

# Ciências Exatas e da Terra e a Dimensão Adquirida através da Evolução Tecnológica 3

Jorge González Aguilera  
Alan Mario Zuffo  
(Organizadores)



**Jorge González Aguilera**

**Alan Mario Zuffo**

(Organizadores)

# Ciências Exatas e da Terra e a Dimensão Adquirida através da Evolução Tecnológica 3

Atena Editora  
2019

2019 by Atena Editora  
Copyright © Atena Editora  
Copyright do Texto © 2019 Os Autores  
Copyright da Edição © 2019 Atena Editora  
Editora Executiva: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Antonella Carvalho de Oliveira  
Diagramação: Karine de Lima  
Edição de Arte: Lorena Prestes  
Revisão: Os Autores

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores. Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

### **Conselho Editorial**

#### **Ciências Humanas e Sociais Aplicadas**

Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas  
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília  
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Cristina Gaio – Universidade de Lisboa  
Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia  
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice  
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande  
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

#### **Ciências Agrárias e Multidisciplinar**

Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná  
Prof. Dr. Darllan Collins da Cunha e Silva – Universidade Estadual Paulista  
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará  
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

#### **Ciências Biológicas e da Saúde**

Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina  
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria  
Prof. Dr. José Max Barbosa de Oliveira Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará

Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão  
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande

### **Ciências Exatas e da Terra e Engenharias**

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto  
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

### **Conselho Técnico Científico**

Prof. Msc. Abrãao Carvalho Nogueira – Universidade Federal do Espírito Santo  
Prof. Dr. Adaylson Wagner Sousa de Vasconcelos – Ordem dos Advogados do Brasil/Seccional Paraíba  
Prof. Msc. André Flávio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Maranhão  
Prof.ª Drª Andreza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico  
Prof. Msc. Carlos Antônio dos Santos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Prof. Msc. Daniel da Silva Miranda – Universidade Federal do Pará  
Prof. Msc. Eliel Constantino da Silva – Universidade Estadual Paulista  
Prof.ª Msc. Jaqueline Oliveira Rezende – Universidade Federal de Uberlândia  
Prof. Msc. Leonardo Tullio – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Prof.ª Msc. Renata Luciane Polsaque Young Blood – UniSecal  
Prof. Dr. Welleson Feitosa Gazel – Universidade Paulista

<b>Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)</b>	
C569	Ciências exatas e da terra e a dimensão adquirida através da evolução tecnológica 3 [recurso eletrônico] / Organizadores Jorge González Aguilera, Alan Mario Zuffo. – Ponta Grossa, PR: Atena Editora, 2019. – (Ciências Exatas e da Terra e a Dimensão Adquirida Através da Evolução Tecnológica; v. 3)  Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader Modo de acesso: World Wide Web Inclui bibliografia ISBN 978-85-7247-474-0 DOI 10.22533/at.ed.740191107  1. Ciências exatas e da terra – Pesquisa – Brasil. 2. Tecnologia. I. Aguilera, Jorge González. II. Zuffo, Alan Mario  CDD 509.81
<b>Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422</b>	

Atena Editora  
Ponta Grossa – Paraná - Brasil  
[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)  
contato@atenaeditora.com.br

## APRESENTAÇÃO

A obra “*Ciências Exatas e da Terra e a Dimensão Adquirida através da Evolução Tecnológica vol. 3*” aborda uma publicação da Atena Editora, apresenta, em seus 23 capítulos, conhecimentos tecnológicos e aplicados as Ciências Exatas e da Terra.

Este volume dedicado à Ciência Exatas e da Terra traz uma variedade de artigos que mostram a evolução tecnológica que vem acontecendo nestas duas ciências, e como isso tem impactado a vários setores produtivos e de pesquisas. São abordados temas relacionados com a produção de conhecimento na área da matemática, química do solo, computação, geoprocessamento de dados, biodigestores, educação ambiental, manejo da água, entre outros temas. Estas aplicações visam contribuir no aumento do conhecimento gerado por instituições públicas e privadas no país.

Aos autores dos diversos capítulos, pela dedicação e esforços sem limites, que viabilizaram esta obra que retrata os recentes avanços científicos e tecnológicos nas Ciências Exatas e da Terra, os agradecimentos dos Organizadores e da Atena Editora.

Por fim, esperamos que este livro possa colaborar e instigar mais estudantes e pesquisadores na constante busca de novas tecnologias para a área da Física, Matemática, e na Agronomia e, assim, contribuir na procura de novas pesquisas e tecnologias que possam solucionar os problemas que enfrentamos no dia a dia.

Jorge González Aguilera  
Alan Mario Zuffo

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>1</b>
ACURÁCIA TEMÁTICA DE DADOS GEOESPACIAIS CONFORME A ET-CQDG	
Rodrigo Wanderley de Cerqueira Ana Cláudia Bezerra de Albuquerque Borborema de Andrade Alex de Lima Teodoro da Penha Fábio Dayan Soares de Melo	
<b>DOI 10.22533/at.ed.7401911071</b>	
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>13</b>
UM PANORAMA GERAL SOBRE A CALIBRAÇÃO DINÂMICA DE TRANSDUTORES DE PRESSÃO PIZOELETRICOS	
Flávio Roberto Faciolla Theodoro Maria Luisa Colucci da Costa Reis Carlos D'Andrade Souto	
<b>DOI 10.22533/at.ed.7401911072</b>	
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>20</b>
ANÁLISE DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL ATRAVÉS DE SISTEMAS IMUNOLÓGICOS ARTIFICIAIS	
Rafaela Pereira Segantim Mara Lúcia Martins Lopes Fábio Roberto Chavarette	
<b>DOI 10.22533/at.ed.7401911073</b>	
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>30</b>
ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS DO PROTOCOLO DE ROTEAMENTO RIP: UM ESTUDO DE CASO SOBRE O ASPECTO DE SEGURANÇA NO RIPV2	
Charles Hallan Fernandes dos Santos Lucivânia da Silva Souza Felipe Sampaio Dantas Silva	
<b>DOI 10.22533/at.ed.7401911074</b>	
<b>CAPÍTULO 5</b> .....	<b>40</b>
ANÁLISES DA RESISTÊNCIA À CORROSÃO E ESQUEMAS DE PINTURAS EM CHAPAS DE AÇO ASTM A242 E AÇO CARBONO SAE 1020	
Rafaela Vale Matos	
<b>DOI 10.22533/at.ed.7401911075</b>	
<b>CAPÍTULO 6</b> .....	<b>45</b>
APLICAÇÃO DE ESFERAS DE QUITOSANA E ESFERAS DE QUITOSANA MODIFICADA COM NANOPÁRTÍCULA MAGNÉTICA (MAGNETITA) EM ANÁLISE DE ADSORÇÃO PARA O ÍON METÁLICO CROMO (VI)	
Andréa Claudia Oliveira Silva Maria José de Oliveira Pessoa	
<b>DOI 10.22533/at.ed.7401911076</b>	

