

Pós-Doutorado

PD-III

Projeto 4820

Relatório Final

**Técnicas de Medição Aplicadas à Impedância Eletromecânica para
Detalhamento Comportamental de Estruturas em Sistemas de
Monitoramento de Integridade Estrutural**

Danilo Ecidir Budoya
Pós-doutorando

Fabricio Guimarães Baptista
Supervisor

Bauru, 2024

Resumo

O presente relatório descreve, de forma sucinta, as atividades desenvolvidas pelo pós-doutorando Danilo Ecidir Budoya durante o período de 01/10/2023 a 01/10/2024 sob a supervisão do Prof. Fabricio Guimarães Baptista do Departamento de Engenharia Elétrica, campus de Bauru, Unesp. A pesquisa focou no aprimoramento da técnica da impedância eletromecânica para detecção de danos estruturais em sistemas de monitoramento de integridade estrutural, também chamados de sistemas SHM do termo em inglês *structural health monitoring*. O princípio de tal técnica consiste na instalação de um ou mais transdutores piezelétricos na estrutura a ser monitorada. Devido ao efeito piezelétrico, é estabelecido um acoplamento eletromecânico entre a estrutura monitorada e o transdutor, permitindo que as condições estruturais sejam monitoradas por meio da medição e análise da impedância elétrica do transdutor. A motivação para o aprimoramento da técnica surgiu durante o desenvolvimento da tese de doutorado do pós-doutorando, na qual constatou-se que os picos de ressonância observados na impedância elétrica do transdutor, fundamentais para a detecção de dano, dependem do número de ciclos do sinal excitação do transdutor fornecido pelo sistema de medição. Portanto, na atual pesquisa buscou-se explorar por meio de análise teórica e validação experimental a relação entre o número de ciclos necessários do sinal de excitação e as características da estrutura monitorada. Foi constatado que o número de ciclos do sinal de excitação está relacionado com o fator de amortecimento da estrutura monitorada. Os resultados mostram que configurando-se o sistema de medição com o número adequado de ciclos de excitação, aumenta-se a sensibilidade da técnica ao dano estrutural, o que é fundamental para a detecção de danos estruturais incipientes. A pesquisa foi desenvolvida tendo como base a coorientação de uma tese de doutorado, sendo que o supervisor foi o orientador principal. Além da coorientação de uma tese de doutorado, a pesquisa resultou em um artigo científico publicado em periódico internacional indexado com estrato Qualis A1 da CAPES.

Palavras-chave: transdutores piezelétricos, monitoramento, impedância eletromecânica, ciclos de excitação, aquisição de sinais.

Abstract

This report briefly describes the activities developed by postdoctoral fellow Danilo Ecidir Budoya during the period from October 1, 2023 to October 1, 2024 under the supervision of Prof. Fabricio Guimarães Baptista from the Department of Electrical Engineering, Bauru campus, Unesp. The research focused on improving the electromechanical impedance (EMI) technique for detecting structural damage in structural health monitoring (SHM) systems. The principle of such a technique consists of installing one or more piezoelectric transducers in the structure to be monitored. Due to the piezoelectric effect, an electromechanical coupling is established between the monitored structure and the transducer, allowing the structural conditions to be monitored by measuring and analyzing the electrical impedance of the transducer. The motivation for improving the technique occurred during the development of the author's doctoral thesis, in which it was found that the resonance peaks observed in the electrical impedance of the transducer, which are essential for detecting damage, depend on the number of cycles of the transducer excitation signal provided by the measurement system. Therefore, the current research sought to explore, through theoretical analysis and experimental validation, the relationship between the number of cycles required for the excitation signal and the characteristics of the monitored structure. It was found that the number of cycles of the excitation signal is related to the damping factor of the monitored structure. The results show that configuring the measurement system with the appropriate number of excitation cycles increases the sensitivity of the technique to structural damage, which is essential for detecting incipient structural damage. The research was developed based on the co-supervision of a doctoral thesis. In addition to co-supervising a doctoral thesis, the research resulted in a scientific article published in an indexed international journal.

Keywords: piezoelectric transducers, monitoring, electromechanical impedance, excitation cycles, signal acquisition.

Sumário

1. Introdução	5
2. Técnica da Impedância Eletromecânica	6
3. Objetivos	9
4. Material e Métodos	10
5. Resultados e Discussão	12
5.1. Análise Teórica	12
5.2. Estimativa Teórica do Número de Ciclos.....	15
5.3. Número de Ciclos Encontrado Experimentalmente.....	16
5.4. Influência na Detecção de Dano	17
6. Orientações.....	18
7. Publicações.....	18
8. Atividades de Ensino e Extensão.....	18
9. Gestão de Dados	19
10. Comentários do Supervisor	19
Referências.....	20

1. Introdução

Nesta seção são apresentados os conceitos básicos dos sistemas de monitoramento de integridade estrutural e da técnica de detecção de dano baseada na impedância eletromecânica para servirem de base teórica da pesquisa desenvolvida pelo pós-doutorando.

Como descrito no Resumo, a pesquisa utilizou transdutores piezelétricos que têm como princípio de operação a piezeletricidade. Piezeletricidade é o termo usado para descrever a propriedade que alguns materiais, também chamados de materiais “inteligentes” ou multifuncionais por alguns autores, de gerar uma carga elétrica ao serem submetidos a uma tensão mecânica. Tal efeito é conhecido como efeito piezelétrico direto. Esses materiais também apresentam o efeito reverso, isto é, eles sofrem uma deformação mecânica quando um campo elétrico é aplicado. Vários materiais apresentam essas propriedades, sendo um dos mais conhecidos as cerâmicas de titanato zirconato de chumbo, popularmente chamadas de cerâmicas de PZT do inglês Pb (*lead*) *zirconate titanate*.

Com base nesse princípio, esses materiais podem ser empregados para o desenvolvimento de transdutores piezelétricos, que permitem a conversão de energia mecânica em energia elétrica bem como a conversão da energia elétrica em energia mecânica. Assim, esses transdutores podem ser utilizados na forma passiva como sensores, com base no efeito piezelétrico direto, e na forma ativa como atuadores, tendo como princípio o efeito piezelétrico reverso. Na forma passiva, os transdutores piezelétricos são utilizados em muitas aplicações como microfones, hidrofones para escuta subaquática, captadores, ignitores, sensores de vibração, entre outras. Já na forma ativa, as aplicações incluem microposicionadores, microbombas, impressoras, localizadores de peixes e imagens médicas ultrassônicas. Em algumas aplicações, um mesmo transdutor pode operar tanto como sensor como atuador.

