



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”**

**Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Elétrica**

**Estudo Comparativo de Técnicas de Medição e  
Aquisição de Sinais de Transdutores Piezelétricos  
para Detecção de Dano Baseada na Impedância  
Eletromecânica**

**DANILO ECIDIR BUDOYA**

Bauru – SP  
2018



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**Estudo Comparativo de Técnicas de Medição e  
Aquisição de Sinais de Transdutores Piezelétricos  
para Detecção de Dano Baseada na Impedância  
Eletromecânica**

**DANILO ECIDIR BUDOYA**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia de Bauru (FEB) – UNESP, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica

**Orientador:** Prof. Dr. Fabricio Guimarães Baptista

Bauru – SP  
2018

Budoya, Danilo Ecidir.

Estudo Comparativo de Técnicas de Medição e  
Aquisição de Sinais de Transdutores Piezelétricos para  
Detecção de Dano Baseada na Impedância Eletromecânica  
/ Danilo Ecidir Budoya, 2018  
59 f.

Orientador: Prof. Dr. Fabricio Guimarães Baptista

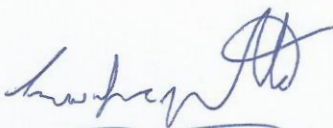
Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual  
Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2018

Impedância. 2. Medição. 3. Monitoramento de  
integridade estrutural. 4. Eletromecânica. I.  
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de  
Engenharia. II. Título.

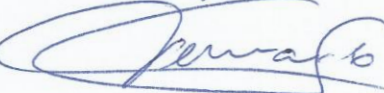
**ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE DANILO ECIDIR BUDOYA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.**

Aos 20 dias do mês de abril do ano de 2018, às 09:00 horas, no(a) Bauru FE-VC-1 (Civil), reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. FABRICIO GUIMARÃES BAPTISTA - Orientador(a) do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. FERNANDO DE SOUZA CAMPOS do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. MÁRIO ANDERSON DE OLIVEIRA do(a) Departamento de Eletro-eletrônica / Instituto Federal de Mato Grosso, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de DANILO ECIDIR BUDOYA, intitulada **Estudo Comparativo de Técnicas de Medição e Aquisição de Sinais de Transdutores Piezelétricos para Detecção de Dano Baseada na Impedância Eletromecânica**. Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: Aprovado. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

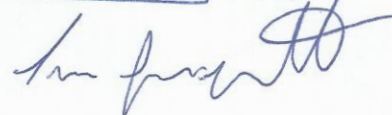
Prof. Dr. FABRICIO GUIMARÃES BAPTISTA



Prof. Dr. FERNANDO DE SOUZA CAMPOS



Prof. Dr. MÁRIO ANDERSON DE OLIVEIRA

P1 

*À minha família.*

## **AGRADECIMENTOS**

*À minha família, em especial aos meus pais e irmã, pelo suporte e incentivo constante.*

*À minha namorada, Giulianna, pelo companheirismo e apoio incondicional.*

*Aos meus amigos e aos companheiros do Laboratório de Transdutores e Aquisição de Dados (LTAD).*

*Ao meu orientador, Prof. Dr. Fabricio Guimarães Baptista, pela profunda dedicação e ajuda durante todas as etapas deste trabalho.*

*À comissão examinadora.*

*À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, pela bolsa (Processo 2015/23272-1) e auxílio financeiro (Processo 2015/02500-6) recebidos nesta pesquisa.*

## RESUMO

Sistemas de monitoramento de integridade estrutural (SHM – *Structural Health Monitoring*) são científica e economicamente relevantes como métodos de detecção de danos estruturais em diversos tipos de estruturas, aumentando assim a segurança e reduzindo os custos de manutenção. Entre os vários princípios de detecção de danos, o método da impedância eletromecânica (E/M) baseia-se na medição da impedância elétrica do transdutor piezelétrico fixado à estrutura monitorada. Aqui, a exatidão e precisão do sistema de medição são fundamentais para o diagnóstico correto da estrutura. Portanto, essa dissertação apresenta uma análise comparativa de duas técnicas de medição de impedância para detecção de danos que são tipicamente utilizadas em analisadores de impedância comerciais e em outros sistemas de medição alternativos: medições em estado transitório utilizando um sinal de excitação de varredura e medições em estado estacionário utilizando um sinal senoidal puro para cada frequência de excitação. Os testes foram realizados com cargas resistivas e capacitivas de valores nominais 100  $\Omega$  e 10 nF, respectivamente, e com um transdutor piezelétrico fixado em uma barra de alumínio que representa uma estrutura monitorada. As duas técnicas foram comparadas com base na exatidão, precisão, sensibilidade à danos e tempo necessário para as medições. Os resultados destacam as características importantes de cada técnica, as quais devem ser consideradas para o desenvolvimento de sistemas de SHM baseados na impedância e o diagnóstico correto das estruturas monitoradas.

**Palavras-chave:** impedância, medição, transdutores piezelétricos, monitoramento de integridade estrutural (SHM), eletromecânica

## ABSTRACT

Structural health monitoring (SHM) systems are scientifically and economically relevant as methods of detecting structural damage to various types of structures, thus increasing safety and reducing maintenance costs. Among the various principles of damage detection, the electromechanical impedance (EMI) method is based on the electrical impedance measurement of piezoelectric transducers attached to the monitored structure. Here, the accuracy and precision of the measurement system are fundamental for the correct diagnosis of the structure. Therefore, this dissertation presents a comparative analysis of two impedance measurement techniques for damage detection that are typically used in commercial impedance analyzers and other alternative measurement systems: transient-state measurements using a sweep excitation signal and steady-state measurements using a pure sinusoidal signal for each excitation frequency. Tests were performed with resistive and capacitive loads with nominal values of  $100\ \Omega$  e  $10\ \text{nF}$ , respectively, and a piezoelectric transducer fixed to an aluminum bar representing a monitored structure. The two techniques were compared based on the accuracy, precision, sensibility to damage and time required for the measurements. The results highlight the important features of each technique, which should be considered for the development of impedance-based SHM systems and the correct diagnosis of monitored structures.

**Keywords:** impedance, measurement, piezoelectric transducers, structural health monitoring (SHM), electromechanical



## LISTA DE FIGURAS

|                  |   |   |    |
|------------------|---|---|----|
| <b>Figura 1</b>  | – | Configuração básica do método da impedância E/M. ....   | 6  |
| <b>Figura 2</b>  | – | (a) Forma de onda e (b) PSD de uma composição de sinais senoidais puros... 10   | 10 |
| <b>Figura 3</b>  | – | Configuração básica utilizada na análise das técnicas de medições. ....   | 10 |
| <b>Figura 4</b>  | – | Sinal chirp (a) gerado por software e (b) após a conversão do CDA e amostragem pelo CAD. ....   | 11 |
| <b>Figura 5</b>  | – | Fluxograma simplificado de medições em estado estacionário. ....  | 14 |
| <b>Figura 6</b>  | – | (a) Forma de onda e (b) PSD de um sinal chirp.....  | 16 |
| <b>Figura 7</b>  | – | Fluxograma simplificado de medições em estado transitório.....  | 17 |
| <b>Figura 8</b>  | – | Barra de alumínio com o transdutor piezelétrico e o dano induzido. ....   | 21 |
| <b>Figura 9</b>  | – | Configuração experimental.....  | 22 |
| <b>Figura 10</b> | – | Parte real da impedância obtida para o (a) resistor e (b) capacitor.....  | 23 |
| <b>Figura 11</b> | – | Parte imaginária da impedância obtida para o (a) resistor e (b) capacitor.....  | 24 |
| <b>Figura 12</b> | – | Histogramas das medições obtidas para a carga resistiva sem médias, utilizando-se as técnicas de medição em (a) estado transitório e (b) estado estacionário..                                      | 25 |
| <b>Figura 13</b> | – | Histogramas das medições obtidas para a carga resistiva com a realização de média sobre 50 medições, utilizando-se as técnicas de medição em (a) estado transitório e (b) estado estacionário. .... | 26 |
| <b>Figura 14</b> | – | Comportamento do (a) valor médio e (b) desvio padrão em relação ao número de medições utilizadas para a média.....  | 27 |
| <b>Figura 15</b> | – | Efeitos dos ciclos de tempo de estabilização da técnica de medição em estado estacionário nas assinaturas de impedância. ....   | 29 |
| <b>Figura 16</b> | – | (a) Parte real e (b) imaginária das assinaturas de impedância obtidas para o transdutor piezelétrico utilizando-se as duas técnicas de medição. ....  | 30 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 17</b> – Índices RMSD obtidos utilizando-se as técnicas de medição em (a) estado transitório e (b) estado estacionário sem a realização de médias.....                                       | 32 |
| <b>Figura 18</b> – Índices RMSD obtidos utilizando-se a técnica de medição em estado transitório com a realização de média sobre 10 medições. ....   | 33 |
| <b>Figura 19</b> – Assinaturas de impedância obtidas para a estrutura em condições íntegra e danificada, utilizando-se as técnicas de medição em (a) estado transitório e (b) estado estacionário..... | 34 |
| <b>Figura 20</b> – Índices RMSD obtidos utilizando-se as técnicas de (a) estado transitório e de (b) estado estacionário.....  | 35 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabela 1</b> - Configurações utilizadas para as duas técnicas de medição.....                                      | 20 |
| <b>Tabela 2</b> - Comparação dos resultados obtidos para as duas técnicas de medição com cargas básicas.....          | 27 |
| <b>Tabela 3</b> - Comparação dos resultados obtidos para as duas técnicas de medição com transdutor piezométrico..... | 36 |

## LISTA DE SIGLAS E DEFINIÇÕES

|         |   |
|---------|---|
| AI      | <i>Analog Input</i> – Entrada analógica   |
| AO      | <i>Analog Output</i> – Saída analógica  |
| CAD     | Conversor Analógico – Digital   |
| CCDM    | <i>Correlation Coefficient Deviation Metric</i> - Desvio do coeficiente de correlação |
| CDA     | Conversor Digital – Analógico   |
| DAQ     | <i>Data Acquisition</i> – Dispositivo de aquisição de dados                           |
| DDS     | <i>Direct Digital Synthesizer</i> – Sintetizador digital direto                       |
| DFT     | <i>Discrete Fourier Transform</i> – Transformada de Fourier discreta                  |
| DSP     | <i>Digital Signal Processor</i> – Processador digital de sinais                       |
| E/M     | Eletromecânica  |
| FRF     | <i>Frequency Response Function</i> – Função de Resposta em Frequência                 |
| LabVIEW | <i>Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench</i>                            |
| MFC     | <i>Macro Fiber Composite</i> – Compósito de macro fibra                               |
| NDE     | <i>Non-Destructive Evaluation</i> – Avaliação não destrutiva                          |
| NDT     | <i>Non-Destructive Testing</i> – Teste não destrutivo                                 |
| PC      | <i>Personal Computer</i> – Computador pessoal   |
| PSD     | <i>Power Spectral Density</i> – Densidade Espectral de Potência                       |
| PZT     | <i>Pb-Lead Zirconate Titanate</i> – Titanato zirconato de chumbo                      |
| PWAS    | <i>Piezoelectric Wafer Active Sensor</i> – Sensor ativo de pastilha piezelétrica      |
| RMSD    | <i>Root Mean Square Deviation</i> – Desvio da raiz média quadrática                   |
| SHM     | <i>Structural Health Monitoring</i> – Monitoramento de integridade estrutural         |
| USB     | <i>Universal Serial Bus</i> – Barramento serial universal                             |

## LISTA DE SÍMBOLOS

| <b>Símbolo</b> | <b>Descrição</b>   | <b>Unidade</b>      |
|----------------|--|---------------------|
| $A$            | <i>Amplitude dos sinais de excitação</i>   | $V$                 |
| $CE$           | <i>Ciclos de Tempo de Estabilização</i>  | <i>Adimensional</i> |
| $E$            | <i>Campo Elétrico</i>  | $V/m$               |
| $H(f)$         | <i>Função de Resposta em Frequência - FRF</i>                                    | <i>Adimensional</i> |
| $N$            | <i>Número de amostras para cálculo da DFT</i>                                    | <i>Adimensional</i> |
| $N_{CE}$       | <i>Número de amostras para execução dos ciclos de tempo de estabilização</i>     | <i>Adimensional</i> |
| $Re(Z_1)$      | <i>Parte real da impedância elétrica do transdutor para a estrutura íntegra</i>  | $\Omega$            |
| $Re(Z_2)$      | <i>Parte real da impedância elétrica do transdutor para a estrutura com dano</i> | $\Omega$            |
| $R_s$          | <i>Resistor Série</i>  | $\Omega$            |
| $S_{xx}$       | <i>Autoespectro de potência</i>  | <i>Adimensional</i> |
| $S_{xy}$       | <i>Espectro de potência cruzado</i>  | <i>Adimensional</i> |
| $T$            | <i>Tensão mecânica ou stress</i>   | $N/m$               |
| $X$            | <i>Transformada de Fourier discreta do sinal de excitação</i>                    | <i>Adimensional</i> |
| $Y$            | <i>Transformada de Fourier discreta do sinal de resposta</i>                     | <i>Adimensional</i> |
| $Z_E$          | <i>Impedância elétrica do transdutor</i>   | $\Omega$            |
| $Z_{in}$       | <i>Impedância de entrada do DAQ</i>  | $\Omega$            |
| $Z_T$          | <i>Impedância elétrica medida</i>  | $\Omega$            |
| $Z_P$          | <i>Impedância mecânica do transdutor</i>   | $N.s/m$             |
| $Z_S$          | <i>Impedância mecânica da estrutura</i>  | $N.s/m$             |
| $C$            | <i>Capacitância estática do transdutor</i>                                       | $F$                 |
| $d$            | <i>Constante Piezelétrica</i>  | $m/V$               |
| $\varepsilon$  | <i>Permissividade dielétrica</i>   | $F/m$               |
| $d_f$          | <i>Passo de frequência</i>   | $Hz$                |
| $f$            | <i>Frequência</i>  | $Hz$                |
| $f_i$          | <i>Frequência da atual iteração</i>  | $Hz$                |

| <b>Símbolo</b> | <b>Descrição</b>  | <b>Unidade</b>           |
|----------------|---|--------------------------|
| $f_i$          | <i>Frequência inicial</i>                                       | <i>Hz</i>                |
| $f_F$          | <i>Frequência final</i>   | <i>Hz</i>                |
| $f_s$          | <i>Taxa de amostragem</i>                                       | <i>S / s</i>             |
| $j$            | <i>Unidade imaginária</i>                                       | <i>Adimensional</i>      |
| $n$            | <i>Amostra atual</i>  | <i>Adimensional</i>      |
| $s$            | <i>Constante de elasticidade ou compliance</i>                  | <i>m<sup>2</sup> / N</i> |
| $t$            | <i>Tempo</i>  | <i>s</i>                 |
| $t_{CE}$       | <i>Tempo para execução dos ciclos de tempo de estabilização</i> | <i>s</i>                 |
| $x(t)$         | <i>Sinal de excitação do transdutor na forma contínua</i>       | <i>V</i>                 |
| $x[n]$         | <i>Sinal de excitação do transdutor na forma discreta</i>       | <i>V</i>                 |
| $y(t)$         | <i>Sinal de resposta do transdutor na forma contínua</i>        | <i>V</i>                 |
| $y[n]$         | <i>Sinal de resposta do transdutor na forma discreta</i>        | <i>V</i>                 |

## PUBLICAÇÕES

### Artigos completos publicados em periódicos

BUDOYA, D. E.; BAPTISTA, F. G. A Comparative Study of Impedance Measurement Techniques for Structural Health Monitoring Applications. **IEEE Trans. Instrum. Meas.** v. 67, n. 4, p. 912-924, 2018. <http://dx.doi.org/10.1109/TIM.2018.2792854>

FREITAS, E.S.; BAPTISTA, F. G.; BUDOYA, D.E.; CASTRO, B.A. Equivalent circuit of piezoelectric diaphragms for impedance-based structural health monitoring applications. **IEEE Sens. J.**, v. 17, n. 17, p. 5537-5546, 2017. <http://dx.doi.org/10.1109/JSEN.2017.2725946>

### Artigo submetido para periódico

CAMPOS, F. S.; CASTRO, B. A.; BUDOYA, D. E.; BAPTISTA, F. G.; ULSON, J. A. C.; ANDREOLI, A. L. New Feature Extraction Approach Insensitive to Temperature Variations for Impedance-Based Structural Health Monitoring. **IET Science, Measurement & Technology**.