<b>CAPÍTULO 7</b> .....	<b>55</b>
AVALIAÇÃO METROLÓGICA DE ANALISADORES DE QUALIDADE DE ENERGIA	
Rodrigo Rodrigues Nascimento Zampilis	
Marcelo Britto Martins	
<b>DOI 10.22533/at.ed.7401911077</b>	
<b>CAPÍTULO 8</b> .....	<b>62</b>
AXIOMAS FUNDAMENTAIS EM SISTEMAS DE MONITORAMENTO: UMA ANÁLISE EXPERIMENTAL PARA O MÉTODO DA IMPEDÂNCIA ELETROMECCÂNICA	
Caio Henrique Rodrigues	
Guilherme Silva Bergamim	
<b>DOI 10.22533/at.ed.7401911078</b>	
<b>CAPÍTULO 9</b> .....	<b>75</b>
VISÃO CEGA	
Vitoria Camargo da Silva	
Erinaldo Sanches Nascimento	
Fabiana Calisto Trevisan	
José Roberto Parra	
<b>DOI 10.22533/at.ed.7401911079</b>	
<b>CAPÍTULO 10</b> .....	<b>86</b>
CÉU ACESSÍVEL: APLICATIVO NA PLATAFORMA ANDROID PARA O ENSINO DE ASTRONOMIA PARA PESSOAS COM DEFICIÊNCIA VISUAL	
Ana Carolina Sampaio Frizzera	
Danielli Veiga Carneiro Sondermann	
Athyla Caetano	
Giovana Dewes Munari	
Caroline Azevedo Rosa	
Péricles José Ferreira	
Ronaldo Leffler	
Gabriel Barcellos Kretli Lopes	
<b>DOI 10.22533/at.ed.74019110710</b>	
<b>CAPÍTULO 11</b> .....	<b>97</b>
DETERMINAÇÃO TEÓRICA DO TEMPO DE ACELERAÇÃO EM 30 METROS PARA UM VEÍCULO BAJA SAE A PARTIR DO PRINCÍPIO DO IMPULSO	
Daiane Sampaio Fernandes	
Mateus Coutinho de Moraes	
Miguel Ângelo Menezes	
<b>DOI 10.22533/at.ed.74019110711</b>	
<b>CAPÍTULO 12</b> .....	<b>105</b>
DILATAÇÃO DE VEÍCULOS TANQUE RODOVIÁRIO	
Luciano Bruno Faruolo	
Edisio Alves de Aguiar Junior	
<b>DOI 10.22533/at.ed.74019110712</b>	

<b>CAPÍTULO 13</b> .....	<b>110</b>
EFEITO DA VARIAÇÃO DO VALOR DA DENSIDADE LATERAL RELACIONADA À SEPARAÇÃO GEOIDE-QUASEGEOIDE NA REGIÃO DE PORTO ALEGRE RS – ESTUDO DE CASO	
Roosevelt De Lara Santos Jr.	
<b>DOI 10.22533/at.ed.74019110713</b>	
<b>CAPÍTULO 14</b> .....	<b>118</b>
ELECTROCHEMICAL SENSING OF OH RADICALS AND RADICAL SCAVENGERS BASED ON POLY(METHYLENE BLUE)-MODIFIED ELECTRODE	
Maurício Hilgemann	
Marcelo Barcellos da Rosa	
<b>DOI 10.22533/at.ed.74019110714</b>	
<b>CAPÍTULO 15</b> .....	<b>131</b>
ESTUDO DA VIABILIDADE ECONÔMICA DE MICRO GERAÇÃO RESIDENCIAL EM UM AMBIENTE MICRO REDE, CONSIDERANDO DIFERENTES CENÁRIOS	
Luiz Guilherme Piccioni de Almeida	
<b>DOI 10.22533/at.ed.74019110715</b>	
<b>CAPÍTULO 16</b> .....	<b>141</b>
EXPRESSÃO GRÁFICA E OFICINAS PEDAGÓGICAS: CONTRIBUIÇÕES PARA A APRENDIZAGEM DE MATEMÁTICA BÁSICA	
Alessandra Assad Angieski	
Heliza Colaço Góes	
Davi Paula da Silva	
<b>DOI 10.22533/at.ed.74019110716</b>	
<b>CAPÍTULO 17</b> .....	<b>155</b>
LOGÍSTICA DA DESTINAÇÃO FINAL DOS RESÍDUOS SÓLIDOS DE SAÚDE DOS PRINCIPAIS HOSPITAIS DE ARACAJU/SE	
Ana Lúcia Oliveira Filipin	
Cleverton dos Santos	
Izabel Cristina Gomes de Oliveira	
Ana Sophia Oliveira Filipin	
<b>DOI 10.22533/at.ed.74019110717</b>	
<b>CAPÍTULO 18</b> .....	<b>161</b>
LUNAPPTICO: SOFTWARE DE TECNOLOGIA ASSISTIVA UTILIZADO NA COMUNICAÇÃO DE CRIANÇAS AUTISTAS DO ESTADO DO RN	
Elizeu Sandro da Silva	
Alyson Ricardo De Araújo Barbosa.	
Joêmia Leilane Gomes de Medeiros	
Welliana Benevides Ramalho	
Andrezza Cristina da Silva Barros Souza	
<b>DOI 10.22533/at.ed.74019110718</b>	

<b>CAPÍTULO 19</b> .....	<b>180</b>
MODELAGEM DE UM SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA MÓVEL COLABORATIVO PARA DEFICIENTES FÍSICOS Sivoney Pinto Dias Helder Guimarães Aragão <b>DOI 10.22533/at.ed.74019110719</b>	
<b>CAPÍTULO 20</b> .....	<b>194</b>
MODELAGEM E PROGRAMAÇÃO DE UMA PLATAFORMA DE STEWART Rodolfo Gabriel Pabst Roberto Simoni Maurício de Campos Porath Milton Evangelista de Oliveira Filho Antônio Otaviano Dourado <b>DOI 10.22533/at.ed.74019110720</b>	
<b>CAPÍTULO 21</b> .....	<b>207</b>
SISTEMA DE NOTIFICAÇÕES POR MENSAGENS DE CELULAR PARA MONITORAMENTO EM ATIVOS DE REDE César Eduardo Guarienti Igor Breno Estácio Dutra de Oliveira Thiago H. da C. Silva Raphael de Souza Rosa Gomes <b>DOI 10.22533/at.ed.74019110721</b>	
<b>CAPÍTULO 22</b> .....	<b>213</b>
MONTAGEM DE UM ARRANJO EXPERIMENTAL DIDÁTICO PARA O ESTUDO DA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDÂNCIA ELETROQUÍMICA Ernando Silva Ferreira Ricardo Macedo Borges Boaventura Juan Alberto Leyva Cruz <b>DOI 10.22533/at.ed.74019110722</b>	
<b>CAPÍTULO 23</b> .....	<b>225</b>
O NOVO (E ATUAL) SI E O SEU IMPACTO NA METROLOGIA ELÉTRICA NO BRASIL Regis Pinheiro Landim Helio Ricardo Carvalho <b>DOI 10.22533/at.ed.74019110723</b>	
<b>SOBRE OS ORGANIZADORES</b> .....	<b>240</b>

