

**Jorge González Aguilera
Alan Mario Zuffo
(Organizadores)**

Ciências Exatas e da Terra e a Dimensão Adquirida através da Evolução Tecnológica 4



Jorge González Aguilera

Alan Mario Zuffo

(Organizadores)

Ciências Exatas e da Terra e a Dimensão Adquirida através da Evolução Tecnológica 4

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^a Dr^a 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^a Dr^a 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^a Dr^a Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense
Prof^a Dr^a Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins
Prof^a Dr^a Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof^a Dr^a Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Prof^a Dr^a 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^a Dr^a 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^a Dr^a 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.^a Dr.^a 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

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)	
C569	Ciências exatas e da terra e a dimensão adquirida através da evolução tecnológica 4 [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. 4) Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader Modo de acesso: World Wide Web Inclui bibliografia ISBN 978-85-7247-475-7 DOI 10.22533/at.ed.757191107 1. Ciências exatas e da terra – Pesquisa – Brasil. 2. Tecnologia. I. Aguilera, Jorge González. II. Zuffo, Alan Mario CDD 509.81
Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422	

Atena Editora
Ponta Grossa – Paraná - Brasil
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. 4*” aborda uma publicação da Atena Editora, apresenta, em seus 22 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

CAPÍTULO 1	1
ANÁLISE DE SOBREVIVÊNCIA DE CÉLULAS DE CARCINOMA DE CÂNCER CANINO APÓS IRRADIAÇÃO COM EQUIPAMENTO DE COBALTO	
Paula de Sanctis Brunno Felipe Ramos Caetano Luis Maurício Montoya Flórez Valéria Barbosa de Souza Luís Fernando Barbisan Marco Antônio Rodrigues Fernandes Ramon Kaneno Rogério Antônio de Oliveira Willian Fernando Zambuzzi Noeme Sousa Rocha	
DOI 10.22533/at.ed.7571911071	
CAPÍTULO 2	15
AVALIAÇÃO COMPUTACIONAL DE INTERAÇÕES ENTRE AS PROTEÍNAS M E M2-1 DO VÍRUS SINCICIAL RESPIRATÓRIO HUMANO (HRSV) E RIBAVIRINA	
Ernesto Tavares Neto Leandro Cristante de Oliveira	
DOI 10.22533/at.ed.7571911072	
CAPÍTULO 3	23
ENCAPSULAMENTO DE NANOPARTÍCULAS FERROMAGNÉTICAS EM MATRIZ EPOXÍDICA PARA O TRATAMENTO DE HEPATOCARCINOMA	
Bruno de Vasconcellos Averaldo Hangai Alexandre Zirpoli Simões	
DOI 10.22533/at.ed.7571911073	
CAPÍTULO 4	38
ESTUDO QUÍMICO DO EXTRATO CLOROFÓRMICO DAS FOLHAS DA <i>Annona muricata</i> L.	
Maria Luiza da Silva Pereira Karoline Pereira Ribeiro	
DOI 10.22533/at.ed.7571911074	
CAPÍTULO 5	48
MÉTODO SIMPLIFICADO PARA CALCULAR A ROTAÇÃO DO SOL	
Matheus Leal Castanheira Dietmar Willian Foryta	
DOI 10.22533/at.ed.7571911075	
CAPÍTULO 6	55
MONITORAMENTO AMBIENTAL DOS FOCOS DE QUEIMADAS NO ESTADO DE ALAGOAS PARA OS ANOS DE 2015 E 2016	
Esdras de Lima Andrade Whendel Cezar Silva de Couto Daniel Nivaldo da Conceição Alex Nazário Silva Oliveira Elizangela Lima de Oliveira	
DOI 10.22533/at.ed.7571911076	

CAPÍTULO 7	64
MONITORAMENTO DE IMPACTOS AMBIENTAIS PÓS-IMPLANTAÇÃO DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTOS SANITÁRIOS E AÇÕES CORRELATAS DO ÓRGÃO AMBIENTAL FISCALIZADOR	
Poliana Arruda Fajardo	
DOI 10.22533/at.ed.7571911077	
CAPÍTULO 8	74
OSCILADOR HARMÔNICO: MODELO PARA A DESCRIÇÃO DE SISTEMAS FÍSICOS EM EQUILÍBRIO ESTÁVEL SOFRENDO PEQUENAS OSCILAÇÕES	
Pedro Henrique Ferreira de Oliveira João Philipe Macedo Braga	
DOI 10.22533/at.ed.7571911078	
CAPÍTULO 9	86
PALAVRAS CRUZADAS: UMA FERRAMENTA LÚDICA NO ENSINO DE MATEMÁTICA E DAS CIÊNCIAS DA NATUREZA	
Osmar Luís Nascimento Gotardi Andréa Martini Ribeiro Fernanda Marchiori Grave Letícia Cristiane Malakowski Heck Mario Victor Vilas Boas	
DOI 10.22533/at.ed.7571911079	
CAPÍTULO 10	102
QUANTIFICAÇÃO DE P-FENILENODIAMINA (PPD) EM FORMULAÇÃO DE CORANTE PERMANENTE DE CABELO	
Maria Letícia Mendes Soares Thamiris Costa dos Santos Carolina Venturini Uliana Mariele Mucio Pedroso Hideko Yamanaka	
DOI 10.22533/at.ed.75719110710	
CAPÍTULO 11	111
RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DIRETO DO POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS)	
Mariana Basolli Borsatto Beatriz Garcia Silva Paulo César Lodi Rogério Custódio Azevedo Souza Bruna Rafaela Malaghini Caio Henrique Buranello dos Santos	
DOI 10.22533/at.ed.75719110711	