### Trabalhos completos publicados em anais de congresso

BUDOYA, D. E.; BAPTISTA, F. G. Signal Acquisition from Piezoelectric Transducers for Impedance-Based Damage Detection. **Proceedings of the 4th International Electronic Conference on Sensors and Applications**, v. 2, n. 3, p. 130, 2018. <http://dx.doi.org/10.3390/ecsa-4-04894>

BUDOYA, D. E.; CASTRO, B. A.; CAMPEIRO, L. M.; SILVEIRA, R. Z. M.; FREITAS, E. S.; BAPTISTA, F. G. Analysis of Piezoelectric Diaphragms in Impedance-Based Damage Detection in Large structures. **Proceedings of the 4th International Electronic Conference on Sensors and Applications**, v. 2, n. 3, p. 131, 2018. <http://dx.doi.org/10.3390/ecsa-4-04896>

CAMPEIRO, L. M.; CASTRO, B. A.; BUDOYA, D. E.; SILVEIRA, R. Z. M.; FREITAS, E. S.; BAPTISTA, F. G. Análise da Influência de Ruído em Sistemas de SHM Baseados na Técnica da Impedância Eletromecânica. **XIII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente**, Porto Alegre, p. 745-750, 2017.

## SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Capítulo 1 - Introdução .....</b>                                   | <b>1</b>  |
| 1.1 Motivação e Objetivos .....  | 3         |
| 1.2 Organização do trabalho.....                                       | 4         |
| <b>Capítulo 2 - Princípio da Impedância Eletromecânica (E/M) .....</b> | <b>6</b>  |
| <b>Capítulo 3 - Técnicas de Medição.....</b>                           | <b>9</b>  |
| 3.1 Medições em Estado Estacionário .....                              | 9         |
| 3.2 Medições em Estado Transitório.....                                | 15        |
| <b>Capítulo 4 - Metodologia .....</b>                                  | <b>19</b> |
| <b>Capítulo 5 - Resultados e Discussões.....</b>                       | <b>23</b> |
| 5.1 Cargas Básicas .....   | 23        |
| 5.2 Transdutor Piezelétrico .....                                      | 28        |
| 5.2.1 Reprodutibilidade dos Resultados .....                           | 31        |
| 5.2.2 Sensibilidade a Dano Estrutural.....                             | 33        |
| <b>Conclusão.....</b>  | <b>37</b> |
| <b>Sugestão para trabalhos futuros.....</b>                            | <b>39</b> |
| <b>Referências Bibliográficas.....</b>                                 | <b>40</b> |



## Capítulo 1

### Introdução

A detecção de danos estruturais em um estágio inicial é de interesse global; consequentemente, tal detecção tornou-se um importante campo de pesquisa em vários segmentos acadêmicos e industriais. A infraestrutura civil e os grandes meios de transporte, como pontes, aeronaves, navios, trens e barragens, são alguns exemplos de estruturas que podem ser monitoradas. Os danos a essas estruturas, incluindo rachaduras, corrosões e afrouxamento de conexões aparafusadas, podem mudar seu funcionamento normal e, consequentemente, pôr em risco seus usuários. Dessa forma, os sistemas de monitoramento de integridade estrutural (SHM – *Structural Health Monitoring*) têm sido pesquisados e desenvolvidos nos últimos anos (FARRAR; WORDEN, 2013, LI *et al.*, 2016). Tais sistemas monitoram estruturas em tempo real ou periodicamente para detectar e localizar danos. Além de melhorar a segurança do usuário, os sistemas de SHM também ajudam a reduzir os custos de manutenção, uma vez que os danos podem ser detectados em estágio inicial.

A maioria das estruturas não pode receber interrupções operacionais frequentes para o monitoramento de detecção de danos incertos. Portanto, os sistemas de SHM devem utilizar um método embarcado de detecção de danos que seja minimamente invasivo à estrutura e permita o monitoramento em condições normais de operação. As técnicas que atendem a esses requisitos são conhecidas como métodos de avaliação não destrutivas (NDE – *Nondestructive evaluation*) ou de testes não destrutivos (NDT – *Nondestructive testing*); as técnicas NDT relatadas na literatura incluem a emissão acústica (RAMASSO; PLACET; BOUBAKAR, 2015, SONG *et al.*, 2016, PRIETO *et al.*, 2016), ondas de Lamb (CHEN *et al.*, 2013, SHAN; CHENG; LI, 2017), correntes de Foucault (ROCHA; RAMOS; RIBEIRO, 2016) e termografia pulsada de corrente de Foucault (LI *et al.*, 2017), radar Doppler (MUÑOZ-FERRERAS *et al.*, 2016) e ondas ultrassônicas guiadas (HOSSEINABADI *et al.*, 2014). Além disso, novos métodos e sensores (JABIR; GUPTA, 2011, PERVEEN *et al.*, 2014, CAO *et al.*, 2015) continuam a ser desenvolvidos para garantir exatidão, precisão e produção de baixo custo de sistemas de SHM confiáveis.

Dentre os vários métodos disponíveis para detecção de danos, o método da impedância eletromecânica (E/M) (ANNAMDAS; RADHIKA, 2013, ALBAKRI; TARAZAGA, 2017, LIU *et al.*, 2017a) destaca-se por utilizar transdutores piezelétricos pequenos, leves e de baixo

custo, operando simultaneamente como atuador e sensor. A metodologia básica do método da impedância E/M consiste em fixar o transdutor piezelétrico à estrutura a ser monitorada e, devido ao efeito piezelétrico (MEITZLER *et al.*, 1988), a impedância mecânica da estrutura monitorada torna-se acoplada à impedância elétrica do transdutor. O dano estrutural altera a impedância mecânica da estrutura, o que causa uma variação correspondente na impedância elétrica do transdutor. Portanto, a estrutura pode ser monitorada medindo-se e analisando-se a impedância elétrica do transdutor.

A caracterização básica de danos é realizada por meio de apropriados índices métricos. Os índices mais utilizados são o desvio da raiz média quadrática (RMSD – *root mean square deviation*) (FARRAR; WORDEN, 2013) e o desvio do coeficiente de correlação (CCDM – *correlation coefficient deviation metric*) (MARQUI *et al.*, 2008). Estes índices comparam dois sinais da impedância elétrica, sendo um deles adquirido e utilizado como referência quando a estrutura é considerada íntegra (*baseline*), enquanto que o segundo sinal é de um momento de teste da estrutura. Uma vez que a detecção de danos é baseada na comparação entre duas assinaturas de impedância, a exatidão e precisão do sistema de medição é fundamental para garantir o diagnóstico correto da estrutura monitorada.

No passado, as medições de impedância elétrica eram realizadas principalmente com analisadores de impedância comerciais, como o HP 4194A e o HP 4294A. Estes instrumentos continuam a ser utilizados em estudos recentes (RUGINA; ENCIU; TUDOSE, 2015, ROTH; GIURGIUTIU, 2017) do método da impedância E/M devido à sua exatidão e precisão favoráveis. No entanto, esses instrumentos são caros e têm muitos recursos não exigidos pelo método da impedância E/M, além de serem volumosos, tornando-os inadequados para aplicações práticas.

Portanto, para superar as desvantagens práticas dos instrumentos convencionais, foram propostos sistemas de medição alternativos. Um dos estudos pioneiros de sistemas de medição de impedância alternativos relatados na literatura (PEAIRS; PARK; INMAN, 2004) propôs um circuito simples baseado em um amplificador operacional que requer o uso de um analisador de espectro comercial para calcular a transformada de Fourier discreta (DFT – *Discrete Fourier Transform*) e obter as assinaturas de impedância no domínio da frequência. Um circuito mais simples, que utiliza apenas um resistor para conectar o transdutor, foi proposto por Xu e Giurgiutiu (2005), onde foi utilizado um gerador de funções para excitar o transdutor e um dispositivo de aquisição de dados (DAQ – *data acquisition*) para obter os sinais de excitação e resposta. Outros sistemas de medição mais versáteis, que não requerem instrumentos

comerciais como geradores de funções e analisadores de espectro, também foram propostos. Esses sistemas são baseados principalmente em microcontroladores (PIASECKI; CHABOWSKI; NITSCH, 2016) ou em dispositivos DAQ multifuncionais (BAPTISTA; VIEIRA FILHO, 2009).

Recentemente, diversos sistemas de medição de impedância foram desenvolvidos utilizando-se o chip AD5933 (ANALOG DEVICES, 2017) da Analog Devices (Norwood, MA), que é uma solução completa para a medição de impedância elétrica em um único chip. Tal dispositivo inclui um núcleo de sintetizador digital direto (DDS – *Direct Digital Synthesizer*) e um conversor digital-analógico (CDA). Esses dispositivos geram um sinal senoidal para a excitação da carga de valor desconhecido sob teste, e um conversor analógico-digital (CAD) é utilizado para amostrar o sinal de resposta. A DFT do sinal de resposta é processada por um processador digital de sinais (DSP – *Digital Signal Processor*) *on-board*, que retorna a impedância elétrica da carga sob teste decomposta em suas componentes real e imaginária, para cada frequência presente na banda de análise desejada. Os sistemas de medição baseados no chip AD5933 podem ser otimizados para incluir a comunicação sem fio e as medições de múltiplos sensores (OVERLY *et al.*, 2008). Várias aplicações utilizaram sistemas de medição baseados neste chip, como a detecção de danos estruturais em sistemas de SHM (MARTOWICZ *et al.*, 2016, NA; PARK, 2017), análise de impedância bioelétrica (HARDER *et al.*, 2016) e detecção de biomarcadores de proteínas (LIU *et al.*, 2017b).

Os analisadores de impedância comerciais e esses sistemas alternativos propostos na literatura utilizam tipicamente uma das seguintes técnicas de medição: (a) medições em estado transitório, que aplicam um sinal de varredura, como um *chirp* (SLEPSKI; DAROWICKI, 2009), para excitar o transdutor (ou outro dispositivo sob teste) em uma ampla faixa de frequência em um curto intervalo de tempo, ou (b) medições em estado estacionário, que utilizam um sinal senoidal puro para cada frequência, exigindo várias etapas e uma duração maior para completar a medição.

## 1.1 Motivação e Objetivos

Sistemas de SHM são responsáveis pelo aumento da segurança e diminuição dos custos com manutenções nas estruturas em que são incorporados. É por esse motivo que esse campo de pesquisa tem tido grande interesse tanto do setor industrial quanto acadêmico.

Diversas técnicas consideradas NDT podem ser utilizadas para tais sistemas e, dentre elas, a da impedância E/M destaca-se pela utilização de transdutores piezelétricos pequenos, leves e de baixo custo. Há diversas soluções para a aplicação desta técnica, que podem ser encontradas em equipamentos comerciais ou em sistemas alternativos. Tais soluções tipicamente fazem uso de duas formas de medição: (a) medições em estado transitório e (b) medições em estado estacionário, ambas brevemente apresentadas na subseção anterior e detalhadas no Capítulo 3 deste trabalho.

Sabe-se que a medição da impedância é etapa crítica nos sistemas de SHM baseados na impedância E/M, uma vez que a detecção de danos estruturais é realizada comparando-se duas assinaturas de impedância. Portanto, medições precisas são fundamentais para o diagnóstico correto do estado da estrutura monitorada.

Dessa forma, este trabalho de mestrado teve como objetivo realizar uma análise comparativa entre essas duas técnicas de medição mais comumente utilizadas. Tal análise buscou apresentar comparações quanto à exatidão, precisão e sensibilidade à presença de danos estruturais. Além disso, outros fatores, como o tempo necessário para a realização das medições, devem ser considerados no desenvolvimento de sistemas de SHM embarcados para o monitoramento em tempo real. Portanto, este trabalho apresenta características importantes das duas técnicas que podem ajudar na escolha do sistema de medição mais apropriado para os sistemas de SHM ou de outras aplicações que exijam a medição de impedância.

## **1.2 Organização do trabalho**

Este trabalho está organizado da seguinte forma:

- Capítulo 1 – Introdução e revisão bibliográfica de sistemas de SHM, assim como de sistemas alternativos baseados na técnica da impedância E/M, além da apresentação da motivação e objetivos para a realização do trabalho;
- Capítulo 2 – Apresentação do método da impedância E/M e do índice de dano utilizado neste trabalho;
- Capítulo 3 – Apresentação das duas técnicas de medição comparadas neste trabalho, com a utilização de diagramas e fluxogramas, além de uma explanação detalhada do funcionamento de cada uma;

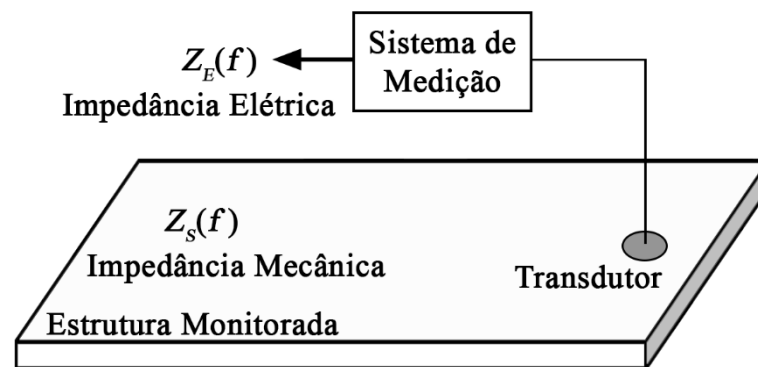
- Capítulo 4 – Apresentação dos materiais e da metodologia utilizada para a realização da análise comparativa entre as duas técnicas de medição;
- Capítulo 5 – Apresentação dos resultados e discussões, analisando-se as principais diferenças e características das duas técnicas de medição quando utilizadas nos testes realizados com cargas básicas (resistor e capacitor) e com um transdutor piezelétrico fixado em uma barra de alumínio, sendo esta a estrutura monitorada sob análise. Os resultados permitiram concluir sobre características importantes das duas técnicas de medição, como exatidão, precisão, sensibilidade à presença de danos estruturais, além outras propriedades, como o tempo de execução de cada técnica e a importante função dos ciclos de tempo de estabilização;
- Por fim, apresenta-se a conclusão, sugestões para trabalhos futuros e as referências bibliográficas.

## Capítulo 2

### Princípio da Impedância Eletromecânica (E/M)

A configuração básica do método da impedância E/M é exposta na Figura 1, em que é apresentado um transdutor piezelétrico fixado a uma estrutura a ser monitorada.

**Figura 1** - Configuração básica do método da impedância E/M.



Fonte: Elaborado pelo autor

Após a fixação do transdutor piezelétrico na estrutura, conforme apresentado na Figura 1, o sistema de medição excita o transdutor em uma frequência apropriada ( $f$ ) enquanto, simultaneamente, mede sua impedância elétrica ( $Z_E(f)$ ). Os transdutores mais comumente utilizados no método da impedância E/M são as cerâmicas de PZT (*Pb-Lead Zirconate Titanate* – Titanato Zirconato de Chumbo) (também conhecidas como sensores ativos de pastilha piezelétrica (PWAS – *Piezoelectric Wafer Active Sensor*)) (GIURGIUTIU, 2010), compósitos de macro fibra (MFC – *Macro Fiber Composite*) (SHAHAB; ERTURK, 2017) e diafragmas piezelétricos (FREITAS; BAPTISTA, 2016, FREITAS *et al.*, 2017). Esses transdutores são leves, pequenos e finos, permitindo, então, que vários transdutores sejam fixados às estruturas a serem monitoradas, sem alterar significativamente as propriedades mecânicas das mesmas.

A relação entre a impedância elétrica ( $Z_E(f)$ ) de um transdutor piezelétrico e a impedância mecânica ( $Z_S(f)$ ) de uma estrutura tem sido amplamente estudada e, com base nas equações constitutivas do material piezelétrico (MEITZLER *et al.*, 1988), muitos pesquisadores têm proposto vários modelos eletromecânicos. Uma versão simplificada de um dos modelos unidimensionais mais conhecidos e comumente utilizado na literatura para mostrar

a interação entre as propriedades elétricas e mecânicas no método da impedância E/M, utilizando-se uma cerâmica de PZT, é dada por (LIANG; SUN; ROGERS, 1994)

$$Z_E(f) = \frac{1}{j2\pi fC} \left( 1 - \frac{d_{31}^2}{s_{11}^E \varepsilon_{33}^T} \frac{Z_S(f)}{Z_S(f) + Z_P(f)} \right)^{-1} \quad (1)$$

em que  $Z_E(f)$  é a impedância elétrica do transdutor na frequência  $f$ ;  $Z_P(f)$  é a impedância mecânica do transdutor;  $Z_S(f)$  é a impedância mecânica da estrutura monitorada;  $C$  é a capacitância estática do transdutor;  $d_{31}$ ,  $s_{11}^E$  e  $\varepsilon_{33}^T$  são as constantes piezoeletrica, de elasticidade (*compliance*) e dielétrica, respectivamente, do material piezoeletrico, onde os sobrescritos  $T$  e  $E$  indicam tensão mecânica constante e campo elétrico constante, respectivamente, e os índices 1 e 3 representam os eixos do sistema de coordenadas naturais do material piezoeletrico para uma conjectura unidimensional; e  $j$  é a unidade imaginária.