## AXIOMAS FUNDAMENTAIS EM SISTEMAS DE MONITORAMENTO: UMA ANÁLISE EXPERIMENTAL PARA O MÉTODO DA IMPEDÂNCIA ELETROMECHANICA

### Caio Henrique Rodrigues

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Engenharia de Bauru, Departamento de Engenharia Elétrica.  
Bauru – São Paulo

### Guilherme Silva Bergamim

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Engenharia de Bauru, Departamento de Engenharia Elétrica.  
Bauru – São Paulo

**RESUMO:** O campo de pesquisa em monitoramento de integridade estrutural, ou SHM – *structural health monitoring* – tornou-se relevante nos últimos anos, uma vez que o monitoramento de estruturas complexas em uso pela população permite a detecção de dano estrutural em estágio inicial, levando a uma redução dos custos com manutenção e, principalmente, a um aumento de segurança. Os sistemas de SHM apresentam algumas características práticas que devem ser consideradas no monitoramento de estruturas complexas. Essas características ocorrem independentemente do método utilizado para a detecção de dano e são conhecidas como axiomas fundamentais de sistemas de SHM. Assim, esta pesquisa teve como objetivo realizar uma análise experimental da técnica de detecção de dano baseada na impedância

eletromecânica para a constatação de tais axiomas. Testes experimentais foram realizados em uma estrutura de alumínio sob a influência de ruído de várias intensidades e a detecção de danos simulados por meio de adição de massa foi analisada utilizando-se transdutores piezoelétricos de diferentes tamanhos. Os resultados experimentais permitiram constatar os principais axiomas relacionados à sensibilidade, faixa de frequência de excitação do transdutor e vulnerabilidade a distúrbios externos como ruído.

**PALAVRAS-CHAVE:** transdutores piezoelétricos, detecção de dano, impedância eletromecânica, axiomas.

### FUNDAMENTAL AXIOMS OF STRUCTURAL HEALTH MONITORING: AN EXPERIMENTAL ANALYSIS FOR THE METHOD OF ELECTROMECHANICAL IMPEDANCE

**ABSTRACT:** Structural Health Monitoring or SHM has become relevant in recent years, since the monitoring of complex structures in use by the population allows the detection of initial structural damage, leading to a reduction in maintenance costs and, above all, an increase in security. SHM systems present some practical features that should be considered when monitoring complex structures. These

characteristics occur independently of the method used for the detection of damage and are known as fundamental axioms of SHM systems. Thus, this research had the objective of performing an experimental analysis of the damage detection technique based on electromechanical impedance for the verification of such axioms. Experimental tests were performed in an aluminum structure under the influence of noise of various intensities and the detection of simulated damages by addition of mass was analyzed using piezoelectric transducers of different sizes. The experimental results allowed to verify the main axioms related to sensitivity, frequency range of excitation of the transducer and vulnerability to external disturbances as noise.

**KEYWORDS:** piezoelectric transducers, SHM, damage detection, electromechanical impedance, axioms.

## 1 | INTRODUÇÃO

Diversas técnicas de Monitoramento de Integridade Estrutural têm sido extensivamente estudadas nos últimos anos, pois há um interesse crescente nesse campo de estudo por parte das indústrias e de pesquisadores, a fim de antecipar problemas e realizar procedimentos de manutenção preventiva. Sistemas de SHM, do termo em inglês *Structural Health Monitoring*, permitem ao engenheiro/pesquisador coletar uma grande quantidade de informações sobre a estrutura que está sendo analisada, a localização das falhas e, até mesmo, a severidade de uma falha (LI *et al.*, 2016).

Ao analisar a integridade de uma estrutura, é desejável que o procedimento seja o menos invasivo possível. Portanto, a necessidade de metodologias não destrutivas, também conhecida como NDE (*nondestructive evaluation*) ou teste não destrutivo (*nondestructive testing -NDT*), é obrigatória (FOX *et al.*, 2017). Existem várias técnicas NDT que são utilizadas pelos pesquisadores, no entanto, o método que é aplicado nesta pesquisa é a técnica de impedância eletromecânica (ALBAKRI; TARAZAGA, 2017), também conhecida como EMI, do termo em inglês *Electro-Mechanical Impedance*. O método EMI desempenha um papel importante em SHM por causa de sua simplicidade e também por seus transdutores piezoelétricos de dimensão reduzida que, por sua vez, quando fixados à superfície da estrutura que está sendo analisada, suas propriedades físicas não mudam de forma significativa.

Esse método é baseado no princípio do efeito piezoelétrico (MEITZLER *et al.*, 1988). Basicamente, esse fenômeno fornece um acoplamento eletromecânico entre o sensor e a estrutura. Portanto, várias informações sobre as propriedades mecânicas da estrutura podem ser estudadas apenas analisando-se as propriedades elétricas do transdutor.

Os transdutores usados mais frequentemente em estruturas críticas como pontes, barragens e oleodutos, por exemplo, são as cerâmicas convencionais de PZT (*Pb-lead zirconate titanate* – titanato zirconato de chumbo) e o MFC (*macro-*

*fiber composite* – compósito de microfibra). No entanto, estes transdutores não são facilmente obtidos porque, normalmente precisam ser importados e esse processo de compra envolve altos níveis de burocracia e custo. A melhor solução para superar os problemas mencionados é usar os diafragmas piezoelétricos, também conhecidos como *buzzers piezoelétricos*, que por sua vez são facilmente encontrados e têm um custo baixo. Estudos recentes (FREITAS *et al.*, 2017) indicaram que esses dispositivos apresentam bons resultados para a técnica de impedância eletromecânica.

## 2 | OBJETIVO

Durante as últimas duas décadas, o campo de estudo sobre SHM se maturou ao ponto de que alguns axiomas fundamentais ou princípios gerais foram desenvolvidos e, atualmente, existem sete axiomas já propostos, que são válidos para qualquer método de detecção de dano estrutural. O objetivo desta pesquisa foi realizar uma constatação experimental dos principais axiomas quando a detecção de dano é baseada no método da impedância eletromecânica (EMI). Os axiomas constatados são aqueles relacionados com a faixa de frequência de excitação do transdutor piezoelétrico, a sensibilidade ao dano estrutural e a vulnerabilidade a distúrbios externos como ruído.

