da função correlação cruzada</i>	<i>Adimensional</i>
t	<i>Tempo</i>	s
T	<i>Período de integração</i>	s
$R_{vh}[j]$	<i>Função correlação cruzada na forma discreta formada pelos sinais discretos $v[k]$ e $h[k]$</i>	<i>Adimensional</i>
j	<i>Deslocamento da função correlação cruzada no tempo discreto</i>	<i>Adimensional</i>
$R_{B2,B1}$	<i>Vetor da correlação cruzada entre duas baselines B1 e B2</i>	<i>Adimensional</i>
$R_{H,B1}$	<i>Vetor da correlação cruzada uma curva de condição íntegra e a baseline B1.</i>	<i>Adimensional</i>
$R_{D,B1}$	<i>Vetor da correlação cruzada uma curva de condição de dano e a baseline B1.</i>	<i>Adimensional</i>
$R_{M,B1}$	<i>Vetor da correlação cruzada uma curva de inspeção e a baseline B1.</i>	<i>Adimensional</i>

SUMÁRIO

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	16
1.1. Considerações Iniciais.....	16
1.2. Motivação, Relevância Científica e Objetivos	17
1.3. Organização do Trabalho Acadêmico	19
CAPÍTULO II – A TÉCNICA DA IMPEDÂNCIA ELETROMECHANICA	20
2.1. Transdutores Piezelétricos e a Técnica E/M.....	20
2.2. O sistema de medição de impedância	22
2.3. Índices estatísticos para caracterização de danos estruturais.....	24
2.4. A transformada wavelet como ferramenta para o diagnóstico de falhas estruturais na técnica E/M.....	25
2.5. Conclusão	27
CAPÍTULO III – A INFLUÊNCIA DO RUÍDO NAS TÉCNICAS TRADICIONAIS E UMA CONTRIBUIÇÃO BASEADA NO CRITÉRIO DE HINKLEY	28
3.1. Influência do ruído estrutural nas técnicas tradicionais	28
3.2. Uma nova abordagem para análise de impedância pela aplicação do critério estatístico de Hinkley	29
3.3. A influência do ruído nas medições: uma contextualização prática via análise de impedância, wavelets e Hinkley.....	30
3.4. Resultados e Discussões	33
3.4.1. Efeito do ruído nas abordagens tradicionais	33
3.4.2 Efeito do ruído no índice CCDM	36
3.4.3. Análise dos resultados para o critério de Hinkley.....	42
3.5. Conclusão	46
CAPÍTULO IV – UMA NOVA ABORDAGEM BASEADA NA TÉCNICA CROMÁTICA DE RECONHECIMENTO DE PADRÃO	47

4.1. A técnica cromática de reconhecimento de padrão.....	47
4.2. Metodologia Proposta	49
4.3. Resultados	50
4.4. Conclusão	55
CAPÍTULO V – UM NOVO ÍNDICE DE DANOS BASEADO NA CORRELAÇÃO CRUZADA DE SINAIS.....	56
5.1. A função correlação cruzada.....	56
5.2. Metodologia Proposta	59
5.3. Resultados	60
5.3.1. CCSD aplicado às assinaturas de impedância.....	60
5.3.2. CCSD aplicado aos coeficientes Wavelet.....	68
5.4. Conclusão	73
CAPÍTULO VI – CONSIDERAÇÕES FINAIS	74
Referências.....	77

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentado uma introdução geral sobre o campo de diagnóstico de falhas em estruturas, bem como a técnica abordada por esta tese, salientando a relevância científica, motivação e organização do trabalho.

1.1. Considerações Iniciais

Pesquisas relacionadas à detecção e diagnóstico de falhas em estruturas aeroespaciais, navais e civis tem ganhado destaque e atenção global nas últimas décadas. Tanto a ciência quanto a indústria têm buscado desenvolver sistemas capazes de fornecer um diagnóstico estrutural confiável, a fim de se promover um elevado grau de segurança humana e redução de custos por meio de manutenções preditivas mais rápidas e eficientes (FARRAR; WORDEN, 2013; LI et al., 2015).

O avanço da tecnologia dos materiais e sensores, da eletrônica digital e das técnicas de processamento digital de sinais, têm alicerçado o progresso de inúmeras descobertas no campo dos sistemas de monitoramento de integridade estrutural. Esse campo da engenharia, também conhecido como SHM, do termo em inglês *Structural Healthy Monitoring*, tem como objetivo detectar danos e falhas estruturais em estágio inicial se valendo de técnicas não destrutivas (NDT - *Non-Destructive Techniques*), minimamente invasivas à estrutura monitorada (FOTI, 2015, DMITRIEV et al., 2015). De forma geral, esses sistemas são constituídos por uma rede de sensores vinculados a um sistema de aquisição e armazenamento de dados que, por meio de técnicas de processamento de sinais, permitem a quantificação, localização e avaliação de alterações estruturais que possam comprometer o desempenho ou a resposta dinâmica de uma estrutura.

Muitas técnicas de diagnóstico e monitoramento de falhas foram propostas. Um estudo aprofundado sobre as metodologias de SHM pode ser encontrado em Farrar e Worden (2013).

Dentre os vários métodos disponíveis para o diagnóstico de danos, a técnica da impedância eletromecânica (E/M) se caracteriza por simples e eficiente aplicação, se valendo do uso de transdutores piezelétricos pequenos, leves e de baixo custo, os quais operam, simultaneamente, como atuadores e sensores (WANG; SONG; ZHU, 2015, ZHANG et al., 2015, FREITAS; BAPTISTA, 2016, BAPTISTA, et al., 2014).

A técnica da impedância E/M é baseada no efeito piezelétrico, a qual estabelece uma relação matemática entre as propriedades mecânicas de uma estrutura monitorada e a impedância elétrica do transdutor acoplado no componente em questão (VISALAKSHI; BHALLA; GRUPTA, 2018; ALBAKRI; TARAZAGA, 2017; FREITAS; BAPTISTA, 2016). Desta forma, um dano pode ser diagnosticado pela comparação entre uma assinatura de impedância coletada após uma suspeita de falha, com a impedância extraída em estado estrutural íntegro, que é utilizada como referência. A diferença entre essas assinaturas pode ser um indicativo de não conformidades estruturais como trincas, corrosões, desgastes, dentre outras.

Embora seja uma técnica de monitoramento e diagnóstico de falhas intensivamente estudada nas últimas décadas, muitas questões práticas tem limitado seu uso em aplicações reais. Os atuais desafios tecnológicos para a expansão desta técnica estão alicerçados no contorno de problemas do mundo real, como a influência do ruído e da temperatura nas assinaturas de impedância, que suscitam não conformidades e erros no monitoramento estrutural (BASTANI, et al., 2012; TAKAHASHI, 2016; CAMPEIRO; SILVEIRA; BAPTISTA, 2018; CAMPOS, et al, 2019; CASTRO; BAPTISTA; CIAMPA, 2019a).

1.2. Motivação, Relevância Científica e Objetivos

Como discutido, os sistemas de monitoramento são responsáveis pelo aprimoramento da segurança estrutural e, conseqüentemente, humana. Contribuem também com a diminuição de custos com manutenções nas estruturas em que são incorporados. Por conseguinte, a motivação

pelo estudo e desenvolvimento dessas técnicas é tanto científica quanto econômica. Como explanado, os desafios científicos e tecnológicos no campo de SHM estão relacionados à expansão da aplicabilidade destes sistemas em inspeções reais, onde muitas variáveis ambientais podem influenciar na eficácia dessas metodologias.

A técnica da impedância eletromecânica abordada neste trabalho se vale de curvas de impedância da estrutura íntegra, pré-armazenadas, que servem como referência para o diagnóstico de danos. Tradicionalmente, a quantificação e o diagnóstico de uma falha é realizada via índices estatísticos, como o desvio da raiz média quadrática – *root mean square deviation* (RMSD) ou o desvio do coeficiente de correlação – *correlation coefficient deviation metric* (CCDM). Esses índices mencionados, por efetuarem a comparação direta entre as curvas, são sensíveis a alterações ambientais como aquelas provocadas por ruído estrutural, que corrompem os sinais de impedância (CAMPEIRO; SILVEIRA; BAPTISTA, 2018). Uma das consequências desse fato se dá no comprometimento da eficácia do correto diagnóstico estrutural, como foi mostrado em Campeiro, Silveira e Baptista (2018).

Em aplicações reais, dentre os diversos tipos de ruído, um dos mais comuns e presentes em medições é o ruído branco uniforme, que possui um espectro constante em uma ampla faixa de frequência. Esse ruído pode ser produzido por fontes que estão presentes no cotidiano humano, industrial e em aparatos de estruturas civis, navais e aeroespaciais. Como exemplo, produzem esse tipo de perturbação os sistemas de ventilação, câmaras de combustão, sistemas de iluminação, ignição de automóveis, irradiação solar, altas profundidades marítimas, etc (CAMPEIRO; SILVEIRA; BAPTISTA, 2018). Portanto, o uso de filtros analógicos ou digitais para a atenuação do efeito do ruído branco não é eficaz, uma vez que esse possui espectro uniforme em ampla faixa, inclusive nas bandas dos próprios sinais utilizados para se realizar as medições de impedância. O simples aumento do sinal elétrico aplicado ao transdutor piezelétrico para a extração da impedância, não garante o correto desempenho da técnica, uma vez que, em aplicações práticas, o ruído pode variar sua intensidade com o tempo e o transdutor

pode possuir limites de amplitude em sua operação.

Como mostrado no trabalho de Campeiro, Silveira e Baptista (2018), as métricas tradicionais de quantificação de dano estrutural, que se valem dos índices CCDM e RMSD, não são eficazes para inspeções onde o ruído estrutural se faz presente, uma vez que esse distúrbio corrompe as medidas de impedância e compromete o correto diagnóstico estrutural. Por conseguinte, esse trabalho tem como objetivo analisar e propor novas técnicas de processamento de sinais, visando a otimização e o correto diagnóstico de falhas, pela aplicação da técnica da impedância eletromecânica, sob condições de baixa relação sinal-ruído. Sendo assim, este trabalho visa a expansão desta promissora técnica de SHM para aplicações onde o ruído estrutural se faz presente, tornando seu uso factível nas inspeções reais.

1.3. Organização do Trabalho Acadêmico

Esta tese se inicia, no Capítulo 2, pelo estado da arte da técnica da impedância eletromecânica e das ferramentas utilizadas para o diagnóstico de falhas em estruturas.

No capítulo 3 uma nova técnica de processamento digital de sinais, baseada no critério de Hinkley, é apresentada como alternativa eficaz para a minimização da influência do ruído nas medições de impedância. Também se discute a questão da influência do ruído estrutural nas abordagens tradicionais de identificação e quantificação de danos.

Já no Capítulo 4, uma técnica de reconhecimento de padrão é exposta como inédita alternativa para a problemática abordada por esta tese. O trabalho segue com o Capítulo 5, em que é apresentado um novo índice estatístico para a identificação e quantificação de danos estruturais. O novo índice se mostrou imune à variações temporais da amplitude do ruído, permitindo o correto diagnóstico estrutural.

As novas abordagens propostas nos Capítulos 3, 4 e 5 se valem de uma avaliação teórica e prática concomitante.

Por fim, apresenta-se a conclusão e trabalhos futuros, seguidos da bibliografia.

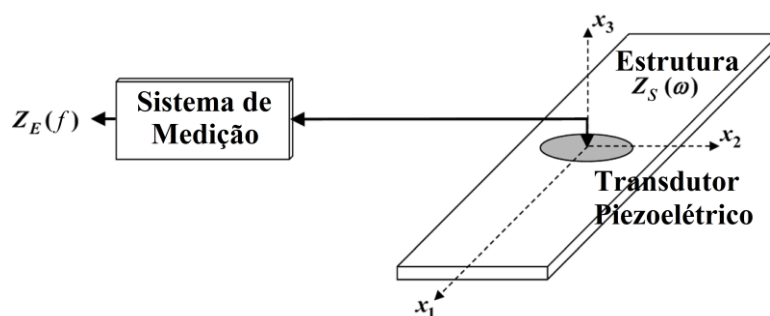
CAPÍTULO II – A TÉCNICA DA IMPEDÂNCIA ELETROMECHANICA

Neste capítulo apresenta-se um breve estado da arte da técnica da impedância eletromecânica. Também são apresentados os modelos tradicionais de diagnóstico e caracterização de danos.

2.1. Transdutores Piezelétricos e a Técnica E/M

O princípio da impedância eletromecânica é baseado no efeito piezelétrico, que estabelece um acoplamento eletromecânico produzido pela estrutura e pelo transdutor acoplado a ela (VISALAKSHI; BHALLA; GRUPTA, 2018; ALBAKRI; TARAZAGA, 2017; FREITAS; BAPTISTA, 2016). A configuração básica do método é exposta na Figura 1.

Figura 1 - Configuração básica da técnica E/M.



Fonte: Da Silveira (2017).

Devido ao efeito piezelétrico, a impedância mecânica da estrutura ($Z_S(f)$) está relacionada matematicamente com a impedância elétrica ($Z_E(f)$) do transdutor acoplado. Deste modo, como um dano altera a impedância mecânica de uma estrutura, uma falha pode ser diagnosticada pela simples análise da impedância elétrica do transdutor em uma determinada faixa de frequência f (FREITAS; BAPTISTA, 2016; BUDOYA, et al, 2017).

Além de ser uma técnica de diagnóstico de falhas eficaz, as análises de impedância se valem de transdutores piezelétricos de baixo custo e simples aplicação. Esses transdutores tem a propriedade de converter a energia mecânica em elétrica (efeito piezelétrico direto), bem como a energia elétrica em mecânica (efeito piezelétrico reverso). A modelagem de um

transdutor piezelétrico pode ser caracterizada por um capacitor de placas paralelas, na qual são aplicadas uma força e uma tensão elétrica. Uma vez que o capacitor seja um material piezelétrico, ocorre uma interação entre as grandezas mecânicas e elétricas. Meitzler (1988) determinou as relações constitutivas deste tipo de material, conforme segue o modelo matemático:

$$D_p = d_{prs}T_{rs} + \varepsilon_{pr}^T V_r , \quad (1)$$

$$S_{pq} = s_{pqrs}^V T_{rs} + d_{rpq} V_r , \quad (2)$$

em que, d_{prs} e d_{rpq} são as constantes piezelétricas, S_{pq} é o tensor de deformação mecânica (*strain*), T_{rs} é o tensor de tensão mecânica (*stress*), s_{pqrs}^V é o tensor de elasticidade do material, também conhecido como tensor de *compliance*, sendo que o sobrescrito V indica campo elétrico constante, V_r é a componente de campo elétrico, D_p é a componente de deslocamento elétrico, ε_{pr}^T é o tensor de permissividade dielétrica do material, sendo que o sobrescrito T indica tensão mecânica constante, e $p, q, r, s = 1, 2, 3$.

A Equação (1) representa o efeito piezelétrico direto, em que uma tensão mecânica (T_{rs}) no material causa um deslocamento elétrico (D_p). Já no efeito piezelétrico reverso, representado pela Equação (2), a aplicação de um campo elétrico (V_r) causa uma correspondente deformação mecânica (S_{pq}).

Tomando como base a modelagem matemática das relações constitutivas básicas de uma cerâmica de PZT apresentadas nas Equações (1) e (2), é possível se determinar um modelo eletromecânico que relacione a impedância mecânica da estrutura monitorada com a impedância elétrica do transdutor. Liang, Sun e Rogers (1994) propuseram um modelo matemático em que a impedância elétrica do transdutor fixado em uma estrutura é dada por:

$$Z_E(f) = \frac{1}{if\eta} \left(\varepsilon_{33}^T - \frac{Z_S(f)}{Z_S(f) + Z_P(f)} \frac{d_{31}^2}{s_{11}^V} \right)^{-1}, \quad (3)$$

sendo que $Z_E(f)$ é a impedância elétrica do transdutor, d_{31} , ε_{33}^T , s_{11}^V são as constantes definidas acima, mas para uma conjectura unidimensional, η é uma constante geométrica relacionada com a forma e dimensões do transdutor, $Z_P(f)$ e $Z_S(f)$ são as impedâncias mecânicas do transdutor e da estrutura monitorada, respectivamente, f é a frequência e i é a unidade imaginária.

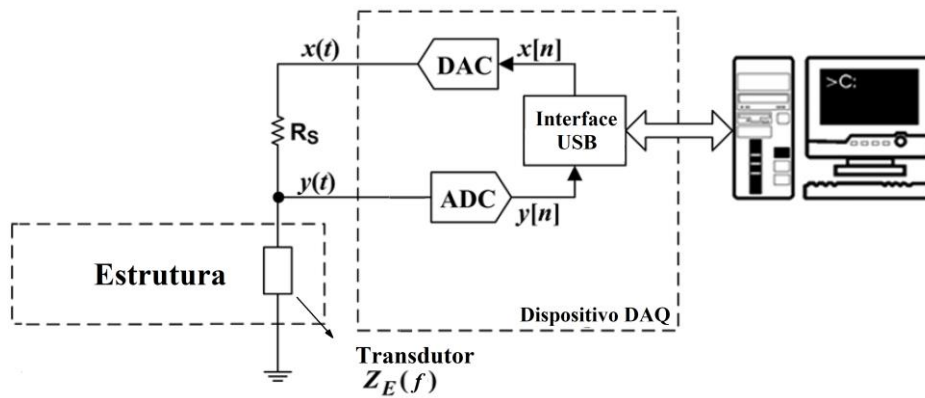
Mediante análise da Equação (3), a variação na impedância mecânica ($Z_S(f)$) da estrutura, causada, por exemplo, por alguma avaria, implica em uma variação correspondente na impedância elétrica ($Z_E(f)$) do transdutor. Por conseguinte, um dano estrutural pode ser detectado pela análise da impedância elétrica do transdutor em faixa de frequência apropriada. Basicamente, extrai-se a impedância quando a estrutura possui um estado considerado íntegro, sendo esta assinatura usada como referência ou *baseline*. A outra curva de impedância deve ser medida após a suspeita de ocorrência de um dano, ou periodicamente em caso de sistemas de SHM em tempo real. A diferença entre as curvas pode ser indício de avarias estruturais. A grande problemática é que, em muitos casos, o próprio ruído incidente na estrutura pode fazer com que a curva de impedância tenha modificações e, deste modo, produza falsos diagnósticos de danos (CAMPEIRO; SILVEIRA; BAPTISTA, 2018).

2.2. O sistema de medição de impedância

No passado, as medições de impedância eram tipicamente realizadas por dispositivos comerciais de alto custo e que demandavam um tempo significativo para a extração dos resultados. Mais recentemente, sistemas alternativos tem sido propostos (BUDOYA; BAPTISTA, 2018; KAUR; BHALLA; SHANKER, 2016). Neste trabalho, o sistema de medição utilizado foi proposto por Baptista e Vieira Filho (2009), conforme se ilustra na Figura

2.

Figura 2 - Sistema utilizado para medição de impedância.



Fonte: Baseado em Da Silveira (2017).

Com relação a esse sistema, as medidas de impedância do transdutor piezelétrico acoplado na estrutura são realizadas por meio do divisor de tensão formado entre o resistor R_s e a impedância elétrica do transdutor ($Z_E(f)$). O sinal de excitação $x(t)$ é gerado pela saída analógica de um conversor digital-analógico – *digital-analog converter* (DAC), e a resposta do transdutor $y(t)$ é amostrada pela entrada analógica de um conversor analógico-digital – *analog-digital converter* (ADC). $x[n]$ e $y[n]$ representam os sinais amostrados de $x(t)$ e $y(t)$. Tradicionalmente, o sinal de excitação utilizado é do tipo *chirp*, cuja amplitude, faixa e passo de frequência são fixos. A vantagem desse sistema é a rapidez em efetuar as medições de impedância (BAPTISTA; VIEIRA FILHO, 2009). Portanto, tomando como base o circuito elétrico da Figura 2:

$$Z_E(f) = R_s \frac{H(f)}{1 - H(f)}, \quad (4)$$

em que $H(f)$ é a função resposta em frequência (FRF) calculada entre $x[n]$ e $y[n]$:

$$H(f) = \frac{S_{xy}(f)}{S_{xx}(f)}, \quad (5)$$

sendo $S_{xy}(f)$ é o espectro de potência cruzado entre o sinal de excitação e resposta e $S_{xx}(f)$ o auto espectro de potência do sinal de excitação, computado utilizando a transformada rápida de Fourier – *fast Fourier transform* (FFT) (BAPTISTA; VIERA FILHO, 2009).