De acordo com a Equação (1), qualquer variação na impedância mecânica ( $Z_S(f)$ ) da estrutura monitorada causada por danos, resulta em uma variação correspondente na impedância elétrica ( $Z_E(f)$ ) do transdutor. Portanto, danos estruturais podem ser detectados e quantificados comparando-se duas assinaturas de impedância elétrica por meio do cálculo dos índices de danos. A impedância elétrica é complexa, e a parte real geralmente é a utilizada para calcular os índices de danos, uma vez que é mais sensível ao dano e menos sensível às variações de temperatura (FARRAR; WORDEN, 2013). Como já mencionado no Capítulo 1, um dos índices de danos mais comumente relatado na literatura, e que foi utilizado neste trabalho, é o índice do desvio da raiz média quadrática (RMSD), que é dado por (FARRAR; WORDEN, 2013)

$$\text{RMSD} = \sum_{f=f_I}^{f_F} \sqrt{\frac{[\text{Re}(Z_2(f)) - \text{Re}(Z_1(f))]^2}{\text{Re}(Z_1(f))^2}} \quad (2)$$

em que  $\text{Re}(Z_1(f))$  é a parte real da assinatura de impedância obtida para a estrutura considerada íntegra, também conhecida como *baseline*;  $\text{Re}(Z_2(f))$  é a parte real da assinatura

de impedância obtida sob condição desconhecida (com ou sem danos); e RMSD é o índice calculado na faixa de frequência entre a frequência inicial  $f_I$  e frequência final  $f_F$ .

Idealmente, desconsiderando-se efeitos ambientais como temperatura, vibração e ruído, as assinaturas de impedância e, conseqüentemente, os índices de danos, devem variar apenas devido a danos estruturais. Portanto, como já afirmado, a qualidade do sistema de medição é fundamental para garantir uma reprodutibilidade satisfatória das assinaturas de impedância elétrica e, conseqüentemente, evitar variações nos índices de danos, que é essencial para o diagnóstico correto da estrutura monitorada. As duas técnicas de medição analisadas e comparadas neste trabalho são apresentadas no próximo capítulo.



## Capítulo 3

### Técnicas de Medição

Conforme mencionado no Capítulo 1, duas diferentes técnicas são comumente utilizadas em analisadores de impedância comerciais e sistemas de medição alternativos para excitar um transdutor piezelétrico ou outro dispositivo. A técnica de medição em estado estacionário utiliza como excitação sinais senoidais puros de frequência única, ou seja, a medição é realizada passo a passo para cada frequência de interesse, tornando o processo oneroso em relação ao tempo. Já a técnica de medição em estado transitório utiliza um sinal de varredura, que neste trabalho foi o *chirp*, em que todas as frequências de interesse estão contidas em um único sinal de excitação, acarretando em medições mais rápidas.

Neste capítulo, essas duas técnicas de medição são apresentadas e detalhadas.

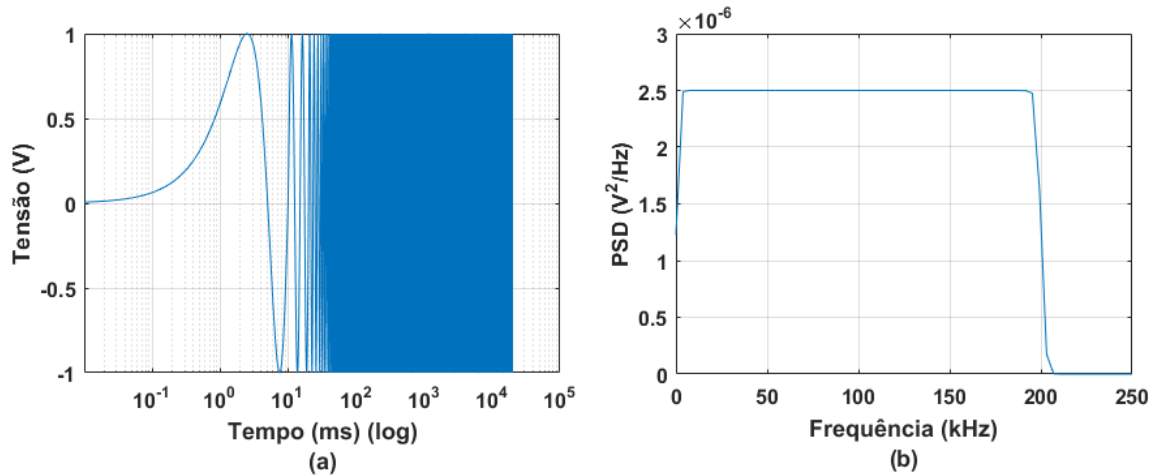
#### 3.1 Medições em Estado Estacionário

A técnica de medição em estado estacionário é semelhante à utilizada pelos analisadores de impedância comerciais e muitos sistemas alternativos, especialmente sistemas baseados no chip AD5933 (OVERLY *et al.*, 2008, HARDER *et al.*, 2016, MARTOWICZ *et al.*, 2016, ANALOG DEVICES, 2017, LIU *et al.*, 2017b, NA; PARK, 2017). Nesta técnica, a impedância elétrica do transdutor é medida passo a passo, utilizando-se um sinal senoidal puro para cada frequência de interesse. Como exemplo, apresenta-se na Figura 2 - (a), a forma de onda e, na Figura 2 - (b), a densidade espectral de potência (PSD – *Power Spectral Density*) de uma composição de sinais senoidais puros com  $A = 1$  V,  $N = 20.000$  por frequência de análise,  $f_I = 100$  Hz,  $f_F = 200$  kHz, passo de frequência ( $d_f$ ) de 100 Hz e  $f_S = 2$  MS/s.

Neste trabalho, a análise das técnicas de medição foi realizada utilizando-se um dispositivo DAQ multifuncional conectado a um computador pessoal (PC), semelhantemente à configuração relatada em Baptista e Vieira Filho (2009). O diagrama de blocos do sistema de medição é apresentado na Figura 3.

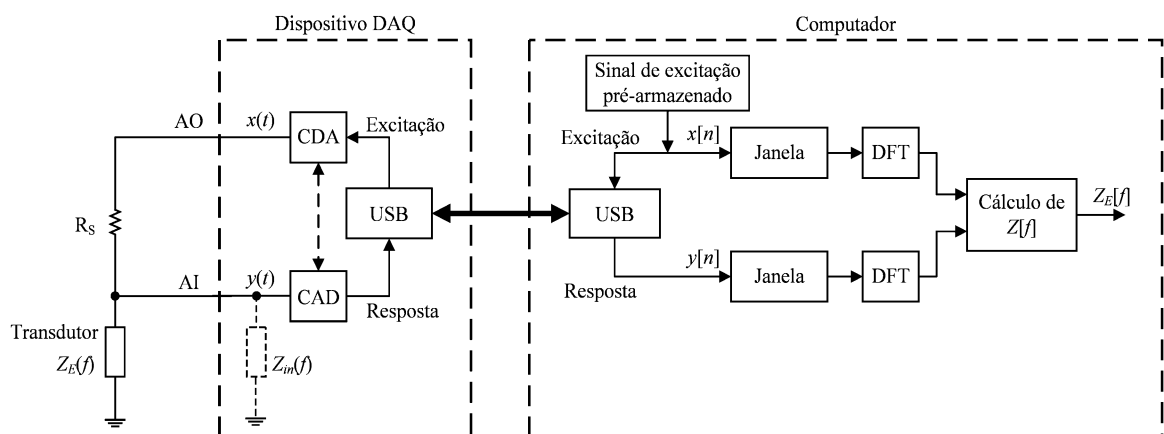
De acordo com a Figura 3, o sinal de excitação ( $x(t)$ ) é gerado por uma saída analógica (AO – *Analog Output*) de um CDA, que excita o transdutor conectado em série com um resistor ( $R_s$ ), resultando em um divisor de tensão. O sinal de resposta ( $y(t)$ ) do transdutor é amostrado

**Figura 2** - (a) Forma de onda e (b) PSD de uma composição de sinais senoidais puros.



Fonte: Elaborado pelo autor

**Figura 3** - Configuração básica utilizada na análise das técnicas de medições.



Fonte: Adaptado de Baptista e Vieira Filho (2009)

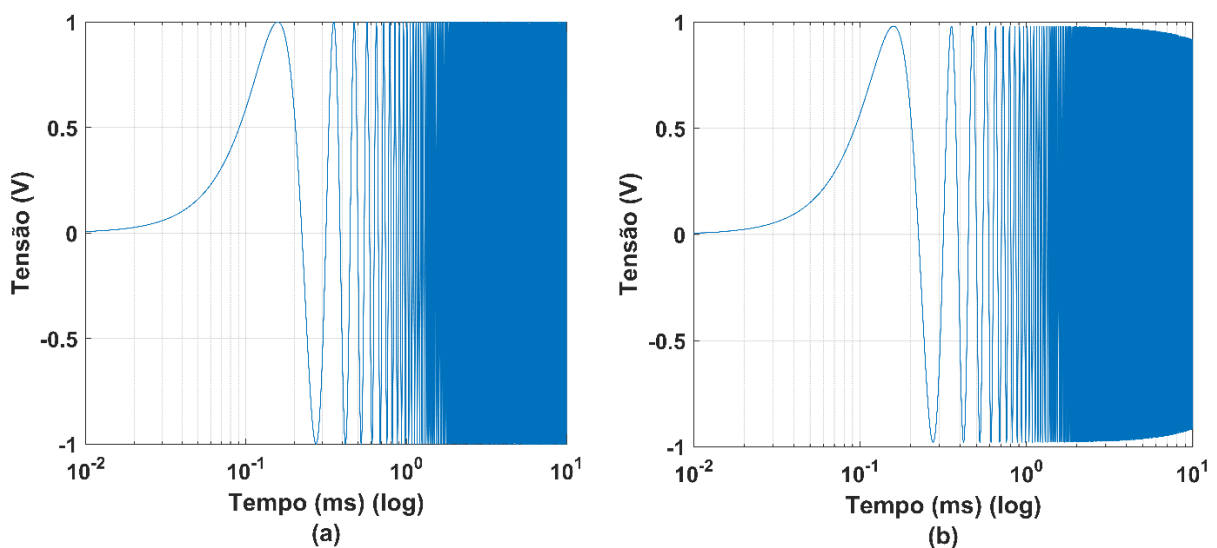
pela entrada analógica (AI – *Analog Input*) de um CAD, de forma síncrona com o sinal de excitação. Os sinais  $x[n]$  e  $y[n]$  são, respectivamente, os sinais de excitação e resposta em tempo discreto.

Os instrumentos de medição comerciais utilizam tipicamente pontes auto balanceadas ou outras técnicas para manter constante a amplitude dos sinais de excitação e resposta, independentemente da impedância do transdutor ou da carga testada. Soluções semelhantes ao divisor de tensão, que consistem no resistor ( $R_s$ ) conectado em série com o transdutor, foram utilizadas em vários estudos (PEAIRS; INMAN; PARK, 2007, RIBOLLA; RIZZO; GULIZZI, 2015, TAYLOR *et al.*, 2016) por sua simplicidade e versatilidade, embora haja a desvantagem

de não se manter a amplitude do sinal de resposta constante, independentemente da frequência ( $f$ ) na qual a impedância é medida. Embora, do ponto de vista estritamente elétrico, a impedância medida não dependa da amplitude do sinal, um sinal de baixa excitação pode reduzir a sensibilidade ao dano em aplicações de SHM, principalmente para grandes estruturas monitoradas. A variação da amplitude do sinal pode ser minimizada escolhendo-se um resistor apropriado de acordo com a faixa de frequência analisada, ou adicionando-se um capacitor em série com o resistor para reduzir a incompatibilidade de impedância, conforme relatado em Peairs, Inman e Park (2007).

Para medições em estado estacionário, o sinal de excitação é uma onda senoidal pura  $x(t) = A \sin(2\pi f_i t)$ , com amplitude  $A$  e frequência fixa  $f_i$ . Neste caso, não é necessário amostrar este sinal durante as medições, uma vez que já é conhecido e gerado por software. No entanto, é recomendado que o sinal de excitação seja amostrado e pré-armazenado para minimizar os efeitos do CDA, semelhantemente ao procedimento seguido em Baptista e Vieira Filho (2009). Tais efeitos incluem a interferência da impedância de saída do CDA e podem ser facilmente visualizados a seguir, onde é apresentado um sinal ideal gerado por software, na Figura 4 – (a), e o mesmo sinal após a passagem pelo CDA e pelo CAD, na Figura 4 – (b). O sinal de exemplo é um sinal *chirp* com  $A = 1$  V,  $N = 20.000$ ,  $f_I = 0$  Hz,  $f_F = 200$  kHz e  $f_S = 2$  MS/s.

**Figura 4** – Sinal *chirp* (a) gerado por software e (b) após a conversão do CDA e amostragem pelo CAD.



Fonte: Elaborado pelo autor

Nota-se, na Figura 4 – (b), que em altas frequências o comportamento do sinal é diferente do sinal ideal gerado por software, já que apresenta uma atenuação conforme ocorre o incremento da frequência de análise.

Dessa forma, o pré-armazenamento do sinal de excitação aumenta a precisão das medições e é implementada conectando-se a entrada (AI) diretamente à saída (AO) do dispositivo DAQ. Outra vantagem desta solução, é que ela viabiliza uma maior taxa de amostragem em dispositivos DAQ multiplexados, já que apenas uma entrada analógica torna-se necessária durante as medições.

A impedância medida em cada frequência é dada por

$$Z_T[f_i] = \frac{R_S}{\frac{X[f_i]}{Y[f_i]} - 1} \quad (3)$$

em que  $X[f_i]$  e  $Y[f_i]$  são as DFTs do sinal de excitação em tempo discreto ( $x[n]$ ) e do sinal de resposta em tempo discreto ( $y[n]$ ), respectivamente, na frequência  $f_i$ , e  $R_S$  é o resistor conectado em série com o transdutor, como mostrado na Figura 3. Uma vez que o interesse é na frequência específica  $f_i$ , é importante aplicar uma janela nos sinais  $x[n]$  e  $y[n]$ , como mostrado na Figura 3, antes de calcular as respectivas DFTs, para minimizar os efeitos de outras frequências resultantes do truncamento dos sinais.

A impedância  $Z_T[f_i]$ , calculada conforme a Equação (3), inclui a impedância de entrada ( $Z_{in}[f_i]$ ) do dispositivo DAQ, que deve ser considerada, dependendo do hardware e da faixa de frequência em que a impedância do transdutor está sendo medida. Portanto, considerando-se que os fios de conexão são curtos e suas resistências podem ser desconsideradas, a impedância elétrica do transdutor ( $Z_E[f_i]$ ) pode ser corretamente calculada como

$$Z_E[f_i] = \frac{Z_{in}[f_i]Z_T[f_i]}{Z_{in}[f_i] - Z_T[f_i]} \quad (4)$$

A impedância de entrada ( $Z_{in}[f_i]$ ) pode ser calculada em cada frequência  $f_i$ , de acordo com as características fornecidas pelo fabricante do dispositivo DAQ. Uma maneira mais

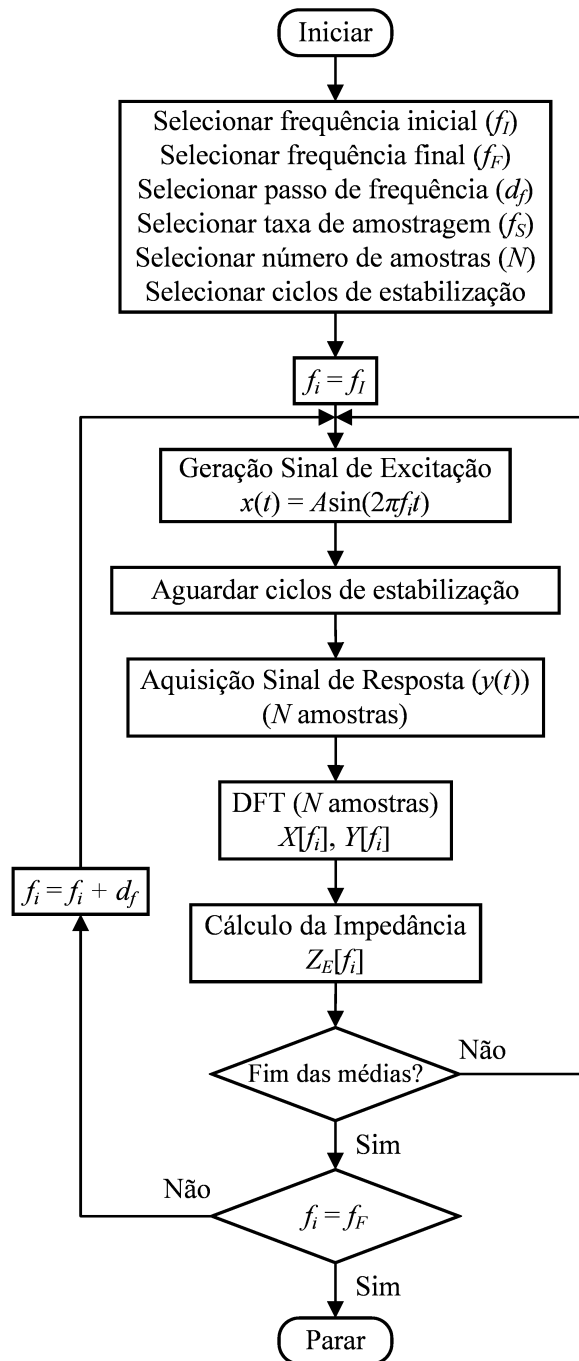
prática e efetiva, que foi utilizada neste trabalho, é realizar a medição com o transdutor (ou qualquer outra carga) desconectado. Nesta condição, a impedância fornecida pelo sistema de medição será a impedância de entrada.