Os transdutores piezelétricos também têm sido largamente utilizados em sistemas de monitoramento, que foi a aplicação de interesse desta pesquisa de pós-doutorado. Esses sistemas podem ser utilizados para o monitoramento de integridade estrutural ou SHM do termo em inglês *structural health monitoring* (Gordan *et al.*, 2022, Sofi *et al.*, 2022). Diversas estruturas podem ser monitoradas, tais como infraestruturas civis (pontes, barragens, tubulações etc.), grandes meios de transporte (aeronaves, navios etc.), entre outras. Do ponto de vista científico, o monitoramento de tais estruturas permite que um dano incipiente seja detectado antes que um colapso estrutural ocorra, garantindo a segurança da população. Já do

ponto de vista econômico, a detecção de danos incipientes permite que manutenções preditivas sejam realizadas antes que os danos sejam maiores, podendo reduzir significativamente os custos.

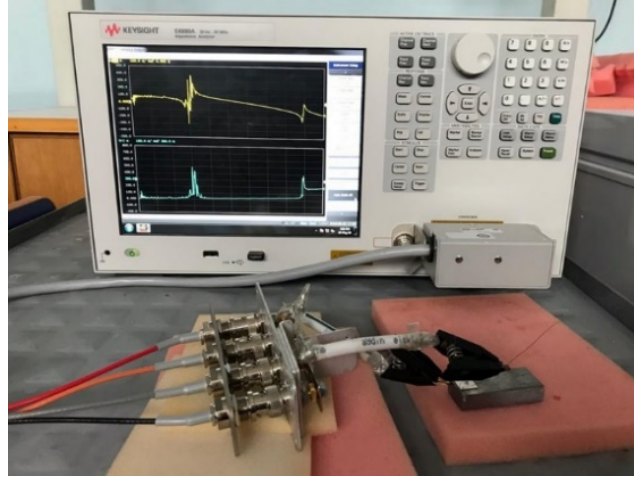
Também é possível o monitoramento de processos industriais, tais como a retificação de peças. O processo de retificação está situado na fase final da cadeia de produção e oferece um alto valor agregado ao produto. Os danos causados na peça nessa fase são de alto custo, pois os processos anteriores, além da própria retificação, são perdidos. Portanto, um sistema de monitoramento da integridade das peças é de grande relevância (He *et al.*, 2019).

É desejável que o método de detecção de danos ou falhas seja não destrutivo, isto é, minimamente invasivo à estrutura ou processo para que o monitoramento possa ocorrer em tempo real ou de forma periódica sem causar danos permanentes para a avaliação. Há vários métodos não destrutivos reportados na literatura. Nesta pesquisa, o interesse foi pela técnica da impedância eletromecânica, que é descrita na próxima seção.

2. Técnica da Impedância Eletromecânica

O método da impedância eletromecânica tem recebido atenção para o desenvolvimento de sistemas de monitoramento pela sua simplicidade de instalação, pois um único transdutor piezelétrico opera simultaneamente como sensor e atuador (Tenreiro; Lopes; Da Silva, 2022, Tamhane; Banerjee; Tallur, 2022). Basicamente, o método consiste em instalar o transdutor na região de interesse da estrutura, normalmente utilizando-se um adesivo de alta rigidez, e medir a sua impedância por meio de um analisador de impedância ou outro sistema de medição equivalente. Como um exemplo, na Figura 1 apresenta-se um transdutor piezelétrico instalado em um bloco de aço, estrutura típica usada em laboratórios de pesquisa, tendo sua impedância elétrica medida por um analisador de impedância comercial Keysight E4990A (Tekkalmaz *et al.*, 2022).

Figura 1 – Medição da impedância de um transdutor piezelétrico instalado em um bloco de aço utilizando-se um analisador de impedância comercial



Fonte: Tekkalmaz *et al.* (2022).

Devido ao efeito piezelétrico, uma relação é estabelecida entre a impedância elétrica do transdutor e a impedância mecânica da estrutura. Pesquisadores têm desenvolvido diversos modelos para descrever essa relação. Em um dos modelos mais simplificados, essa relação é dada por

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

sendo $Z_E(f)$ a impedância elétrica do transdutor, $Z_M(f)$ a impedância mecânica da estrutura monitorada, $Z_P(f)$ a impedância mecânica do transdutor, f a frequência, C a capacitância do transdutor, j a unidade imaginária e d_{31} , s_{11}^E e ϵ_{33}^T são as constantes piezelétrica, de elasticidade e dielétrica, respectivamente. Os subscritos 1 e 3 indicam a componente tensorial para uma suposição unidimensional e os sobrescritos E e T indicam, respectivamente, campo elétrico e tensão mecânica constantes.

De acordo com a Equação (1), há uma relação entre a impedância mecânica da estrutura e a impedância elétrica do transdutor. Qualquer variação na impedância mecânica da estrutura causada por um dano estrutural como trincas e corrosão causa uma variação correspondente na impedância elétrica do transdutor. Portanto, a integridade da estrutura pode ser monitorada por meio da medição e análise da impedância elétrica do transdutor piezelétrico.

Tipicamente, a detecção de dano é realizada por meio de índices que comparam duas assinaturas de impedância, sendo que uma delas é usada como referência e obtida para a

estrutura em um estado considerado íntegro. Nesta pesquisa foram utilizados dois índices básicos, o desvio da raiz média quadrática, ou *root mean square deviation* (RMSD), e o desvio do coeficiente de correlação, ou *correlation coefficient deviation* (CCD). Esses índices são calculados utilizando uma medição de referência, sem danos, e são largamente relatados na literatura (Maio *et al.*, 2023; Li *et al.*, 2023; Liu; Feng, 2021; Tan *et al.*, 2023). O índice RMSD é obtido como

$$RMSD = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{f=1}^K \{ \text{Re}[Z_{E,D}(f)] - \text{Re}[Z_{E,H}(f)] \}^2}, \quad (2)$$

em que K é o número de pontos de frequências na banda analisada; $\text{Re}[Z_{E,H}(f)]$ é a parte real da impedância elétrica obtida da estrutura monitorada na condição íntegra (medição de referência ou *baseline*); $\text{Re}[Z_{E,D}(f)]$ é a parte real da impedância elétrica obtida da estrutura monitorada na condição danificada.