CAPÍTULO 12	121
SAÚDE E SEGURANÇA DO TRABALHO PARA O DESENVOLVIMENTO SEGURO DE BIOPROCESSOS	
Milson dos Santos Barbosa Lays Carvalho De Almeida Isabelle Maria Duarte Gonzaga Aline Resende Dória Luma Mirely Souza Brandão Isabela Nascimento Souza Débora da Silva Vilar Juliana Lisboa Santana Priscilla Sayonara de Sousa Brandão	
DOI 10.22533/at.ed.75719110712	
CAPÍTULO 13	129
SÍNTESE DOS NÍVEIS INTERPRETANTES DAS ESTAÇÕES DO ANO APRESENTADOS POR FUTUROS PROFESSORES DE CIÊNCIAS	
Daniel Trevisan Sanzovo Carlos Eduardo Laburú	
DOI 10.22533/at.ed.75719110713	
CAPÍTULO 14	140
SISTEMA DE CONTROLE EMPREGANDO TECNOLOGIA RFID	
Felipe de Carvalho Forti Alexandre César Rodrigues da Silva	
DOI 10.22533/at.ed.75719110714	
CAPÍTULO 15	150
TÉCNICAS DE MEDIÇÃO BASEADAS NA FUNÇÃO DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA PARA DETECÇÃO DE DANO BASEADA NA IMPEDÂNCIA ELETROMECAÂNICA	
Guilherme Silva Bergamim Caio Henrique Rodrigues	
DOI 10.22533/at.ed.75719110715	
CAPÍTULO 16	164
TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO APLICADAS À MINERAÇÃO NA REGIÃO SEMIÁRIDA DO SERIDÓ POTIGUAR	
Paulo Sérgio de Rezende Nascimento	
DOI 10.22533/at.ed.75719110716	
CAPÍTULO 17	180
UM ESTUDO SOBRE ANÉIS LOCAIS	
Brendol Alves Oliveira Gomes Eliris Cristina Rizzioli	
DOI 10.22533/at.ed.75719110717	
CAPÍTULO 18	192
UMA VISÃO GERAL DE FRAMEWORKS PHP POPULARES PARA PROGRAMAÇÃO WEB	
Lilian N A Lazzarin Leandro do Nascimento dos Anjos João Florentino da Silva Junior	
DOI 10.22533/at.ed.75719110718	

CAPÍTULO 19	202
UM PANORAMA DA QUALIDADE DA INTERNET BANDA LARGA NA REGIÃO DO MATO GRANDE	
Igor Augusto De Carvalho Alves	
Hellen Adélia Oliveira Da Cruz	
Maria De Lourdes Assunção Soares Dantas Fonseca	
DOI 10.22533/at.ed.75719110719	
CAPÍTULO 20	216
USO DE SUPPORT VECTOR MACHINE EM AMBIENTE SUBTERRÂNEO: APLICAÇÃO EM POÇO DE MONITORAMENTO PARA REGRESSÃO DE DADOS DE NÍVEL DE ÁGUA	
Thiago Boeno Patricio Luiz	
Guilherme de Freitas Gaiardo	
José Luiz Silvério da Silva	
DOI 10.22533/at.ed.75719110720	
CAPÍTULO 21	229
UTILIZAÇÃO DA DIFRAÇÃO DE RAIOS X NA CARACTERIZAÇÃO DO HIDRÓXIDO DUPLO LAMELAR (HDL) MG/AL E SEU EFEITO MEMÓRIA	
Victor De Aguiar Pedott	
Elton Luis Hillesheim	
Iemedelais Bordin	
Rogério Marcos Dallago	
Marcelo Luís Mignoni	
DOI 10.22533/at.ed.75719110721	
CAPÍTULO 22	237
UTILIZAÇÃO DE SIMULAÇÕES NUMÉRICAS PARA ESTUDO DE ONDAS OCEÂNICAS	
Matheus José de Deus	
Mateus das Neves Gomes	
DOI 10.22533/at.ed.75719110722	
SOBRE OS ORGANIZADORES	242

TÉCNICAS DE MEDIÇÃO BASEADAS NA FUNÇÃO DE RESPOSTA EM FREQUÊNCIA PARA DETECÇÃO DE DANO BASEADA NA IMPEDÂNCIA ELETROMECHANICA

Guilherme Silva Bergamim

Universidade Estadual Paulista – UNESP,
Faculdade de Engenharia de Bauru
Bauru – SP

Caio Henrique Rodrigues

Universidade Estadual Paulista – UNESP,
Faculdade de Engenharia de Bauru
Bauru – SP

RESUMO: Os sistemas de monitoramento de integridade estrutural, (SHM - *Structural Health Monitoring*), possuem vasta possibilidade de atuação, permitindo reduzir os elevados gastos com manutenção em estruturas críticas onde o grau de confiabilidade é determinante, como na infraestrutura civil e em estruturas aeronáuticas. Portanto, possuem relevância científica e econômica. Dentre os diversos métodos de SHM, o método baseado na impedância eletromecânica (E/M) possui como vantagem a fácil implementação por meio de transdutores piezelétricos de baixo custo. Esse método utiliza o efeito piezelétrico para estabelecer uma relação entre a impedância mecânica da estrutura monitorada e a impedância elétrica do transdutor, permitindo medir mudanças na estrutura mecânica por meio da impedância elétrica do transdutor. Existem dois tipos de técnicas de medição baseados na impedância eletromecânica: a técnica da impedância

eletromecânica (E/M) convencional e técnica baseada na função de resposta em frequência (FRF). A detecção do dano é realizada por meio da comparação entre assinaturas de impedância da estrutura considerada íntegra e danificada, feita utilizando-se índices de dano. As técnicas E/M convencional e FRF precisam ser precisas o suficiente para evitar falsas detecções e sensíveis o suficiente para detectar o dano estrutural desde o seu começo. Foram realizados testes experimentais com dois transdutores acoplados em uma barra e uma placa de alumínio para realizar os ensaios de precisão e sensibilidade. Os resultados comparam características importantes das duas técnicas de medição, E/M convencional e FRF, quanto à precisão e à sensibilidade, de forma a contribuir para o desenvolvimento dos sistemas de SHM.

PALAVRAS-CHAVE: SHM, Impedância Eletromecânica, FRF, transdutores piezelétricos

MEASUREMENT TECHNIQUES BASED ON FREQUENCY RESPONSE FOR DAMAGE DETECTION BASED ON ELECTROMECHANICAL IMPEDANCE

ABSTRACT: Structural Health Monitoring (SHM) systems have a wide range of applications. The SHM systems have scientific and economic relevance allowing reducing

the high maintenance costs in critical structures where the degree of reliability is determinant, such as in civil infrastructure and aeronautical structures. There are several SHM methods, such as acoustic emission, however the method based on electromechanical impedance (E/M) has the advantage of being easily implemented using low cost piezoelectric transducers. The electromechanical impedance method uses the piezoelectric effect to establish a relationship between the mechanical impedance of the monitored structure and the electrical impedance of the transducer, enabling to measure changes in the mechanical structure through the electrical impedance of the transducer. There are two types of measurement techniques based on electromechanical impedance: the conventional electromechanical (E/M) impedance technique and frequency response function (FRF) technique. The damage detection was performed comparing the healthy structure impedance signature with the testing impedance signature by calculating damage metric indices. Therefore, the main measurements techniques used by impedance based systems, conventional EMI and FRF, need to be precise enough to avoid false diagnosis and to be sensitive enough to detect the damage since its beginning. Experimental tests were performed with two transducers coupled to a bar and an aluminum plate to perform precision and sensitivity tests. The experimental results compared both measurement techniques, conventional E/M and FRF, in relation of precision and sensitivity parameters and it can support the improvement of SHM systems based on electromechanical impedance method.