Como as medições são realizadas passo a passo para cada frequência, pode ser necessário um grande número de iterações para obter assinaturas de impedância para bandas largas e pequenos passos de frequência. O fluxograma simplificado desta técnica de medição é apresentado na Figura 5.

Conforme mostrado na Figura 5, após o sinal de excitação ( $x(t)$ ) ser gerado com frequência fixa ( $f_i$ ), é necessário aguardar um determinado número de ciclos de tempo de estabilização ( $CE$ ) antes da amostragem do sinal de resposta ( $y(t)$ ). O número de amostras necessárias para a execução destes ciclos de tempo de estabilização ( $N_{CE}$ ) é obtido pela relação  $N_{CE}(f_i) = CE(1/f_i)f_S$  para cada frequência fixa ( $f_i$ ) de análise. Os ciclos de tempo de estabilização têm efeitos significativos nas assinaturas de impedância, conforme discutido e apresentado no Capítulo 5, seção 5.2. Após tal período, representado no sistema pelo número de amostras  $N_{CE}$ , novas  $N$  amostras do sinal de resposta são amostradas, e as DFTs com  $N$  amostras dos sinais de excitação e resposta são computadas. Para cada passo de frequência ( $d_f$ ), a impedância do transdutor ( $Z_E[f_i]$ ) pode ser obtida pela média de várias medições para obter assinaturas de impedância com maior exatidão e precisão. Para calcular a impedância de acordo com a Equação (4), a impedância de entrada ( $Z_{in}[f_i]$ ) do dispositivo DAQ deve ser pré-calculada para cada passo de frequência, ou medida seguindo-se o procedimento descrito anteriormente. Similarmente, o sinal de excitação deve ser amostrado e pré-armazenado para cada passo de frequência.

O tempo necessário para cada iteração, desconsiderando-se o cálculo da DFT, é  $\Delta t = N/f_S$ , em que  $f_S$  é a taxa de amostragem, além do tempo necessário para os ciclos de tempo de estabilização, dado por  $t_{CE}(f_i) = N_{CE}(f_i)/f_S$ . Dependendo da faixa de frequência analisada, definida pela frequência inicial ( $f_I$ ) e final ( $f_F$ ), o passo de frequência e o número de medições utilizadas para a média, podem ser necessárias muitas iterações para obter uma única assinatura de impedância. Dessa forma, a técnica de medição em estado estacionário pode exigir muito tempo para fornecer uma assinatura de impedância. O tempo necessário para a medição é particularmente crítico nos sistemas de SHM em que a estrutura monitorada opera sob grandes variações de temperatura, uma vez que é de conhecimento geral que a detecção de

**Figura 5** – Fluxograma simplificado de medições em estado estacionário.



Fonte: Elaborado pelo autor

danos com base no método da impedância E/M é sensível a tais variações (FARRAR; WORDEN, 2013). Logo, as variações de temperatura durante o processo de medição podem alterar as assinaturas de impedância de forma desigual, e as técnicas utilizadas para compensar os efeitos da temperatura nem sempre são efetivas neste caso. O tempo necessário para medição

pode ser reduzido utilizando-se a técnica de medição em estado transitório, apresentada na próxima subseção.

### 3.2 Medições em Estado Transitório

Na medição em estado transitório, o sinal de excitação contém todas as componentes de frequência da faixa de frequência desejada, permitindo, assim, que as assinaturas de impedância sejam obtidas rapidamente. Neste trabalho, essa técnica de medição foi analisada utilizando-se o mesmo sistema utilizado para a análise da técnica de medição em estado estacionário, como mostrado na seção 3.1, Figura 3. No entanto, ao invés de sinais senoidais de frequências fixas, um sinal dinâmico do tipo *chirp* foi utilizado como sinal de excitação. O *chirp* é um sinal dinâmico, simples de ser gerado e amplamente utilizado em muitos sistemas de medição (PEAIRS; PARK; INMAN, 2004, XU; GIURGIUTIU, 2005, BAPTISTA; VIEIRA FILHO, 2009, SLEPSKI; DAROWICKI, 2009, GULIZZI *et al.*, 2015, RIBOLLA; RIZZO; GULIZZI, 2015, FREITAS; BAPTISTA, 2016, TAYLOR *et al.*, 2016, FREITAS *et al.*, 2017). Um sinal *chirp* linear foi utilizado como sinal de excitação, onde a frequência varia linearmente em relação ao tempo, e é dado por

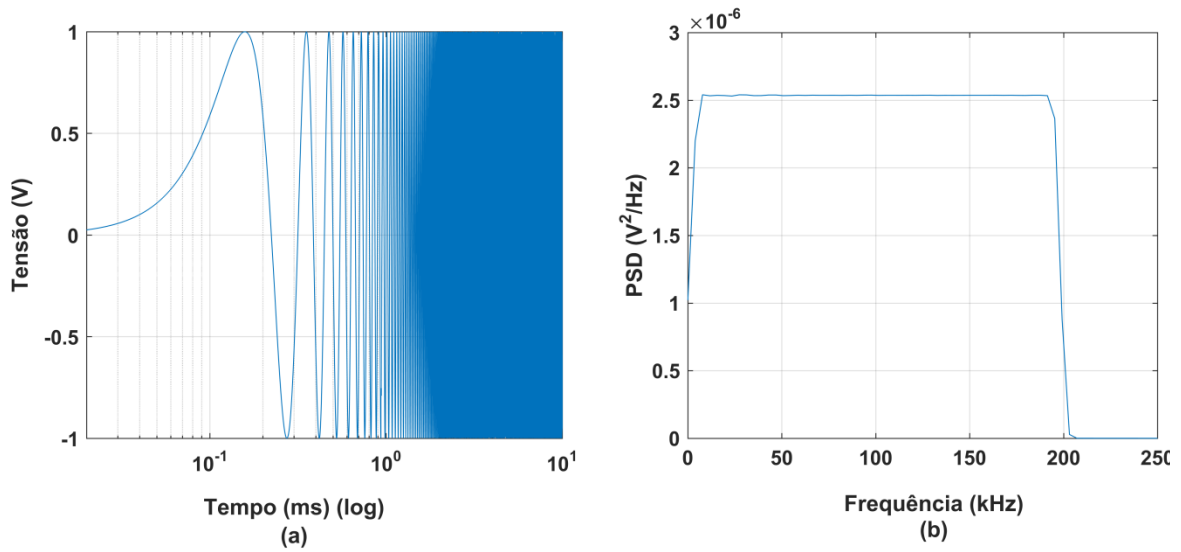
$$x[n] = A \sin \left( \frac{2\pi}{f_S} n \left( \frac{f_F - f_I}{2N} n + f_I \right) \right) \quad (5)$$

em que  $A$  é a amplitude,  $f_I$  e  $f_F$  são as frequências inicial e final, respectivamente,  $f_S$  é a taxa de amostragem,  $n$  é a amostra e  $N$  é o número de amostras.

Como exemplo, apresenta-se na Figura 6 - (a), a forma de onda e, na Figura 6 - (b), a densidade espectral de potência (PSD) de um sinal *chirp* com  $A = 1$  V,  $N = 20.000$ ,  $f_I = 100$  Hz,  $f_F = 200$  kHz e  $f_S = 2$  MS/s.

De acordo com a Figura 6, a frequência do sinal aumenta ao longo do tempo e o seu espectro contém todas as frequências da banda desejada, que neste exemplo é de 100 Hz a 200 kHz. Portanto, o transdutor é excitado em uma ampla faixa de frequência em um curto intervalo de tempo, que é  $\Delta t = N / f_S$ . Consequentemente, as assinaturas de impedância são obtidas

**Figura 6** – (a) Forma de onda e (b) PSD de um sinal chirp.



Fonte: Elaborado pelo autor

rapidamente, dadas por (BAPTISTA; VIEIRA FILHO, 2009)

$$Z_T[f] = R_S \frac{H[f]}{1 - H[f]} \quad (6)$$

sendo  $H[f]$  a função de resposta de frequência (FRF), tomando-se o sinal de excitação ( $x[n]$ ) como entrada e o sinal de resposta ( $y[n]$ ) como saída. A FRF é calculada por uma estimativa espectral dada por

$$H[f] = \frac{S_{xy}[f]}{S_{xx}[f]} \quad (7)$$

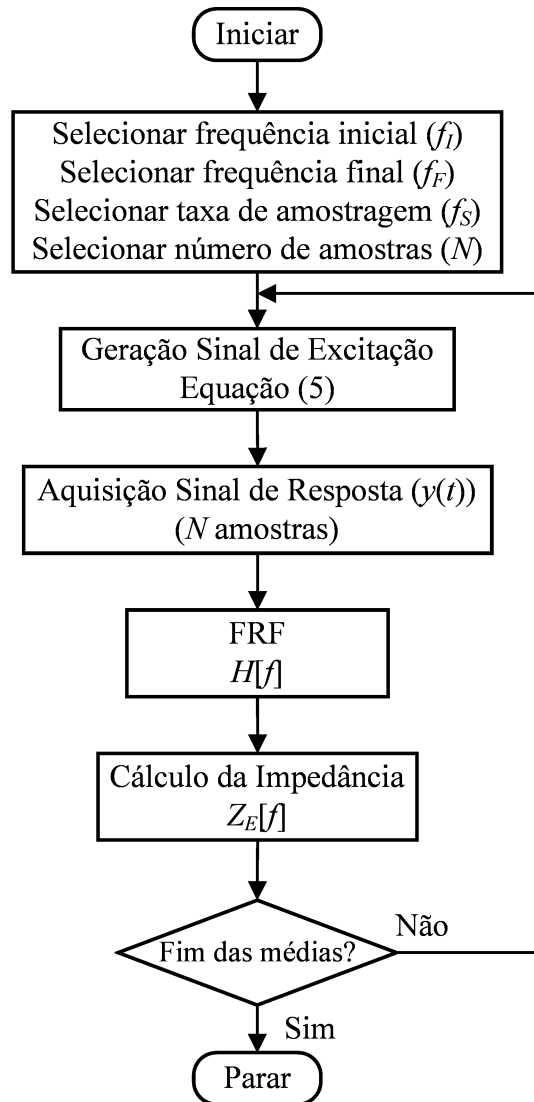
em que  $S_{xy}[f]$  é o espectro de potência cruzado entre o sinal de excitação ( $x[n]$ ) e o sinal de resposta ( $y[n]$ ) e  $S_{xx}[f]$  é o autoespectro de potência do sinal de excitação, ambos obtidos a partir das DFTs  $X[f]$  e  $Y[f]$ .

Semelhante à descrição na subseção anterior, a impedância  $Z_T[f]$ , calculada de acordo com a Equação (6), inclui o efeito de impedância de entrada ( $Z_{in}[f]$ ) do dispositivo DAQ. Sendo assim, a impedância elétrica do transdutor ( $Z_E[f]$ ) pode ser obtida de forma semelhante



à indicada na Equação (4). O fluxograma simplificado desta técnica de medição é exposto na Figura 7.

**Figura 7** – Fluxograma simplificado de medições em estado transitório.



Fonte: Adaptado de Baptista e Vieira Filho (2009)

Conforme mostrado no fluxograma, as assinaturas de impedância podem ser obtidas pela média de várias medições. Ao contrário da técnica descrita na seção anterior, a assinatura de impedância em toda a faixa de frequência desejada, na técnica de medição em estado transitório, é obtida em uma única iteração, que tem a mesma duração do sinal *chirp*, desconsiderando-se o tempo para o cálculo da FRF. Portanto, este processo de medição é consideravelmente mais rápido. Além disso, há uma relação de compromisso entre a taxa de amostragem, o número de

amostras e o passo de frequência das assinaturas de impedância, que é dado por  $d_f = f_s / N$  (BAPTISTA; VIEIRA FILHO, 2009).

As duas técnicas de medição foram analisadas e comparadas quanto à exatidão, precisão, sensibilidade ao dano e tempo necessário para as medições, de acordo com as configurações experimentais apresentadas no próximo capítulo.

## Capítulo 4

### Metodologia

Para analisar e comparar as duas técnicas de medição, o sistema apresentado na seção 3.1, Figura 3, foi implementado utilizando-se um dispositivo DAQ NI-USB-6361, da National Instruments. O uso de um hardware igual permite uma comparação efetiva entre as duas técnicas, garantindo-se que as diferenças observadas na exatidão, precisão e tempo necessários para as medições sejam devido às próprias técnicas e não ao hardware. Um resistor de precisão de  $2,2 \text{ k}\Omega \pm 1\%$  foi utilizado como o resistor em série ( $R_s$ ) para conectar o transdutor ou a carga sob teste. Este valor foi escolhido para garantir uma baixa tensão e, conseqüentemente, um campo elétrico pequeno aplicado ao transdutor piezelétrico. Como é sabido, o efeito piezelétrico é aproximadamente linear quando o campo elétrico é suficientemente baixo (MEITZLER *et al.*, 1988). O software para as duas técnicas foi implementado no LabVIEW, de acordo com os fluxogramas apresentados no Capítulo 3, Figuras 5 e 7.

Para a técnica de medição em estado estacionário, sinais senoidais puros com amplitude  $A = 1 \text{ V}$  foram utilizados como sinais de excitação. As assinaturas de impedância foram obtidas de  $f_I = 100 \text{ Hz}$  a  $f_F = 200 \text{ kHz}$ , com um passo  $d_f = 100 \text{ Hz}$  e taxa de amostragem  $f_S = 2 \text{ MS/s}$ . Essas frequências foram selecionadas de acordo com a taxa de amostragem máxima permitida pelo dispositivo DAQ e a resposta de frequência da entrada analógica do mesmo, que exhibe uma resposta plana até a frequência de  $200 \text{ kHz}$  (NATIONAL INSTRUMENTS, 2015). As DFTs foram computadas com 20.000 amostras dos sinais de excitação e resposta. Além disso, como as medições são obtidas passo a passo para frequências fixas, a janela Hanning foi aplicada aos sinais de tempo antes de calcular as DFTs, como mostrado na Figura 3, para minimizar os efeitos de frequência harmônica devido ao truncamento do sinal em questão. Com base nos resultados das configurações testadas e apresentadas no Capítulo 5, seção 5.2, foram utilizados 1.000 ciclos de tempo de estabilização para cada passo de frequência na maioria das medições. Conforme citado, outras configurações para esta variável de entrada da técnica de medição em estado estacionário também foram testadas previamente, de forma a determinar o valor ideal a ser utilizado neste trabalho. Uma discussão mais detalhada dos efeitos destes ciclos de tempo de estabilização nas medições é apresentada no próximo capítulo.

Para aplicar as mesmas configurações para a técnica de medição em estado transitório, o sinal *chirp*, apresentado na Equação (5), foi configurado para a mesma faixa de frequência,

amplitude, taxa de amostragem e  $N = 20.000$  amostras, que resultou em assinaturas de impedância com um passo de frequência de 100 Hz. No entanto, em contraste com a técnica de medição em estado estacionário, os sinais de excitação e resposta continham todas as frequências da banda de interesse e, portanto, a janela retangular foi utilizada para estas medições. Todas as configurações acima citadas estão resumidas, a seguir, na Tabela 1.

**Tabela 1** – Configurações utilizadas para as duas técnicas de medição

|   | <b>Estado Transitório</b> | <b>Estado Estacionário</b> |
|---|---------------------------|----------------------------|
| <b>Amplitude</b>                        | 1 V                       | 1 V                        |
| <b>Taxa de Amostragem</b>               | 2 MS/s                    | 2 MS/s                     |
| <b>Número de Amostras</b>               | 20.000                    | 20.000                     |
| <b>Frequência Inicial</b>               | 100 Hz                    | 100 Hz                     |
| <b>Frequência Final</b>                 | 200 kHz                   | 200 kHz                    |
| <b>Passo de Frequência</b>              | 100 Hz                    | 100 Hz                     |
| <b>Ciclos de Tempo de Estabilização</b> | -                         | 1.000                      |
| <b>Janela</b>                           | Retangular                | Hanning                    |

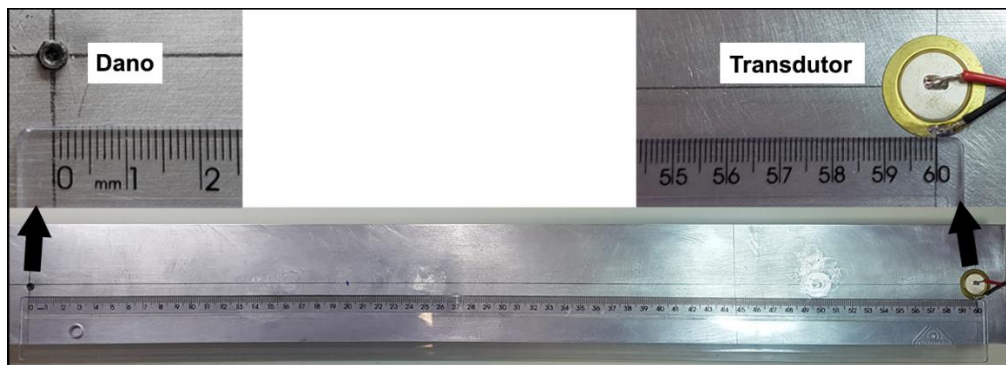
No primeiro teste, as duas técnicas de medição foram comparadas em relação às medições de duas cargas básicas: um resistor e um capacitor com valores nominais de 100  $\Omega$  e 10 nF, respectivamente. Como valores de referência, foram utilizadas medidas de um medidor LCR, U1733C, da Agilent, configurado para a frequência de 100 kHz. Os valores obtidos para o resistor e capacitor foram 99.180  $\Omega$  e 10.64 nF, respectivamente. Além disso, o resistor possui uma pequena componente indutiva de 0,6  $\mu$ H. Para este teste, várias assinaturas de impedância foram coletadas e, em sequência, calculados a média e o desvio padrão para analisar e comparar a exatidão e a precisão das duas técnicas com base nos valores de referência obtidos.