## 3 | A TECNICA DA IMPEDÂNCIA ELETROMECÂNICA NA DETECÇÃO DE DANOS

De acordo com os estudos reportados na literatura, o método EMI consiste no processo de comparação entre duas assinaturas de impedância elétrica de um transdutor piezoelétrico fixado na estrutura a ser monitorada (LIANG, SUN, ROGERS, 1994). Essa comparação é feita usando-se uma assinatura de impedância obtida para a estrutura quando esta ainda se encontra em boas condições (*baseline*) e outra assinatura obtida depois da estrutura danificada. O transdutor, que neste trabalho consistiu de um diafragma piezoelétrico, opera simultaneamente como um atuador e como um sensor. Portanto, enquanto o transdutor é excitado, devido ao efeito piezoelétrico, pode ser determinada uma relação entre a impedância mecânica da estrutura monitorada e a impedância elétrica do transdutor. O modelo mais comumente utilizado para determinar a impedância elétrica do transdutor ( $Z_E(\omega)$ ) é o modelo unidimensional (LIANG, SUN, ROGERS, 1994), cuja equação é dada por

$$Z_E(\omega) = \frac{1}{j\omega C} \left( 1 - \frac{d_{31}^2}{s_{11}^E \epsilon_{33}^T} \frac{Z_S(\omega)}{Z_S(\omega) + Z_P(\omega)} \right)^{-1} \quad (1)$$

sendo  $Z_E(\omega)$  a impedância elétrica do transdutor,  $Z_S(\omega)$  a impedância mecânica da estrutura monitorada,  $Z_P(\omega)$  a impedância mecânica do transdutor,  $\omega$  a frequência angular,  $C$  a capacitância do transdutor,  $d_{31}^2$ ,  $s_{11}^E$  e  $\epsilon_{33}^T$  são as constantes piezoelétrica, de elasticidade e dielétrica, como definidas anteriormente, mas considerando-se agora

uma condição unidimensional, e  $j$  a unidade imaginária.

De acordo com a Equação (1), pequenas variações na impedância mecânica da estrutura ( $Z_s(\omega)$ ), que podem ser causadas por qualquer tipo de dano, são detectadas, pois também implicam em uma variação da impedância elétrica do transdutor ( $Z_E(\omega)$ ). Assim, um dano estrutural pode ser detectado por meio da medição e análise da impedância elétrica do transdutor em uma banda de frequência apropriada. Na Figura 1 apresenta-se a configuração básica do método

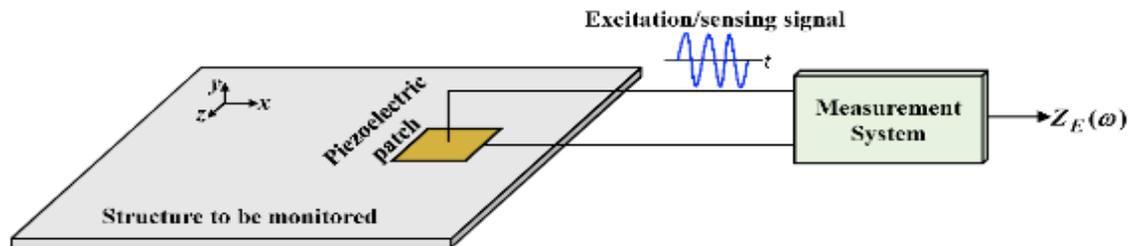


Figura 1 - Princípio do método EMI

Fonte: Adaptado de Budoya et al. (2018)

De acordo com a Figura 1, o transdutor piezoelétrico, que está fixado na estrutura a ser monitorada, recebe um sinal de excitação do sistema de medição. O sistema faz a aquisição do sinal de resposta correspondente e fornece a impedância elétrica do transdutor. Normalmente, esse processo é realizado duas vezes para se obter duas assinaturas de impedância, uma correspondente à estrutura íntegra (*baseline*) e outra correspondente à estrutura danificada. Como um exemplo, na Figura 2 pode-se observar duas assinaturas de impedâncias distintas e sobrepostas na mesma faixa de frequência, sendo que uma assinatura é referente à estrutura íntegra e, a outra, à estrutura danificada. É possível verificar que há uma diferença significativa entre as duas assinaturas.

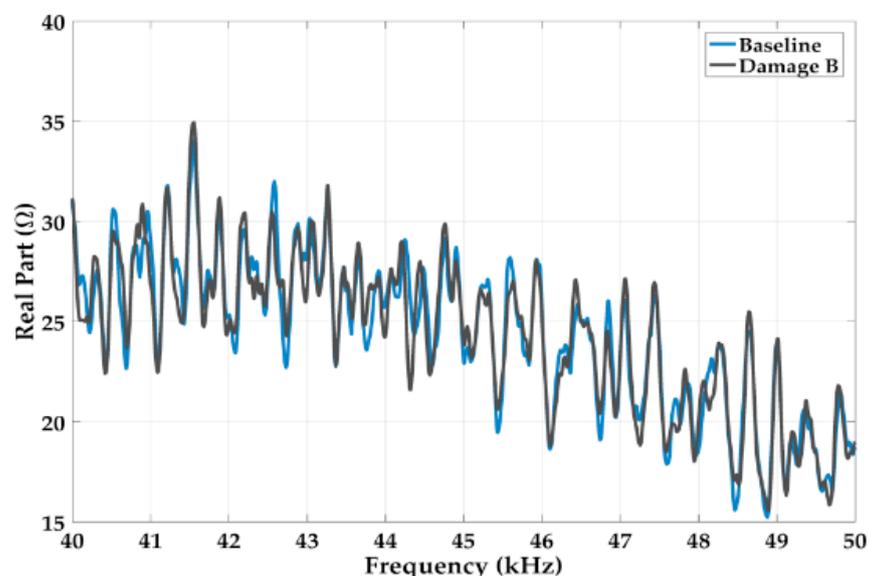


Figura 2 – Variações na assinatura de impedância elétrica causadas por danos estruturais

Uma comparação entre as duas assinaturas de impedância pode ser feita com base em índices de dano estatísticos. Um dos índices mais comumente utilizados para quantificar esse contraste entre duas assinaturas de impedância é conhecido como RMSD (*root-mean-square deviation* – desvio da raiz média quadrática), que é baseado na norma euclidiana, calculado como (FARRAR; WORDEN, 2013)

$$RMSD = \sum_n^N \sqrt{\frac{(Z_{n,d} - Z_{n,h})^2}{Z_{n,h}^2}} \quad (2)$$

sendo que  $Z_{n,h}$  e  $Z_{n,d}$  são, respectivamente, as assinaturas de impedância elétrica (módulo, parte real ou parte imaginária) do transdutor obtidas para a estrutura íntegra e após a ocorrência de dano,  $n$  indica o passo de frequência e  $N$  o total de frequências analisadas.

Outro índice bastante reportado na literatura e que também foi utilizado neste trabalho é o CCDM (*correlation coefficient deviation metric* – métrica do desvio do coeficiente de correlação), que é baseado no coeficiente de correlação e calculado como (MARQUI et al., 2008)

$$CCDM = 1 - \frac{cov[Z_{n,h}, Z_{n,d}]}{\sigma_1 \sigma_2} \quad (3)$$

sendo que  $cov$  indica a covariância entre as duas assinaturas ( $Z_{n,h}$  e  $Z_{n,d}$ ) definidas acima para a mesma faixa de frequência do índice RMSD,  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  indicam o desvio padrão de cada assinatura.