KEYWORDS: SHM, Electromechanical Impedance, FRF, Piezoelectric transducers

1 | INTRODUÇÃO

A detecção de danos estruturais em estágios iniciais ganha cada vez mais relevância econômica e científica em um mundo composto por estruturas complexas, nas quais a interrupção inesperada do funcionamento acarreta em altos custos de manutenção, podendo inclusive provocar problemas sociais. Os sistemas de monitoramento de integridade estrutural, *Structural Health Monitoring* (SHM), permitem reduzir os elevados gastos com manutenção em estruturas críticas onde o grau de confiabilidade é determinante, possuindo vasta aplicações como, por exemplo, em pontes, barragens e estruturas aeronáuticas. (FARRAR; WORDEN, 2013).

Dano é entendido como qualquer alteração na estrutura que altere, ou possa vir a alterar, o seu desempenho. Dentre os possíveis danos sofridos por uma estrutura tem-se rachaduras, deformações, corrosão, ruptura ou distensão de elementos conectivos. A detecção do dano estrutural realiza-se através da comparação entre a estrutura em seu estado considerado íntegro e a estrutura em um estado considerado danificado. Essa comparação pode ser analisada por meio da perda ou adição de massa, dissipação de energia, ou alterações na seção transversal.

Para garantir segurança e economia, os sistemas de SHM atuam em tempo real ou em determinados períodos, de forma que possam detectar possíveis danos em

sua fase inicial e sua evolução na estrutura. O uso destes sistemas deve interferir minimamente na estrutura e permitir o monitoramento da mesma em suas condições operacionais. Portanto, os sistemas de SHM que se valem de tais características são conhecidos como métodos de teste não destrutivos (NDT – *Nondestructive Testing*) ou métodos de avaliação não destrutivos (NDE – *Nondestructive Evaluation*). Há diversos métodos de monitoramento de integridade estrutural que correspondem às características de um sistema NDE, dentre eles destacam-se as ondas de Lamb (CHEN *et al.*, 2013, GIURGIUTIU, 2005), emissão acústica (KHARRAT *et al.*, 2016) e as correntes parasitas (HE *et al.*, 2012).

A técnica de medição baseada na impedância eletromecânica (E/M) se enquadra dentro dos métodos NDE de SHM. No entanto, quando comparada às outras técnicas, possui vantagens explícitas como o uso de transdutores piezelétricos pequenos, leves e de baixo custo que podem simultaneamente operar como atuador e sensor (PEAIRS; PARK; INMAN, 2004, ALBAKRI; TARAZAGA, 2017). Os transdutores piezelétricos devem ser mecanicamente acoplados à estrutura, procedimento realizado facilmente utilizando-se, por exemplo, resina epóxi, de forma que, por meio do efeito piezelétrico (MEITZLER *et al.*, 1988), a impedância mecânica da estrutura fique acoplada à impedância elétrica do transdutor. Devido ao acoplamento eletromecânico do transdutor, na presença de um dano, que altera a impedância mecânica da estrutura, as variações provocadas se refletem na variação da impedância elétrica do transdutor, tornando possível o monitoramento da estrutura por meio da impedância elétrica do transdutor (PEAIRS; INMAN; PARK, 2007).

A redução do custo dos sistemas de SHM é uma das principais motivações do desenvolvimento de novos sistemas alternativos. E a redução de equipamentos necessários para realizar o monitoramento da estrutura é fundamental para alcançar tal objetivo, como o método desenvolvido por Baptista e Vieira Filho (2009), no qual o equipamento central é um dispositivo DAQ multifuncional controlado por qualquer PC compatível com o software LabVIEW.

Os sistemas de SHM baseados na impedância E/M podem ser realizados utilizando-se duas técnicas. A técnica de medição da impedância E/M convencional, na qual é obtida a impedância elétrica de um transdutor que opera simultaneamente como atuador e sensor, configuração também conhecida como pulso-eco. A técnica baseada na função de resposta em frequência (FRF), que faz o uso de um transdutor atuador acoplado na estrutura para a sua excitação e de outro transdutor com a função de sensor para a aquisição do sinal de resposta, configuração também conhecida como transmissão-recepção. O monitoramento da integridade estrutural deve avaliar a presença de um dano por meio de índices métricos que retratem a variação causada na estrutura, como a métrica do desvio do coeficiente de correlação – *correlation coefficient deviation metric* (CCDM) (MARQUI *et al.*, 2008). Os índices métricos têm como função quantificar a comparação entre o estado considerado íntegro e o estado de operação em que a estrutura se encontra no momento da medição. Além

de possuírem sensibilidade para detecção do dano estrutural, as técnicas de medição devem possuir precisão suficiente para evitar falsas detecções.

2 | IMPEDÂNCIA ELETROMECÂNICA

A impedância eletromecânica tem como característica a representação da relação obtida entre a impedância mecânica da estrutura e a impedância elétrica do transdutor. Tomando-se como referência as Equações descritas por MEITZLER *et al* (1988) que descrevem de forma simplificada o efeito piezelétrico em sua forma matricial, obtém-se um modelo eletromecânico unidimensional (LIANG; SUN; ROGERS, 1994), e traduz de forma simples a interação entre as propriedades mecânicas da estrutura monitorada com as propriedades elétricas do PZT acoplado. Esse modelo pode ser analisado simplificado de forma analítica a partir da Equação 1,

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

Para a Equação (1) tem-se que Z_E é a impedância elétrica do transdutor para determinada frequência angular ω , Z_S é a impedância mecânica do transdutor, Z_p é a impedância da estrutura monitorada, d_{31} é constante piezelétrica, s_{11}^E é a constante de elasticidade, ϵ_{33}^T é a constante dielétrica, C é a capacitância do transdutor e j é a unidade imaginária. Sendo que os sobrescritos T e E nas constantes indicam, respectivamente, tensão mecânica constante e campo elétrico constante, e os subscritos 1 e 3 identificam os eixos dos sistemas de coordenadas naturais do material piezelétrico suposto pelo modelo unidimensional.