2.3. Índices estatísticos para caracterização de danos estruturais

Conforme mencionado previamente, a identificação, classificação e quantificação do grau de avaria de uma estrutura, tradicionalmente, é realizada por meio de índices estatísticos que comparam diretamente duas assinaturas de impedância: a primeira, tomada como referência ou *baseline*, é extraída quando a estrutura é considerada íntegra. Após uma suspeita de falha uma nova assinatura de impedância é coletada. A diferença entre a nova medida e a *baseline* pode ser um indicativo de não conformidades estruturais como trincas, corrosões, desgastes, dentre outras. Os índices estatísticos mais utilizados na literatura são o desvio da raiz média quadrática – *root mean square deviation* (RMSD) – que é baseado na norma Euclidiana (SUN et al., 1995) e o desvio do coeficiente de correlação – *correlation coefficient deviation metric* (CCDM) – baseado no coeficiente de correlação (FARRAR; WORDEN, 2013, CAMPEIRO; SILVEIRA; BAPTISTA, 2018):

$$RMSD = \sum_{f=f_i}^{f_n} \sqrt{\frac{[(S_D(f)) - (S_B(f))]^2}{(S_B(f))^2}}, \quad (6)$$

$$CCDM = 1 - \frac{\text{cov}[S_B(f) - S_D(f)]}{\sigma_B \sigma_D}, \quad (7)$$

sendo $S_B(f)$ e $S_D(f)$, respectivamente, as assinaturas de impedância, extraídas em uma determinada faixa de frequência f , entre uma frequência inicial f_i e final f_n , com a estrutura considerada íntegra (*baseline*) e após a ocorrência de um possível dano. σ_B e σ_D representam o desvio padrão de cada assinatura em questão e cov a covariância.

Embora sejam eficazes e muito utilizados na literatura para a quantificação de falhas estruturais, esses índices realizam uma comparação direta entre as assinaturas de impedância. Como nas inspeções reais o ruído pode contaminar o sinal de resposta $y(t)$ do transdutor piezolétrico, os índices tradicionais não são eficazes no diagnóstico de falhas, conforme apresentado por Campeiro, Silveira e Baptista (2018). Por conseguinte, surge a necessidade do desenvolvimento de técnicas de processamento de sinais e de novas métricas de classificação e quantificação do dano, uma vez que a análise tradicional, via CCDM e RMSD, limita a técnica da impedância eletromecânica para aplicações controladas, onde o ruído estrutural não se faz presente.

2.4. A transformada wavelet como ferramenta para o diagnóstico de falhas estruturais na técnica E/M

Muitas pesquisas no campo de SHM tem aplicado a transformada wavelet (TW) como ferramenta de diagnóstico de avarias. No caso da técnica da impedância eletromecânica, a TW discreta é uma importante ferramenta para o monitoramento estrutural.

De acordo com Vieira Filho, Baptista e Inman (2011), o sinal de resposta $y(t)$ pode ser utilizado no diagnóstico de danos, uma vez que as variações da impedância mecânica de uma estrutura, produzida por danos, mudam o sinal de resposta em amplitude, fase e frequência. Além disso, essa propriedade é válida para o sistema de medição apresentado, pois o sinal de excitação é constante e todas essas variações recaem sobre o sinal de resposta.

Sendo assim, o uso da transformada wavelet discreta na técnica da impedância eletromecânica é baseada na decomposição de $y(t)$ em níveis wavelet de aproximação e detalhe. Um dano pode ser diagnosticado pela comparação entre os níveis wavelet calculados após uma suspeita de falha, com os níveis extraídos em estado estrutural íntegro.

Os coeficientes dos níveis de aproximação e detalhe são calculados aplicando-se pares

de filtros FIR (Filtros de Resposta Finita ao Impulso) a um sinal discreto, em que um deles é um filtro passa baixa e, o outro, um filtro passa alta. Filtragens sucessivas produzem diferentes níveis wavelet (DAUBECHIES, 1992, VITTERLI; HERLEY, 1992, PARAMESWARIAH; COX, 1998).

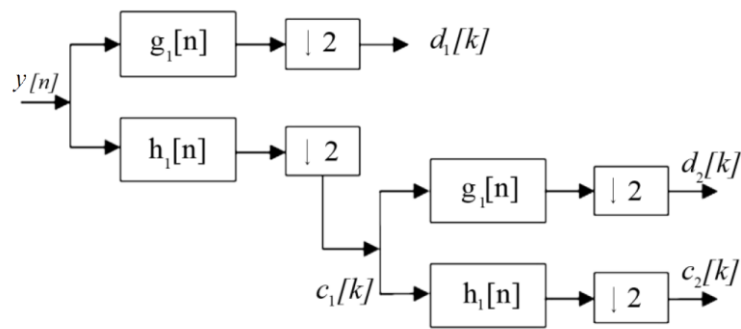
Por exemplo, sendo o sinal de resposta $y[n]$ uma sequência discreta de $y(t)$ obtida por uma frequência de amostragem F_s , a decomposição via wavelet produz, para o primeiro nível, duas novas sequências com a metade da taxa de amostragem, chamadas de coeficientes de aproximação $c_1[k]$ e coeficientes de detalhe $d_1[k]$. Esses coeficientes são produzidos, respectivamente, pelos filtros passa baixas e passa altas, cujas respostas ao impulso são h_1 e g_1 , conforme é mostrado:

$$d_1[k] = \sum_n g_1[n-2k]y[n], \quad (8)$$

$$c_1[k] = \sum_n h_1[n-2k]y[n], \quad (9)$$

A sequência referente aos coeficientes de aproximação preservam as informações do sinal relativas a baixas frequências. Já os coeficientes de detalhe retém informações relativas a altas frequências. Esta decomposição pode continuar de acordo com o número de níveis desejados. Por exemplo, a decomposição de primeiro nível pode ser decomposta novamente, formando os coeficientes de aproximação e detalhes de segundo nível e assim por diante. Para uma sequência com N amostras, o maior número de níveis que um sinal pode ser decomposto é $\log_2 N$ segundo Daubechies (1992). Na Figura 3 ilustra-se a decomposição de coeficientes via TW para o sinal de resposta amostrado $y[n]$. Neste caso, tradicionalmente, um dano é diagnosticado pela aplicação dos índices CCDM e RMSD em cada nível wavelet da *baseline* e de uma inspeção periódica.

Figura 3 - Diagrama de decomposição wavelet



Fonte: Adaptado de Vieira Filho, Baptista e Inman (2011).

2.5. Conclusão

Neste capítulo foram apresentadas as técnicas tradicionais de diagnóstico de falhas via E/M, que utilizam os índices CCDM e RMSD aplicados às curvas de impedância ou aos níveis wavelet de aproximação ou detalhe. Também foi exposto o modelo do circuito utilizado neste trabalho para medição da impedância eletromecânica. O próximo capítulo traz uma explicação sobre a influência do ruído estrutural nessas métricas tradicionais de quantificação de danos e propõe uma nova abordagem de extração de característica estrutural baseado no critério de Hinkley.

CAPÍTULO III – A INFLUÊNCIA DO RUÍDO NAS TÉCNICAS TRADICIONAIS E UMA CONTRIBUIÇÃO BASEADA NO CRITÉRIO DE HINKLEY

Neste capítulo apresenta-se o estado da arte dos estudos sobre a influência do ruído na caracterização do dano estrutural via índices estatísticos tradicionais. Além disso, apresenta-se o critério de Hinkley como forma inédita e alternativa para o diagnóstico de falhas estruturais em inspeções onde o ruído se faz presente.

3.1. Influência do ruído estrutural nas técnicas tradicionais

Em aplicações reais, dentre os diversos tipos de ruído, um dos mais comuns e presentes em medições é o ruído branco uniforme. Esse tipo de perturbação possui um espectro constante em uma ampla faixa de frequência e pode estar presente no cotidiano humano, industrial e em sistemas aeroespaciais, navais e civis. Como exemplo, esse ruído pode ser encontrado em sistemas de ventilação industrial, em câmaras de combustão, sistemas de iluminação, ignição de automóveis, irradiação solar, em altas profundidades marítimas, etc (CAMPEIRO; SILVEIRA; BAPTISTA, 2018). Por ser uniforme e possuir, teoricamente, uma faixa de frequência infinita, o uso de filtros analógicos ou digitais para a atenuação do efeito desta perturbação não é eficaz. Além disso, o simples aumento do sinal elétrico aplicado ao transdutor piezelétrico para a extração da impedância não garante o correto desempenho da técnica, uma vez que, em aplicações práticas, o ruído pode variar sua intensidade com o tempo e o transdutor pode possuir limites de amplitude em sua operação.

Uma vez que a técnica da impedância eletromecânica depende de uma comparação para se diagnosticar uma falha, o ruído estrutural pode ser fator crucial na eficiência dessa técnica SHM, uma vez que pode corromper os sinais de impedância e alterá-los em amplitude e fase (CASTRO; BAPTISTA; CIAMPA, 2019a.). Neste sentido, os trabalhos de Campeiro, Silveira e Baptista (2018) e Castro, Baptista e Ciampa, (2018), demonstraram que os índices CCDM e

RMSD não são eficazes no diagnóstico estrutural devido a essas mudanças provocadas nas assinaturas de impedância. Uma vez que o ruído corrompe as curvas, os índices CCDM e RMSD para uma estrutura íntegra podem apresentar valores semelhantes aos encontrados para uma estrutura danificada. Isso ocorre pois o ruído estrutural faz a assinatura de impedância se divergir da assinatura de *baseline*, fazendo com que esses índices cresçam e, conseqüentemente, acusem falsamente a presença de uma falha estrutural (CAMPEIRO; SILVEIRA; BAPTISTA, 2018; CASTRO; BAPTISTA; CIAMPA, 2019b). Embora a influência do ruído estrutural nas curvas de impedância tenha sido estudada, Campeiro, Silveira e Baptista (2018) não se valeram da técnica baseada na transformada wavelet. Além disso, essa perturbação não foi compensada para os casos de baixa relação sinal-ruído e as assinaturas de *baseline* foram extraídas sob condições ideais, ou seja, sem a presença do ruído estrutural. Sendo assim, conforme discutido até aqui, os desafios científicos e tecnológicos que emergem suscitam o desenvolvimento de técnicas de processamento digital de sinais com o objetivo de se compensar a influência desta perturbação durante as inspeções de impedância. Esse capítulo apresenta uma análise prática da influência do ruído nas técnicas tradicionais, discutidas no Capítulo 2, e apresenta o critério de Hinkley como alternativa para o aprimoramento da técnica SHM estudada nesta tese.

3.2. Uma nova abordagem para análise de impedância pela aplicação do critério estatístico de Hinkley

Como abordado anteriormente, as técnicas baseadas em impedância mais utilizadas na literatura se valem da análise pura da curva de impedância ou do sinal de resposta processado digitalmente via transformada wavelet. A partir dessas técnicas o dano é quantificado via CCDM e RMSD. Neste sentido esta subseção apresenta o critério de Hinkley como uma nova abordagem de diagnóstico de falhas via análise de impedância.

O critério Hinkley é uma técnica avançada de processamento que pode ser usada para caracterizar sinais cuja frequência e conteúdo de energia são variáveis (HINKLEY, 1971). Esse

critério, também conhecido como "Critério de Energia", geralmente é utilizado para se determinar mudanças em sinais acústicos, por meio de um algoritmo simples que compensa a energia do ruído pela energia média do sinal (MARKALOUS; TENBOHLEN; FESER, 2008, ARCINIEGAS; BRANCHERIAU; LASAYGUES, 2015).

Em relação à técnica da impedância eletromecânica, como o sinal de resposta pode ser alterado devido a dano e ruído, o critério de Hinkley foi aplicado nesse sinal como alternativa para o diagnóstico estrutural sob condições ruidosas, uma vez que esse algoritmo, além de atenuar os efeitos de ruído no sinal, pode ser sensível às alterações do sinal de resposta, que são produzidas por danos.

O vetor Hinkley H_k para o sinal de resposta amostrado $y[n]$, é definido pela soma cumulativa da energia de cada amostra (n), que varia de 0 a k . O ruído é atenuado pelo segundo fator do somatório, que pondera a energia de cada amostra com a média da energia do sinal:

$$H_k = \sum_{n=0}^k \left(y[n]^2 - \frac{E}{N} \right), \quad (10)$$

onde E e N são a energia global do sinal e o número total de amostras, respectivamente.

Para se verificar a eficácia do critério de Hinkley na técnica da impedância eletromecânica, aplicou-se essa métrica para o sinal de resposta e extraiu-se o CCDM das curvas geradas pelo critério.

3.3. A influência do ruído nas medições: uma contextualização prática via análise de impedância, wavelets e Hinkley.

Como discutido, na prática, é inevitável a presença do ruído estrutural nas inspeções de monitoramento. Em muitos casos a assinatura de *baseline* pode ou não ser extraída em ambientes controlados e o ruído estrutural pode variar sua amplitude no decorrer do tempo.

Para se verificar o efeito do ruído na caracterização de danos estruturais, foram realizados experimentos com uma estrutura de fibra de carbono de dimensões 300 mm x 500 mm x 1,04 mm. Não houve informações técnicas sobre o processo de fabricação desse componente, muito utilizado na indústria aeronáutica.

O diafragma piezelétrico, modelo 7BB-20-6, fabricado pela Murata Electronics® (MURATA ELECTRONICS, 2018) foi utilizado em todo o desenvolvimento desta pesquisa. Esses transdutores possuem uma base circular de latão de 20 mm de diâmetro e 0,20 mm de espessura. A cerâmica piezelétrica é o elemento ativo e detém 14 mm de diâmetro e 0,22 mm de espessura. Como demonstrado em estudos experimentais e teóricos (FREITAS; BAPTISTA, 2016, FREITAS et al., 2017), esse transdutor piezelétrico apresenta propriedades semelhantes às cerâmicas de PZT convencionais e é validado para o uso em monitoramento estrutural em ensaios de impedância. Para atuar no seu ponto de operação linear deve ser alimentado com um sinal de baixa tensão (cerca de 1 V) (MEITZLER et al., 1988, FREITAS; BAPTISTA, 2016, FREITAS et al., 2017). Como o foco desta tese é a análise da influência do ruído na técnica da impedância eletromecânica, mais detalhes sobre as características do transdutor podem ser encontrados no trabalho de Freitas et al. (2017).

Dois diafragmas piezelétricos, “PZT 1” e “PZT 2” foram fixados no material a uma distância de 50 mm de cada borda, por meio de uma cola a base de cianoacrilato. As coordenadas de cada transdutor, conforme eixo de referência indicado na Figura 4 foram, para o “PZT 1” e “PZT 2”, respectivamente, (150, 100) mm e (150, 450) mm.

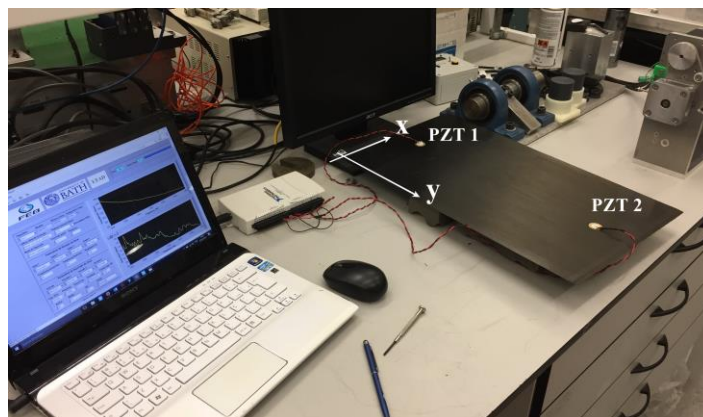
O diafragma 1 (“PZT 1”) foi configurado para se efetuar as medições de impedância eletromecânica. O ruído branco estrutural foi produzido pelo diafragma 2 (“PZT 2”), excitado com um sinal de ruído branco de diferentes amplitudes de pico (0,1 V, 0,2 V, 0,3 V, 0,4 V, 0,5 V, 0,6 V, 0,7 V, 0,8 V, 0,9 V, 1 V, 2 V, 3 V, 4 V, 5 V e 10 V).

Conforme Campeiro, Silveira e Baptista (2017), esses transdutores podem gerar este tipo de ruído, que possui espectro de frequência uniforme em faixa definida. Devido às propriedades

dos materiais piezelétricos, um sinal elétrico de ruído branco produz uma perturbação mecânica na estrutura com a mesma característica do sinal aplicado. Este ruído mecânico produzirá, então, distorções nas medições de impedância eletromecânica devido ao efeito piezelétrico (CAMPEIRO; SILVEIRA; BAPTISTA, 2018; CASTRO; BAPTISTA; CIAMPA, 2019c).

A placa de aquisição de dados utilizada para o teste foi a NI USB-6211. O transdutor 1 foi excitado com um sinal *chirp* de amplitude 1V, range de 0 a 65 kHz e passo de 2 Hz. A frequência de amostragem foi ajustada para 250 kHz. Aplicou-se um sinal de ruído branco uniforme, com a mesma faixa de frequência (0 – 65 kHz) utilizada para se excitar o transdutor para as medições de impedância. Na Figura 4 é ilustrado o ensaio desenvolvido. Cada sinal de impedância calculado foi produzido a partir da média de dez medições.

Figura 4 - Diafragmas piezelétricos acoplados na placa de material compósito.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para se atenuar possíveis vibrações e interferências mecânicas do meio ambiente, o material monitorado foi apoiado sobre espuma de espessura 50 mm. Além disso, a temperatura do teste foi mantida constante em 25°C.

Como o objetivo deste estudo é comparar a identificação e classificação do dano estrutural em ambientes com ruído, foram inseridos, progressivamente, no centro geométrico do material (coordenada (150, 250) mm), três tipos de danos reais: furos com diâmetros de 1 mm (dano “A”), 5 mm (dano “B”) e 10 mm (dano “C”). Essas avarias representaram um percentual de

volume danificado de 0,0005 %, 0,01 % e 0,05 %, respectivamente.

De posse das curvas de impedância e dos respectivos sinais de resposta, analisou-se a eficiência das técnicas tradicionais e do critério de Hinkley.

O índice CCDM foi normalizado ($CCDM = 1$ para estrutura íntegra) e calculado para sub bandas de 10 kHz da curva de impedância. Com relação à análise wavelet, esse índice foi calculado para cada nível de aproximação e detalhe. Considerando que o sinal chirp gerado possui 65536 pontos, o número máximo de níveis wavelet Daubechies 2 foi de 16. Essa wavelet-mãe foi escolhida por não apresentar descontinuidades em sua função. Todavia, como testado durante essa pesquisa, o uso de outras wavelet-mãe não modificou os resultados e as conclusões deste ensaio de monitoramento estrutural.

Para a análise de Hinkley, o sinal de resposta foi dividido em partes de 10 kHz uma vez sua frequência cresce em intervalos de 2 Hz. De posse dessas sequencias, aplicou-se o algoritmo e, para cada curva de Hinkley extraída em intervalos de 10 kHz, o índice CCDM normalizado foi calculado.

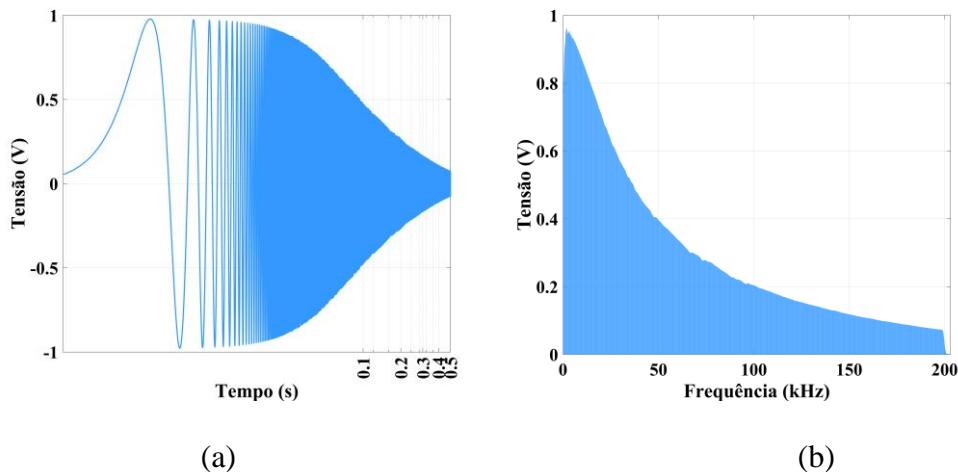
3.4. Resultados e Discussões

A apresentação dos resultados será dividida em três partes. A primeira, mostra a influência do ruído nas curvas de impedância e nos níveis wavelet. A segunda, apresenta a influência do ruído no índice CCDM. Para finalizar, é apresentado o critério de Hinkley como alternativa a inspeções com ruído estrutural.