#### 4 | AXIOMAS FUNDAMENTAIS EM SISTEMAS DE MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL

Os axiomas fundamentais em sistema de SHM (WORDEN *et al.*, 2007) foram formulados com base na observação da extensa literatura sobre esses sistemas nas últimas décadas, independentemente da técnica utilizada para a detecção de dano estrutural. Para melhor clareza, esses axiomas são apresentados novamente a seguir:

**Axioma I:** Todos os materiais têm falhas ou defeitos inerentes. Portanto, não existe estrutura íntegra, mas em um estado considerado íntegro;

**Axioma II:** A avaliação de dano em uma estrutura requer uma comparação entre dois estados. Portanto, é impossível detectar dano sem que dados sejam coletados

quando a estrutura está em um estado considerado íntegro e sejam usados como uma referência, embora muitos estudos reportados na literatura (OVERLY *et al.*, 2009, LU *et al.*, 2017) indiquem o contrário;

**Axioma III:** A detecção e a localização de um dano podem ser feitas em um modo de aprendizagem não supervisionada, mas a identificação do tipo de dano presente e da sua gravidade geralmente só pode ser feita em um modo de aprendizagem supervisionada.

**Axioma IVa:** Os sensores não podem detectar dano. A extração de características usando processamento de sinais e classificação estatística é necessária para converter os dados dos sensores em informações úteis sobre o dano;

**Axioma IVb:** Sem uma forma inteligente de extração de características, quanto mais sensível ao dano for um sistema de SHM, mais sensível também será às variações das condições ambientais e operacionais da estrutura;

**Axioma V:** As escalas de comprimento e de tempo associadas com o surgimento e a evolução de um dano ditam as propriedades exigidas do sistema de SHM para sua detecção;

**Axioma VI:** Há uma relação de compromisso entre a sensibilidade ao dano de um algoritmo e a sua capacidade de rejeição a ruído;

**Axioma VII:** O tamanho do dano que pode ser detectado a partir das mudanças dinâmicas da estrutura é inversamente proporcional à faixa de frequência de excitação do sistema de medição. 13

Nesta pesquisa procurou-se constatar experimentalmente os Axiomas IVb, VI e VII. Os materiais e métodos utilizados para essa análise são descritos na próxima seção.

## 5 | MATERIAIS E MÉTODOS

Os testes experimentais foram realizados em uma placa de alumínio, que foi considerada como estrutura monitorada em um sistema de SHM.

Na Figura 3 pode-se observar a estrutura na qual todos os ensaios foram realizados; trata-se de uma placa de alumínio de dimensões 500 mm x 1000 mm x 2 mm. Essa chapa foi apoiada na mesa com o auxílio de estruturas de borracha para que não houvesse um contato direto com a mesa. Foram escolhidos três pontos na linha média da placa para fixar os transdutores (diafragmas piezoelétricos ou *buzzers*) e outros dois nos quais os danos foram acoplados, assim como mostrado na figura.

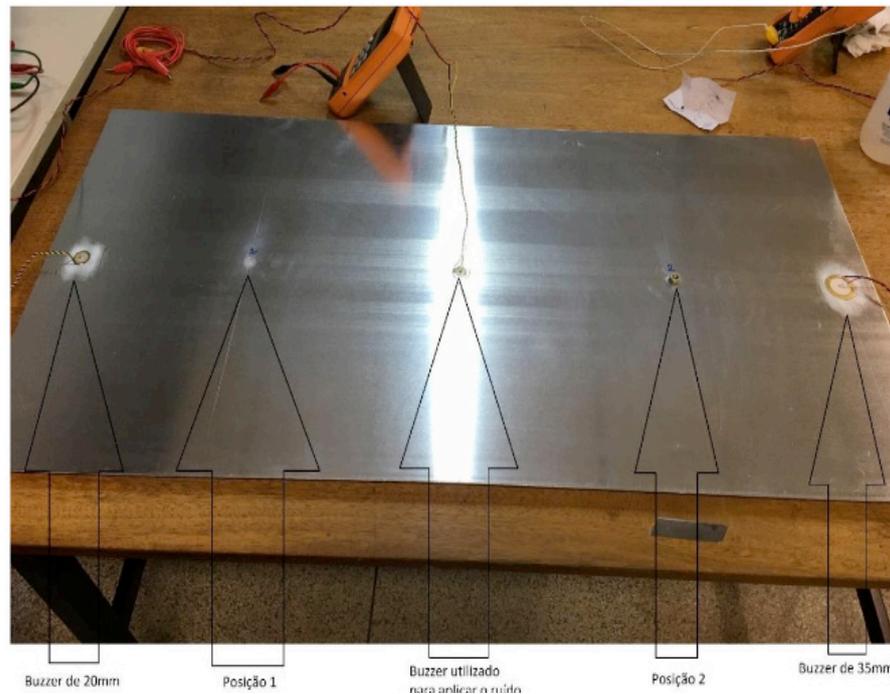


Figura 3 – Estrutura de alumínio utilizada nos ensaios

Fonte: Próprio autor

Com o objetivo de analisar os Axiomas IVb, VI e VII, foram utilizados dois diafragmas com tamanhos diferentes (20 mm e 35mm de diâmetro externo), o que possibilitou obter sensibilidades diferentes ao dano estrutural. Tanto o diafragma de 20 mm quanto o de 35 mm posicionados próximos às laterais da placa foram utilizados para coletar as assinaturas de impedância, porém o diafragma localizado no centro da chapa (20 mm) foi responsável por gerar ruído. Foi gerado um ruído branco pseudoaleatório com amplitudes de 0 Vp (sem ruído), 0.1 Vp, 0.5 Vp e 1.0 Vp. A geração de ruído foi necessária para confrontar a sensibilidade ao dano estrutural com a sensibilidade a distúrbios externos (ruído), verificando-se assim os Axiomas IVb e VI.

Para simular os danos estruturais foram utilizados dois tipos diferentes de massas metálicas (porcas de parafuso) que foram fixadas na estrutura a ser analisada, uma com dimensões de aproximadamente 4 mm x 2 mm (dano pequeno) e outra com dimensões de aproximadamente 10 mm x 4 mm (dano grande). Esse procedimento causa uma variação na impedância mecânica da estrutura como se fosse um dano real, mas com a vantagem de não danificar permanentemente a placa. Os diafragmas piezoelétricos e as massas metálicas para a simulação de danos estruturais foram fixados na placa por meio de um adesivo instantâneo de alta rigidez a base de cianoacrilato.

O sistema de medição utilizado é baseado em dispositivo de aquisição de dados (DAQ) multifuncional e o software LabVIEW (BUDOYA; BAPTISTA, 2018). O DAQ utilizado foi o modelo USB-6366 BNC da National Instruments. Os transdutores foram excitados com um sinal *chirp* com amplitude de 1 V e as assinaturas de impedância foram obtidas na faixa de frequência de 0 a 550 kHz com passos de 2 Hz e com uma taxa de amostragem de 2MS/s.

Na Figura 4 apresenta-se uma visão geral do arranjo experimental utilizado.