3 | ÍNDICES MÉTRICOS DE DANO

A detecção do dano para o método de medição baseado na impedância E/M é realizada por meio da comparação entre a parte real (resistência) da impedância obtida para a estrutura analisada quando na presença de um dano, e da obtida para a estrutura íntegra (*Baseline*). O uso da parte real para o método da impedância E/M se deve a maior sensibilidade ao dano e menor variação causada pela temperatura. Enquanto que para o método de medição baseado na FRF, a comparação é realizada pela assinatura do módulo da FRF do sensor na presença de um dano e pela assinatura do módulo da FRF do transdutor em um estado sem danos (*Baseline*).

A sensibilidade de um sistema de SHM é mensurada com o uso de índices métricos de dano, como o CCDM (*Correlation Coefficient Deviation Metric*), que deve ser calculado em uma faixa de frequência contendo as frequências naturais mais sensíveis ao dano presente na estrutura e ainda deve possuir uma boa repetitividade. O índice CCDM (MARQUI *et al.*, 2008) é definido através da Equação (2),

$$CCDM = 1 - \left| \frac{\sum_n^N (Z_{n,h} - \bar{Z}_h)(Z_{n,d} - \bar{Z}_d)}{\sqrt{\sum_n^N (Z_{n,h} - \bar{Z}_h)^2} \sqrt{\sum_n^N (Z_{n,d} - \bar{Z}_d)^2}} \right| , \quad (2)$$

Sendo que \bar{Z}_h e \bar{Z}_d são as médias das impedâncias na faixa de frequências escolhidas para a estrutura íntegra e estrutura com dano, respectivamente, e podem ser descritas como

$$\bar{Z}_h = \frac{1}{N} \sum_n^N Z_{n,h} , \quad (3)$$

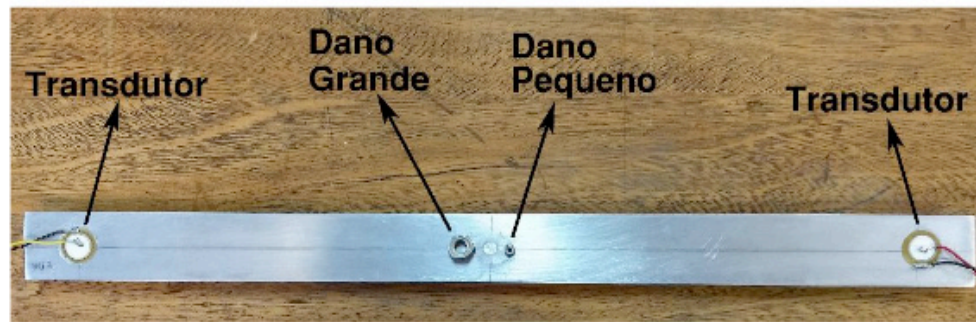
$$\bar{Z}_d = \frac{1}{N} \sum_n^N Z_{n,d} , \quad (4)$$

A determinação da faixa de frequência para análise da sensibilidade do sistema de medição e da presença do dano é um processo fundamental e empírico, baseado principalmente na tentativa e erro. No entanto, há estudos que buscam identificar e utilizar uma metodologia na determinação da faixa adequada utilizando, por exemplo, uma análise da faixa de ressonância do transdutor antes de sua instalação (PEAIRS; TARAZAGA; INMAN, 2007).

4 | METODOLOGIA PROPOSTA

Com finalidade de estudar a precisão e sensibilidade das técnicas de medição da impedância E/M e da FRF foram utilizadas duas estruturas, barra de alumínio com dimensões 500 x 38 x 3 mm e placa de alumínio com dimensões 1000 x 500 x 3 mm, em conjunto de duas porcas de parafuso de tamanhos diferentes, 5 x 2 mm e 13 x 6 mm, para simular, respectivamente, danos estruturais pequeno e grande.

Os transdutores piezelétricos foram acoplados à estrutura por meio do uso de cola instantânea a base de cianoacrilato. O posicionamento do transdutor na estrutura, tanto para a barra quanto para a placa, foi feito de forma a manter 30 mm de distância de sua extremidade. O seu posicionamento, quanto as bordas, foi situado no eixo central ao comprimento de ambas as estruturas, como mostrado na Figura 1. Em série com o transdutor, que opera como atuador, foi colocado o resistor R_s de valor 2,2 k Ω \pm 1%, que atua limitando a corrente e assegurando a tensão suficiente para que o efeito piezelétrico permaneça linear.



(a)



(b)

Figura 1 - Componentes utilizados para os ensaios na (a) barra e (b) placa de Alumínio

Fonte: Elaborado pelo autor

Para o teste de sensibilidade, os danos foram acoplados aproximadamente no centro geométrico da estrutura, ou seja, com posição dada por 250 x 19 mm para a barra e 500 x 250 mm para a placa. O teste de sensibilidade foi realizado para as duas técnicas de medição, impedância E/M e FRF, aplicando o sinal *chirp* como sinal de excitação com amplitude de 1 V, faixa de frequência de 0 a 300 kHz, com passo de 2 Hz, e taxa de amostragem de 2MS/s.

Para cada estrutura foi utilizado a técnica E/M convencional e a FRF, e foi avaliada a sensibilidade das duas técnicas para o dano grande e dano pequeno por meio do índice métrico de dano CDDM, descrito pela Equação (2). Foram realizadas 12 medições para cada situação realizada para cada técnica de medição, visto que é necessário verificar a repetição das medições de forma a estipular a faixa de detecção de dano. O resultado foi mensurado com o uso de um gráfico 3D de barra com seus eixos identificados pela faixa de frequência, e subfaixas avaliadas, o número da medição realizada e a amplitude dos índices.

O teste de precisão foi realizado para ambas as técnicas, impedância E/M convencional e FRF, em ambas estruturas, barra e placa de alumínio, medindo-se a impedância elétrica e FRF do transdutor sensor para a baseline da estrutura. O

transdutor foi excitado da mesma forma que no teste de sensibilidade, com sinal *chirp* calibrado com 1 V de amplitude, faixa de frequência começando em 0 e finalizando em 300 kHz, com passos de 2 Hz, e taxa de amostragem de 2 MS/s.

