

SISTEMA PORTÁTIL DE ANÁLISE DE IMPEDÂNCIA ELETROMECAÂNICA PARA MONITORAMENTO DE INTEGRIDADE ESTRUTURAL

Antônio Leandro Castro da Paixão, leoleandro@unifesspa.edu.br¹

Welizama da Silva Oliveira, welizama.silva@unifesspa.edu.br¹

Breno Ebinuma Takiuti, takiuti@Unifesspa.Edu.Br¹

Douglas Domingues Bueno, douglas.bueno@unesp.br²

Camila Gianini Gonzalez Bueno, camila.gg.bueno@unesp.br²

Pedro Christian Ayala Castillo, pedro.ayala@unifesspa.edu.br¹

¹ Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará. Instituto de Geociências e Engenharias, Folha 17, Quadra 04, Lote especial, Bairro: Nova Marabá – Marabá -PA, CEP: 68505- 080

² Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP) - Campus de Ilha Solteira, Av. Brasil Centro, 56 - Ilha Solteira, SP - CEP 15.385-000

Resumo. A integridade estrutural em ambientes industriais é frequentemente comprometida por falhas decorrentes de impacto, atrito e fadiga, tornando a detecção precoce de danos crucial para a segurança operacional e manutenção preditiva. O Monitoramento da Integridade Estrutural (SHM), particularmente através do método de impedância eletromecânica (EMI) com transdutores piezoelétricos (PZT), oferece uma solução promissora devido à sua praticidade e custo-benefício. Contudo, a aplicação ampla desta técnica é limitada pelo alto custo, volume e peso dos analisadores de impedância comerciais. Este trabalho aborda essa lacuna propondo o desenvolvimento de um Medidor de Impedância Portátil (MIP) de baixo custo e alta portabilidade para detecção de danos estruturais. O objetivo é criar um sistema acessível e prático para aplicações rotineiras de SHM. A primeira etapa do desenvolvimento concentra-se no projeto de um circuito amplificador portátil dedicado ao condicionamento dos sinais do transdutor PZT. Espera-se que o MIP resultante melhore a resolução e a sensibilidade na identificação de danos, simplifique o processamento digital de sinais e possibilite futuras implementações de monitoramento remoto, ampliando significativamente a viabilidade e o alcance da técnica EMI em aplicações industriais e de pesquisa.

Palavras chave: Monitoramento da Integridade Estrutural. Impedância eletromecânica, Transdutor piezoelétrico

Abstract. Structural integrity in industrial environments is often compromised by impact, friction, and fatigue, making early damage detection critical for operational safety. This paper presents a portable, low-cost Impedance Measurement Device (IMD) for Structural Health Monitoring (SHM) using the Electromechanical Impedance (EMI) method with piezoelectric transducers (PZT). Addressing the limitations of commercial impedance analyzers (high cost, bulkiness), the proposed solution focuses initially on developing a portable amplifier circuit for PZT signal conditioning. The resulting IMD aims to improve damage detection resolution, simplify digital signal processing, and enable future remote monitoring applications, significantly expanding EMI technique accessibility for both industrial and research implementations.

Keywords: Structural Health Monitoring, Electromechanical Impedance, Piezoelectric Transducer

1. INTRODUÇÃO

As falhas em estruturas industriais decorrem principalmente de três fatores: impacto, atrito e fadiga. A detecção precoce desses danos é essencial para manutenção preditiva e segurança operacional (Gonçalves et al., 2020). O Structural Health Monitoring (SHM) surge como abordagem eficaz para identificar, avaliar e monitorar a degradação estrutural, possibilitando a previsão da vida útil dos componentes (Cortez, 2015). Entre as técnicas de ensaios não destrutivos (NDE), o método de impedância eletromecânica destaca-se pela praticidade e custo-benefício, utilizando transdutores piezoelétricos de baixo custo e fácil implementação. Contudo, os analisadores de impedância comerciais - projetados para altas frequências - apresentam limitações significativas: custo elevado, tamanho volumoso e excesso de peso,

inviabilizando seu uso em pesquisas e aplicações industriais rotineiras (Tebaldi, 2004; Venâncio, 2022). Diante disso, a tendência atual é a adoção de sistemas compactos e econômicos que mantêm a precisão com componentes acessíveis (Venâncio, 2022). Este trabalho propõe o desenvolvimento de um medidor de impedância portátil (MIP) para detecção de danos estruturais, com ênfase em redução de custos, portabilidade e aplicabilidade prática. A primeira etapa consiste no projeto de um circuito amplificador portátil para condicionar os sinais do transdutor. Esta solução permitirá melhorar a detecção de danos através de maior resolução e sensibilidade, facilitará o processamento digital dos sinais e viabilizará o monitoramento remoto via transmissão sem fio, ampliando as possibilidades de aplicação do sistema.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

No trabalho de (Baptista e filho, 2009) apresenta alguns esquemas de circuito de medição eletromecânica na figura 1 uma representação simples de um circuito em que V_{in} é tensão de entrada, V_{out} tensão de saída, i corrente elétrica e R_s resistor de referência.