O índice CCD é dado como

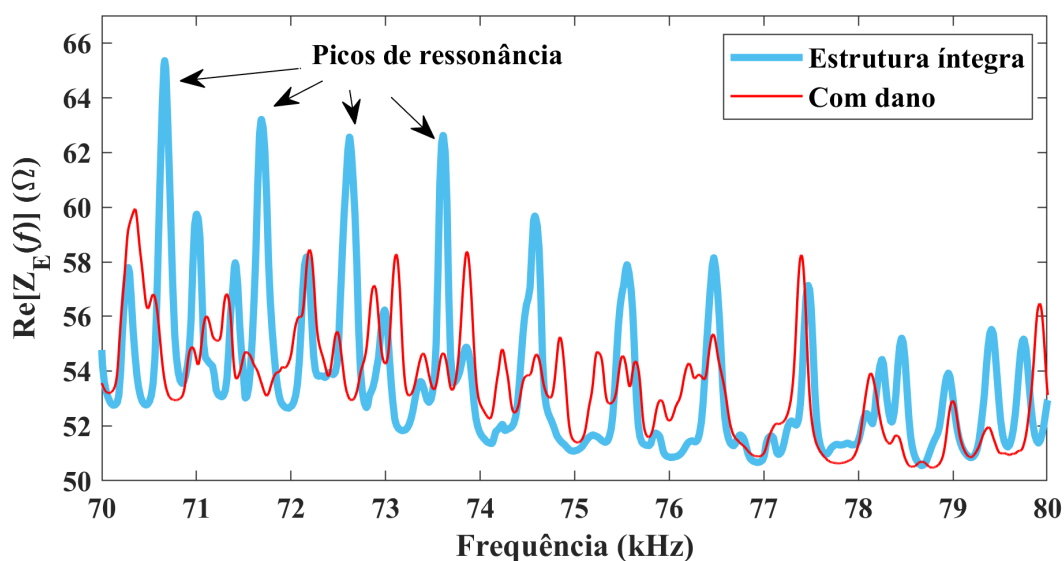
$$CCD = 1 - C_C, \quad (3)$$

em que C_C é o coeficiente de correlação calculado entre duas assinaturas de impedância elétrica, com $-1 \leq C_C \leq 1$.

Como observado na Equação (2), embora a impedância seja complexa, a parte real normalmente é utilizada para o cálculo dos índices, pois é conhecida por ser mais sensível ao dano estrutural. Como um exemplo, as partes reais de duas assinaturas de impedância obtidas durante os testes experimentais desta pesquisa para uma determinada estrutura em condição íntegra (sem dano) e com dano são apresentadas na Figura 2. Como observado, nas assinaturas de impedância há diversos picos de ressonância que estão relacionados com as frequências naturais da estrutura monitorada. Danos estruturais causam alterações nesses picos de ressonância que podem ser observados qualitativamente na Figura 2 e quantificados por meio de índices de dano como o RMSD e CCD apresentados acima.

Os objetivos desta pesquisa estão relacionados com esses picos de ressonância e são detalhados na próxima seção.

Figura 2 – Partes reais das assinaturas de impedância destacando os picos de ressonância e a variação com o dano estrutural



Fonte: Elaboração do próprio autor.

3. Objetivos

Durante o seu curso de doutorado, o pós-doutorando observou que a amplitude dos picos de ressonância, como aqueles observados na Figura 2, variavam com o tempo de excitação do transdutor acoplado na estrutura, conforme a configuração do sistema de medição. No entanto, uma análise detalhada não foi realizada na época. Portanto, os objetivos desta pesquisa foram:

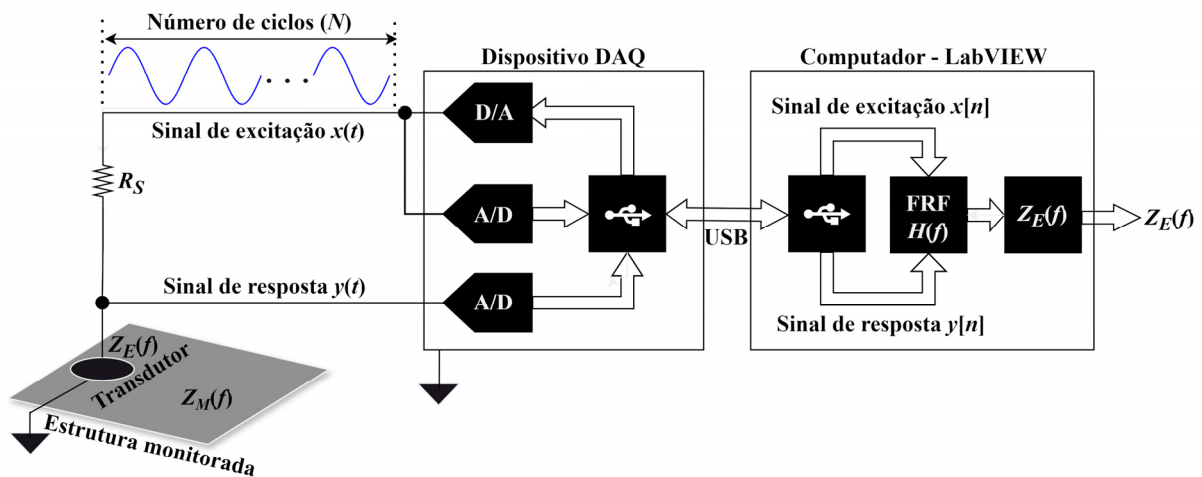
- Realizar uma revisão bibliográfica para encontrar uma explicação teórica sobre a relação entre a amplitude do pico de ressonância e tempo de excitação do transdutor acoplado à estrutura monitorada;
- Validar por meio de diversos testes experimentais a relação entre o tempo de excitação, diretamente relacionado com o número de ciclos do sinal de excitação, e as características da estrutura monitorada;
- Analisar os impactos da seleção correta do número de ciclos do sinal de excitação na eficiência da detecção do dano estrutural.

O material e métodos utilizados para alcançar esses objetivos são apresentados na próxima seção.

4. Material e Métodos

A medição da impedância elétrica do transdutor piezelétrico pode ser realizada com um analisador de impedância comercial, como aquele apresentado na Figura 1 da Seção 2. No entanto, para sistemas SHM em que vários transdutores são utilizados o uso de tais analisadores é pouco versátil. Desta forma, tem aumentado o uso de sistemas de medição alternativos, que permitem a medição da impedância de vários transdutores e uma maior versatilidade quanto a configuração do sinal de excitação. Portanto, esta pesquisa foi desenvolvida utilizando-se um sistema de medição alternativo, que tem o diagrama esquemático básico apresentado na Figura 3.