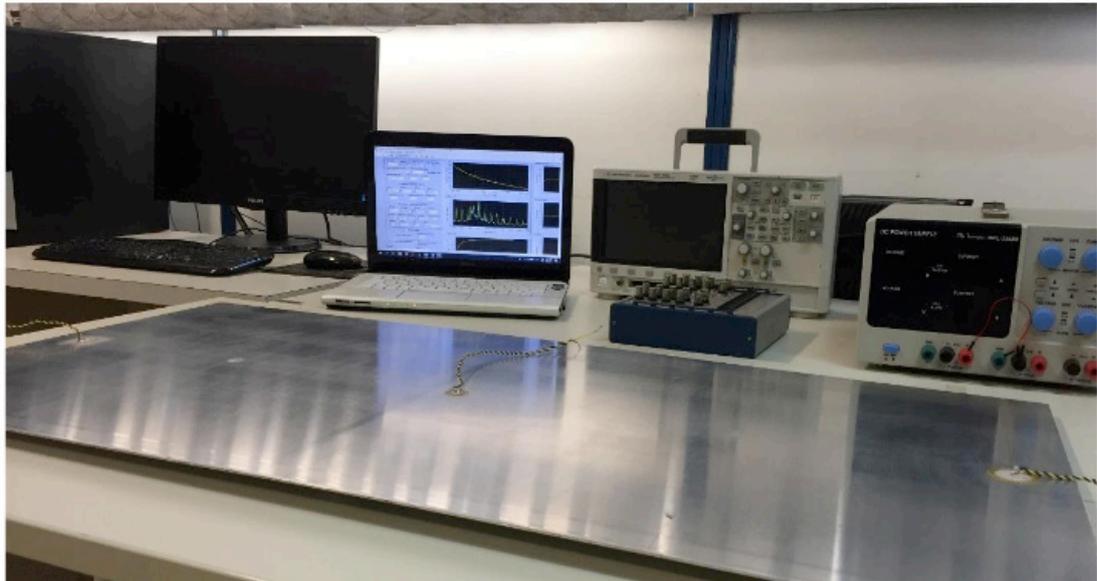


Figura 4 – Visão geral do arranjo experimental

Fonte: Próprio autor

A seguir faz-se uma descrição da ordem lógica que foi utilizada para coletar os dados para o transdutor de 20 mm:

1. Coletar a assinatura de impedância da estrutura saudável e sem ruído;
2. Coletar as assinaturas de impedância da estrutura saudável aplicando todos os ruídos estabelecidos um a um;
3. Colocar o dano pequeno na posição 1 (marcada na chapa);
4. Coletar as assinaturas de impedância sem ruído e com dano pequeno;
5. Coletar as assinaturas de impedância com todos os ruídos estabelecidos e com dano pequeno;
6. Retirar o dano pequeno da estrutura e repetir os passos 1 e 2;
7. Fixar o dano pequeno da posição 2;
8. Repetir os passos 4, 5 e 6;
9. Colocar o dano grande na posição 1;
10. Repetir os passos de 4 a 8 para o dano grande.

Depois, todos esses 10 passos descritos anteriormente foram repetidos para o transdutor de 35 mm. É importante mencionar que durante todos os ensaios a temperatura foi praticamente constante em torno de 30 °C, controlada por um condicionador de ar. Isso evita os efeitos da variação da temperatura nas assinaturas de impedância elétrica.

De posse de todos os dados obtidos nos ensaios, foi utilizado o software MATLAB para o cálculo dos índices de dano RMSD e CCDM, indicados nas Equações (2) e (3), respectivamente, para diferentes subfaixas de frequência. Os resultados experimentais são analisados e discutidos na próxima seção.

## 6 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para todas as condições experimentais, isto é, para os dois tamanhos de transdutores, as duas intensidades de ruído e as diferentes condições de dano estrutural (tamanho e posição), foram coletadas as assinaturas de impedância de referência (*baseline*) para o cálculo dos índices RMSD e CCDM, indicados nas Equações (2) e (3), respectivamente. O uso de uma assinatura de referência é necessário para a detecção de dano estrutural, como afirma o Axioma II. Os índices foram calculados utilizando-se a parte real e a parte imaginária da impedância. Por motivos de objetividade os índices calculados com o módulo da impedância não são apresentados neste trabalho, uma vez que os resultados são apenas uma combinação dos resultados obtidos com as partes real e imaginária, além disso serão mostrados apenas os resultados relevantes.

Os valores dos índices RMSD foram calculados em subfaixas de 10 kHz, o que permite analisar o comportamento do método de detecção de dano em relação à frequência de excitação do transdutor e da estrutura.

Na figura 5 pode-se observar que os resultados indicam que o sistema conseguiu não apenas detectar, mas também quantificar o dano estrutural, pois os valores dos índices são mais baixos para o dano pequeno e mais elevados para o dano grande. O ruído tem influência significativa na detecção de dano. Como pode ser observado, na presença de ruído, os valores dos índices aumentam significativamente, mesmo a estrutura estando saudável, o que pode prejudicar o correto diagnóstico da estrutura. Abaixo foram apresentados os resultados para o dano localizado na posição 1, utilizando o transdutor de 20 mm para fazer as medições e considerando apenas a parte real da impedância.

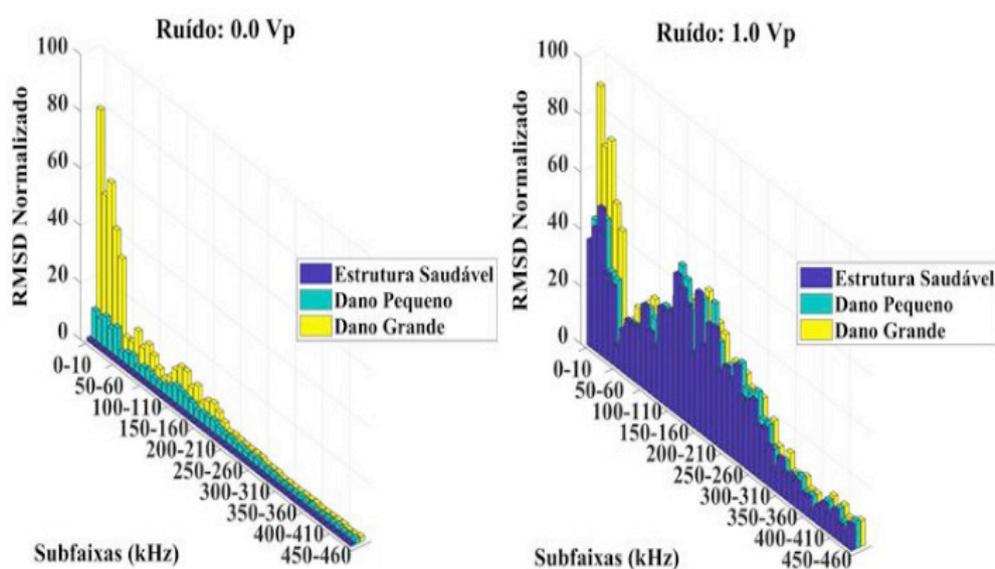


Figura 5- Resultados obtidos para o transdutor de 20mm, posição 1 de dano, parte real da impedância

Fonte: Próprio autor

Os resultados obtidos para o dano localizado na posição 1, utilizando-se o transdutor de 20 mm e considerando-se apenas a parte imaginária da impedância são apresentados na Figura 6. Esses resultados indicam que o uso da parte imaginária da impedância torna o sistema menos sensível ao dano estrutural, pois os valores dos índices foram menores do que os obtidos utilizando-se a parte real, como mostrado anteriormente na Figura 5. Por outro lado, os valores dos índices obtidos para a estrutura íntegra e na presença de ruído também foram menores, o que indica que o sistema também ficou menos sensível ao ruído. Porém esse tipo de comportamento só pode ser observado em frequências de 0 a 110 kHz, pois para as demais faixas os índices ficaram muito próximos uns dos outros, talvez isso signifique que nessa configuração as demais faixas de frequência não sejam confiáveis. Esses resultados estão de acordo com o Axiomas IVb e VI. Portanto, sistemas de SHM baseados no método da impedância que têm como objetivo a detecção de danos pequenos precisam obrigatoriamente de uma técnica de compensação para os efeitos de ruído e outros distúrbios externos.