Diferentemente do ensaio de sensibilidade, a precisão não utiliza índices métricos para avaliar seu desempenho e sim a construção de histogramas e avaliação de parâmetros estatísticos. Os parâmetros estatísticos são calculados para um único ponto da assinatura de impedância, sendo escolhido um valor onde se localiza um ponto de frequência natural da estrutura. Para verificar a precisão dos métodos de medição em pontos de frequência natural da estrutura foram realizadas 200 medições para cada técnica em cada estrutura e, então, construídos os histogramas e calculado a média, desvio padrão e coeficiente de variação para as medições em cada estrutura. Foram utilizados, principalmente, o histograma e o coeficiente de variação devido às diferentes magnitudes das impedâncias obtidas para cada técnica de medição.

As técnicas de medição se diferenciam em alguns aspectos no momento da medição. Para a técnica de medição da impedância E/M é utilizado a parte real da impedância mensurada pelo sensor, enquanto para técnica de medição da FRF foi utilizado o módulo da FRF do transdutor sensor.

5 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Precisão

5.1.1 Barra de Alumínio

Para a estrutura “barra de alumínio” a frequência de ressonância escolhida para análise foi de 31,680 kHz para as duas técnicas de medição, e foi feito um histograma e calculado a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação, como mostrado pela Figura 2.

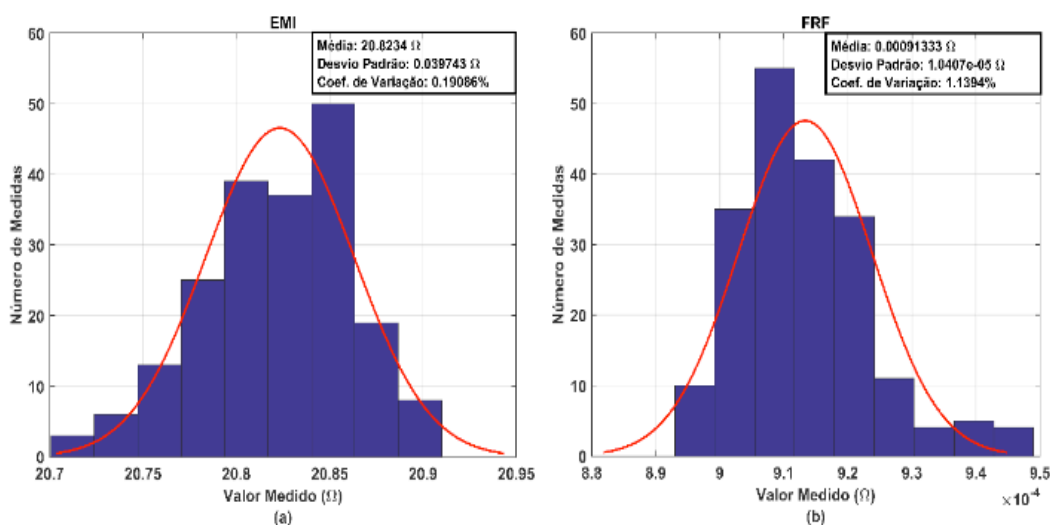


Figura 2 - Histograma e parâmetros estatísticos para 200 medições realizadas na barra de alumínio para as técnicas E/M convencional e FRF.

A técnica de medição E/M convencional por meio da análise das 200 medições para a parte real da impedância elétrica do transdutor piezelétrico apresentou, na frequência de 31,680 kHz, uma média de 20,8234 Ω e um coeficiente de variação de 0,19085%. A técnica de medição FRF, utilizando o módulo da impedância, obteve média de 0,9133 m Ω e um coeficiente de variação igual de 1,1394%. Como mostrado na Figura 2, a técnica E/M convencional apresentou um coeficiente de variação menor, 0,19085%, do que a técnica FRF, 1,1394%. Portanto, a diferença apresentada quando comparado os coeficientes de variação indica que a técnica E/M convencional apresentou maior precisão do que a técnica FRF.

5.1.2 Placa de Alumínio

Para a estrutura placa de alumínio o procedimento de análise foi realizado da mesma forma e a frequência de ressonância escolhida para análise da precisão foi a de 56,450 kHz. Analisando-se a parte real da impedância na frequência de ressonância escolhida das 200 medições realizadas para técnica de medição E/M convencional, como mostra a figura 3, foi obtido uma média de 25,6762 Ω e coeficiente de variação igual a 0,24349%. Para a técnica de medição FRF foram analisadas o módulo da impedância das 200 medidas e foi obtido uma média de 2,1226 m Ω e um coeficiente de variação de 4,5622%.

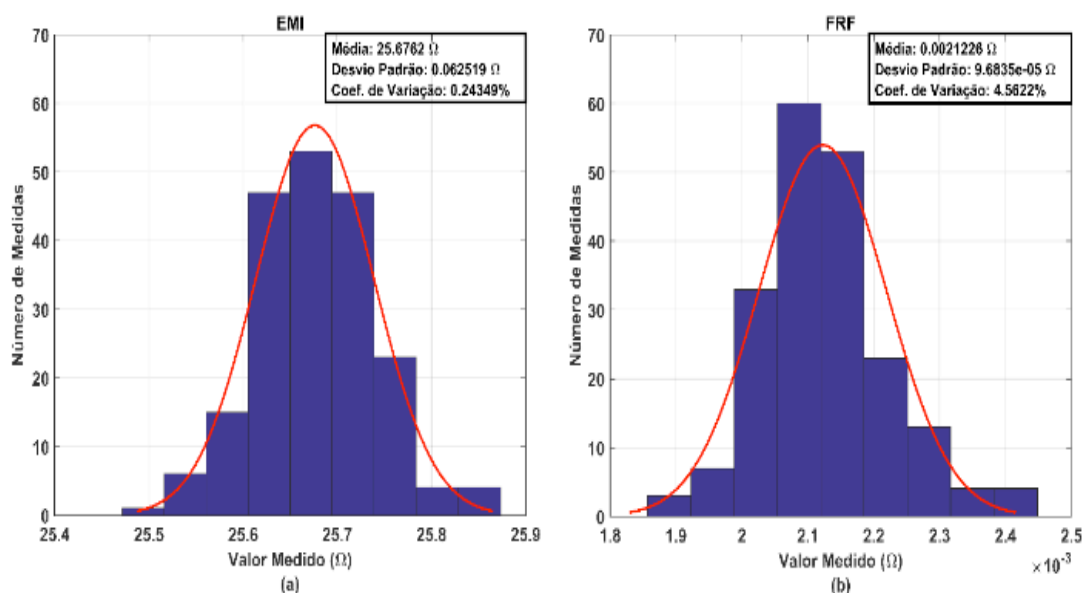


Figura 3 - Histograma e parâmetros estatísticos para 200 medições realizadas na placa de alumínio para as técnicas E/M convencional e FRF.