Em seguida, os testes foram realizados em uma barra de alumínio com dimensões de 790 mm x 75 mm x 3 mm e massa de 481,7 g, representando a estrutura monitorada. Um diafragma piezelétrico, modelo 7BB-20-6, fabricado pela Murata Electronics North America, Inc. (Smyrna, GA, EUA), com uma placa de latão circular de 20 mm de diâmetro e 0,20 mm de espessura, e uma cerâmica piezelétrica (elemento ativo) de 14 mm de diâmetro e 0,22 mm de espessura, foi fixado a 20 mm de uma extremidade da barra, utilizando-se um adesivo a base de cianoacrilato para obter as assinaturas de impedância. Como demonstrado em estudos experimentais (FREITAS; BAPTISTA, 2016) e teóricos (FREITAS *et al.*, 2017) anteriores, esse diafragma piezelétrico tem propriedades semelhantes às cerâmicas de PZT convencionais e é sensível ao dano, ao menos quando utilizado para aplicações em pequenas estruturas e

excitado com um sinal de baixa tensão, que são as condições experimentais utilizadas neste trabalho.

O dano foi induzido na estrutura por adição de massa, fixando-se uma porca de aço de dimensões 2 x 4 mm e massa de 0,1361 g a uma distância de 600 mm do transdutor, utilizando-se também um adesivo a base de cianoacrilato. Tal porca representa uma variação (incremento) de massa de 0,03% para a barra de alumínio sob monitoramento. Esse procedimento altera a impedância mecânica da estrutura de forma semelhante a um dano real, com a vantagem de não danificar permanentemente a estrutura. Essa configuração é apresentada na Figura 8.

**Figura 8** – Barra de alumínio com o transdutor piezelétrico e o dano induzido.

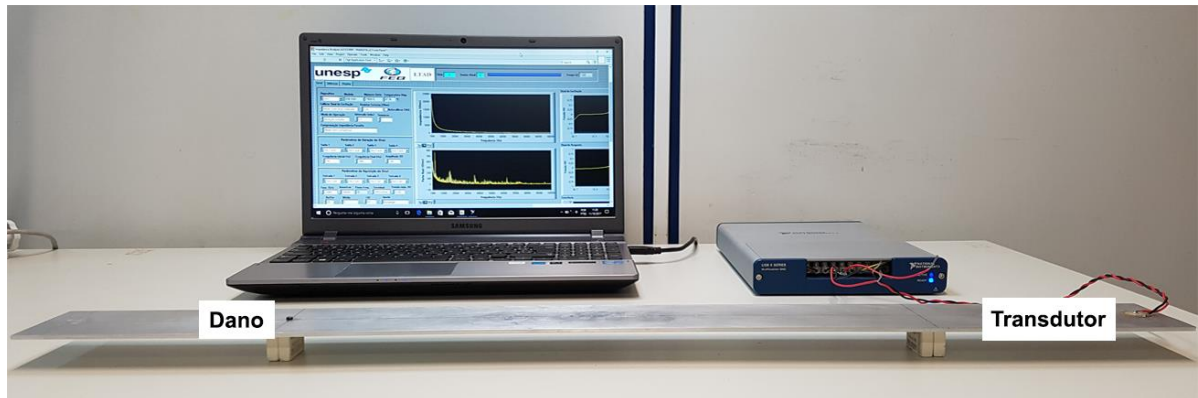


Fonte: Elaborado pelo autor

O índice RMSD foi calculado de acordo com a Equação (2), em diferentes faixas de frequência, para analisar e comparar a reprodutibilidade dos resultados e a sensibilidade ao dano, utilizando-se as duas técnicas de medição. Como é comumente conhecido, o método da impedância E/M é sensível às variações de temperatura (FARRAR; WORDEN, 2013). Portanto, para evitar efeitos de temperatura ao comparar as duas técnicas, todas as medições foram realizadas a uma temperatura controlada de 25 °C, utilizando-se um aparelho de ar condicionado. Além disso, a barra de alumínio foi colocada em blocos de borracha sobre uma bancada para que os efeitos de vibrações externas fossem minimizados. A configuração experimental é apresentada na Figura 9.

Para garantir uma exatidão satisfatória, a impedância de entrada do dispositivo DAQ foi considerada como indicado na Equação (4) em todas as medições obtidas pelas duas técnicas. Os resultados são apresentados e discutidos no próximo capítulo.

**Figura 9** – Configuração experimental.



Fonte: Elaborado pelo autor

## Capítulo 5

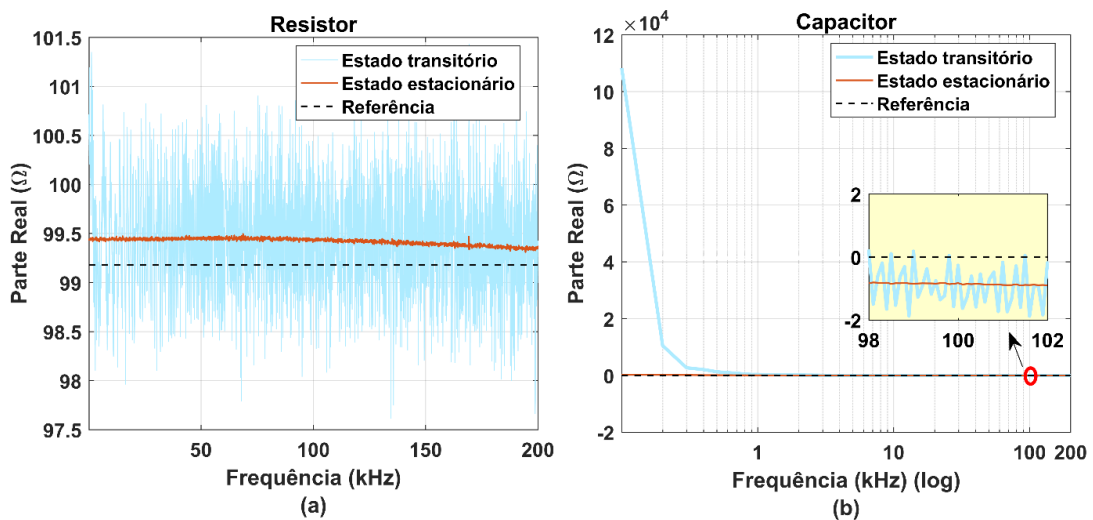
### Resultados e Discussões

Neste capítulo, são apresentados e analisados os resultados das medições de impedâncias elétricas obtidas para as cargas básicas e para o transdutor piezelétrico fixado à barra de alumínio. Uma vez que a reprodutibilidade dos resultados é importante para os sistemas de SHM baseados na impedância E/M, a exatidão e a precisão das duas técnicas de medição foram analisadas e comparadas, a fim de garantir o diagnóstico correto do estado da estrutura monitorada. Os resultados obtidos para as cargas básicas são apresentados na próxima subseção.

#### 5.1 Cargas Básicas

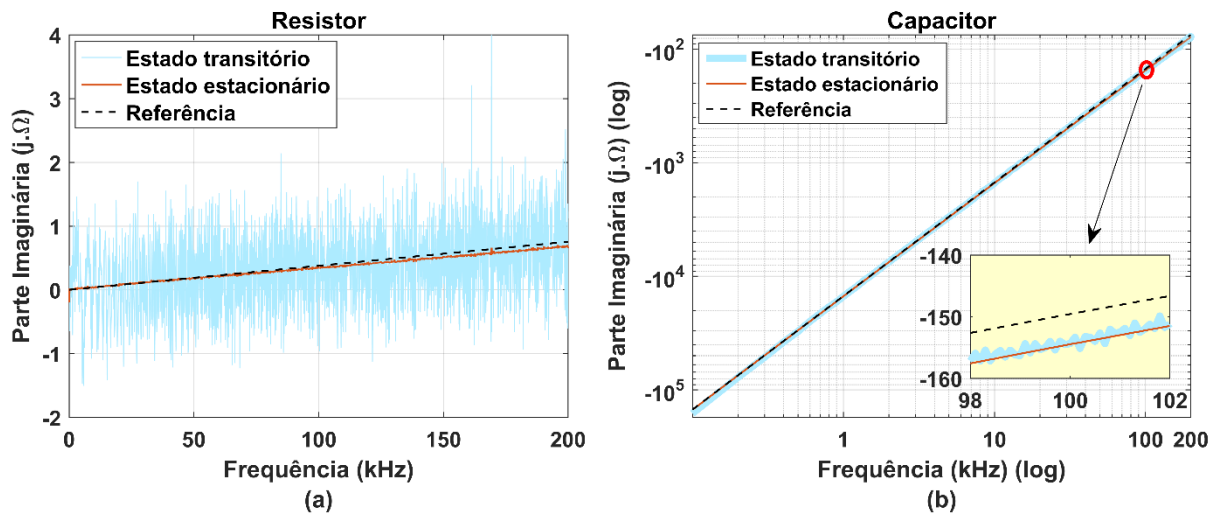
As assinaturas de impedância elétrica das cargas básicas foram coletadas utilizando-se as duas técnicas de medição. A exatidão de cada técnica foi analisada com base nos valores de referência, obtidos com um instrumento comercial, conforme descrito no Capítulo 4. As partes reais e imaginárias das assinaturas de impedância obtidas para o (a) resistor e (b) capacitor são expostas nas Figuras 10 e 11, respectivamente. O módulo da impedância não é apresentado, uma vez que é simplesmente uma combinação das partes real e imaginária.

**Figura 10** – Parte real da impedância obtida para o (a) resistor e (b) capacitor.



Fonte: Elaborado pelo autor

**Figura 11** – Parte imaginária da impedância obtida para o (a) resistor e (b) capacitor.



Fonte: Elaborado pelo autor

Além das assinaturas de impedância obtidas pelas duas técnicas de medição, as assinaturas de referência, baseadas nos valores obtidos com o instrumento comercial, também são apresentadas nas Figuras 10 e 11. É importante ressaltar que os valores de referência foram obtidos na frequência de teste de 100 kHz, que é a maior frequência permitida pelo medidor LCR (Agilent U1733C) utilizado neste estudo. Para as outras frequências, os valores foram teoricamente estimados por meio das equações teóricas da impedância da respectiva carga sob análise. As assinaturas foram obtidas sem a realização de média, para garantir uma comparação efetiva entre as duas técnicas.

De acordo com os resultados obtidos para as cargas resistivas e capacitivas, as duas técnicas de medição forneceram medições próximas aos valores de referência. A parte imaginária da carga resistiva exibiu um ligeiro aumento com a frequência devido à sua pequena componente indutiva de 0,6  $\mu\text{H}$ , conforme mencionado no Capítulo 4. No entanto, as medidas obtidas utilizando-se a técnica de medição em estado estacionário estão mais próximas dos valores de referência e variam significativamente menos entre os passos de frequência do que as medidas obtidas com a técnica de medição em estado transitório. A maior discrepância foi observada para a parte real da impedância do capacitor quando medida com a técnica de medição em estado transitório, uma vez que eram esperados valores baixos, mas foram obtidos valores altos para frequências abaixo de 300 Hz. Constatou-se com outros testes que quanto menor é a capacitância, mais significativa é esta discrepância. No entanto, isso não é relevante para aplicações de SHM baseadas na impedância E/M, já que os danos geralmente são

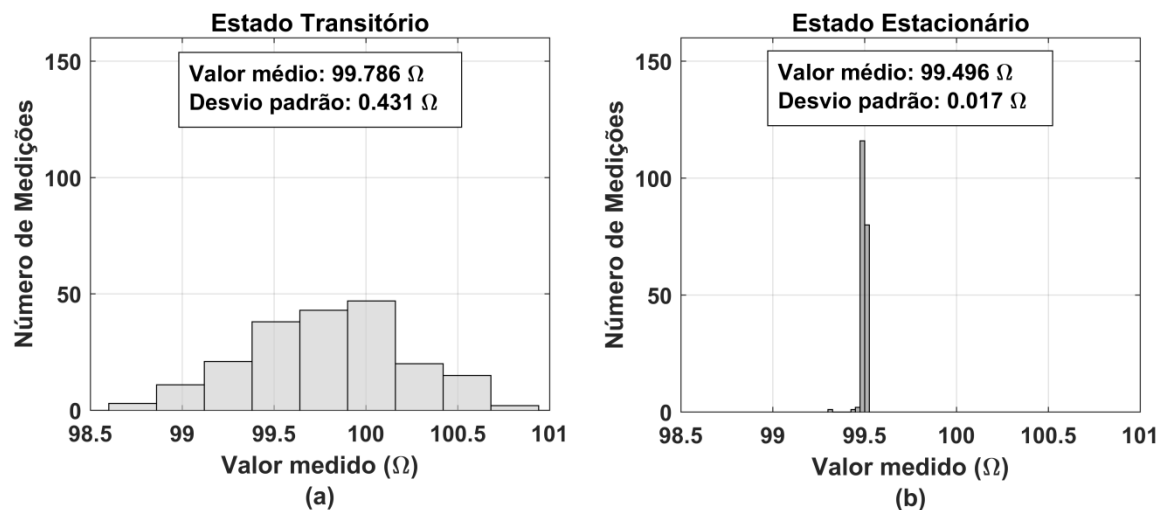


detectados em altas frequências, onde os resultados apresentaram-se próximos dos valores de referência.

Outra característica importante que deve ser considerada é o tempo necessário para obter cada assinatura de impedância. A técnica de medição em estado transitório fornece assinaturas relativamente rápidas, exigindo aproximadamente 0,4 s para as configurações utilizadas neste trabalho. Embora a qualidade das medições da técnica de medição em estado estacionário seja superior, como é visível nas Figuras 10 e 11, tal técnica requer um tempo muito maior de execução, de aproximadamente 3,3 minutos, para fornecer assinaturas de impedância na mesma faixa e passo de frequência que a técnica de medição em estado transitório.

Para uma comparação quantitativa entre as duas técnicas, realizou-se uma análise mais detalhada considerando-se somente a carga resistiva. Para tal, foram adquiridas 200 assinaturas de impedância e foram considerados para a análise os valores da resistência a uma frequência de 100 kHz, possibilitando a elaboração de histogramas das medições, além do cálculo do valor médio e o desvio padrão para os dados obtidos. Inicialmente, a análise foi realizada sem a média das assinaturas de impedância. São apresentados, na Figura 12, os histogramas das medições obtidas para as duas técnicas.

**Figura 12** – Histogramas das medições obtidas para a carga resistiva sem médias, utilizando-se as técnicas de medição em (a) estado transitório e (b) estado estacionário.



