



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**Avaliação da influência da temperatura no método de ISHM aplicado em
eixos de material compósito de máquinas rotativas**

Fernanda Beatriz Aires de Freitas

Uberlândia - MG

2020

Fernanda Beatriz Aires de Freitas

Avaliação da influência da temperatura no método de ISHM aplicado em eixos de material compósito de máquinas rotativas

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos e Vibrações.

Linha de pesquisa: Dinâmica de Sistemas Mecânicos.

Orientador: Prof. Dr. Aldemir Aparecido Cavalini Jr.

Uberlândia - MG

2020

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

F866 2020	<p>Freitas, Fernanda Beatriz Aires de, 1994- Avaliação da influência da temperatura no método de ISHM aplicado em eixos de material compósito de máquinas rotativas [recurso eletrônico] / Fernanda Beatriz Aires de Freitas. - 2020.</p> <p>Orientador: Aldemir Aparecido Cavalini Junior. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Mecânica. Modo de acesso: Internet. Disponível em: http://doi.org/10.14393/ufu.di.2020.673 Inclui bibliografia.</p> <p>1. Engenharia mecânica. I. Cavalini Junior, Aldemir Aparecido ,1983-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.</p> <p>CDU: 621</p>
--------------	---

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091

Fernanda Beatriz Aires de Freitas

Avaliação da influência da temperatura no método de ISHM aplicado em eixos de material compósito de máquinas rotativas

Dissertação aprovada pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia.

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos e Vibrações.

Linha de pesquisa: Dinâmica de Sistemas Mecânicos.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Aldemir Aparecido Cavalini Jr - Orientador (UFU)

Dra. Karina Mayumi Tsuruta - Convidada (UFU)

Prof. Dr. Fran Sérgio Lobato - (UFU)

Prof. Dr. Paulo J. Paupitz Gonçalves - (UNESP)

Uberlândia, 25 de setembro de 2020


UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Av. João Naves de Ávila, nº 2121, Bloco 1M, Sala 212 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902

Telefone: (34) 3239-4282 - www.posgrad.mecanica.ufu.br - secposmec@mecanica.ufu.br


ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Mecânica				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, nº 569, COPEM				
Data:	25/09/2020	Hora de início:	08:30	Hora de encerramento:	11:00
Matrícula do Discente:	11822EMC009				
Nome do Discente:	Fernanda Beatriz Aires de Freitas				
Título do Trabalho:	Avaliação da influência da temperatura no método de ISHM aplicado em eixos de material compósito de máquinas rotativas				
Área de concentração:	Mecânica dos Sólidos e Vibrações				
Linha de pesquisa:	Dinâmica de Sistemas Mecânicos				
Projeto de Pesquisa de vinculação:					

Reuniu-se por meio de videoconferência a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, assim composta: Professores Doutores: Fran Sérgio Lobato - FEQUI/UFU; Paulo José Paupitz Gonçalves - UNESP; e Aldemir Aparecido Cavallini Júnior - FEMEC/UFU, orientador do candidato. Ressalta-se que os Prof. Aldemir Aparecido Cavallini Júnior, Fran Sérgio Lobato e o Discente participaram da defesa por meio de videoconferência desde a cidade de Uberlândia/MG, e o Prof. Paulo José Paupitz Gonçalves desde a cidade de Bauru/SP, em atendimento a Portaria nº 36, de 19 de março de 2020, da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Dr. Aldemir Aparecido Cavallini Júnior, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Aldemir Aparecido Cavalini Junior, Professor(a) do Magistério Superior**, em 25/09/2020, às 10:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Fran Sergio Lobato, Professor(a) do Magistério Superior**, em 25/09/2020, às 10:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Paulo José Paupitz Gonçalves, Usuário Externo**, em 25/09/2020, às 10:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2270972** e o código CRC **D7E710B8**.

*Dedico à Elisabeth e Ryan,
com todo o meu amor!*

*"Seja forte e corajoso! Não se apavore nem desanime, pois o Senhor, o seu Deus, estará com
você por onde você andar."
(Josué 1:9)*

Agradecimentos

Em primeiro lugar agradeço a Deus, pelo dom da vida, pelo caminho que pude traçar até aqui e por todas as pessoas que pude conhecer e conviver, que me ajudaram a chegar onde estou.

À minha família, em especial a minha vó Rosilda Coriolano, meus pais Alcivan Francisco e Rosildete Coriolano, meu tio Antônio Coriolano e minha tia Roseneire Coriolano, por toda compreensão, incentivo e apoio na realização deste sonho. E minha prima Nayara Coriolano, por sempre ter sido um bom exemplo em minha vida.

Aos meus irmãos Maykon (*in memoriam* - sei o quanto estava esperando o momento da minha defesa para comemorarmos juntos), Elisabeth, Ryan e Bernardo, por todo amor, compreensão em minhas decisões e por sempre estarem ao meu lado, me fazendo sentir presente mesmo estando tão longe de casa. Amo vocês!

À Luiz Guilherme e seus pais, por toda torcida e por terem me acolhido com tanto carinho.

À meu orientador, Dr. Aldemir Ap. Cavalini Jr., pela orientação, oportunidade, confiança, todos os ensinamentos e por ter tornado possível a minha jornada até aqui.

À Karina Mayumi Tsuruta, por todo o conhecimento passado não só no âmbito acadêmico, como também pessoal. Por muitas vezes ter sido o meu ponto de apoio em situações difíceis e ter me mostrado que é importante enfrentar tudo de cabeça erguida. Muito obrigada!

Aos meus amigos LMEst, especialmente à Leandro Martins, Izabela Batista, Orlando Tomaz, Marcus Vinicius, Geisa Zuffi, Fernanda Rossi e Barbara Nara por todo companheirismo, acolhimento e convívio diário, vocês são como uma família para mim. Sou muito feliz e grata por fazer parte dessa grande família!

Aos meus amigos da UFU, também nordestinos, Edja, José Ricardo, Leonardo, Arrais, Gutemberg e Erivaldo, por todas as conversas e por me ajudarem a diminuir um pouco a saudade de casa.

Aos meus grandes amigos (Layane, Galdencio e Anderson Wagner), meus amigos da graduação que permanecem até hoje (Arthur, Anderson, Aeferson, Edgley, Isnara, Italo, Laynara,

Luann, Myrelle e Mônica), minhas amigas de infância (Barbara, Ellen, Isabela, Jaynne, Lorena, Rayslane, Shaieny e Thayze), por todos os momentos que vivemos juntos, compreensão na minha ausência e por sempre acreditarem em mim.

À Universidade Federal de Uberlândia (UFU) e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, pela oportunidade de realização deste trabalho e por disponibilizarem toda a infraestrutura necessária.

Aos membros da banca examinadora, pelo aceite do convite, em especial ao Fran Sérgio Lobato por toda a contribuição neste trabalho e em minha formação acadêmica.

Por fim, agradeço aos órgãos de fomento: a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), e em especial ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) por meio do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia – Estruturas Inteligentes em Engenharia (INCT – EIE), pelo apoio financeiro concedido durante a realização deste trabalho.

Obrigada!

FREITAS, F. B. A., **Avaliação da influência da temperatura no método de ISHM aplicado em eixos de material compósito de máquinas rotativas**. 2020. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil.

Resumo

Esta dissertação de mestrado propõe uma metodologia capaz de aumentar a robustez do método ISHM de forma a deixá-lo menos sensível a variação de condições ambientais e operacionais. Neste caso, são investigados dois eixos de material compósito, considerando variação de temperatura e condições operacionais. Para isto, o primeiro eixo foi submetido a experimentos realizados com auxílio de uma câmara climática para melhor controle de temperatura, simulando assim variações ambientais. Por outro lado, o segundo foi utilizado como eixo de uma máquina rotativa operando em diferentes velocidades de rotação. Nestas duas etapas experimentais, uma porca foi acoplada a superfície dos eixos de modo a simular o dano. As assinaturas de impedância foram obtidas com auxílio de um analisador de impedância e um impedancímetro. Os resultados obtidos mostraram que o método ISHM foi capaz de detectar os danos nos eixos estudados. Além disso, foi constatado experimentalmente que as variações de temperatura e condições operacionais causaram modificações indesejadas nas assinaturas de impedância. A otimização utilizando uma estratégia híbrida, Evolução Diferencial (ED) e Nelder-Mead (NM), não foi eficiente para minimizar a influência dessas variações ao longo de toda a faixa de frequência investigada. Acredita-se que esta dificuldade está associada a não linearidade das assinaturas de impedância medidas nos eixos de material compósito. Diante deste cenário, uma nova metodologia de compensação foi proposta com a ideia de buscar regiões ótimas de frequência nas assinaturas de impedância medidas. A condição de dano é avaliada dentro da faixa de frequência ideal. Dessa forma, resultados obtidos pela metodologia proposta, quando comparados com os anteriores, se apresentaram mais interessantes, uma vez que as variações ocasionadas por diferentes temperaturas e condições operacionais foram minimizadas, evitando a detecção de falso-positivos.

Palavras-chave: ISHM. Máquinas rotativas. Eixo compósito. Temperatura. Otimização.

FREITAS, F. B. A., **Evaluation of the temperature influence in the ISHM method applied on shafts of composite material of rotating machines.** 2020. M. Sc. Dissertation, Federal University of Uberlândia, Uberlândia, MG, Brazil.

Abstract

This master's thesis proposes a methodology capable of increasing the robustness of the ISHM method in order to make it less sensitive to variations in environmental and operational conditions. In this case, two shafts of composite material are investigated considering temperature and operational condition variations. For this aim, the first shaft was subjected to experiments carried out in a climatic chamber for temperature control purposes, thus simulating environmental variations. On the other hand, the second shaft was used in a rotating machine operating at different rotation speeds. In these two experimental tests, a nut was attached to the surface of the shafts in order to simulate the damage conditions. Impedance signatures were measured using an impedance analyzer and an impedance meter. The obtained results demonstrated that the ISHM method was able to detect the considered damages. Additionally, it was found experimentally that variations in temperature and operating conditions caused unwanted changes to the impedance signatures. The optimization process using a hybrid strategy, Differential Evolution (ED) and Nelder-Mead (NM), was not efficient to minimize the influence of these variations throughout the investigated frequency range. This difficulty is associated with the nonlinear behavior of the impedance signatures measured in the composite shafts according to the considered temperature and operational condition variations. Thus, a new compensation methodology was proposed aiming at seeking optimal frequency regions in the measured impedance signatures. The damage condition is evaluated within the optimal frequency range. Thus, the results obtained by the proposed methodology, when compared with the previous one, were more interesting, since the influence of temperature and operational condition variations in the impedance signatures were minimized, avoiding the detection of false positives.

Keywords: ISHM. Rotating machines. Composite shaft. Temperature. Optimization.

Sumário

Lista de Figuras	xviii
Lista de Tabelas	xix
Lista de Símbolos	xx
1 Introdução	1
1.1 Contextualização do Estudo	1
1.2 Contribuições anteriores no contexto institucional	5
1.3 Objetivos do estudo	7
1.4 Organização da dissertação	8
2 Revisão bibliográfica	9
2.1 Impedância eletromecânica	9
2.1.1 Formas de quantificar os danos	13
2.1.2 Montagem dos transdutores piezelétricos	13
2.1.3 Compensação do efeito da temperatura	15
2.1.4 Aplicações da técnica de ISHM	18
2.1.4.1 Aplicações da técnica de ISHM em materiais compósitos	20
3 Monitoramento de integridade estrutural	22
3.1 Impedância eletromecânica	22
3.1.1 Limiar estatístico (<i>threshold</i>)	26
3.2 Efeito da temperatura	28
3.2.1 Procedimento de otimização híbrida	29
3.2.2 Procedimento de otimização proposto	31
3.2.2.1 Programação por compromisso	32

4	Aplicação de ISHM em um eixo de material compósito	33
4.1	Procedimento experimental	33
4.1.1	Escolha das faixas de frequências	37
4.2	Compensação do efeito da temperatura	38
4.2.1	Procedimento de otimização proposto e otimização híbrida	38
4.2.2	Deteção do dano	46
5	Aplicação de ISHM em rotor com eixo de material compósito	52
5.1	Procedimento experimental	52
5.2	Compensação do efeito da temperatura e condições operacionais	56
5.2.1	Procedimento de otimização proposto e otimização híbrida	56
5.3	Deteção de danos	62
5.3.1	Rotor sem rotação	62
5.3.2	Rotor com rotação de 600 RPM	66
5.3.3	Rotor com rotação de 900 RPM	67
5.3.4	Rotor com rotação de 1200 RPM	69
5.3.5	Comparação das diversas condições analisadas	71
6	Considerações finais	74
6.1	Perspectivas de trabalhos futuros	75
	Referências	75
A	Algoritmos de otimização	93
A.0.1	Evolução Diferencial	93
A.0.2	Nelder-Mead	94

Lista de Figuras

2.1	Remoção de três rebites para simular dano na estrutura da fuselagem	10
2.2	Assinaturas de impedância de uma placa de alumínio medidas durante 2 meses	11
2.3	Placas de metal com transdutor PZT removível	14
2.4	Montagem: (a) Convencional (b) Magnética (c) MWBEMI	15
3.1	Modelo unidimensional do acoplamento eletromecânico utilizado no método SHM baseado em impedância eletromecânica	24
3.2	Analizador de impedância SySHM	25
3.3	Distribuição de frequências de uma variável aleatória	27
3.4	Assinaturas de impedância com variação de temperatura e dano	29
3.5	Fluxograma do procedimento de otimização híbrida	29
3.6	Fluxograma do procedimento de otimização proposto	31
4.1	Eixo de material compósito	34
4.2	Posicionamento dos transdutores piezelétricos e dano	34
4.3	Câmara climática	35
4.4	Bancada experimental montada no interior da câmara climática	35
4.5	Analizador de impedância	36
4.6	Assinaturas de impedância do eixo compósito PZT#1	37
4.7	Assinaturas de impedância medidas pelo PZT#1 sem compensação de temperatura	38
4.8	Assinaturas de impedância medidas pelo PZT#1 com compensação híbrida	39
4.9	Índice de dano do PZT#1 com e sem otimização híbrida	40
4.10	Assinaturas de impedância medidas pelo PZT#1 com compensação de 35 a 50 kHz	40
4.11	Índice de dano do PZT#1 com e sem otimização de 35 a 50 kHz	41

4.12	Assinaturas de impedância medidas pelo PZT#1 com compensação proposta de 34,65 a 45,40 kHz	42
4.13	Índice de dano do PZT#1 com e sem otimização de 34,65 a 45,40 kHz	42
4.14	Índice de dano do PZT#1 com e sem otimização híbrida e proposta	43
4.15	Assinaturas de impedância medidas pelo PZT#2 sem compensação de temperatura	43
4.16	Assinaturas de impedância medidas pelo PZT#2 com compensação proposta de 33,20 a 48,85 kHz	44
4.17	Índice de dano do PZT#2 com e sem otimização de 33,20 a 48,85 kHz	44
4.18	Assinaturas de impedância medidas pelo PZT#3 sem compensação de temperatura	45
4.19	Assinaturas de impedância medidas pelo PZT#3 com compensação proposta de 39,55 a 47,30 kHz	45
4.20	Índice de dano do PZT#1 com e sem otimização de 39,55 a 47,30 kHz	46
4.21	Assinaturas de impedância medidas pelo PZT#1 sem compensação e com dano	46
4.22	Assinaturas de impedância medidas pelo PZT#1 com compensação proposta de 32,55 a 42,40 kHz e dano	47
4.23	Índice de dano do PZT#1 com e sem otimização de 32,55 a 42,40 kHz e com dano	48
4.24	Assinaturas de impedância medidas pelo PZT#2 sem compensação proposta e com dano	48
4.25	Assinaturas de impedância medidas pelo PZT#2 com compensação proposta de 44,30 a 51,75 kHz e dano	49
4.26	Índice de dano do PZT#2 com e sem otimização proposta de 44,30 a 51,75 kHz e com dano	49
4.27	Assinaturas de impedância medidas pelo PZT#3 sem compensação e com dano	50
4.28	Assinaturas de impedância medidas pelo PZT#3 com compensação proposta de 39,55 a 48,95 kHz e dano	50
4.29	Índice de dano do PZT#3 com e sem otimização proposta de 39,55 a 48,95 kHz e com dano	51
5.1	Bancada usada para avaliação da técnica ISHM	53
5.2	Bancada usada com as principais dimensões	53
5.3	<i>Slip Ring</i>	54
5.4	Assinaturas de impedância medidas pelo PZT#1 sem compensação	57

5.5	Assinaturas de impedância medidas pelo PZT#1 com compensação proposta de 91,28 a 95,33 kHz	58
5.6	Índice de dano do PZT#1 com e sem otimização de 91,28 a 95,33 kHz	58
5.7	Índice de dano do PZT#1 com compensação híbrida	59
5.8	Índice de dano do PZT#1 com compensação proposta	59
5.9	Assinaturas de impedância medidas pelo PZT#2 sem compensação	60
5.10	Assinaturas de impedância medidas pelo PZT#2 com compensação proposta de 82,24 a 88,73 kHz	60
5.11	Índice de dano do PZT#2 com e sem otimização de 82,24 a 88,73 kHz	61
5.12	Índice de dano do PZT#2 com compensação híbrida	61
5.13	Índice de dano do PZT#2 com compensação proposta	62
5.14	Assinaturas de impedância medidas pelo PZT#1 sem compensação	63
5.15	Assinaturas de impedância medidas pelo PZT#1 com compensação proposta de 83,84 a 87,54 kHz	63
5.16	Índice de dano do PZT#1 com e sem otimização de 83,84 a 87,54 kHz	64
5.17	Assinaturas de impedância medidas pelo PZT#1 com compensação proposta de 81,34 a 90,52 kHz	65
5.18	Índice de dano do PZT#1 com e sem otimização de 81,34 a 90,52 kHz	65
5.19	Assinaturas de impedância medidas pelo PZT#1 sem compensação e com rotação de 600 RPM	66
5.20	Assinaturas de impedância medidas pelo PZT#1 com compensação proposta de 84,37 a 94,84 kHz e rotação de 600 RPM	66
5.21	Índice de dano do PZT#1 com e sem otimização de 84,37 a 94,84 kHz e rotação de 600 RPM	67
5.22	Assinaturas de impedância medidas pelo PZT#1 sem compensação e com rotação de 900 RPM	68
5.23	Assinaturas de impedância medidas pelo PZT#1 com compensação proposta de 81,48 a 91,05 kHz e rotação de 900 RPM	68
5.24	Índice de dano do PZT#1 com e sem otimização de 81,48 a 91,05 e rotação de 900 RPM	69
5.25	Assinaturas de impedância medidas pelo PZT#1 sem compensação e com rotação de 1200 RPM	70

5.26	Assinaturas de impedância medidas pelo PZT#1 com compensação proposta de 81,12 a 93,02 kHz e rotação de 1200 RPM	70
5.27	Índice de dano do PZT#1 com e sem otimização de 81,12 a 93,02 kHz e rotação de 1200 RPM	71
5.28	Assinaturas de impedância medidas pelo PZT#1 sem compensação em todas as condições analisadas	72
5.29	Assinaturas de impedância medidas pelo PZT#1 com compensação proposta de 85,23 a 94,03 kHz em todas as condições analisadas	72
5.30	Índice de dano do PZT#1 com e sem otimização de todas as condições analisadas	73
A.1	Fluxograma para implementação computacional da ED	94

Lista de Tabelas

3.1	Coeficientes do algoritmo Nelder-Mead	30
3.2	Melhores e piores valores considerados	32
4.1	Posicionamento e massa do dano	34
4.2	Organização experimental com nomenclatura adotada	36
4.3	Espaço de projeto	41
4.4	Fator de ponderação da CP para a função objetivo referente a faixa de frequência	51
4.5	Faixa de frequência	51
5.1	Organização experimental com nomenclatura adotada	55
5.2	Posicionamento e massa dos danos	55
5.3	Espaço de projeto	56
5.4	Espaço de projeto	64
5.5	Fator de ponderação da CP e faixas de frequência	73

Lista de Símbolos

Símbolos Latinos

b_a	Largura da pastilha de PZT
c	Coeficiente de amortecimento
d_{3x}^2	Constante de acoplamento piezelétrico com deformação nula
d	Tensor das constantes piezelétricas em deformação
D	Vetor deslocamento elétrico
E	Vetor campo elétrico
FO_k	k -ésima função objetivo
FO_k^*	Melhor valor da k -ésima função objetivo
FO_k^{worst}	Pior valor conhecido da k -ésima função objetivo
F	Força
f	Densidade de probabilidade da variável aleatória
h_a	Espessura da pastilha de PZT
I_o	Corrente elétrica
k	Rigidez
l_a	Comprimento da pastilha de PZT
m	Massa
n	Número de frequências na banda de observação
$Re(Z_{1,i})$	Parte real da assinatura de impedância da medição sem danos em uma frequência i
$Re(Z_{2,i})$	Parte real da assinatura de impedância para uma nova configuração da estrutura em uma frequência i

s	Tensor de flexibilidade
S	Vetor de deformação
T	Vetor das tensões
V_i	Tensão elétrica
W_k	Fator de ponderação na k-ésima função objetivo
x	Variável aleatória
\dot{X}	Velocidade
Y	Admitância do atuador PZT
\bar{Y}_{xx}^E	Módulo complexo de Young com campo elétrico nulo
Z_a	Impedância mecânica do PZT
Z_e	Impedância elétrica
Z_m	Impedância mecânica
Z_S	Impedância mecânica da estrutura

Símbolos Gregos

δ	Fator de perda dielétrica
σ	Desvio padrão
μ	Média populacional
σ^2	Variância populacional
$\bar{\epsilon}_{33}^T$	Constante dielétrica complexa do PZT
ϵ	Permissividade elétrica

Abreviaturas

ASD	Diferença Média Quadrada
CC	Coeficiente de Correlação
CCD	Desvio do Coeficiente de Correlação
CP	<i>Compromise Programming</i>

ED	Evolução Diferencial
EFS	Mudança de Frequência Efetiva
END	Ensaio Não Destrutivo
FEMEC	Faculdade de Engenharia Mecânica
ISHM	Monitoramento da Integridade Estrutural baseado em Impedância Eletromecânica
LMEst	Laboratório de Mecânica de Estruturas “José Eduardo Tannús Reis”
MAPD	Desvio Percentual da Média Absoluta
MFC	Micro-Fiber Composite
NM	Nelder-Mead
PZT	Titanato Zirconato de Chumbo
RMSD	Desvio Médio Quadrático
SHM	Monitoramento da Integridade Estrutural
UFU	Universidade Federal de Uberlândia

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contextualização do Estudo

Com a crescente competitividade dos setores industriais, busca-se o desenvolvimento de máquinas e equipamentos com maior eficiência. Uma das alternativas adotadas para este fim é a utilização de novos tipos de materiais, como o material compósito.

Os materiais compósitos são aqueles formados pela combinação de dois ou mais materiais de forma a apresentarem melhores propriedades mecânicas, elétricas e térmicas do que quando estes materiais são avaliados individualmente (REDDY, 2003; CALLISTER JR; RETHWISCH, 2012). Dentre as quais, pode-se citar melhora na rigidez, propriedades térmicas, resistência mecânica, à corrosão, ao desgaste e fadiga, além da redução do peso das estruturas constituídas por estes materiais. São formados por duas categorias ou fases, que são denominadas de matriz e reforço (REDDY, 2003).

A matriz é a fase aglutinante que tem como principal função manter coesos os componentes que constituem o material, sendo que esta pode ser polimérica, cerâmica ou metálica. O reforço é o componente que dá suporte ao material compósito, e sua configuração, forma e volume influenciam as propriedades do compósito (JEFFERSON; ARUMUGAM; DHAKAL, 2018).

Estes materiais possuem grande área de aplicação, incluindo o exército e a área militar, marinha (PASĂRE; LUCA; DIMITROV, 2019), médica (BEALER et al., 2020), indústria de eletrônicos, esportiva e energia (POTLURI; KRISHNA, 2020), de construção civil (BISWAL; SWAIN, 2020), aeroespacial (MCILHAGGER; ARCHER; MCILHAGGER, 2020) e automotiva (BATISTA et al., 2020).

Na indústria automotiva, esses materiais são utilizados com o objetivo de redução do peso,

aumento da resistência e durabilidade (KENDER; BREZINOVÁ; SAILER, 2020), uma vez que existe uma estimativa de que uma redução de 10 % no peso do automóvel aumenta a eficiência do combustível em 4 % a 6 %. Por esta razão, diferentes componentes estão sendo fabricados com materiais compósitos, como suportes de óculos de sol, viseiras, tampas de motor, apoios de pés, para-choques, dentre outros (POTLURI; KRISHNA, 2020).

Outro campo de aplicação é em eixos de máquinas rotativas, uma vez que possuem maiores torques, altas rotações, melhor eficiência e segurança, redução do peso e redução de vibrações, além de serem mais flexíveis, leves e resistentes a corrosão que os eixos de materiais metálicos. Por isso, estes materiais têm substituído os materiais tradicionais em eixos para indústria automotiva (MCGEEHIN, 1982; SHINDE; SAWANT; RAUT, 2020), nas indústrias marítimas (MARSH, 2001; DURADZHI, 2020) e aeroespacial (DARLOW; CREONTE, 1995; HENRY; MILLS, 2019). Estes materiais também fornecem aos projetistas a possibilidade de obter propriedades e comportamentos predeterminados e atender um grande número de projetos, visto que existe flexibilização na constituição e disposição do tipo de material utilizado como reforço e matriz (REDDY, 2003).

Entretanto, devido à suas particularidades de fabricação, as estruturas de materiais compósitos possuem danos distintos de estruturas constituídas por materiais tradicionais, como delaminação, ruptura de fibras, vazios internos e a descolagem entre a interface matriz-fibra (ASKARIPOUR; ZAK, 2019). Por isso, existe a necessidade da utilização de técnicas sofisticadas para detecção dos danos neste tipo de material.

Dentre as metodologias que podem ser utilizadas pode-se citar os ensaios não destrutivos (END), como a inspeção termográfica (XU et al., 2020), interferometria óptica por vibrometria a laser *Doppler* de varredura (KUDELA et al., 2017) e sherografia (VANDENRIJT et al., 2019), teste eletromagnético por radiografia (SHOUKROUN et al., 2020) e espectroscopia terahertz (DESTIC; BOUVET, 2016; ZHONG et al., 2020), teste ultrassônico acoplados a ar (QUATTROCCHI; FRENI; MONTANINI, 2020) e de C-scan (MASOOD; VISWAMURTHY; GADDIKERI, 2020), inspeção visual por microscopia óptica (CHEN, 2020) e eletrônica de varredura (ASL et al., 2019).

No entanto, de acordo com Rogers e Lalande (1996), embora essas técnicas convencionais possam apontar danos microscópicos, elas exigem fácil acesso a área avaliada, além de equipamentos relativamente grandes. Quando a área avaliada é de difícil acesso, é necessário desmontar esta estrutura, causando prejuízos associados com a redução da produtividade, au-

mento das despesas, atrasos na prestação de serviços. Além disso, estes processos costumam ser trabalhosos, onerosos, e dependem de mão-de-obra especializada.

Em vista disso, surgiu a necessidade de investigar técnicas alternativas para detectar danos em estágios iniciais, para que medidas corretivas possam ser tomadas de forma antecipada, de modo a aumentar a vida útil de sistemas de engenharia, reduzindo custo e tempo com manutenção. Além de reduzir incertezas no projeto, aumentar a confiança do projetista, resultando em projetos com menor peso e custo (GIURGIUTIU; ROGERS, 1998a).

Neste contexto, os métodos de Monitoramento da Integridade Estrutural (SHM - *Structural Health Monitoring*) são uma alternativa interessante, visto que estes envolvem a detecção de danos em estruturas de engenharia, principalmente na área aeroespacial, civil e mecânica, fornecendo em tempo real, informações confiáveis sobre a integridade da estrutura, a fim de aumentar sua vida útil (FARRAR; LIEVEN; BEMENT, 2005). O monitoramento em tempo real pode ser realizado com a estrutura em operação e tem a vantagem de analisar a progressão de danos, permitindo detecta-los antes que um nível crítico de gravidade seja atingido (ROSS, 2016).

Algumas técnicas de SHM, que podem ser aplicadas em materiais compósitos, foram propostas na literatura. Dentre estas técnicas, as baseadas em sinais de vibração se destacam (MEI et al., 2019): emissão acústica (NIKBAKHT et al., 2017; XU et al., 2019), ondas de Lamb (DE LUCA et al., 2018; ROCHA; FINZI NETO; STEFFEN JR, 2019) e a impedância eletromecânica (TAWIE et al., 2019), sendo esta última uma metodologia promissora na identificação de falhas estruturais em tempo real e muito utilizada (PARK et al., 2003).

Nas últimas duas décadas várias aplicações de SHM baseadas em impedância eletromecânica em diferentes áreas podem ser encontradas, dentre as quais pode-se citar: na área de engenharia civil (BHALLA; SOH, 2003; YANG; HU; LU, 2008; WANG; ZHANG; ZHU, 2015; ZHAO; FAN; CHEN, 2019), aeroespacial (PEAIRS et al., 2003; GIURGIUTIU; ZAGRAI; BAO, 2004; GIURGIUTIU; ZAGRAI, 2005; PAVELKO, 2013), mecânica (SOH; LIM, 2009; YANG et al., 2009), engrenagem de aço carbono (ANNAMDAS et al., 2013), pás de turbinas eólicas (RUAN et al., 2014), conexão de tubulação parafusada (MARTOWICZ et al., 2015), porosidade interna de peças (TENNEY et al., 2017), superfície da peça após operação de retificação (SILVA et al., 2018), e estruturas metálicas (LI et al., 2019; LI et al., 2020).

Nesta metodologia, transdutores piezelétricos (PZT - Titanato Zirconato de Chumbo), pequenos e leves são posicionados externamente ou incorporados na estrutura a ser monitorada

e agem como sensores e atuadores simultaneamente. Esse comportamento é possível devido a capacidade dos materiais piezelétricos produzirem cargas elétricas quando submetidos a deformações mecânicas (efeito sensor ou efeito piezelétrico direto). E sofrerem deformações mecânicas quando submetidos a um potencial elétrico (efeito atuador ou efeito piezelétrico inverso) (CHAUDHRY et al., 1995b; PARK et al., 2003). Com esses PZTs é possível medir a impedância elétrica que está diretamente relacionada com a impedância mecânica da estrutura. Então, qualquer alteração nas propriedades da estrutura analisada, como rigidez, massa e amortecimento, altera diretamente a impedância elétrica medida (acoplamento eletromecânico), indicando a presença de dano, através da avaliação dessas respostas.

As medições de impedância eletromecânica obtidas na estrutura considerada saudável são utilizadas como referência (ou *baseline*), e são comparadas com assinaturas medidas em diferentes momentos para avaliação de quaisquer alterações na estrutura monitorada. Esta avaliação é realizada por meio de índices estatísticos (métricas de dano), que correspondem a parâmetros escalares capazes de representar as diferenças entre as funções de impedância medidas. Dentre estes índices de dano, destaca-se o desvio médio da raiz quadrada (RMSD do inglês *Root Mean Square Deviation*), por ser o mais utilizado na literatura (PEAIRS, 2006).

O uso dos PZTs é um diferencial nessa técnica, visto que são materiais de baixo custo, capazes de operar em uma larga banda em frequência e bom desempenho dinâmico (BHALLA et al., 2002). A utilização de altas frequências (geralmente superiores a 30 kHz) garante alta sensibilidade a danos incipientes, uma vez que, em frequências altas, o comprimento da onda da excitação é pequeno e, portanto, é sensível para detectar pequenas alterações na integridade estrutural através de mudanças detectadas com sensores piezelétricos (PARK; CUDNEY; INMAN, 2000b). No entanto, os materiais piezelétricos são influenciados pela variação de temperatura e isso pode levar a diagnósticos incorretos sobre a condição da estrutura analisada com o uso da técnica de impedância eletromecânica. Essa influência da temperatura aumenta com a frequência em análise (KRISHNAMURTHY; LALANDE; ROGERS, 1996).

O método ISHM difere das técnicas convencionais de avaliação não destrutiva, devido sua capacidade de monitorar uma área relativamente maior e tem as seguintes vantagens em comparação com outras técnicas não destrutivas de detecção de danos (ROGERS; LALANDE, 1996):

- Não é baseada em modelos e pode ser aplicada a estruturas complexas;
- Usa atuadores não intrusivos e pequenos para monitorar local de difícil acesso;

- Pode ser implementada para monitoramento on-line, não precisando de paradas do equipamento em análise;
- O monitoramento contínuo fornece uma melhor avaliação do status atual da estrutura, o que pode eliminar as inspeções de base programadas;
- A massa adicionada do atuador/sensor é insignificante.

Entretanto, possui a desvantagem de ser influenciada pela temperatura, já que variações de temperatura causam deslocamentos horizontal (em frequência) e vertical (em amplitude) na curva de respostas em frequência das assinaturas de impedância, podendo levar a interpretação de falsos-positivos. Para minimizar esse problema, técnicas de compensação da temperatura têm sido propostas com o objetivo de resultados mais confiáveis (PARK et al., 1999).

Portanto, esse trabalho possuiu como principal objetivo estudar o monitoramento de integridade estrutural, baseado na técnica de impedância eletromecânica, aplicadas a eixos de materiais compósitos sob diferentes temperaturas e condições de operação. Para isso, as assinaturas de impedância foram obtidas em eixo compósito montado no interior da câmara climática e em uma máquina rotativa. Um procedimento de otimização híbrida considerando os métodos ED e NM associado à programação por compromisso foi proposto para minimizar o efeito da temperatura nas assinaturas de impedância para evitar falso-positivos.

1.2 Contribuições anteriores no contexto institucional

A técnica de ISHM é um assunto estudado a alguns anos pelos pesquisadores do Laboratório de Mecânica de Estruturas “José Eduardo Tannús Reis” (LMEst) da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia (FEMEC-UFU).

Moura Jr. (2004) utilizou técnicas estatísticas juntamente com a técnica de impedância eletromecânica para a identificação de falhas em estruturas aeronáuticas. Tsuruta (2008) avaliou a técnica de ISHM para a detecção e quantificação de danos causados por impactos de baixa energia em placas de material compósito. Também examinou a influência da faixa de frequência que a impedância é adquirida e do posicionamento dos transdutores piezelétricos na estrutura analisada. Moura Jr. (2008) avaliou o uso de diferentes técnicas de SHM baseadas em impedância eletromecânica e ondas de Lamb. Estas técnicas foram aplicadas em componentes aeronáuticos e espaciais.

Palomino (2008) avaliou as métricas de dano propostas na literatura usadas em ISHM. Para isso, identificou danos pequenos em estruturas simples utilizando diferentes métricas de dano a fim de determinar a que apresentava melhor comportamento para fins de identificação. Posteriormente, com um processo similar, procurou identificar danos incipientes em uma estrutura aeronáutica, como a perda de um rebite. Por fim, utilizou o ISHM em ensaios de fadiga.

Leucas (2009) estudou o desempenho de duas técnicas de SHM (impedância eletromecânica e ondas de Lamb) aplicadas à detecção de danos em estruturas metálicas rebitadas, como vigas e painéis aeronáuticos. Com os resultados obtidos, aplicou técnicas de análise baseadas em testes de hipóteses estatísticas, buscando verificar a presença de dano, dentro de uma margem de confiança. Além disso, foi apresentada uma abordagem alternativa para classificação de padrões baseada em redes neurais artificiais aplicadas na detecção dos diferentes estágios de dano em um painel aeronáutico.

Palomino (2012) avaliou a influência de algumas condições ambientais, tais como campos magnéticos e meios iônicos, na medição de impedância. Os resultados obtidos mostraram que os campos magnéticos não tem influência na medição da impedância e que os meios iônicos influenciam os resultados. Entretanto, ao blindar o sensor, esse efeito foi reduzido consideravelmente. Também estudou a influência da geometria e posição do sensor em relação ao dano. Verificou que o formato do transdutor PZT não tem nenhuma influência na medição e que sua posição é importante para detectar corretamente o dano. Neste caso, as técnicas de inteligência artificial conhecidas como redes neurais e análises de cluster fuzzy foram utilizadas para classificar danos em estruturas aeronáuticas. O comportamento da técnica de ISHM na detecção de danos em estruturas submetidas a carregamentos dinâmicos também foi avaliado neste trabalho.

Cavalini Jr. (2013) aplicou a técnica de ISHM em uma máquina rotativa em diferentes condições de operação. Os resultados obtidos pelo autor demonstrou a eficiência da técnica na detecção de trincas incipientes no eixo de um rotor em operação.

Rabelo (2014) desenvolveu um método de deslocamento efetivo em frequência para compensar o efeito de flutuações de temperatura ambiente nas medições de impedância. Para isso, utilizou o método ISHM em uma viga de alumínio e em um painel aeronáutico.

Rocha (2017) realizou o diagnóstico de falhas de um painel de alumínio através da integração de duas técnicas de SHM, a técnica de impedância eletromecânica e ondas de Lamb. Neste caso, foi projetado um *hardware* dedicado, de modo que sua arquitetura permita a integração

cooperativa das duas técnicas.

Rabelo (2017) aplicou o ISHM em uma placa retangular e em painéis aeronáuticos de alumínio. Neste trabalho, o autor desenvolveu técnicas de normalização de dados que ao serem aplicadas nos sinais de impedância adquiridos, compensaram as variações causadas por mudanças em condições ambientais ou operacionais sem grandes perdas de informação. Além disto, propôs um método para a determinação de um limiar discriminante através de um modelo estatístico, bem como técnicas avançadas de normalização de dados, uma utilizando métodos de otimização e outra baseada na minimização da distância euclidiana entre um ponto e uma curva.