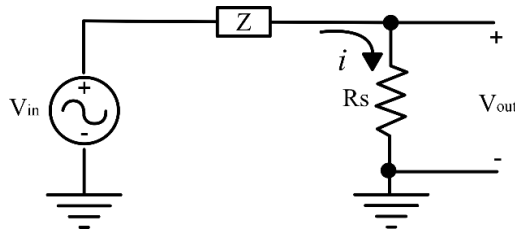


Figura 1. Circuito para medir a tensão de resposta do PZT

Segundo Tebaldi (2004) A tensão de saída é proporcional a corrente que passa pelo resistor. Se o resistor apresentar uma baixa resistência podemos admitir que a corrente que atravessa o PZT é a mesma que passa pelo resistor, o circuito é equacionado da seguinte forma.

$$i = \frac{V_{out}}{R_s} \quad (1)$$

sendo i a corrente que atravessa o resistor. Segundo as considerações acima assumidas temos que a impedância elétrica Z aproximada é

$$Z = \frac{V_{in}}{i} = \frac{V_{in} \cdot R_s}{V_{out}} \quad (2)$$

Esse sistema baseado no divisor de tensão é de fácil implementação e soluções semelhantes têm sido utilizadas em vários estudos. Contudo, Campeiro (2018) explica que esse sistema possui a desvantagem de ser incapaz de manter a amplitude do sinal de resposta do PZT constante, pois a amplitude do sinal de resposta diminui com o aumento da frequência devido à reatância capacitiva do PZT.

O sistema de medição de impedância portátil (MIP) o qual é uma continuação do trabalho de Oliveira e Castillo (2024), com base na metodologia de Tebaldi (2004), utiliza um circuito amplificador de sinal para diminuir a reatância capacitiva isto é apresentado na Fig. 2. Um amplificador inversor foi empregado para ampliar a amplitude do sinal em faixa de frequências altas, e o circuito apresenta ganho variável ajustável com resistores de $10K\Omega$, $50K\Omega$ e $100K\Omega$, selecionáveis por uma chave seletora. A alimentação é feita por duas baterias de 9V.

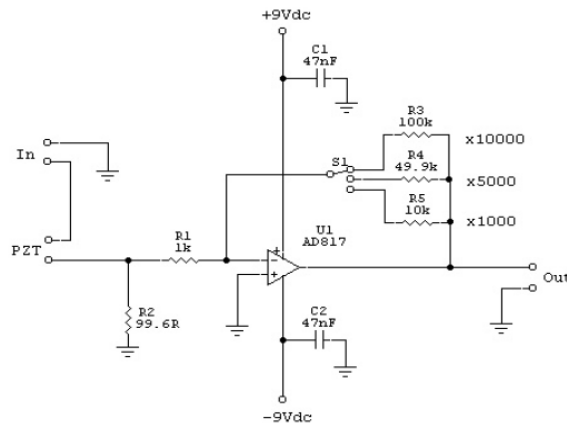


Figura 2. Circuito de referência (Tebaldi 2004)

Houve uma mudança no componente do amplificador, utilizando um transistor LM6172 por conta da compatibilidade e aquecimento menor do componente, Além da fabricação da caixa protetora do circuito em impressão 3d.

3. METODOLOGIA

A metodologia a utilizada no seguinte artigo é mostrada no fluxograma da Figura 3. e se explica no seguinte paragrafo.

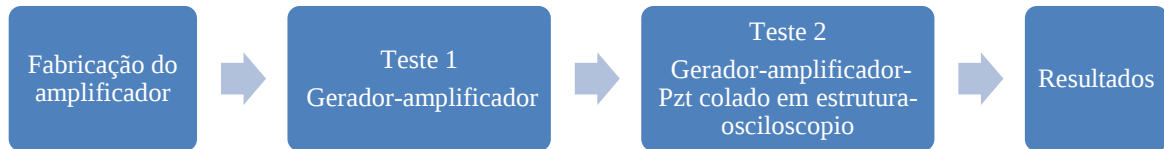


Figura 3. Fluxograma da metodologia do trabalho

3.1 Fabricação do amplificador

Utilizando o software Fusion 360 de Autodesk para projetar uma placa PCI para gravação a laser e de uma caixa de proteção para impressão em 3D. Ambos são apresentados na Fig. 4a) e b) respectivamente.