3.4.1. Efeito do ruído nas abordagens tradicionais

Como discutido anteriormente, as abordagens tradicionais se valem das curvas de impedância e da transformada wavelet aplicada ao sinal de resposta. Para uma melhor análise, primeiramente, apresenta-se, na Figura 5, o sinal de resposta e sua FFT, para uma inspeção sem ruído estrutural.

Figura 5 – Sinal de resposta. Domínio do tempo (a) e FFT (b) para inspeção sem ruído estrutural.



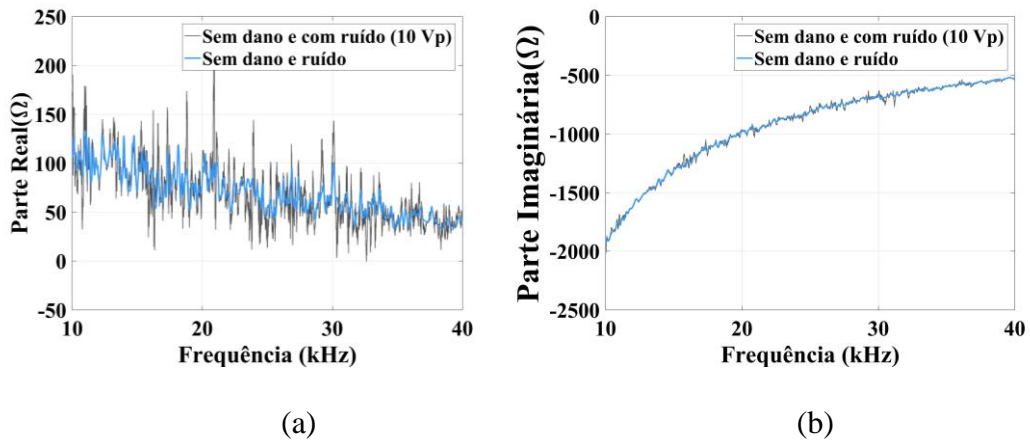
Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme observado na Figura 5, a amplitude do sinal de resposta variou de 1 V para 0,05 V. Este fato se dá devido a reatância capacitiva do transdutor utilizado neste trabalho. Como o sinal de excitação é um chirp linear e a frequência aumenta com o tempo, observa-se um decaimento do sinal de resposta uma vez que a reatância capacitiva diminui com o aumento da frequência. Um estudo aprofundado sobre a sensibilidade do transdutor pode ser encontrado nos trabalhos de Freitas et al. (2017) e Baptista e Vieira Filho (2009).

Para exemplificar a influência do ruído estrutural na técnica E/M, são apresentadas, nas Figuras 6 e 7, as curvas de impedância e os coeficientes wavelet para dois casos: inspeção estrutural sem a presença do ruído e com ruído branco uniforme de amplitude 10 V e faixa de frequência de 0 a 200 kHz. Cabe destacar que a faixa de frequência do ruído permanece em toda faixa do sinal aplicado (0 – 65 kHz).

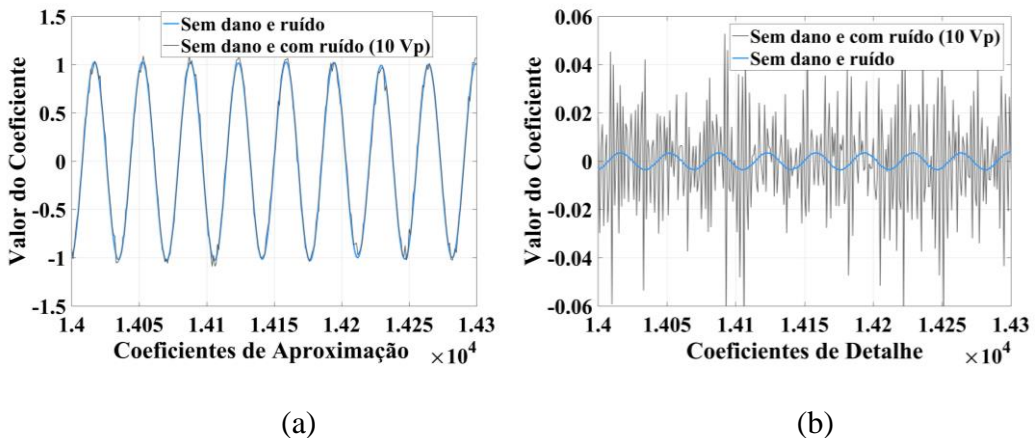
A título de simplificação, apresentou-se o nível 3 de aproximação e detalhe para esta análise prática. A wavelet-mãe utilizada foi a Daubechies 2. A fim de se melhorar a visualização, selecionou-se a faixa de 10 kHz a 40 kHz e os coeficientes de 14000 a 14300.

Figura 6 - Curvas para (a) parte real, (b) imaginária para uma condição estrutural íntegra com e sem ruído estrutural.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 7 - Curvas para (a) coeficientes de aproximação e (b) coeficientes de detalhe para uma condição estrutural íntegra com e sem ruído estrutural. Nível 3 de decomposição.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como se observa nas Figuras 6 e 7, o ruído estrutural corrompe todas as assinaturas, tanto para a análise de impedância, quanto para a análise wavelet. No entanto, nota-se que, para o mesmo nível de ruído, cujo valor apresentado foi 10 vezes maior que o sinal de excitação, a parte real da impedância, bem como os coeficientes de detalhe são mais afetados e corrompidos por essa perturbação ambiental.

Em relação à parte imaginária, como o transdutor piezolétrico é predominantemente capacitivo, a curva, em módulo, decresce significativamente com a frequência, produzindo uma

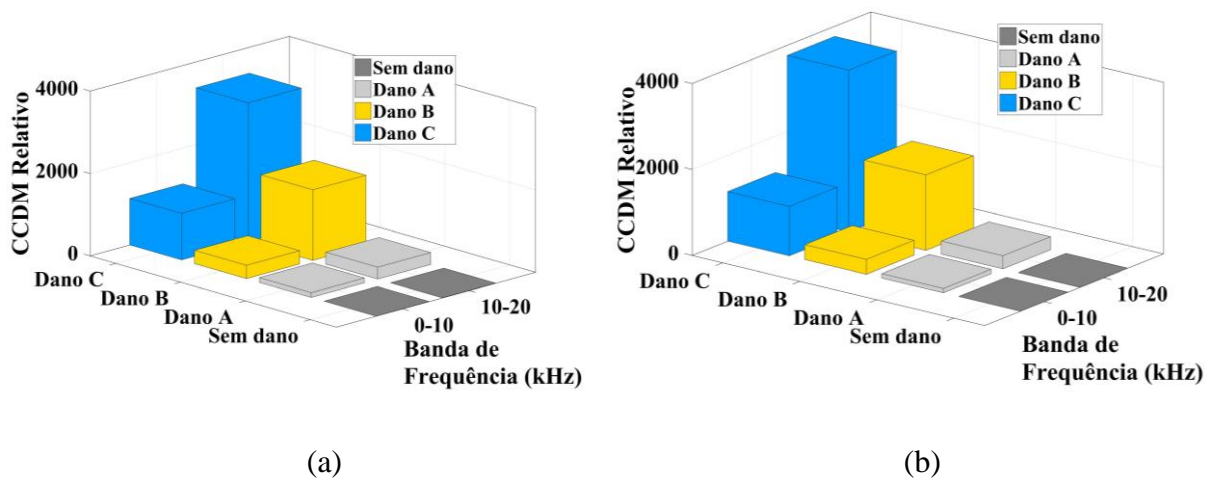
alta taxa de variação. Devido a esse fator, embora o ruído também corrompa essa assinatura, a tendência observada no sinal original é mantida no sinal corrompido.

Com relação à abordagem via transformada wavelet, conforme discutido no Capítulo 2, como os coeficientes de detalhe permitem uma análise de componentes do sinal em baixa escala e alta frequência, esse tipo de coeficiente se torna mais sensível ao ruído, como se observa na Figura 7 (b). Já com relação aos coeficientes de aproximação, essa influência é menos significativa, uma vez que essa análise se dá em alta escala e baixa frequência. Embora os níveis de aproximação também sejam corrompidos pelo ruído, percebe-se que eles possuem um padrão assintótico similar aos níveis calculados a partir de inspeções controladas.

3.4.2 Efeito do ruído no índice CCDM

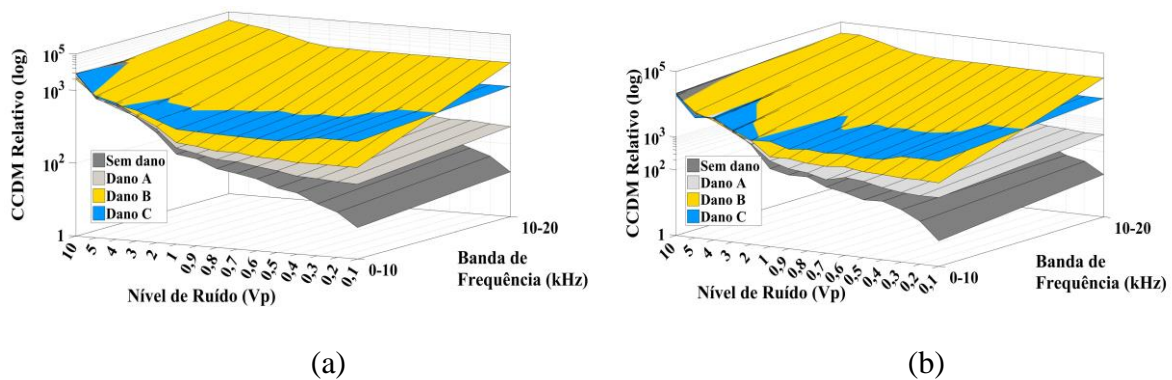
As Figuras 8 e 9 apresentam os resultados obtidos para inspeções controladas e com a presença de ruído estrutural para as curvas de impedância. Selecionou-se as bandas de frequência cujo CCDM aumentou com o tamanho da avaria, uma vez que uma das premissas do monitoramento estrutural é se constatar a evolução do dano estrutural (FARRAR; WORDEN, 2013).

Figura 8 - CCDM para a parte (a) real e (b) imaginária para uma inspeção controlada (sem a presença de ruído estrutural).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 9 - CCDM para a parte (a) real e (b) imaginária para inspeções com ruído estrutural e *baseline* extraída em ambiente controlado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Quando uma estrutura não possui dano, o índice CCDM relativo fica em torno de 1, uma vez que a curva de impedância é similar à *baseline*. Esse índice cresce à medida que as curvas se divergem pela presença de uma falha estrutural. Mediante análise da Figura 8, verifica-se que os resultados obtidos de CCDM para a parte real e imaginária foram próximos. Para ambos os casos, somente nas bandas de 0 a 10 kHz e de 10 a 20 kHz o índice CCDM cresceu com o tamanho da avaria inserida no material. Por exemplo, na primeira banda estudada (0 – 10 kHz), o CCDM cresceu de 1 (estrutura íntegra) para 110 (dano “A”), 240 (dano “B”) e 1100 (dano “C”). Na banda subsequente (10 – 20 kHz), que apresentou maior sensibilidade, os valores apresentados foram, aproximadamente, 250, 1200 e 3800.

Entretanto, ao se observar os resultados apresentados na Figura 9, é verificado que o ruído estrutural pode limitar a capacidade de se diagnosticar a evolução do dano, além de criar falsos diagnósticos de falhas. Mais especificamente, quando a estrutura não possui danos mas há ruído nas inspeções (vide Figura 9), existe um nível de ruído que produz valores de CCDM semelhantes aos encontrados nas inspeções controladas quando essa mesma estrutura possui danos (Figura 8). Essa característica causa a criação de falsos diagnósticos de dano (ou “falsos-positivos”), uma vez que o índice extraído em uma inspeção corrompida pelo ruído pode ter valores iguais ou maiores que os índices para os danos diagnosticados em uma inspeção controlada. Na Tabela 1 é indicado o nível de ruído que produz falso positivo para cada dano.

Tabela 1 – Nível de ruído em estrutura íntegra que produz valores de CCDM semelhantes aos valores encontrados para inspeções sem ruído, quando a estrutura sofre os danos inseridos (análise de impedância).

Faixa de Frequência (kHz)	Amplitude do Ruído (V)		
	Dano “A”	Dano “B”	Dano “C”
0 - 10	0,7	2	3
10 - 20	0,8	2	3

Por exemplo, pela análise da Tabela 1, um ruído incidente de 0,7 V na condição íntegra produziu o mesmo valor de CCDM quando a inspeção foi realizada em ambiente controlado e com a presença do dano “A”.

Além de promover falsos diagnósticos de avarias, o ruído afeta severamente a capacidade de diagnóstico da evolução do dano estrutural. Para os níveis de ruído maiores que 1 V de amplitude, os valores de CCDM se apresentaram similares para todos os casos de condição estrutural, impossibilitando qualquer conclusão sobre a condição estrutural. Para os níveis de ruído estrutural menores que 1 V de amplitude, o CCDM cresceu com o tamanho das avarias inseridas, apenas para a banda de 0 a 10 kHz. Neste caso o índice permaneceu em torno de 110, 330 e 1600 para os danos “A”, “B” e “C”, respectivamente. Todavia, para a faixa de 10 a 20 kHz a sensibilidade da técnica a evolução do dano foi prejudicada, uma vez que os valores de CCDM para o dano “B” foram maiores que para o dano “C”. Estes resultados comprovam a ineficiência dos índices tradicionais para o diagnóstico e monitoramento estrutural em aplicações onde o ruído se faz presente.

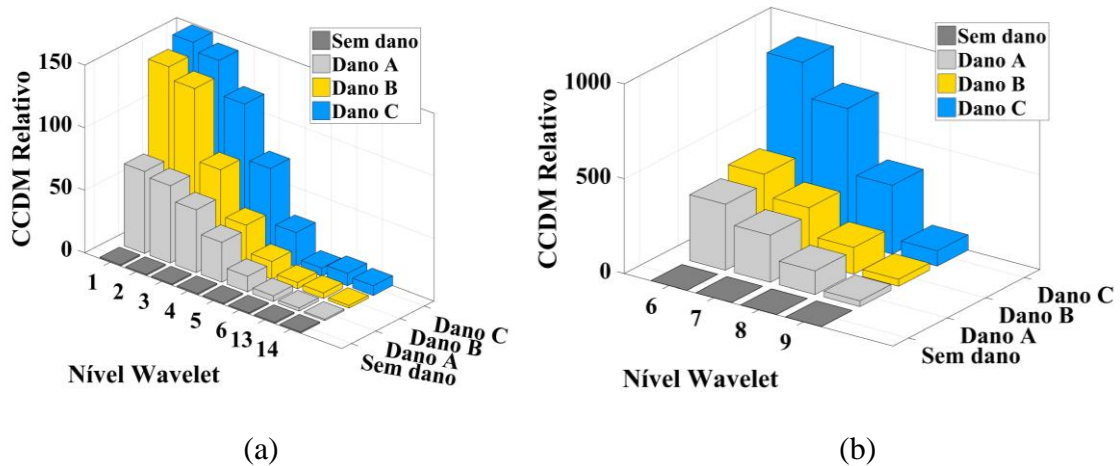
Na Figura 10 são apresentados os resultados obtidos para uma inspeção controlada mediante diagnóstico via transformada wavelet. Selecionou-se apenas os níveis wavelet cujo CCDM aumentou com o tamanho da avaria.

Como indicado na Figura 10 (a), os níveis de aproximação cujo CCDM cresceu com o tamanho da avaria, foram os níveis 1, 2, 3, 4, 5, 6, 13 e 14. O primeiro nível apresentou maior sensibilidade pois forneceu os maiores valores de CCDM. Para o dano “A”, o índice manteve-se em cerca de 50, aumentando em aproximadamente 130 para o dano “B” e 150 para o dano

“C”.

Com relação à análise de detalhe (Figura 10 (b)), para a inspeção controlada, o nível wavelet 6 apresentou maior sensibilidade ao dano, variando em torno de 350, 450 e 880 para

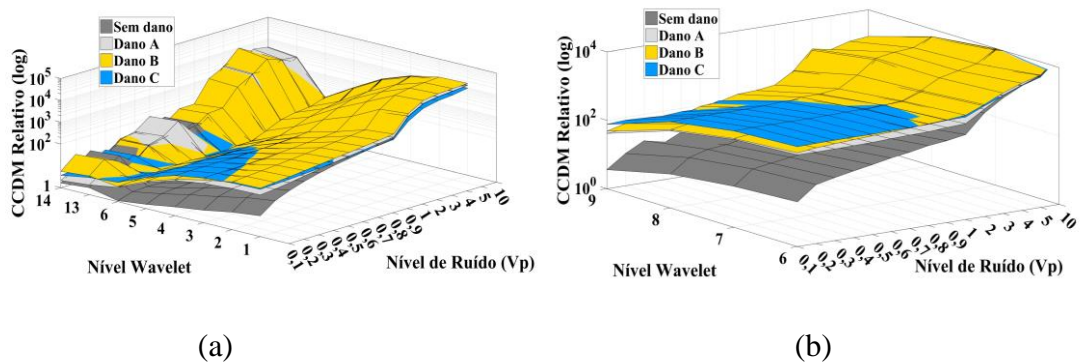
Figura 10 - CCDM para os (a) níveis de aproximação e (b) níveis de detalhe em uma inspeção controlada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

os danos “A”, “B” e “C”, respectivamente. É apresentado, na Figura 11, os valores de CCDM para inspeções com ruído estrutural, mediante a aplicação da transformada wavelet nos sinais de resposta.

Figura 11 - CCDM para os níveis de (a) aproximação e (b) detalhe para inspeções com ruído estrutural e *baseline* extraída em ambiente controlado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim como na análise de impedância, observa-se que o ruído também compromete a

eficiência do método. Na Tabela 2 é apresentado o nível de ruído que produz falsos positivos no diagnóstico, via níveis de aproximação.

Tabela 2 – Nível de ruído em estrutura íntegra que produz valores de CCDM semelhantes aos valores encontrados para inspeções sem ruído, quando a estrutura sofre os danos inseridos (análise de aproximação).

Nível Wavelet	Amplitude do Ruído (V)		
	Dano “A”	Dano “B”	Dano “C”
1	0,3	0,6	0,6
2	0,4	0,7	0,8
3	0,8	0,9	2
4	1	1	2
5	2	2	2
6	2	2	2
13	0,2	0,1	0,3
14	0,1	0,2	0,3

Pela análise da Tabela 2 constata-se que, apesar de possuírem menor sensibilidade ao dano que o primeiro nível de aproximação, os níveis 5 e 6 foram os que apresentaram maior limiar para a criação de falso positivo (2 V de amplitude de ruído). Para o nível wavelet 1 o falso diagnóstico de dano “A”, “B” ou “C” foi criado, respectivamente, em 0,3 V, 0,6 V e 0,6 V. Uma outra observação relevante é que, assim como nos sinais de impedância, o ruído estrutural tornou o sistema menos sensível tanto para a identificação, quanto para a classificação de danos. Conforme é ilustrado na Figura 11 (a), as superfícies dos danos “A”, “B” e “C” são maiores que a superfície de estrutura íntegra, apenas para os níveis de 1 a 6 e ruídos menores que 0,5 V de amplitude. Para os demais casos a proximidade das quatro superfícies impede tanto a identificação, quanto a classificação do tamanho do dano.

Na Tabela 3 é apresentado o nível de ruído que produz falsos positivos no diagnóstico via níveis de detalhe. Nesse caso, observa-se que o nível de detalhe 6, que foi mais sensível ao dano para as inspeções controladas, apresentou um limiar de amplitude de ruído de 2 V para todos os danos inseridos. No entanto, assim como nos outros casos explanados até aqui, o ruído prejudicou a identificação da evolução do tamanho da avaria. Para ruídos abaixo de 1 V de amplitude, a proximidade das superfícies impossibilita a identificação da falha.