Silva (2017) avaliou a aplicação do método de monitoramento de integridade estrutural baseado em impedância eletromecânica para a detecção de danos em estruturas de concreto, considerando variação de temperatura e umidade. Para esta finalidade foi empregada a técnica de compensação de temperatura baseada no método do deslocamento efetivo em frequência por análise de correlação.

Venson (2020) aplicou o coeficiente de Hurst juntamente com a técnica de monitoramento da integridade estrutural baseada no método da impedância eletromecânica para detecção de danos estruturais. A eficácia foi avaliada realizando um conjunto de experimentos em vigas de alumínio, submetidas a ensaios sem a presença de dano e com a presença de dano em diferentes temperaturas. Os resultados mostraram que o coeficiente de Hurst usado como métrica de dano permite detectar a presença de dano em todas as condições de ensaio, minimizando a necessidade da aplicação de técnicas de compensação de temperatura.

Em todos estes trabalhos foi mostrado que a técnica de ISHM tem grande potencial em detecção de danos nas estruturas analisadas. Entretanto, não foi avaliado o monitoramento de integridade estrutural em eixos de materiais compósitos, sendo esta uma das contribuições desta dissertação. Além disso, uma nova metodologia de compensação foi proposta para minimizar os efeitos causados pela variação de temperatura e condições operacionais nas assinaturas de impedância.

1.3 Objetivos do estudo

O objetivo desta dissertação é propor uma metodologia de compensação baseada no método de otimização híbrida (ED e NM) formulada com programação por compromisso, para buscar regiões ótimas de compensação de acordo com a faixa de frequência e compensar o efeito

causado pela variação de temperatura, uma vez que este fator influencia de forma distinta as assinaturas de impedância obtidas de estruturas de materiais compósitos. Para essa finalidade, destacam-se os seguintes objetivos específicos:

- Realizar experimentos em um eixo de material compósito posicionado na parte interna de uma câmara climática para obtenção dos sinais de impedância em diferentes temperaturas e em uma máquina rotativa com eixo de material compósito submetida a diferentes velocidades de rotação;
- Aplicar métrica de dano nas assinaturas de impedância medidas com a estrutura saudável e danificada (adição de massa), e com isso analisar se a técnica é capaz de detectar danos nas estruturas monitoradas.

1.4 Organização da dissertação

O Capítulo 2 exibe uma revisão bibliográfica com ênfase na evolução histórica e nas pesquisas mais relevantes da área de monitoramento da integridade estrutural baseado em impedância eletromecânica, bem como a avaliação da variação de temperatura e outras variáveis, e esta metodologia aplicada a materiais compósitos.

O Capítulo 3 apresenta os conceitos do método de ISHM e o método de compensação de temperatura proposto nessa dissertação.

No Capítulo 4, o método de ISHM é aplicado para monitorar dano em eixo de material compósito. São apresentadas as assinaturas de impedância eletromecânica, os índices de dano, a influência da temperatura nas assinaturas e a compensação das mesmas.

No Capítulo 5, o método de ISHM é aplicado em rotor com eixo de material compósito, submetido a diferentes velocidades de rotações e danos. A compensação do efeito das diferentes condições operacionais que a máquina rotativa foi submetida é realizada.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões acerca do trabalho realizado e perspectivas de trabalhos futuros para esta linha de pesquisa.

Capítulo 2

Revisão bibliográfica

Este capítulo tem como objetivo contextualizar, considerando diversos trabalhos desenvolvidos na área, a metodologia de monitoramento da integridade estrutural baseada na impedância eletromecânica, bem como a avaliação da variação da temperatura e outras variantes desta técnica.

2.1 Impedância eletromecânica

As pesquisas relacionadas com o monitoramento da integridade estrutural baseada em impedância eletromecânica foram iniciadas por Liang, Sun e Rogers (1993). Em seguida, Liang, Sun e Rogers (1994b) propuseram uma aplicação teórica para vigas e placas. Liang, Sun e Rogers (1994a), Stein, Liang e Rogers (1994) e Sermoneta et al. (1995) aplicaram a metodologia em vigas de alumínio. Zhou, Liang e Rogers (1996) estenderam esse modelo para cenários bidimensionais em chapas finas e cilindro de alumínio.

Chaudhry et al. (1995a) aplicaram a técnica da impedância eletromecânica em estruturas aeronáuticas, Ayres et al. (1996) em uma ponte de treliça e Lalande et al. (1996) em peças de alto precisão (engrenagem). Castanien e Liang (1996) realizaram a análise estatística da seção da fuselagem de um avião, com perdas de três rebites (Fig. 2.1) para simular o dano. Dessa forma, foi possível mostrar o potencial da impedância no monitoramento da integridade estrutural de estruturas complexas reais.

Outros autores aplicaram com sucesso esta metodologia para a detecção de danos em vários tipos de estruturas: de materiais compósitos (CHAUDHRY et al., 1995b; SAAFI; SAYYAH, 2001), estrutura de treliça (SUN et al., 1995b), juntas soldadas por ponto (GIURGIUTIU et al.,



Figura 2.1: Remoção de três rebites para simular dano na estrutura da fuselagem (Fonte: Castanien e Liang (1996)).

1998; GIURGIUTIU; REYNOLDS; ROGERS, 1999), estruturas civis (ponte maciça) (AYRES et al., 1998), barra de alumínio (PARK; CUDNEY; INMAN, 2000b), estruturas aeroespaciais envelhecidas e viga de aço (GIURGIUTIU; ZAGRAI, 2000), ponte de concreto armado (SOH et al., 2000), paredes de concreto armado, seção de ponte em escala de 1/4 e junta de tubulação (PARK; CUDNEY; INMAN, 2000a), tubulações conectadas por juntas aparafusadas (PARK; CUDNEY; INMAN, 2001), componentes de motores de turbinas a gás (WINSTON; SUN; ANNIGERI, 2001), detecção de trincas em placas metálicas (GIURGIUTIU; ZAGRAI, 2001) e em placas finas circulares (ZAGRAI; GIURGIUTIU, 2001; ZAGRAI; GIURGIUTIU, 2002).

Entretanto, mesmo com todas essas aplicações bem sucedidas, os profissionais de manutenção duvidaram da confiabilidade desta técnica de detecção de danos, com o argumento de que se a assinatura não se repetisse por longos períodos, a interpretação desta metodologia na detecção do dano poderia ser muito confusa para o engenheiro de manutenção. Por esta razão, Bhalla et al. (2002) realizaram um estudo da repetibilidade durante dois meses em uma placa de alumínio instrumentada com dois transdutores piezelétricos. Durante esse período, os fios foram removidos e reconectados diversas vezes. Na Fig. 2.2 são mostradas as assinaturas obtidas durante os dois meses, para uma pastilha PZT, na qual é possível visualizar que existe repetibilidade nas assinaturas.

Bhalla et al. (2002) perceberam que ainda existiam alguns impedimentos para a aplicação prática da técnica em estruturas reais, como a sensibilidade das assinaturas de impedância em relação a umidade do ambiente, demora na instalação da pastilha PZT sobre a estrutura monitorada e na aquisição das assinaturas com o analisador de impedância convencional.

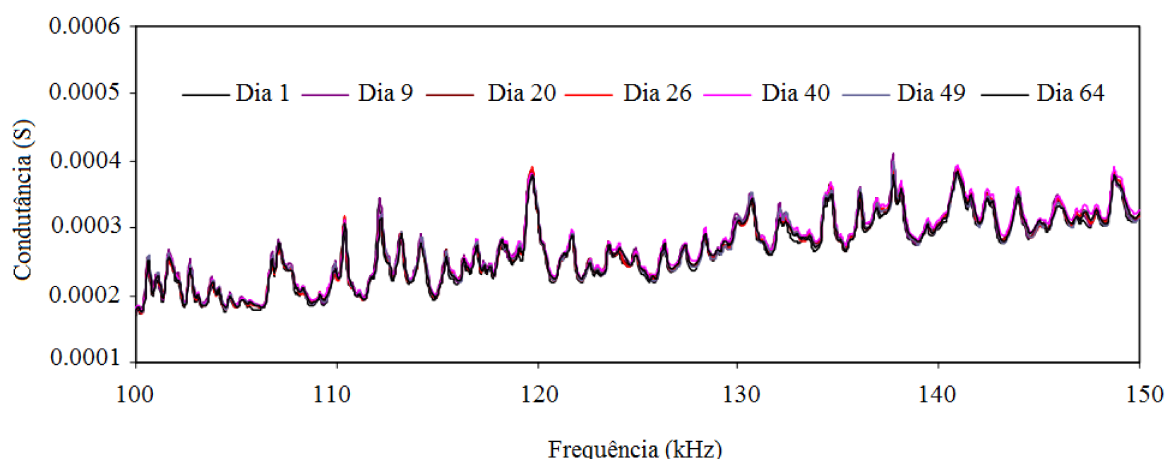


Figura 2.2: Assinaturas de impedância de uma placa de alumínio medidas durante 2 meses (Fonte: Adaptado de Bhalla et al. (2002)).

A sensibilidade à umidade, pode ser solucionada utilizando gel de sílica (por ser um bom material de impermeabilização, quimicamente inerte e bom isolante) sobre o transdutor piezelétrico sem interferir na identificação de danos (BHALLA et al., 2002).

O acoplamento dos transdutores piezelétricos sobre a estrutura a ser monitorada é comumente realizado com o uso de uma mistura de adesivo a base de resina epóxi e espera de 24 horas para que ocorra o processo de cura. Em muitas aplicações, como nos processos de fabricação, esse tempo pode ser muito longo. Portanto, um experimento foi conduzido por Bhalla et al. (2002) para avaliar a viabilidade de uma fita adesiva dupla face na pastilha de PZT. Para isso, foram obtidas as assinaturas de impedância antes e após de um dano na estrutura em análise. Foi percebido que embora esse tipo de ligação não seja adequado para extrair detalhes estruturais com precisão, ainda é eficiente para detectar danos de tamanho moderados na estrutura.

A aquisição das assinaturas de impedância com os analisadores de impedância convencionais, como HP 4191A, HP 4194A e HP 4192A, é realizada através da análise de um transdutor piezelétrico por vez. Este procedimento demanda muito tempo para que todos os transdutores sejam avaliados. Buscando reduzir este tempo, Bhalla et al. (2002) propuseram o uso de um dispositivo de multiplexação, onde os transdutores piezelétricos foram conectados ao módulo multiplexador N2260A de 40 canais, alojado no sistema de controle de comutação 3499B (Agilent Technologies), que por sua vez foi conectado ao analisador de impedância HP 4192A. Com esse sistema, n transdutores piezelétricos puderam ser utilizados simultaneamente para o monitoramento.

Os analisadores de impedância convencionais são volumosos, pesados e onerosos. Por

esta razão, não podem ser facilmente transportados para o local onde se deseja realizar o monitoramento estrutural. Para resolver essa limitação, buscou-se meios de reduzir o seu tamanho, o tornando mais compacto e portátil. Dessa forma, muitos pesquisadores propuseram sistemas de medição alternativos, como Peairs, Park e Inman (2004) que usaram um circuito simples e de baixo custo baseado em um analisador de espectro para obter o valor aproximado da impedância elétrica do transdutor no domínio da frequência. Giurgiutiu e Xu (2004) e Xu e Giurgiutiu (2005) desenvolveram um analisador de impedância portátil com sensores ativos piezelétricos, Xu e Giurgiutiu (2006) baseado em um processador de sinal digital capaz de medir a impedância eletromecânica em até 1 MHz.

Alguns autores realizaram pesquisas com sistemas sem fio, como Mascarenas et al. (2006), Park et al. (2007), Park, Yun e Inman (2008), Park et al. (2008) e Perera et al. (2017), utilizando um *chip* de medição de impedância miniaturizado desenvolvido pela *Analog Devices*, o AD5933, de baixo custo, que consome pequenas quantidades de energia, possui capacidade de fazer medições de temperatura e realizam medições de impedância na faixa de frequência de 10 a 100 kHz.

Finzi Neto et al. (2010) desenvolveram um protótipo usando circuitos integrados de baixo custo e um processador de sinal digital que necessita apenas de um computador para a interface do usuário e pode funcionar em frequências de 0 a 400 kHz com alta precisão e estabilidade.

Além dessas, também foram realizadas diversas pesquisas para melhorar a aplicação da metodologia e reduzir ao máximo suas limitações, como o uso de transdutores piezelétricos de MFC (*Micro-Fiber Composite*) em superfícies curvas por Park et al. (2007), Park et al. (2008), Min et al. (2010), Faria, Owen e Inman (2014) e Rabelo et al. (2017b), devido aos transdutores piezelétricos convencionais serem quebradiços e difíceis de fixar em superfícies curvas. Além disso, foram investigados modelos matemáticos associados com o método da impedância eletromecânica para a identificação dos danos estruturais por Park, Cudney e Inman (2000b), Ong et al. (2002), Park et al. (2006) e Kitts e Zagari (2009), a localização ideal dos sensores por Peairs et al. (2004) e Deevi, Naidu e Rao (2020), a melhor faixa de frequência por Moura Jr. (2004) e Peairs, Inman e Park (2007), a modelagem do sistema em três dimensões por Annamdas e Soh (2007a), Annamdas e Soh (2007b), Madhav e Soh (2007) e Annamdas e Soh (2008), a não linearidade da técnica da impedância por Rutherford et al. (2004), formas de quantificar o dano por Giurgiutiu e Rogers (1998b), montagem dos PZTs por Silveira, Campeiro e Baptista (2017) e o efeito da temperatura nas assinaturas de impedância por Sun et al. (1995b).

2.1.1 Formas de quantificar os danos

Embora as variações das assinaturas de impedância (devido presença de dano, mudança de temperatura, dentre outros) forneçam uma abordagem qualitativa para a identificação de danos, é necessária uma avaliação quantitativa, que é realizada usando as métricas de dano.

A métrica de dano mais utilizada é o desvio médio quadrático (em inglês *Root Mean Square Deviation* - RMSD) com suas variantes, conforme mostrada por Giurgiutiu e Rogers (1998b), Park et al. (2003), Grisso, Peairs e Inman (2004) e Peairs (2006). E ainda tem, a diferença média quadrada (ASD) mostrada por Raju (1997), diferença quadrada entre os sinais por Park, Cudney e Inman (2000a), desvio percentual da média absoluta (MAPD), coeficiente de correlação (CC) e desvio do coeficiente de correlação (CCD) por Zagrai e Giurgiutiu (2001) e Tseng e Naidu (2002).

Alguns autores analisaram diferentes métricas com o intuito de avaliar a sensibilidade de cada uma delas quanto a presença de danos em diversas estruturas. Isto pode ser encontrado no trabalho realizado por Zagrai e Giurgiutiu (2001), no qual foram investigadas as métricas RMSD, MAPD, CC e CCD. Os autores verificaram que a CCD foi a métrica de dano que levou aos melhores resultados. Tseng e Naidu (2002) também investigaram o desempenho das métricas RMSD, MAPD, CC e CCD como indicadores de dano. Os índices RMSD e MAPD foram considerados mais adequados para caracterizar o crescimento e a localização dos danos, enquanto as métricas CC e CCD foram mais adequadas para identificar o aumento de tamanho do dano em um local fixo.

Tawie e Lee (2010) utilizaram as métricas RMSD, MAPD e CCD para monitorar a cura de um espécimen de concreto por 28 dias, onde a impedância foi medida em 3, 7, 14 e 28 dias. Com os resultados obtidos, os autores verificaram que a MAPD estava melhor correlacionada com a cura do concreto que a RMSD e CCD. Xu e Jiang (2012) monitoraram e detectaram o afrouxamento de parafusos de uma viga composta de aço-concreto usando as métricas: RMSD, MAPD e CCD.

E diversos outros autores realizaram pesquisas nesta área, com maior utilização da métrica RMSD, por esta razão foi a escolhida para ser aplicada nesta dissertação.

2.1.2 Montagem dos transdutores piezelétricos

Na, Tawie e Lee (2012) propuseram uma montagem magnética, na qual os PZTs podem ser reutilizáveis em diversas aplicações para obtenção das assinaturas de impedância. Este método

consiste em um dispositivo removível, formado por um transdutor PZT acoplado na superfície de um ímã em formato de disco com auxílio de adesivo de base epóxi. O adesivo também foi aplicado para cobrir o transdutor PZT, protegendo-o contra umidade. Na e Baek (2017) aplicaram esta montagem para identificar a redução na espessura de metal. Para realização dos experimentos foi utilizado várias camadas de placas metálicas (Fig. 2.3). Além disso, os autores utilizaram um algoritmo baseado em rede neural probabilística para identificar modificações das assinaturas de impedância causadas por presença de dano ou por recolocação do PZT na estrutura monitorada.

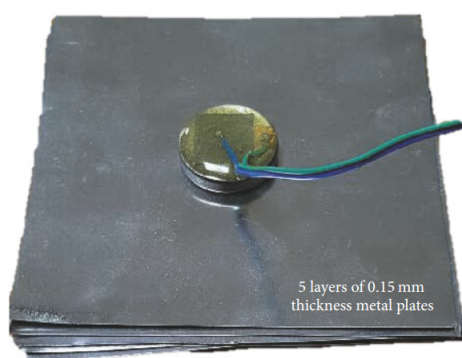


Figura 2.3: Placas de metal com transdutor PZT removível (Fonte: Na e Baek (2017)).

Na e Lee (2013) propuseram uma montagem utilizando um fio de aço para acoplar o transdutor à estrutura. Para isso, o transdutor piezelétrico foi acoplado ao fio de aço e este a extremidade da viga de material compósito com adesivo de base epóxi.

Naskar e Bhalla (2016) realizaram investigações experimentais e numéricas mais detalhadas sobre esse método de montagem. Nestas análises, o fio de aço foi substituído por placas metálicas com diferentes seções transversais. Os autores relataram que o método tem a vantagem de permitir o monitoramento de estruturas inacessíveis, com superfícies irregulares ou sob condições adversas de operação (por exemplo, sistemas com altas temperaturas) para as quais o método de montagem convencional não seria possível. No entanto, esta montagem apresenta redução na sensibilidade para detecção de danos em comparação com a montagem convencional. Esse método de montagem foi chamado de impedância eletromecânica baseada em fio de metal (em inglês *Metal-Wire-Based Electromechanical Impedance* - MWBEMI).

Silveira, Campeiro e Baptista (2017) realizaram uma avaliação comparativa de três formas de montagem do transdutor piezelétrico: montagem convencional utilizando cola epóxi ou cianoacrilato, montagem magnética (proposta por Na, Tawie e Lee (2012)) e MWBEMI (proposta por Na e Lee (2013), Naskar e Bhalla (2016)) em vigas de alumínio (Fig. 2.4). Os autores

mostraram que a montagem convencional é a mais sensível à detecção de danos estruturais, a montagem MWBEMI possui sensibilidade intermediária e a magnética menor sensibilidade. Percebe-se que a montagem convencional é a mais adequada, por esta razão foi a utilizada nesta dissertação.

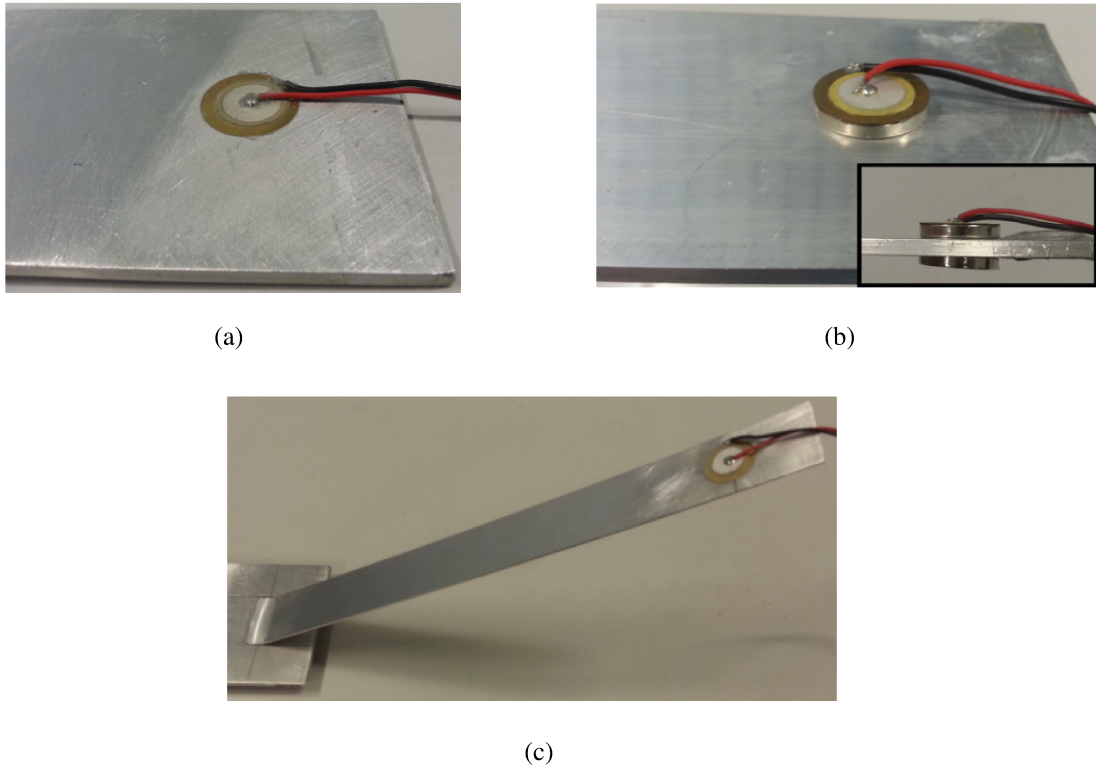


Figura 2.4: Montagem: (a) Convencional (b) Magnética (c) MWBEMI (Fonte: Silveira, Campeiro e Baptista (2017)).

2.1.3 Compensação do efeito da temperatura

Os materiais piezelétricos apresentam forte dependência da temperatura em relação as suas propriedades básicas, como a constante dielétrica e coeficiente piezelétrico. Das quais, a constante dielétrica exibe o efeito mais significativo, já que esta pode causar deslocamentos horizontais (em frequência) e verticais (em amplitude) da assinatura de impedância em relação à medida de referência (*baseline*) e isto pode levar a interpretações erradas sobre a condição da estrutura monitorada (KRISHNAMURTHY; LALANDE; ROGERS, 1996; PARK et al., 1998). Por esta razão é necessária a realização de estudos sobre esses efeitos buscando minimizar as influências causadas por variações de temperatura nas assinaturas de impedância medidas.

Krishnamurthy, Lalande e Rogers (1996) estudaram os efeitos da temperatura nos materiais

piezelétricos. Através de uma investigação experimental, verificaram que a variação de temperatura altera a magnitude da impedância elétrica do sensor piezelétrico, mantendo a fase de impedância inalterada, e que um aumento de temperatura leva a uma diminuição na amplitude da impedância eletromecânica. Também, apresentaram uma técnica simples de compensação de temperatura sobre um sensor PZT PSI-5A, que elimina os efeitos da temperatura sobre o sensor, mas que não elimina os efeitos da temperatura que afetam a estrutura.

Além desse trabalho, diversos métodos foram desenvolvidos para compensar as medições de impedância elétrica devido às variações de temperatura. Sun et al. (1995b) usaram a correlação cruzada entre as assinaturas de impedância de referência e após variação de temperatura para compensar as mudanças de frequência. Entretanto, essa compensação só é válida para variações de impedância devido exclusivamente à mudança de temperatura. Quando existe a presença de danos, a compensação não é completa, deixando resíduos.

Koo et al. (2007) também utilizaram uma técnica baseada em correlação cruzada para minimizar os efeitos da temperatura sobre as medições de impedância elétrica. No entanto, encontraram que os valores obtidos por esta metodologia ainda sofrem com flutuações devido à variação de temperatura. Portanto, uma análise externa que fornece o limite de decisão ideal foi realizada para detecção de danos considerando essas flutuações.

Koo et al. (2009) tentaram melhorar a técnica baseada na correlação cruzada com uma mudança de frequência efetiva (EFS). A EFS é definida como um deslocamento em frequência que altera a assinatura de impedância atual (após variação de temperatura) em relação à assinatura de impedância de *baseline* para maximizar a correlação existente entre essas assinaturas. E verificaram que o método EFS pode reduzir significativamente os efeitos da variação de temperatura na detecção de danos.

Entretanto, Baptista, Filho e Inman (2011) utilizaram uma metodologia semelhante a proposta por Sun et al. (1995b), Park et al. (1998) e Koo et al. (2009) para compensar as variações no coeficiente de correlação, na qual a curva de impedância medida por cada sensor foi analisada e compensada individualmente, mesmo que a temperatura ao redor de cada sensor fosse diferente. Os autores observaram que essa metodologia tem limitações em relação a faixa de frequência escolhida, que se for muito ampla pode levar a resultados incorretos.

Além disso, Baptista et al. (2014) mostraram através de experimentos que, embora o método EFS seja simples, sua eficiência diminui se uma ampla faixa de frequência for usada para calcular as métricas de dano. Isso ocorre porque a mudança de frequência dos picos de ressonância não

é constante em toda a faixa de frequência, ela aumenta com o aumento da frequência. Portanto, essa metodologia só é viável para uma banda de frequência estreita (como 2 kHz, mostrada pelos autores). Por outro lado, bandas de frequência mais amplas podem incluir mais picos de ressonância e, conseqüentemente, aumentar a sensibilidade do sistema para detectar danos estruturais, especialmente danos incipientes. Por esta razão, a largura da banda de frequência é uma questão crítica para essa técnica e que deve continuar a ser estudada.

Rabelo et al. (2017a) também propuseram um metodologia baseada em EFS através da análise de correlação para a compensação dos efeitos da temperatura. Os autores concluíram que, além da faixa de frequência, existem limitações quanto a faixa de temperatura, que se for grande pode implicar em uma má correspondência nas assinaturas. Estas limitações podem ser minimizadas utilizando mais de uma assinatura de impedância de *baseline*, obtendo um diagnóstico mais confiável.

Park et al. (1998) propuseram uma técnica de compensação para que a métrica de dano (RMSD) fosse estável quando a estrutura analisada fosse submetida a variações de temperatura, através do realinhamento das assinaturas de impedância medidas em diferentes temperaturas com a assinatura *baseline*. Os autores verificaram que, por esse procedimento de compensação, a técnica de impedância ainda é capaz de detectar danos incipientes, como afrouxamento de parafusos, mesmo com a presença de variação de temperatura. Além disso, mostraram que o aumento na temperatura leva a mudanças nas frequências de ressonância e flutuações na magnitude das assinaturas de impedância. Por esta razão, as curvas de impedância compensadas não são exatamente iguais às impedâncias de referência. Contudo, pôde-se distinguir as modificações nas assinaturas de impedância causadas por variação de temperatura e por dano na estrutura.

Esse método de compensação de temperatura também foi usado por Park et al. (1999) em uma estrutura de tubo aparafusado, alumínio reforçado com compósito e peças de precisão, como engrenagens, na faixa de temperatura de 25 a 75 °C, Park, Cudney e Inman (1999) em estruturas maciças e densas, além de Park, Cudney e Inman (2000a) em estruturas civis.

Konchuba (2011) propôs melhorias no método de realinhamento de frequência proposto por Park et al. (1998). Para isso, o autor estabeleceu um limite de mudança de temperatura, que deve está abaixo de uma variação de frequência insignificante. Além disso, introduziu o método do momento central, que visa atingir um *baseline* independente da temperatura, de modo que nenhuma compensação seja necessária no cálculo das métricas de dano. No entanto, a confiabilidade do método é dependente do comportamento da resposta em frequência

das assinaturas de impedância, que não é facilmente modelado. Por isso, os resultados desse método podem ser incertos.

Sepehry, Shamshirsaz e Abdollahi (2011) desenvolveram um método para a compensação de temperatura com base em redes neurais artificiais. Os resultados confirmaram que o método proposto pode ser efetivamente utilizado para compensar os efeitos da variação de temperatura na detecção de danos em diferentes estruturas. Entretanto, necessita de muitos dados de medição para treinar as redes neurais artificiais.

Bastani et al. (2011) desenvolveram um novo método usando um conjunto de PZTs e análise estatística com métricas de dano (RMSD e CCD) para identificar alterações causadas por danos e condições ambientais, como a temperatura. Porém, o método proposto requer grande quantidade de sensores, o que pode ser inviável em algumas aplicações.

Por fim, Tsuruta et al. (2017) desenvolveram uma técnica de otimização híbrida associada a diferentes métricas de dano para minimizar os efeitos ambientais (temperatura) e operacionais (velocidade de rotação e nível de desequilíbrio) em um eixo rotativo. Neste caso, a métrica de dano (RMSD) foi minimizada usando a metodologia proposta. Resultados experimentais mostraram que a técnica detecta danos com sucesso e que as alterações nas condições operacionais e de temperatura ambiente foram minimizadas. Esta metodologia também foi usada por Rabelo et al. (2017b) para compensação de temperatura em uma máquina rotativa com eixo de aço e por Tsuruta et al. (2018) para minimizar o efeito de excitações externas nas assinaturas de impedância de estruturas de concreto, também será utilizada nesta dissertação para efeito de comparação com a técnica proposta.

2.1.4 Aplicações da técnica de ISHM

Yang, Lim e Soh (2008) estudaram a durabilidade e o efeito entre as ligações dos transdutores piezelétricos com a estrutura monitorada (estruturas de alumínio). Os autores verificaram que existe repetibilidade nas assinaturas de impedância até um ano e meio.

Baptista, Filho e Inman (2010) apresentaram análises teórica e experimental sobre o tamanho correto dos PZTs utilizados com a técnica de ISHM. Testes foram realizados em estruturas de alumínio usando sensores de vários tamanhos. Com os resultados obtidos foi possível mostrar que a sensibilidade da técnica pode ser otimizada se os PZTs fossem corretamente dimensionados.

Palomino et al. (2012) avaliaram a influência da geometria do PZT e parâmetros físicos

(campo magnético, ambiente iônico, variações de pressão e temperatura) na técnica de ISHM. Os resultados obtidos em relação a modificações das assinaturas de impedância eletromecânica mostraram que: campos magnéticos e variação de pressão não causam modificações, o formato do PZT não tem influência considerável, o meio iônico e a temperatura causam modificações. Além disso, perceberam que as assinaturas de impedância variam fortemente em temperaturas mais altas. Min et al. (2012) aplicaram uma técnica de rede neural para identificação das faixas de frequência sensíveis a danos e do tipo e gravidade dos danos, em uma viga de alumínio, uma estrutura de tubos e uma ponte em escala real.

Priya et al. (2014) estudaram os efeitos de vibrações externas de baixa frequência em uma placa de alumínio com quatro transdutores piezelétricos. A partir dos resultados experimentais obtidos foi verificado que as vibrações de baixa frequência quase não têm efeito nas assinaturas de impedância. Isso também foi garantido através do cálculo dos valores RMSD com a estrutura saudável e danificada, com e sem vibração externa, na qual, foi encontrada diferença em média de apenas 2 % para todas as pastilhas de PZTs.

Cavalini Jr, Finzi Neto e Steffen Jr (2014) utilizaram com êxito o método de ISHM para detecção de trincas transversais incipientes em eixos rotativos. Para isto utilizaram uma bancada de testes e realizaram medições de assinaturas de impedância para o rotor balanceado e desbalanceado operando a 1.200 rotações/min, com dano e sem dano no eixo. Inicialmente foi inserido um dano não destrutivo. Uma porca de aço (massa de 1,06 g) foi acoplada na superfície do eixo para uma avaliação preliminar da técnica analisada. Em seguida, um corte foi realizado ao longo da seção transversal do eixo para simular uma trinca.

Campeiro, Silveira e Baptista (2018) apresentaram uma análise experimental dos efeitos de ruído e vibração na detecção de danos estruturais com a técnica de ISHM. Os efeitos do ruído e da vibração nas assinaturas de impedância foram avaliados pelo cálculo da função de coerência e pelos índices básicos de dano. Os resultados experimentais indicaram que mesmo um ruído baixo causa variação significativa nas assinaturas de impedância.

Kocherla et al. (2020) realizaram abordagens experimental e numérica para monitoramento do acoplamento entre os transdutores piezelétricos e a superfície monitorada. Para evitar interpretação errônea dos resultados quando a técnica de ISHM é utilizada em estruturas reais.

Por fim, tem-se algumas aplicações médicas, como: Ribolla e Rizzo (2015) que utilizaram para monitorar a estabilidade de implantes dentários, Mazlina et al. (2015) para detecção de fissuras ósseas, Ponder, Safaei e Anton (2018) para detecção de danos nos implante ósseo,

como a substituição total do joelho, Hu et al. (2018) para monitoramento da excitação-contracção cardíaca, Menegaz et al. (2019) e Menegaz e Guimarães (2019) para detecção de tumores mamários. E em materiais compósitos, alguns exemplos de aplicações utilizando esses materiais serão mostradas a seguir, visto que os eixos utilizados nesta dissertação são manufaturados deste material.

2.1.4.1 Aplicações da técnica de ISHM em materiais compósitos

Giurgiutiu e Rogers (1999) desenvolveram um modelo analítico da resposta de impedância eletromecânica de uma viga de compósito danificada para monitoramento de delaminação. Para simular a delaminação variou-se a espessura da viga. No ano seguinte, Giurgiutiu e Zagari (2000) continuaram seus estudos nessa área, monitorando delaminações em estruturas antigas de aeronaves.

Pohl et al. (2001) induziram danos em polímeros reforçados com fibra de carbono, através de impacto em baixa velocidade e os detectaram monitorando as alterações no picos de impedância. Também, consideraram a influência de fatores que podem influenciar as assinaturas de impedância, como efeitos de envelhecimento, carga mecânica e diferentes contatos elétricos.

Grisso, Peairs e Inman (2004) utilizaram o método de ISHM para detectar o início do aparecimento de trincas transversais na matriz de uma viga de material compósito. As assinaturas de impedância foram analisadas com a métrica de dano RMSD. Em seguida, a técnica de raios-X foi utilizada para verificar o número de trincas presentes na estrutura.

Tsuruta et al. (2008) utilizaram o método de ISHM para avaliar danos por impacto de baixa energia em placas compósitas laminadas de fibra de carbono. Os experimentos foram realizados usando um pêndulo especialmente projetado, energia de impacto e dimensão da peça impactante. Além disso, foi investigada a influência da banda de frequência na qual as funções de impedância foram medidas. Metamodelos estatísticos foram construídos com o objetivo de estabelecer relações entre os valores da métrica de dano (RMSD) e a energia de impacto considerando impactos únicos e múltiplos.

Schwankl et al. (2013) utilizaram a técnica de ISHM para detectar danos em painel de material compósito e a métrica de dano RMSD para analisar as assinaturas de impedância obtidas. Os autores notaram que o valor RMSD aumenta com a gravidade do dano, mas que não apresenta um padrão definido em relação a distância entre o dano e o PZT.

Wandowski, Malinowski e Ostachowicz (2016) estudaram a detecção e localização de de-

laminações iniciadas artificialmente em amostras de polímero reforçado com fibra de carbono, também investigaram os efeitos das mudanças de temperatura. Um método de compensação de temperatura foi proposta para melhorar a detecção de delaminação.

Ostachowicz et al. (2017) apresentaram métodos e técnicas multidisciplinares orientadas para a identificação e avaliação de danos em estruturas compostas (delaminações, descolagem, vazios). Dois tipos de materiais foram utilizados: compostos reforçados com fibras de carbono e vidro. Os autores utilizaram, além da impedância eletromecânica, a propagação de ondas elásticas, vibrometria de varredura a laser e espectroscopia terahertz.

Zhu, Wang e Qing (2019) utilizaram a técnica de ISHM para localizar e quantificar o desbaste na interface núcleo e face de compostos sanduíche *honeycomb*. E Tawie et al. (2019) estudaram capacidades de detecção e desempenho da técnica de impedância sujeita a diferentes métodos de fixação de transdutores piezelétricos. Para esse fim, foram preparadas placas compostas de fibra de vidro com vários métodos de fixação para o sensor e foi realizada a detecção de defeitos comuns, como delaminações e trincas.

Capítulo 3

Monitoramento de integridade estrutural

Este capítulo tem como objetivo apresentar alguns conceitos relacionados a técnica de monitoramento da integridade estrutural baseado em impedância eletromecânica (ISHM). Inicialmente são mostrados os conceitos básicos relacionados com a impedância eletromecânica. Em seguida, o efeito da temperatura na técnica e os métodos de compensação de temperatura.

3.1 Impedância eletromecânica

A técnica de ISHM utiliza transdutores piezelétricos pequenos e leves, que agem simultaneamente como sensores e atuadores. Estes sensores podem ser posicionados externamente ou incorporados na estrutura a fim de monitorar alterações de rigidez, massa e/ou amortecimento (CHAUDHRY et al., 1995b). Diversos tipos de materiais, naturais (como o quartzo, turmalina, etc) e sintéticos, exibem propriedades piezelétricas, como por exemplo: as cerâmicas de PZT (Titanato Zirconato de Chumbo) que têm sido extensivamente utilizadas como elementos atuadores distribuídos, aplicados sob a forma de placas, com espessuras típicas da ordem de 0,1 a 0,2 mm (TEBALDI; COELHO; LOPES JR., 2006).