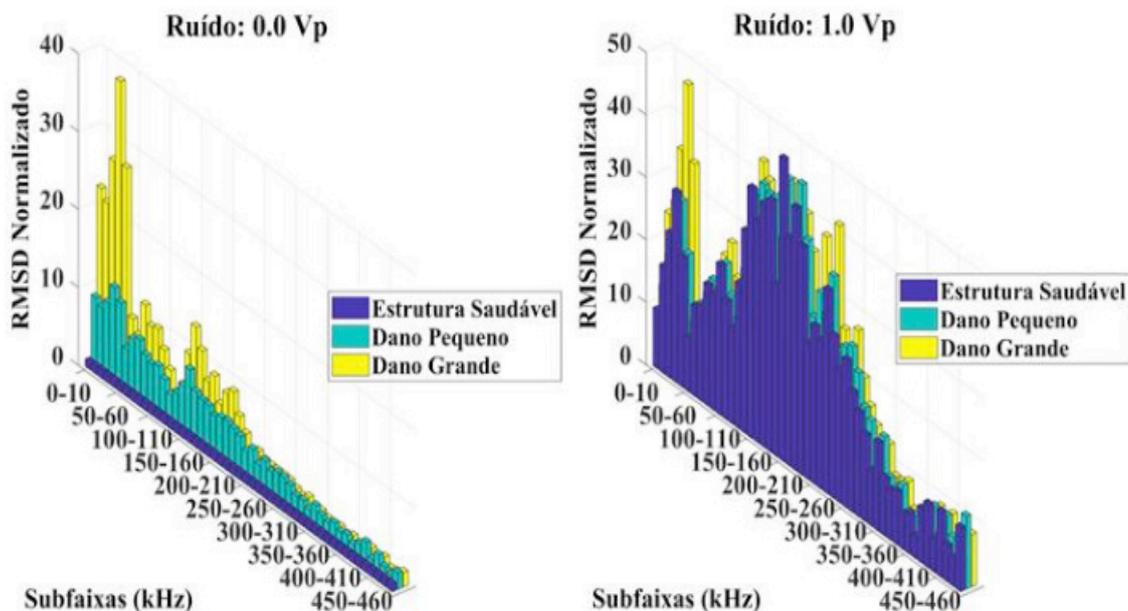


Figura 6- Resultados obtidos para o transdutor de 20mm, posição 1 de dano, parte imaginária da impedância

Fonte: Próprio autor

Na Figura 7 e 8 são mostrados os resultados obtidos para o transdutor de 35 mm para que se possa fazer uma comparação com os resultados obtidos anteriormente.

De acordo com os resultados apresentados nas Figuras 8 e 9, o comportamento do índice RMSD obtido com o transdutor de 35 mm foi semelhante ao comportamento do índice obtido com o transdutor de 20 mm. No entanto, no geral, observa-se claramente que os valores obtidos com o transdutor de 35 mm são mais baixos, indicando uma menor sensibilidade ao dano estrutural para esse transdutor (considerando-se dano localizado na mesma posição).

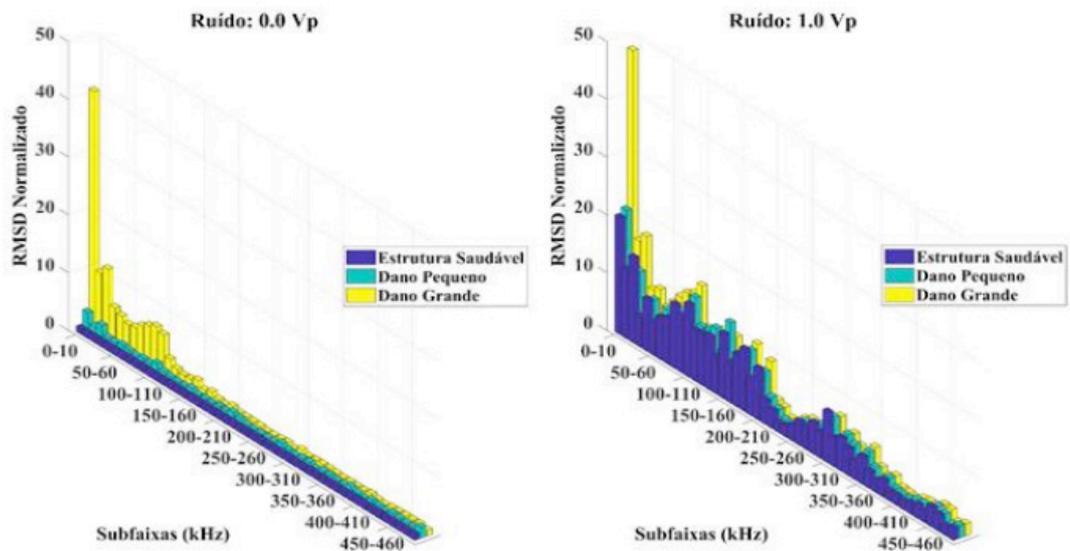


Figura 7- Resultados obtidos para o transdutor de 35mm, posição 2 de dano, parte real da impedância

Fonte: Próprio autor

Essa menor sensibilidade ao dano estrutural obtida para o transdutor de 35 mm é explicada pelo seu tamanho maior e, conseqüentemente, maior capacitância. Quanto maior a capacitância, menor a sua reatância para uma dada frequência e isso implica em uma menor variação na impedância elétrica do transdutor devido a dano estrutural.