Figura 3 – Sistema de medição utilizado nos testes experimentais



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Como observado na Figura 3, o sistema de medição tem como base um dispositivo de aquisição de dados – *data acquisition* (DAQ) – conectado a um computador pessoal por meio de barramento USB. O sinal de excitação $x(t)$ é um sinal senoidal com determinado número de ciclos (N) que é aplicado ao transdutor em série com o resistor limitador R_S . O sinal de excitação é fornecido por um conversor digital-analógico (D/A), sendo $x[n]$ sua forma em tempo discreto. O sinal de resposta do transdutor $y(t)$ é amostrado por um conversor analógico-digital (A/D), sendo obtido o sinal discreto $y[n]$.

O transdutor está fixado na estrutura a ser monitorada com uma impedância mecânica $Z_M(f)$, que está relacionada com a impedância elétrica do transdutor $Z_E(f)$ devido ao efeito piezelétrico, como descrito pela Equação (1) da Seção 2. A impedância elétrica do transdutor

é obtida a partir da função de resposta em frequência (FRF) $H(f)$, que foi calculada por meio de um estimador espectral dado por

$$H(f) = \frac{S_{XY}(f)}{S_{XX}(f)}, \quad (4)$$

sendo $S_{XY}(f)$ o espectro de potência cruzada entre o sinal de excitação $x[n]$ e o sinal de resposta $y[n]$ e $S_{XX}(f)$ o auto espectro de potência do sinal de excitação $x[n]$.

Já a impedância elétrica do transdutor $Z_E(f)$ é calculada por

$$H(f) = R_S \frac{H(f)}{1 - H(f)}, \quad (5)$$

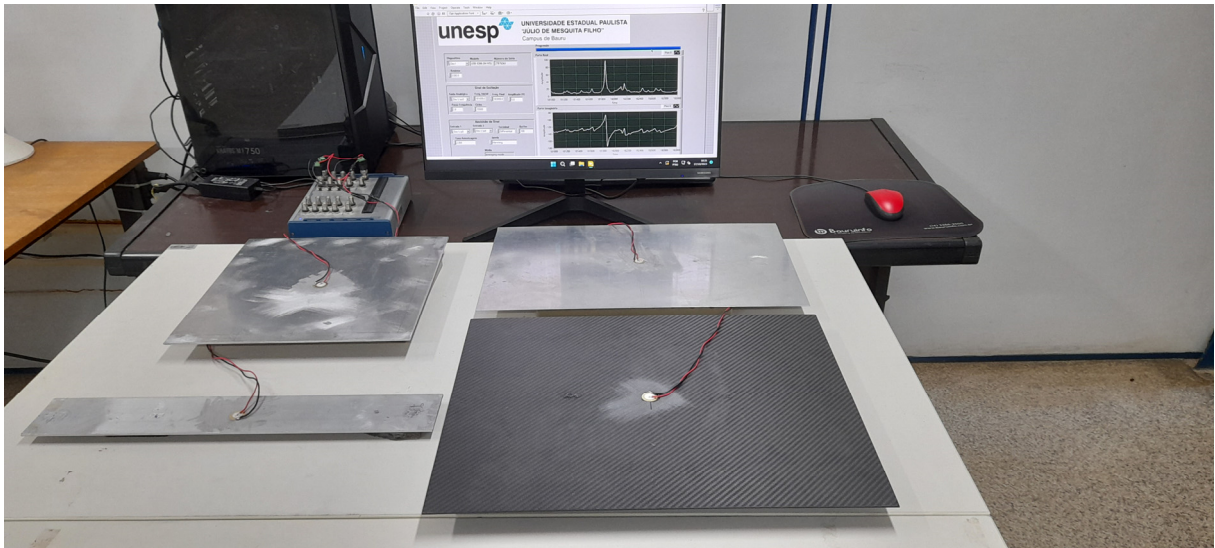
sendo R_S o resistor conectado em série com o transdutor, como ilustrado na Figura 3.

O controle do dispositivo DAQ e o processamento dos sinais para obtenção da impedância elétrica $Z_E(f)$ foram realizados com o software LabVIEW. O MATLAB também foi utilizado para geração de gráficos e cálculo de índices de dano. O dispositivo DAQ utilizado foi o modelo USB-6366-BNC da National Instruments e como transdutores os diafragmas piezelétricos modelo 7BB-20-6, de 20 mm, da Murata Electronics, os quais foram fixados na estrutura utilizando-se um adesivo de cianoacrilato e conectados ao DAQ por meio de resistores R_S de 3,3 k Ω .

Como estruturas monitoradas, uma placa de fibra de carbono e várias placas de alumínio com dimensões e geometrias diferentes foram utilizadas. Como exemplificação, neste relatório são apresentados apenas os resultados obtidos para a estrutura que permitiu observar com mais evidência a influência do número dos ciclos do sinal de excitação na amplitude dos picos de ressonância, que foi uma placa de alumínio com dimensões de 340 mm $\times$ 340 mm $\times$ 3 mm e massa de 928 g.

O arranjo experimental com as estruturas analisadas é apresentado na Figura 4. A placa mencionada é aquela posicionada no canto superior esquerdo.

Figura 4 – Arranjo experimental



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os resultados são apresentados e discutidos na próxima seção.

5. Resultados e Discussão

Nesta seção são apresentados os resultados principais obtidos durante a pesquisa, sendo focados na estrutura que permitiu observar com mais evidência a influência do número de ciclos do sinal de excitação na amplitude dos picos de ressonância. Para resultados completos e mais detalhados, recomenda-se a leitura da tese de doutorado da qual o pós-doutorando foi coorientador ou do artigo publicado em periódico, como detalhado nas Seções 6 e 7.