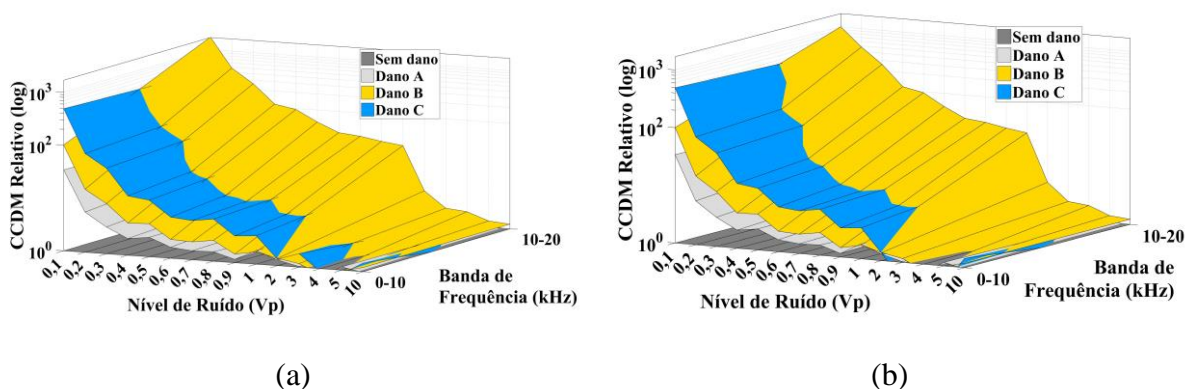
Tabela 3 – Nível de ruído em estrutura íntegra que produz valores de CCDM semelhantes aos valores encontrados para inspeções sem ruído, quando a estrutura sofre os danos inseridos (análise de detalhe).

Nível Wavelet	Amplitude do Ruído (V)		
	Dano “A”	Dano “B”	Dano “C”
6	2	2	2
7	2	1	3
8	1	2	2
9	0,8	1	2

Tendo em vista os resultados discutidos, conclui-se que o ruído estrutural, além de criar falsos diagnósticos, influencia decisivamente na capacidade do sistema em se diagnosticar e identificar a evolução do tamanho da falha estrutural, uma vez que os índices tradicionais realizam a comparação direta, sem levar em conta outras características do sinal.

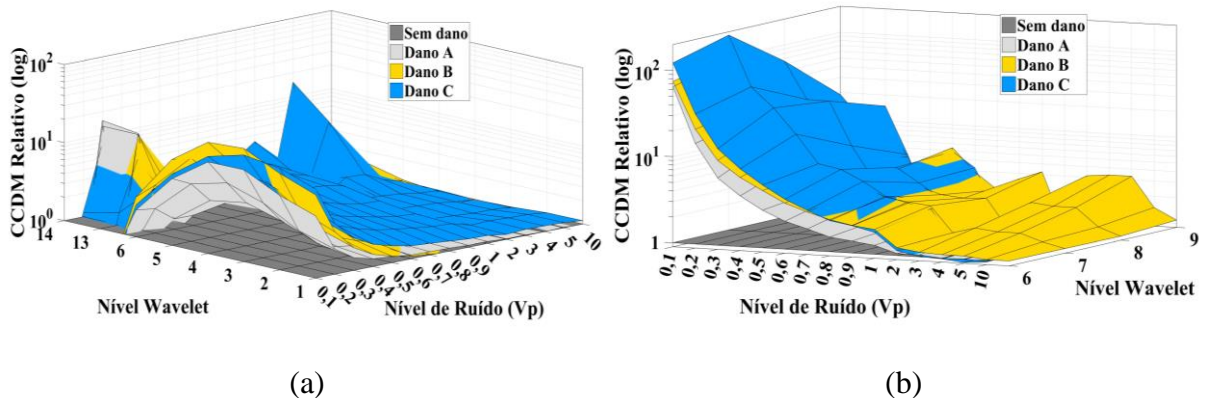
Muitas vezes, em aplicações reais, não é possível extrair a assinatura de *baseline* sob uma inspeção controlada. Tomando como base esse fato, nas Figuras 12 e 13, são apresentados os valores de CCDM relativo para inspeções onde tanto a *baseline* quanto as medidas de monitoramento foram contaminadas com diferentes níveis de ruído. Como a *baseline* foi tomada em uma estrutura contaminada por ruído, o CCDM relativo para a superfície íntegra permaneceu em 1.

Figura 12 - CCDM para a parte (a) real e (b) imaginária para inspeções e *baseline* extraída com ruído estrutural.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 13 - CCDM para os níveis de (a) aproximação e (b) detalhe para inspeções e *baseline* extraída com ruído estrutural.



Fonte: Elaborado pelo autor.

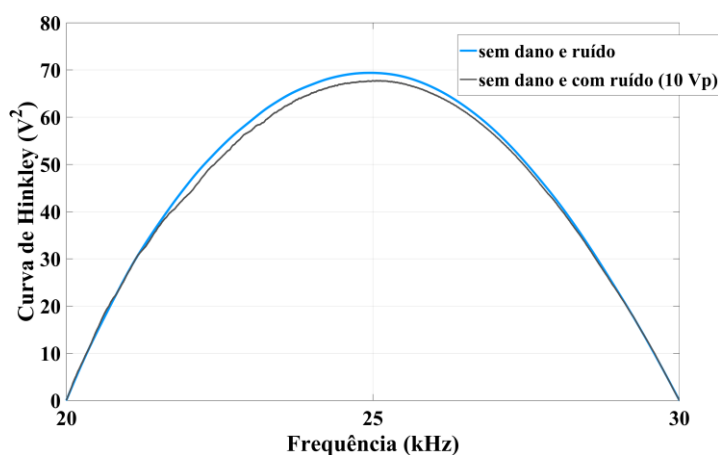
A partir da análise das Figuras 12 e 13, observa-se que, além da atenuação dos valores do índice em relação às medidas realizadas sob condição ideal, os valores de CCDM tenderam a 1 à medida que o ruído cresceu. Esta característica produz falso diagnóstico de condição íntegra, também conhecido na literatura como “falso negativo”.

Tendo em vista os resultados discutidos, conclui-se que o ruído estrutural, além de criar falsos diagnósticos, positivos ou negativos, influencia decisivamente na capacidade do sistema em se diagnosticar e identificar a evolução do tamanho da avaria, uma vez que os índices tradicionais realizam a comparação direta, sem levar em conta outras características dos sinais. Deste modo, torna-se necessário o desenvolvimento de novas técnicas de processamento de sinais aplicados à impedância eletromecânica.

3.4.3. Análise dos resultados para o critério de Hinkley.

Embora a análise de Hinkley seja realizada no domínio do tempo, o sinal de resposta foi janelado em bandas de 10 kHz, uma vez que a frequência do sinal de excitação cresce linearmente com o tempo. Na Figura 14 é mostrado uma curva de Hinkley para uma inspeção com e sem a presença de ruído uniforme para a faixa de 20 a 30 kHz.

Figura 14 – Influência do ruído na curva de Hinkley.



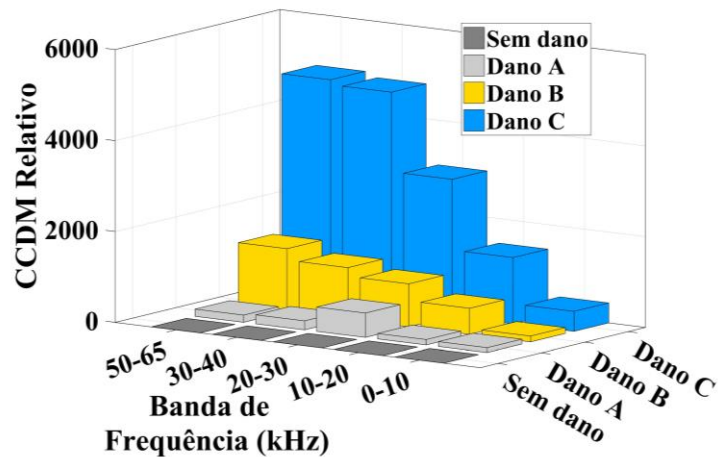
Fonte: Elaborado pelo autor.

Pela Figura 14, observa-se que a curva de Hinkley apresentou um máximo global. Isso ocorre devido ao decaimento da amplitude do sinal com o aumento da frequência (Figura 5). Quando a energia média do sinal ou da sequência selecionada é menor que a somatória das energias das amostras, a curva de Hinkley cresce e atinge um máximo global. O decaimento ocorre quando essa média se torna maior que a energia das amostras devido a redução da amplitude do sinal. Como discutido, o sinal de resposta decresce devido à reatância capacitiva do transdutor.

Conforme se observa na Figura 14, o ruído também produz mudanças na curva de Hinkley em relação a uma medida extraída em ambiente controlado e sem danos. Todavia, as variações produzidas são menos significantes às observadas nas curvas de impedância e nos coeficientes wavelet.

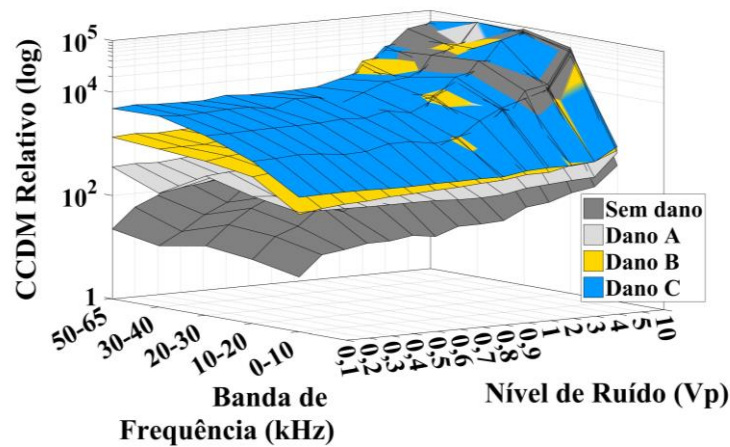
Na Figura 15 são apresentados os resultados obtidos para inspeções controladas. De acordo com os resultados experimentais, o critério de Hinkley mostrou ter um grande potencial para aplicações baseadas em impedância eletromecânica, em relação às técnicas tradicionais. Constata-se que, diferentemente dos outros métodos, o CCDM aumentou com o tamanho da avaria produzida no material para todas as bandas de frequência, com exceção da faixa entre 40 kHz e 50 kHz.

Figura 15 - CCDM para análise de Hinkley em uma inspeção controlada (sem a presença de ruído estrutural).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 16 - CCDM para a análise de Hinkley com *baseline* extraída (a) sem e (b) com a presença de ruído estrutural.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em relação aos efeitos de ruído para a *baseline* extraída em uma inspeção controlada (Figura 16), a banda de frequência mais sensível à evolução do tamanho do dano foi a faixa de 50 kHz a 65 kHz. Para este caso, os índices permaneceram em torno de 500 para o dano “A”, 1500 para o dano “B” e 5000 para o dano “C”. Observa-se também que, para amplitudes de ruído abaixo de 1 V, todas as superfícies dos danos “A”, “B” e “C” apresentaram significativa distância para a superfície de CCDM referente à estrutura íntegra. Esse resultado comprova

uma maior eficiência em relação às análises de impedância e wavelet, em que o efeito do ruído nas curvas criou sobreposições nas superfícies de CCDM, até para valores inferiores a 1 V. A nova abordagem também apresentou menor sensibilidade à criação de falsos positivos, conforme Tabela 4.

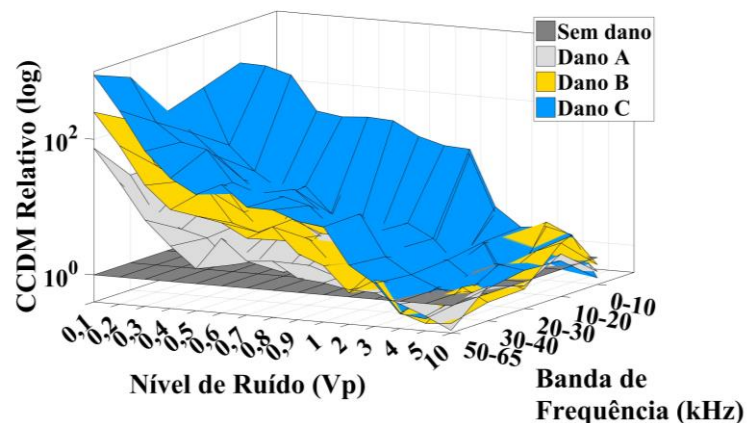
Tabela 4 – Nível de ruído em estrutura íntegra que produz valores de CCDM semelhantes aos valores encontrados para inspeções sem ruído, quando a estrutura sofre os danos inseridos (análise de Hinkley).

Faixa de Frequência (kHz)	Amplitude do Ruído (V)		
	Dano “A”	Dano “B”	Dano “C”
0 -10	3	4	-
10-20	0,6	2	2
20-30	0,9	1	2
30-40	0,6	2	3
50-65	0,7	2	3

De acordo com a Tabela 4, os resultados indicam que a banda de 0 a 10 kHz possui menor sensibilidade a criação de falsos diagnósticos de danos. Nesta faixa, o ruído pode atingir até 3 V e 4 V de amplitude que não causa diagnósticos de falso positivo para os danos “A” e “B”, respectivamente. Para o dano maior, o nível de ruído mais alto não foi suficiente para causar falso diagnóstico nesta banda de frequência. Esses valores indicam que o critério de Hinkley teve maior eficácia na minimização dos efeitos de ruído estrutural em relação às técnicas convencionais.

Para finalizar, os efeitos produzidos pelo ruído estrutural para a *baseline* extraída em uma inspeção real (Figura 17), indicaram que o critério de Hinkley tem sensibilidade para se diagnosticar a evolução do dano em todas as faixas de frequência em questão, para ruídos estruturais inferiores a 1 V. Todavia, para valores maiores que 1 V, também foi gerado falso diagnóstico de condição estrutural íntegra (falso negativo).

Figura 17 - CCDM para a análise de Hinkley com *baseline* extraída (a) sem e (b) com a presença de ruído estrutural.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.5. Conclusão

Neste capítulo, foi estudado o efeito do ruído estrutural nas técnicas tradicionais, que se baseiam na aplicação de índices como o CCDM nas curvas de impedância e nos níveis wavelet de aproximação e detalhe. Verificou-se que o ruído pode causar falsos diagnósticos de dano para inspeções onde a *baseline* é extraída em ambiente controlado. Além disso, constatou-se que o ruído pode causar falsos diagnósticos de condição estrutural íntegra, para medições em que a *baseline* é extraída em ambientes ruidosos.

Também se propôs uma abordagem inédita para o diagnóstico de falhas por meio do critério de Hinkley. Como visto, além de possibilitar o diagnóstico da evolução do dano para inspeções onde o ruído pode chegar ao mesmo nível de amplitude do sinal *chirp*, a inédita técnica apresentou um maior número de bandas que classificaram o tamanho dos danos inseridos no material em questão.

CAPÍTULO IV – UMA NOVA ABORDAGEM BASEADA NA TÉCNICA CROMÁTICA DE RECONHECIMENTO DE PADRÃO

Neste capítulo apresenta-se uma nova metodologia de diagnóstico de danos para inspeções onde o ruído estrutural se faz presente, por meio da aplicação da técnica cromática de reconhecimento de padrão.

4.1. A técnica cromática de reconhecimento de padrão

Como visto, a correto diagnóstico de falhas para inspeções contaminadas pelo ruído estrutural, suscita o desenvolvimento de novas técnicas de processamento digital de sinais.

Diante dessa problemática, a técnica cromática (TC) destaca-se por ser uma abordagem efetiva de reconhecimento de padrões ou agrupamento de dados, que permite a extração analítica de informações de um conjunto complexo de sinais, cujas características temporais e espectrais não podem ser facilmente identificadas (ZHANG, et al., 2005; WANG, et al., 2017; JONES, et al. 2000; ARDILA-REY, et al. 2018). Neste contexto, essa técnica foi aplicada aos sinais de resposta do transdutor piezelétrico, a fim de se minimizar a influência do ruído no diagnóstico de danos. De acordo com essa metodologia, o reconhecimento de padrões de sinais, como por exemplo, os sinais $y(t)$, pode ser realizado por três parâmetros de sinal: a energia (E), a banda média (ω_c) e a largura de banda RMS, também conhecido como equivalente em banda (B). Estes parâmetros são descritos matematicamente a seguir:

$$E = \frac{1}{2\pi} \sum_{n=0}^{N-1} |Y_n|^2, \quad (11)$$

$$\omega_c = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} f_n |Y_n|^2}{2\pi E}, \quad (12)$$

$$B = \sqrt{\frac{1}{E} \sum_{n=0}^{N-1} (f_n - \omega_c)^2 |Y_n|^2}, \quad (13)$$

em que Y_n e f_n são, respectivamente, a transformada de Fourier e a frequência do sinal de resposta $y(t)$ no tempo discreto $y[n]$. N representa o tamanho do sinal analisado.

Embora a energia e a banda média sejam parâmetros comuns no campo de processamento digital de sinais, a largura de banda RMS de um sinal calcula o desvio padrão de seu espectro (CHENG, et al., 1991). Por meio desses três parâmetros, a TC visa formar um mapa de agrupamento de dados, que pode ser identificável do ponto de vista cromático (ZHANG, et al., 2005; WANG, et al., 2017; JONES, et al. 2000; ARDILA-REY, et al. 2018).

Como a condição íntegra ou danificada pode ser caracterizada como padrões ou diferentes estados estruturais, esta tese propõe a aplicação da técnica cromática para se agrupar e caracterizar a condição estrutural sob inspeções com ou sem o ruído. A ideia principal é formar um mapa de cores que se relaciona com a condição estrutural.

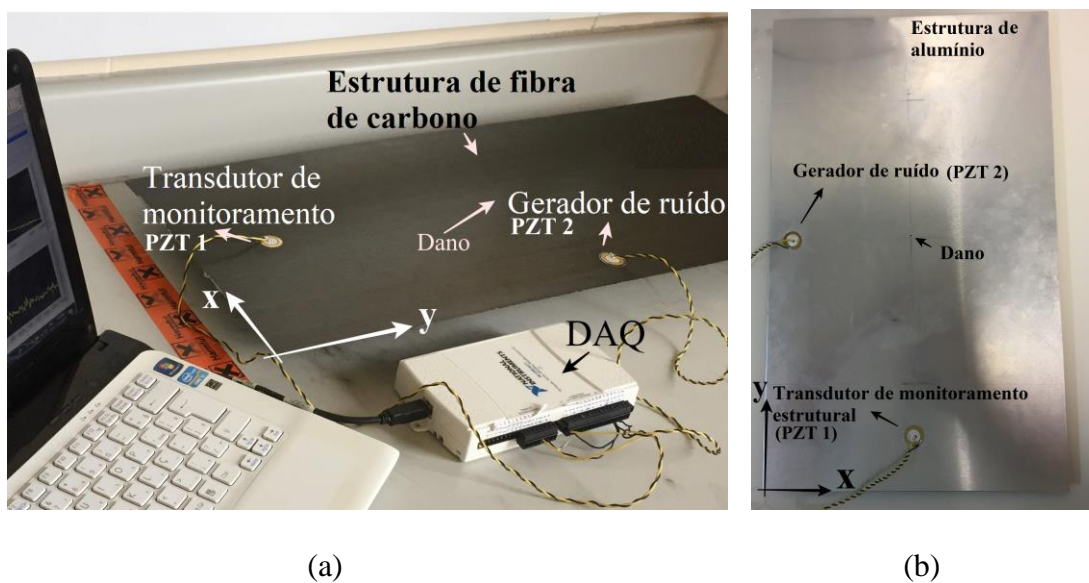
A fim de melhorar a sensibilidade da metodologia para o diagnóstico de evolução dos danos, este trabalho propõe um novo parâmetro cromático, o índice de Hinkley (H_i), baseado no critério estatístico de Hinkley, como a alternativa à energia (E). Como será apresentado, este novo parâmetro, associado com a banda média e a largura de banda RMS, melhorou a eficácia da técnica para a identificação de danos incipientes, assim como para a caracterização da evolução do tamanho da avaria. Este resultado se dá devido às propriedades do critério de Hinkley, que, conforme discutido no capítulo anterior, é sensível ao dano e minimiza a influência do ruído estrutural. O novo parâmetro em questão, denominado neste trabalho como “índice de Hinkley” (H_i), é a soma cumulativa de cada amostra da curva de Hinkley (H_k) de um sinal (CASTRO; BAPTISTA; CIAMPA; ARDILA REY, 2019):

$$H_i = \sum_{k=0}^{N-1} H_k \quad (14)$$

4.2. Metodologia Proposta

A fim de se avaliar a eficácia da técnica cromática para aplicações de impedância, experimentos foram realizados em uma placa de alumínio (300 mm x 500 mm x 1 mm) e em uma placa de fibra de carbono (300 mm x 700 mm x 1 mm). Nenhuma informação técnica a respeito do processo de manufatura de ambos os materiais foi fornecido. Na Figura 18 é apresentado o aparato experimental para ambas as estruturas. Como explanado nos capítulos anteriores, instalou-se dois transdutores piezelétricos (7BB-20-6, Murata Electronics®) por meio de uma cola a base de cianoacrilato. Um transdutor foi configurado para o monitoramento estrutural e, o outro, como atuador, responsável pela geração de ruído no meio material.