Devido à dificuldade em se obter a impedância mecânica da estrutura, no método de ISHM mede-se a impedância elétrica do sensor PZT (AYRES et al., 1998). A impedância mecânica (Z_m) de uma estrutura é obtida pelo quociente entre a força aplicada em um dado ponto e a velocidade com que o mesmo se desloca neste ponto, conforme a Eq. (3.1). A impedância elétrica (Z_e) corresponde a oposição que um circuito ou componente elétrico oferece à passagem de corrente e é dada pela Eq. (3.2) (PARK et al., 1998).

$$Z_m = \frac{F(w)}{\dot{X}(w)} \quad (3.1)$$

onde F é a força e \dot{X} é a velocidade.

$$Z_e = \frac{V_i(w)}{I_o(w)} \quad (3.2)$$

onde $V_i(w)$ é a tensão e $I_o(w)$ é a corrente elétrica.

O monitoramento utilizando os PZTs só é possível devido estes materiais possuírem o efeito direto e inverso (PARK et al., 2003). O efeito piezelétrico direto, ou efeito sensor, ocorre quando o material é submetido a uma deformação mecânica gerando uma carga elétrica. O efeito piezelétrico inverso, ou efeito atuador, ocorre quando o material é submetido a um potencial elétrico externo, resultando em uma deformação mecânica (CHAUDHRY et al., 1995b). Dessa forma, para utilização da técnica de ISHM é necessário aplicar uma tensão elétrica (geralmente de 1V) nos PZTs, que se deformam (efeito piezelétrico inverso), produzindo uma excitação na estrutura monitorada. A resposta vibracional resultante gera carga elétrica no PZT (efeito piezelétrico direto) devido a deformação mecânica induzida pela estrutura (RAJU, 1997).

De acordo com Chaudhry et al. (1995b), os efeitos inverso e direto para um material piezelétrico com comportamento linear podem ser expressos com a relação entre as variáveis elétricas e mecânicas com o uso das Eq. (3.3) e (3.4) respectivamente.

$$S_i = s_{ij}^E T_j + d_{mi} E_m \quad (3.3)$$

$$D_m = d_{mi} T_i + \varepsilon_{mk}^T E_k \quad (3.4)$$

onde S é o vetor de deformação, T é o vetor das tensões, E é o vetor campo elétrico, D é o vetor deslocamento elétrico, s é o tensor de flexibilidade, d é o tensor das constantes piezelétricas em deformação, ε é a permissividade elétrica, i, j, k e m são os índices que indicam as componentes dos vetores e tensores das equações.

No que se refere a região sensível para detecção de mudanças nas assinaturas de impedância, Park, Cudney e Inman (2000a) afirmam, com base no conhecimento adquirido em vários estudos de caso, que a área de detecção de um único PZT pode identificar falhas localizadas a uma distância (radial) de até 0,4 m em estruturas de materiais compósitos e até 2 m em vigas metálicas simples.

O trabalho teórico pioneiro que descreve o processo de medição das assinaturas de impe-

dância foi apresentado por Liang, Sun e Rogers (1993), que propuseram um modelo teórico unidimensional. O modelo eletromecânico, que representa o processo de medição da impedância eletromecânica em um sistema de 1 grau de liberdade é apresentado na Fig. 3.1. Neste caso, as propriedades de massa, rigidez e amortecimento são representadas pelas letras: m , k e c , respectivamente. O transdutor piezelétrico é excitado por uma fonte de tensão V_i e a corrente de saída I_o é produzida pela deformação do sensor.

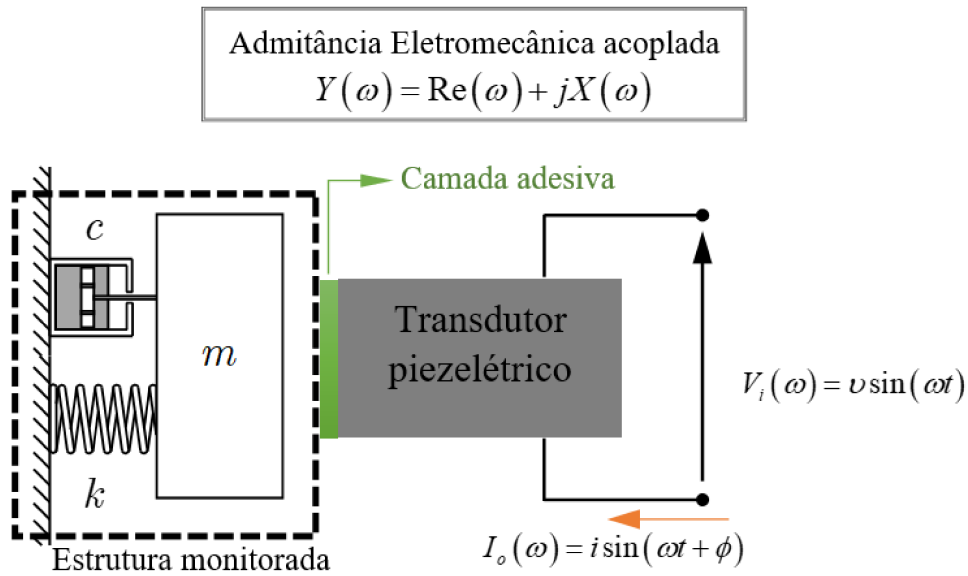


Figura 3.1: Modelo unidimensional do acoplamento eletromecânico utilizado no método SHM baseado em impedância eletromecânica (Fonte: Adaptado de Liang, Sun e Rogers (1993)).

A partir do sistema proposto e considerando que as propriedades mecânicas do PZT não variam com o tempo, Liang, Sun e Rogers (1993) e Liang, Sun e Rogers (1994a) demonstraram que a admitância Y do atuador PZT pode ser escrita como uma função combinada da impedância mecânica do próprio atuador Z_a e da estrutura Z_S , como mostra a Eq. (3.5).

$$Y(w) = \frac{I_o(w)}{V_i(w)} = iw \frac{b_a l_a}{h_a} \left(\bar{\epsilon}_{33}^T (1 - i\delta) - \frac{Z_S(w)}{Z_S(w) + Z_a(w)} d_{3x}^2 \bar{Y}_{xx}^E \right) \quad (3.5)$$

onde $I_o(w)$ é a corrente de saída, $V_i(w)$ é a tensão de entrada no atuador PZT, b_a , l_a e h_a são a largura, comprimento e espessura do PZT, $\bar{\epsilon}_{33}^T$ é a constante dielétrica complexa do PZT, δ é o fator de perda dielétrica, d_{3x}^2 é a constante de acoplamento piezelétrico com deformação nula e \bar{Y}_{xx}^E é o módulo complexo de Young do PZT com campo elétrico nulo.

A partir da Eq. (3.5) é possível observar que a impedância é uma função complexa, com parte real e imaginária. A parte real das assinaturas de impedância é mais sensível às alterações

estruturais. Por esta razão, é a mais indicada para detecção de danos em estruturas de acordo com o seu sinal de impedância (RAJU, 1997).

O sinal de impedância geralmente é obtido com o uso de um equipamento denominado "analisador de impedância" ou "impedancímetro", que para sua utilização é necessário a escolha da banda de frequência de excitação, onde geralmente é adotado um procedimento de tentativa e erro, baseado na densidade de picos (PARK; CUDNEY; INMAN, 2000b).

Neste trabalho, para obtenção das assinaturas de impedância, utilizou-se o Analisador de impedância Agilent 4294A, disponível no Laboratório de Mecânica de Estruturas “Prof. José Eduardo Tannús Reis” - LMEst da Faculdade de Engenharia Mecânica da UFU (FEMEC). Este sistema tem a capacidade de realizar a aquisição da impedância na faixa de frequência entre 40 Hz a 110 MHz. Também, foi utilizado o analisador de impedância SySHM (Fig. 3.2), desenvolvido pelos pesquisadores do LMEst, uma tecnologia inovadora, de baixo custo, versátil, de processamento rápido e que opera em frequências de 0 a 400 kHz (FINZI NETO et al., 2010).



Figura 3.2: Analisador de impedância SySHM.

De posse dos dados obtidos experimentalmente, faz-se necessário analisar os resultados para quantificar os danos presentes na estrutura, já que as assinaturas de impedância fornecem informação apenas qualitativa. Por isso, utiliza-se tratamentos estatísticos, conhecidos como métricas de dano, que correspondem a parâmetros escalares que representam as diferenças entre duas curvas de impedância medidas antes e após a ocorrência de um possível dano. Dentre estas métricas, destaca-se o desvio médio quadrático (RMSD) dada por (PEAIRS, 2006):

$$RMSD = \left\{ \sum_{i=1}^n \left[\frac{(Re(Z_{1,i}) - Re(Z_{2,i}))^2}{n} \right] \right\}^{1/2} \quad (3.6)$$

onde $Re(Z_{1,i})$ é a parte real da assinatura de impedância da medição sem dano (valor de

referência, chamado de *baseline*) em uma frequência i , $Re(Z_{2,i})$ é a parte real da assinatura de impedância em uma frequência i para uma nova configuração da estrutura, n é o número de pontos em frequência na banda de observação e i varia de 1 até n .

A métrica RMSD foi a escolhida para aplicação nesta dissertação, por ser a mais utilizada na literatura. No entanto, existem outras métricas, como as variantes da métrica RMSD, nomeadas como RMSD1, RMSD2, RMSD3, RMSD4 e RMSD5. Além dessas, existem a diferença média quadrada, o desvio do coeficiente de correlação e o desvio percentual da média absoluta. As definições destas métricas podem ser consultadas em Palomino (2008).

3.1.1 Limiar estatístico (*threshold*)

Na análise dos resultados das métricas de dano é preciso estabelecer um limiar estatístico (*threshold*) confiável, que é usado para estimar o ponto a partir do qual tem-se mudança na estrutura, ou seja, com este valor é possível separar a condição saudável da com dano.

O limiar estatístico pode ser determinado considerando que a amostra possui distribuição normal, isto é, uma distribuição em que a variável pode assumir qualquer valor dentro de um intervalo previamente definido. Para isto, utiliza-se a densidade de probabilidade de uma distribuição normal, que esta ilustrada na Fig. 3.3 e é calculada com a Eq. (3.7) (BARROS NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2001).

$$f(x)dx = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx \quad (3.7)$$

onde f corresponde a densidade de probabilidade da variável aleatória x , μ a média populacional, σ^2 a variância populacional e σ é o desvio padrão.

O produto $f(x)dx$ é, por definição, a probabilidade de ocorrência de um valor da variável aleatória no intervalo de largura dx em torno do ponto x . Dessa forma, para obter a probabilidade correspondentes a intervalos finitos é necessário integrar a densidade de probabilidade entre os limites apropriados, como mostrado na Eq. (3.8) para o intervalo $[a,b]$ (BARROS NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2001).

$$P(a < x < b) = P(a \leq x \leq b) = \int_a^b f(x)dx \quad (3.8)$$

Na Fig. 3.3, percebe-se que a maior parte da área sob a gaussiana está contida no intervalo definido por um desvio padrão em torno da média e praticamente toda ela está situada entre

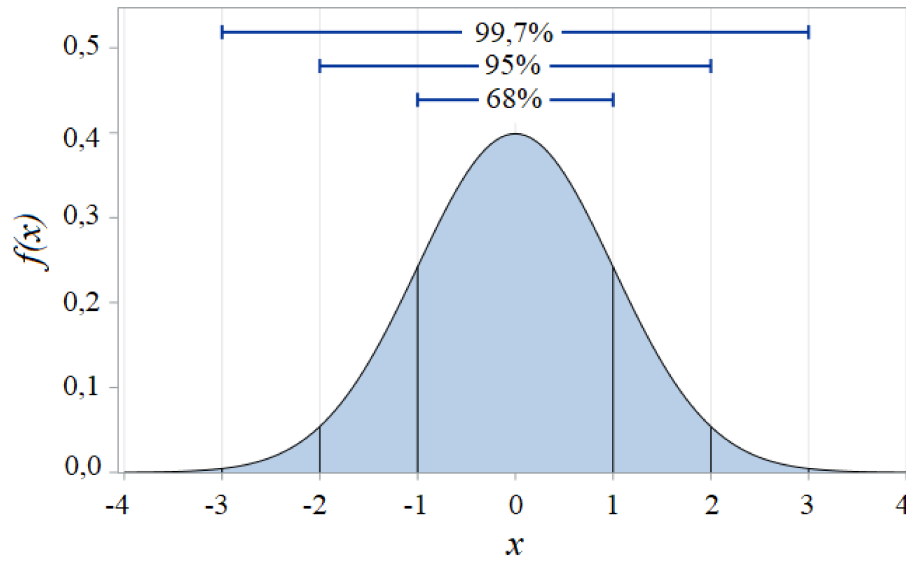


Figura 3.3: Distribuição de frequências de uma variável aleatória (Fonte: Adaptado de Wicklin (2019)).

$\mu - 3\sigma$ e $\mu + 3\sigma$. Os valores numéricos correspondentes a esses intervalos são obtidos integrando os limites apropriados, como mostrado na Eq. (3.9), que também pode ser usada para outro intervalo. A escolha do intervalo depende da confiança desejada.

$$P(\mu - 3\sigma < x < \mu + 3\sigma) = \int_{\mu-3\sigma}^{\mu+3\sigma} f(x)dx = 0,9973(99,73 \%) \quad (3.9)$$

Dessa forma, usando o intervalo de $\mu - 3\sigma$ a $\mu + 3\sigma$, é possível encontrar com confiança de 99,73 % os valores contidos neste intervalo. Este intervalo pode ser utilizado como limiar estatístico para distinguir a condição saudável da com alteração significativa na estrutura. Portanto, o limiar estatístico é determinado de acordo com a Eq. (3.10), considerando apenas o limite superior do valor médio e do desvio-padrão.

$$PZT_{threshold} = \mu + 3\sigma \quad (3.10)$$

Assim, a técnica de ISHM é capaz de detectar danos em estruturas complexas, através da obtenção das assinaturas de impedância para uma estrutura saudável (sem dano) e com dano ao longo de uma banda de frequência escolhida por tentativa e erro; e da análise das modificações desses sinais, que podem indicar um dano na estrutura.

3.2 Efeito da temperatura

Em aplicações práticas de monitoramento de integridade estrutural, a estrutura monitorada está constantemente sofrendo alterações devido ao efeito das condições externas. Um desses fatores é a variação de temperatura. A mudança de temperatura resulta em uma variação significativa da impedância eletromecânica, causando mudança na frequência e amplitude das assinaturas de impedância, podendo levar a conclusão incorreta sobre o estado da estrutura analisada (PARK et al., 1999). A conclusão incorreta sobre a integridade estrutural, se da porque o índice de dano referente as assinaturas de impedância eletromecânica com variação de temperatura, poderem possuir valor correspondente a um dano moderado na estrutura (SUN et al., 1995b).

No entanto, Sun et al. (1995b) afirmaram que existe uma diferença entre o efeito causado pela variação da temperatura e o efeito ocasionado por um dano estrutural na impedância. A mudança de temperatura causa um desvio quase uniforme na vertical e na horizontal das assinaturas de impedância. Enquanto que, na presença de dano na estrutura, tem-se alterações significativas no padrão das assinaturas. Esta diferença permite isolar e reduzir o efeito da temperatura através de manipulações numéricas.

Esta diferença foi demonstrada por Park, Cudney e Inman (2000a), com a realização de experimentos em uma junção de tubo de aço com temperatura de 25 a 75 °C e presença de dano. Os autores aplicaram um método de compensação de temperatura, para minimizar estas variações e obter resultados mais confiáveis. No entanto, não obtiveram uma boa compensação, como pode ser observado na Fig. 3.4, devido as assinaturas de impedância apresentarem mudanças em seu padrão com a variação de temperatura, que foi ainda maior quando adicionou um dano na estrutura.

Esse comportamento também foi observado em eixo de material compósito. Por esta razão, foi proposto nesta dissertação uma técnica de compensação de temperatura baseada na otimização híbrida com programação por compromisso, para tentar minimizar estas variações. Além disso, uma técnica baseada apenas em otimização híbrida, proposta por Tsuruta et al. (2017), foi utilizada para efeito de comparação com a metodologia proposta.

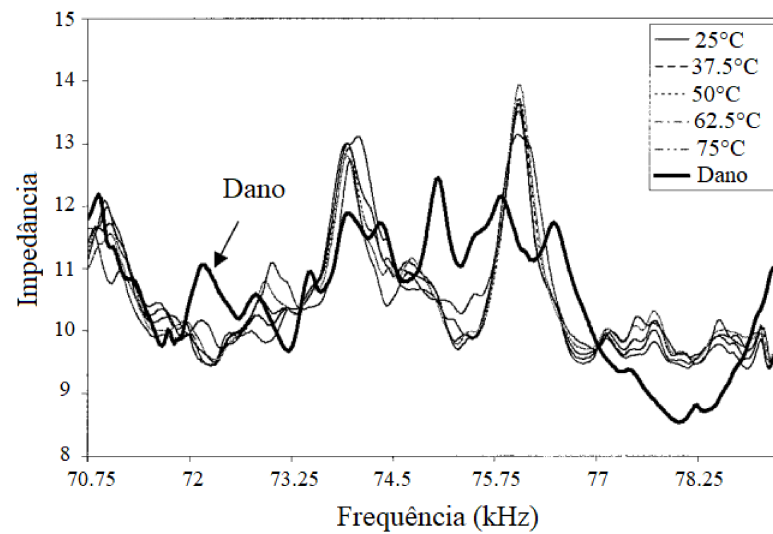


Figura 3.4: Assinaturas de impedância com variação de temperatura e dano (Fonte: Adaptado de Park, Cudney e Inman (2000a)).

3.2.1 Procedimento de otimização híbrida

Na Fig. 3.5 é ilustrado o fluxograma da técnica de compensação de temperatura baseada em otimização híbrida.

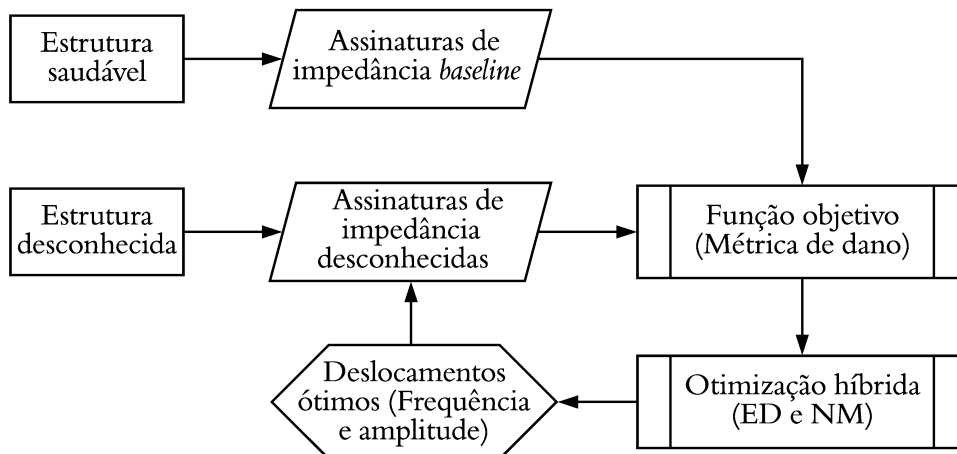


Figura 3.5: Fluxograma do procedimento de otimização híbrida (Fonte: Adaptado de Tsuruta et al. (2017)).

Nesta metodologia, inicialmente são obtidas as assinaturas de impedância da estrutura monitorada na condição saudável (*baseline*). Em seguida, são obtidas as assinaturas de impedância da estrutura para uma condição desconhecida e o otimizador fica responsável pela determinação dos deslocamentos ótimos capazes de garantir a compensação na horizontal e vertical.

No otimizador, inicialmente o algoritmo de Evolução Diferencial é executado 5 vezes e o seu menor valor é utilizado como estimativa inicial para o *fminsearch*.

A ED foi implementada na SimpleToolbox, desenvolvida por Viana (2008), com a seguinte configuração: *DE/rand - to - best/1/exp*, ou seja, a estratégia de mutação da população é realizada considerando tanto o indivíduo escolhido aleatoriamente quanto o melhor, um vetor diferença e cruzamento exponencial. Além disso, foi considerado probabilidade de cruzamento de 0,50, taxa de perturbação de 0,80 e população de 50 indivíduos.

O *fminsearch* usa o algoritmo Nelder-Mead de Lagarias et al. (1998). Para sua utilização é necessário fornecer os valores iniciais das variáveis de projeto, que nesta dissertação foram obtidos com o uso da evolução diferencial. Além disso, quatro parâmetros escalares devem ser especificados: coeficientes de reflexão, expansão, contração e encolhimento. Os valores mais utilizados na literatura para cada um desses coeficientes estão mostrados na Tab. (3.1) e são estes os utilizados em sua implementação no MATLAB.

Tabela 3.1: Coeficientes do algoritmo Nelder-Mead.

Coeficiente	Valor
Reflexão	1
Expansão	2
Contração	0,50
Encolhimento	0,50

Posteriormente, as assinaturas de impedância da condição desconhecida são comparadas com as assinaturas de impedância *baseline* através de uma função objetivo, que neste caso é a métrica de dano (Eq. (3.6)), na qual, a impedância da condição desconhecida corresponde a $Re(Z_{2,i})$ e a impedância da condição *baseline* corresponde a $Re(Z_{1,i})$. Se o procedimento convergir para um valor mínimo da função objetivo, os efeitos da variação de temperatura são compensados usando os valores das variáveis de mudança de frequência e amplitude, que são as variáveis de projeto do problema de otimização. Se isto não acontecer, o procedimento de otimização continua atualizando os valores de frequência e amplitude até que se tenha uma convergência, o que pode levar à compensação de temperatura (se o valor final da função objetivo for próximo a zero) ou a uma indicação de dano associada à compensação de temperatura.

Esta técnica de otimização híbrida tem como objetivo minimizar as influências das variações de temperatura durante o processo de medição das assinaturas de impedância. A descrição do seu algoritmo pode ser consultada em Tsuruta et al. (2017) e Rabelo et al. (2017b).

3.2.2 Procedimento de otimização proposto

Na Fig. 3.6 é ilustrado o fluxograma da técnica de compensação de temperatura proposta nessa dissertação.

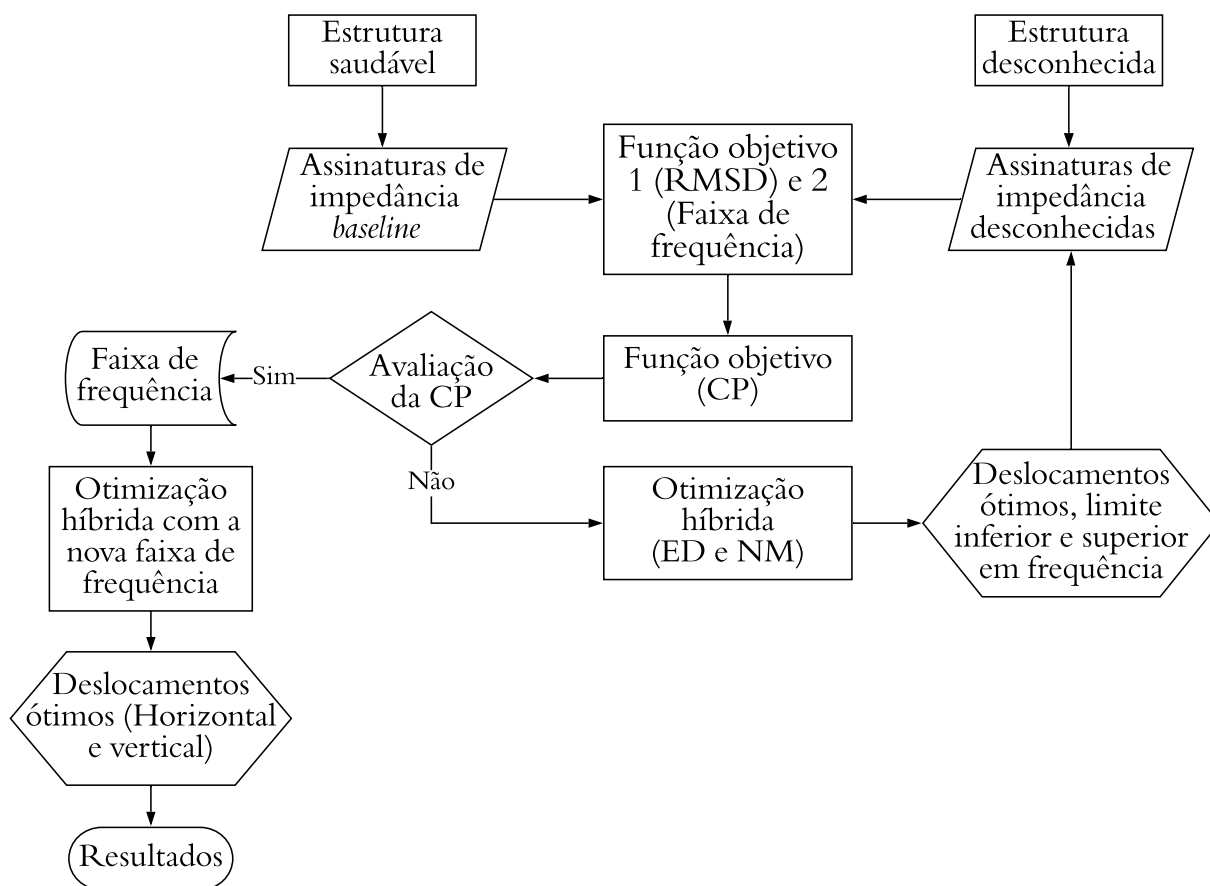


Figura 3.6: Fluxograma do procedimento de otimização proposto.

Este procedimento foi formulado com o objetivo de detectar a faixa de frequência em que há maior compensação dos deslocamentos horizontais e verticais causados pela variação de temperatura, inserindo uma nova função objetivo na técnica de otimização híbrida utilizada convencionalmente. Dessa forma, além da função objetivo referente a métrica de dano (Função objetivo 1 - RMSD) descrita anteriormente, há agora uma segunda função objetivo (Função objetivo 2 - Faixa de frequência) encarregada da busca da melhor faixa de frequência otimizada. Estas duas funções objetivos são unidas usando a programação por compromisso (em inglês *Compromise Programming* - CP). Para isto, é utilizada quatro variáveis de projeto: deslocamento de frequência (horizontal), de amplitude (vertical), limite inferior e superior em frequência e o otimizador fica responsável por encontrar os seus valores ótimos.

Se o procedimento convergir para um valor mínimo da função objetivo, a melhor faixa

de frequência é armazenada. Se isto não acontecer, o procedimento de otimização continua atualizando os valores das variáveis de projeto até que se tenha uma convergência, o que pode levar à compensação de temperatura (se o valor final da função objetivo for próximo a zero).

Em seguida, a melhor faixa de frequência encontrada e armazenada é utilizada como limites para otimização híbrida convencional, que realiza a compensação de temperatura nas assinaturas de impedância considerando apenas o intervalo de frequência fornecido, com o deslocamento de frequência (horizontal) e de amplitude (vertical) como variáveis de projeto. Assim, a função objetivo original (RMSD) é reaplicada na região ótima, onde espera-se que um melhor resultado seja obtido com relação a toda a faixa de frequência previamente utilizada.

3.2.2.1 Programação por compromisso

A CP é utilizada quando há mais de uma função objetivo no problema estudado. Essa metodologia possui maior flexibilidade na formulação de problemas, fornecendo resultados mais razoáveis, uma vez que nela é possível fornecer o melhor e pior resultado para cada uma das funções objetivos individualmente. Para isso utiliza-se a função descrita na Eq 3.11 (VANDERPLAATS, 1999).

$$CP(x) = \left\{ \sum_{k=1}^K \left[\frac{W_k \{FO_k(x) - FO_k^*(x)\}}{FO_k^{worst}(x) - FO_k^*(x)} \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (3.11)$$

onde W_k é o fator de ponderação na k -ésima função objetivo; FO_k é a k -ésima função objetivo; FO_k^* é o melhor valor da k -ésima função objetivo e FO_k^{worst} é o pior valor conhecido da k -ésima função objetivo.

Para aplicação da Eq 3.11 na metodologia proposta, foram testados diferentes valores do fator de ponderação, que possui valor máximo de 1. Dessa forma, variou-se esse parâmetro de 0,05 em 0,05, de forma a obter o melhor para cada um dos casos estudados. Os piores e melhores valores considerados estão descritos na Tab. 3.2.

Tabela 3.2: Melhores e piores valores considerados.

Função objetivo	Melhor valor	Pior valor
RMSD	0	Maior valor RMSD
Faixa de frequência	Número de pontos total da faixa de frequência	200 pontos para o eixo e 400 para o rotor

Capítulo 4

Aplicação de ISHM em um eixo de material compósito

Neste capítulo é detalhado o procedimento experimental para a aplicação do método de ISHM em um eixo de material compósito, sujeito a variação de temperatura e na presença de um dano. Também foram utilizadas as técnicas de otimização descritas anteriormente para a análise dos dados obtidos.

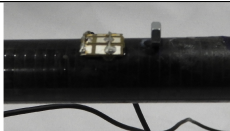
4.1 Procedimento experimental

Neste trabalho foi utilizado um eixo circular vazado de material compósito, com 532 mm de comprimento, 16,7 mm de diâmetro externo e 14 mm de diâmetro interno, conforme mostrado na Fig. 4.1. Este eixo é constituído por cinco lâminas formadas com matriz epóxi e fibras de carbono de alta resistência, com as seguintes orientações: $[0^\circ, 90^\circ, 0^\circ, 90^\circ, 0^\circ]$.

O eixo foi instrumentado com três PZTs fixados na sua superfície com cola epóxi da marca Araldite, cada PZT é composto por 4 transdutores piezelétricos, cada um com 10 mm de comprimento, 3 mm de largura e 1 mm de espessura, conectados eletricamente em paralelo, conforme mostrado na Fig. 4.2. Esses transdutores foram denominados como PZT#1, PZT#2 e PZT#3. Para simular o dano, uma porca de aço foi acoplada ao eixo, sendo seu posicionamento e massa mostrados na Tab. 4.1. A Fig. 4.2 também mostra um desenho esquemático do eixo com as suas principais dimensões (em mm), bem como as posições dos PZTs e do dano.



Figura 4.1: Eixo de material compósito.

Tabela 4.1: Posicionamento e massa do dano.			
	Massa [g]	Posicionamento	Dano
Eixo Compósito	0,33	10 mm do PZT#2	

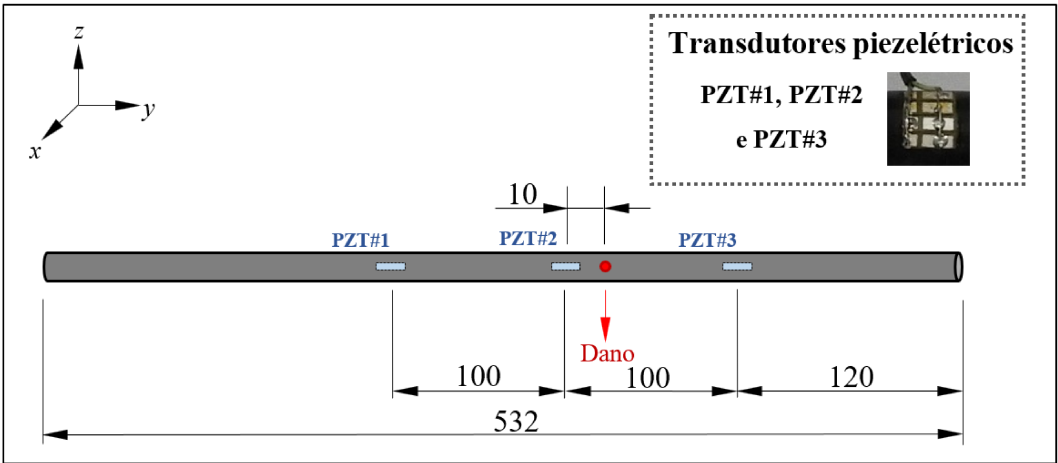


Figura 4.2: Posicionamento dos transdutores piezelétricos e dano.

Para a avaliação do efeito da temperatura foi utilizada uma câmara climática EPL-4H da série Plantinous (veja a Fig. 4.3) capaz de controlar temperatura no intervalo de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ com resolução de $\pm 0,50\text{ }^{\circ}\text{C}$. O eixo foi posicionado dentro da câmara climática (veja a Fig. 4.4) e a temperatura foi variada de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ com incrementos de $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ para as duas condições analisadas (sem dano e com dano).

As medidas de impedância foram realizadas antes e após a adição do dano utilizando o analisador de impedância *Agilent* modelo 4294A mostrado na Fig. 4.5. A faixa de frequência foi determinada com base na densidade de picos na assinatura de impedância (entre 25 e 65 kHz para todos os PZTs) e considerando 801 pontos.



Figura 4.3: Câmara climática.



Figura 4.4: Bancada experimental montada no interior da câmara climática.

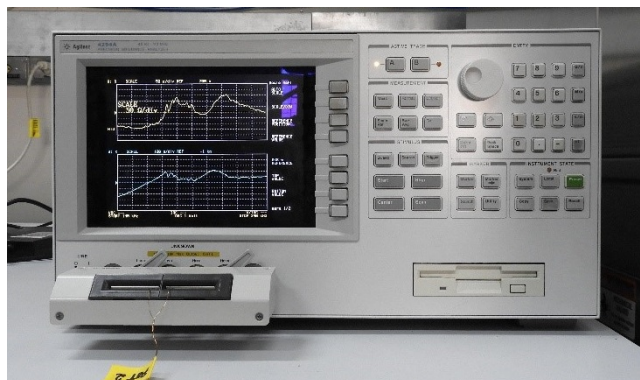


Figura 4.5: Analisador de impedância *Agilent* modelo 4294A .

A Tab. 4.2 apresenta a nomenclatura experimental para as assinaturas de impedância obtidas. Para cada condição do experimento foram obtidas 8 medidas.

Tabela 4.2: Organização experimental com nomenclatura adotada.

<i>n</i>	Temperatura	Dano	Indicação
1	0°C	Sem dano	B0
2	5°C	Sem dano	B5
3	10°C	Sem dano	B10
4	15°C	Sem dano	B15
5	20°C	Sem dano	B20
6	25°C	Sem dano	B25
7	30°C	Sem dano	B30
8	35°C	Sem dano	B35
9	40°C	Sem dano	B40
10	45°C	Sem dano	B45
11	50°C	Sem dano	B50
12	0°C	Com dano	D0
13	5°C	Com dano	D5
14	10°C	Com dano	D10
15	15°C	Com dano	D15
16	20°C	Com dano	D20
17	25°C	Com dano	D25
18	30°C	Com dano	D30
19	35°C	Com dano	D35
20	40°C	Com dano	D40
21	45°C	Com dano	D45
22	50°C	Com dano	D50

Os experimentos de 1 a 11 foram realizados com o objetivo de avaliar como as assinaturas

de impedância variam de acordo com a temperatura. Por outro lado, os experimentos de 12 a 22 foram realizados para avaliar o efeito do dano nas assinaturas de impedância do eixo.

4.1.1 Escolha das faixas de frequências

Como já discutido, a sensibilidade da técnica de ISHM em detectar danos nas estruturas monitoradas depende da correta escolha da faixa de frequência. Essa escolha geralmente é realizada por um método de tentativa e erro, no qual adquire-se o sinal de uma ampla faixa de frequência, analisando a região que possui a maior quantidade de picos (20 a 30), sendo esta a faixa escolhida, pois indica que a resposta é mais rica de informações (PARK; CUDNEY; INMAN, 2000b). Sun et al. (1995a), por outro lado, sugerem a faixa de frequência de 20kHz a 150kHz e afirmam que uma banda de frequência com alta densidade de picos é sempre mais favorável, pois exibe uma sensibilidade mais alta, e geralmente cobre mais informações dinâmicas estruturais. Kitts e Zagrai (2009) também mostraram que faixas de frequência com alta densidade de picos são mais adequadas.

Utilizando esse procedimento, as assinaturas de impedância do eixo compósito foram obtidas em uma ampla faixa de frequência (10 kHz a 250 kHz). Assim foi possível identificar quais as faixas de frequência adequadas para cada um dos PZTs colados na estrutura monitorada. A Fig. 4.6 mostra que a região entre 25 e 65 kHz possui a maior quantidade de picos quando considerada a assinatura de impedância medida pelo PZT#1 na temperatura de 25 °C e foi a escolhida para os três PZTs.

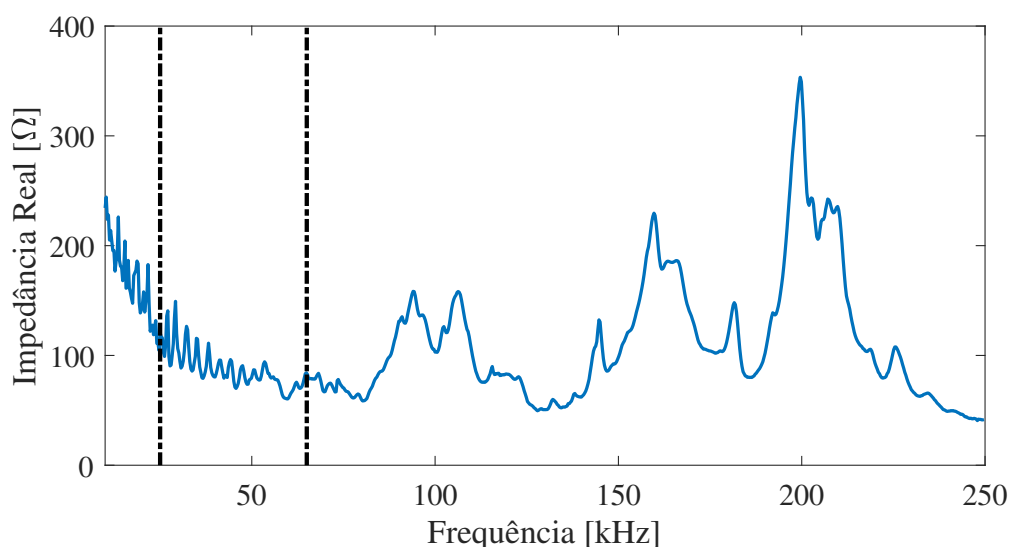


Figura 4.6: Assinaturas de impedância do eixo compósito PZT#1.