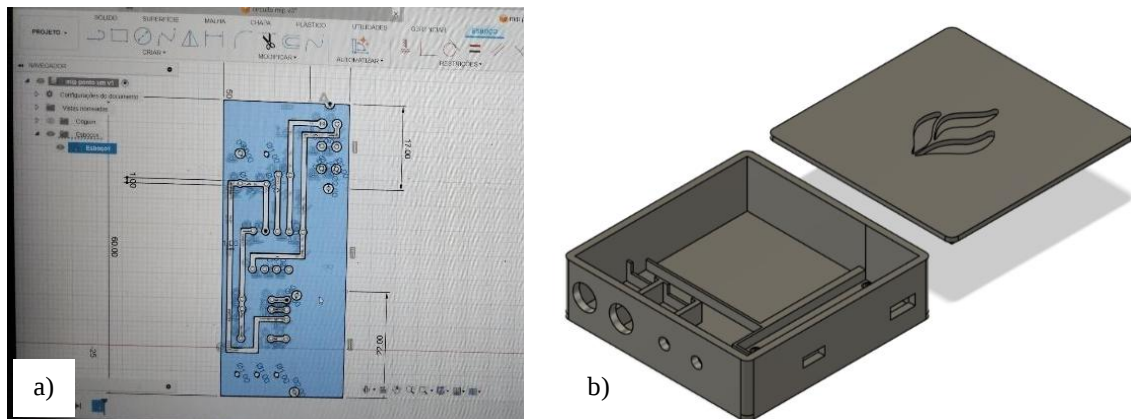


Figura 4. a) Projeto dos trilhos para placa PCI, b) Designer da caixa MIP

Com o equipamento para prototipagem Zmorph do laboratório se fabricou o PCI usando gravação a laser e impressa a caixa do circuito. Ambos são apresentados na Fig. 5a) e Fig. 3b) respectivamente.

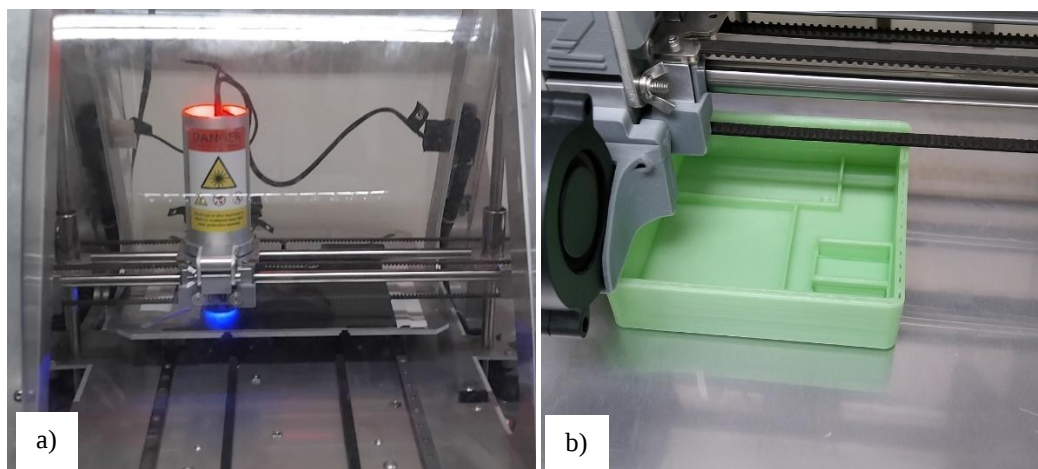


Figura 5. a) Projeto dos trilhos para placa PCI, b) Caixa MIP

Após a construção da caixa MIP finalizada o layout está de acordo com a Figura 6. Onde no indicador 1) chave liga desliga, 2) chave seletora de ganho de sinal 10 vezes, 50 vezes e 100 vezes, 3) cabo negativo do PZT, 4) cabo positivo do PZT, 5) Entrada de sinal 6) saída de sinal.



Figura 6. Protótipo da caixa MIP

3.2 Teste 1 com gerador de sinais, amplificador e osciloscópio

A primeira validação experimental foi realizada no laboratório da UNIFESSPA Fig. 7. Nesta fase, comparou-se o sinal direto no osciloscópio com o sinal processado pelo sistema amplificador Fig. 7a) primeiro teste sem pzt e na Fig. 7b) o gerador de sinal está calibrado para 1 Hz a 200 mVpp.