Figura 18 – Procedimento experimental para (a) estrutura compósita e (b) metálica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a estrutura compósita, as coordenadas dos transdutores 1 e 2 foram, respectivamente (150, 50) mm e (10, 350) mm. Para o material metálico o transdutor 1 foi instalado na coordenada (150, 50) mm e o transdutor 2 na coordenada (10, 250) mm. O sistema de instrumentação utilizado foi o dispositivo DAQ multifuncional NI USB-6211, ajustado para uma frequência de amostragem de 250 kHz. As assinaturas de impedância foram obtidas por meio de um sinal de excitação *chirp*, de amplitude de 1 V, faixa de frequência de 0 a 65 kHz e

passo de 2 Hz. Cada assinatura foi produzida a partir da média de dez medições e o resistor utilizado para o ensaio foi de 2,2 k Ω . Para se analisar a sensibilidade da técnica cromática ao diagnóstico de evolução de danos, dois furos de diâmetro de 1 mm (dano “1”) e 10 mm (dano “2”) foram inseridos, progressivamente, no centro geométrico das estruturas (coordenada (150, 350) mm para o compósito e coordenada (150, 250) mm para o alumínio). Por conseguinte, para a placa de alumínio, a porcentagem da massa de estrutura danificada foi de, 0,0005% e 0,005%, para o dano “1” e “2”, respectivamente. Em relação ao material compósito esses valores foram de 0,0004% e 0,004%.

Para simular um cenário de inspeção real, inseriu-se 20 níveis de ruído branco gaussiano na estrutura, cujas amplitudes variaram de 0 (inspeção controlada) a 10 V (0, 0,1 V, 0,2 V, 0,3 V, 0,4 V, 0,5 V, 0,6 V, 0,7 V, 0,8 V, 0,9 V, 1 V, 2 V, 3 V, 4 V, 5 V, 6 V, 7 V, 8 V, 9 V, 10 V). A faixa de frequência da perturbação foi de 0 a 65 kHz. Para cada condição estrutural e para cada nível de ruído, 20 sinais de resposta foram coletados, com objetivo de se construir um agrupamento de pontos cromáticos. Deste modo, cada agrupamento se consistiu em 400 pontos, que formaram um mapa de cores. Como em todos os ensaios deste trabalho, as medidas foram realizadas sob temperatura controlada (25°C) a fim de mitigar os efeitos dessa variável nos sinais. Para se atenuar possíveis vibrações e interferências mecânicas do meio ambiente, o material monitorado foi apoiado sobre espuma de espessura 50 mm.

4.3. Resultados

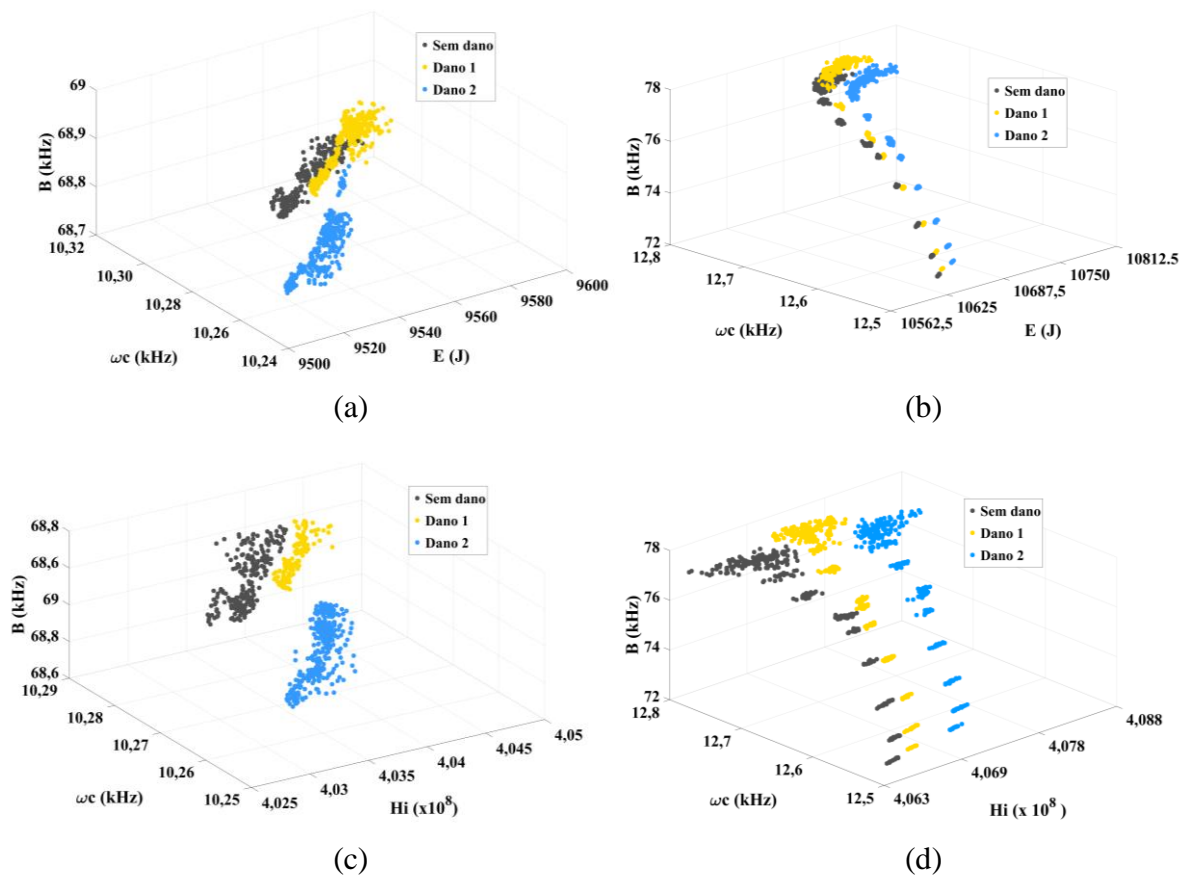
A fim de se avaliar a eficácia da técnica cromática para aplicações de impedância em ambientes ruidosos, gerou-se, como ilustrado na Figura 19, os mapas de cores para as três condições estruturais: condição íntegra, dano estrutural “1” e dano estrutural “2”.

Conforme observado nas Figuras 19 (a) e (b), a TC tradicional não realizou o correto diagnóstico de dano para ambos materiais, uma vez que os mapas de cores formados pelo estado de estrutura saudável se sobrepuseram aos mapas de condição de dano “1”. Com relação a este

resultado, pode-se concluir que a técnica tradicional produziu um diagnóstico de falso positivo, além de não ser sensível à evolução de uma falha incipiente. No entanto, essa técnica foi eficaz no diagnóstico do dano “2”, uma vez que essa condição estrutural criou uma região cromática totalmente distinta da região de condição íntegra.

Já a nova abordagem proposta, apresentou três mapas de cores totalmente distintos, como observado nas Figuras 19 (c) e (d). Este resultado comprova a eficácia do índice de Hinkley que, associado aos outros dois parâmetros, melhora a sensibilidade do sistema para monitoramento da evolução da falha. Esse resultado ocorre devido às propriedades do critério de Hinkley, que, conforme explanado no capítulo anterior, é sensível às mudanças produzidas pelos danos, além de atenuar os efeitos do ruído nas medições.

Figura 19 – Técnica cromática tradicional para (a) estrutura compósita e (b) metálica. Técnica modificada para (c) estrutura compósita e (d) metálica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em relação aos resultados obtidos, como observado nas Figuras 19 (a) e (b), os níveis de energia para a estrutura de alumínio foram superiores em aproximadamente 11 % em relação ao material compósito. Para o índice de Hinkley, esse percentual foi superior em apenas 1 %. Já a largura de banda RMS apresentou variações entre 68,7 kHz e 69 kHz para a estrutura de fibra de carbono e variações de 72 kHz a 78 kHz para a estrutura metálica. Neste último caso o limite inferior e superior cresceram, respectivamente, em 4 % e 11 %. Essa métrica, indica o desvio padrão da largura de banda, que é diretamente afetada pelo ruído estrutural.

Embora o sinal de excitação possua faixa de 0 a 65 kHz, a banda média permaneceu entre 10,2 kHz e 10,3 kHz para a estrutura compósita. Para a estrutura de alumínio esses valores ficaram entre 12,5 kHz a 12,8 kHz. Isso ocorre pois, conforme a Equação 12, a banda média é calculada ponderando-se cada amostra por sua respectiva amplitude. Como a frequência do sinal de resposta excitação varia linearmente com o tempo e a reatância capacitiva do transdutor diminui com o aumento da frequência, as maiores amplitudes permanecem para baixas frequências, o que ocasiona uma banda média baixa. A Figura 5, do Capítulo 3 desta tese, auxilia nesse entendimento.

Mediante os resultados obtidos, pode-se constatar que, contrariamente à análise tradicional, a técnica cromática apresentou um significativo potencial para aplicações de impedância onde o ruído estrutural se faz presente, uma vez que, pela aplicação do índice de Hinkley, a técnica produziu mapas distintos, independente do ruído estrutural inserido.

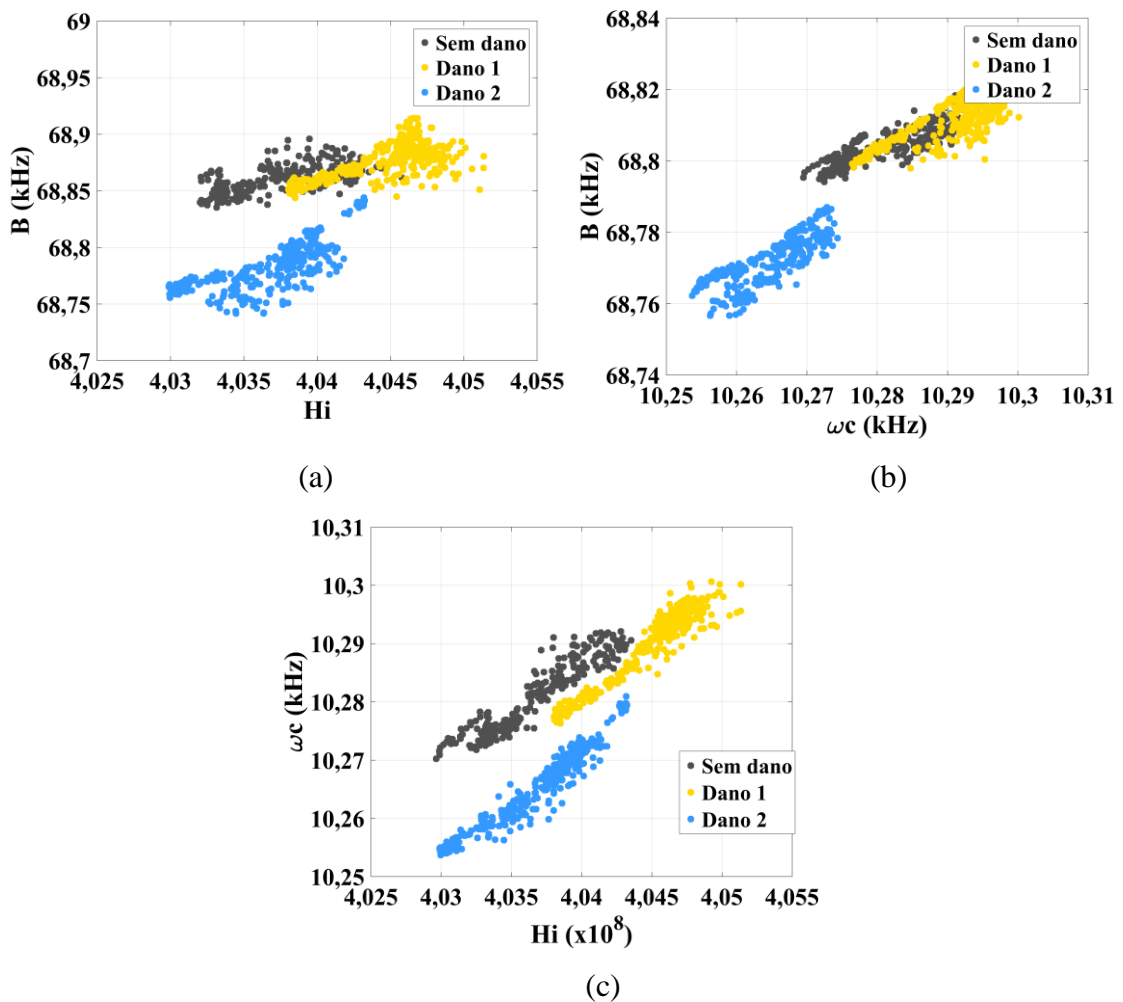
Com objetivo de se analisar a relevância dos parâmetros na separação dos dados, apresentou-se, nas Figuras 20 e 21, mapas bidimensionais da técnica cromática modificada.

Pela análise dos resultados apresentados para o material compósito, observa-se que os parâmetros cromáticos não realizam a separação dos dados de forma equivalente. Como observado na Figura 20 (a), as regiões formadas pelo par $B \times H_i$ não permitem o correto diagnóstico estrutural, uma vez que o mapa do dano “1” se sobrepõe ao mapa da condição íntegra. Este resultado é verificado quando H_i permanece entre $4,035 \cdot 10^8$ e $4,045 \cdot 10^8$, e para os

valores de B entre 68,84 kHz e 68,9 kHz. Todavia, para o dano “2” a técnica foi capaz de criar uma região distinta do conjunto de pontos formado pela medições de condição estrutural íntegra.

O mesmo comportamento é observado para o mapa formado pelo par $B \times \omega_c$. Embora o agrupamento formado por pontos referentes a condição de dano “1” se sobreponha ao agrupamento de condição íntegra, o mapa formado pelo dano “2” é totalmente díspar do agrupamento de pontos referente à condição estrutural saudável.

Figura 20 – Representação da técnica cromática para o material compósito em mapas bidimensionais formados por: (a) $B \times H_i$, (b) $B \times \omega_c$ e (c) $H_i \times \omega_c$.



Fonte: Elaborado pelo autor.

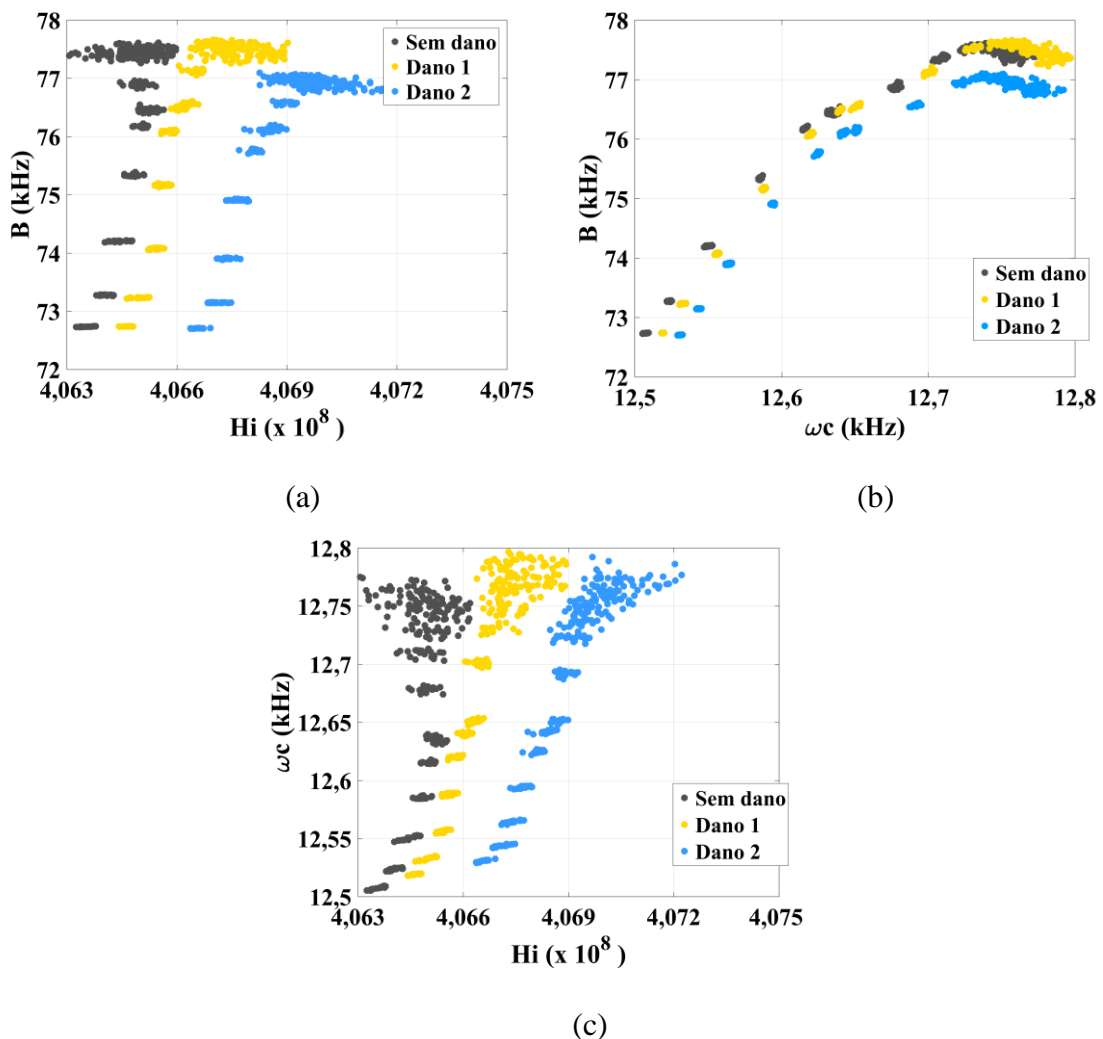
A melhor caracterização da condição estrutural se dá pelo mapa formado pelos

parâmetros $\omega_c \times H_i$. Como observado na Figura 20 (c), estes dois parâmetros modelam três regiões claramente definidas, promovendo o correto diagnóstico estrutural, independentemente do ruído aplicado à estrutura.

Constata-se também, pela análise dos gráficos apresentados, que o diagnóstico correto se dá mediante a aplicação de duas ou três variáveis cromáticas concomitantemente, uma vez que, um único parâmetro não é suficiente para a identificação das falhas. Por exemplo, o índice de Hinkley permanece entre $4,038 \cdot 10^8$ e $4,042 \cdot 10^8$ para todas as condições estruturais. Este mesmo comportamento ocorre para os outros parâmetros cromáticos.

Na Figura 21 é apresentado os mapas bidimensionais para a estrutura de alumínio.

Figura 21 – Representação da técnica cromática para a estrutura de alumínio em mapas bidimensionais formados por: (a) $B \times H_i$, (b) $B \times \omega_c$ e (c) $H_i \times \omega_c$.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Neste caso, somente o mapa $B \times \omega_c$ apresentou sobreposição dos agrupamentos cromáticos formados pela condição íntegra e dano “1”. Como observado nas Figuras 21 (a) e 22(c), as regiões formadas pelos parâmetros $\omega_c \times H_i$ e $B \times H_i$ são claramente definidas, segundo a condição estrutural.

4.4. Conclusão

Este capítulo apresentou a técnica cromática como alternativa às métricas tradicionais de identificação de avarias. Baseado nos resultados obtidos, o inédito índice proposto por este trabalho melhorou a eficácia da técnica cromática convencional, uma vez que o novo parâmetro possibilitou a criação de agrupamentos distintos para as três condições estruturais produzidas neste trabalho. Em termos práticos esta nova abordagem pode ser aplicada mediante a formação de um mapa de referência, ou *baseline map*, em que os pontos fora deste agrupamento podem indicar a presença de avarias estruturais.

CAPÍTULO V – UM NOVO ÍNDICE DE DANOS BASEADO NA CORRELAÇÃO CRUZADA DE SINAIS

Neste capítulo apresenta-se a técnica da correlação cruzada de sinais, bem como sua aplicação para sinais contaminados por ruídos. Um inédito índice de danos é proposto com objetivo de generalizar as aplicações de monitoramento via técnica da impedância eletromecânica.

5.1. A função correlação cruzada

A função correlação cruzada é uma técnica de processamento digital de sinais muito utilizada em radares, sonares, Wi-Fi, em aplicações de reconhecimento de padrão, estimação de sinais, etc. Essa função pode representar o grau de similaridade entre dois sinais baseados em um deslocamento temporal entre eles (COSTA-JUNIOR, et al., 2018, GUREVICH, et al., 2018, RAMAKRISHNA; KUMAR; THIRUMALAI, 2013; SAOUD; MOSOROV; GRUDZIEN, 2017).