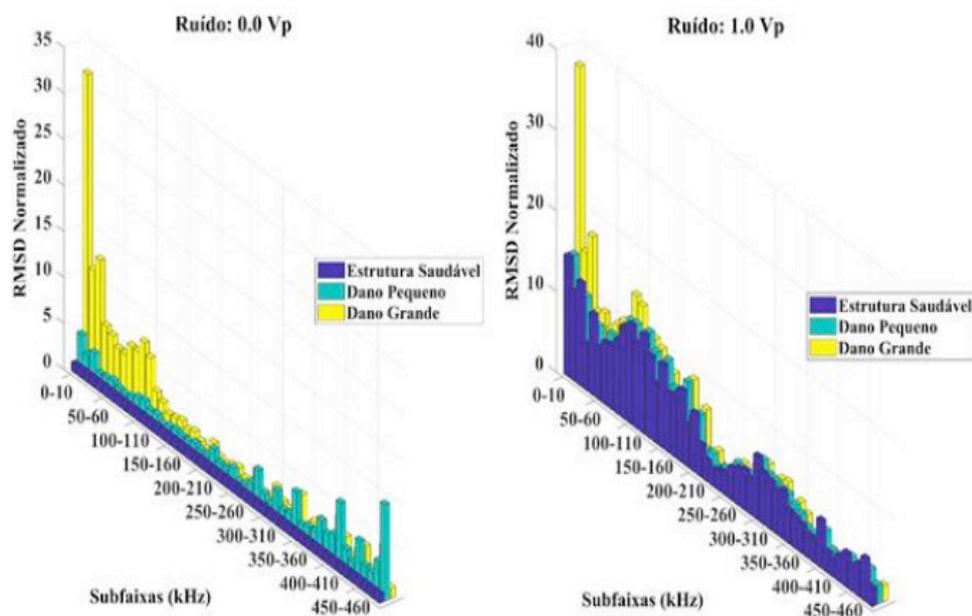


Figura 8- Resultados obtidos para o transdutor de 35mm, posição 2 de dano, parte imaginária da impedância

Fonte: Próprio autor.

Os resultados obtidos para o transdutor de 35 mm em comparação com o transdutor de 20 mm reforçam os Axiomas IVb e VI. Embora o transdutor de 20 mm seja mais sensível ao dano estrutural, sua sensibilidade também é maior ao ruído.

## 7 | CONCLUSÃO

Por meio da realização deste Projeto de Pesquisa foi possível, de fato, constatar a veracidade de alguns dos axiomas em Sistemas de Monitoramento de Integridade Estrutural. Os Axiomas IVb e VI, por exemplo, basicamente anunciam que um sistema mais sensível à detecção de dano também é mais afetado pela presença de ruído e outro distúrbio externo e isso foi possível de ser verificado, pois os resultados indicaram que o diafragma piezoelétrico de 20 mm se mostrou mais sensível a detecção de dano, porém, esse transdutor também foi o que teve seus resultados mais prejudicados quando perturbações externas (ruído) foram impostas ao sistema.

Também foram constatados os Axiomas V e VII que anunciam, respectivamente, que “as escalas de comprimento e de tempo associadas com o surgimento e a evolução de um dano ditam as propriedades exigidas do sistema de SHM para sua detecção” e que “o tamanho do dano que pode ser detectado a partir das mudanças dinâmicas da estrutura é inversamente proporcional à faixa de frequência de excitação do sistema de medição. Ambos axiomas puderam ser constatados neste projeto, pois foi possível observar em alguns resultados que o índice RMSD para o dano grande diminuíram com o aumento da frequência. Já para o dano pequeno, esses índices aumentaram com o aumento da frequência. Portanto, conclui-se que danos menores são melhores detectados em altas frequências, já os danos maiores são detectados mais facilmente em baixas frequências.

## REFERÊNCIAS

ALBAKRI, M. I.; TARAZAGA, P. A. Electromechanical impedance-based damage characterization using spectral element method, **J. Intell. Mater. Syst. Struct.**, v. 28, pp. 63–77, 2017.

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, pp. 305–314, 2012.

FARRAR, C.R.; WORDEN, K. *Structural Health Monitoring: A Machine Learning Perspective*, John Wiley & Sons, Chichester, United Kingdom, 2013.

FOX, C.; DOKTOR, D.; KURZ, W.; SEILER, G.; WU, H.; BOLLER, C. Evaluation of steel buildings by means of non-destructive testing methods. **CE/Papers**, v. 1, n. 2-3, pp. 4560–4569, 2017.

LI, H-N.; REN, L.; JIA, Z-G.; YI, T-H.; LI, D-S. State-of-the-art in structural health monitoring of large and complex civil infrastructures. **Journal of Civil Structural Health Monitoring**, v. 6, n. 1, pp. 3–16, 2016.

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, pp. 12-20, 1994.

LU, L.; SONG, H.; YUAN, W.; HUANG, C. Baseline-free damage identification of metallic sandwich panels with truss core based on vibration characteristics. **Structural Health Monitoring**, v. 16, n. 1, pp. 24–38, 2017.

MEITZLER, A.H. et al. IEEE standard on piezoelectricity: an American national standard. New York: **IEEE-ANSI**, (Std, 176.), 66p., 1988.

OVERLY, T.G.; PARK, G.; FARINHOLT, K.M.; FARRAR, C.R. Piezoelectric active-sensor diagnostics and validation using instantaneous baseline data. **IEEE Sensors Journal**, v. 9, n. 11, pp. 1414-1421, 2009.

TAKAHASHI, Y. Evaluation of environmental noise by analyzing faint random vibration in structural health monitoring. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v 140, pp. 2958–2958, 2016.

## **SOBRE OS ORGANIZADORES**

**Jorge González Aguilera:** Engenheiro Agrônomo (Instituto Superior de Ciências Agrícolas de Bayamo (ISCA-B) hoje Universidad de Granma (UG)), Especialista em Biotecnologia pela Universidad de Oriente (UO), CUBA (2002), Mestre em Fitotecnia (UFV/2007) e Doutorado em Genética e Melhoramento (UFV/2011). Atualmente, é professor visitante na Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS) no Campus Chapadão do Sul. Têm experiência na área de melhoramento de plantas e aplicação de campos magnéticos na agricultura, com especialização em Biotecnologia Vegetal, atuando principalmente nos seguintes temas: pre-melhoramento, fitotecnia e cultivo de hortaliças, estudo de fontes de resistência para estres abiótico e biótico, marcadores moleculares, associação de características e adaptação e obtenção de vitroplantas. Tem experiência na multiplicação “on farm” de insumos biológicos (fungos em suporte sólido; Trichoderma, Beauveria e Metharrizum, assim como bactérias em suporte líquido) para o controle de doenças e insetos nas lavouras, principalmente de soja, milho e feijão. E-mail para contato: [jorge.aguilera@ufms.br](mailto:jorge.aguilera@ufms.br)

**Alan Mario Zuffo:** Engenheiro Agrônomo (Universidade do Estado de Mato Grosso – UNEMAT/2010), Mestre em Agronomia – Produção Vegetal (Universidade Federal do Piauí – UFPI/2013), Doutor em Agronomia – Produção Vegetal (Universidade Federal de Lavras – UFLA/2016). Atualmente, é professor visitante na Universidade Federal do Mato Grosso do Sul – UFMS no Campus Chapadão do Sul. Tem experiência na área de Agronomia – Agricultura, com ênfase em fisiologia das plantas cultivadas e manejo da fertilidade do solo, atuando principalmente nas culturas de soja, milho, feijão, arroz, milheto, sorgo, plantas de cobertura e integração lavoura pecuária. E-mail para contato: [alan\\_zuffo@hotmail.com](mailto:alan_zuffo@hotmail.com)

Agência Brasileira do ISBN  
ISBN 978-85-7247-474-0