4.2 Compensação do efeito da temperatura

Para evitar falsos positivos e minimizar os efeitos causados pela variação da temperatura, foi realizada a compensação da temperatura utilizando o procedimento de otimização proposto associado à programação por compromisso.

4.2.1 Procedimento de otimização proposto e otimização híbrida

Na Fig. 4.7 são ilustradas as assinaturas de impedância medidas pelo PZT#1 considerando as diferentes temperaturas e condições estruturais do eixo de material compósito. É possível observar que as assinaturas de impedância apresentam deslocamentos verticais e horizontais com a variação da temperatura.

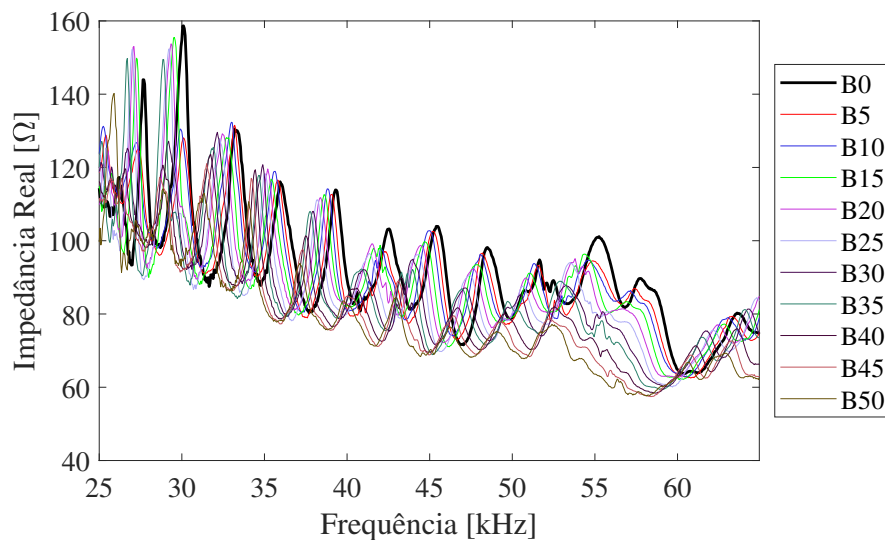


Figura 4.7: Assinaturas de impedância medidas pelo PZT#1 sem compensação de temperatura.

Para minimizar esses deslocamentos e evitar falsos positivos foi realizada a compensação da temperatura com o procedimento de otimização híbrida, utilizando o otimizador evolutivo (ED) 5 vezes, com 50 indivíduos na população inicial, o deslocamento horizontal (frequência) e vertical (amplitude das assinaturas de impedância) como variáveis de projeto, com espaço de projeto de -100 a 100 para o deslocamento horizontal e vertical, e métrica de dano (RMSD) como função objetivo. O resultado deste procedimento é apresentado na Fig. 4.8. No entanto, percebe-se que a compensação não foi bem sucedida em toda a faixa de frequência, isso se deve ao fato da temperatura não apenas deslocar as assinaturas de impedância, bem como alterar seus comportamentos. E este não é um comportamento desejável, pois pode ser interpretado como

um dano estrutural.

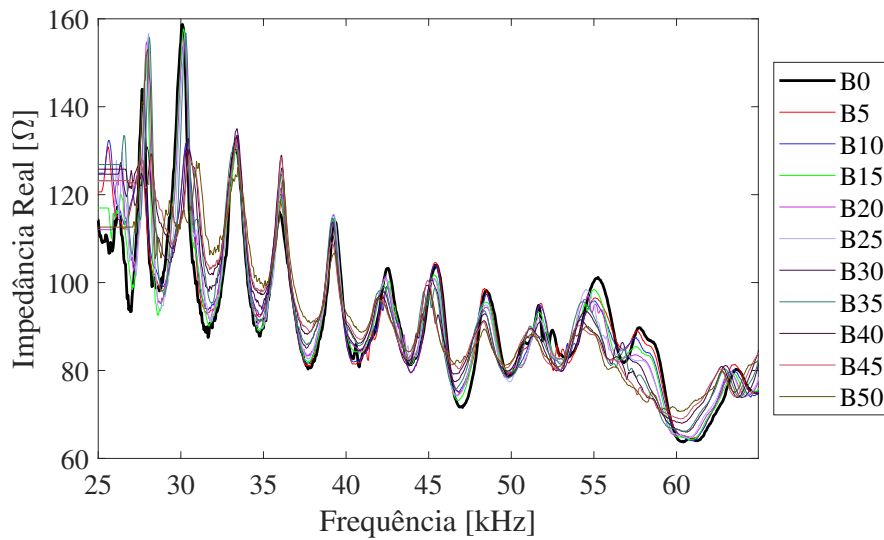


Figura 4.8: Assinaturas de impedância medidas pelo PZT#1 com compensação híbrida.

Em seguida, foi calculado o índice de dano (Fig. 4.9) antes e após a aplicação do procedimento de otimização híbrida. Na qual, observou-se que os valores de índices de dano aumentam em função do aumento da temperatura, mas que são minimizados após a otimização. No entanto, a redução obtida no índice de dano não permite o correto diagnóstico da condição estrutural, já que o *threshold* (calculado em relação aos dados obtidos com a otimização proposta) consegue separar a condição B0 das demais, o ideal seria que todos os valores estivessem abaixo desse *threshold* determinado, devido todas as condições corresponderem as assinaturas de impedância *baseline*. Por esta razão, foi proposto nessa dissertação considerar apenas a faixa de frequência em que há maior compensação dos deslocamentos horizontais e verticais causados pela variação de temperatura.

Portanto, o procedimento de otimização foi novamente utilizado, considerando apenas a melhor faixa de compensação, que como observada visualmente corresponde a faixa de frequência de [35 a 50] kHz. Assim, foi estabelecido um limite inferior (LI) de 35 kHz e superior (LS) de 50 kHz de forma manual (LM), como representado na Fig. 4.10. Posteriormente, foi calculado o índice de dano (Fig. 4.11) antes e após a realização da otimização híbrida, e foi observado que houve redução no valor RMSD encontrado quando comparado com o obtido considerando toda a faixa de frequência.

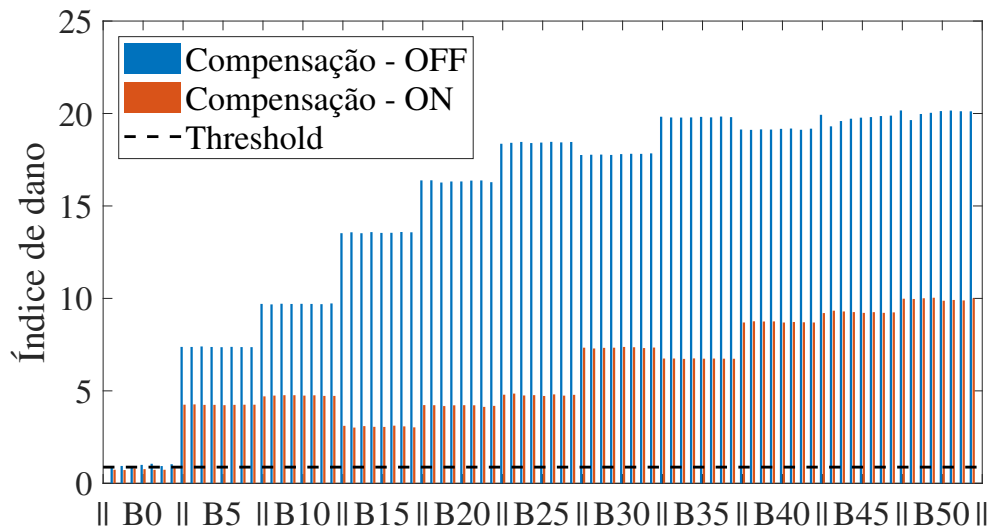


Figura 4.9: Índice de dano do PZT#1 com e sem otimização híbrida.

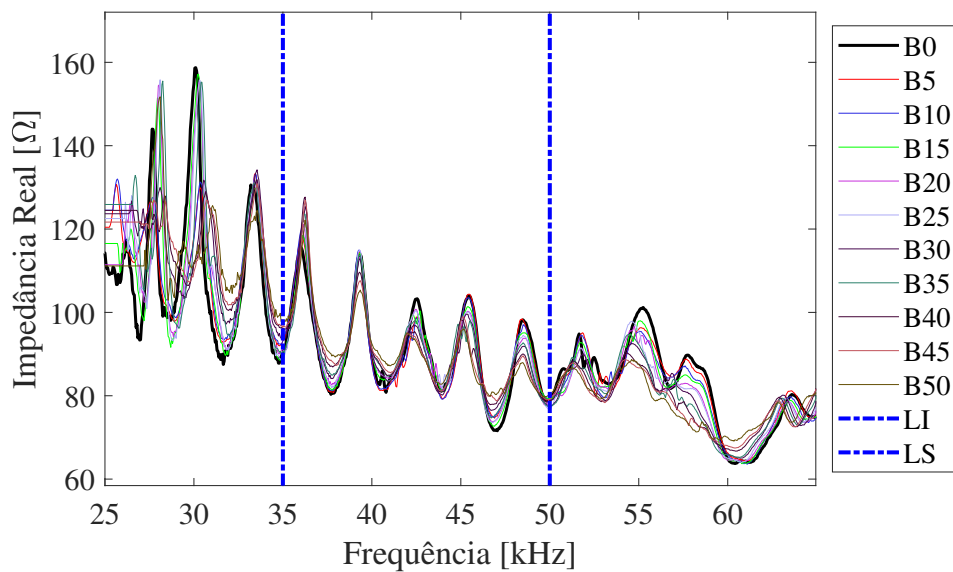


Figura 4.10: Assinaturas de impedância medidas pelo PZT#1 com compensação de [35 a 50] kHz.

Após realização deste procedimento foi possível comprovar que a utilização da melhor faixa compensada é uma alternativa viável para obtenção de resultados com menor influência devido variações de temperatura e mais confiáveis sobre a integridade da estrutura em análise. Por esta razão, a nova metodologia de otimização proposta nesta dissertação foi utilizada para detectar de forma automática a melhor faixa de compensação. Dessa forma, além da função objetivo referente a métrica de dano RMSD utilizada na otimização híbrida, há uma segunda função objetivo encarregada da busca da melhor faixa de frequência otimizada. Estas duas funções

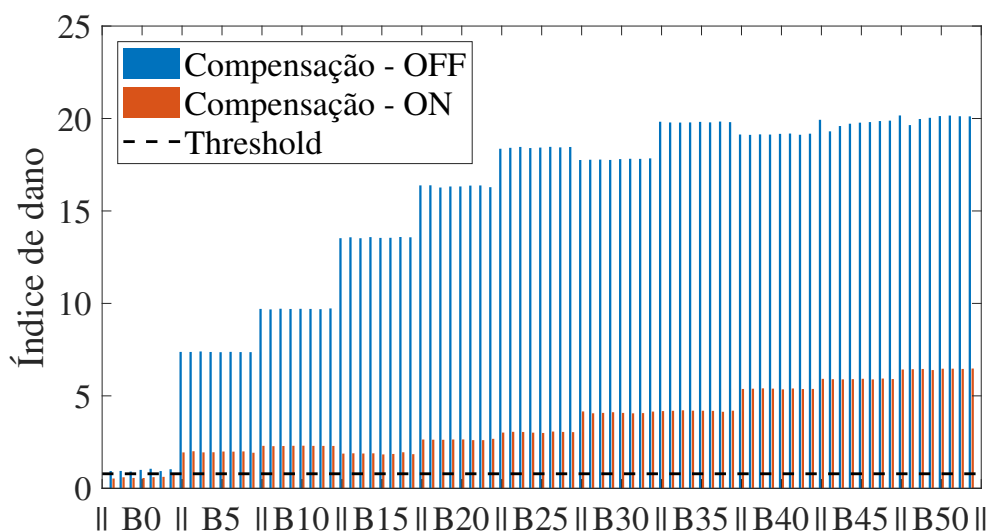


Figura 4.11: Índice de dano do PZT#1 com e sem otimização de [35 a 50] kHz.

objetivos são unidas usando a função por compromisso, nesta função o fator de ponderação (W_k) referente a cada uma das funções objetivos é variado para que possa ser encontrado o melhor resultado possível.

Nesta metodologia o algoritmo de Evolução Diferencial foi executado 5 vezes, considerando 50 indivíduos em sua população inicial e o seu menor valor é utilizado como chute inicial para o método de NM. Além disso, quatro variáveis de projeto são consideradas: deslocamento de frequência (horizontal), de amplitude (vertical), limite inferior e superior em frequência. Na Tab. 4.3 é apresentada o espaço de projeto para cada uma das variáveis citadas, definidos de modo a possibilitar a escolha de uma faixa de frequência com pelo menos 200 pontos entre o limite inferior e superior. Além disso, é importante destacar que toda a faixa de frequência possui 800 pontos.

Tabela 4.3: Espaço de projeto.

Variável	Limite inferior	Limite superior
Deslocamento horizontal	-100	100
Deslocamento vertical	-100	100
Limite inferior em frequência	1	800
Limite superior em frequência	200	800

Na Fig. 4.12 são mostradas as assinaturas de impedância do eixo compósito após compensação proposta sob diferentes temperaturas, sem dano, obtidas pelo PZT#1, com faixa de frequência de [34,65 a 45,40] kHz (faixa de frequência ótima determinada ao fim do processo

de otimização), fator de ponderação da CP de 0,30 para a função objetivo RMSD e 0,70 para a função objetivo referente a faixa de frequência. A Fig. 4.13 apresenta seu índice de dano, que possui valor semelhante ao encontrado quando calculado com os limites de forma manual, já que a faixa de frequência selecionada com a otimização proposta foi próxima a selecionada de forma manual.

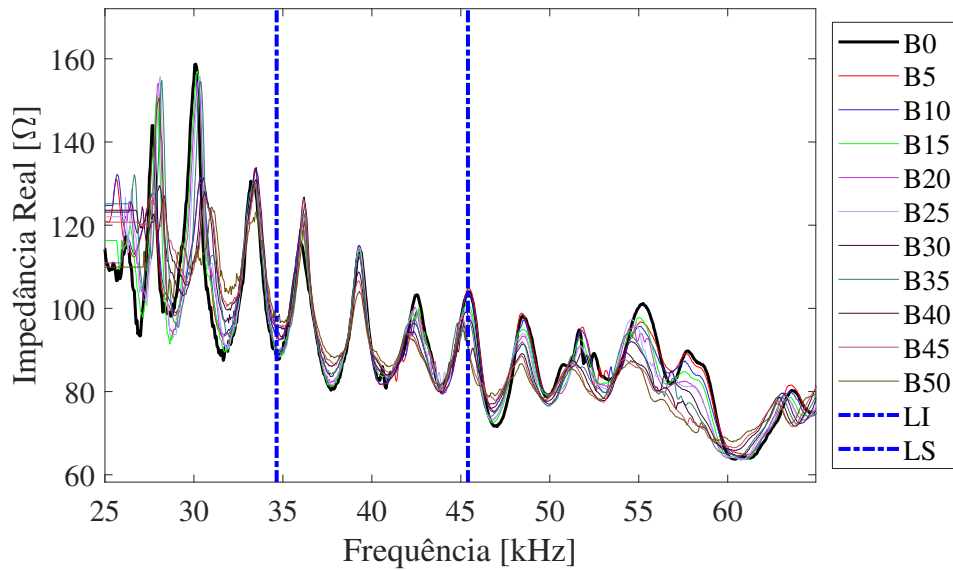


Figura 4.12: Assinaturas de impedância medidas pelo PZT#1 com compensação proposta de [34,65 a 45,40] kHz.

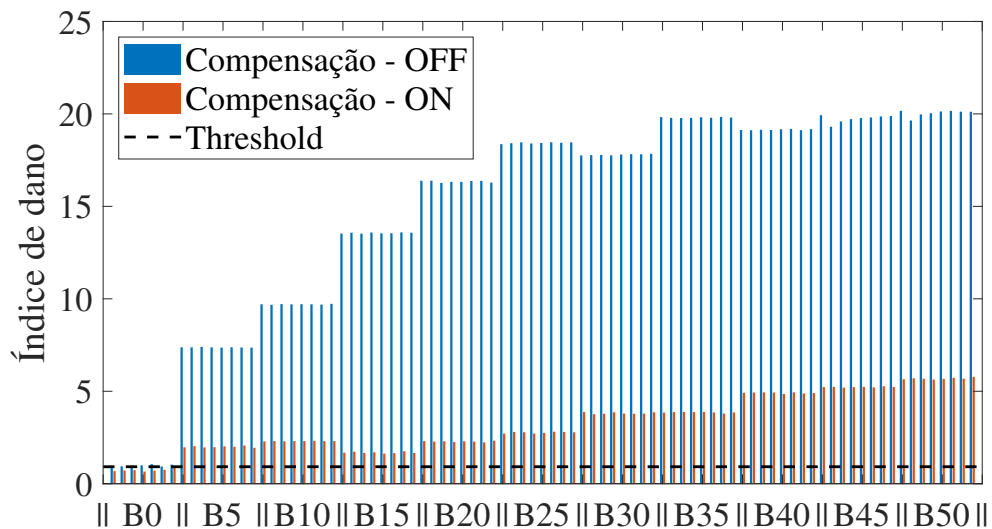


Figura 4.13: Índice de dano do PZT#1 com e sem otimização de [34,65 a 45,40] kHz.

Na Fig. 4.14 é mostrado todos os resultados de valor RMSD, na qual com a otimização proposta a redução no RMSD é mais significativa do que com a otimização híbrida. Dessa

forma, percebe-se que a metodologia proposta foi capaz de para minimizar as variações das assinaturas de impedância, causadas devido a mudança de temperatura.

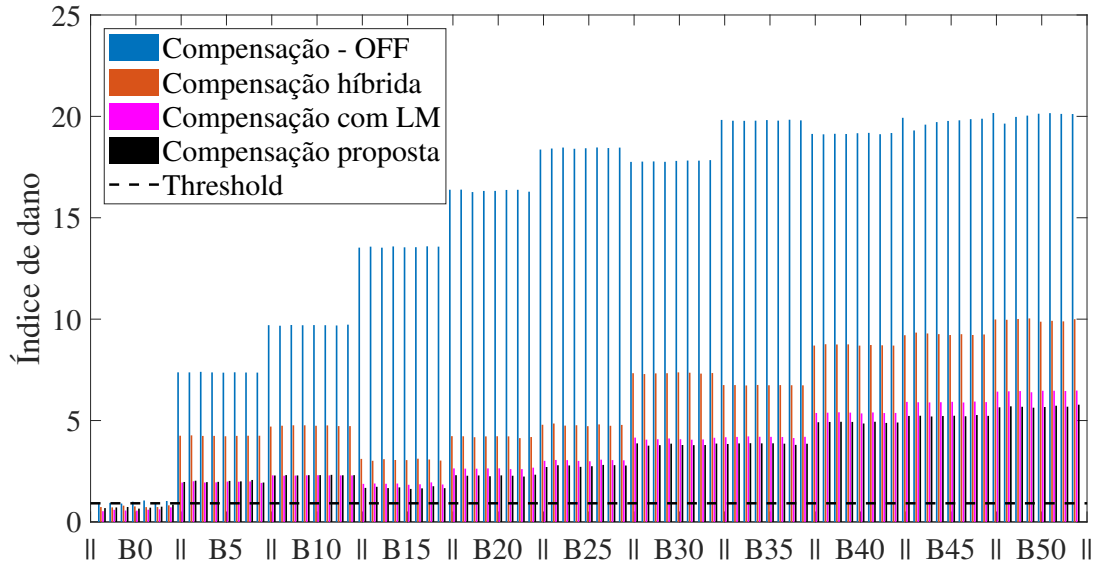


Figura 4.14: Índice de dano do PZT#1 com e sem otimização híbrida e proposta.

Esse mesmo procedimento foi aplicado para o PZT#2 e o PZT#3. Na Fig. 4.15 são mostradas as assinaturas de impedância para o PZT#2 antes da otimização proposta e após otimização proposta na Fig. 4.16, considerando faixa de frequência de [33,20 a 48,85] kHz, fator de ponderação da CP de 0,40 para a função objetivo RMSD e 0,60 para a função objetivo referente a faixa de frequência.

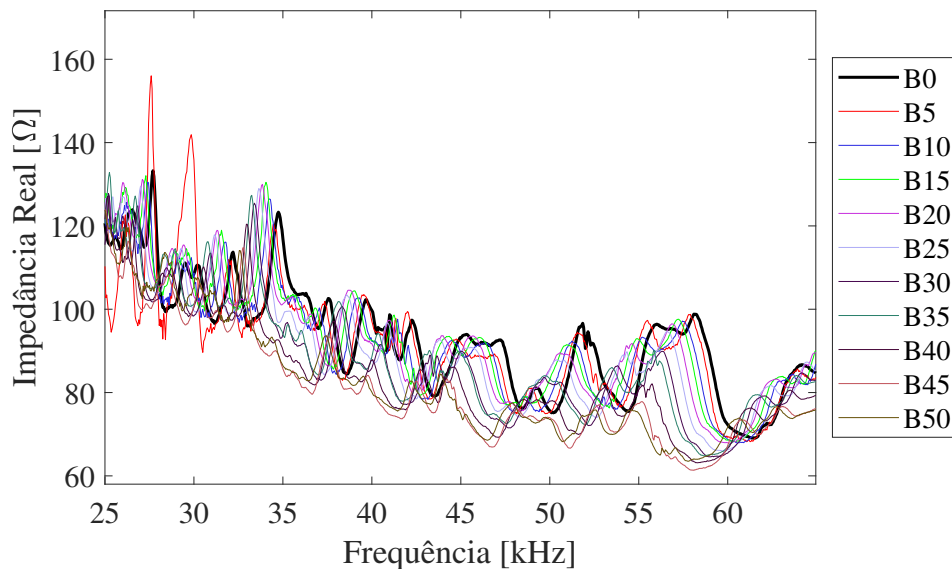


Figura 4.15: Assinaturas de impedância medidas pelo PZT#2 sem compensação de temperatura.

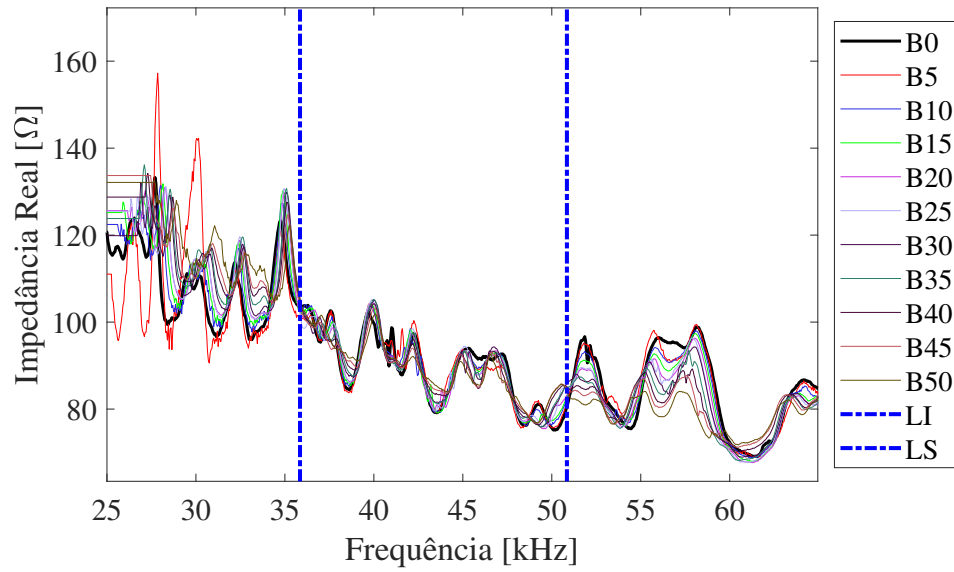


Figura 4.16: Assinaturas de impedância medidas pelo PZT#2 com compensação proposta de [33,20 a 48,85] kHz.

Na Fig. 4.17 é possível observar que com esse procedimento de otimização as variações das assinaturas de impedância foram minimizadas e que é possível separar a condição B0 das demais estudadas com o uso do *threshold*.

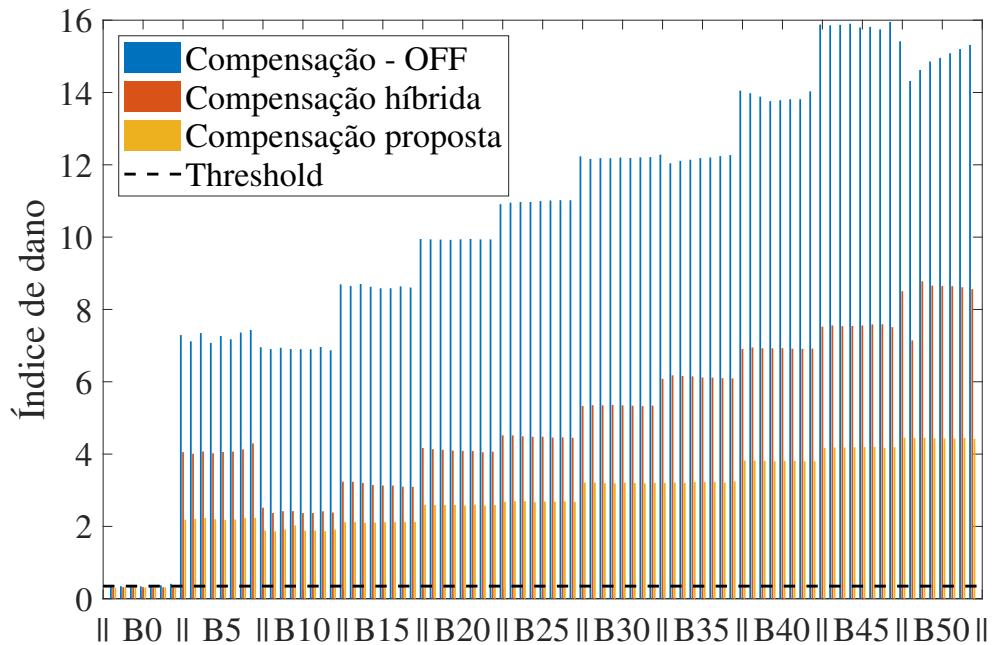


Figura 4.17: Índice de dano do PZT#2 com e sem otimização de [33,20 a 48,85] kHz.

O mesmo ocorreu para o PZT#3 (veja as Figs. 4.18, 4.19 e 4.20), utilizando a faixa de frequência de [39,55 a 47,30] kHz, fator de ponderação da CP de 0,45 para a função objetivo

RMSD e 0,55 para a função objetivo referente a faixa de frequência. Porém, nota-se que as assinaturas de impedância mudam a sua forma a medida que a temperatura aumenta. Acredita-se que este comportamento pode estar associado a colagem incorreta do PZT#3, visto que não foi observado esse comportamento nos PZT#1 e PZT#2.

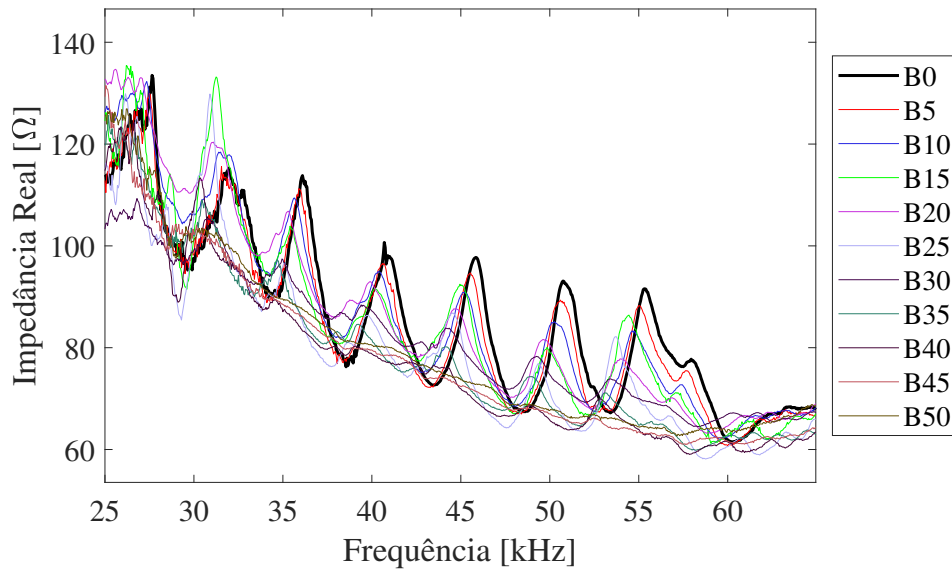


Figura 4.18: Assinaturas de impedância medidas pelo PZT#3 sem compensação de temperatura.

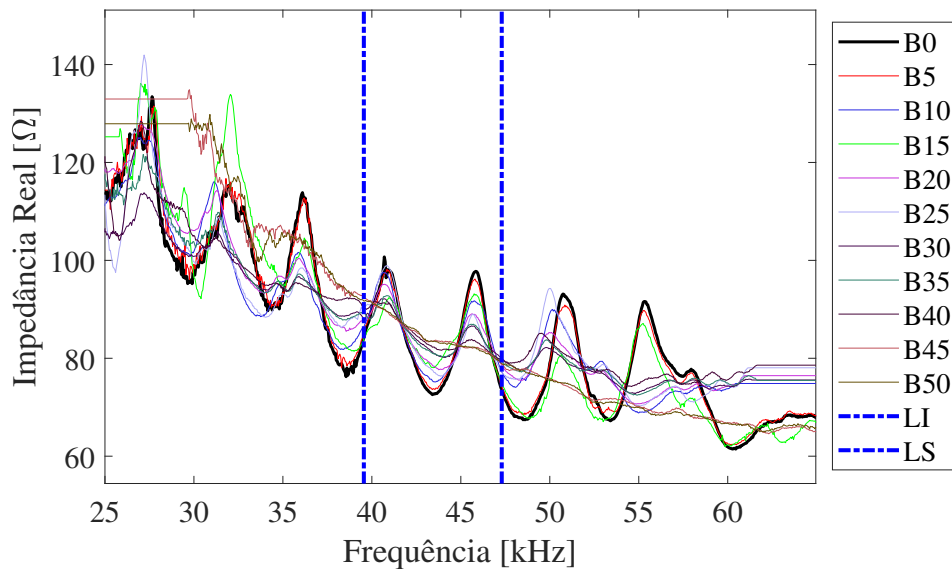


Figura 4.19: Assinaturas de impedância medidas pelo PZT#3 com compensação proposta de [39,55 a 47,30] kHz.

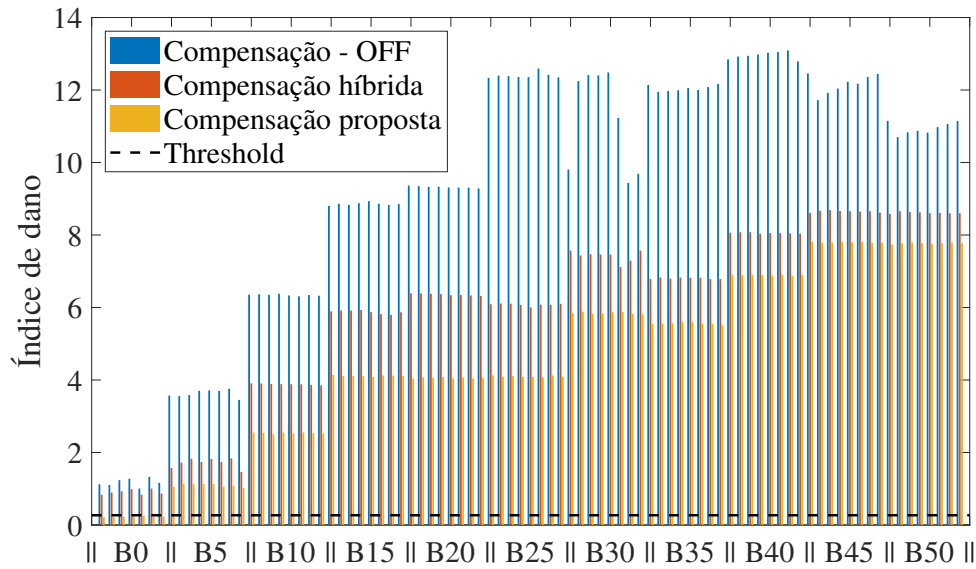


Figura 4.20: Índice de dano do PZT#1 com e sem otimização de [39,55 a 47,30] kHz.

4.2.2 Detecção do dano

Na Fig. 4.21 são mostradas as médias das assinaturas de impedância antes da realização da compensação da temperatura do PZT#1 para a estrutura saudável e com dano. Nesta, é possível observar que ocorre deslocamentos em frequência e amplitude nas assinaturas de impedância medidas quando comparadas com a assinatura *baseline* (B0).

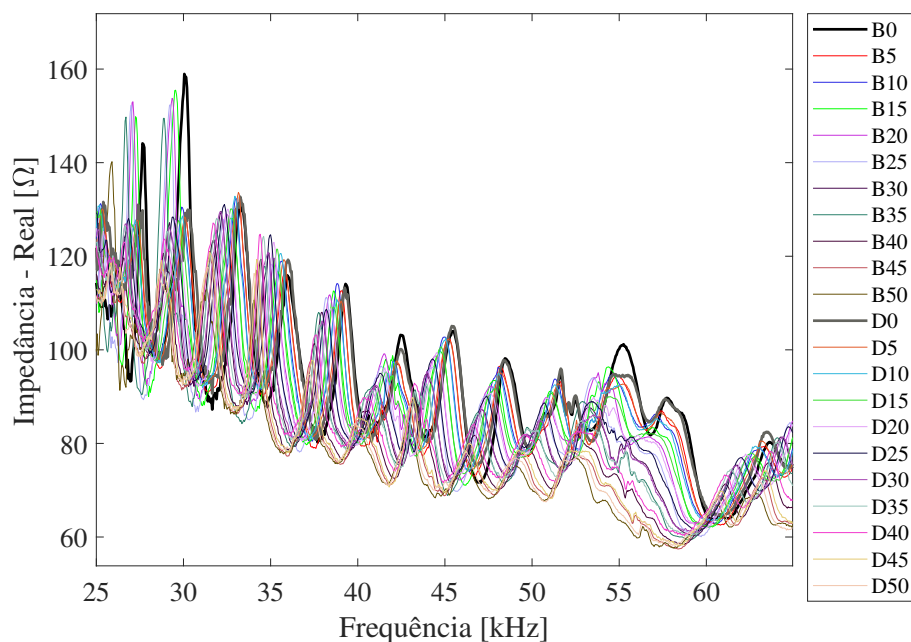


Figura 4.21: Assinaturas de impedância medidas pelo PZT#1 sem compensação e com dano.

Os resultados obtidos após a compensação proposta dos efeitos da temperatura, considerando a faixa de frequência de [32,55 a 42,40] kHz, fator de ponderação da CP de 0,20 para a função objetivo RMSD e 0,80 para a função objetivo referente a faixa de frequência, são mostrados na Fig. 4.22. Observa-se que os deslocamentos foram minimizados com este procedimento de otimização.

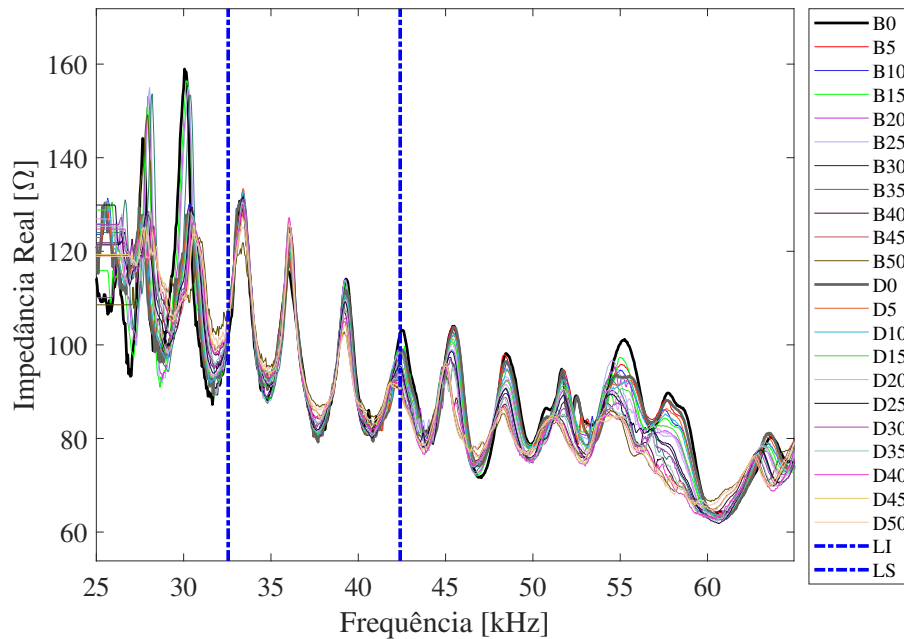


Figura 4.22: Assinaturas de impedância medidas pelo PZT#1 com compensação proposta de [32,55 a 42,40] kHz e dano.