Considerando dois sinais, $v(t)$ e $h(t)$, o vetor de correlação cruzada $R_{vh}(\tau)$ é calculado como sendo:

$$R_{vh}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T v(t)h(t+\tau)dt, \quad (15)$$

em que T é o tempo de integração e $R_{vh}(\tau)$ é obtido pela integral do produto $v(t)$ e $h(t)$ para cada posição do deslocamento τ de $h(t)$ em $v(t)$.

Basicamente, o ponto máximo do vetor $R_{vh}(\tau)$ se dá quando $v(t)$ e $h(t)$ possuem máxima similaridade. Se $v(t)$ e $h(t)$ forem iguais, o ponto máximo de $R_{vh}(\tau)$ se dará quando τ for igual a zero, maximizando o produto da integral. Para sinais discretos, a Equação (15) pode ser reescrita como:

$$R_{vh}[j] = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N v[k]h[k+j], \quad (16)$$

em que $v[k]$ e $h[k]$ são os sinais amostrados de, respectivamente, $v(t)$ e $h(t)$, sendo N o período de integração, que é o dobro do tamanho dos sinais $v[k]$ e $h[k]$, e j o deslocamento de $h[k]$ em $v[k]$.

Sendo assim, com relação aos sinais de impedância em ambientes totalmente controlados, uma inspeção de estrutura íntegra sempre produz resultados similares em amplitude, frequência e fase em relação ao sinal de *baseline*. Todavia, quando a estrutura possui danos, as assinaturas características tendem a se alterarem nestes mesmos parâmetros. Por conseguinte, no caso da correlação cruzada produzida por uma estrutura íntegra e uma assinatura de *baseline*, o ponto máximo entre essas duas curvas se dá quando $j = 0$, pois ambas são equivalentes e produzem o máximo produto possível nesse instante. Já com relação a uma inspeção danificada, o máximo ponto do vetor formado pela correlação cruzada entre um sinal de dano e uma *baseline*, além de ter amplitude diferente, ocorre em outra amostra de deslocamento j , pois os sinais de impedância em questão se diferem em amplitude e fase, não maximizando o produto entre os vetores na integral em questão.

Baseado neste fato, tomando como referência um vetor de correlação cruzada R_{B_2, B_1} , produzido por dois sinais de *baseline* B_1 e B_2 , um vetor R_{H, B_1} , gerado por uma assinatura de estrutura íntegra H e uma *baseline* B_1 , tem o mesmo padrão em relação a R_{B_2, B_1} . Deste modo, a diferença desses vetores tende a zero, uma vez que o pico máximo de R_{B_2, B_1} e R_{H, B_1} ocorre no mesmo instante de deslocamento j . Com relação às inspeções com presença de avaria, o dano estrutural faz com que o pico da correlação cruzada R_{D, B_1} , produzida entre uma medida de dano D e uma *baseline* B_1 , não ocorra no mesmo instante de deslocamento de R_{B_2, B_1} , produzindo um vetor da diferença com amplitude e energia diferente de zero.

A técnica da correlação cruzada é também utilizada comumente para a detecção ou estimação de sinais cujo conteúdo é corrompido (GAJIC, 2003, NORTON; KARZUB, 2003). Neste caso, o sinal que possui a maior correlação cruzada possível com um sinal corrompido é

considerado a melhor estimacão desse sinal. Essa técnica é eficaz, principalmente, quando os sinais analisados possuem padrões assintóticos similares, mesmo que corrompidos. No caso da técnica da impedância eletromecânica, esses padrões são observados nas curvas da parte imaginária da impedância do transdutor, bem como nos coeficientes de aproximao da transformada wavelet, conforme verificado nas Figuras 6 e 7 do Capítulo 3 desta tese. Tomando como base essa característica, as assinaturas corrompidas para inspeces íntegras, têm uma melhor estimacão com as assinaturas de baseline do que as assinaturas de dano, que, além de sofrerem a influência do ruído estrutural, também se divergem em frequência e fase devido a mudanças na impedância mecânica da estrutura. Por conseguinte, a diferença entre $R_{H,B1}$ e $R_{B2,B1}$, sempre será menor que a diferença entre $R_{D,B1}$ e $R_{B2,B1}$, uma vez que $R_{H,B1}$ tem melhor estimacão com $R_{B2,B1}$.

Devido a essa característica entre os sinais de impedância, este trabalho propõe um novo ndice de dano baseado no desvio quadrático da correlao cruzada, ou CCSD (*cross-correlation square deviation index*), para a correta extrao de característica estrutural em medidas onde o ruído  presente. O ndice CCSD é apresentado como segue:

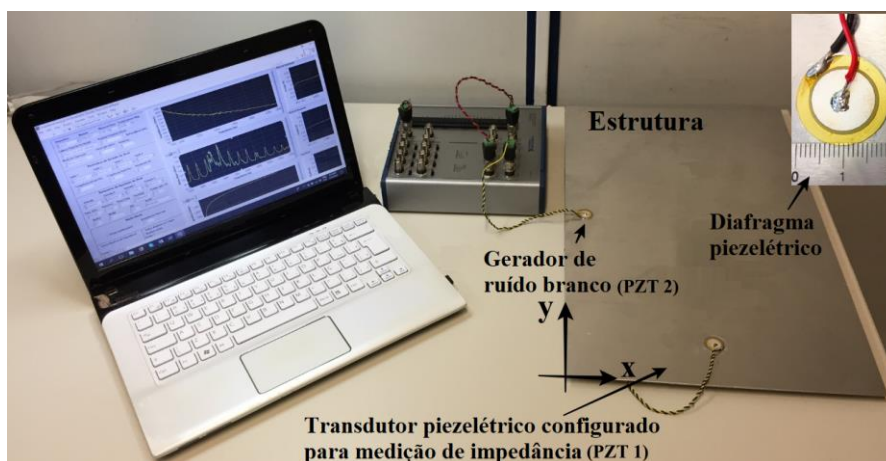
$$CCSD = \sum (R_{M,B1} - R_{B2,B1})^2, \quad (17)$$

em que $R_{M,B1}$ é a correlao cruzada produzida por uma medida M e uma baseline $B1$, e $R_{B2,B1}$ é a correlao cruzada produzida por duas assinaturas de baseline em uma faixa apropriada de frequência.

5.2. Metodologia Proposta

Para se avaliar a eficácia do novo índice de danos proposto, experimentos foram realizados em uma estrutura de alumínio cujas dimensões foram de 300 mm x 500 mm x 1 mm, como se mostra na Figura 22. Nenhuma informação técnica a respeito do processo de manufatura e composição química do material foi fornecido.

Figura 22 - Procedimento experimental.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os transdutores foram acoplados à estrutura por meio de uma cola a base de cianoacrilato e os ensaios foram realizados sob temperatura controlada. Um diafragma piezolétrico foi configurado para as medições de impedância (PZT 1 – coordenada (150, 50) mm) e, o outro, para a geração de ruído estrutural (PZT 2 – coordenada (10, 250) mm). A placa de aquisição de dados utilizada para o teste foi a NI USB 6366 da *National Instruments*®. A taxa de amostragem foi ajustada para 2 milhões de amostras por segundo e o sinal *chirp* utilizado para a extração das assinaturas teve amplitude de 1 V (1 V_p), faixa de frequência de 0 a 200 kHz e passo de 2 Hz. O resistor do divisor de tensão para a medida de impedância foi de 2,2 kΩ. Os níveis de ruído branco uniforme inseridos foram de 0,1 V a 10 V de amplitude e faixa de 0 a 200 kHz. Cada sinal de impedância calculado foi produzido a partir da média de dez medições.

Como o objetivo deste estudo foi comparar a sensibilidade do novo índice para a

identificação e classificação do dano estrutural em ambientes com ruído, foram inseridos, progressivamente, dois tipos de danos reais no centro geométrico da estrutura (coordenada (150, 250) mm): furos de 1 mm (dano “A”) e 10 mm (dano “B”) de diâmetro, o que representaram, em percentual de volume danificado, 0,0005 % e 0,05 %, respectivamente.

Para se atenuar possíveis vibrações e interferências mecânicas do meio ambiente, o material monitorado foi apoiado sobre espuma de espessura 50 mm. Além disso, a temperatura do teste foi mantida constante em 25°C.

5.3. Resultados

O novo índice proposto foi aplicado tanto para as curvas de impedância, para sub faixas de 10 kHz, quanto para os coeficientes Wavelet. Sendo assim, a apresentação dos resultados será dividida em duas etapas: a análise via assinaturas de impedância e transformada Wavelet.

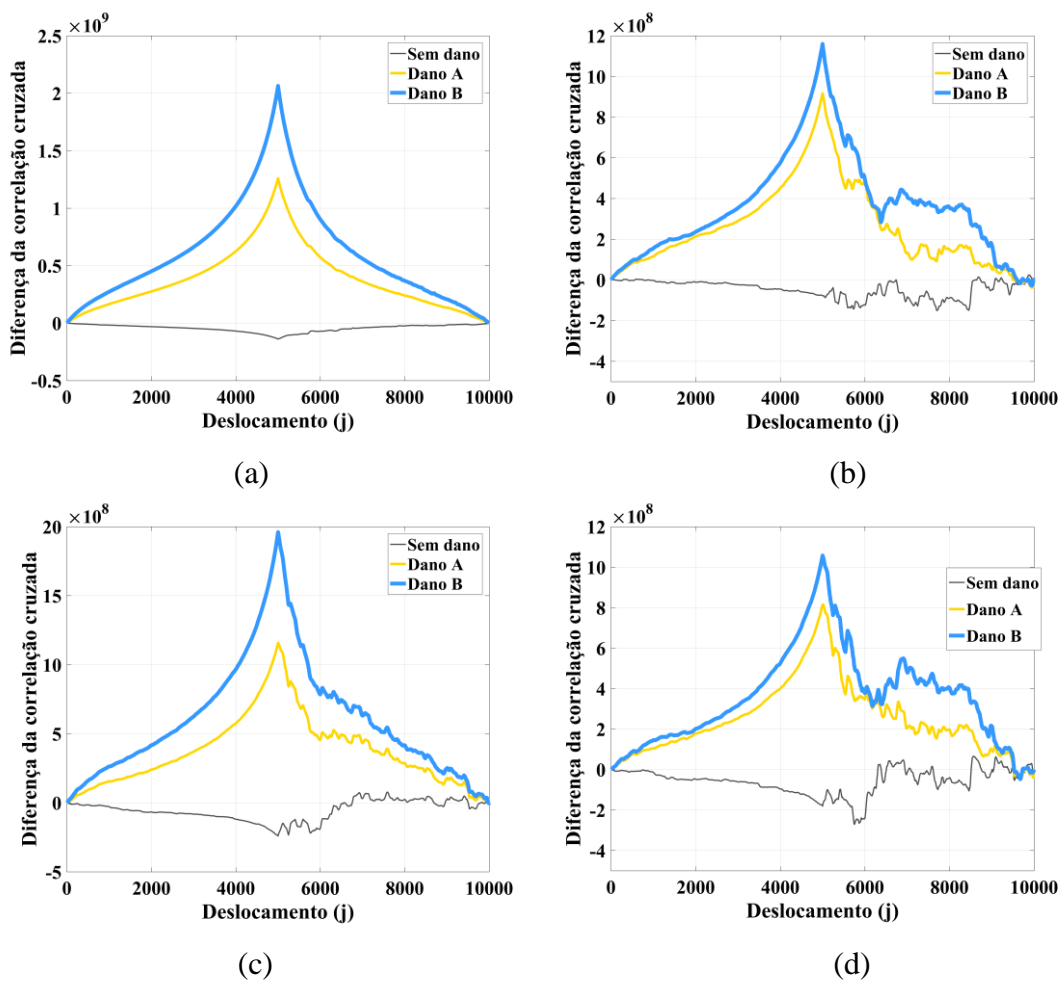
5.3.1. CCSD aplicado às assinaturas de impedância.

Primeiramente, a parte imaginária da curva de impedância foi escolhida pois, embora o ruído também corrompa esta curva, o sinal mantém uma tendência assintótica em relação aos sinais extraídos em inspeções controladas. Além disso, a parte imaginária, que se refere exatamente ao acoplamento eletromecânico entre o transdutor e a estrutura hospedeira, apresentou maior eficácia no monitoramento estrutural.

A fim de se demonstrar a eficiência desta metodologia, apresentou-se diferentes combinações de ruído incidentes nas inspeções. Na Figura 23 mostra-se a diferença da correlação cruzada para inspeções realizadas com níveis de ruído estrutural de 0,1 V e 10 V, e *baselines* extraídas para níveis de ruído de 1 V e 10 V. A faixa de frequência escolhida foi de 0 a 10 kHz. De acordo com os resultados experimentais, os vetores formados pela diferença da correlação cruzada se mostraram eficazes para o diagnóstico de condição estrutural, uma vez que, para todos os casos apresentados, eles cresceram com o aumento do dano. Este resultado

confirma o que foi explanado na seção 5.1 desta tese. Embora os sinais sejam corrompidos por ruídos estruturais, as assinaturas produzidas pela condição íntegra têm uma melhor estimativa com as assinaturas de *baseline*. Já as assinaturas extraídas para condição de dano, além de serem afetadas pelo ruído, sofrem mudanças devido às alterações na impedância mecânica da estrutura, produzindo vetores de diferença com maiores amplitudes. Outro fator observado se dá no valor de pico dessa curva, que caiu com o aumento do nível de ruído. Isso ocorre, pois, o aumento do grau de contaminação do sinal, faz com que a correlação cruzada produza menores valores no produto de sua integral.

Figura 23 - Diferença da correlação cruzada para a banda de 0 a 10 kHz. Baselines extraídas para nível de ruído de 1 Vp e inspeções com ruídos de (a) 0,1 Vp e (b) 10Vp. Baselines extraídas para nível de ruído de 10 Vp e inspeções com ruídos de (c) 0,1 Vp e (d) 10Vp.



Fonte: Elaborado pelo autor.

No mais, como observado, o aumento do nível dessa perturbação produz oscilações na curva de diferença para a estrutura íntegra, uma vez que o ruído corrompe mais intensamente os sinais, produzindo diferenças entre $R_{H,B1}$ e $R_{B2,B1}$. No entanto, essas oscilações não prejudicam o diagnóstico da falha, uma vez que essas variações permanecem em torno do eixo das abcissas e não produzem picos, como os observados para as condições de danos.

Uma outra característica que pode ser observada na Figura 23, é o decaimento do pico das curvas da diferença com o aumento do ruído estrutural. Isso ocorre pois o máximo ponto de correlação entre B_1 e B_2 , como também o máximo ponto entre D e B_1 , não formam uma perfeita sobreposição dos sinais, produzindo, conseqüentemente, valores de picos menores para $R_{B2,B1}$ e $R_{D,B1}$.

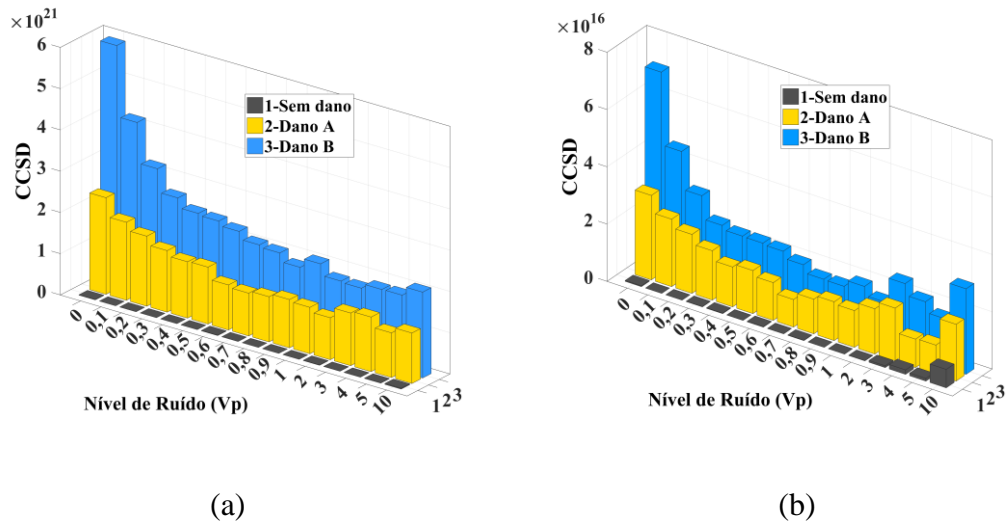
De acordo com esses resultados experimentais, a diferença da correlação cruzada foi capaz de promover o correto diagnóstico estrutural, uma vez que os vetores cresceram com o tamanho do dano inserido. Deste modo, um dano pode ser diagnosticado somente pela observação dessas curvas.

Para quantificar matematicamente o comportamento dessas curvas, aplicou-se o desvio quadrático para os respectivos vetores de diferença (CCSD). A título de simplificação, apresentou-se o novo índice para a baseline extraída sob três diferentes níveis de amplitude de ruído: 0,1 V (nível baixo), 1 V (nível moderado) e 10 V (nível alto). Esses valores representam variações entre um décimo e dez vezes a amplitude do sinal utilizado para se extrair as curvas de impedância. A partir disso, as inspeções foram coletadas de níveis de ruído que variaram de 0 (ambiente controlado) até 10 V de amplitude.

5.3.1.1 Baseline extraída para nível de ruído baixo.

Na Figura 24 é apresentando o CCSD extraído para as bandas de 0 a 10 kHz e 60 kHz a 70 kHz, considerando uma *baseline* extraída em nível de ruído estrutural de 0,1 V.

Figura 24 - CCSD para baseline extraída em nível de ruído de 0,1 V para as bandas de (a) 0 – 10 kHz e (b) 60 – 70 kHz.



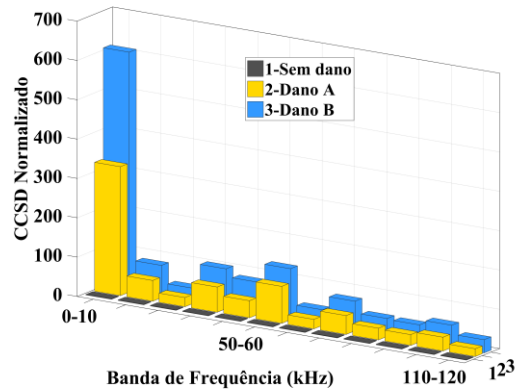
Fonte: Elaborado pelo autor.

Baseado nos resultados apresentados na Figura 24, verifica-se que, para as ambas bandas, o CCSD cresceu com o tamanho do dano, independentemente do nível de ruído estrutural aplicado, mesmo com o sinal de baseline também contaminado. Para a banda de frequência de 0 a 10 kHz, o valor do índice para a condição íntegra permaneceu em torno de 10^{19} , e para a estrutura danificada este valor se apresentou em torno de 10^{21} . Com relação à faixa de 60 kHz a 70 kHz, esses valores ficaram entre 10^{14} e 10^{16} , para a condição estrutural íntegra e com dano, respectivamente.

Como discutido anteriormente, o aumento do nível de ruído estrutural faz com que a correlação entre os sinais caia, o que produz menores valores para o CCSD. Em relação às medidas extraídas para a banda de 0 a 10 kHz, o CCSD decresceu de $6 \cdot 10^{21}$ para $2 \cdot 10^{21}$ em relação ao dano “B”, e de $2 \cdot 10^{21}$ para $1 \cdot 10^{21}$, para o dano “A”. Em relação à banda de 60 kHz a 70 kHz, o índice caiu de $7 \cdot 10^{16}$ para $3 \cdot 10^{16}$ na condição de dano “B” e de $3 \cdot 10^{16}$ para $1 \cdot 10^{16}$ em relação ao dano “A”.

Como o índice CCSD varia com o nível de ruído, o valor médio normalizado de cada sub banda foi calculado, conforme Figura 25. Considerou-se $CCSD = 1$ para a estrutura íntegra.

Figura 25 - CCSD médio normalizado para *baseline* extraída em nível de ruído de 0,1 V.