5.1. Análise Teórica

Como mencionado na Seção 3, a pesquisa partiu de uma revisão bibliográfica para encontrar uma explicação teórica da relação entre o número de ciclos do sinal de excitação e a amplitude dos picos de ressonância observados nas assinaturas de impedância. Foi encontrado que a intensidade de vibração da estrutura em suas frequências naturais quando excitada por uma carga externa variando harmonicamente depende do fator de amortecimento da estrutura. Portanto, a vibração máxima não é alcançada imediatamente quando a carga externa é aplicada, mas cresce progressivamente. Em uma análise simplificada, a intensidade relativa de vibração de uma estrutura sob excitação harmônica é dada por (Clough; Penzien, 2003)

$$R(t) \cong \frac{1 - e^{-\xi 2\pi f t}}{2\xi} \cos(2\pi f t), \quad (6)$$

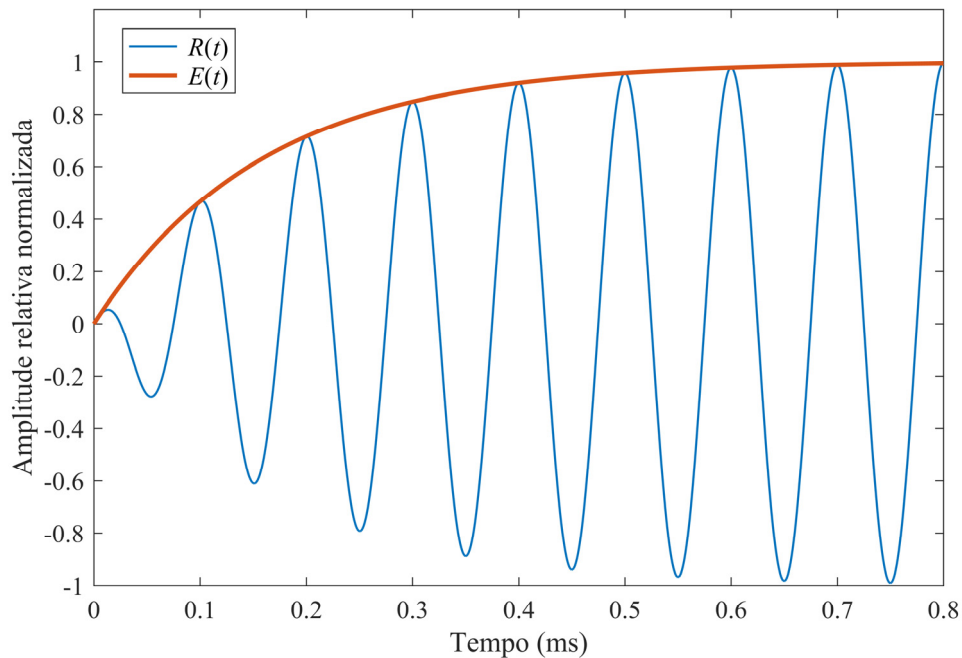
em que $R(t)$ é a intensidade relativa de vibração à frequência de excitação f igual à frequência natural da estrutura monitorada; ξ é o fator de amortecimento da estrutura monitorada; e t é a variável tempo.

De acordo com a Equação (6), pode ser claramente observado que a intensidade relativa da vibração varia com a envoltória $E(t)$ dada por

$$E(t) = \frac{1 - e^{-\xi 2\pi f t}}{2\xi}. \quad (7)$$

Como um exemplo, a intensidade relativa de vibração $R(t)$ e a envoltória $E(t)$ para uma estrutura hipotética com fator de amortecimento $\xi=0,1$ vibrando em uma frequência de 10 kHz podem ser observadas na Figura 5.

Figura 5 – Comportamento da intensidade relativa de vibração $R(t)$ e da envoltória $E(t)$



Fonte: Elaboração do próprio autor.

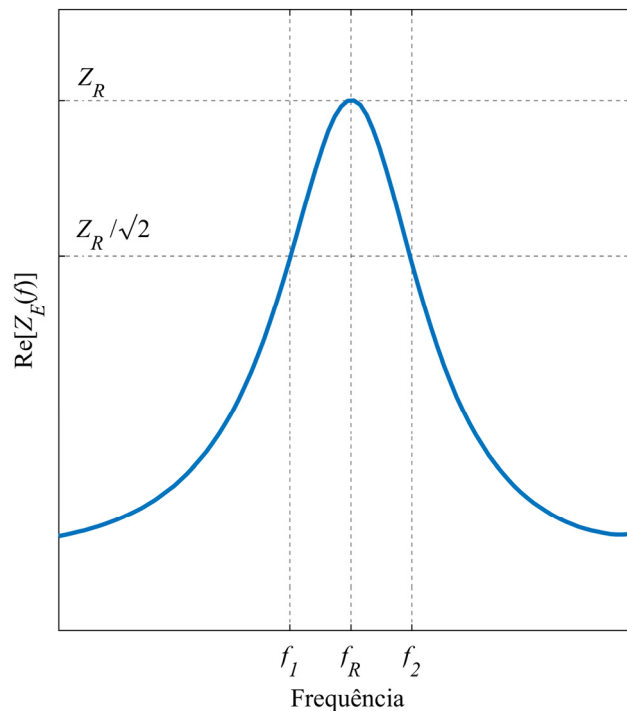
Como pode ser observado na Figura 5, a intensidade relativa de vibração máxima não é alcançada imediatamente, mas ela tende assintoticamente em direção a um valor máximo depois de um determinado número de ciclos. Quanto menor o fator de amortecimento da

estrutura, mais ciclos são necessários para a estrutura alcançar a máxima vibração.

De acordo com as Equações (6) e (7), o número de ciclos necessários em uma determinada frequência depende do fator de amortecimento ξ da estrutura. Há vários métodos para calcular o fator de amortecimento, sendo um dos mais utilizados o método de largura de banda de meia potência (Papagiannopoulos; Hatzigeorgiou, 2011). Esse método tem como princípio a resposta da frequência em torno da frequência natural. Nesta pesquisa, esse método foi aplicado à parte real da assinatura de impedância elétrica para calcular o fator de amortecimento.

Na Figura 6 é ilustrada a aplicação desse método, apresentando a parte real da assinatura de impedância elétrica em torno do pico de ressonância obtido experimentalmente para uma das estruturas analisadas durante a pesquisa.

Figura 6 – Aplicação do método da largura de banda de meia potência para calcular o fator de amortecimento ξ da estrutura



Fonte: Elaboração do próprio autor.