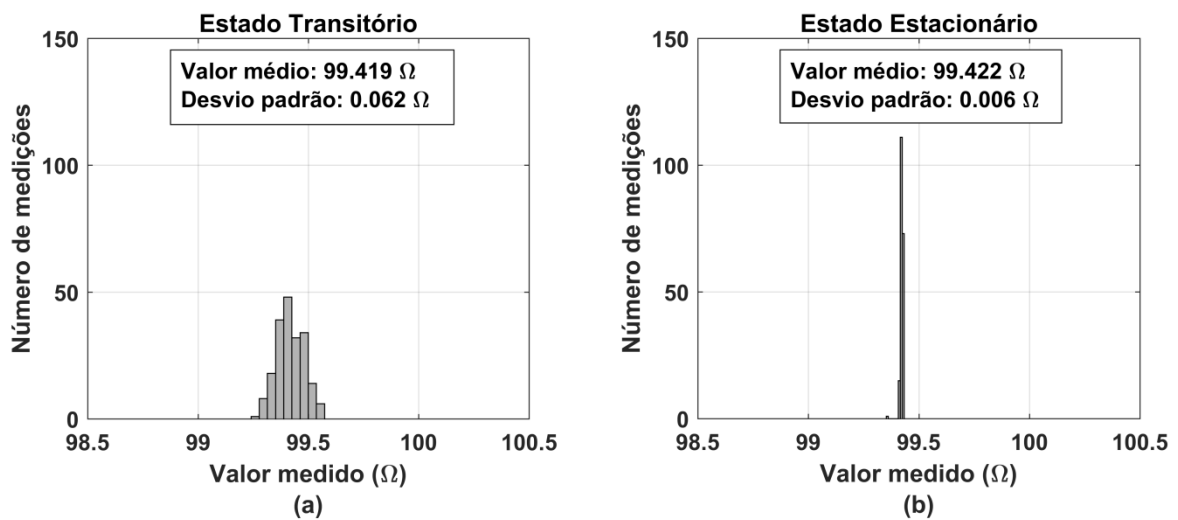
Fonte: Elaborado pelo autor

Conforme mostrado na Figura 12, as medidas obtidas pela técnica de medição em estado transitório mostram uma dispersão significativa em relação ao valor médio de 99,786 Ω, com um erro de 0,61% em relação ao valor de referência (99.180 Ω) e desvio padrão de 0.431 Ω.

Em contrapartida, as medidas fornecidas pela técnica de medição em estado estacionário são significativamente mais concentradas em torno do valor médio de  $99.496 \Omega$ , com um erro de  $0,32\%$  em relação ao valor de referência e desvio padrão de apenas  $0,017 \Omega$ . Portanto, embora a técnica de medição em estado estacionário seja significativamente mais precisa (com menor desvio padrão), as duas técnicas têm exatidão similar.

A exatidão e precisão podem ser melhoradas realizando-se a média de várias medições. Como exemplo, são apresentados, na Figura 13, os histogramas de 200 medições, em que cada medição foi obtida pelo cálculo da média de 50 medidas.

**Figura 13** – Histogramas das medições obtidas para a carga resistiva com a realização de média sobre 50 medições, utilizando-se as técnicas de medição em (a) estado transitório e (b) estado estacionário.

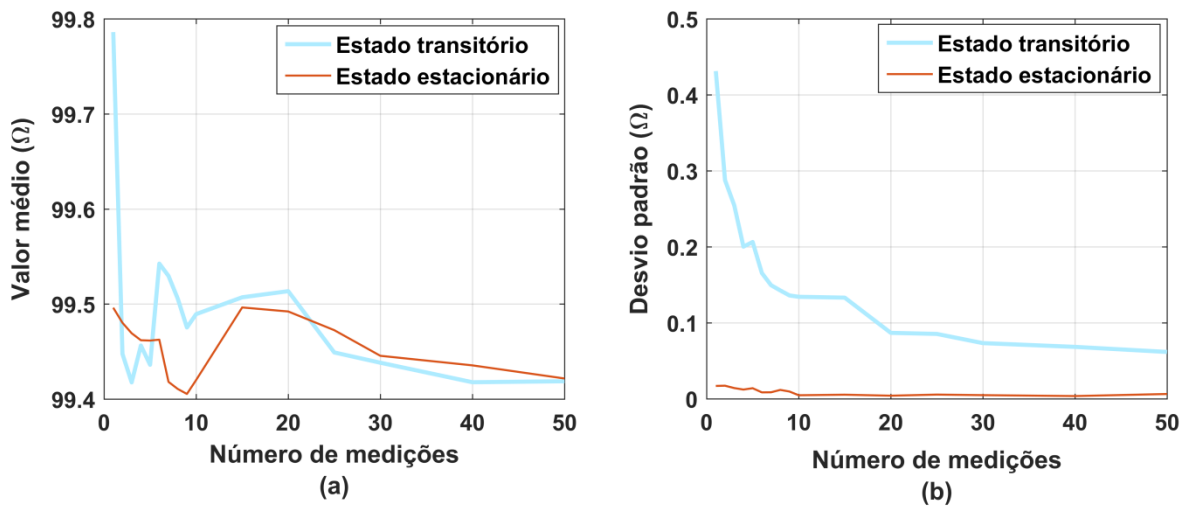


Fonte: Elaborado pelo autor

De acordo com os resultados, a média permite uma melhoria significativa na precisão. Como pode ser observado na Figura 13, as medições obtidas para a técnica de medição em estado transitório são mais concentradas em relação ao valor médio do que os resultados obtidos sem a realização de média, apresentados na Figura 12. Além disso, com a média das medidas, o desvio padrão diminuiu de  $0,431 \Omega$  para  $0,062 \Omega$ . Já para a técnica de medição em estado estacionário, o desvio padrão diminuiu de  $0,017 \Omega$  para  $0,006 \Omega$ . Os valores médios também mostraram uma pequena alteração devido à média das medições, tornando-se mais próximos entre as duas técnicas.

Os efeitos da média sobre o valor médio e o desvio padrão podem ser melhor analisados observando-se os resultados na Figura 14, onde são apresentadas as variações desses parâmetros em relação ao número de medidas utilizadas para a média.

**Figura 14** – Comportamento do (a) valor médio e (b) desvio padrão em relação ao número de medições utilizadas para a média.



Fonte: Elaborado pelo autor

Como pode ser observado na Figura 14, o desvio padrão diminui (isto é, a precisão aumenta) à medida que o número de medidas utilizadas na média aumenta, convergindo para um valor mínimo, que ocorreu após a utilização de 50 medições, para ambas as técnicas utilizadas neste trabalho. O valor médio também exibe uma pequena variação em relação ao número de medições utilizadas para a média, conforme observado anteriormente, indicando uma exatidão similar para as duas técnicas de medição. Os resultados obtidos para a carga resistiva utilizando-se as duas técnicas de medição estão resumidos na Tabela 2.

**Tabela 2** – Comparação dos resultados obtidos para as duas técnicas de medição com cargas básicas

|                         | Medição em Estado Transitório |                       | Medição em Estado Estacionário |                       |
|-------------------------|-------------------------------|-----------------------|--------------------------------|-----------------------|
|                         | Sem média                     | Média com 50 medições | Sem média                      | Média com 50 medições |
| <b>Tempo de medição</b> | 0,4 segundos                  | 0,9 segundos          | 3,3 minutos                    | 2,8 horas             |
| <b>Valor médio</b>      | 99,786 $\Omega$               | 99,419 $\Omega$       | 99,496 $\Omega$                | 99,422 $\Omega$       |
| <b>Exatidão</b>         | 99,389%                       | 99,759%               | 99,681%                        | 99,756%               |
| <b>Precisão</b>         | $\pm 0,431 \Omega$            | $\pm 0,062 \Omega$    | $\pm 0,017 \Omega$             | $\pm 0,006 \Omega$    |

Conforme observado na Tabela 2, embora as duas técnicas forneçam medidas com exatidão similar, a precisão entre elas é significativamente diferente. A técnica de medição em estado estacionário fornece uma melhor precisão, mas requer muito mais tempo para fornecer uma assinatura de impedância. Por exemplo, para uma média sobre 50 medições, a técnica de

estado estacionário requer aproximadamente 2,8 horas para fornecer uma assinatura de impedância com uma precisão de  $\pm 0,006 \Omega$ . Em contrapartida, a técnica de medição em estado transitório requer aproximadamente 0,9 s, embora a precisão seja pior ( $\pm 0,062 \Omega$ ). Vale ressaltar que o registro dos tempos é realizado automaticamente pelos sistemas de medição, fornecendo valores reais do tempo de execução de cada sistema. Além disso, as diferenças observadas em relação aos comportamentos dos tempos de medição para os dois sistemas estão relacionadas com o funcionamento dos mesmos, como pode ser analisado pelos fluxogramas apresentados no Capítulo 3, Figuras 5 e 7. Tais diferenças ocorrem em razão de diferentes variáveis, como os ciclos de tempo de estabilização, tempo de carregamento dos arquivos de calibração dos sinais de excitação, cálculo das DFTs e realização das médias.

Portanto, existe uma relação de compromisso entre a precisão e o tempo necessário para a medição. Essa relação é particularmente crítica em aplicações de SHM. Uma técnica de medição rápida é desejável se o monitoramento estrutural requer que as assinaturas de impedância sejam obtidas em uma ampla faixa e pequeno passo de frequência. No entanto, um sistema preciso permite a detecção confiável de danos incipientes. Os resultados obtidos para o transdutor piezelétrico fixado à barra de alumínio são apresentados na próxima seção.

## 5.2 Transdutor Piezelétrico

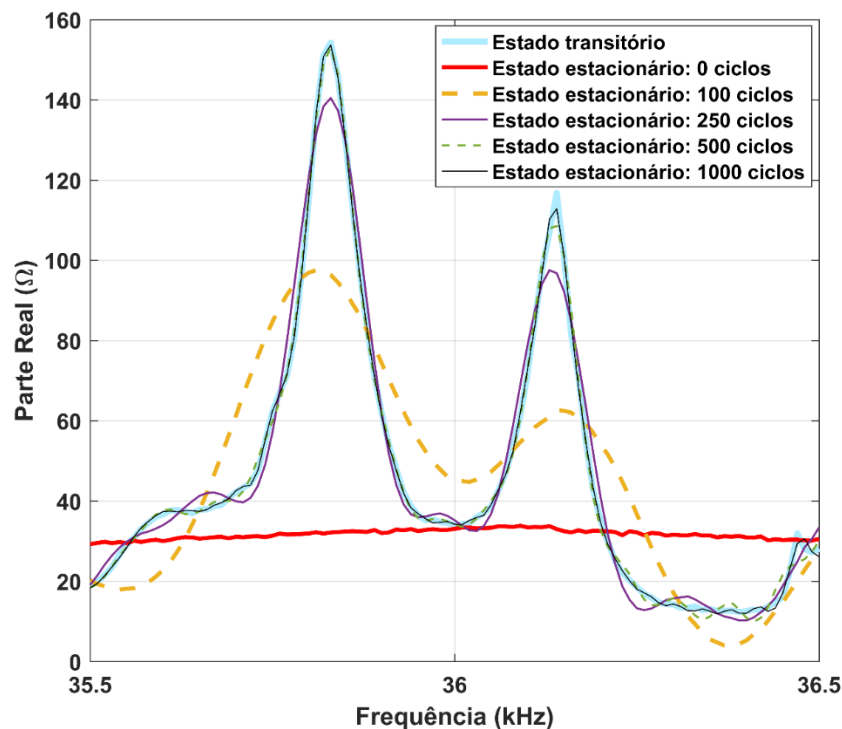
Nesta etapa do trabalho, foram utilizados transdutores piezelétricos para o monitoramento estrutural de uma barra de alumínio, como apresentado no Capítulo 4. Inicialmente, houve a necessidade da realização de alguns testes para a obtenção de valores ideais de parâmetros que deveriam ser configurados em cada sistema, principalmente quanto aos ciclos de tempo de estabilização no sistema de medição em estado estacionário.

Para esses sistemas, há uma relação de compromisso importante entre o número de ciclos de tempo de estabilização e o de amostras utilizadas para calcular a DFT, conforme apresentado no fluxograma da Figura 5. O tempo total durante o qual a estrutura monitorada é excitada, que é a soma dos tempos exigidos pelos ciclos de tempo de estabilização e a aquisição das amostras para calcular a DFT, deve ser suficiente para detectar os picos de ressonância nas assinaturas de impedância relacionados às frequências naturais da estrutura.

Esse problema é particularmente crítico em sistemas embarcados (OVERLY *et al.*, 2008, HARDER *et al.*, 2016, MARTOWICZ *et al.*, 2016, ANALOG DEVICES, 2017, LIU *et al.*,

2017b, NA; PARK, 2017) em que o número de amostras adquiridas para calcular DFT é limitado, exigindo um maior número de ciclos de tempo de estabilização. Portanto, para garantir que todos os resultados apresentados nesta etapa do trabalho fossem confiáveis e aptos a comparações entre os dois sistemas de medição analisados, um teste inicial foi realizado escolhendo-se como  $N = 1.024$  o número de amostras na técnica de medição em estado estacionário, que é uma quantidade comum em dispositivos comerciais. Além disso, para uma melhor observação dos picos de ressonância, o passo de frequência foi de 10 Hz, acarretando em um número de amostras para a técnica de medição em estado transitório de  $N = 200.000$ . É apresentada, na Figura 15, uma comparação entre as assinaturas de impedância (parte real) obtidas utilizando-se as duas técnicas de medição, com o número de ciclos de tempo de estabilização variando de 0 a 1.000.

**Figura 15** – Efeitos dos ciclos de tempo de estabilização da técnica de medição em estado estacionário nas assinaturas de impedância.



Fonte: Elaborado pelo autor

De acordo com a Figura 15, os ciclos de tempo de estabilização têm uma influência significativa nas assinaturas de impedância. Sem esses ciclos, os picos de ressonância não são detectados nas assinaturas de impedância, o que torna impossível a detecção de danos estruturais. Os picos de ressonância nas assinaturas de impedância obtidas pela técnica de

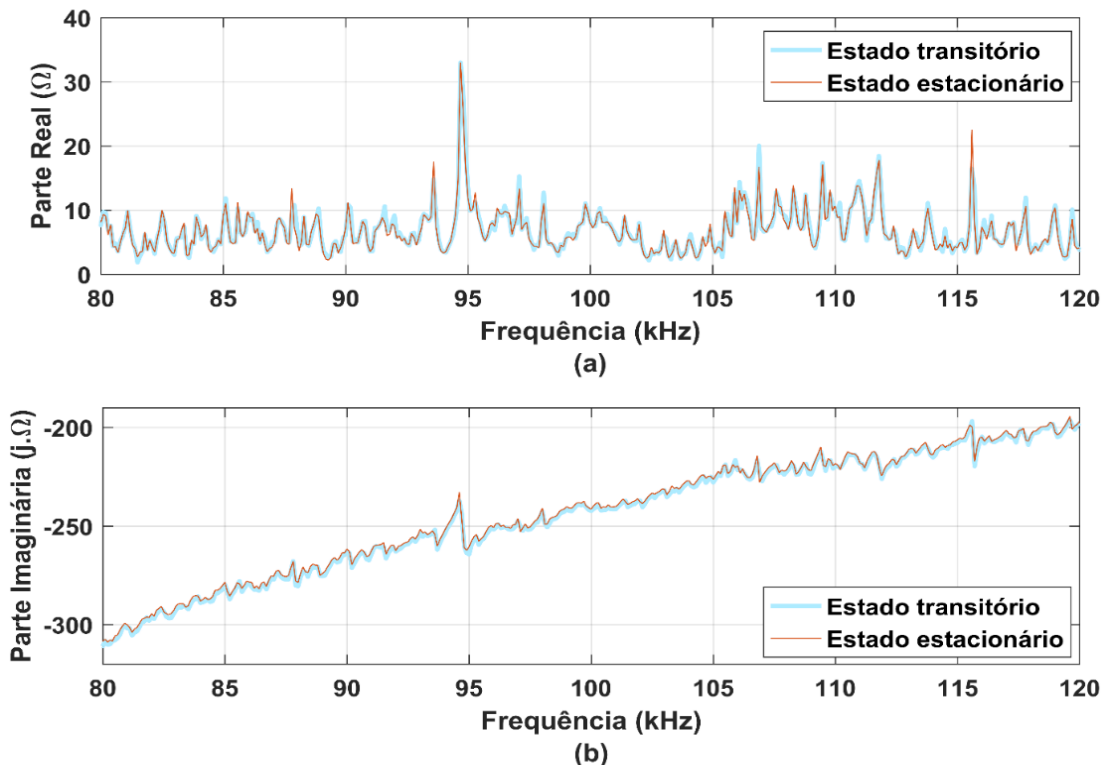
medição em estado estacionário com 1.000 ciclos de tempo de estabilização aproximam-se dos obtidos com a técnica de medição em estado transitório. As assinaturas de impedância apresentadas na Figura 15 são para uma faixa de frequência estreita em torno de 36 kHz, mas resultados semelhantes são obtidos em toda a banda de análise.

A técnica de medição em estado transitório tem uma vantagem neste contexto, uma vez que o sinal de excitação possui uma ampla faixa de frequência, conforme mostrado na Figura 6, e todas as frequências naturais da estrutura monitorada são excitadas durante um curto intervalo de tempo, fornecendo rapidamente as assinaturas de impedância.

Portanto, visando uma comparação equitativa entre os dois sistemas de medição, permitindo que as discrepâncias observadas sejam de fato devido às diferenças nas técnicas de medição e não quanto aos hardwares dos sistemas, para os resultados expostos a seguir e nas seções 5.2.1 e 5.2.2, foram utilizadas as mesmas configurações apresentadas no Capítulo 4, resumidas na Tabela 1.

Como uma forma de validar as configurações utilizadas, expõe-se na Figura 16, uma comparação da parte real e da parte imaginária das assinaturas de impedância, obtidas utilizando-se as duas técnicas de medição.

**Figura 16** – (a) Parte real e (b) imaginária das assinaturas de impedância obtidas para o transdutor piezolétrico utilizando-se as duas técnicas de medição.