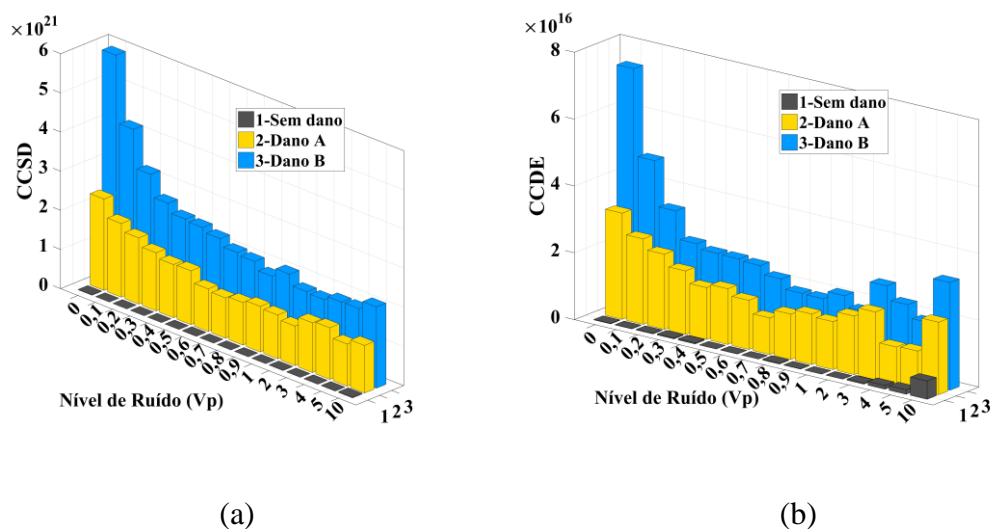
Fonte: Elaborado pelo autor.

Constata-se, mediante o resultado apresentado, que o CCSD normalizado foi sensível a evolução do tamanho da falha nas sub bandas de 0 a 120 kHz, uma vez que o índice cresceu com o tamanho da falha imposta ao material. As bandas que apresentaram maior sensibilidade, ou seja, as que externaram maior valor para o índice, foram as faixas de 0 a 10 kHz e de 50 a 60 kHz. Na primeira banda de frequência, o CCSD foi 320 e 600 vezes maior que o índice para a estrutura saudável ($CCSD = 1$), para os danos “A” e “B”, respectivamente. Em relação à faixa de 50 - 60 kHz, esses valores foram 85 e 120 vezes superiores à condição íntegra.

5.3.1.2 *Baseline extraída para nível de ruído moderado.*

Como o objetivo é avaliar a eficácia do novo índice de danos para diferentes condições de ruído, apresenta-se, na Figura 26, o CCSD calculado para uma *baseline* corrompida por 1 V de ruído estrutural.

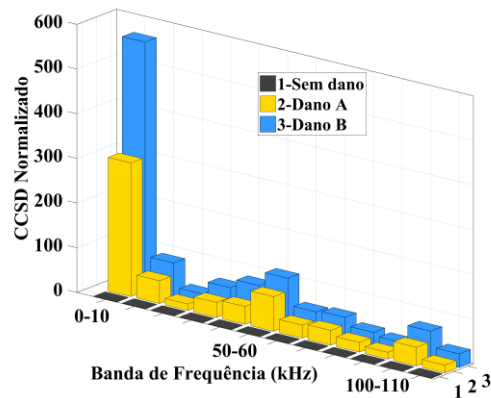
Figura 26 - CCSD para *baseline* extraída em nível de ruído de 1 V para as bandas de (a) 0 – 10 kHz e (b) 60 – 70 kHz.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com relação aos resultados apresentados, observa-se que o aumento do nível de ruído para 1 V não foi suficiente para se prejudicar o correto diagnóstico das falhas. O mesmo comportamento observado na Figura 24, é repetido para este caso. Para a banda de frequência de 0 a 10 kHz, o valor do CCSD para a condição íntegra permaneceu em torno de 10^{19} , e para a estrutura danificada este valor se apresentou em torno de 10^{21} . Com relação à faixa de 60 kHz a 70 kHz, esses valores ficaram entre 10^{14} e 10^{16} , respectivamente, para a condição estrutural íntegra e com dano. Em relação às medidas extraídas para a banda de 0 a 10 kHz, o CCSD decresceu de $5,8 \cdot 10^{21}$ para $2 \cdot 10^{21}$, na condição de dano “B” e de $2,1 \cdot 10^{21}$ para $1 \cdot 10^{21}$ para o dano “A”. Em relação à banda de 60 kHz a 70 kHz, o índice caiu de $7 \cdot 10^{16}$ para $3 \cdot 10^{16}$ para o dano “B” e de $3 \cdot 10^{16}$ para $1 \cdot 10^{16}$ para o dano “A”. Entretanto, observa-se que o índice CCSD para a estrutura íntegra, cresceu de $4 \cdot 10^{18}$ para $8 \cdot 10^{18}$ devido aos efeitos do ruído nos vetores de correlação cruzada. Por conseguinte, existe um decaimento marginal do CCSD médio normalizado, conforme apresentado na Figura 27.

Figura 27 - CCSD médio normalizado para *baseline* extraída em nível de ruído de 1 V.



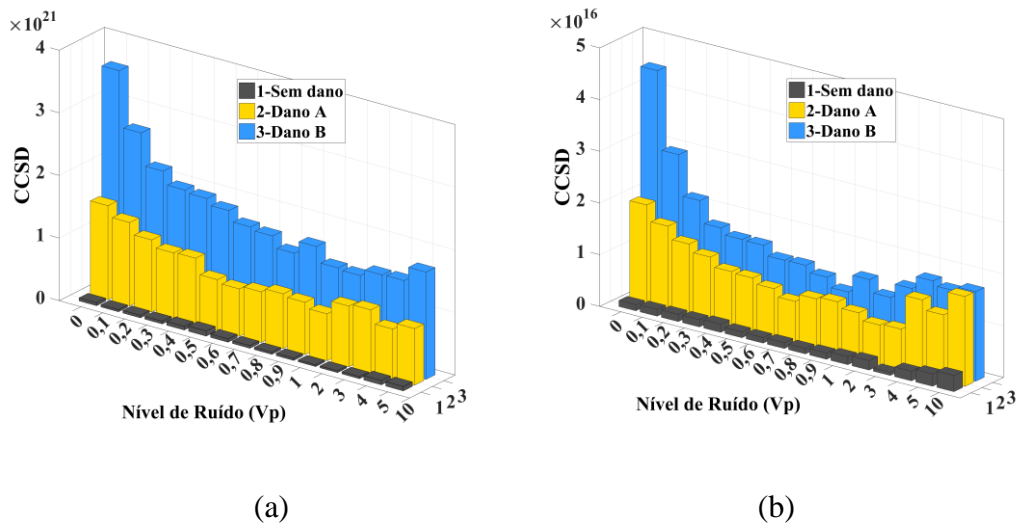
Fonte: Elaborado pelo autor.

Como observado, o CCSD normalizado também aumentou com o tamanho do dano, para todas as bandas de frequência de 0 kHz a 120 kHz. No entanto, esses valores são ligeiramente menores, em relação ao índice produzido quando a *baseline* é extraída em ambiente contaminado com uma amplitude do ruído de 0,1 V. As bandas de frequências mais sensíveis também se apresentaram entre 0 a 10 kHz e 50 a 60 kHz. Para a primeira faixa, o CCSD médio normalizado apresentou valores em torno de 300 e 550 para os danos “A” e “B”, respectivamente. Esses valores representam uma queda de 6,6% e 8% em relação ao CCSD extraído na primeira análise (*baseline* corrompida com 0,1 V de ruído). Já na faixa de 50 a 60 kHz, o índice apresentou valores em torno de 75 e 100 para os danos “A” e “B”, correspondendo a um decaimento de 11% e 16%, respectivamente.

5.3.1.3 *Baseline* extraída para nível de ruído alto.

Na Figura 28 apresenta-se o CCSD calculado para uma *baseline* corrompida por 10 V de ruído estrutural. Esta amplitude do ruído representa níveis de contaminação dez vezes maiores que o sinal *chirp* empregado para as medições de impedância.

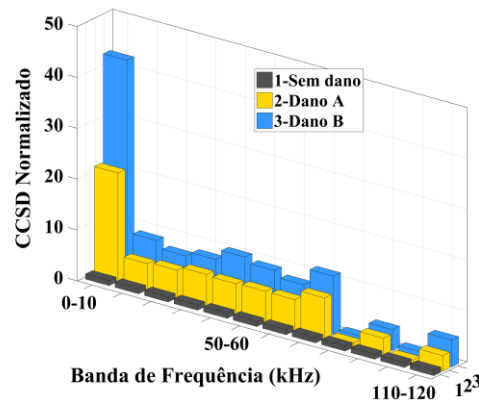
Figura 28 - CCSD para *baseline* extraída em nível de ruído de 10 V para as bandas de (a) 0 – 10 kHz e (b) 60 – 70 kHz.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados apresentados na Figura 28, repetiram o comportamento observado nas outras análises, ou seja, o CCSD foi capaz de identificar e classificar o dano. Para as faixas de 0 a 10 kHz e 60 kHz a 70 kHz, os índices para a condição de dano “A” e “B” permaneceram, respectivamente em 10^{21} e 10^{16} . Para a banda de 0 a 10 kHz o índice decresceu de $3,5 \cdot 10^{21}$ para $1,5 \cdot 10^{21}$, em relação ao dano “B” e de $1,5 \cdot 10^{21}$ a $1 \cdot 10^{21}$, em relação ao dano “A”. Já para a outra banda apresentada, o CCSD decaiu, em relação ao dano “B”, de $4,5 \cdot 10^{16}$ para $1,5 \cdot 10^{16}$ e, em relação à falha “A”, de $2 \cdot 10^{16}$ para $1 \cdot 10^{16}$. Para as inspeções em condição estrutural íntegra os valores observados para o CCSD cresceram em aproximadamente 10 vezes para ambas bandas, permanecendo em torno de 10^{20} e 10^{15} para as bandas de 0 a 10 kHz e de 60 kHz a 70 kHz, respectivamente. Sendo assim, como o CCSD relativo depende dos valores do índice para a estrutura íntegra, observou-se que o CCSD médio relativo apresentou um decréscimo, conforme observa-se na Figura 29.

Figura 29 - CCSD para médio normalizado para *baseline* extraída em nível de ruído de 10 V.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Esse resultado ocorre pois, conforme explicado, a diferença dos vetores de correlação cruzada para a condição íntegra, possui oscilações em torno do eixo das abscissas, quando o ruído estrutural aumenta. A banda de 0 a 10 kHz, para este caso, também apresentou maior sensibilidade ao diagnóstico de falhas. No entanto, os valores do CCSD para os danos “B” e “A” foram de 40 e 20, respectivamente. Para a faixa de 60 kHz a 70 kHz esses valores foram de 10 e 5.

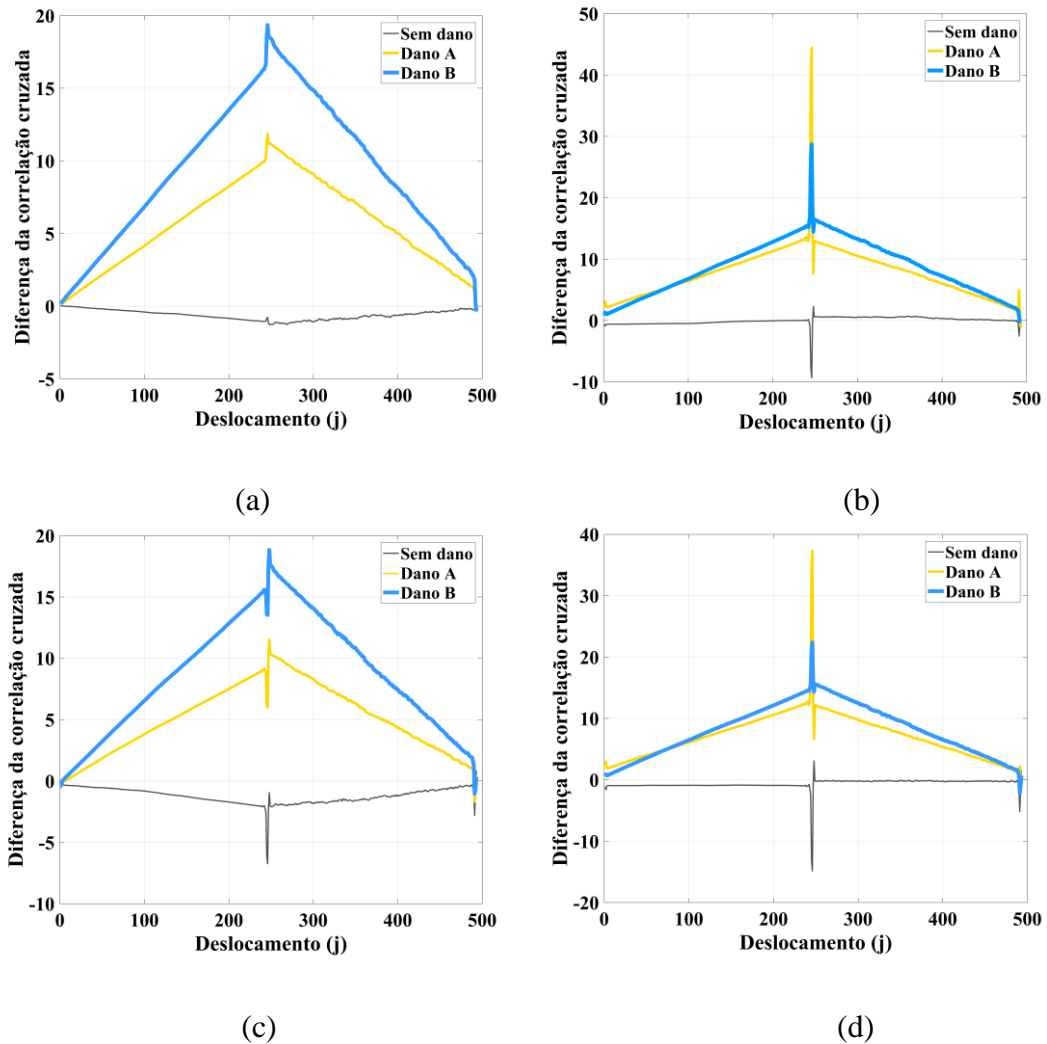
Embora o CCSD diminua com o aumento do ruído estrutural, cabe destacar que, o índice pode ser uma alternativa para o monitoramento estrutural, uma vez que, para as bandas apresentadas, a nova métrica de dano cresceu com o tamanho da avaria estrutural.

5.3.2. CCSD aplicado aos coeficientes Wavelet.

Com relação à análise via transformada Wavelet, o novo índice de danos foi aplicado apenas para os coeficientes de aproximação. Como discutido anteriormente, os coeficientes de detalhe permitem uma análise do sinal em baixa escala e em componentes de alta frequência. Por conseguinte, esse tipo de coeficiente é mais sensível ao ruído, que produz transitórios no sinal analisado. Sendo assim, apenas para os coeficientes de aproximação, o CCSD foi eficaz no diagnóstico estrutural.

Como na análise anterior, mostra-se, na Figura 30, a diferença da correlação cruzada para inspeções realizadas com níveis de ruído estrutural de 0,1 V e 10 V, e *baselines* extraídas para níveis de ruído de 1 V e 10 V. O nível de aproximação apresentado foi o décimo segundo.

Figura 30 - Diferença da correlação cruzada para a nível wavelet de aproximação 12. *Baselines* extraídas para nível de ruído de 1 Vp e inspeções com ruídos de (a) 0,1 Vp e (b) 10Vp. *Baselines* extraídas para nível de ruído de 10 Vp e inspeções com ruídos de (c) 0,1 Vp e (d) 10Vp.



Fonte: Elaborado pelo autor.

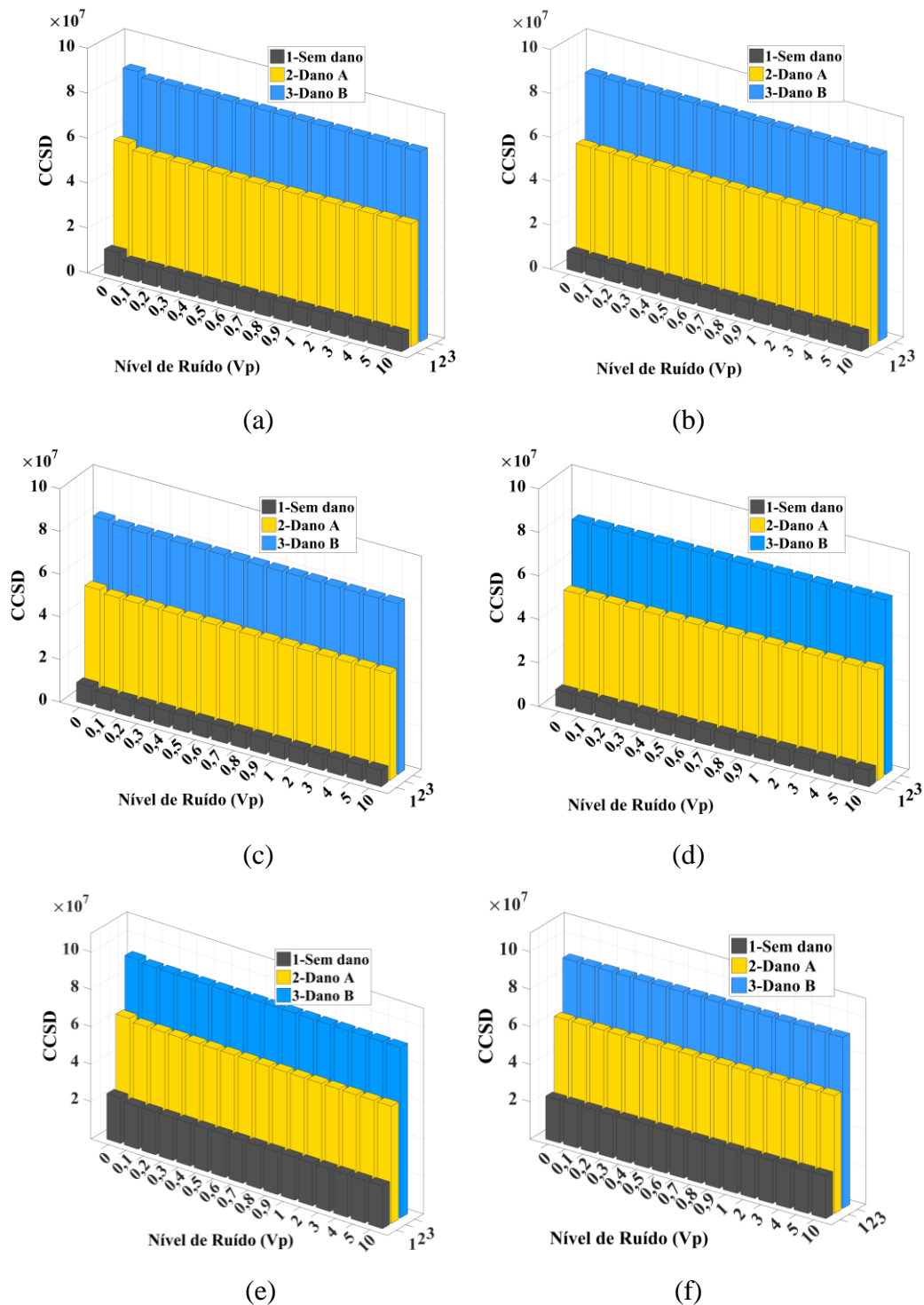
De acordo com esse resultado experimental produzido pela análise wavelet de aproximação, os vetores da diferença da correlação cruzada também foram eficazes na caracterização da evolução dos danos inseridos, uma vez que eles cresceram com o tamanho do avaria. Esses resultados confirmam o que foi exposto anteriormente, em que a diferença da

correlação cruzada produz vetores maiores para a condição de dano. Observa-se que, tanto para a análise de impedância quanto para a análise Wavelet, as curvas de correlação cruzada permaneceram em torno de zero para a condição íntegra e apresentaram picos ou oscilações devido ao aumento do nível de ruído estrutural.

Observa-se também que, para todos os casos de estrutura danificada, o vetor da diferença de correlação cruzada aumentou de zero até um ponto de máximo global e, então, diminuiu novamente. Por exemplo, em todos os casos, a curva referente ao dano “B” cresce de zero até 15, e, exatamente neste ponto, apresenta uma descontinuidade. Após, os valores novamente decrescem até zero. A única diferença observada entre os vetores correlacionados com a condição estrutural de dano, está nos valores de pico, que, para todos os casos, aumentam com o nível de ruído. Embora exista essa diferença, observa-se que a assíntota de crescimento e decaimento são semelhantes em todos os casos de condição estrutural com avaria. Deste modo, as amplitudes do CCSD não apresentaram diferença significativa, pois as amplitudes desses picos não são suficientes para aumentar significativamente o valor do índice de dano.