De acordo com a Figura 6, o fator de amortecimento é aproximadamente calculado como (Papagiannopoulos; Hatzigeorgiou, 2011)

$$\xi \cong \frac{f_2 - f_1}{2f_R}, \quad (8)$$

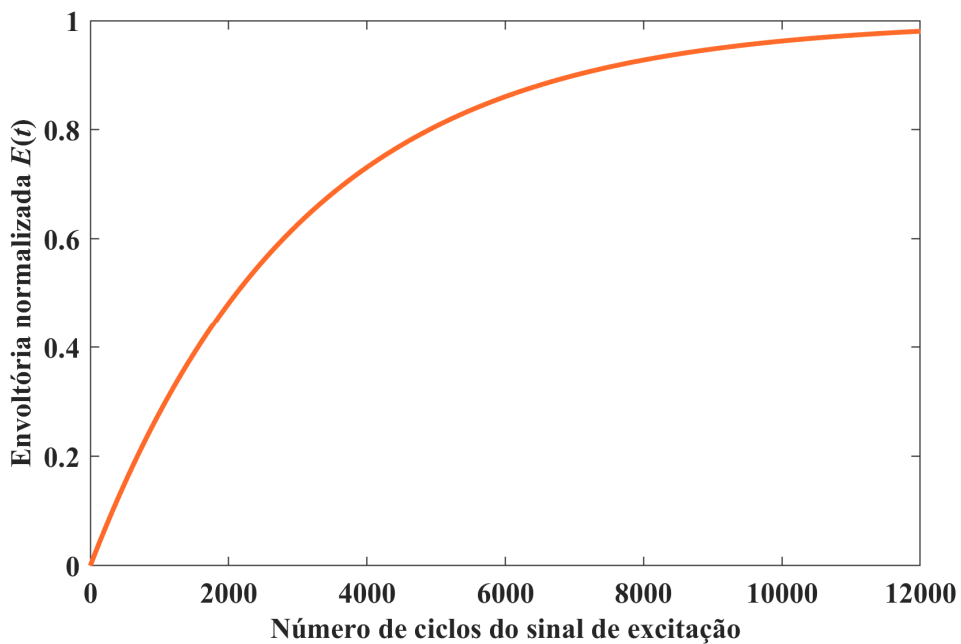
em que ξ é o fator de amortecimento; f_R é a frequência correspondente ao pico de ressonância Z_R da parte real da impedância elétrica; f_1 é uma frequência correspondente a $Z_R / \sqrt{2}$; e f_2 é a outra frequência correspondendo a $Z_R / \sqrt{2}$, sendo $f_2 > f_1$.

Alguns resultados teóricos e práticos tendo como base esse método são apresentados nas próximas seções.

5.2. Estimativa Teórica do Número de Ciclos

Inicialmente, as envoltórias teóricas $E(t)$ das estruturas analisadas foram calculadas utilizando-se a Equação (7), sendo que o fator de amortecimento foi calculado com base no método apresentado na Figura 6 e Equação (8). Como já mencionado, neste relatório estão sendo apresentados os resultados obtidos para a placa de alumínio descrita na Seção 4. O fator de amortecimento calculado para um pico de ressonância dessa estrutura em torno de 181 kHz foi de $\xi = 5,23 \times 10^{-5}$ e a envoltória $E(t)$ obtida pode ser conferida na Figura 7.

Figura 7 – Envoltória teórica normalizada obtida para a placa de alumínio



Fonte: Elaboração do próprio autor.

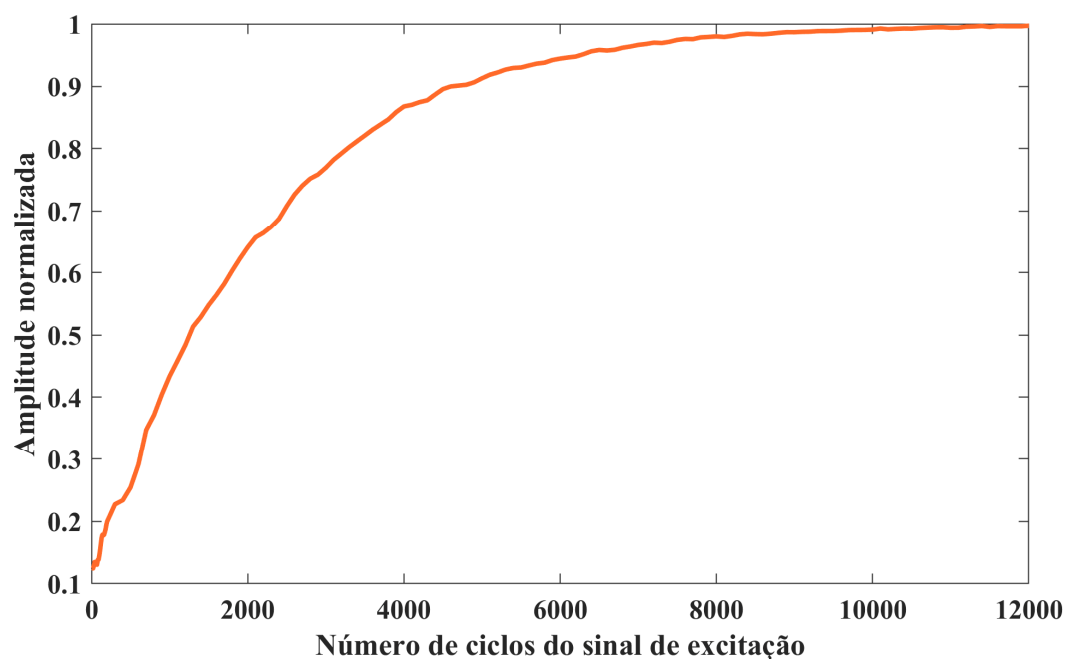
De acordo com a Figura 7, o número de ciclos necessário para se obter a maior amplitude dos picos de ressonância pode ser estimado pela convergência da envoltória. Considerando-se um valor de 0,98 para a envoltória normalizada, pode-se determinar que o número de ciclos necessário para a placa de alumínio analisada é por volta de 10000 ciclos.

Desta forma, o sistema de medição deve ser ajustado para excitar a estrutura com um número de ciclos adequado. Cada estrutura a ser monitorada apresenta um fator de amortecimento diferente e, portanto, um determinado número de ciclos do sinal de excitação.

5.3. Número de Ciclos Encontrado Experimentalmente

O sistema de medição apresentado na Figura 3 da Seção 4 foi configurado para realizar uma varredura com diferentes números ciclos do sinal de excitação. A envoltória experimental obtida para a estrutura é apresentada na Figura 8.