Em seguida, foi calculado o índice de dano (Fig. 4.23) antes e após a realização da compensação proposta. Note que todas as condições estudadas possuem índices de dano maior que o valor associado com a estrutura saudável (*baseline*) e que com a otimização proposta é possível reduzir essas diferenças. E ainda que o valor *threshold* (calculado em relação aos dados obtidos com a otimização proposta) consegue separar o valor de B0 das demais condições estudadas.

Em seguida, esse mesmo procedimento foi aplicado para o PZT#2 e o PZT#3. Na Fig. 4.24 são mostradas as assinaturas de impedância para o PZT#2 antes da otimização e na Fig. 4.26 após otimização proposta, considerando faixa de frequência de [44,30 a 51,75] kHz, fator de ponderação da CP de 0,40 para a função objetivo RMSD e 0,60 para a função objetivo referente a faixa de frequência. Com esse procedimento de otimização, as variações das assinaturas de impedância foram minimizadas, como mostra a Fig. 4.26.

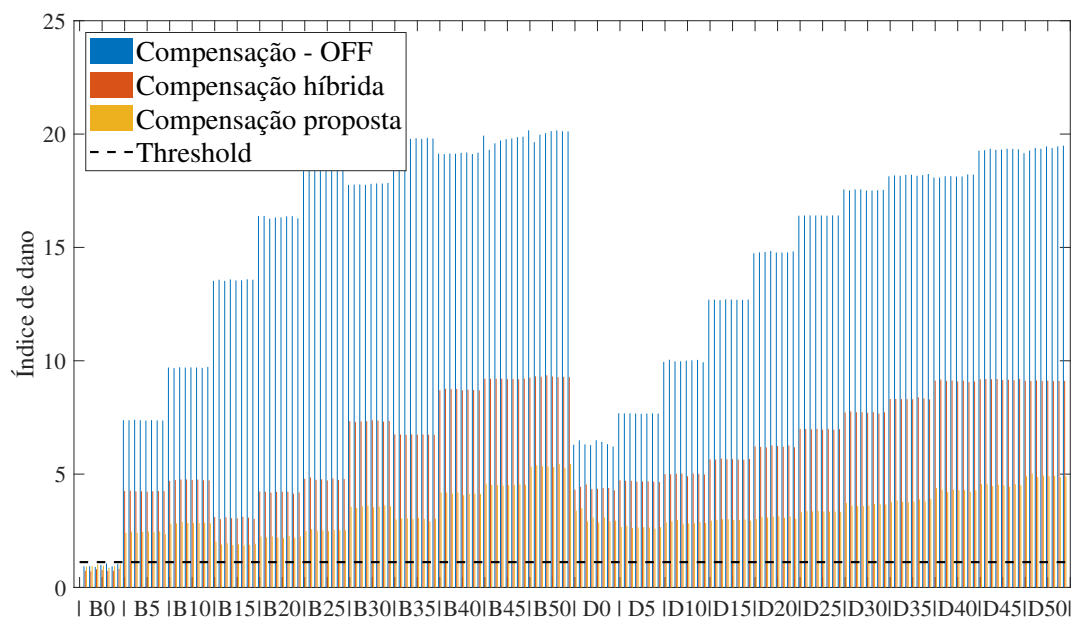


Figura 4.23: Índice de dano do PZT#1 com e sem otimização de [32,55 a 42,40] kHz e com dano.

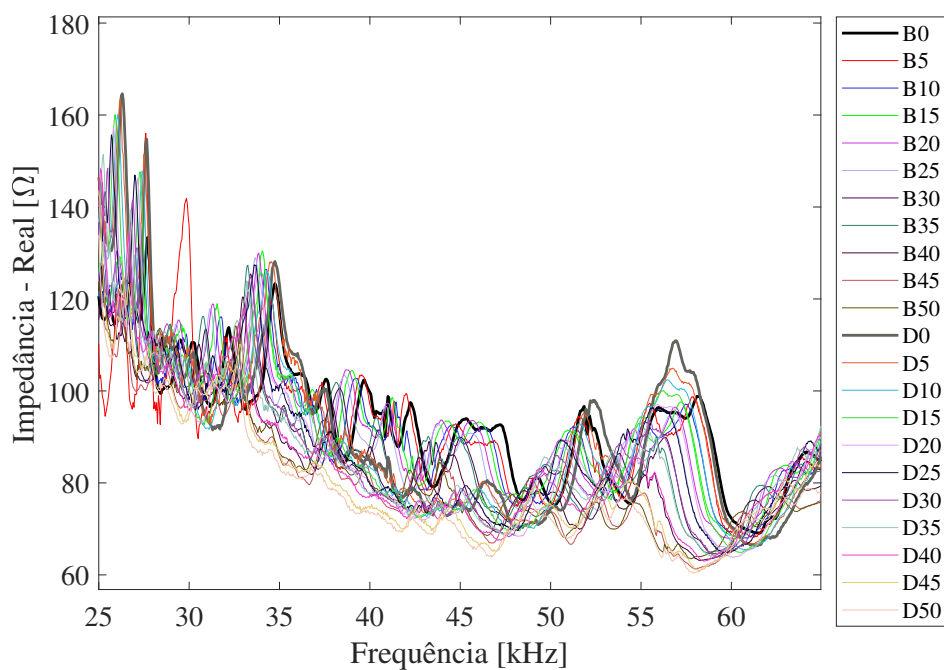


Figura 4.24: Assinaturas de impedância medidas pelo PZT#2 sem compensação proposta e com dano.

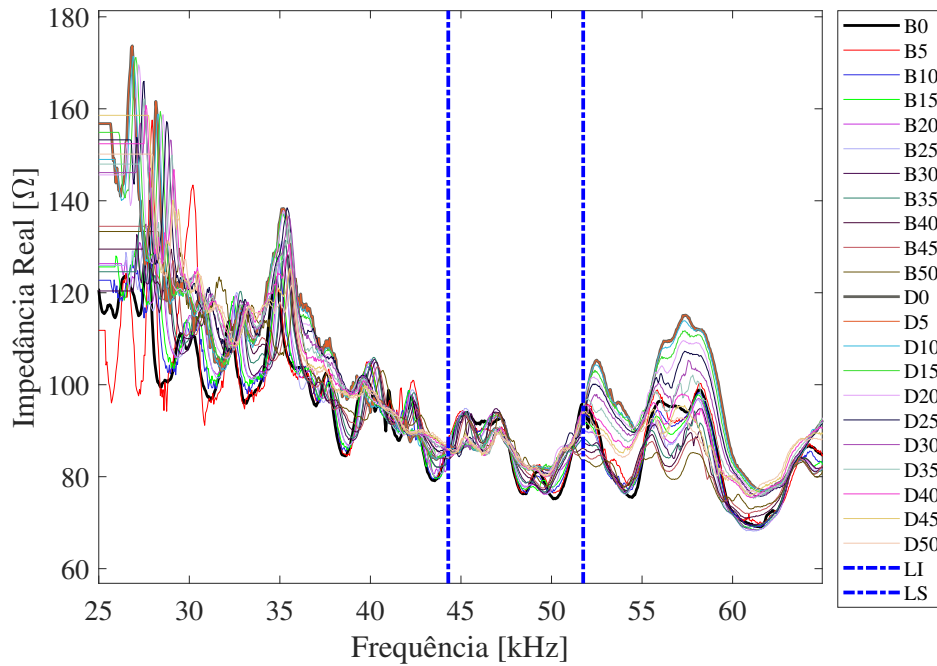


Figura 4.25: Assinaturas de impedância medidas pelo PZT#2 com compensação proposta de [44,30 a 51,75] kHz e dano.

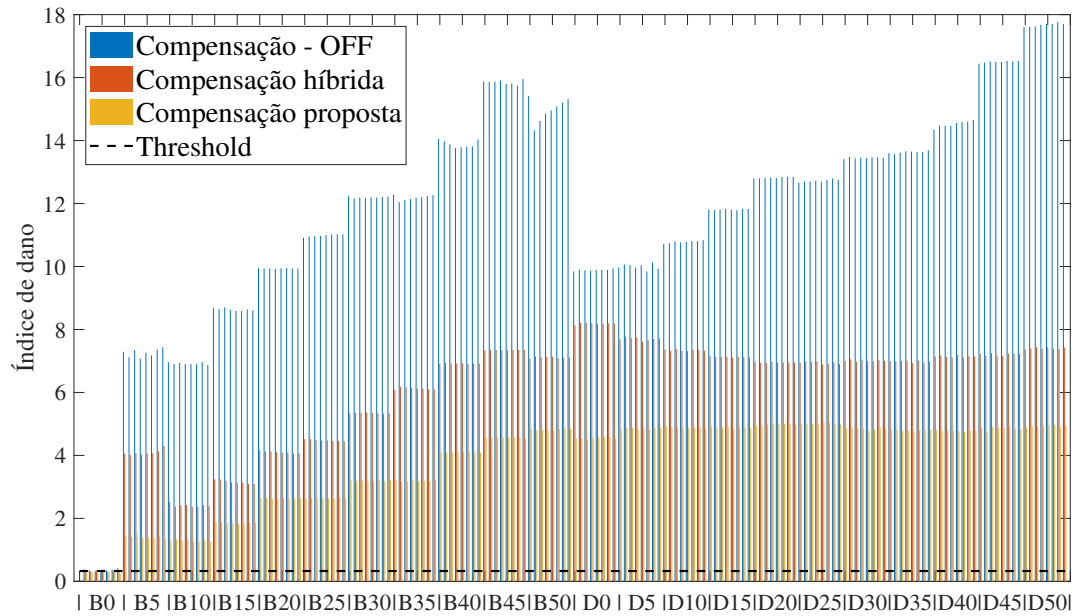


Figura 4.26: Índice de dano do PZT#2 com e sem otimização proposta de [44,30 a 51,75] kHz e com dano.

Como mostrado anteriormente, o PZT#3 apresenta mudança das assinaturas de impedância quando a temperatura aumenta (veja as Figs. 4.27 e 4.28). Por esta razão, não foi obtida grande

diferença entre os resultados determinados pelos métodos de otimização híbrida e a proposta, como ilustrado na Fig. 4.29. Para a realização da otimização proposta foi considerado fator de ponderação da CP de 0,45 para a função objetivo RMSD e 0,55 para a função objetivo referente a faixa de frequência.

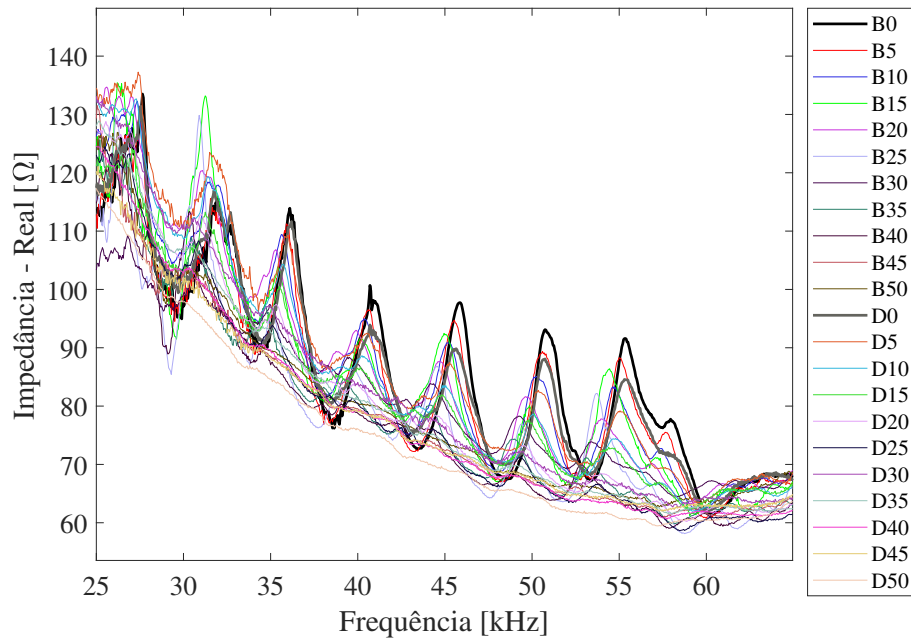


Figura 4.27: Assinaturas de impedância medidas pelo PZT#3 sem compensação e com dano.

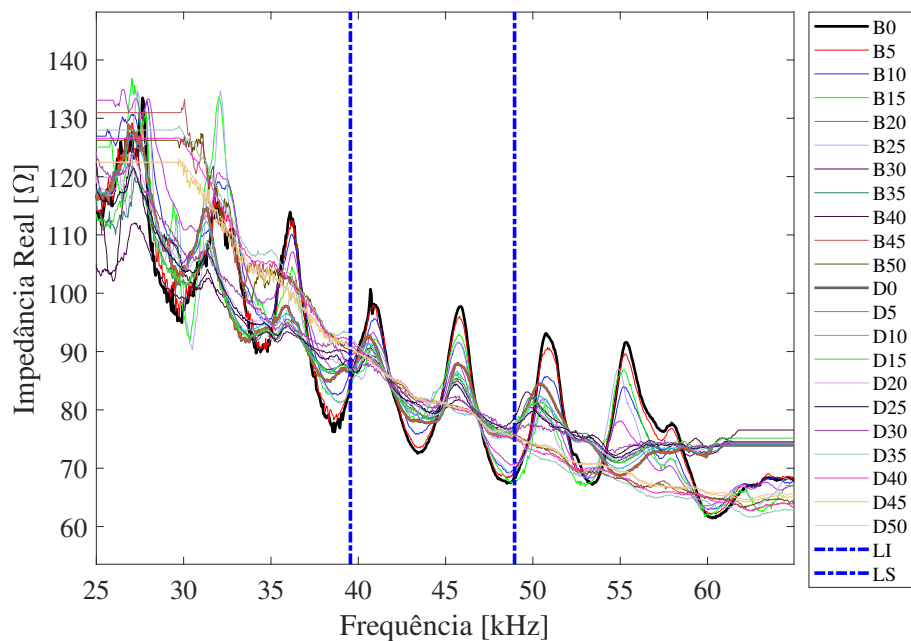


Figura 4.28: Assinaturas de impedância medidas pelo PZT#3 com compensação proposta de [39,55 a 48,95] kHz e dano.

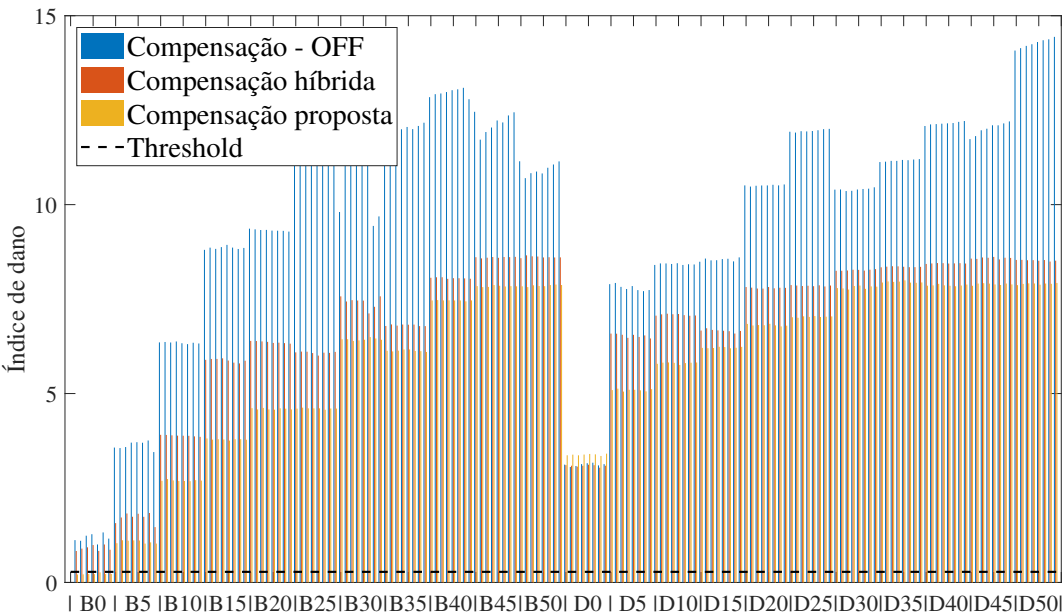


Figura 4.29: Índice de dano do PZT#3 com e sem otimização proposta de [39,55 a 48,95] kHz e com dano.

Na Tab 4.4 são apresentados os melhores fatores de ponderações da otimização de compromisso para a função objetivo referente a faixa de frequência selecionada para otimização de todas as pastilhas PZTs e condições estudadas, para melhor visualização desses dados. Este valor é de grande importância quando utiliza-se a programação por compromisso, já que ele determina o peso de cada uma das funções objetivos em sua formulação. E na Tab 4.5 são apresentadas as faixas de frequências que foram selecionadas, também para melhor visualização.

Tabela 4.4: Fator de ponderação da CP para a função objetivo referente a faixa de frequência.

Transdutor piezelétrico	Baseline	Com dano
PZT#1	0,70	0,80
PZT#2	0,60	0,60
PZT#3	0,55	0,55

Tabela 4.5: Faixa de frequência.

Transdutor piezelétrico	Baseline	Com dano
PZT#1	[34,65 a 45,40] kHz	[32,55 a 42,40] kHz
PZT#2	[33,20 a 48,85] kHz	[44,30 a 51,75] kHz
PZT#3	[39,55 a 47,30] kHz	[39,55 a 48,95] kHz

Capítulo 5

Aplicação de ISHM em rotor com eixo de material compósito

Neste capítulo é detalhado o procedimento experimental e os resultados obtidos da aplicação do método de ISHM em uma máquina rotativa com um eixo de material compósito flexível.

5.1 Procedimento experimental

A Fig. 5.1 mostra a bancada de teste usada para avaliar a técnica ISHM na detecção de danos em uma máquina rotativa. Este rotor é constituído por um eixo de material compósito flexível, vazado, de fibras de carbono de alta resistência pré-impregnadas com resina epóxi e 20 lâminas com a seguinte orientação: $[0^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 90^\circ, 90^\circ, 45^\circ, -45^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 45^\circ, -45^\circ, 90^\circ, 90^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0/90^\circ]$. Este eixo possui 907 mm de comprimento, 18 mm de diâmetro externo e 12,8 mm de diâmetro interno. Neste caso, são utilizados dois discos rígidos, ambos com 202,7 mm de diâmetro e 20 mm de espessura. O eixo é suportado por dois mancais de rolamentos de esferas. O sistema é acionado por um motor elétrico de corrente contínua. Um acoplamento flexível (Rocom Corp® modelo DTOOO175) foi utilizado para minimizar a interação entre o motor elétrico e o eixo.

A Fig. 5.2 mostra um desenho esquemático do rotor com as suas principais dimensões (em mm), bem como a posição dos PZTs e os danos (D#1, D#2, D#3 e D#4) considerados no eixo de material compósito. Dois PZTs foram fixados no eixo, cada um composto por 4 transdutores piezelétricos (10 mm de comprimento, 3 mm de largura e 1 mm de espessura) conectados eletricamente em paralelo, como mostrado no desenho (Fig. 5.2) e denominados como PZT#1

As medidas de impedância foram realizadas antes e após a adição do dano utilizando o analisador de impedância SySHM, desenvolvido por Finzi Neto et al. (2010). Neste caso, foi utilizada a faixa [80 - 110] kHz para todos os PZTs, sendo que esta escolha foi baseada na densidade de picos presente na faixa considerada. Além disso, os sinais de impedância foram obtidos com o rotor em operação sob três velocidades diferentes: 600 RPM, 900 RPM e 1200 RPM. Para cada condição do experimento, foram obtidas 30 assinaturas de impedância, com 3000 pontos e 256 medidas para o cálculo dos valores médios das assinaturas obtidas por cada PZT.

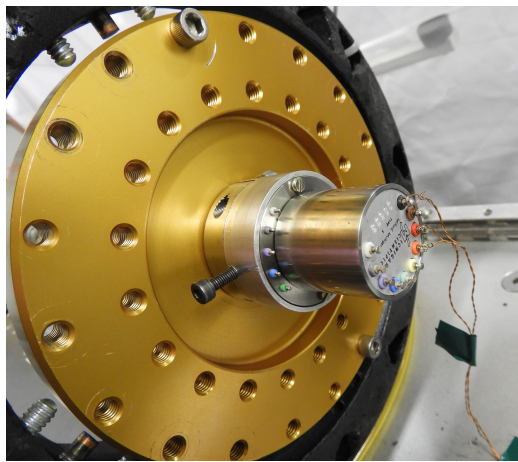


Figura 5.3: *Slip Ring*.

A Tab. 5.1 apresenta a metodologia experimental adotada para a obtenção das assinaturas de impedância do rotor. Esses testes incluíram a análise de danos no rotor em diferentes condições operacionais. Para o primeiro teste, as assinaturas de impedância foram medidas com o rotor desligado.

Em seguida, para simular danos, uma porca de aço (massa de 0,44 g) foi acoplada ao eixo em diferentes posições:

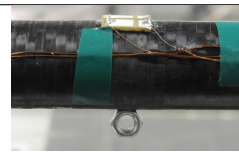
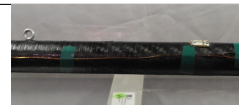

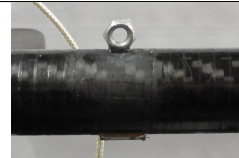
- D#1: Porca acoplada no lado oposto ao PZT#1;
- D#2: Porca acoplada a 100 mm do PZT# 1;
- D#3: Porca acoplada a 50 mm do PZT#1;
- D#4: Porca acoplada no lado oposto ao PZT#2;

A Tab. 5.2 descreve essas posições dos danos considerados (veja a Fig. 5.2), e são ilustradas as figuras para facilitar o entendimento de cada posição considerada.

Tabela 5.1: Organização experimental com nomenclatura adotada.

<i>n</i>	Condição estrutural	Dano	Rotação [RPM]	Indicação
1	Baseline	Sem dano	-	A
2	Baseline	Sem dano	600	B
3	Baseline	Sem dano	900	C
4	Baseline	Sem dano	1200	D
5	Cond. 1	D#1	-	E
6	Cond. 2	D#1	600	F
7	Cond. 3	D#1	900	G
8	Cond. 4	D#1	1200	H
9	Cond. 5	D#2	-	I
10	Cond. 6	D#2	600	J
11	Cond. 7	D#2	900	K
12	Cond. 8	D#2	1200	L
13	Cond. 9	D#3	-	M
14	Cond. 10	D#3	600	N
15	Cond. 11	D#3	900	O
16	Cond. 12	D#3	1200	P
17	Cond. 13	D#4	-	Q
18	Cond. 14	D#4	600	R
19	Cond. 15	D#4	900	S
20	Cond. 16	D#4	1200	T

Tabela 5.2: Posicionamento e massa dos danos.

Nomenclatura	Massa [g]	Posicionamento	Dano
D#1	0,44	Lado oposto do PZT#1	
D#2	0,44	100 mm do PZT#1	
D#3	0,44	50 mm do PZT#1	
D#4	0,44	Lado oposto do PZT#2	

5.2 Compensação do efeito da temperatura e condições operacionais

Os resultados apresentados nesta seção mostram as modificações no sinal de impedância devido às condições ambientais e de operação do rotor (temperatura e velocidade de rotação), o que pode levar interpretações errôneas dos resultados. Dessa forma, para evitar falsos positivos e minimizar esses efeitos, foi realizada a compensação com o procedimento de otimização proposto e pela otimização híbrida. Em seguida, os sinais de impedância foram atualizados e com eles foi possível calcular novamente as métricas de dano. Na realização deste experimento a temperatura na sala era de $27,66\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2,56$ e não foi adicionado dano na estrutura. Antes da realização da otimização, as assinaturas de impedância foram suavizadas com um filtro digital Savitsky-Golay de Resposta Finita ao Impacto de 3ª ordem.

Na metodologia de otimização proposta foi utilizado o algoritmo de Evolução Diferencial considerando 5 execuções e 50 indivíduos. O menor valor encontrado foi utilizado como estimativa inicial para inicializar o método NM, reforçando assim o caráter híbrido. Além disso, quatro variáveis de projeto foram consideradas: deslocamento de frequência (horizontal), de amplitude (vertical), limite inferior e superior em frequência. Na Tab. 5.3 são apresentados os espaços de projeto para cada uma das variáveis citadas, definidos de modo a possibilitar a escolha de uma faixa de frequência com pelo menos 200 pontos entre o limite inferior e superior em frequência. Além disso, é importante destacar que toda a faixa de frequência possui 3000 pontos.

Tabela 5.3: Espaço de projeto.

Variável	Limite inferior	Limite superior
Deslocamento horizontal	-100	100
Deslocamento vertical	-100	100
Limite inferior em frequência	1	3000
Limite superior em frequência	200	3000

5.2.1 Procedimento de otimização proposto e otimização híbrida

Na Fig. 5.4 são ilustradas as médias das assinaturas de impedância do eixo de material compósito montado na máquina rotativa sob diferentes velocidades de rotação, sem dano, obtidas pelo PZT#1. É possível observar que as assinaturas de impedância apresentam pequenos

deslocamentos verticais e horizontais com a variação de rotação.

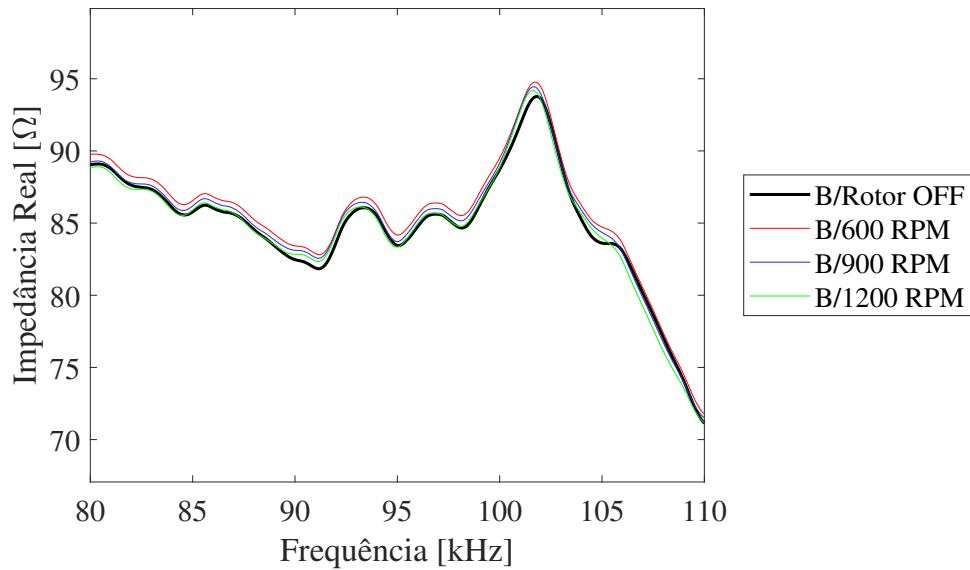


Figura 5.4: Assinaturas de impedância medidas pelo PZT#1 sem compensação.

Para minimizar esses deslocamentos a otimização híbrida foi realizada. Posteriormente, o procedimento de otimização proposto nesta dissertação foi aplicado (Fig. 5.5) e seus resultados foram comparados com os obtidos pela otimização híbrida anteriormente aplicada. Percebe-se que a técnica de compensação proposta foi eficiente para minimizar esses deslocamentos e que a faixa de frequência ótima determinada ao fim do processo de otimização foi de [91,28 a 95,33] kHz. O fator de ponderação da CP foi de 0,60 para a função objetivo RMSD e 0,40 para a função objetivo referente a faixa de frequência, visto que estes foram os valores que apresentaram melhor desempenho.

Em seguida, foi calculado o índice de dano (veja a Fig. 5.6) antes e após aplicação do processo de compensação. Note que os valores de índice de dano aumentam em função da velocidade de rotação, e que mesmo após otimização é possível perceber esse comportamento. Na Fig. 5.7 são apresentados os índices de dano das assinaturas de impedância obtidas pelo PZT#1 após otimização híbrida e na Fig 5.8 são apresentados os índices de dano após a aplicação do procedimento de otimização proposto, percebe-se que os valores de índices de dano possuem um leve aumento com o aumento da rotação.

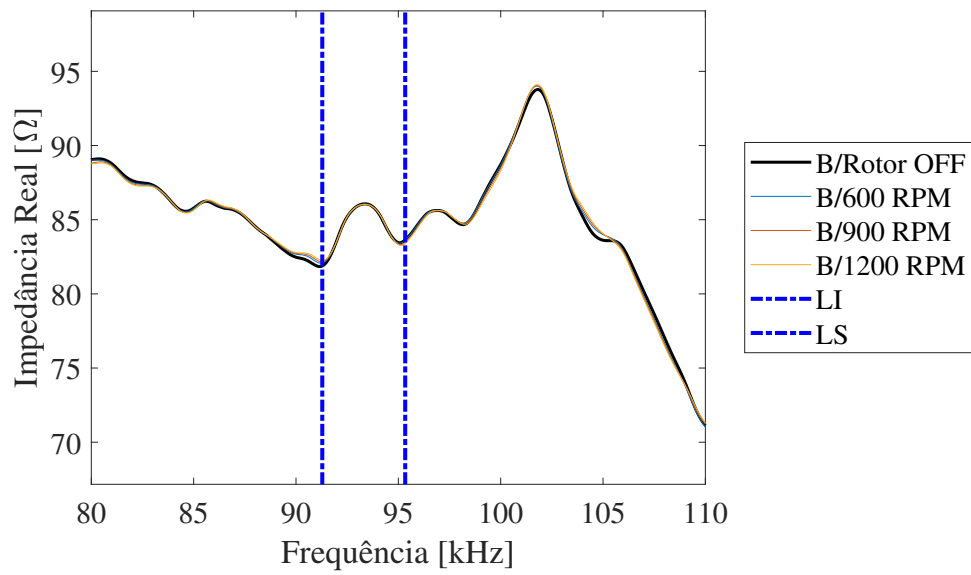


Figura 5.5: Assinaturas de impedância medidas pelo PZT#1 com compensação proposta de [91,28 a 95,33] kHz.

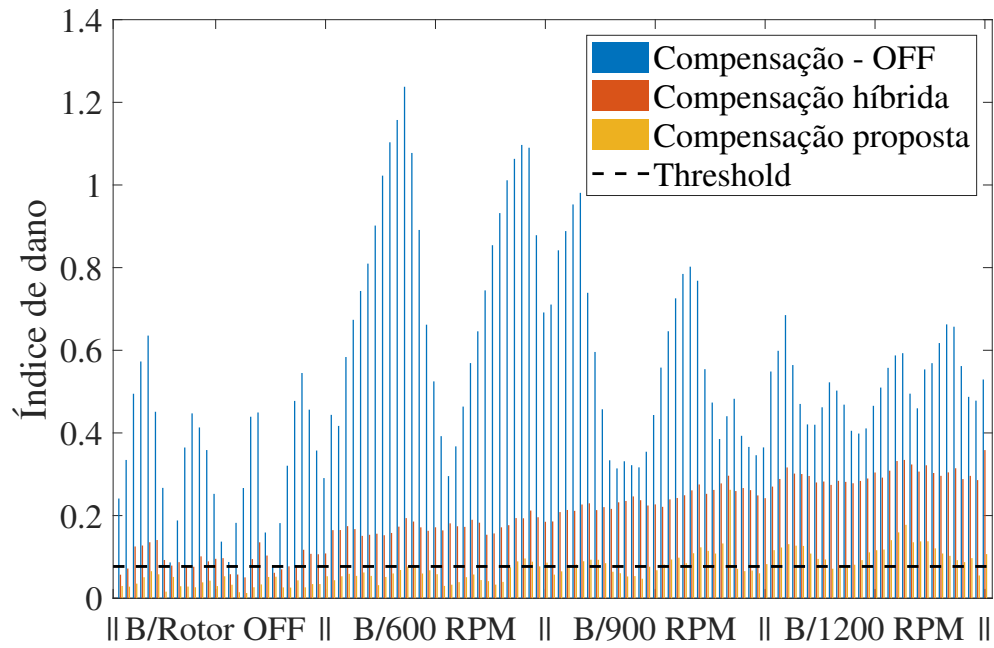


Figura 5.6: Índice de dano do PZT#1 com e sem otimização de [91,28 a 95,33] kHz.

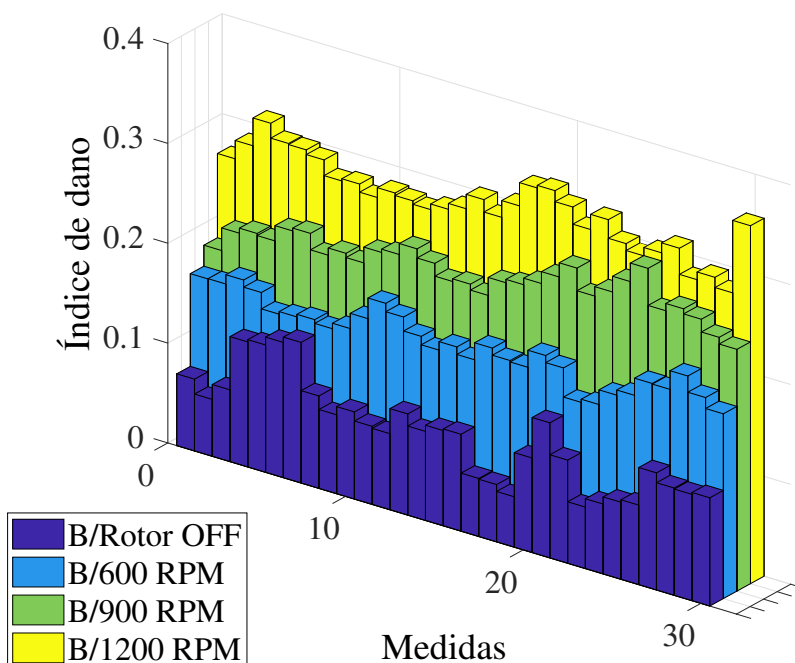


Figura 5.7: Índice de dano do PZT#1 com compensação híbrida.

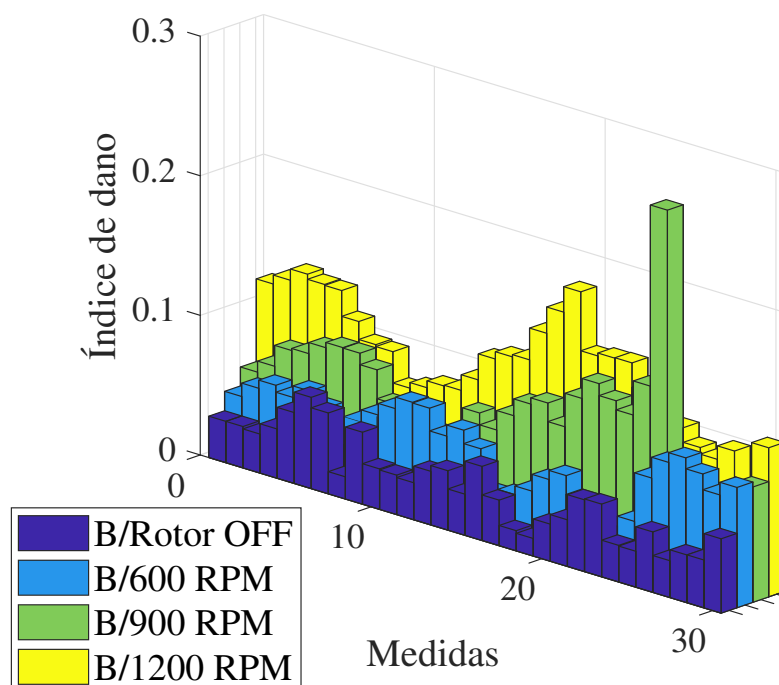


Figura 5.8: Índice de dano do PZT#1 com compensação proposta.

Esse mesmo procedimento foi realizado para o PZT#2. Na Fig. 5.9 são ilustradas as assinaturas de impedância sob diferentes velocidades de rotação, sem dano, antes da compensação.

Na Fig. 5.10 são apresentadas as assinaturas de impedância após realização da compensação proposta. Percebe-se que a técnica proposta foi eficiente para minimizar esses deslocamentos e que a faixa de frequência ótima determinada ao fim do processo de otimização foi de [82,24 a 88,73] kHz. Neste caso, o fator de ponderação da CP foi de 0,20 para a função objetivo RMSD e 0,80 para a função objetivo referente a faixa de frequência.

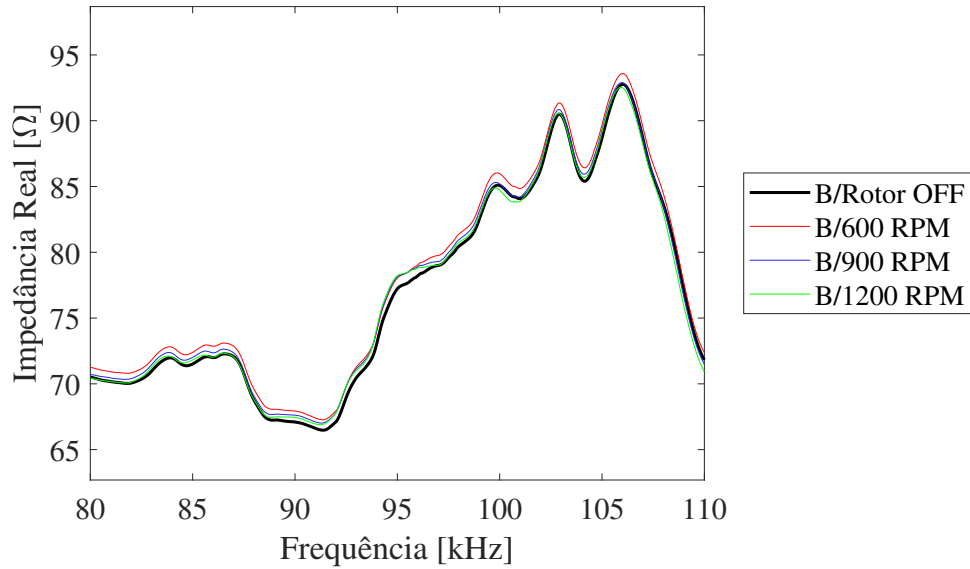


Figura 5.9: Assinaturas de impedância medidas pelo PZT#2 sem compensação.