Fonte: Elaborado pelo autor

Evidenciado pela Figura 3, a técnica de medição E/M convencional apresentou

um coeficiente de variação menor, 0,24349%, do que a técnica de medição FRF, 4,5622%. Dessa forma, a técnica E/M convencional se apresentou mais precisa com um coeficiente de variação 18,736 vezes menor que a técnica FRF.

Analisando-se os resultados obtidos para as estruturas barra de alumínio e placa de alumínio para o ensaio de precisão é relevante notar que a técnica E/M convencional foi mais precisa para ambas as estruturas testadas do que a técnica FRF. Na barra de alumínio a técnica E/M convencional obteve um coeficiente de variação de 0,19085% enquanto a técnica FRF obteve 1,1394%. Na placa de alumínio, a técnica E/M obteve coeficiente de variação de 0,24349% enquanto a técnica FRF obteve coeficiente de variação igual a 4,5622%. Portanto, nas duas estruturas submetidas a teste a técnica E/M convencional se mostrou capaz de oferecer menos falsos-positivos quanto à detecção de danos a partir das frequências de ressonância do que técnica FRF.

5.2 Sensibilidade

5.2.1. Barra de Alumínio

O ensaio de sensibilidade foi realizado para as técnicas de medição E/M convencional e FRF na barra de alumínio na presença de um dano pequeno, e a análise realizada com o uso do índice CCDM pode ser visualizado na Figura 4. A técnica E/M convencional apresentou maior sensibilidade na faixa de 90 – 100 kHz, com CCDM aproximadamente 0,72, e amplitude relevante na faixa 50 – 70 kHz. A técnica FRF apresentou maior sensibilidade na faixa 90 – 100 kHz, com valor de CCDM aproximadamente 0,49, e valor relevante na faixa de 150 – 160 kHz.

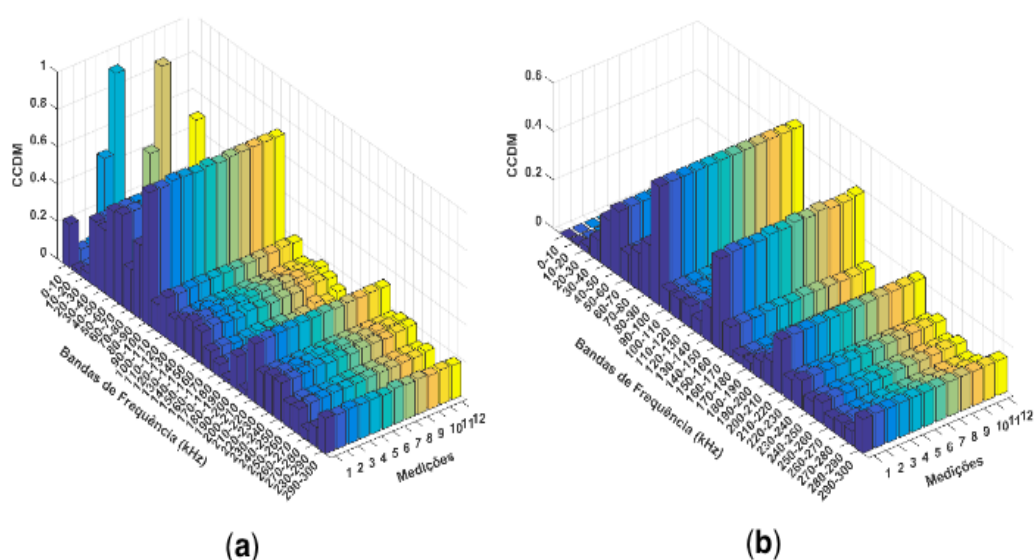


Figura 4 - Índice CCDM para o ensaio de sensibilidade realizado em uma barra de alumínio com dano pequeno para as técnicas (a) E/M convencional e (b) FRF.

Fonte: Elaborado pelo autor

O ensaio de sensibilidade também foi realizado para a barra de alumínio na

presença de dano grande, e foi analisada por meio do índice CCDM, como visto na Figura 5.

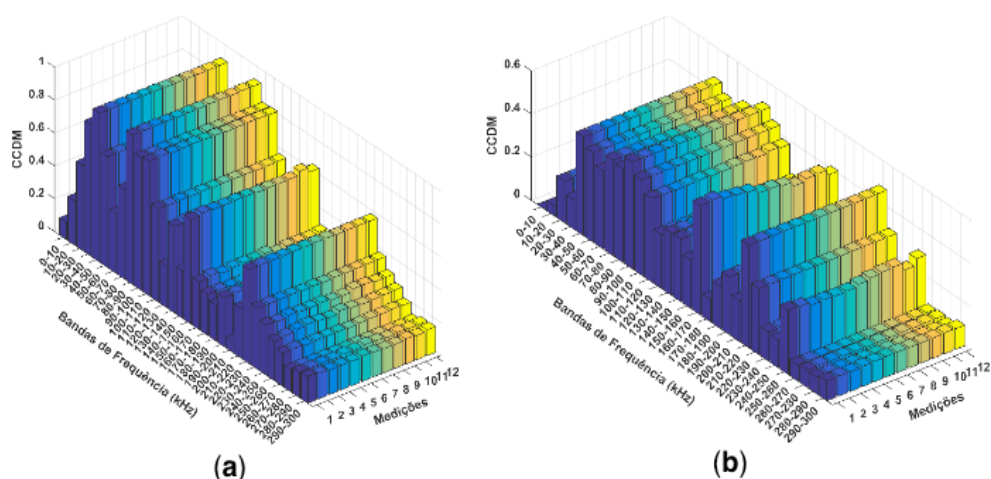


Figura 5 - Índice CCDM para o ensaio de sensibilidade realizado na barra de alumínio com dano grande para as técnicas (a) E/M convencional e (b) FRF.

Fonte: Elaborado pelo autor

A técnica de medição E/M convencional apresentou maior sensibilidade ao dano grande nas faixas de frequência 40 – 50 kHz e 80 – 90 kHz, com CCDM aproximadamente igual a 0,91, e valores relevantes nas faixas 30 – 40 kHz, 90 – 110 kHz, 150 – 160 kHz e 220 – 230 kHz. A técnica FRF apresentou maior sensibilidade ao dano grande nas faixas 40 – 60 kHz, 70 – 110 kHz e 210 – 220 kHz, com CCDM aproximadamente igual a 0,46, e valor relevante na faixa 150 – 160 kHz.