Figura 8 – Envoltória experimental normalizada obtida para a placa de alumínio



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Observa-se a semelhança entre a envoltória obtida experimentalmente da Figura 8 e a envoltória teórica da Figura 7. O número de ciclos para convergência da envoltória experimental considerando-se a amplitude normalizada de 0,98 é de cerca de 8200 ciclos, que é inferior ao valor de 10000 ciclos obtido teoricamente. A diferença observada deve-se,

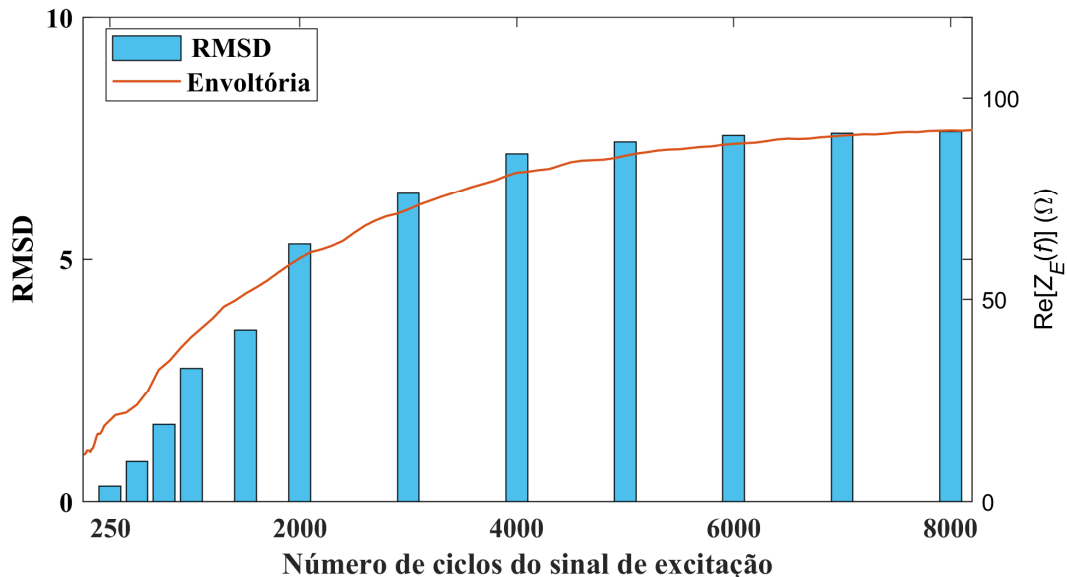
principalmente, ao cálculo aproximado do fator de amortecimento dado pela Equação (8). A discrepância tende a ser menor para estruturas com fator de amortecimento maior, como pode ser conferido na tese de doutorado coorientada pelo pós-doutorando e na publicação obtida.

5.4. Influência na Detecção de Dano

Para analisar os efeitos do número de ciclos de excitação na eficiência da detecção de dano estrutural, um dano foi simulado fixando-se um pino de aço inoxidável de 1 g na estrutura por meio de adesivo de cianoacrilato a uma distância de 100 mm do transdutor. Em seguida, os índices de dano foram calculados para diferentes números de ciclos do sinal de excitação.

Como um exemplo, os índices RMSD calculados usando-se a Equação (2) obtidos para a placa de alumínio considerada neste relatório são apresentados na Figura 9.

Figura 9 – Variação dos índices de dano RMSD com o número de ciclos do sinal de excitação e comparação com a envoltória $E(t)$



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na Figura 9, a amplitude normalizada da envoltória experimental foi apresentada para comparar a tendência de variação nos índices de dano. Os resultados mostram que o número de ciclos do sinal de excitação significativamente afeta os índices de dano estrutural. Os índices RMSD apresentam baixos valores quando o sinal de excitação tem poucos ciclos

comparados à excitação com um alto número de ciclos. Comportamento semelhante foi obtido para as outras estruturas analisadas durante a pesquisa.

Esse resultado reforça a importância do ajuste correto do sistema de medição para excitar a estrutura-transdutor com um número adequado de ciclos. O ajuste correto de acordo com a estrutura monitorada aumenta consideravelmente a sensibilidade ao dano estrutural, o que é fundamental para a detecção de danos incipientes.

6. Orientações

O pós-doutorando coorientou uma tese de doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da própria unidade, sendo o supervisor o orientador principal, como segue:

Claudio José Ribeiro da Silva. Otimização da medição de impedância elétrica para monitoramento de integridade estrutural pela configuração do número de ciclos do sinal de excitação. 2024. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior. Orientador: Fabricio Guimarães Baptista. **Coorientado: Danilo Ecidir Budoya**

<https://hdl.handle.net/11449/255546>

7. Publicações

A pesquisa resultou na publicação de um artigo científico em periódico internacional indexado com estrato Qualis A1 da CAPES, como segue:

DA SILVA, C. J. R.; **BUDOYA, D. E.**; BAPTISTA, F. G. Improving impedance measurement for structural health monitoring by setting the appropriate number of excitation signal cycles. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 73, p. 1-12, 2024.

<http://dx.doi.org/10.1109/tim.2024.3353269>

Observação: A primeira página do artigo está anexada na última página deste relatório.

8. Atividades de Ensino e Extensão

Não foram realizadas atividades de ensino e extensão.

9. Gestão de Dados

De acordo com o Plano de Gestão de Dados aprovado, “*Os dados serão compartilhados por meio do **Google Drive institucional** da Unesp em um diretório específico para o projeto*”. “*Dados selecionados que resultem em publicações poderão ser compartilhados por meio de outras bases como o **IEEE DataPort***”.

Seguindo o plano, os dados foram compartilhados tanto no Google Drive como no IEEE DataPort. Esses dados estão organizados tendo o artigo publicado em periódico, como detalhado na Seção 7, como referência. Os links são apresentados abaixo.

Google Drive institucional

https://drive.google.com/drive/folders/10HzNQrwj7EnB0GFBF_okykYeWS41vBjA?usp=sharing

IEEE DataPort

<https://dx.doi.org/10.21227/gcsb-hq76>

Posteriormente, os dados poderão ser compartilhados em outros repositórios.

10. Comentários do Supervisor

O relatório está bem elaborado e os resultados corretamente apresentados e discutidos. O pós-doutorando coorientou uma tese de doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da unidade, da qual o supervisor foi orientador, e a pesquisa resultou em um artigo científico publicado no periódico internacional indexado *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* que tem estrato Qualis A1 na CAPES.

Portanto, com base no relatório apresentado e nos resultados obtidos, o supervisor considera que a execução do projeto foi bem-sucedida.