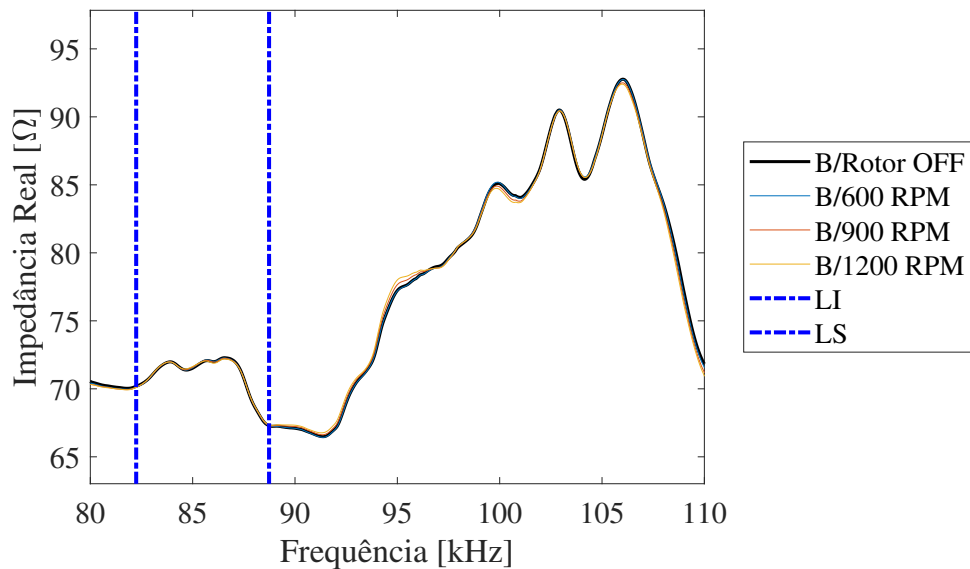


Figura 5.10: Assinaturas de impedância medidas pelo PZT#2 com compensação proposta de [82,24 a 88,73] kHz.

Em seguida, foi calculado o índice de dano (veja as Figs. 5.11, 5.12 e 5.13) antes e após

aplicação do processo de compensação. Percebe-se o mesmo comportamento observado no PZT#1, no qual a medida que a velocidade da máquina rotativa aumenta, o valor da métrica de dano também aumenta, mas este aumento é pequeno.

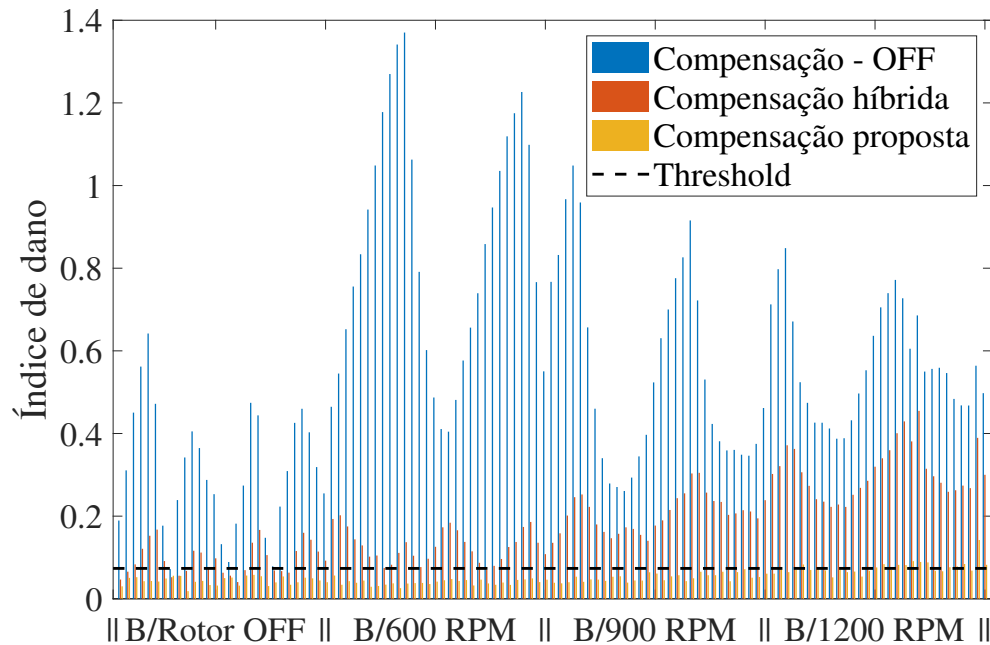


Figura 5.11: Índice de dano do PZT#2 com e sem otimização de [82,24 a 88,73] kHz.

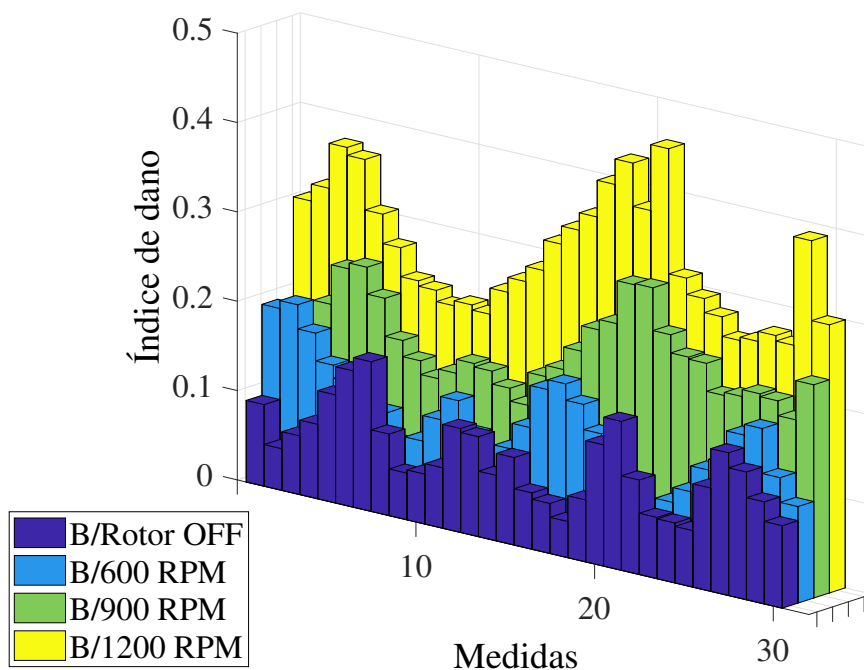


Figura 5.12: Índice de dano do PZT#2 com compensação híbrida.

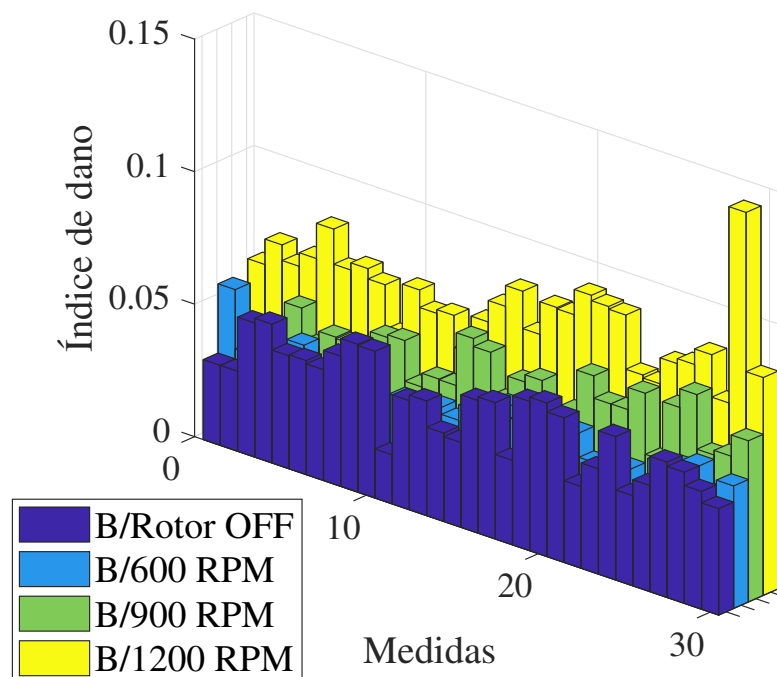


Figura 5.13: Índice de dano do PZT#2 com compensação proposta.

5.3 Detecção de danos

Os resultados apresentados demonstram o comportamento das assinaturas de impedância medidas pelo PZT#1 em diferentes condições: estrutura saudável, sem rotação, submetida a danos (D#1, D#2, D#3 e D#4) e a variação de rotação (600 RPM, 900 RPM e 1200 RPM). Essas condições causam modificações nas assinaturas de impedância da estrutura monitorada. Por esta razão, foi realizado o procedimento de otimização proposto nesta dissertação para todos os casos analisados. O comportamento obtido para o PZT#2 foi o mesmo do PZT#1, por esta razão só são apresentados os resultados referentes ao PZT#1.

5.3.1 Rotor sem rotação

Na Fig. 5.14 são mostradas as médias das assinaturas de impedância medidas pelo PZT#1 antes da realização da compensação e na Fig. 5.15 após compensação, com a máquina rotativa desligada, em sua condição saudável e com danos (D#1, D#2, D#3 e D#4). É possível observar que a maior modificação é na assinatura do D#1, por ser o dano localizado mais próximo ao PZT#1.

Na Fig. 5.16 é mostrado o índice de dano antes e após a compensação híbrida e a proposta. Analisando os valores obtidos com a otimização proposta é possível perceber que todos os valores encontrados são bem próximos ao valor obtido com a assinatura de impedância *baseline*, o que não representa o comportamento real da estrutura. Isto ocorreu porque a faixa de frequência ótima selecionada pela metodologia de otimização proposta foi muito pequena.

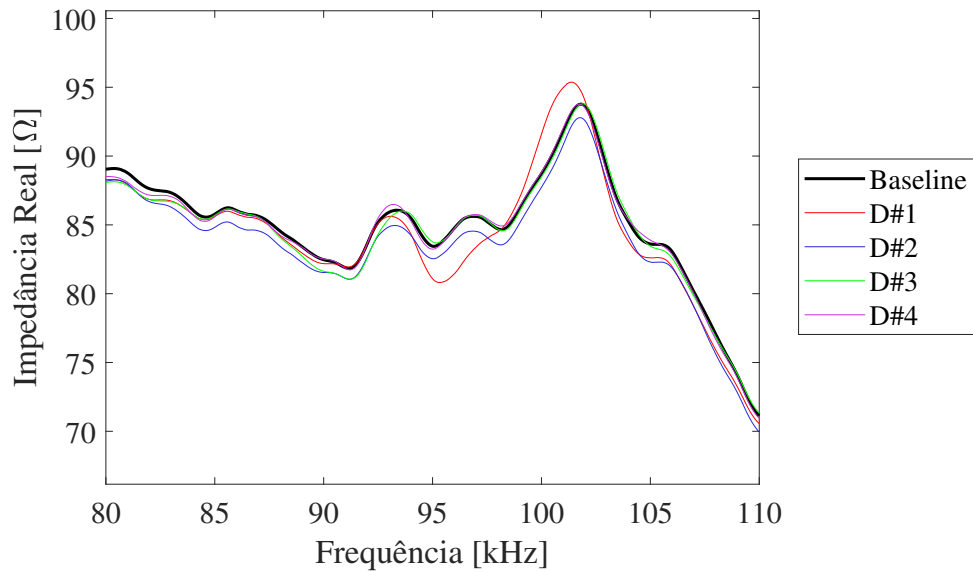


Figura 5.14: Assinaturas de impedância medidas pelo PZT#1 sem compensação.

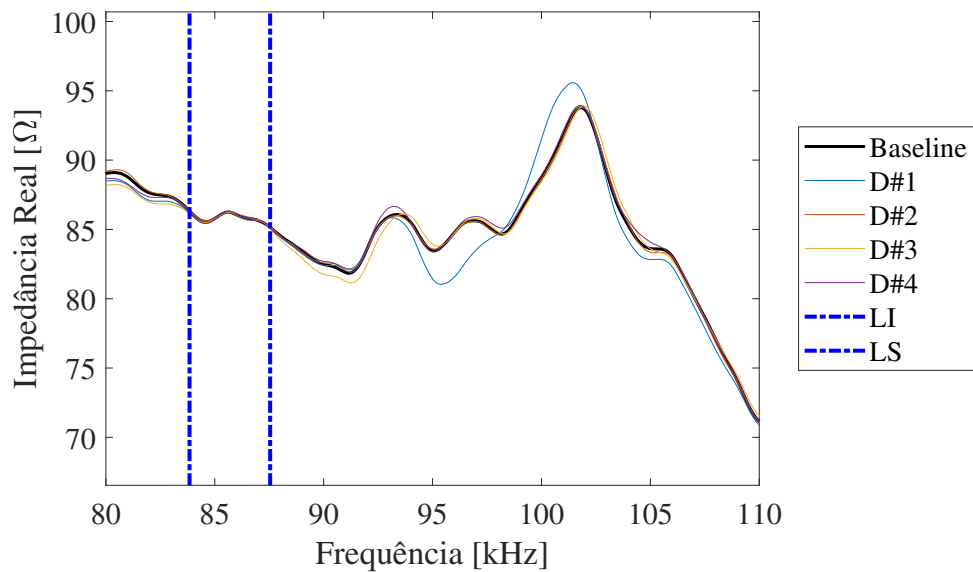


Figura 5.15: Assinaturas de impedância medidas pelo PZT#1 com compensação proposta de [83,84 a 87,54] kHz.

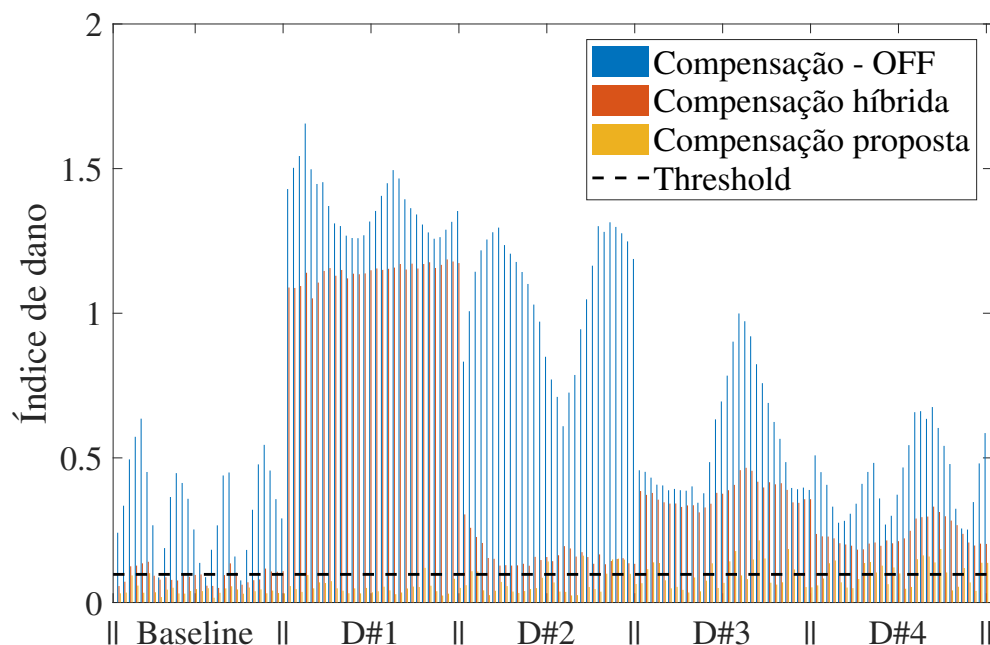


Figura 5.16: Índice de dano do PZT#1 com e sem otimização de [83,84 a 87,54] kHz.

Para resolver este problema, foi aumentado o intervalo entre os limites inferior e superior em frequência, para que uma maior faixa de frequência fosse selecionada. Dessa forma, o espaço de projeto das variáveis foi modificado, na Tab. 5.4 são mostrados os novos valores considerados, os mesmos parâmetros foram aplicados para as demais condições investigadas. A partir do novo espaço de projeto aplicado, a faixa de frequência ótima selecionada deverá possuir no mínimo 400 pontos.

Tabela 5.4: Espaço de projeto.

Variável	Limite inferior	Limite superior
Deslocamento horizontal	-100	100
Deslocamento vertical	-100	100
Limite inferior em frequência	1	3000
Limite superior em frequência	400	3000

Em seguida, a compensação proposta foi empregada novamente e na Fig. 5.17 são mostradas as assinaturas de impedância obtidas pelo PZT#1 com a nova faixa de frequência ótima selecionada de [81,34 a 90,52] kHz, fator de ponderação da CP de 0,10 para a função objetivo RMSD e 0,90 para a função objetivo referente a faixa de frequência.

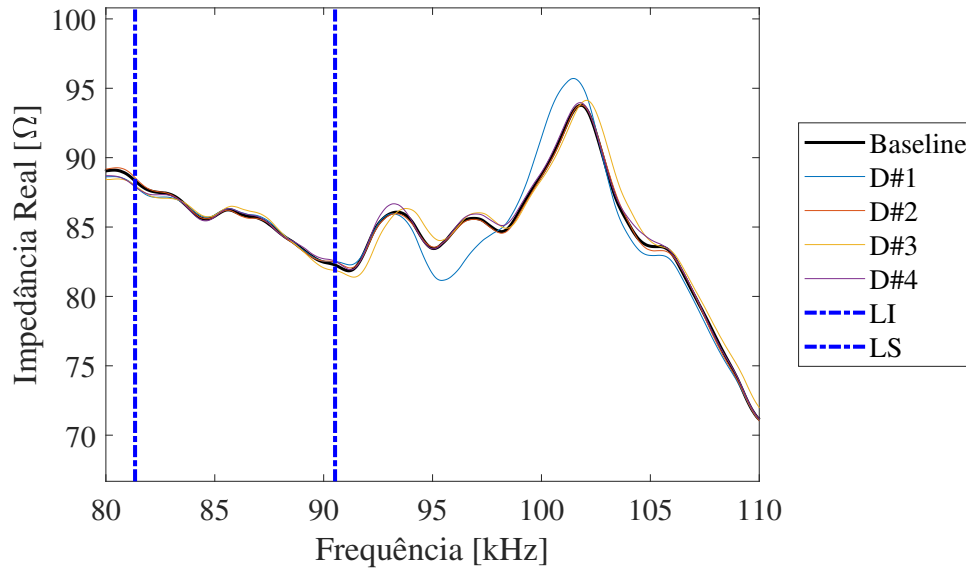


Figura 5.17: Assinaturas de impedância medidas pelo PZT#1 com compensação proposta de [81,34 a 90,52] kHz.

Por fim, foi calculado o índice de dano antes e após compensação do PZT#1, como mostrado na Fig. 5.18. Percebe-se que o maior valor de índice de dano é referente as assinaturas de impedância de D#1 e D#3 devido esses danos possuírem maior proximidade ao PZT#1 e que o *threshold* consegue separar a condição *baseline* das demais.

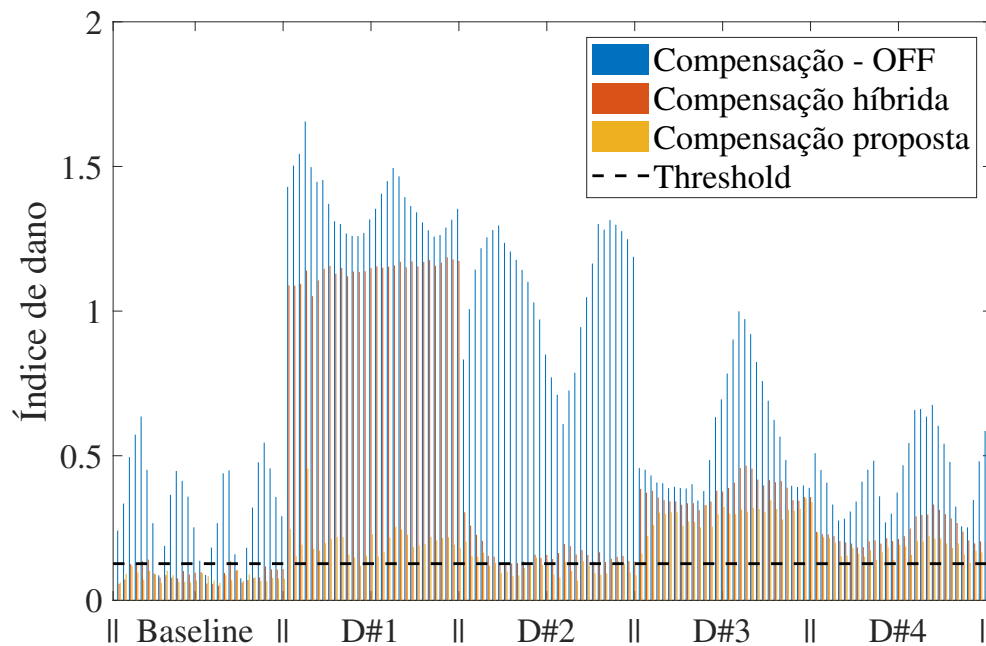


Figura 5.18: Índice de dano do PZT#1 com e sem otimização de [81,34 a 90,52] kHz.

5.3.2 Rotor com rotação de 600 RPM

Na Fig. 5.19 são mostradas as médias das assinaturas de impedância medidas pelo PZT#1 antes da realização da compensação e na Fig. 5.20 após compensação, na faixa de [84,37 a 94,84] kHz, fator de ponderação da CP de 0,50 para a função objetivo RMSD e 0,50 para a função objetivo referente a faixa de frequência. Para a estrutura em sua condição saudável, danificada (D#1, D#2, D#3 e D#4) e ligada a uma velocidade de 600 RPM.

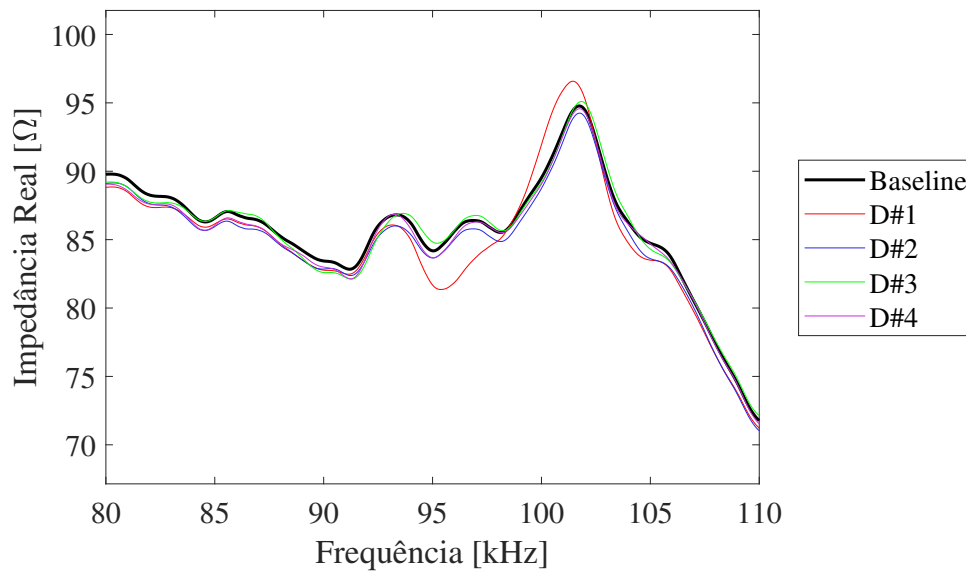


Figura 5.19: Assinaturas de impedância medidas pelo PZT#1 sem compensação e com rotação de 600 RPM.

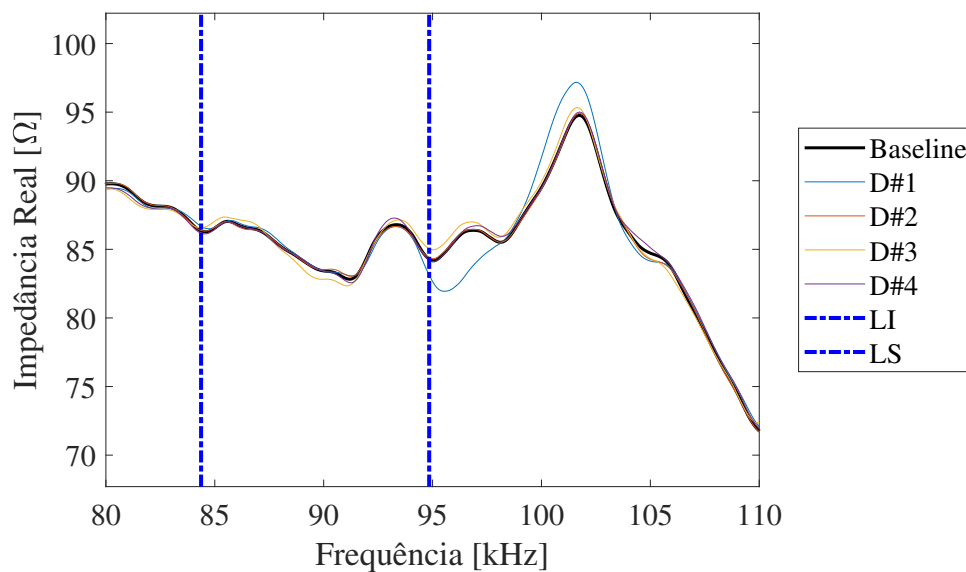


Figura 5.20: Assinaturas de impedância medidas pelo PZT#1 com compensação proposta de [84,37 a 94,84] kHz e rotação de 600 RPM.

Na Fig. 5.21 são mostrados os índices de danos antes e após a compensação híbrida e a proposta. Analisando os valores obtidos com a otimização proposta é possível perceber que os maiores valores de índices de dano correspondem aos danos D#1 e D#3, devido possuírem maior proximidade ao PZT#1 e que o *threshold* consegue separar a condição *baseline* das demais.

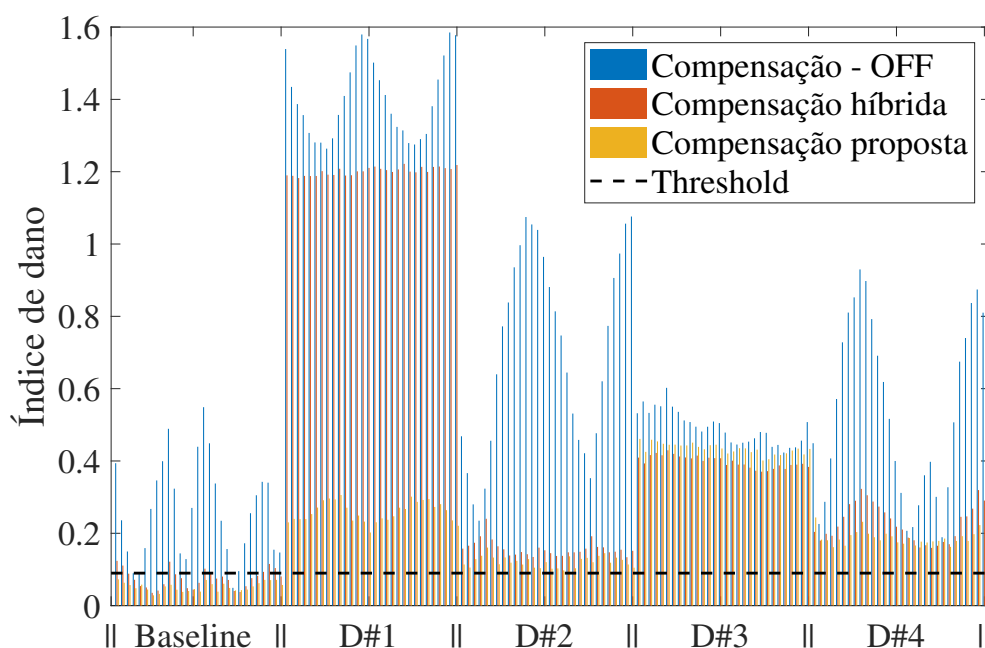


Figura 5.21: Índice de dano do PZT#1 com e sem otimização de [84,37 a 94,84] kHz e rotação de 600 RPM.

5.3.3 Rotor com rotação de 900 RPM

Na Fig. 5.22 são mostradas as médias das assinaturas de impedância medidas pelo PZT#1 antes da compensação e na Fig. 5.23 após compensação, na faixa de frequência de [81,48 a 91,05] kHz, fator de ponderação da CP de 0,20 para a função objetivo RMSD e 0,80 para a função objetivo referente a faixa de frequência. Para a estrutura em sua condição saudável, danificada (D#1, D#2, D#3 e D#4) e ligada a uma velocidade de 900 RPM. Nesta também é possível observar que a maior modificação é na assinatura do D#1, por ser o dano localizado mais próximo ao PZT#1.

Na Fig. 5.24 são mostrados os índices de danos antes e após a compensação híbrida e a proposta. Percebe-se que os maiores valores de índices de dano correspondem aos danos D#1 e D#3, devido possuírem maior proximidade ao PZT#1 e que o *threshold* consegue separar a condição *baseline* das demais.

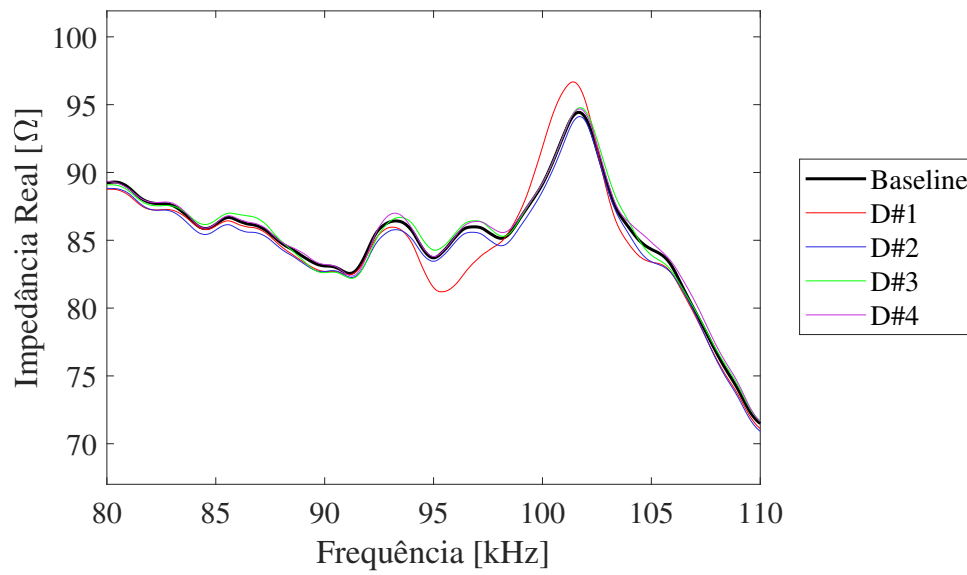


Figura 5.22: Assinaturas de impedância medidas pelo PZT#1 sem compensação e com rotação de 900 RPM.

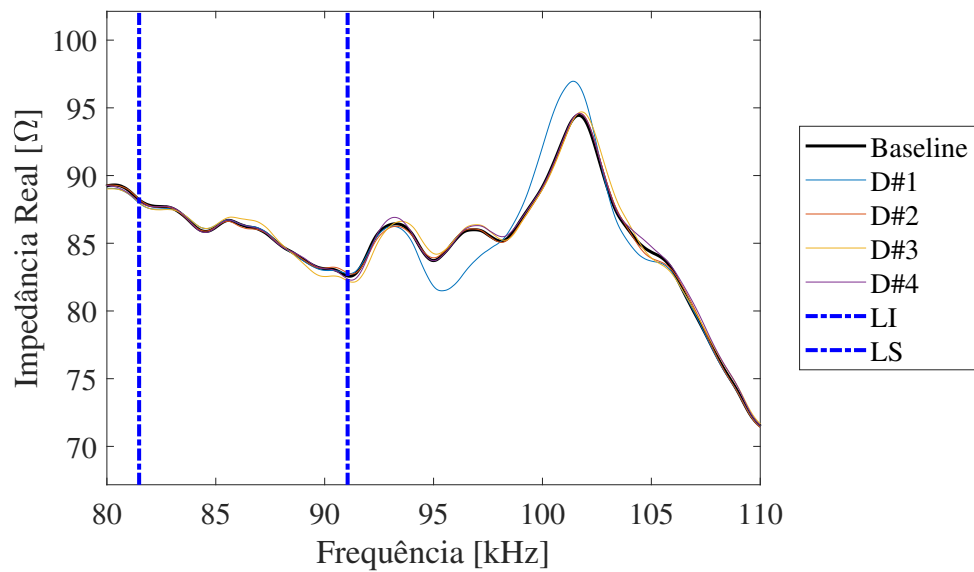


Figura 5.23: Assinaturas de impedância medidas pelo PZT#1 com compensação proposta de [81,48 a 91,05] kHz e rotação de 900 RPM.

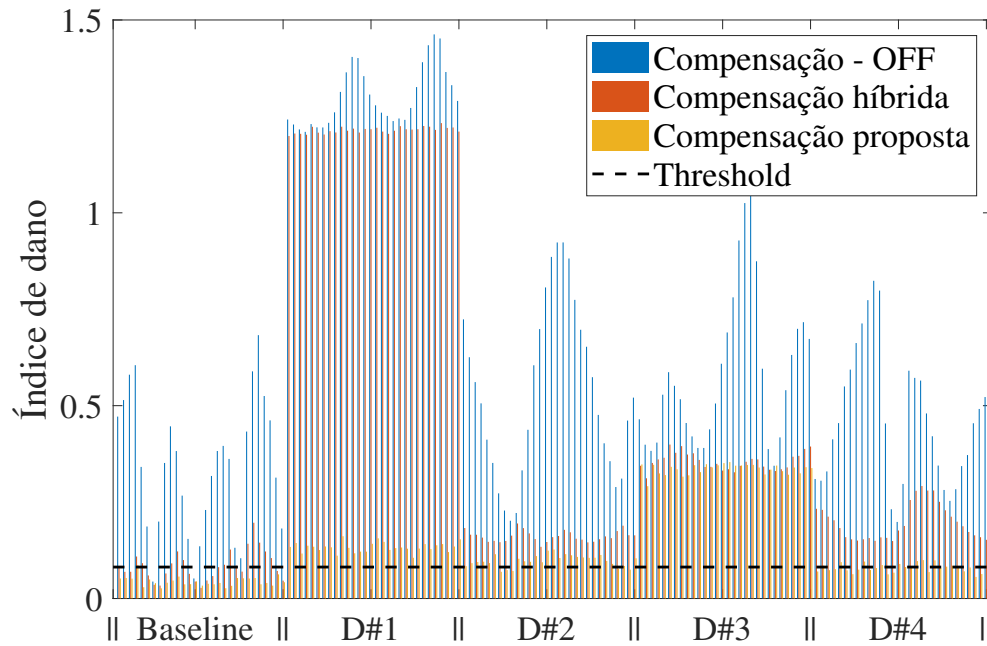


Figura 5.24: Índice de dano do PZT#1 com e sem otimização de [81,48 a 91,05] e rotação de 900 RPM.

5.3.4 Rotor com rotação de 1200 RPM

Na Fig. 5.25 são mostradas as médias das assinaturas de impedância medidas pelo PZT#1 antes da compensação e na Fig. 5.26 após compensação, na faixa de frequência de [81,12 a 93,02] kHz, fator de ponderação da CP de 0,10 para a função objetivo RMSD e 0,90 para a função objetivo referente a faixa de frequência. Para a estrutura em sua condição saudável, danificada (D#1, D#2, D#3 e D#4) e ligada a uma velocidade de 1200 RPM. Nesta também é possível observar que a maior modificação é na assinatura do D#1, por ser o dano localizado mais próximo ao PZT#1.

Na Fig. 5.27 são mostrados os índices de danos antes e após a compensação híbrida e a proposta. Percebe-se que os maiores valores de índices de dano correspondem aos danos D#1 e D#3, devido possuírem maior proximidade ao PZT#1 e que o *threshold* consegue separar a condição *baseline* das demais.

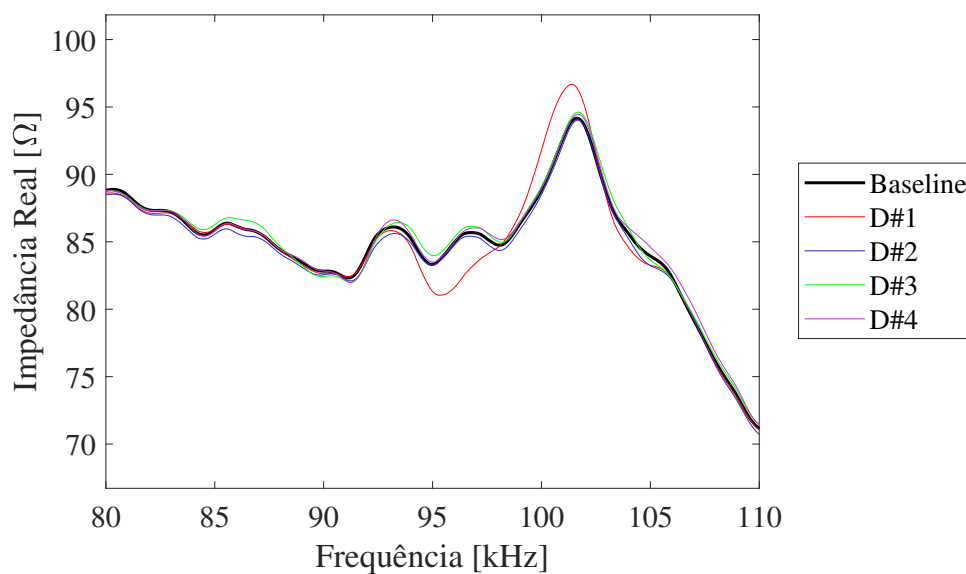


Figura 5.25: Assinaturas de impedância medidas pelo PZT#1 sem compensação e com rotação de 1200 RPM.