Portanto, como mostrado nas Figuras 4 e 5, a técnica de medição E/M convencional apresentou maior sensibilidade para detectar os danos pequenos e grandes quando comparado à técnica FRF devido a amplitude dos índices, principalmente o índice CCDM, nas faixas de frequência mais sensíveis. No entanto, é válido observar que a técnica FRF apresentou um maior número de faixas de frequência com sensibilidade para detectar os danos testados.

O índice CCDM permitiu a distinção do tamanho do dano para a técnica E/M convencional, mas apresentou valores muito próximos para a técnica FRF, limitando a distinção do tamanho do dano.

5.2.2. Placa de Alumínio

Para a estrutura placa de alumínio foi realizado o ensaio de sensibilidade da mesma forma como descrito na seção metodologia. A análise por meio do índice CCDM do ensaio de sensibilidade para a placa de alumínio, com dano pequeno, está ilustrada pela Figura 6.

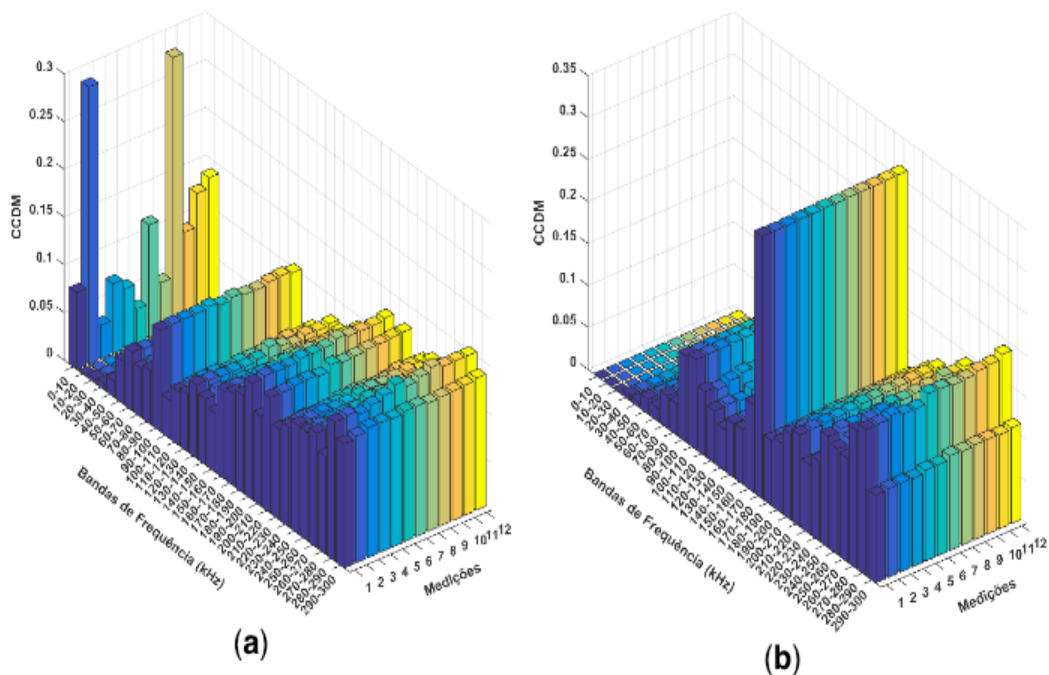


Figura 6 - Índice CCDM para o ensaio de sensibilidade realizado da placa de alumínio com dano pequeno para as técnicas (a) E/M convencional e (b) FRF.

Fonte: Elaborado pelo autor

A técnica de medição E/M convencional apresentou maior sensibilidade na faixa 280 – 290 kHz, com CCDM aproximadamente 0,1545, e boa sensibilidade nas faixas 190 – 200 kHz, 210 – 220 kHz e 290 – 300 kHz, além das frequências em torno da faixa com maior sensibilidade. A técnica FRF apresentou maior sensibilidade na faixa 170 – 180 kHz, com CCDM aproximadamente igual a 0,3149, e boa sensibilidade nas faixas 270 – 290 kHz.

A análise do ensaio de sensibilidade da placa de alumínio com dano grande com o uso do índice CCDM, relacionando o índice às faixas de frequência e medições realizada é ilustrada na Figura 7. A técnica E/M convencional apresentou maior sensibilidade nas faixas 210 – 220 kHz e 230 – 260 kHz, com CCDM aproximadamente 0,325, e apresentou boa sensibilidade em 120 – 150 kHz, 190 – 210 kHz e 260 – 300 kHz. A técnica FRF apresentou maior sensibilidade nas faixas de frequência 110 – 120 kHz e 260 – 270 kHz, com CCDM aproximadamente 0,330, e boa sensibilidade nas faixas 160 – 180 kHz, 200 – 220 kHz e 280 – 290 kHz, com CCDM aproximadamente igual a 0,28.

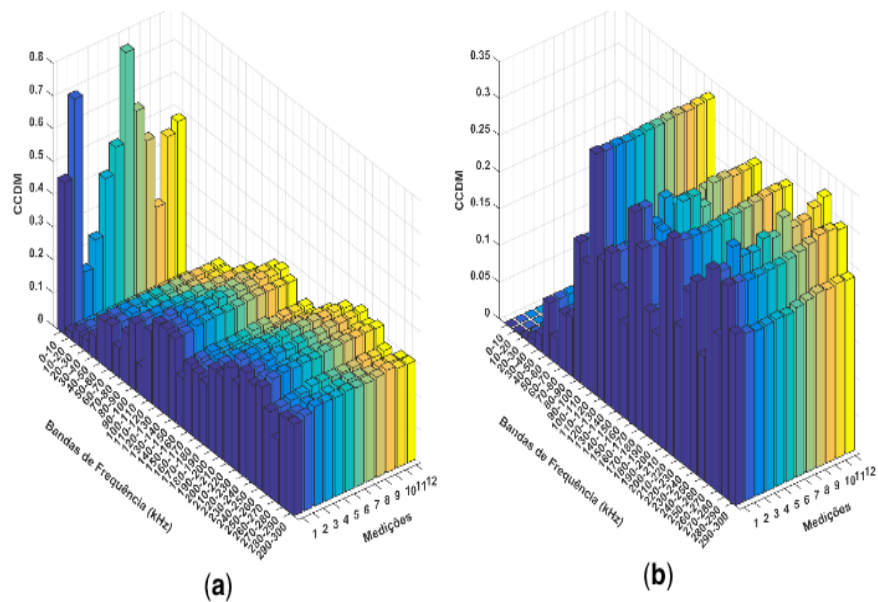


Figura 7 - Índice CCDM para o ensaio de sensibilidade realizado em uma placa de alumínio com dano grande para as técnicas (a) E/M convencional e (b) FRF.