Fonte: Elaborado pelo autor

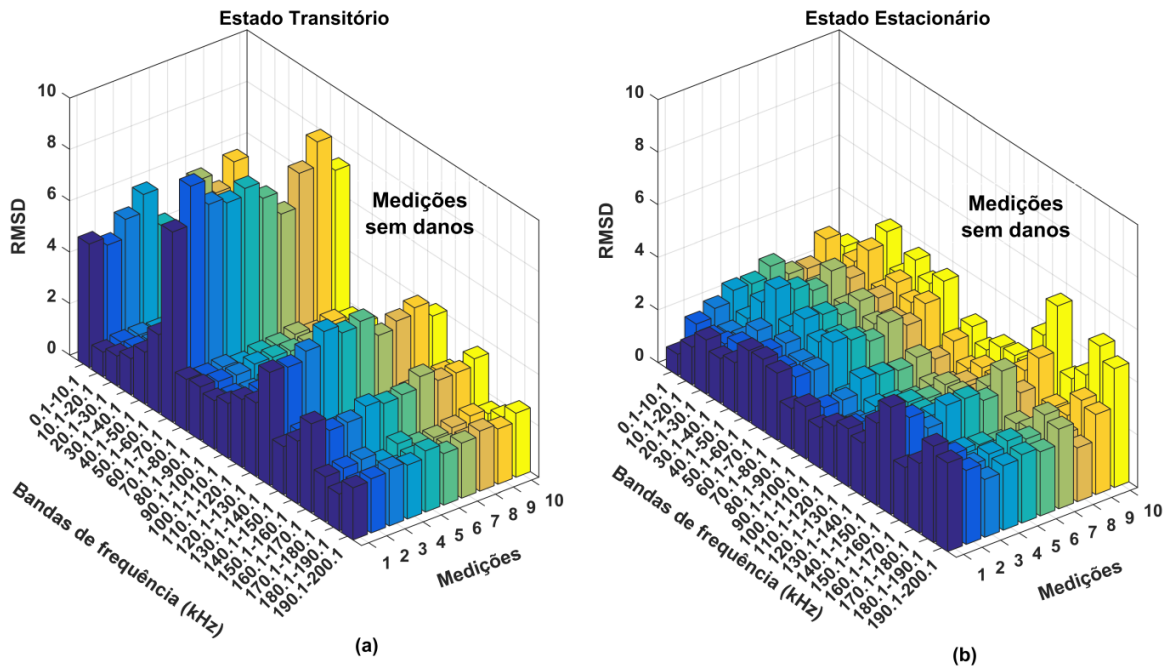
As assinaturas de impedância, expostas na Figura 16, foram obtidas sem a realização de média para uma comparação efetiva entre as duas técnicas. Uma faixa estreita de 80-120 kHz é exibida para uma comparação adequada entre as assinaturas. Tanto para a parte real quanto para a parte imaginária, as assinaturas obtidas utilizando-se as duas técnicas têm características semelhantes em amplitude e forma. Observa-se ainda que os picos de ressonância relacionados às frequências naturais da estrutura, que são fundamentais para a detecção de danos, foram igualmente detectados nas assinaturas de impedância elétrica obtidas com as duas técnicas, comprovando que as configurações utilizadas para as duas técnicas de medição permitem as análises de reprodutibilidade e sensibilidade ao dano, apresentadas a seguir, respectivamente, nas seções 5.2.1 e 5.2.2.

### 5.2.1 Reprodutibilidade dos Resultados

Conforme afirmado anteriormente, a reprodutibilidade dos resultados é importante em aplicações de SHM baseadas na impedância E/M, uma vez que a detecção de danos é realizada pela comparação entre duas assinaturas de impedância utilizando-se índices de danos. Dessa forma, as variações na impedância que são causadas pelo sistema de medição podem dificultar o diagnóstico correto da estrutura, especialmente na ocorrência de danos muito pequenos e em estágio inicial. Para avaliar as duas técnicas de medição quanto à reprodutibilidade dos resultados, foram obtidas 11 assinaturas de impedância sem a realização de médias, sendo que a primeira foi utilizada como *baseline* em relação às outras assinaturas para a realização do cálculo do índice RMSD pela Equação (2). O índice RMSD foi calculado em sub-bandas de 10 kHz para avaliar a reprodutibilidade dos resultados em relação à frequência. Os índices RMSD são apresentados na Figura 17.

Como a estrutura monitorada (barra de alumínio) não sofreu nenhuma alteração devido a danos e as medições foram realizadas em um ambiente controlado por temperatura, são esperados valores baixos (idealmente 0) para os índices RMSD. De acordo com a Figura 17, os índices obtidos para a técnica de medição em estado estacionário geralmente têm valores mais baixos e menor variação entre as faixas de frequência, indicando uma melhor reprodutibilidade dos resultados em relação à técnica de medição em estado transitório. Os piores casos apresentaram índices RMSD de valores 8,90 (faixa de 60,1 kHz a 70,1 kHz – Medição 2) e 5,49 (150,1 kHz a 160,1 kHz – Medição 10) para as técnicas de medição em estado transitório e

**Figura 17** – Índices RMSD obtidos utilizando-se as técnicas de medição em (a) estado transitório e (b) estado estacionário sem a realização de médias.



Fonte: Elaborado pelo autor

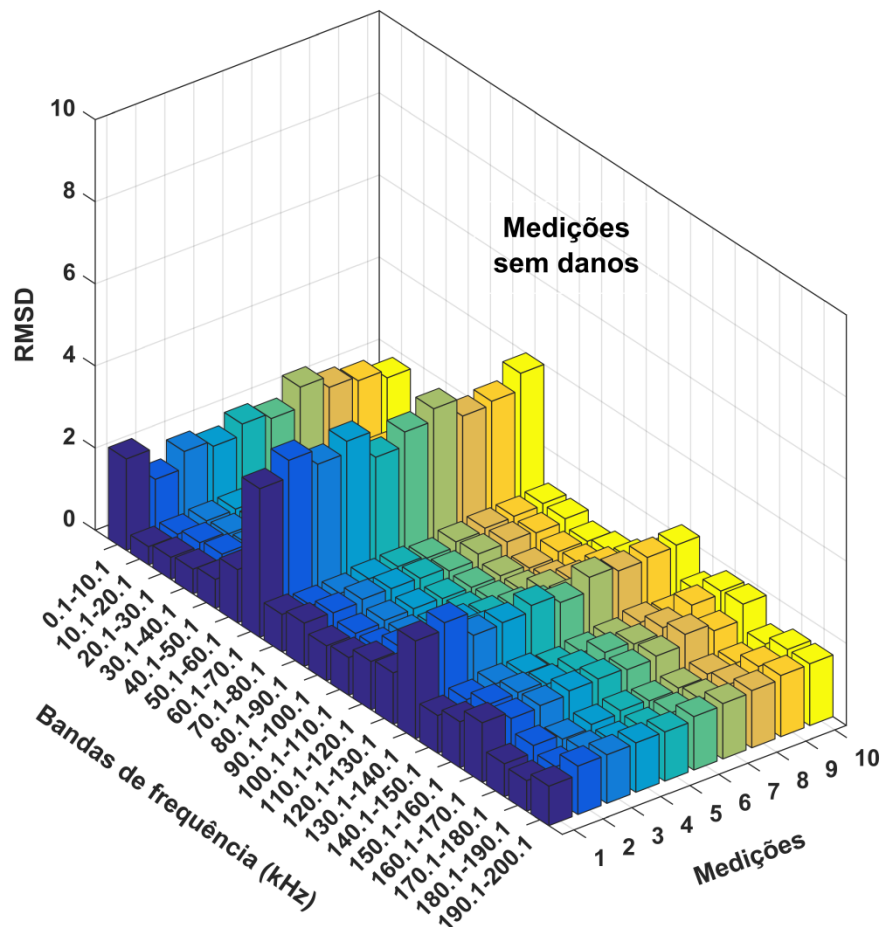
estacionário, respectivamente. Além disso, os tempos de medição necessários para a obtenção dos resultados foram de 0,5 segundos para a técnica de medição em estado transitório e de 36,3 minutos para medições em estado estacionário.

Era esperada uma melhor reprodutibilidade para as medições em estado estacionário, uma vez que os resultados obtidos para as cargas básicas, apresentados na seção 5.1, indicaram uma melhor precisão para esta técnica de medição. No entanto, a reprodutibilidade dos resultados apresentados pela técnica de medição em estado transitório pode ser melhorada pela realização de média nas medições. Como exemplo, são apresentados, na Figura 18, os índices calculados utilizando-se a técnica de medição em estado transitório com as assinaturas de impedância obtidas tomando-se a média sobre 10 medições.

Como pode ser observado na Figura 18, a realização da média melhora claramente a reprodutibilidade da técnica de medição em estado transitório. De fato, em certas bandas de frequência, os resultados são melhores do que os obtidos para a técnica de medição em estado estacionário, com a vantagem de que o tempo necessário para as medições é muito menor. O tempo necessário para obter os resultados vistos na Figura 18 foi de 2,4 s, enquanto que os mesmos resultados exigiriam um tempo de aproximadamente 6,1 horas se utilizada a técnica de medição em estado estacionário. As diferenças entre os tempos apresentados nesta seção são



**Figura 18** – Índices RMSD obtidos utilizando-se a técnica de medição em estado transitório com a realização de média sobre 10 medições.



Fonte: Elaborado pelo autor

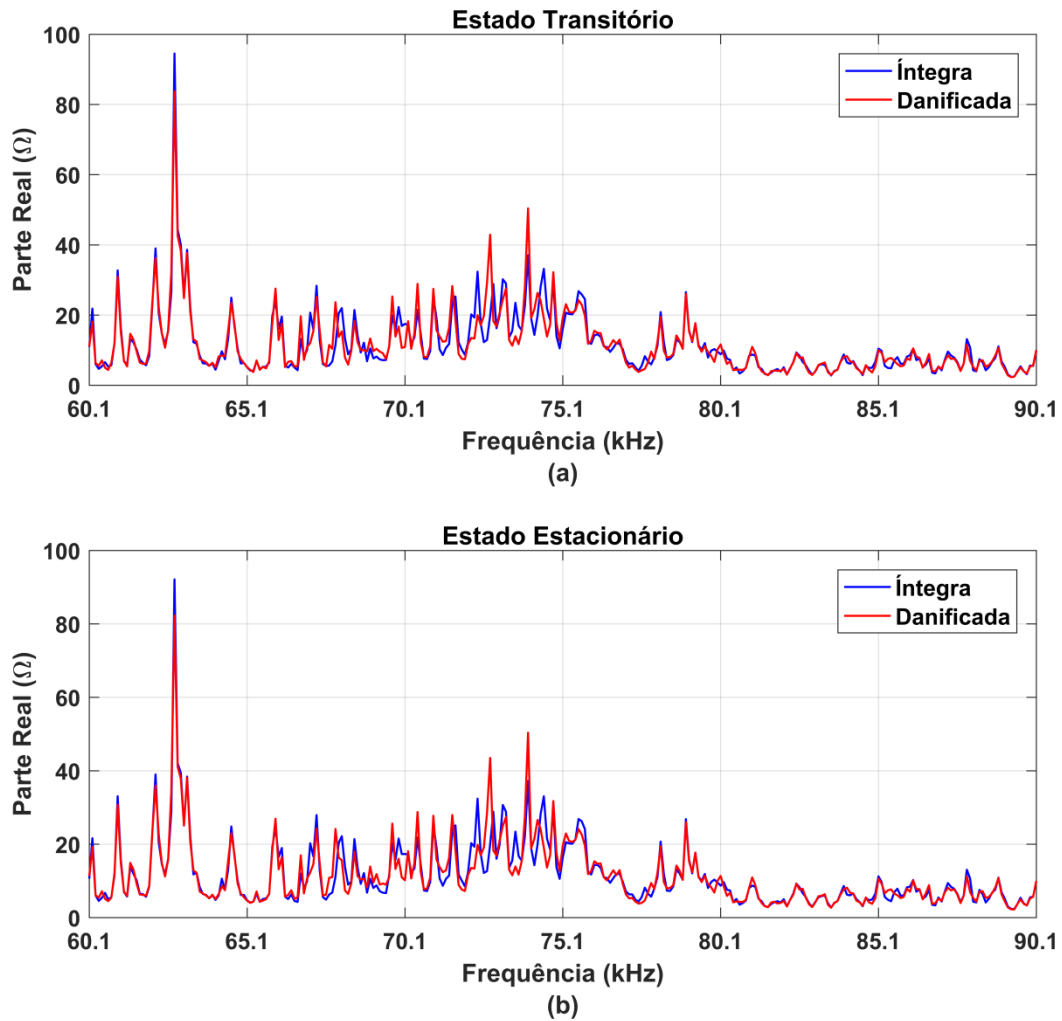
devido aos mesmos fatores já citados para os resultados da seção 5.1.

### 5.2.2 Sensibilidade a Dano Estrutural

Além da reprodutibilidade dos resultados, é importante analisar a sensibilidade de cada técnica de medição ao dano estrutural. Assim sendo, a porca de aço previamente descrita foi fixada à estrutura como forma de induzir um dano estrutural, conforme o procedimento apresentado no Capítulo 4, e as assinaturas de impedância foram obtidas para a estrutura em condições íntegra (*baseline*) e danificada, possibilitando a realização do cálculo dos índices RMSD. A sensibilidade ao dano pode ser qualitativamente avaliada observando-se as variações nas assinaturas de impedância devido à presença do dano na estrutura. Tais assinaturas de

impedância, apresentadas na Figura 19, foram obtidas utilizando-se as duas técnicas de medição para a estrutura em condições íntegra e danificada.

**Figura 19** – Assinaturas de impedância obtidas para a estrutura em condições íntegra e danificada, utilizando-se as técnicas de medição em (a) estado transitório e (b) estado estacionário.

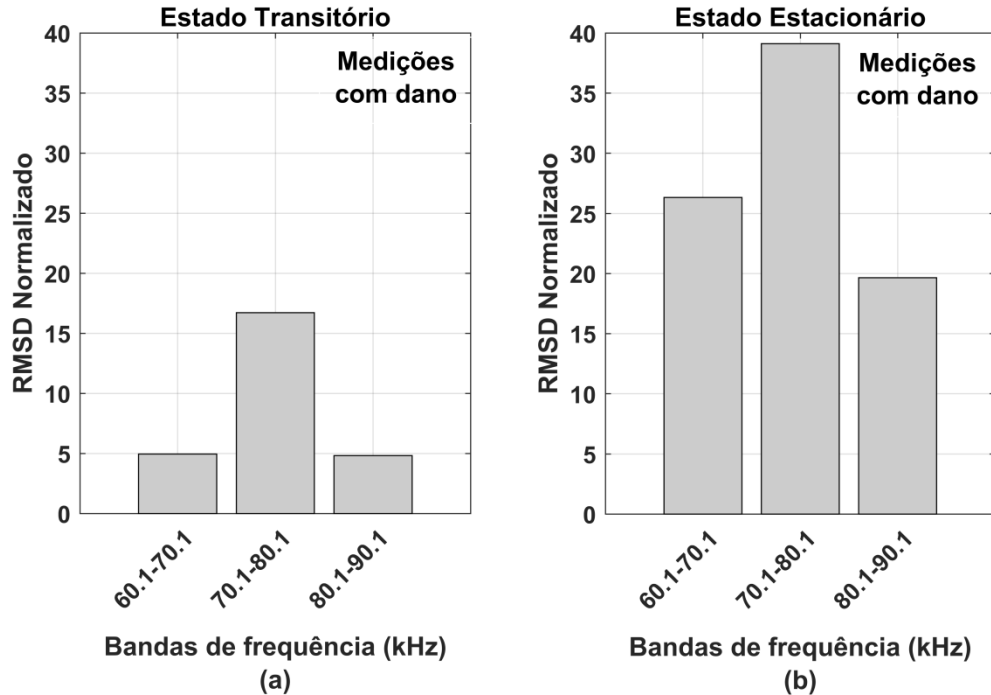


Fonte: Elaborado pelo autor

Uma faixa de frequência estreita das assinaturas de impedância, que se apresentou a mais sensível ao tipo de dano que foi induzido, é apresentada na Figura 19 para uma melhor comparação. Variações devido ao dano são observadas nas assinaturas de impedância para ambas as técnicas de medição, principalmente na faixa de 70-80 kHz. Vale ressaltar que as curvas apresentadas na Figura 19 – (a) e (b) são praticamente idênticas, comprovando a eficácia dos dois sistemas de medição, uma vez que as condições estruturais, de materiais e ambientais foram as mesmas. Portanto, isso indica que ambas as técnicas são sensíveis aos danos estruturais e uma análise quantitativa pode ser obtida calculando-se os índices RMSD das

assinaturas apresentadas na Figura 19. Os índices foram calculados em sub-bandas de 10 kHz, e os resultados são expostos na Figura 20.