Como exemplo, na Figura 31, é apresentado os valores de CCSD produzidos pelos níveis Wavelets 7 e 19. Contrariamente ao comportamento apresentado pela análise de impedância, as curvas de diferença da correlação cruzada não diminuiram com o aumento do ruído estrutural, devido ao efeito dos filtros FIR. Os filtros, utilizados para calcular os coeficientes de aproximação, permitem a análise em alta escala e baixas frequências. Por conseguinte, como esses coeficientes são insensíveis aos transitórios causados pelo ruído estrutural, o CCSD apresenta aproximadamente os mesmos valores para todos os níveis de ruído aplicados à estrutura. Além disso, à medida que o nível de filtragem aumenta até o último nível Wavelet, a sobreposição de sinais produz picos mais altos na integral da correlação cruzada.

Figura 31 – CCSD obtido para uma baseline extraída com a presença de ruído de 0,1 V e nível wavelet 7 e (b) 19; (c) com ruído de 1 V e nível wavelet 7 e (d) 19; (e) com ruído de 10 V e nível wavelet 7 e (f) 19.



Fonte: Elaborado pelo autor.

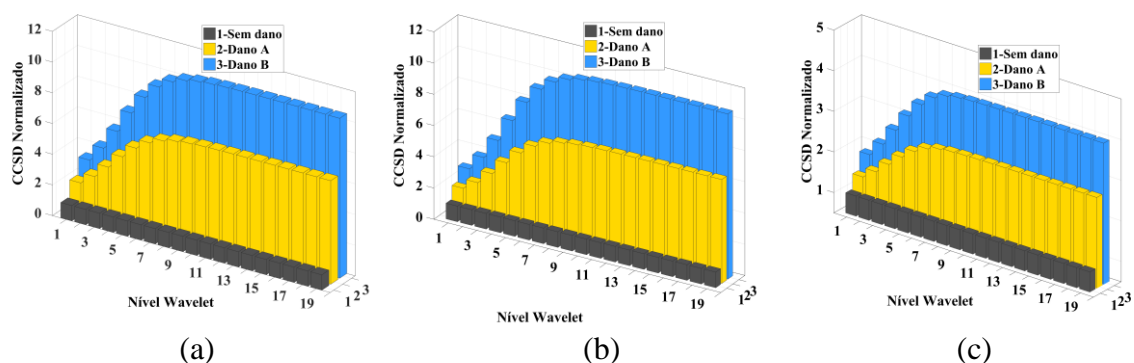
Com relação aos resultados apresentados na Figura 31, todos os valores de CCSD permaneceram em torno de $5,5 \cdot 10^7$ para o dano “A” e $8 \cdot 10^7$ para o dano “B”, quando as

assinaturas de baseline foram extraídas para amplitudes de ruído de 0,1 V e 1 V. No caso da baseline contaminada por uma amplitude de 10 V de ruído esses valores foram de $6 \cdot 10^7$ para o dano “A” e $9 \cdot 10^7$ para o dano “B”. Entretanto, para a condição de estrutura íntegra, o CCSD cresceu para o nível de ruído de 10 V, variando de $0,8 \cdot 10^7$, como nas inspeções cuja baseline foi contaminada em 0,1 V e 1 V, para $2,2 \cdot 10^7$.

Na Figura 32 é apresentado o CCSD médio normalizado para todos os níveis Wavelet. Como observado, todos os níveis de aproximação foram eficazes no diagnóstico estrutural uma vez que, para todos os casos, o CCSD cresceu com o tamanho da avaria imposta ao material. Além disso, entre os níveis 1 e 7, houve um aumento da sensibilidade do índice que, após o oitavo nível, permaneceu constante. Esse crescimento ocorre devido ao aumento do grau de filtragem dos níveis wavelet.

Para a *baseline* extraída com níveis de ruído de 0,1 V e 1 V, os valores do CCSD médio normalizado foram de 6, para o dano “A” e 10, para o dano “B”, no que condiz aos níveis de aproximação mais sensíveis, isto é, a partir do nível 7. Para o ruído de 10 V, esses valores foram de 2, para o dano “A” e 4, para o dano “B”.

Figura 32 – CCSD médio normalizado para *baselines* extraídas com (a) 0,1 V, (b) 1V e (c) 10 V de ruído estrutural.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.4. Conclusão

Neste capítulo se apresentou um novo índice estrutural para a identificação e caracterização de falhas. Este índice, o CCSD, baseado na correlação cruzada entre sinais, foi totalmente eficiente e permitiu a identificação e a classificação da condição estrutural sob todos os níveis de ruído aplicado, diferentemente das técnicas tradicionais apresentadas pela literatura. Sendo assim, este resultado torna, portanto, uma alternativa para a expansão da técnica da impedância E/M em inspeções reais onde, na maioria das vezes, o ruído se faz presente e varia ao longo do tempo.

Cabe destacar que, para o cálculo do índice CCSD, o vetor formado pela auto-correlação de uma baseline pode ser utilizado como alternativa ao vetor formado pelas duas *baselines*.

CAPÍTULO VI – CONCLUSÃO

Sistemas SHM são responsáveis pelo aprimoramento da segurança humana e estrutural. Contribuem também com a diminuição de custos com manutenções nas estruturas em que são incorporados. Tanto a ciência quanto a indústria têm buscado desenvolver sistemas capazes de fornecer um diagnóstico estrutural confiável, a fim de se promover segurança humana e redução de custos por meio de manutenções eficientes. Baseado neste fato, o estudo realizado por este trabalho teve como foco os atuais desafios tecnológicos relacionados à técnica da impedância eletromecânica. Embora seja uma metodologia de monitoramento e diagnóstico de falhas intensivamente estudada nas últimas décadas, muitas questões práticas tem limitado seu uso em aplicações reais, como a influência do ruído nas assinaturas de impedância, que suscitam não conformidades e erros no monitoramento estrutural.

Tomando como base essa problemática, essa tese teve como objetivo propor soluções factíveis às inspeções onde o ruído estrutural pode afetar significativamente o correto diagnóstico de falha. Deste modo, a partir de uma contextualização prática, este trabalho exemplificou os efeitos deste tipo de perturbação nas técnicas tradicionais, que utilizam os índices como o CCDM e o RMSD. Além disso, por este estudo, concluiu-se que, embora o ruído corrompa todas as assinaturas de impedância e os níveis wavelet, os sinais extraídos da parte imaginária e análise de aproximação, conservam as assíntotas originais das curvas extraídas em inspeções controladas.

A partir desta contextualização foram propostas três técnicas de processamento de sinais que contribuiriam para a minimização da influência do ruído na análise de impedância.

A primeira técnica apresentada utilizou critério de Hinkley como uma nova abordagem de monitoramento. Neste aspecto, o critério se demonstrou eficaz em se diagnosticar danos, tanto em ambientes controlados, como em ambientes onde o ruído estrutural se faz presente. Constatou-se um maior número de bandas sensíveis ao dano, em relação às análises

tradicionais. Além disso, para ruídos inferiores a 1 V, todas as faixas em questão produziram índices que cresceram com o tamanho da avaria. Entretanto, a técnica não foi eficaz para as inspeções onde o ruído estrutural permaneceu maior que o sinal de excitação (1 V). Portanto, em aplicações onde o ruído estrutural é baixo, o critério de Hinkley pode ser uma alternativa para o monitoramento.

A segunda abordagem apresentada, foi baseada na técnica cromática de reconhecimento de padrão. A aplicação da TC tradicional, que se vale dos parâmetros de energia, banda média e banda RMS, não apresentou eficácia para o diagnóstico de danos incipientes, uma vez que o conjunto de pontos cromáticos para o menor dano se sobrepôs ao mapa de inspeções formado pela condição íntegra. Deste modo, esta tese propôs uma nova métrica, o índice de Hinkley que, como alternativa ao parâmetro de energia, melhorou a eficácia da técnica tradicional para o diagnóstico de danos incipientes, separando em regiões distintas, as três condições estruturais impostas aos materiais.

Sendo a principal contribuição deste trabalho, a terceira técnica apresentou um novo índice para o monitoramento estrutural, que foi baseado na correlação cruzada de sinais. Deste modo, constatou-se também que a própria observação dos vetores de diferença pode auxiliar no diagnóstico estrutural, independentemente do ruído presente, tanto na extração das assinaturas de baseline, quanto nas inspeções cotidianas de monitoramento. Também foi verificado que o novo índice (CCSD) pode ser uma alternativa eficaz e factível para aplicações onde o ruído estrutural se faz presente, como na grande maioria dos casos reais.

Este estudo se deu como uma contribuição aos sistemas de monitoramento baseados na impedância eletromecânica em aplicações de baixa relação sinal-ruído. Sendo assim, essas abordagens desenvolvidas e apresentadas nesse trabalho, podem contribuir para a expansão da técnica E/M em aplicações reais, sem a necessidade da realização de medições controladas. Entretanto, no desenvolvimento deste trabalho, os efeitos térmicos e magnéticos não foram considerados. Sendo assim, para trabalhos futuros, esse tipo de investigação para as métricas

propostas nesta tese, se torna desejável.

Referências

- ALBAKRI, M. I.; TARAZAGA, P. A. Electromechanical impedance-based damage characterization using spectral element method. **J. Intell. Mater. Syst. Struct**, v.28, p. 63–77, 2017. <http://dx.doi.org/10.1177/1045389X16642534>
- ARCINIEGAS, A.; BRANCHERIAU, L.; LASAYGUES, P. Tomography in standing trees: revisiting the determination of acoustic wave velocity. **Annals of Forest Science, Springer Verlag/EDP Sciences**, vol. 72, no 6, pp.685-691, 2015.
- ARDILA-REY, J. A.; MONTAÑA, J.; CASTRO, B. A.; et al. A Comparison of Inductive Sensors in the Characterization of Partial Discharges and Electrical Noise Using the Chromatic Technique, **Sensors**, vol. 18, pp. 1021, 2018. <https://doi.org/10.3390/s18041021>
- BAPTISTA F. G.; BUDOYA, D. E.; ALMEIDA, V. A. D.; ULSON, J. A. C. “An Experimental Study on the Effect of Temperature on Piezoelectric Sensors for Impedance-Based Structural Health Monitoring”, **Sensors**, vol. 14, no 1, p. 1208–1227, jan. 2014.
- BAPTISTA F. G.; VIEIRA FILHO, J. “A New Impedance Measurement System for PZT-Based Structural Health Monitoring”, **IEEE Trans. Instrum. Meas.**, vol. 58, no. 10, pp. 3602–3608, Oct. 2009.
- BASTANI, A.; AMINDAVAR, H.; SHAMSHIRSAZ, M.; et al., Identification of temperature variation and vibration disturbance in impedance-based structural health monitoring using piezoelectric sensor array method, **Struct Health Monitoring**, v. 11, p. 305–314, 2012. <https://dx.doi.org/10.1177/1475921711427486>
- BUDOYA, D. E.; BAPTISTA, F. G. A Comparative Study of Impedance Measurement Techniques for Structural Health Monitoring Applications, **IEEE T Instrum Meas**, v. 67, n. 4, p. 912 – 924, 2018. <http://dx.doi.org/10.1109/TIM.2018.2792854>
- BUDOYA, D. **Estudo Comparativo de Técnicas de Medição e Aquisição de Sinais de Transdutores Piezelétricos para Detecção de Dano Baseada na Impedância Eletromecânica**. 59 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista – Unesp, Bauru, Brasil, 2018.
- BUDOYA, D. E.; CASTRO, B. A.; CAMPEIRO, L. M., et al, Analysis of Piezoelectric Diaphragms in Impedance-Based Damage Detection in Large Structures. In: 4th International Electronic Conference on Sensors and Applications. Basel: MDPI, 2017.
- CAMPEIRO, L. M. SILVEIRA, R. Z. M.; BAPTISTA, F. G. Impedance-based damage detection under noise and vibration effects. **Struct Health Monitoring**, v. 17, n. 3, p. 654-667, 2018. <https://dx.doi.org/10.1177/1475921717715240>
- CAMPOS, F. S.; CASTRO, B. A.; BUDOYA, D. E., et al. New Feature Extraction Approach Insensitive to Temperature Variations for Impedance-Based Structural Health Monitoring. **IET Science, Measurement & Technology**. p. 1-11, 2019.

CASTRO, B. A.; BAPTISTA, F. G.; CIAMPA, F. New signal processing approach for structural healthy monitoring in noisy environments based on impedance measurements, **Measurement Elsevier Journal**, v. 137, pp. 155 – 167, 2019a.

CASTRO, B. A.; BAPTISTA, F. G.; CIAMPA, F. Comparative analysis of signal processing techniques for impedance-based SHM applications under noisy environments, **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 126, pp. 32 – 340, 2019b.

CASTRO, B. A.; BAPTISTA, F. G.; CIAMPA, F. A comparison of signal processing techniques for impedance-based damage characterization in carbon fibers under noisy inspections, In: **Proceedings of 12th International Conference on Composite Science and Technology**, pp. 1-9, Sorrento, Itália, 2019c.

CASTRO, B. A.; BAPTISTA, F. G.; ARDILA REY, J. A.; CIAMPA, F. Chromatic technique to distinguish damage from noise in Structure Health Monitoring Based on Impedance Measurements, **IOP Measurement Science and Technology**, v. 30, pp. 1 – 11, 2019.

CASTRO, B. A.; BAPTISTA, F. G.; CIAMPA, F. Impedance-based Structural Health Monitoring Under Low Signal-to-Noise Ratio Conditions, In: **Proceedings of 9th European Workshop on Structural Health Monitoring**, pp. 1-12, Manchester, Inglaterra, 2018.

CHENG, R. S. e VERDU, S. Capacity of root-mean-square bandlimited Gaussian multiuser channels, **IEEE Trans. Inf. Theory**, vol. 37, pp. 453-465, 1991. <http://dx.doi.org/10.1109/18.79901>

COSTA-JUNIOR, J. F. S.; CORTELA; G. A., MAGGI, L. E.; et al, Measuring uncertainty of ultrasonic longitudinal phase velocity estimation using different time-delay estimation methods based on cross-correlation: Computational simulation and experiments. **Measurement**, v. 122, p. 45-56, 2018.

DAUBECHIES, I. Ten Lectures on Wavelets, **SIAM**, 1992.

DA SILVEIRA, Z. M. **Desempenho dos Métodos de Instalação de Transdutores Piezelétricos em Sistemas de Monitoramento de Integridade Estrutural Baseados na Impedância Eletromecânica**. 53f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista – Unesp, Bauru, Brasil, 2017.

DMITRIEV, S. F.; ISHKOV, A. V.; MALIKOV, V. N.; SAGALAKOV, A. M.; KATASONOV, A. O. Non-destructive testing of the metal-insulator-metal using miniature eddy current transducers. In: **IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. Proceedings**. IOP Publishing, v. 71, 012065, p. 1-7, 2015.

FARRAR, C. R.; WORDEN, K. Structural health monitoring: a machine learning perspective, **John Wiley & Sons, Ltd.**, 2013.

FOTI, D. Non-destructive techniques and monitoring for the evolutive damage detection of an

- ancient masonry structure. **Key Engineering Materials**, v. 628, p. 168-177, 2015.
- FREITAS, E. S.; BAPTISTA, F. G. Experimental analysis of the feasibility of low-cost piezoelectric diaphragms in impedance-based SHM applications. **Sens. Actuators A Phys.**, 238, 220–228, 2016.
- FREITAS, E. S.; BAPTISTA, F. G.; BUDOYA, D. E.; CASTRO, B. A. Equivalent Circuit of Piezoelectric Diaphragms for Impedance-Based Structural Health Monitoring Applications. **IEEE Sensors Journal**, v. 17, pp. 5537 – 5546, 2017.
- GAJIC, Z. *Linear Dynamic Systems and Signals*, Prentice Hall, New Jersey, 2003.
- GUREVICH, A. Y.; GOMAN, M. G.; GUREVICH, Y. G.; et al, Synthetic turbulence modeling for evaluation of ultrasonic cross-correlation flow measurement, **Flow Meas. Instrum.**, v. 60., p. 134-143, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2017.12.013>
- HINKLEY, D. Inference about the change-point from cumulative sum tests. **Biometrika**, vol. 58, pp. 509–523, 1971.
- JONES, G.R.; RUSSEL, P.C.; VOORDAS, A.; et al. The Gabor transform basis of chromatic monitoring. **Meas. Sci. Technol.**, v. 11, p. 489–498, 2000.
- KAUR, N.; BHALLA, S.; SHANKER, R. Experimental evaluation of miniature impedance chip for structural health monitoring of prototype steel/RC structures, **Exp Techniques**, v. 40 p. 981-992, 2016. <http://dx.doi.org/10.1111/ext.12146>
- LI, H-N.; REN, L.; JIA, Z-G.; YI, T-H. and LI, D.-S. State-of-the-art in structural health monitoring of large and complex civil infrastructures. **Journal of Civil Structural Health Monitoring**, published online before print, Apr. 2015, p. 1–14, 2015.
- LIANG, C.; SUN, F. P.; ROGERS, C. A. Coupled electro-mechanical analysis of adaptive material systems-determination of the actuator power consumption and system energy transfer. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 5, n. 1, p. 12-20, 1994.
- MARKALOUS, S.; TENBOHLEN, S.; FESER, K. Detection and Location of Partial Discharges in Power Transformers using Acoustic and Electromagnetic Signals, **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, vol.15, n. 6, pp. 1576-1583, Dec. 2008.
- MEITZLER, A. H. et al. IEEE standard on piezoelectricity: An American national standard. New York: **IEEE-ANSI**, 66 p., Std., 176, 1988.
- MURATA ELECTRONICS. Piezoelectric Sound Components. Japão. 2018. Disponível em: <<https://www.murata.com/~media/webrenewal/support/library/catalog/products/sound/p37e.ashx?la=en-sg>>. Acessado em 15 de Dezembro de 2018.

NORTON, M.; KARCZUB, D. Fundamentals of Noise and Vibration Analysis for Engineers, 2nd ed., **Cambridge University Press**, New York, NY, 2003.

PARAMESWARIAH, C.; COX, M. A tutorial on wavelets from an electrical engineering perspective, part 1. Discrete wavelet techniques. **IEEE Antennas and Propagation Magazine**, vol. 40, no 5, pp. 49–70, 1998.

RAMAKRISHNA, R.; KUMAR, P. A.; THIRUMALAI, M.; et al, In-situ calibration of permanent magnet flow meters in PFBR using noise analysis technique, **Flow Meas. Istrum.**, v. 34, p. 76-82, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2013.08.004>

SAOUD, A.; MOSOROV, V.; GRUDZIEN, K. Measurement of velocity of gas/solids wirl flow using Electrical Capacitance Tomography and cross correlation technique, **Flow Meas. Istrum.**, v. 53, p. 133-140, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2016.08.003>

TAKAHASHI, Y. “Evaluation of environmental noise by analyzing faint random vibration in structural health monitoring”, **J Acoust Soc Am.**, v. 140, 2016. <https://dx.doi.org/10.1121/1.4969133>

VIEIRA FILHO J.; BAPTISTA, F. G.; INMAN, D. J. Time-domain analysis of piezoelectric impedance-based structural health monitoring using multilevel wavelet decomposition. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 25, p. 1550-1558, 2011.

VISALAKSHI, T.; BHALLA, S.; GRUPTA, A. Monitoring early hydration of reinforced concrete structures using structural parameters identified by piezo sensors via electromechanical impedance technique”, **Mech. Syst. Signal Process**, v. 99, p. 129-141, 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ymsp.2017.05.042>

VITTERLI, M.; HERLEY, C.; Wavelets and filter banks: theory and design. **IEEE Transactions on Signal Processing**. vol. 40, no 9, pp. 2207–2232, 1992.

WANG, D.; SONG, H.; ZHU, H. Electromechanical impedance analysis on piezoelectric smart beam with a crack based on spectral element method. **Mathematical Problems in Engineering**, v. 2015, Article ID 713501, p. 1-13, 2015.

WANG, X.; LI, X.; RONG, M.; et al. UHF signal processing and pattern recognition of partial discharge in gas-insulated switchgear using chromatic methodology. **Sensors**, v. 17, p. 177, 2017. <http://dx.doi.org/10.3390/s17010177>

ZHANG, J.; JONES, G. R.; SPENCER, J. W.; et al. Chromatic classification of RF signals produced by electrical discharges in HV transformers. **IEEE Proc. Gener. Transm. Distrib.** v. 152, p. 629–634, 2005. <http://dx.doi.org/10.1049/ip-gtd:20045076>

ZHANG, Y. X.; YANG, J. H.; XU, F. H.; CHEN, J. Z. EMI-based damage identification for beam structures. **Advanced Materials Research**, v. 1081, p. 358-362, 2015.