Referências

- CLOUGH, R.W.; PENZIEN, J. Dynamics of Structures. **Computers & Structures**, Inc. 3 ed. 2003.
- GORDAN, M.; SABBAGH-YAZDI, S.; ISMAIL, Z.; GHAEDI, K.; CARROLL, P.; MCCRUM, D.; SAMALI, B. State-of-the-art review on advancements of data mining in structural health monitoring. **Measurement**, v. 193, p. 110939, 2022.
- HE, B.; WEI, C.; DING, S.; SHI, Z. A survey of methods for detecting metallic grinding burn. **Measurement**, v. 134, p. 426-439, 2019.
- LI, W.; FANG, X.; CHEN, X.; ZHANG, L. Damage detection method based on flexible macro-fiber composite. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 72, p. 3504809, 2023.
- LIU, Y.; FENG, X. Monitoring corrosion-induced thickness loss of stainless steel plates using the electromechanical impedance technique. **Measurement Science and Technology**, v. 32, n. 2, p. 025104, 2021.
- MAIO, L. **Electromechanical impedance measurement for deicing applications based on piezoelectric actuators**. IEEE 5th International Workshop on Metrology for Aerospace (MetroAeroSpace), pp. 562-566, Jun. 2019.
- PAPAGIANNPOULOS, G.A; HATZIGEORGIOU, G.D. On the use of the half-power bandwidth method to estimate damping in building structures. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, v. 31, pp. 1075-1079, 2011.
- SOFI, A.; REGITA, J.; RANE, B.; LAU, H. Structural health monitoring using wireless smart sensor network - An overview. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 163, p. 108113, 2022.
- TAMHANE, D.; BANERJEE, S.; TALLUR, S. Monitoring corrosion in sacrificial anodes with pulsed eddy current and electromechanical impedance: A comparative analysis. **IEEE Sensors Journal**, v. 22, n. 8, p. 8147-8154, 2022.
- TAN, Z.; FENG, Q.; MA, T.; ZHANG, J.; LIANG, Y. Development of an AD5933-based impedance calibration and measurement technology using piezoceramic transducers. **Measurement**, v. 210, p.112527, 2023.
- TEKKALMAZ, M.; ER, U.; CXAKIR, F. H.; BOZKURT, F. A new approach to monitor wear tracks propagation on-site with electromechanical impedance technique. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 33, n. 2, p. 342–351, 2022.
- TENREIRO, A.; LOPES, A.; DA SILVA, L. A review of structural health monitoring of bonded structures using electromechanical impedance spectroscopy. **Structural Health Monitoring**, v. 21, n. 2, p. 228–249, 2022.

Improving Impedance Measurement for Structural Health Monitoring by Setting the Appropriate Number of Excitation Signal Cycles

Cláudio José Ribeiro da Silva^{1b}, Danilo Ecidir Budoya^{1b},
and Fabricio Guimarães Baptista^{1b}, *Senior Member, IEEE*

Abstract—Researchers have widely used commercial and alternative measurement systems in impedance-based structural health monitoring (SHM), where a piezoelectric transducer attached to the monitored structure is excited while its electrical impedance is measured; however, the literature lacks sufficient attention to the required number of cycles of the excitation signal, an issue frequently overlooked by researchers. This study, therefore, aims to investigate the impact of the number of excitation cycles on impedance measurements by using both a theoretical approach based on the dynamic response of the monitored structure and an experimental approach, which employs a measurement system based on a data acquisition (DAQ) device with variable excitation cycles. Four structures of different sizes and materials were analyzed, and the results show that the appropriate number of cycles for the impedance measurement to be optimized depends on the damping ratio of the monitored structure. Configuring the measurement system with the optimal number of cycles can notably enhance the measurement of resonance peaks related to the natural frequencies of the structure, thereby increasing the performance in detecting structural damage, as well as the reproducibility of impedance measurements; therefore, the results reported in this article can be useful to researchers in configuring different impedance measurement systems to achieve improved performance in SHM applications.

Index Terms—Damage detection, electromechanical impedance (EMI), excitation cycles, impedance measurement, piezoelectric transducers, structural health monitoring (SHM).

I. INTRODUCTION

STRUCTURAL health monitoring (SHM) systems have been extensively studied in recent decades due to the importance of this field to academia and industry. Such systems can monitor different types of engineering structures, allowing structural damage to be detected in advance before a

structural collapse occurs, in addition to reducing maintenance costs [1].

Piezoelectric transducers have been used in the development of nondestructive testing (NDT) methods for detecting damage in SHM systems due to the piezoelectric effect that allows the establishment of a relationship between the mechanical properties of the monitored structure and the electrical properties of the transducer. There are a variety of NDT methods that use piezoelectric transducers as sensors, actuators, or both such as acoustic emission and Lamb waves [2]. As a consequence, these damage detection methods with piezoelectric transducers have motivated the research and development of dedicated measurement platforms [3], which is the subject of interest of this article, mainly in large structures where a large number of transducers are required, and the use of commercial instruments is not feasible.

Among the various NDT methods with piezoelectric transducers, this article particularly addresses the electromechanical impedance (EMI) method and the electrical impedance measurement of the transducer. The principle of the EMI method is simple. A transducer, typically a thin piezoelectric ceramic, is attached to the structure to be monitored using a high-stiffness adhesive. Because of the piezoelectric effect, a relationship is established between the electrical impedance of the transducer and the mechanical impedance of the monitored structure. Since the mechanical impedance of the structure is changed with structural damage, such damage can be detected by measuring and analyzing the electrical impedance of the transducer [4].

The electrical impedance (or admittance) of the transducer is obtained in a frequency range that contains resonance peaks related to the natural frequencies of the monitored structure. Structural damage causes changes in electrical impedance that are mainly observed at resonance peaks. A measurement system must, therefore, be capable of measuring small variations in resonance peaks so that incipient structural damage can be effectively detected. Researchers have used accurate commercial impedance analyzers, as well as developed alternative measurement systems focusing on cost, frequency range, sampling rate, frequency resolution, and amplitude of the excitation signal; however, the number of cycles of the excitation signal has not been sufficiently addressed in the literature. In contrast to the electrical impedance of common

Manuscript received 27 October 2023; revised 15 December 2023; accepted 22 December 2023. Date of publication 15 January 2024; date of current version 26 January 2024. This work was supported in part by the São Paulo Research Foundation (FAPESP) under Grant 2022/15759-1, in part by the National Council for Scientific and Technological Development (CNPq) under Grant 305067/2022-2, and in part by the Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel (CAPES). The Associate Editor coordinating the review process was Dr. Huan Liu. (*Corresponding author: Fabricio Guimarães Baptista.*)

The authors are with the Laboratory of Transducers and Data Acquisition, Department of Electrical Engineering, School of Engineering, São Paulo State University (UNESP), Bauru 17033-360, Brazil (e-mail: ribeiro.silva@unesp.br; danilo.budoya@unesp.br; f.baptista@unesp.br).

Digital Object Identifier 10.1109/TIM.2024.3353269

1557-9662 © 2024 IEEE. Personal use is permitted, but republication/redistribution requires IEEE permission.
See <https://www.ieee.org/publications/rights/index.html> for more information.