Fonte: Elaborado pelo autor

Diferentemente de como ocorreu para a barra de alumínio, como é possível observar nas figuras 6 e 7, na placa de alumínio a técnica FRF apresentou maior sensibilidade para o índice CCDM na detecção dos danos utilizados durante o ensaio quando comparada a técnica E/M convencional devido a maior amplitude dos índices apresentados nas faixas mais sensíveis em cada situação.

É relevante analisar a capacidade de distinção do tamanho do dano estrutural, assim como feito para a barra de alumínio. Para o índice CCDM ambas as técnicas foram capazes de distinguir o tamanho do dano acoplado a estrutura, apresentando valores mais elevado para o índice nos danos maiores em comparação aos obtidos para o dano pequeno. No entanto, é importante observar que a técnica FRF apresentou valores muito próximos, podendo dificultar a diferenciação do tamanho do dano. Evidenciando a dificuldade da detecção do dano em estruturas de dimensões maiores.

6 | CONCLUSÃO

Este trabalho comparou as técnicas de medição baseadas na função de resposta em frequência, E/M convencional e a baseada na função de resposta em frequência (FRF), utilizadas em sistemas de SHM baseados na impedância E/M, quanto a duas importantes características: precisão e sensibilidade. Os testes foram realizados para as duas técnicas em duas estruturas de dimensões diferentes, uma barra de alumínio e uma placa de alumínio. Os resultados apresentados mostram características distintas em cada técnica para a precisão e para a sensibilidade, observando a capacidade em detectar o dano e diferencia-los de tamanho.

Para a placa de alumínio, ao se analisar o ensaio de precisão, assim como o

realizado para a barra de alumínio, na frequência de ressonância de 56,450 kHz mostrou a técnica E/M convencional mais precisa, com coeficiente de variação igual a 0,24349% e média igual a 25,6762 Ω , do que a técnica FRF, que obteve um coeficiente de variação igual a 4,5622% e média de 2,1226 m Ω . Desta forma, a técnica E/M convencional se apresentou mais precisa com um coeficiente de variação 18,736 vezes menor que a técnica FRF.

No ensaio de sensibilidade realizado na placa de alumínio, a técnica de medição FRF mostrou, por meio da análise do índice CCDM, maior sensibilidade para detecção dos danos grande e pequeno, com respectivos índices iguais a 0,1545 e 0,325, quando comparado à técnica de medição E/M convencional, que apresentou CCDM aproximadamente igual a 0,315 para o dano pequeno e 0,330 para o dano grande. Nas estruturas analisadas, a técnica E/M convencional quando comparada à técnica FRF se mostrou mais precisa, sensível e com capacidade de distinção do tamanho do dano na barra de alumínio. Já na placa de alumínio, a técnica E/M convencional se mostrou mais precisa, enquanto que a técnica FRF se mostrou mais sensível e com capacidade de distinção do tamanho do dano. Os resultados obtidos no desenvolvimento deste trabalho possuem relevância para serem considerados no desenvolvimento de sistemas de SHM e na escolha de qual técnica utilizar para monitorar uma estrutura em sistemas alternativos.

REFERÊNCIAS

- ALBAKRI, M. I.; TARAZAGA, P. A. Electromechanical impedance-based damage characterization using spectral element method. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 28, n. 1, p. 63–77, 2017.
- BAPTISTA, F. G.; VIEIRA FILHO, J. A New Impedance Measurement System for PZT-Based Structural Health Monitoring. **IEEE Trans. Instrum. Meas.**, v. 58, n. 10, p. 3602–3608, 2009.
- CHEN, X.; LI, X.; WANG, S.; YANG, Z.; CHEN, B.; HE, Z. Composite damage detection based on redundant second-generation wavelet transform and fractal dimension tomography algorithm of Lamb wave. **IEEE Trans. Instrum. Meas.**, v. 62, n. 5, p. 1354–1363, 2013.
- FARRAR, C. R.; WORDEN, K. Structural health monitoring: a machine learning perspective, **John Wiley & Sons, Ltd.**, 2013.
- GIURGIUTIU, V. Tuned lamb wave excitation and detection with piezoelectric wafer active sensors for structural health monitoring. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 16, n. 4, p. 291–305, abr. 2005.
- HE, Y.; TIAN, G.; ZHANG, H.; *et al.* Steel corrosion characterization using pulsed eddy current systems. **IEEE Sensors Journal**, v. 12, n. 6, p. 2113–2120, 2012.
- KHARRAT, M.; RAMASSO, E.; PLACET, V.; BOUBAKAR, L. A signal processing approach for enhanced Acoustic Emission data analysis in high activity systems: application to Organic Matrix Composites. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 70–71, p. 1038–1055, 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, p. 12-20, 1994.

MARQUI, C.R.; BUENO, D.D.; BAPTISTA, F.G.; VIEIRA FILHO, J.; SANTOS, R.B.; LOPES JUNIOR, V. 2008. "External disturbance effect in damage detection using electrical impedance," In: **Proceedings of International Modal Analysis Conference** Orlando, FL, No. 26, paper 286.

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

PEAIRS, D. M.; INMAN, D. J.; PARK, G. Circuit analysis of impedance-based health monitoring of beams using spectral elements. **Structural Health Monitoring**, v. 6, n. 1 p. 81–94, 2007.

PEAIRS, D. M.; PARK, G.; INMAN, D. J. Improving accessibility of the impedance-based structural health monitoring method. **J. Intell. Mater. Syst. Struct.**, v. 15, n. 2, p. 129-139, 2004.

PEAIRS, D. M.; TARAZAGA, P. A.; INMAN, D. J. Frequency range selection for impedance-based structural health monitoring. **Journal of Vibration and Acoustics**, New York, v.129, n. 6, p. 701-719, 2007.

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

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

Agência Brasileira do ISBN
ISBN 978-85-7247-475-7