**Figura 20** – Índices RMSD obtidos utilizando-se as técnicas de (a) estado transitório e de (b) estado estacionário.



Fonte: Elaborado pelo autor

Os índices RMSD, apresentados na Figura 20, são normalizados em relação ao índice obtido para a estrutura íntegra, que foi calculado tomando duas assinaturas de impedância sem a indução de danos. Esta abordagem permite analisar a variação real do índice devido somente aos danos estruturais. De acordo com os resultados, a técnica de medição em estado estacionário é mais sensível ao dano do que a técnica em estado transitório, fornecendo índices RMSD com valores maiores. No entanto, os resultados da técnica de medição em estado transitório podem ser melhorados pela simples realização da média sobre as medições, conforme indicado pelos resultados anteriores.

Por fim, apresenta-se na Tabela 3, um resumo dos resultados obtidos na seção 5.2.1 e nesta, quanto à reprodutibilidade dos resultados e sensibilidade ao dano estrutural.

Conforme já descrito e discutido na seção 5.2.1, além de apresentado na Tabela 3, os piores casos para a reprodutibilidade dos resultados apresentaram índices RMSD de valores

**Tabela 3** – Comparação dos resultados obtidos para as duas técnicas de medição com transdutor piezelétrico

|                                       | <b>Medição em Estado Transitório</b> |              | <b>Medição em Estado Estacionário</b> |              |
|---------------------------------------|--------------------------------------|--------------|---------------------------------------|--------------|
|                                       | <b>Maior índice RMSD</b>             | <b>Tempo</b> | <b>Maior índice RMSD</b>              | <b>Tempo</b> |
| <b>Reprodutibilidade (Sem médias)</b> | 8,90                                 | 0,5 segundos | 5,49                                  | 36,3 minutos |
| <b>Sensibilidade</b>                  | 16,72                                | 0,4 segundos | 39,12                                 | 3,3 minutos  |

8,90 (faixa de 60,1 kHz a 70,1 kHz – Medição 2) e 5,49 (150,1 kHz a 160,1 kHz – Medição 10) para os sistemas de medição em estado transitório e estacionário, respectivamente. Além disso, os índices mais sensíveis à presença do dano inserido na estrutura foram na faixa de 70,1 kHz a 80,1 kHz para ambos os sistemas, com valores de 16,72 para o sistema de medição em estado transitório e 39,12 para o sistema de medição em estado estacionário. Portanto, a técnica de medição em estado estacionário apresentou melhores resultados em termos de reprodutibilidade e sensibilidade ao dano estrutural, ainda que tenha sido consideravelmente mais lenta que a técnica de medição em estado transitório. No entanto, como já inferido, com a simples aplicação de médias sobre as medições pode-se obter melhores resultados para o sistema de medição em estado transitório.

## Conclusão

Esta dissertação de mestrado apresenta um estudo comparativo de duas técnicas de medição comumente utilizadas em aplicações de SHM baseadas na impedância E/M, que são as técnicas de medição em estado estacionário e em estado transitório. Os testes foram realizados em cargas básicas e em um transdutor fixado a uma barra de alumínio, representando uma estrutura monitorada. Os resultados revelam diferenças conclusivamente importantes entre as duas técnicas em relação à precisão, sensibilidade ao dano estrutural e ao tempo necessário para as medições.

Para os testes com as cargas básicas, embora as duas técnicas tenham exibido exatidão similar, a técnica de medição em estado estacionário mostrou-se mais precisa nas medições da resistência do resistor, apresentando desvio padrão de  $\pm 0,017 \Omega$  (sem média) e  $\pm 0,006 \Omega$  (média sobre 50 medições) contra  $\pm 0,431 \Omega$  (sem média) e  $\pm 0,062 \Omega$  (média sobre 50 medições) da técnica de medição em estado transitório. Além disso, para os testes utilizando-se transdutores piezelétricos, a técnica de medição em estado estacionário também apresentou vantagem sobre a técnica de medição em estado transitório quanto à sensibilidade à presença de danos em estruturas monitoradas, uma vez que os maiores valores dos índices RMSD normalizados foram 16,72 para medições em estado transitório, e 39,12 para medições em estado estacionário.

Em contrapartida, a técnica de medição em estado transitório permite a realização de medições rápidas (cerca de 0,4 segundos por curva de impedância para as configurações utilizadas neste trabalho e sem a realização de média sobre as medições) e sua precisão e sensibilidade podem ser melhoradas pela simples realização da média durante as medições. A técnica de medição em estado estacionário requer ciclos de tempo de estabilização para a detecção correta dos picos de ressonância nas assinaturas de impedância, que são relacionados às frequências naturais da estrutura, o que requer ainda mais tempo para a obtenção das medições (em torno de 3,3 minutos para cada curva de impedância, sem a realização de média sobre as medições) e é uma desvantagem em relação à técnica de medição em estado transitório.

Portanto, existe uma importante relação de compromisso entre a precisão e o tempo necessário para as medições que deve ser levada em consideração em sistemas de SHM baseado na impedância E/M e em outras aplicações. Os resultados apresentados neste trabalho fornecem uma referência para determinar a técnica de medição apropriada ou a abordagem de desenvolvimento para novas técnicas em sistemas de SHM e outras aplicações, dependendo da

gravidade do dano a ser detectado, banda e passo de frequência em que as assinaturas de impedância devam ser medidas e o hardware utilizado para as medições.

## **Sugestão para trabalhos futuros**

Neste trabalho, a técnica de medição em estado transitório foi analisada com base no sinal *chirp*, que é um sinal bem conhecido e amplamente utilizado para a excitação do transdutor piezelétrico. No entanto, outros tipos de sinais, como sinais impulsivos, podem ser analisados em trabalhos futuros e comparados com sinais convencionais. Além da exatidão, precisão, sensibilidade aos danos e tempo necessário para as medições, outras características, como o consumo de energia e a relação sinal-ruído, também podem ser analisadas.

## Referências Bibliográficas

- ALBAKRI, M. I.; TARAZAGA, P. A. Electromechanical impedance-based damage characterization using spectral element method. **J. Intell. Mater. Syst. Struct.**, v. 28, n. 1, p. 63–77, 2017. <http://dx.doi.org/10.1177/1045389X16642534>
- ANALOG DEVICES. AD5933 Data Sheet. Norwood, MA, USA. 2017. Disponível em: < <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD5933.pdf> >. Acessado em 07 de Dezembro de 2017.
- ANNAMDAS, V. G.; RADHIKA, M. A. Electromechanical impedance of piezoelectric transducers for monitoring metallic and non-metallic structures: A review of wired, wireless and energy-harvesting methods. **J. Intell. Mater. Syst. Struct.**, v. 24, n. 9, p. 1021–1042, 2013. <http://dx.doi.org/10.1177/1045389X13481254>
- 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. <http://dx.doi.org/10.1109/tim.2009.2018693>
- CAO, H. *et al.* Development and characterization of a novel interdigitated capacitive strain sensor for structural health monitoring. **IEEE Sens. J.**, v. 15, n. 11, p. 6542–6548, 2015. <http://dx.doi.org/10.1109/JSEN.2015.2461591>
- 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. <http://dx.doi.org/10.1109/TIM.2012.2224277>
- FARRAR, C. R.; WORDEN, K. Structural health monitoring: a machine learning perspective, **John Wiley & Sons, Ltd.**, 2013. <http://dx.doi.org/10.1002/9781118443118>
- FREITAS, E.S.; BAPTISTA, F.G. Experimental analysis of the feasibility of low-cost piezoelectric diaphragms in impedance-based SHM applications. **Sens. Actuators A: Phys.**, v. 238, p. 220–228, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2015.11.031>
- FREITAS, E.S.; BAPTISTA, F. G.; BUDOYA, D.E.; CASTRO, B.A. Equivalent circuit of piezoelectric diaphragms for impedance-based structural health monitoring applications. **IEEE Sens. J.**, v. 17, n. 17, p. 5537–5546, 2017. <http://dx.doi.org/10.1109/JSEN.2017.2725946>
- GIURGIUTIU, V. Piezoelectric wafer active sensors for structural health monitoring: state of the art and future directions, In: **Proceedings of Conference of Pressure Vessels and Piping Division**, Bellevue, Washington, USA, p. 1115–1121, 2010. <http://dx.doi.org/10.1115/PVP2010-25292>
- GULIZZI, V.; RIZZO, P.; MILAZZO, A.; RIBOLLA, E. L. An integrated structural health monitoring system based on electromechanical impedance and guided ultrasonic waves. **J. Civil Struct. Health Monit.**, v. 5, n. 3, p. 337–352, 2015. <http://dx.doi.org/10.1007/s13349-015-0112-0>
- HARDER, R.; DIEDRICH, A.; WHITFIELD, J. S.; BUCHOWSKI, M. S.; PIETSCH, J. B.;



BAUDENBACHER, F. J. Smart multi-frequency bioelectrical impedance spectrometer for BIA and BIVA applications. **IEEE Trans. Biomed. Circuits Syst.**, v. 10, n. 4, p. 912–919, 2016. <http://dx.doi.org/10.1109/TBCAS.2015.2502538>

HOSSEINABADI, H. Z.; NAZARI, B.; AMIRFATTAHI, R.; MIRDAMADI, H. R.; SADRI, A. R. Wavelet network approach for structural damage identification using guided ultrasonic waves. **IEEE Trans. Instrum. Meas.**, v. 63, n. 7, p. 1680–1692, 2014. <http://dx.doi.org/10.1109/TIM.2014.2299528>

JABIR, S. A. A.; GUPTA, N. K. Thick-film ceramic strain sensors for structural health monitoring. **IEEE Trans. Instrum. Meas.**, v. 60, n. 11, p. 3669–3676, 2011. <http://dx.doi.org/10.1109/TIM.2011.2138310>

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. **J. Civ. Struct. Health Monit.**, v. 6, n. 1, p. 3–16, 2016. <http://dx.doi.org/10.1007/s13349-015-0108-9>

LI, X.; GAO, B.; WOO, W. L.; TIAN, G. Y.; QIU, X.; GU, L. Quantitative surface crack evaluation based on eddy current pulsed thermography. **IEEE Sens. J.**, v. 17, n. 2, p. 412–421, 2017. <http://dx.doi.org/10.1109/JSEN.2016.2625815>

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. **J. Intell. Mater. Syst. Struct.**, v. 5, n. 1, p. 12–20, 1994. <http://dx.doi.org/10.1177/1045389X9400500102>

LIU, P.; WANG, W.; CHEN, Y.; FEN, X.; MIAO, L. Concrete damage diagnosis using electromechanical impedance technique. **Construction and Building Materials**, v. 136, p. 450–455, 2017a. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.173>

LIU, X.; CHENG, C.; WU, J.; EDA, S.; GUO, Y. A low cost and palm-size analyzer for rapid and sensitive protein detection by AC electrokinetics capacitive sensing. **Biosensors & Bioelectronics**, v. 90, p. 83–90, 2017b. <http://dx.doi.org/10.1016/j.bios.2016.10.098>

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.

MARTOWICZ, A.; SENDECKI, A.; SALAMON, M.; ROSIEK, M.; UHL, T. Application of electromechanical impedance-based SHM for damage detection in bolted pipeline connection. **Nondestruct. Test. Eval.**, v. 31, n. 1, p. 17–44, 2016. <http://dx.doi.org/10.1080/10589759.2015.1058376>

MEITZLER, A. H. *et al.* IEEE standard on piezoelectricity: An American national standard. New York: **IEEE-ANSI**, 66 p., Std., 176, 1988. <http://dx.doi.org/10.1109/IEEESTD.1988.79638>

MUÑOZ-FERRERAS, J. M.; PENG, Z.; TANG, Y.; GÓMEZ-GARCÍA, R.; LIANG, D.; LI, C. Short-range Doppler-radar signatures from industrial wind turbines: theory, simulations, and measurements. **IEEE Trans. Instrum. Meas.**, v. 65, n. 9, p. 2108–2119, 2016. <http://dx.doi.org/10.1109/TIM.2016.2573058>

NA, W. S.; PARK, K. A cost-effective impedance-based structural health monitoring technique for steel structures by monitoring multiple areas. **J. Intell. Mater. Syst. Struct.**, v. 28, n. 2, p. 154–162, 2017. <http://dx.doi.org/10.1177/1045389X16645866>

NATIONAL INSTRUMENTS. NI 6361 Device Specifications. Austin, TX, USA. 2015. Disponível em: < <http://www.ni.com/pdf/manuals/374650c.pdf> >. Acessado em 07 de Dezembro de 2017.

OVERLY, T.; PARK, G.; FARINHOLT, K.; FARRAR, C. Development of an extremely compact impedance-based wireless sensing device. **Smart Mater. Struct.**, v. 17, n. 6, 065011, 2008 <http://dx.doi.org/10.1088/0964-1726/17/6/065011>

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. <http://dx.doi.org/10.1177/1475921707072621>

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. <http://dx.doi.org/10.1177/1045389X04039914>

PERVEEN, K.; BRIDGES, G. E.; BHADRA, S.; THOMSON, D. J. Corrosion potential sensor for remote monitoring of civil structure based on printed circuit board sensor. **IEEE Trans. Instrum. Meas.**, v. 63, n. 10, p. 2422–2431, 2014. <http://dx.doi.org/10.1109/TIM.2014.2310092>

PIASECKI, T.; CHABOWSKI, K.; NITSCH, K. Design, calibration and tests of versatile low frequency impedance analyser based on ARM microcontroller. **Measurement**, v. 91, p. 155–161, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2016.05.057>

PRIETO, M. D.; MILLAN, D. Z.; WANG, W.; ORTIZ, A. M.; REDONDO, J. A.; MARTINEZ, L. R. Self-powered wireless sensor applied to gear diagnosis based on acoustic emission. **IEEE Trans. Instrum. Meas.**, v. 65, n. 1, p. 15–24, 2016. <http://dx.doi.org/10.1109/TIM.2015.2476278>

RAMASSO, E.; PLACET, V.; BOUBAKAR, M. L. Unsupervised consensus clustering of acoustic emission time-series for robust damage sequence estimation in composites. **IEEE Trans. Instrum. Meas.**, v. 64, n. 12, p. 3297–3307, 2015. <http://dx.doi.org/10.1109/TIM.2015.2450354>

RIBOLLA, E. L. M.; RIZZO, P.; GULIZZI, V. On the use of the electromechanical impedance technique for the assessment of dental implant stability: Modeling and experimentation. **J. Intell. Mater. Syst. Struct.**, v. 26, n. 16, p. 2266–2280, 2015. <http://dx.doi.org/10.1177/1045389X14554129>

ROCHA, T. J.; RAMOS, H. G.; RIBEIRO, A. L. Evaluation of subsurface defects using diffusion of motion-induced eddy currents. **IEEE Trans. Instrum. Meas.**, v. 65, n. 5, p. 1182–1187, 2016. <http://dx.doi.org/10.1109/TIM.2015.2507738>

ROTH, W.; GIURGIUTIU, V. Structural health monitoring of an adhesive disbond through electromechanical impedance spectroscopy. **International Journal of Adhesion & Adhesives**, v. 73, p. 109–117, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2016.11.008>

RUGINA, C.; ENCIU, D.; TUDOSE, M. Numerical and experimental study of circular disc electromechanical impedance spectroscopy signature changes due to structural damage and sensor

degradation. **Structural Health Monitoring**, v. 14, n. 6, p. 663–68, 2015. <http://dx.doi.org/10.1177/1475921715610927>

SHAHAB, S.; ERTURK, A. Coupling of experimentally validated electroelastic dynamics and mixing rules formulation for macro-fiber composite piezoelectric structures. **J. Intell. Mater. Syst. Struct.**, v. 28, n. 12, p. 1575-1588, 2017. <http://dx.doi.org/10.1177/1045389X16672732>

SHAN, S.; CHENG, L.; LI, P. Adhesive nonlinearity in Lamb-wave-based structural health monitoring systems. **Smart Mater. Struct.**, v. 26, n. 2, p. 25019, 2017. <http://dx.doi.org/10.1088/1361-665X/26/2/025019>

SLEPSKI, P.; DAROWICKI, K. Optimization of impedance measurements using ‘chirp’ type perturbation signal. **Measurement**, v. 42, n. 8, p. 1220-1225, 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2009.06.005>

SONG, J.; KIM, S.; LIU, Z.; QUANG, N. N.; BIEN, F. A real time nondestructive crack detection system for the automotive stamping process. **IEEE Trans. Instrum. Meas.**, v. 65, n. 11, p. 2434–2441, 2016. <http://dx.doi.org/10.1109/TIM.2016.2583218>

TAYLOR, S. G.; RABY, E. Y.; FARINHOLT, K. M.; PARK, G.; TODD, M. D. Active-sensing platform for structural health monitoring: Development and deployment. **Structural Health Monitoring**, v. 15, n. 4, p. 413–422, 2016. <http://dx.doi.org/10.1177/1475921716642171>

XU, B.; GIURGIUTIU, V. A low-cost and field portable electromechanical (E/M) impedance analyzer for active structural health monitoring, em: **Proc. 5th Int. Workshop Structural Health Monitoring**, 2005.