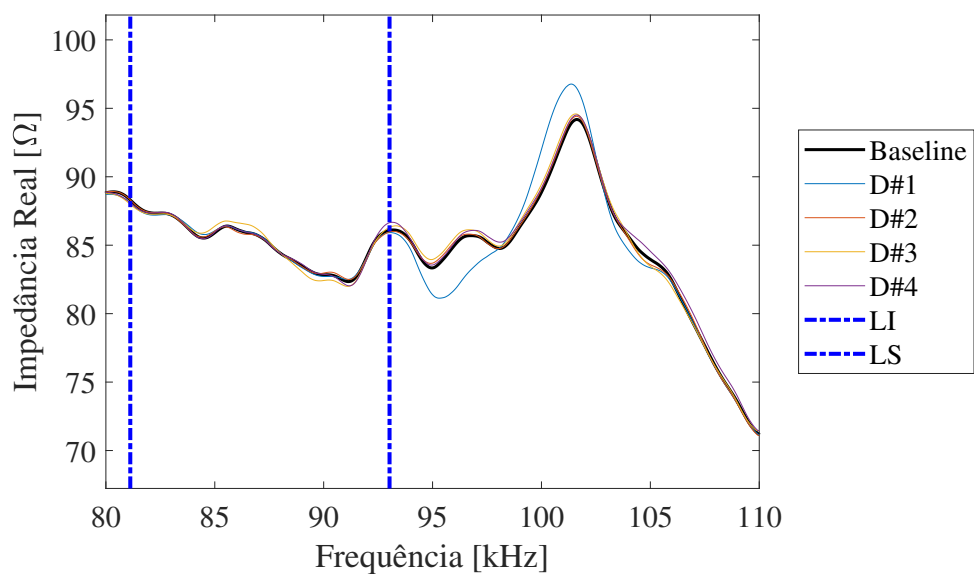


Figura 5.26: Assinaturas de impedância medidas pelo PZT#1 com compensação proposta de [81,12 a 93,02] kHz e rotação de 1200 RPM.

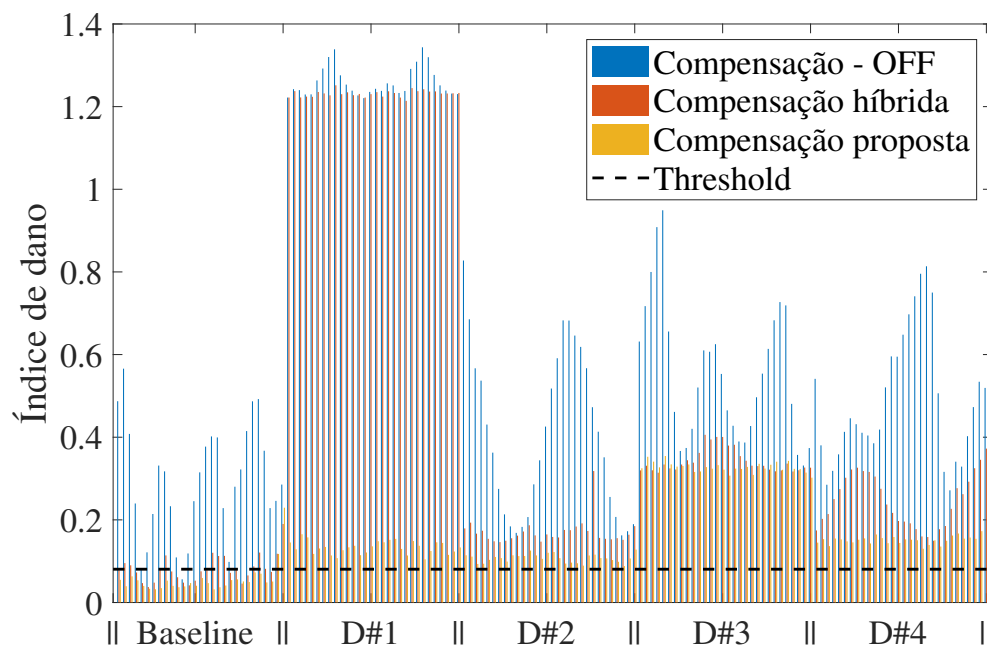


Figura 5.27: Índice de dano do PZT#1 com e sem otimização de [81,12 a 93,02] kHz e rotação de 1200 RPM.

5.3.5 Comparação das diversas condições analisadas

A nomenclatura utilizada nesta seção pode ser consultada na Tab. 5.1. Na Fig. 5.28 são mostradas as médias das assinaturas de impedância medidas pelo PZT#1 para a estrutura saudável e após a adição de danos, em todas as rotações consideradas, sem compensação e na Fig. 5.29 as assinaturas de impedância após compensação, na faixa de frequência de [85,23 a 94,03] kHz, fator de ponderação da CP de 0,60 para a função objetivo RMSD e 0,40 para a função objetivo referente a faixa de frequência. Analisando toda a faixa de frequência utilizada percebe-se que as modificações mais significativas são nas assinaturas de impedância representadas pelas letras "E", "F", "G" e "H", que correspondem ao D#1 (dano mais próximo ao PZT#1).

Na Fig. 5.30 pode-se visualizar melhor que as assinaturas de impedância representadas pelas letras "E", "F", "G" e "H" sofreram maiores modificações, já que seus valores de índices de dano são os maiores utilizando a compensação híbrida. Com a otimização proposta os maiores valores de índices de dano foram das assinaturas representadas pelas letras "M", "N", "O" e "P", que correspondem ao D#3, também localizado próximo ao PZT#1. A partir desses resultados pode-se concluir que a técnica é capaz de detectar a presença do dano, mesmo quando a máquina rotativa está desligada e ligada em velocidades de 600 RPM, 900 RPM e 1200 RPM e que o

threshold é capaz de separar a condição *baseline* das demais.

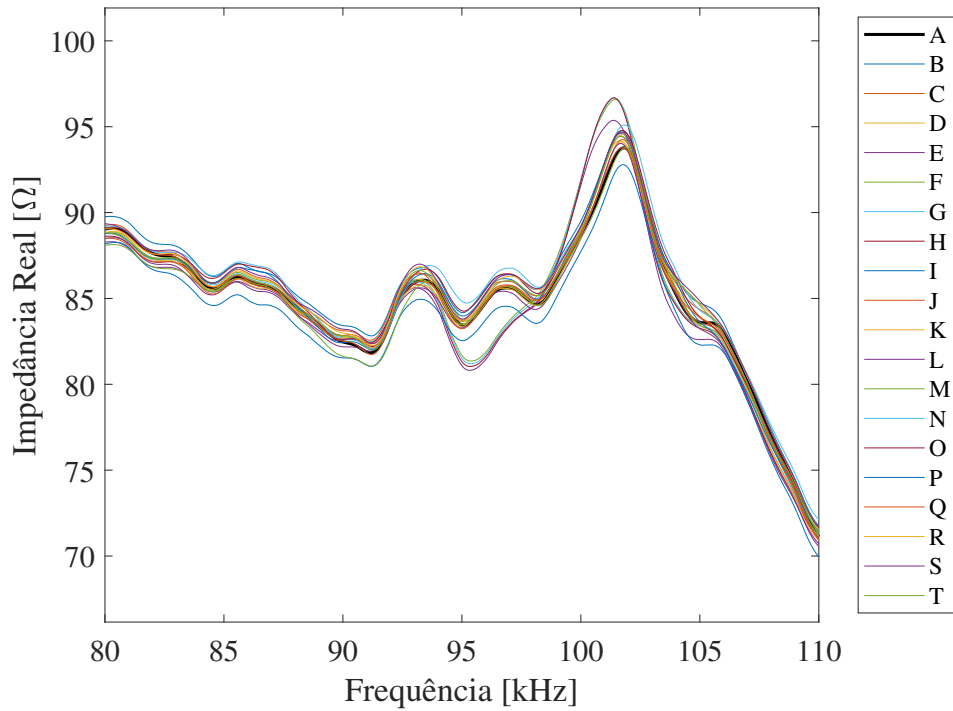


Figura 5.28: Assinaturas de impedância medidas pelo PZT#1 sem compensação em todas as condições analisadas.

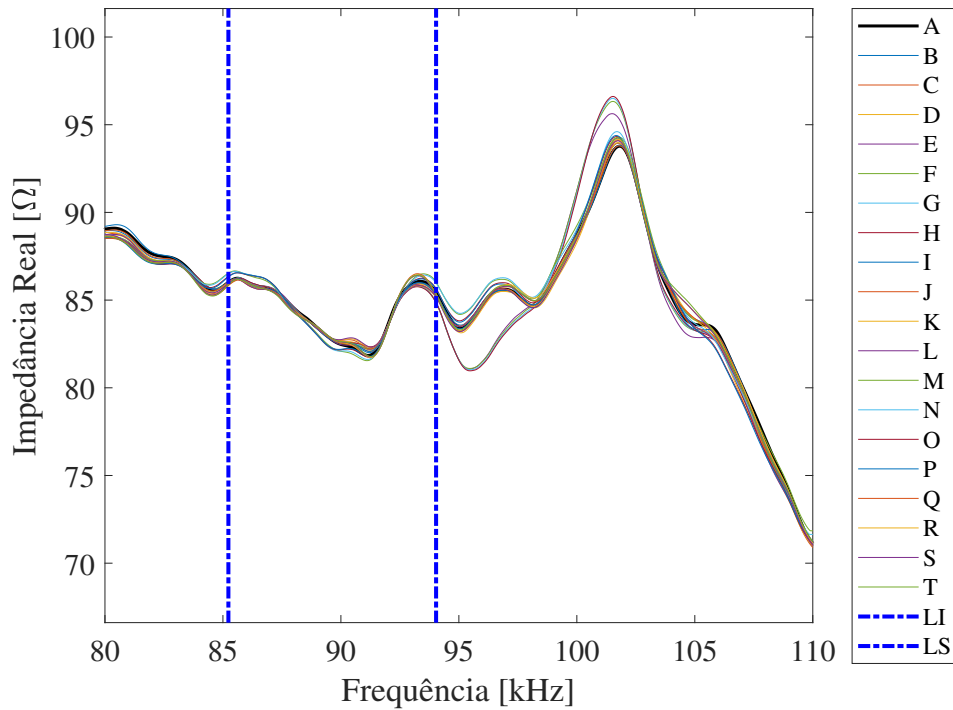


Figura 5.29: Assinaturas de impedância medidas pelo PZT#1 com compensação proposta de [85,23 a 94,03] kHz em todas as condições analisadas.

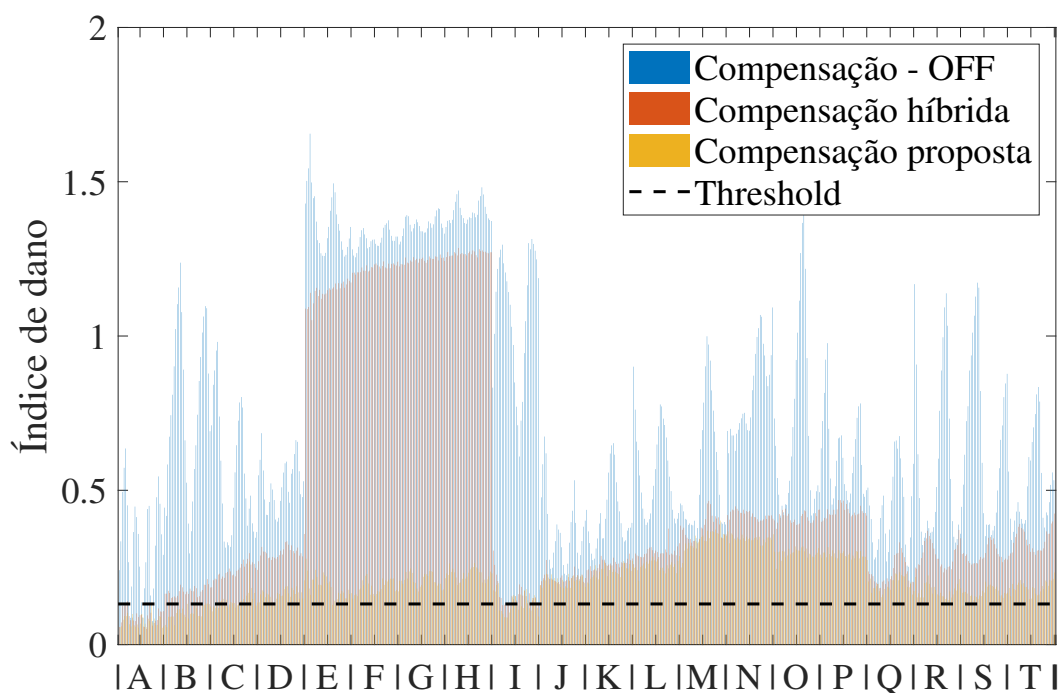


Figura 5.30: Índice de dano do PZT#1 com e sem otimização de todas as condições analisadas.

Na Tab 5.5 são apresentados os fatores de ponderações da otimização por compromisso para a função objetivo referente a faixa de frequência selecionada para otimização de todas as condições estudadas, bem como a faixa de frequência ótima selecionada com o procedimento de compensação proposto, para melhor visualização desses dados.

Tabela 5.5: Fator de ponderação da CP e faixas de frequência.

Rotação	Fator de ponderação	Faixa de frequência
Parado	0,90	[81,34 a 90,52] kHz
600 RPM	0,50	[84,37 a 94,84] kHz
900 RPM	0,80	[81,48 a 91,05] kHz
1200 RPM	0,90	[81,12 a 93,02] kHz
Todas analisadas	0,40	[85,23 a 94,03] kHz

Capítulo 6

Considerações finais

O presente trabalho investigou o uso da técnica de ISHM em eixo de material compósito submetido a variações de temperatura e dano, e uma máquina rotativa em que o material do eixo é compósito, sendo que este foi submetido a variações de rotações e diferentes danos.

Os resultados obtidos mostraram que as assinaturas de impedância são influenciadas pelas variáveis consideradas (temperatura e rotação). Por esta razão foi utilizada a técnica de otimização híbrida e outra técnica de otimização foi proposta para minimizar essas influências.

Inicialmente às duas técnicas de otimização foram utilizadas em um eixo de material compósito submetido a grande variação de temperatura (0 °C a 50 °C, e incrementos de 5 °C) e presença de dano na estrutura, com o auxílio de uma câmara climática para o correto controle da temperatura. A técnica de otimização híbrida foi capaz de minimizar os efeitos causados pela variação de temperatura e presença de dano. Com a técnica de otimização proposta, foi possível minimizar ainda mais essas variações para uma faixa de frequência de interesse, comprovando assim sua eficiência. Além disso, a técnica de ISHM foi eficiente para detectar danos no eixo estudado.

Posteriormente, as técnicas de otimização foram aplicadas a um rotor com eixo de material compósito submetido a variação de temperatura ambiente, diferentes rotações e danos. Os resultados obtidos mostraram que o procedimento de otimização híbrida minimiza os efeitos de temperatura ambiente e condições operacionais nas assinaturas de impedância medidas. E ainda que com a otimização proposta é possível minimizar ainda mais. No entanto, cabe ao engenheiro analisar a faixa escolhida na otimização, para garantir que ela realmente represente as condições nas quais a estrutura esta submetida, para que se obtenha o correto diagnóstico. A técnica de ISHM foi eficiente para detectar danos na máquina rotativa com o eixo de material

compósito estudado mesmo quando está em operação com rotações de 600 RPM, 900 RPM e 1200 RPM.

6.1 Perspectivas de trabalhos futuros

Baseado no trabalho desenvolvido nesta dissertação de mestrado, pode-se mencionar as seguintes propostas para realização de trabalhos futuros:

- Aplicar a metodologia desenvolvida em outras estruturas, como placas e eixos metálicos sob diferentes danos, temperaturas e considerando diferentes faixas de frequência;
- Analisar se a técnica é capaz de minimizar grandes variações de temperatura e rotação ao mesmo tempo. Para isto o rotor deve ser inserido dentro da câmara climática para controle de temperatura;
- Desenvolver a modelagem teórica com validação experimental da técnica de ISHM, para tornar a técnica mais confiável e precisa na identificação de danos na estrutura e variação de temperatura.

Referências

ANNAMDAS, V. G.; PANG, J. H.; ZHOU, K.; SONG, B. Efficiency of electromechanical impedance for load and damage assessment along the thickness of lead zirconate titanate transducers in structural monitoring. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 24, n. 16, p. 2008–2022, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/1045389X13488252>>.

ANNAMDAS, V. G. M.; SOH, C. K. Three-dimensional electromechanical impedance model. i: Formulation of directional sum impedance. **Journal of Aerospace Engineering**, American Society of Civil Engineers, v. 20, n. 1, p. 53–62, 2007. Disponível em: <[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0893-1321\(2007\)20:1\(53\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0893-1321(2007)20:1(53))>.

ANNAMDAS, V. G. M.; SOH, C. K. Three-dimensional electromechanical impedance model. ii: Damage analysis and pzt characterization. **Journal of Aerospace Engineering**, American Society of Civil Engineers, v. 20, n. 1, p. 63–71, 2007. Disponível em: <[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0893-1321\(2007\)20:1\(63\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0893-1321(2007)20:1(63))>.

ANNAMDAS, V. G. M.; SOH, C. K. Three-dimensional electromechanical impedance model for multiple piezoceramic transducers — structure interaction. **Journal of Aerospace Engineering**, American Society of Civil Engineers, v. 21, n. 1, p. 35–44, 2008. Disponível em: <[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0893-1321\(2008\)21:1\(35\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0893-1321(2008)21:1(35))>.

ASKARIPOUR, K.; ZAK, A. A survey of scrutinizing delaminated composites via various categories of sensing apparatus. **Journal of Composites Science**, v. 3, n. 95, p. 1–37, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/jcs3040095>>.

ASL, M. S.; NAYEBI, B.; KAKROUDI, M. G.; SHOKOUHIMEHR, M. Investigation of hot pressed zrb₂–sic–carbon black nanocomposite by scanning and transmission electron microscopy. **Ceramics International**, Elsevier, v. 45, n. 14, p. 16759–16764, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.05.211>>.

AYRES, J. W.; LALANDE, F.; CHAUDHRY, Z.; ROGERS, C. A. Qualitative impedance-based health monitoring of civil infrastructures. **Smart Materials and Structures**, v. 7, n. 5, p. 599–605, 1998. Disponível em: <<http://iopscience.iop.org/0964-1726/7/5/004>>.

AYRES, J. W.; LALANDE, F.; ROGERS, C. A.; CHAUDHRY, Z. A. Qualitative health monitoring of a steel bridge joint via piezoelectric actuator/sensor patches. In: NONDESTRUCTIVE EVALUATION TECHNIQUES FOR AGING INFRASTRUCTURE AND MANUFACTURING. **Nondestructive Evaluation of Bridges and Highways**. Scottsdale, AZ, United States, 1996. v. 2946, p. 211–218. Disponível em: <<https://doi.org/10.1117/12.259139>>.

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**, v. 14, n. 1, p. 1208–1227, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/s140101208>>.

BAPTISTA, F. G.; FILHO, J. V.; INMAN, D. J. Sizing pzt transducers in impedance-based structural health monitoring. **IEEE Sensors Journal**, v. 11, n. 6, p. 1405–1414, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/JSEN.2010.2098865>>.

BAPTISTA, F. G.; FILHO, J. V.; INMAN, D. J. Real-time multi-sensors measurement system with temperature effects compensation for impedance-based structural health monitoring. **Structural Health Monitoring**, v. 11, n. 2, p. 173–186, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/1475921711414234>>.

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos: Pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2001.

BASTANI, A.; AMINDAVAR, H.; SHAMSHIRSAZ, M.; SEPEHRY, N. Identification of temperature variation and vibration disturbance in impedance-based structural health monitoring using piezoelectric sensor array method. **Structural Health Monitoring**, v. 11, n. 3, p. 305–314, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/1475921711427486>>.

BATISTA, M. D. R.; DRZAL, L. T.; KIZILTAS, A.; MIELEWSKI, D. Hybrid cellulose-inorganic reinforcement polypropylene composites: Lightweight materials for automotive applications. **Polymer Composites**, Wiley Online Library, v. 41, n. 3, p. 1074–1089, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/pc.25439>>.

BEALER, E. J.; KAVETSKY, K.; DUTKO, S.; LOFLAND, S.; HU, X. Protein and polysaccharide-based magnetic composite materials for medical applications. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 21, n. 1, p. 1–25, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/ijms21010186>>.

BHALLA, S.; NAIDU, A. S. K.; ONG, C. W.; SOH, C.-K. Practical issues in the implementation of electromechanical impedance technique for nde. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SMART MATERIALS, NANO-, AND MICRO- SMART SYSTEMS. **Smart Structures, Devices, and Systems**. Melbourne, Australia, 2002. v. 4935, p. 484–494. Disponível em: <<https://doi.org/10.1117/12.479821>>.

BHALLA, S.; SOH, C. K. Structural impedance based damage diagnosis by piezo-transducers. **Earthquake Engineering & Structural Dynamics**, John Wiley & Sons, Ltd, v. 32, n. 12, p. 1897–1916, 2003. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/eqe.307>>.

BISWAL, A.; SWAIN, S. K. Smart composite materials for civil engineering applications. In: **Polymer Nanocomposite-Based Smart Materials**. Sambalpur, India: Elsevier, 2020. p. 197–210. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-103013-4.00011-X>>.

CALLISTER JR, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 817 p.

CAMPEIRO, L. M.; SILVEIRA, R. Z. da; BAPTISTA, F. G. Impedance-based damage detection under noise and vibration effects. **Structural Health Monitoring**, v. 17, n. 3, p. 654–667, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/1475921717715240>>.

CASTANIEN, K. E.; LIANG, C. Application of active structural health monitoring technique to aircraft fuselage structures. In: SYMPOSIUM ON SMART STRUCTURES AND MATERIALS. **Smart Structures and Materials 1996: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies**. San Diego, CA, United States, 1996. v. 2721, p. 38–49. Disponível em: <<https://doi.org/10.1117/12.239153>>.

CAVALINI JR., A. A. **Deteção e identificação de trincas transversais incipientes em eixos horizontais flexíveis de máquinas rotativas**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Uberlândia, MG, Brasil, 2013.

CAVALINI JR, A. A.; FINZI NETO, R. M.; STEFFEN JR, V. Electromechanical impedance based crack detection for a rotating machine. In: **Topics in Modal Analysis I**. Bethel, CT, USA: Springer, 2014. v. 7, p. 31–40. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-04753-9_4>.

CHAUDHRY, Z.; JOSEPH, T.; SUN, F. P.; ROGERS, C. A. Local-area health monitoring of aircraft via piezoelectric actuator/sensor patches. In: SMART STRUCTURES AND MATERIALS. **Smart Structures and Materials 1995: Smart Structures and Integrated Systems**. San Diego, CA, United States, 1995. v. 2443, p. 268–276. Disponível em: <<https://doi.org/10.1117/12.208264>>.

CHAUDHRY, Z.; LALANDE, F.; GANINO, A.; ROGERS, C.; CHUNG, J. Monitoring the integrity of composite patch structural repair via piezoelectric actuators/sensors. In: **Center of Intelligent Material Systems and Structures**. New Orleans, LA, USA: AIAA Publishing, 1995. p. 2243–2248. Disponível em: <<https://doi.org/10.2514/6.1995-1074>>.

CHEN, X. Fractographic analysis of sandwich panels in a composite wind turbine blade using optical microscopy and x-ray computed tomography. **Engineering Failure Analysis**, Elsevier, p. 1–12, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104475>>.

DARLOW, M. S.; CREONTE, J. Optimal design of composite helicopter power transmission shafts with axially varying fiber layup. **Journal of the American Helicopter Society**, Vertical Flight Society, v. 40, n. 2, p. 50–56, 1995. Disponível em: <<https://doi.org/10.4050/JAHS.40.50>>.

DE LUCA, A.; PERFETTO, D.; FENZA, A. D.; PETRONE, G.; CAPUTO, F. A sensitivity analysis on the damage detection capability of a lamb waves based shm system for a composite winglet. **Procedia Structural Integrity**, Elsevier, v. 12, p. 578–588, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.11.061>>.

DEEVI, D. A.; NAIDU, A. S.; RAO, B. C. M. Optimal pzt transducer location for effective damage identification in thin fixed plate. **Advances in Materials and Processing Technologies**, Taylor & Francis, p. 1–13, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/2374068X.2020.1732157>>.

DESTIC, F.; BOUVET, C. Impact damages detection on composite materials by thz imaging. **Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation**, Elsevier, v. 6, p. 53–62, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.csndt.2016.09.003>>.

DURADZHI, V. Y. Weight efficiency analysis of a ship carbon shaft manufactured by winding with various winding angles in layers. **Materials Science and Engineering**, v. 747, n. 1, p. 1–5, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/1757-899X/747/1/012017>>.

FARIA, C. T.; OWEN, R. B.; INMAN, D. J. Macro-fiber composites performance under thermal cycling for impedance-based shm applications. In: SPIE SMART STRUCTURES AND MATERIALS + NONDESTRUCTIVE EVALUATION AND HEALTH MONITORING. **Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems**. San Diego, California, United States, 2014. v. 9057, p. 1–11. Disponível em: <<https://doi.org/10.1117/12.2046465>>.

FARRAR, C. R.; LIEVEN, N. A.; BEMENT, M. T. An introduction to damage prognosis. **Damage Prognosis for Aerospace, Civil and Mechanical Systems**, John Wiley & Sons, Ltd., p. 1–12, 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/0470869097.ch1>>.

FINZI NETO, R. M.; STEFFEN JR, V.; RADE, D. A.; GALLO, C. A.; PALOMINO, L. V. A low-cost electromechanical impedance-based shm architecture for multiplexed piezoceramic actuators. **Structural Health Monitoring**, v. 10, n. 4, p. 391–402, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/1475921710379518>>.

GIURGIUTIU, V.; REYNOLDS, A.; ROGERS, C. A.; SUTTON, M. E/m impedance health monitoring of spot-welded structural joints. In: ASME WINTER ANNUAL MEETING. **Adaptive Structures and Material Systems Symposium**. Anaheim, CA, 1998. p. 1–6.

GIURGIUTIU, V.; REYNOLDS, A. P.; ROGERS, C. A. Details of the electromechanical (e/m) impedance health monitoring of spot-welded structural joints. In: SYMPOSIUM ON SMART STRUCTURES AND INTEGRATED SYSTEMS. **Smart Structures and Materials 1999: Smart Structures and Integrated Systems**. Newport Beach, CA, United States, 1999. v. 3668, p. 351–362. Disponível em: <<https://doi.org/10.1117/12.350714>>.

GIURGIUTIU, V.; ROGERS, C. A. Application of the electro-mechanical (e/m) impedance method to machinery failure prevention. In: 52ND MEETING OF THE SOCIETY FOR MACHINERY FAILURE PREVENTION TECHNOLOGY. Virginia Beach, VA, 1998. p. 271–280.

GIURGIUTIU, V.; ROGERS, C. A. Recent advancements in the electromechanical (e/m) impedance method for structural health monitoring and nde. In: 5TH ANNUAL INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SMART STRUCTURES AND MATERIALS. **Smart Structures and Materials 1998: Smart Structures and Integrated Systems**. San Diego, CA, United States, 1998. v. 3329, p. 536–547. Disponível em: <<https://doi.org/10.1117/12.316923>>.

GIURGIUTIU, V.; ROGERS, C. A. Modeling of the electro-mechanical (e/m) impedance response of a damaged composite beam. In: ASME AEROSPACE AND MATERIALS DIVISIONS. **Adaptive Structures and Integrated Systems Symposium**. Nashville, TN, 1999. v. 87, p. 39–46.

GIURGIUTIU, V.; XU, B. Development of a field-portable small-size impedance analyzer for structural health monitoring using the electromechanical impedance technique. In: SMART STRUCTURES AND MATERIALS. **Smart Structures and Materials 2004: Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems**. San Diego, CA, United States, 2004. v. 5391, p. 774–785. Disponível em: <<https://doi.org/10.1117/12.541343>>.

GIURGIUTIU, V.; ZAGRAI, A. Damage detection in simulated aging-aircraft panels using the electro-mechanical impedance technique. In: ADAPTIVE STRUCTURES AND MATERIAL SYSTEMS SYMPOSIUM. Orlando, FL: ASME Winter Annual Meeting, 2000. p. 1–10.

GIURGIUTIU, V.; ZAGRAI, A. Damage detection in thin plates and aerospace structures with the electro-mechanical impedance method. **Structural Health Monitoring**, Sage Publications, Thousand Oaks, CA, v. 4, n. 2, p. 99–118, 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/1475921705049752>>.

GIURGIUTIU, V.; ZAGRAI, A.; BAO, J. Damage identification in aging aircraft structures with piezoelectric wafer active sensors. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, Sage Publications, v. 15, n. 9-10, p. 673–687, 2004. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/1045389X04038051>>.

GIURGIUTIU, V.; ZAGRAI, A. N. Electro-mechanical impedance method for crack detection in metallic plates. In: 6TH ANNUAL INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NDE FOR HEALTH MONITORING AND DIAGNOSTICS. **Advanced Nondestructive Evaluation for Structural and Biological Health Monitoring**. Newport Beach, CA, United States, 2001. v. 4335, p. 131–142. Disponível em: <<https://doi.org/10.1117/12.434167>>.

GRISSE, B. L.; PEAIRS, D. M.; INMAN, D. J. Impedance-based health monitoring of composites. **IMAC XXII Dearborn**, v. 26, p. 1–7, 2004.

HENRY, T.; MILLS, B. Optimized design for projectile impact survivability of a carbon fiber composite drive shaft. **Composite Structures**, Elsevier, v. 207, p. 438–445, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.09.049>>.

HU, N.; WANG, T.; WAN, H.; ZHUANG, L.; KETTENHOFEN, R.; ZHANG, X.; ZHANG, Y. S.; XU, W.; GOSSMANN, M.; BOHLEN, H.; HOU, X.; WANG, P. Synchronized electro-mechanical integration recording of cardiomyocytes. **Biosensors and Bioelectronics**, Elsevier, v. 117, p. 354–365, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.bios.2018.06.017>>.

JEFFERSON, A. J.; ARUMUGAM, V.; DHAKAL, H. **Repair of polymer composites: Methodology, techniques, and challenges**. United Kingdom: Woodhead Publishing, 2018.

KENDER, Š.; BREZINOVÁ, J.; SAILER, H. Advantages of using composite materials in automotive manufacture process. **Trans Motauto World**, Scientific Technical Union of Mechanical Engineering "Industry 4.0", v. 5, n. 1, p. 3–5, 2020.

KITTS, D. J.; ZAGRAI, A. N. Finite element modeling and effect of electrical/mechanical parameters on electromechanical impedance damage detection. In: ASME 2009 CONFERENCE ON SMART MATERIALS, ADAPTIVE STRUCTURES AND INTELLIGENT SYSTEMS. **Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems**. Oxnard, California, USA, 2009. p. 487–497. Disponível em: <<https://doi.org/10.1115/SMASIS2009-1296>>.

KOCHERLA, A.; NARAYANAN, A.; DUDDI, M.; IFAN, M. A.; KOLLURU, S. A novel method for diagnosing defective pzt-substrate bonding in electromechanical (em) impedance technique. **Materials Today: Proceedings**, Elsevier, p. 1–8, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.12.340>>.

KONCHUBA, N. **Temperature compensation improvements for impedance based structural health Monitoring**. Tese (Doutorado) — Virginia Tech, 2011.

KOO, K.-Y.; PARK, S.; LEE, J.-J.; YUN, C.-B.; INMAN, D. J. Impedance-based structural health monitoring considering temperature effects. In: SMART STRUCTURES AND MATERIALS + NONDESTRUCTIVE EVALUATION AND HEALTH MONITORING. **Health**

Monitoring of Structural and Biological Systems. San Diego, California, United States, 2007. v. 6532, p. 1–9. Disponível em: <<https://doi.org/10.1117/12.715680>>.

KOO, K.-Y.; PARK, S.; LEE, J.-J.; YUN, C.-B. Automated impedance-based structural health monitoring incorporating effective frequency shift for compensating temperature effects. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, Sage Publications, London, England, v. 20, n. 4, p. 367–377, 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/1045389X08088664>>.

KRISHNAMURTHY, K.; LALANDE, F.; ROGERS, C. A. Effects of temperature on the electrical impedance of piezoelectric sensors. In: SYMPOSIUM ON SMART STRUCTURES AND MATERIALS. **Smart Structures and Materials 1996: Smart Structures and Integrated Systems.** San Diego, CA, United States, 1996. v. 2717, p. 302–310. Disponível em: <<https://doi.org/10.1117/12.239033>>.

KUDELA, P.; WANDOWSKI, T.; MALINOWSKI, P.; OSTACHOWICZ, W. Application of scanning laser doppler vibrometry for delamination detection in composite structures. **Optics and Lasers in Engineering**, Elsevier, v. 99, p. 46–57, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2016.10.022>>.

LAGARIAS, J. C.; REEDS, J. A.; WRIGHT, M. H.; WRIGHT, P. E. Convergence properties of the nelder-mead simplex method in low dimensions. **SIAM Journal on Optimization**, Society for Industrial and Applied Mathematics, v. 9, n. 1, p. 112–147, 1998. Disponível em: <<https://doi.org/10.1137/S1052623496303470>>.

LALANDE, F.; ROGERS, C. A.; CHILDS, B. W.; CHAUDHRY, Z. A. High-frequency impedance analysis for nde of complex precision parts. In: SYMPOSIUM ON SMART STRUCTURES AND MATERIALS. **Smart Structures and Materials 1996: Smart Structures and Integrated Systems.** San Diego, CA, United States, 1996. v. 2717, p. 237–243. Disponível em: <<https://doi.org/10.1117/12.239026>>.

LEUCAS, L. d. F. **Utilização das técnicas de impedância eletromecânica e ondas de Lamb para identificação de dano em estruturas com rebites.** Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia, MG, Brasil, 2009.

LI, W.; LIU, T.; ZOU, D.; WANG, J.; YI, T. H. Pzt based smart corrosion coupon using electromechanical impedance. **Mechanical Systems and Signal Processing**, Elsevier, v. 129, p. 455–469, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.04.049>>.

LI, W.; WANG, J.; LIU, T.; LUO, M. Electromechanical impedance instrumented circular piezoelectric-metal transducer for corrosion monitoring: modeling and validation. **Smart Materials and Structures**, IOP Publishing Ltd., v. 29, p. 1–13, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/1361-665X/ab675c>>.

LIANG, C.; SUN, F. P.; ROGERS, C. A. Dynamic output characteristics of piezoelectric actuators. In: NORTH AMERICAN CONFERENCE ON SMART STRUCTURES AND MATERIALS. **Smart Structures and Materials 1993: Smart Materials.** Albuquerque, NM, United States, 1993. v. 1916, p. 341–352. Disponível em: <<https://doi.org/10.1117/12.148503>>.

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. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/1045389X9700800406>>.

- LIANG, C.; SUN, F. P.; ROGERS, C. A. An impedance method for dynamic analysis of active material systems. **Center of Intelligent Material Systems and Structures**, Blacksburg, VA, 1994. Disponível em: <<https://doi.org/10.1115/1.2930387>>.
- LOBATO, F. S.; STEFFEN JR, V.; SILVA NETO, A. Resolução de problemas inversos em processos difusivos e transferência radiativa usando o algoritmo de evolução diferencial. **Computação Evolucionária em Problemas de Engenharia**, Omnipax, Curitiba, PR, p. 173–195, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.7436/2011.cepe.c9>>.
- MADHAV, A. V. G.; SOH, C. K. An electromechanical impedance model of a piezo-ceramic transducer-structure in the presence of thick adhesive bonding. **Smart Materials and Structures**, IOP Publishing, v. 16, n. 3, p. 673–686, 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/0964-1726/16/3/014>>.
- MARSH, G. Composite ship shafts shape up. **Reinforced plastics**, Elsevier, v. 45, n. 11, p. 32–36, 2001. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0034-3617\(01\)80318-0](https://doi.org/10.1016/S0034-3617(01)80318-0)>.
- MARTOWICZ, A.; SENDECKI, A.; SALAMON, M.; ROSIEK, M.; UHL, T. Application of electromechanical impedance-based shm for damage detection in bolted pipeline connection. **Nondestructive Testing and Evaluation**, Taylor & Francis, v. 31, n. 1, p. 17–44, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/10589759.2015.1058376>>.
- MASCARENAS, D. L.; TODD, M. D.; PARK, G.; FARRAR, C. R. A miniaturized electromechanical impedance-based node for the wireless interrogation of structural health. In: **NONDESTRUCTIVE EVALUATION FOR HEALTH MONITORING AND DIAGNOSTICS. Health Monitoring and Smart Nondestructive Evaluation of Structural and Biological Systems V**. San Diego, CA, United States, 2006. v. 6177, p. 1–10. Disponível em: <<https://doi.org/10.1117/12.658753>>.
- MASOOD, S. N.; VISWAMURTHY, S.; GADDIKERI, K. M. Composites airframe panel design for post-buckling - an experimental investigation. **Composite Structures**, Elsevier, p. 1–10, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112104>>.
- MAZLINA, M.; BIBI, S. S.; TAWIE, R.; DAHO, C. D.; ANNUAR, I. Bone-crack detection by piezoelectric-electromechanical impedance method. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER, COMMUNICATIONS, AND CONTROL TECHNOLOGY (I4CT)**. Kuching, Malaysia: IEEE, 2015. p. 418–421. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/I4CT.2015.7219610>>.
- MCGEEHIN, P. Composites in transportation: Design and current developments. **Materials & Design**, Elsevier, v. 3, n. 2, p. 378–387, 1982. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/0261-3069\(82\)90129-7](https://doi.org/10.1016/0261-3069(82)90129-7)>.
- MCILHAGGER, A.; ARCHER, E.; MCILHAGGER, R. Manufacturing processes for composite materials and components for aerospace applications. **Polymer Composites in the Aerospace Industry**, Elsevier, p. 59–81, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102679-3.00003-4>>.
- MEI, H.; MIGOT, A.; HAIDER, M. F.; JOSEPH, R.; BHUIYAN, M. Y.; GIURGIUTIU, V. V. Vibration-based in-situ detection and quantification of delamination in composite plates. **Sensors**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 19, n. 7, p. 1–20, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/s19071734>>.

- MENEGAZ, G. L.; GUIMARÃES, G. Development of a new technique for breast tumor detection based on thermal impedance and a damage metric. **Infrared Physics & Technology**, Elsevier, v. 97, p. 401–410, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.infrared.2019.01.019>>.
- MENEGAZ, G. L.; TSURUTA, K. M.; FINZI NETO, R. M.; STEFFEN JR, V.; ARAUJO, C. A.; GUIMARÃES, G. Use of the electromechanical impedance method in the detection of inclusions: application to mammary tumors. **Structural Health Monitoring**, Sage Publications, p. 1–16, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/1475921718825138>>.
- MIN, J.; PARK, S.; YUN, C.-B.; SONG, B. Development of a low-cost multifunctional wireless impedance sensor node. **Smart Structures and Systems**, Techno-Press, v. 6, n. 5-6, p. 689–709, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.12989/sss.2010.6.5_6.689>.
- MIN, J.; PARK, S.; YUN, C.-B.; LEE, C.-G.; LEE, C. Impedance-based structural health monitoring incorporating neural network technique for identification of damage type and severity. **Engineering Structures**, Elsevier, v. 39, p. 210–220, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.01.012>>.
- MOURA JR., J. R. V. **Métodos de identificação de falhas em estruturas aeronáuticas utilizando meta-modelagem aliada às técnicas de impedância e estruturas inteligentes**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia, MG, Brasil, 2004.
- MOURA JR., J. R. V. **Uma contribuição aos sistemas de monitoramento de integridade estrutural aplicada a estruturas aeronáuticas e espaciais**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Uberlândia, MG, Brasil, 2008.
- NA, S.; LEE, H.-K. Steel wire electromechanical impedance method using a piezoelectric material for composite structures with complex surfaces. **Composite Structures**, Elsevier, v. 98, p. 79–84, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.10.046>>.
- NA, S.; TAWIE, R.; LEE, H.-K. Electromechanical impedance method of fiber-reinforced plastic adhesive joints in corrosive environment using a reusable piezoelectric device. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, Sage Publications, v. 23, n. 7, p. 737–747, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/1045389X12440754>>.
- NA, W. S.; BAEK, J. Impedance based health monitoring technique with probabilistic neural network for possible wall thinning detection of metal structures. **Journal of Sensors**, Hindawi, v. 2017, p. 1–11, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1155/2017/8950518>>.
- NASKAR, S.; BHALLA, S. Metal-wire-based twin one-dimensional orthogonal array configuration of pzt patches for damage assessment of two-dimensional structures. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, Sage Publications, v. 27, n. 11, p. 1440–1460, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/1045389X15592480>>.
- NIKBAKHT, M.; YOUSEFI, J.; HOSSEINI-TOUDESHPY, H.; MINAK, G. Delamination evaluation of composite laminates with different interface fiber orientations using acoustic emission features and micro visualization. **Composites Part B: Engineering**, Elsevier, v. 113, p. 185–196, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.047>>.
- ONG, C.-W.; YANG, Y.; NAIDU, A. S. K.; LU, Y.; SOH, C. K. Application of the electromechanical impedance method for the identification of in-situ stress in structures. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SMART MATERIALS, NANO-, AND MICRO- SMART SYSTEMS.

Smart Structures, Devices, and Systems. Melbourne, Australia, 2002. v. 4935, p. 503–514. Disponível em: <<https://doi.org/10.1117/12.485621>>.

OSTACHOWICZ, W. M.; WANDOWSKI, T.; MALINOWSKI, P. H.; KUDELA, P. Damage identification and assessment in composite structures. **Procedia Engineering**, Elsevier, v. 188, p. 241–247, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.480>>.

PALOMINO, L. V. **Análise das métricas de dano associadas à técnica da impedância eletromecânica para o monitoramento de integridade estrutural**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia, MG, Brasil, 2008.

PALOMINO, L. V. **Técnicas de inteligência artificial aplicadas ao método de monitoramento de integridade estrutural baseado na impedância eletromecânica para monitoramento de danos em estruturas aeronáuticas**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Uberlândia, MG, Brasil, 2012.

PALOMINO, L. V.; TSURUTA, K.; MOURA JR, J.; RADEA, D.; STEFFEN JR, V.; INMAN, D. Evaluation of the influence of sensor geometry and physical parameters on impedance-based structural health monitoring. **Shock and Vibration**, v. 19, n. 5, p. 811–823, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.3233/SAV-2012-0690>>.

PARK, G.; CUDNEY, H. H.; INMAN, D. J. Impedance-based health monitoring technique for massive structures and high-temperature structures. In: SYMPOSIUM ON SMART STRUCTURES AND MATERIALS. **Smart Structures and Materials 1999: Sensory Phenomena and Measurement Instrumentation for Smart Structures and Materials**. Newport Beach, CA, United States, 1999. v. 3670, p. 461–469. Disponível em: <<https://doi.org/10.1117/12.349760>>.

PARK, G.; CUDNEY, H. H.; INMAN, D. J. Impedance-based health monitoring of civil structural components. **Journal of Infrastructure Systems**, American Society of Civil Engineers, v. 6, n. 4, p. 153–160, 2000. Disponível em: <[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1076-0342\(2000\)6:4\(153\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0342(2000)6:4(153))>.

PARK, G.; CUDNEY, H. H.; INMAN, D. J. An integrated health monitoring technique using structural impedance sensors. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, Sage Publications, v. 11, n. 6, p. 448–455, 2000. Disponível em: <<https://doi.org/10.1106/QXMV-R3GC-VXXG-W3AQ>>.

PARK, G.; CUDNEY, H. H.; INMAN, D. J. Feasibility of using impedance-based damage assessment for pipeline structures. **Earthquake Engineering & Structural Dynamics**, Wiley Online Library, v. 30, n. 10, p. 1463–1474, 2001. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/eqe.72>>.

PARK, G.; KABEYA, K.; CUDNEY, H. H.; INMAN, D. J. Removing effects of temperature changes from piezoelectric impedance-based qualitative health monitoring. In: 5TH ANNUAL INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SMART STRUCTURES AND MATERIALS. **Sensory Phenomena and Measurement Instrumentation for Smart Structures and Materials**. San Diego, CA, United States, 1998. v. 3330, p. 103–114. Disponível em: <<https://doi.org/10.1117/12.316963>>.

PARK, G.; KABEYA, K.; CUDNEY, H. H.; INMAN, D. J. Impedance-based structural health monitoring for temperature varying applications. **JSME International Journal Series A Solid**

Mechanics and Material Engineering, The Japan Society of Mechanical Engineers, v. 42, n. 2, p. 249–258, 1999. Disponível em: <<https://doi.org/10.1299/jsmea.42.249>>.

PARK, G.; SOHN, H.; FARRAR, C. R.; INMAN, D. J. Overview of piezoelectric impedance-based health monitoring and path forward. **The Shock and Vibration Digest**, v. 35, n. 6, p. 451–464, 2003. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/05831024030356001>>.

PARK, S.; AHMAD, S.; YUN, C.-B.; ROH, Y. Multiple crack detection of concrete structures using impedance-based structural health monitoring techniques. **Experimental Mechanics**, Springer, v. 46, n. 5, p. 609–618, 2006. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11340-006-8734-0>>.

PARK, S.; GRISSE, B. L.; INMAN, D. J.; YUN, C.-B. Mfc-based structural health monitoring using a miniaturized impedance measuring chip for corrosion detection. **Research in Nondestructive Evaluation**, Taylor & Francis, v. 18, n. 2, p. 139–150, 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/09349840701279937>>.

PARK, S.; LEE, J.-J.; YUN, C.-B.; INMAN, D. J. Electro-mechanical impedance-based wireless structural health monitoring using pca-data compression and k-means clustering algorithms. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, Sage Publications, v. 19, n. 4, p. 509–520, 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/1045389X07077400>>.

PARK, S.; YUN, C.-B.; INMAN, D. J. Structural health monitoring using electro-mechanical impedance sensors. **Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures**, Wiley Online Library, v. 31, n. 8, p. 714–724, 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1460-2695.2008.01248.x>>.

PASĂRE, M. M.; LUCA, L.; DIMITROV, R. Aspects of composite materials evolution. **Fiability & Durability/Fiabilitate si Durabilitate**, n. 2, 2019. ISSN 1844-640X.

PAVELKO, V. Electromechanical impedance for shm of aircraft bolted joints. In: SMART STRUCTURES AND MATERIALS + NONDESTRUCTIVE EVALUATION AND HEALTH MONITORING. **Nondestructive Characterization for Composite Materials, Aerospace Engineering, Civil Infrastructure, and Homeland Security**. San Diego, California, United States, 2013. v. 8694, p. 1–14. Disponível em: <<https://doi.org/10.1117/12.2009588>>.

PEAIRS, D. M. **High frequency modeling and experimental analysis for implementation of impedance-based structural health monitoring**. Tese (Doutorado) — Thesis—Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, 2006.

PEAIRS, D. M.; GRISSE, B.; INMAN, D. J.; PAGE, K. R.; ATHMAN, R.; MARGASAHAYAM, R. N. Proof-of-concept application of impedance-based health monitoring on space shuttle ground structures. **National Aeronautics and Space Administration**, Kennedy Space Center, 2003.

PEAIRS, D. M.; GRISSE, B. L.; MARGASAHAYAM, R. N.; PAGE, K. R.; INMAN, D. J. Impedance-based health monitoring of space shuttle ground structures. In: NDE FOR HEALTH MONITORING AND DIAGNOSTICS. **Health Monitoring and Smart Nondestructive Evaluation of Structural and Biological Systems III**. San Diego, CA, United States, 2004. v. 5394, p. 99–107. Disponível em: <<https://doi.org/10.1117/12.539771>>.

PEAIRS, D. M.; INMAN, D. J.; PARK, G. Circuit analysis of impedance-based health monitoring of beams using spectral elements. **Structural Health Monitoring**, Sage Publications, v. 6, n. 1, p. 81–94, 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/1475921707072621>>.

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

PERERA, R.; PÉREZ, A.; GARCÍA-DIÉGUEZ, M.; ZAPICO-VALLE, J. L. Active wireless system for structural health monitoring applications. **Sensors**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 17, n. 12, p. 1–16, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/s17122880>>.

POHL, J.; HEROLD, S.; MOOK, G.; MICHEL, F. Damage detection in smart cfrp composites using impedance spectroscopy. **Smart materials and structures**, IOP Publishing, v. 10, n. 4, p. 834–842, 2001. Disponível em: <stacks.iop.org/SMS/10/834>.

PONDER, R. I.; SAFAEI, M.; ANTON, S. R. Validation of impedance-based structural health monitoring in a simulated biomedical implant system. In: CONFERENCE ON SMART MATERIALS, ADAPTIVE STRUCTURES AND INTELLIGENT SYSTEMS. **Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems**. San Antonio, Texas, USA, 2018. p. 1–8. Disponível em: <<https://doi.org/10.1115/SMASIS2018-8012>>.

POTLURI, R.; KRISHNA, N. C. Potential and applications of green composites in industrial space. **Materials Today: Proceedings**, Elsevier, v. 22, p. 2041–2048, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.218>>.

PRIYA, C. B.; REDDY, A. L.; RAO, G. R.; GOPALAKRISHNAN, N.; RAO, A. R. M. Low frequency and boundary condition effects on impedance based damage identification. **Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation**, Elsevier, v. 2, p. 9–13, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.csndt.2014.05.001>>.

QUATTROCCHI, A.; FRENI, F.; MONTANINI, R. Air-coupled ultrasonic testing to estimate internal defects in composite panels used for boats and luxury yachts. **International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)**, Springer, v. 14, p. 35–41, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s12008-019-00611-5>>.

RABELO, D. d. S. **Monitoramento de integridade estrutural baseado na técnica da impedância eletromecânica incorporando compensação do efeito da variação da temperatura**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia, MG, Brasil, 2014.

RABELO, D. d. S. **Técnicas avançadas de normalização de dados aplicadas ao método de monitoramento de integridade estrutural baseado em impedância eletromecânica**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Uberlândia, MG, Brasil, 2017.

RABELO, D. S.; STEFFEN JR., V.; FINZI NETO, R. M.; LACERDA, H. B. Impedance-based structural health monitoring and statistical method for threshold-level determination applied to 2024-t3 aluminum panels under varying temperature. **Structural Health Monitoring**, Sage Publications, v. 16, n. 4, p. 365–381, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/1475921716671038>>.

RABELO, D. S.; TSURUTA, K. M.; OLIVEIRA, D. D.; CAVALINI JR., A. A.; FINZI NETO, R. M.; STEFFEN JR., V. Fault detection of a rotating shaft by using the electromechanical impedance method and a temperature compensation approach. **Journal of Nondestructive Evaluation**, Springer, v. 36, n. 25, p. 1–13, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10921-017-0405-9>>.

RAJU, V. **Implementing impedance-based health monitoring**. Tese (Doutorado) — Virginia Tech, 1997.

REDDY, J. N. **Mechanics of laminated composite plates and shells: Theory and analysis**. 2. ed. United States of America: CRC press, 2003.

RIBOLLA, E. L.; RIZZO, P. Modeling the electromechanical impedance technique for the assessment of dental implant stability. **Journal of Biomechanics**, Elsevier, v. 48, n. 10, p. 1713–1720, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2015.05.020>>.

ROCHA, L. A. d. A. **Identificação de dano em estruturas utilizando uma metodologia que integra a técnica da impedância eletromecânica e ondas de Lamb**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Uberlândia, MG, Brasil, 2017.

ROCHA, L. A. d. A.; FINZI NETO, R. M.; STEFFEN JR, V. Damage detection integrating ishm and lwshm techniques. In: CONFERENCE PROCEEDINGS OF THE SOCIETY FOR EXPERIMENTAL MECHANICS SERIES. **Special Topics in Structural Dynamics**. Bethel, CT, USA: Springer, 2019. v. 5, p. 181–194. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-75390-4_17>.

ROGERS, C. A.; LALANDE, F. Solid-state active sensing for in-situ health monitoring. In: PROCEEDINGS OF A JOINT CONFERENCE. **Technology Showcase: Integrated Monitoring, Diagnostics and Failure Prevention**. Mobile, Alabama: Defense Technical Information Center Compilation Part Notice, 1996. p. 1–7.

ROSS, R. W. Integrated vehicle health management in aerospace structures. In: YUAN, F.G. **Structural Health Monitoring (SHM) in Aerospace Structures**. Hampton, VA, United States: Woodhead Publishing, 2016. cap. 1, p. 3–31. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100148-6.00001-9>>.

RUAN, J.; HO, S. C. M.; PATIL, D.; SONG, G. Structural health monitoring of wind turbine blade using piezoceramic based active sensing and impedance sensing. In: PROCEEDINGS OF THE 11TH IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON NETWORKING, SENSING AND CONTROL. Miami, FL, USA: IEEE, 2014. p. 661–666. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/ICNSC.2014.6819704>>.

RUTHERFORD, A. C.; PARK, G.; SOHN, H.; FARRAR, C. R. Nonlinear feature identification of impedance-based structural health monitoring. In: SMART STRUCTURES AND MATERIALS. **Smart Structures and Materials 2004: Smart Structures and Integrated Systems**. San Diego, CA, United States, 2004. v. 5390, p. 521–531. Disponível em: <<https://doi.org/10.1117/12.540106>>.

SAAFI, M.; SAYYAH, T. Health monitoring of concrete structures strengthened with advanced composite materials using piezoelectric transducers. **Composites Part B: Engineering**, Elsevier, v. 32, n. 4, p. 333–342, 2001. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S1359-8368\(01\)00017-8](https://doi.org/10.1016/S1359-8368(01)00017-8)>.

SCHWANKL, M.; SHARIF-KHODAEI, Z.; ALIABADI, F. M.; WEIMER, C. Electro-mechanical impedance technique for structural health monitoring of composite panels. **Key Engineering Materials**, v. 525, p. 569–572, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.525-526.569>>.

SEPEHRY, N.; SHAMSHIRSAZ, M.; ABDOLLAHI, F. Temperature variation effect compensation in impedance-based structural health monitoring using neural networks. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, Sage Publications, v. 22, n. 17, p. 1975–1982, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/1045389X11421814>>.

SERMONETA, A.; LIANG, C.; SUN, F. P.; ROGERS, C. A. Dynamic analysis of active structures under multiple actuators excitations using an impedance approach. In: **SMART STRUCTURES AND MATERIALS. Smart Structures and Materials 1995: Smart Structures and Integrated Systems**. San Diego, CA, United States, 1995. v. 2443, p. 448–457. Disponível em: <<https://doi.org/10.1117/12.208281>>.

SHINDE, R. M.; SAWANT, S. M.; RAUT, L. Design and optimization of epoxy/glass fiber drive shaft for passenger vehicle. In: **PROCEEDINGS OF THE 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED TECHNOLOGIES FOR SOCIETAL APPLICATIONS. Techno-Societal 2018**. Pandharpur, Maharashtra, India: Springer, 2020. v. 2, p. 987–998. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-16962-6_97>.

SHOUKROUN, D.; MASSIMI, L.; ENDRIZZI, M.; BATE, D.; OLIVO, S.; FROMME, P. Composites impact damage detection and characterization using ultrasound and x-ray nde techniques. In: **SPIE SMART STRUCTURES + NONDESTRUCTIVE EVALUATION. Health Monitoring of Structural and Biological Systems XIV**. Online Only, 2020. v. 11381, p. 1–7. Disponível em: <<https://doi.org/10.1117/12.2549078>>.

SILVA, R. B.; FERREIRA, F. I.; BAPTISTA, F. G.; AGUIAR, P. R. de; RUZZI, R. de S.; HUBNER, H. B.; FONSECA, M. d. P. C.; BIANCHI, E. C. Electromechanical impedance (emi) technique as alternative to monitor workpiece surface damages after the grinding operation. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Springer, v. 98, p. 2429–2438, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00170-018-2390-2>>.

SILVA, R. N. F. **Monitoramento de integridade estrutural utilizando a técnica da impedância eletromecânica aplicada em estruturas de concreto**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Uberlândia, MG, Brasil, 2017.

SILVEIRA, R. Z. M.; CAMPEIRO, L. M.; BAPTISTA, F. G. Performance of three transducer mounting methods in impedance-based structural health monitoring applications. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, Sage Publications, v. 28, n. 17, p. 2349–2362, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/1045389X17689942>>.

SOH, C. K.; LIM, Y. Y. Detection and characterization of fatigue induced damage using electro-mechanical impedance technique. **Advanced Materials Research**, v. 79, p. 2031–2034, 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.79-82.2031>>.

SOH, C. K.; TSENG, K. K.; BHALLA, S.; GUPTA, A. Performance of smart piezoceramic patches in health monitoring of a rc bridge. **Smart Materials and Structures**, v. 9, n. 4, p. 533–542, 2000. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/0964-1726/9/4/317>>.

STEIN, S. C.; LIANG, C.; ROGERS, C. A. Power consumption of piezoelectric actuators driving a simply supported beam considering fluid coupling. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 96, n. 3, p. 1598–1604, 1994. Disponível em: <<https://doi.org/10.1121/1.410238>>.

STORN, R.; PRICE, K. Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. **Journal of Global Optimization**, Springer, v. 11, n. 4, p. 341–359, 1997. Disponível em: <<https://doi.org/10.1023/A:1008202821328>>.

SUN, F. P.; CHAUDHRY, Z.; LIANG, C.; ROGERS, C. Truss structure integrity identification using pzt sensor-actuator. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 6, n. 1, p. 134–139, 1995. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/1045389X9500600117>>.

SUN, F. P.; CHAUDHRY, Z. A.; ROGERS, C. A.; MAJMUNDAR, M.; LIANG, C. Automated real-time structure health monitoring via signature pattern recognition. In: SMART STRUCTURES AND MATERIALS. **Smart Structures and Materials 1995: Smart Structures and Integrated Systems**. San Diego, CA, United States, 1995. v. 2443, p. 236–247. Disponível em: <<https://doi.org/10.1117/12.208261>>.

TAWIE, R.; LEE, H.-K. Monitoring the strength development in concrete by emi sensing technique. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 24, n. 9, p. 1746–1753, 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.02.014>>.

TAWIE, R.; PARK, H. B.; BAEK, J.; NA, W. S. Damage detection performance of the electromechanical impedance (emi) technique with various attachment methods on glass fibre composite plates. **Sensors**, v. 19, n. 5, p. 1–13, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/s19051000>>.

TEBALDI, A.; COELHO, L. S.; LOPES JR., V. Detecção de falhas em estruturas inteligentes usando otimização por nuvem de partículas: fundamentos e estudo de casos. **Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica**, v. 17, n. 3, p. 312–330, 2006. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0103-17592006000300006>>.

TENNEY, C.; ALBAKRI, M. I.; KUBALAK, J.; STURM, L. D.; WILLIAMS, C. B.; TARAZAGA, P. A. Internal porosity detection in additively manufactured parts via electromechanical impedance measurements. In: CONFERENCE ON SMART MATERIALS, ADAPTIVE STRUCTURES AND INTELLIGENT SYSTEMS. **Smart Materials Adaptive Structures and Intelligent Systems**. Snowbird, Utah, USA, 2017. p. 1–7. Disponível em: <<https://doi.org/10.1115/SMASIS2017-3856>>.

TSENG, K. K.; NAIDU, A. S. Non-parametric damage detection and characterization using smart piezoceramic material. **Smart Materials and Structures**, v. 11, n. 3, p. 317–329, 2002. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/0964-1726/11/3/301>>.

TSURUTA, K.; RABELO, D.; GUIMARÃES, C.; CAVALINI JR, A.; FINZI NETO, R.; STEFFEN JR, V. Electromechanical impedance-based fault detection in a rotating machine by using an operating condition compensation approach. In: SMART STRUCTURES AND MATERIALS + NONDESTRUCTIVE EVALUATION AND HEALTH MONITORING. **A Tribute Conference Honoring Daniel Inman**. Portland, Oregon, United States, 2017. v. 10172, p. 1–17. Disponível em: <<https://doi.org/10.1117/12.2258227>>.

TSURUTA, K. M. **Monitoramento de integridade estrutural de materiais compostos sujeitos a impactos empregando a técnica da impedância eletromecânica**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia, MG, Brasil, 2008.

TSURUTA, K. M.; CUNHA, L. R.; RADE, R. S.; RADE, D. A. Structural health monitoring of composite plates subjected to impacts using the electromechanical impedance technique. In: CONFERENCE ON SMART MATERIALS, ADAPTIVE STRUCTURES AND INTELLIGENT SYSTEMS. **Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems**. Ellicott City, Maryland, USA, 2008. p. 167–173. Disponível em: <<https://doi.org/10.1115/SMASIS2008-514>>.

TSURUTA, K. M.; SILVA, R. N. F.; ROCHA, L. A.; CAVALLINI JR, A. A.; FINZI NETO, R. M.; STEFFEN JR, V. Impedance-based damage detection of concrete structures under dynamic loads. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON STRUCTURAL HEALTH MONITORING AND NONDESTRUCTIVE TESTING. Saarbruecken, Germany, 2018. p. 1–10.

VANDENRIJT, J.-F.; XIONG, H.; LEQUESNE, C.; BLAIN, P.; GEORGES, M. Shearography inspection of monolithic cfrp composites: finite element modeling approach for assessing an adequate strategy of artificial defects representing delamination. In: OPTICAL METROLOGY. **Optical Measurement Systems for Industrial Inspection XI**. Munich, Germany, 2019. v. 11056, p. 1–7. Disponível em: <<https://doi.org/10.1117/12.2527445>>.

VANDERPLAATS, G. N. **Numerical optimization techniques for engineering design**. 3. ed. Colorado Springs: Vanderplaats research & development, Inc., 1999.

VENSON, G. G. **Aplicação do coeficiente de Hurst na técnica de monitoramento da integridade estrutural baseada na impedância eletromecânica**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Uberlândia, MG, Brasil, 2020.

VIANA, F. A. C. **Surrogate modeling techniques and heuristic optimization methods applied to design and identification problems**. Tese (Doutorado), 2008.

WANDOWSKI, T.; MALINOWSKI, P.; OSTACHOWICZ, W. Delamination detection in cfrp panels using emi method with temperature compensation. **Composite Structures**, Elsevier, v. 151, p. 99–107, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.02.056>>.

WANG, D.; ZHANG, J.; ZHU, H. Embedded electromechanical impedance and strain sensors for health monitoring of a concrete bridge. **Shock and Vibration**, v. 2015, p. 1–12, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1155/2015/821395>>.

WICKLIN, R. Extreme values: What is an extreme value for normally distributed data? **SAS**, 2019. Disponível em: <<https://blogs.sas.com/content/iml/2019/07/22/extreme-value-normal-data.html#prettyPhoto>>. Acesso em: 29 setembro 2020.

WINSTON, H.; SUN, F.; ANNIGERI, B. Structural health monitoring with piezoelectric active sensors. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**, v. 123, n. 2, p. 353–358, 2001. Disponível em: <<https://doi.org/10.1115/1.1365123>>.

XU, B.; GIURGIUTIU, V. Efficient electromechanical (e/m) impedance measuring method for active sensor structural health monitoring. In: SMART STRUCTURES AND MATERIALS + NONDESTRUCTIVE EVALUATION AND HEALTH MONITORING. **Smart Structures and Materials 2005: Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems**. San Diego, California, United States, 2005. v. 5765, p. 271–280. Disponível em: <<https://doi.org/10.1117/12.598174>>.

XU, B.; GIURGIUTIU, V. Development of dsp-based electromechanical (e/m) impedance analyzer for active structural health monitoring. In: **SMART STRUCTURES AND MATERIALS + NONDESTRUCTIVE EVALUATION AND HEALTH MONITORING. Smart Structures and Materials 2006: Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems**. San Diego, California, United States, 2006. v. 6174, p. 1–11. Disponível em: <<https://doi.org/10.1117/12.657507>>.

XU, B.; JIANG, F. Concrete-steel composite girder bolt loosening monitoring using electromechanical impedance measurements. In: **THIRTEENTH ASCE AEROSPACE DIVISION CONFERENCE ON ENGINEERING, SCIENCE, CONSTRUCTION, AND OPERATIONS IN CHALLENGING ENVIRONMENTS, AND THE 5TH NASA/ASCE WORKSHOP ON GRANULAR MATERIALS IN SPACE EXPLORATION. Earth and Space**. Pasadena, California, 2012. p. 629–634. Disponível em: <<https://doi.org/10.1061/9780784412190.067>>.

XU, C.; ZHANG, W.; WU, C.; XIE, J.; YIN, X.; CHEN, G. An improved method of eddy current pulsed thermography to detect subsurface defects in glass fiber reinforced polymer composites. **Composite Structures**, Elsevier, p. 1–14, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112145>>.

XU, D.; LIU, P.; LI, J.; CHEN, Z. Damage mode identification of adhesive composite joints under hygrothermal environment using acoustic emission and machine learning. **Composite Structures**, Elsevier, v. 211, p. 351–363, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.12.051>>.

YANG, Y.; HU, Y.; LU, Y. Sensitivity of pzt impedance sensors for damage detection of concrete structures. **Sensors**, v. 8, n. 1, p. 327–346, 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/s8010327>>.

YANG, Y.; LIM, Y. Y.; SOH, C. K. Practical issues related to the application of the electromechanical impedance technique in the structural health monitoring of civil structures: I. experiment. **Smart Materials and Structures**, v. 17, n. 3, p. 1–14, 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/0964-1726/17/3/035008>>.

YANG, Y.; LIU, H.; ANNAMDAS, V. G. M.; SOH, C. K. Monitoring damage propagation using pzt impedance transducers. **Smart Materials and Structures**, v. 18, n. 4, p. 1–9, 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/0964-1726/18/4/045003>>.

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

ZAGRAI, A. N.; GIURGIUTIU, V. Health monitoring of aging aerospace structures using the electromechanical impedance method. In: **NDE FOR HEALTH MONITORING AND DIAGNOSTICS. Smart Nondestructive Evaluation for Health Monitoring of Structural and Biological Systems**. San Diego, California, United States, 2002. v. 4702, p. 289–300. Disponível em: <<https://doi.org/10.1117/12.469888>>.

ZHAO, S.; FAN, S.; CHEN, J. Quantitative assessment of the concrete gravity dam damage under earthquake excitation using electro-mechanical impedance measurements. **Engineering Structures**, Elsevier, v. 191, p. 162–178, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.04.061>>.

ZHONG, M.; LIU, B.; LI, C.; WANG, Z.; WEI, D.; ZHOU, B.; DAI, X.; XU, Y. Terahertz spectroscopy and imaging detection of defects in civil aircraft composites. **Journal of Spectroscopy**, v. 2020, p. 1–8, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1155/2020/2312936>>.

ZHOU, S.-W.; LIANG, C.; ROGERS, C. A. An impedance-based system modeling approach for induced strain actuator-driven structures. **Vibration and Acoustics**, v. 118, p. 323–331, 1996. Disponível em: <<https://doi.org/10.1115/1.2888185>>.

ZHU, J.; WANG, Y.; QING, X. Modified electromechanical impedance-based disbond monitoring for honeycomb sandwich composite structure. **Composite Structures**, Elsevier, v. 217, p. 175–185, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.03.033>>.

Apêndice A

Algoritmos de otimização

A.0.1 Evolução Diferencial

O algoritmo de Evolução Diferencial (do inglês *Differential Evolution*) é um método de otimização proposto em 1995 por Storn e Price que utiliza diferenças vetoriais para atualização de cada indivíduo, resultando assim em uma metodologia de concepção conceitual simples, de fácil implementação, com capacidade de estruturação em arquitetura paralela, habilidade de escapar de ótimos locais, e bons resultados são obtidos em aplicações com diferentes graus de complexidade (STORN; PRICE, 1997; VIANA, 2008; LOBATO; STEFFEN JR; SILVA NETO, 2011).

A realização das operações vetoriais é responsável pela geração de candidatos, para isto, realiza diferença ponderada entre dois indivíduos distintos, que é adicionado a um terceiro indivíduo. E apresenta as seguintes operações: inicialização da população, mutação, cruzamento, seleção e critério de parada (LOBATO; STEFFEN JR; SILVA NETO, 2011).

O algoritmo inicia com uma população de indivíduos (vistos como soluções potenciais), em seguida, ocorre o processo de evolução com as operações de mutação e recombinação para geração de uma nova população. Para completar a operação de mutação o DE emprega o operador de cruzamento, para decidir se o vetor gerado anteriormente será ou não aceito na próxima geração. Se o vetor gerado tem melhor valor de função objetivo do que o inicial, ele é usado na próxima geração, caso contrário é mantido na população por mais uma geração. Esse processo é repetido até que o critério de parada seja satisfeito.

Existem diferentes estratégias para a realização do procedimento descrito, que foram representadas por Storn e Price (1997) pela seguinte notação: $DE / x / y / z$, onde DE referencia o

método, x especifica o vetor a ser mutado (RAND ou BEST), y é o número de vetores diferença utilizados e z denota a estratégia de mutação utilizada (BIN - binomial ou EXP - exponencial). Na Fig. A.1 é apresentado um fluxograma da implementação do DE.

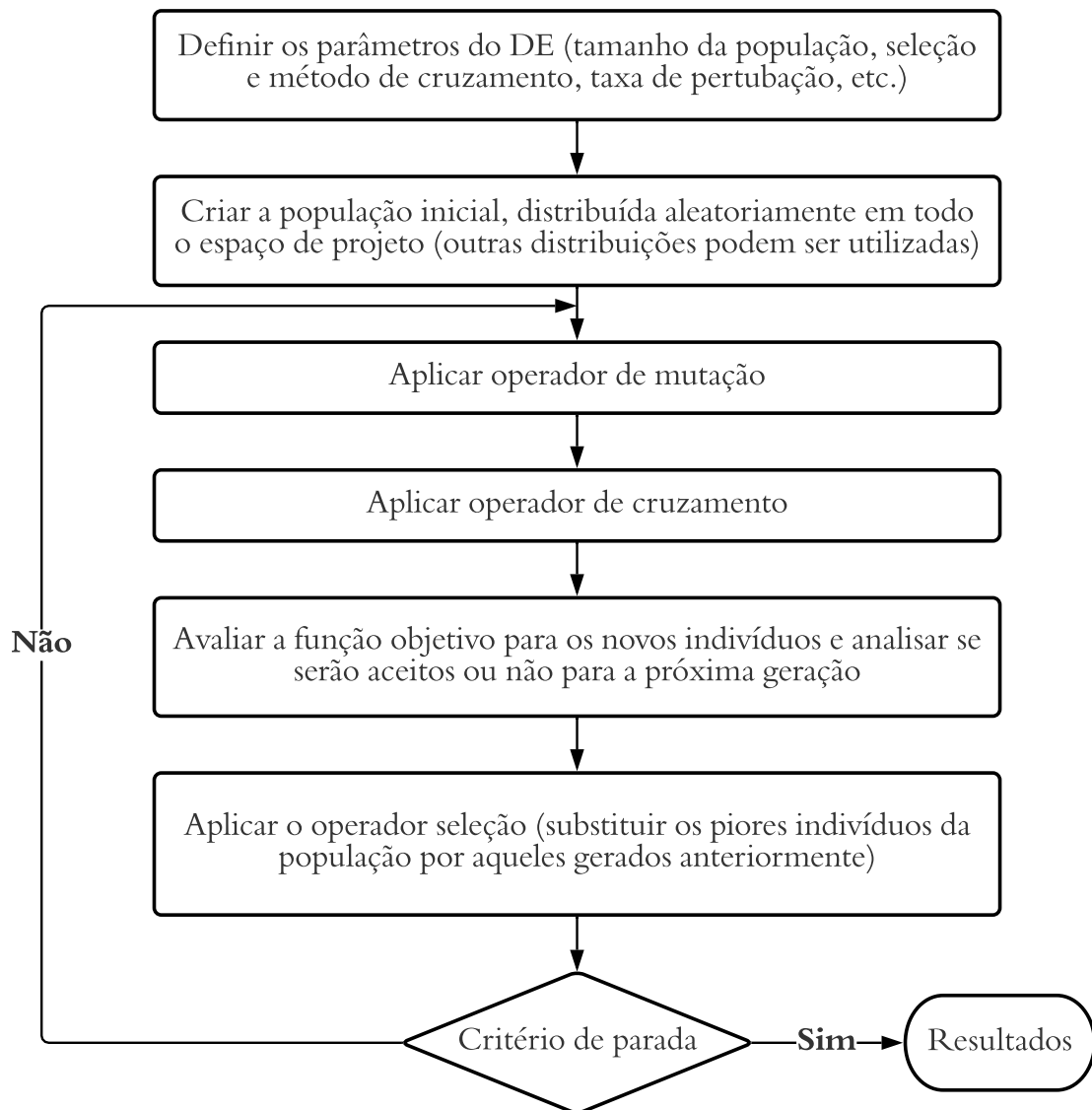


Figura A.1: Fluxograma para implementação computacional da ED (Fonte: Adaptado de Viana (2008)).

A.0.2 Nelder-Mead

O Nelder-Mead é um algoritmo proposto por Lagarias et al. (1998) utilizado para encontrar o valor mínimo ou o máximo de uma função objetivo. É aplicado em problemas de otimização não-lineares para os quais as derivadas são difíceis de serem encontradas. Além disso, usa

um simplex de $n + 1$ vértices em um espaço n -dimensional a fim de explorar a superfície da função objetivo. Possui quatro parâmetros escalares que devem ser especificados: coeficientes de reflexão (ρ), expansão (χ), contração (γ) e encolhimento (σ) e cada um desses coeficientes são utilizados em esquações, para calculo da reflexão, expansão, contração e encolhimento. Os parâmetros citados devem satisfazer as seguintes condições: $\rho > 0$, $\chi > 1$, $\chi > \rho$, $0 < \gamma < 1$ e $0 < \sigma < 1$.

Para sua implementação são escolhidos os vértices iniciais e os valores de todos os coeficientes. Em seguida, os vértices são ordenados do melhor ao pior valor. Calcula o centroide e procura um novo mínimo local com o auxílio das operações de reflexão, contração, expansão e encolhimento. Esse procedimento é repetido até que o critério de parada seja satisfeito.