Figura 7. a) Primeira validação usando gerador de sinais e osciloscópio, b) Gerador de sinal com a configuração da onda senoidal

3.3 Teste 2 com gerador de sinais, PZT-estrutura, amplificador e osciloscópio

Na Figura 8a) o segundo teste foi realizando com um PZT colado um uma barra de alumínio para medir amplitude de resposta do PZT com osciloscópio e fig. 8b) Um sinal Sweep com a variação de frequência de 500 Hz a 1khz em 1s,

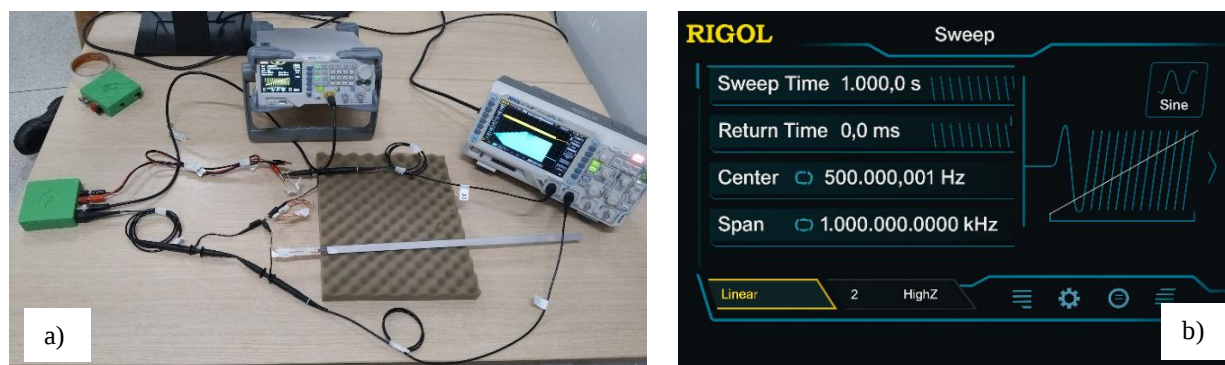


Figura 8. a) Teste com PZT em uma barra e b) gerador de sinal com a configuração do sinal Sweep

2. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 9 mostra os resultados do primeiro teste do circuito e o amplificador, a linha amarela é a medição do gerador de sinal na entrada da caixinha com 220 mVpp e a linha azul é medição na saída da caixinha (sem pzt). Na Fig. 9a) o ganho de 10x chegou a 1,2 Vpp, Fig. 9b) ganho de 50x chegou a 6,32 Vpp, e Fig. 9c) ganho de 100x chegou a 11 Vpp.

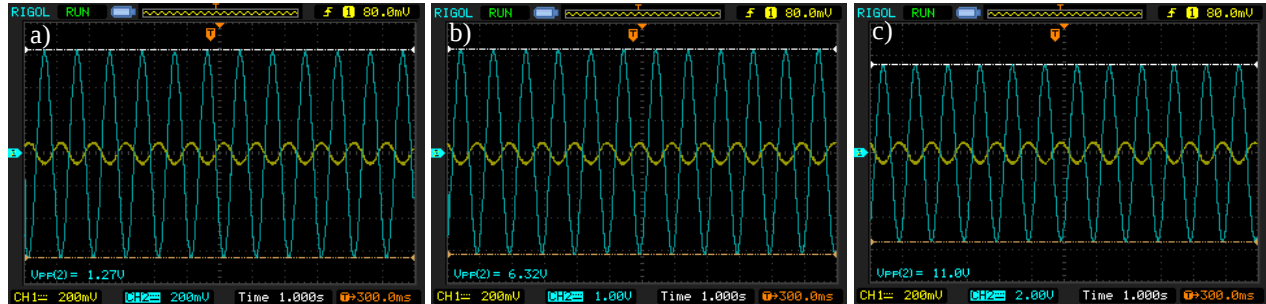


Figura 9. Teste sem pzt, a) ganho de 10x, b) ganho de 50x e c) ganho de 100x.

Os resultados da Figura 10 indicam que a amplitude de resposta do PZT é baixa, onde o amplificador melhora essas amplitudes para altas frequências, na figura 10 o sinal amarelo é na entrada da caixa medindo o gerador de sinal com uma amplitude de 5 Vpp, e o mesmo sinal Sweep é testado nos três ganhos de sinal. Na Fig. 10a) o ganho de 10x máximo 280 mVpp, Fig. 10b) ganho de 50x máximo 1,56 Vpp, e Fig. 10c) ganho de 100x máximo 2,76 Vpp.

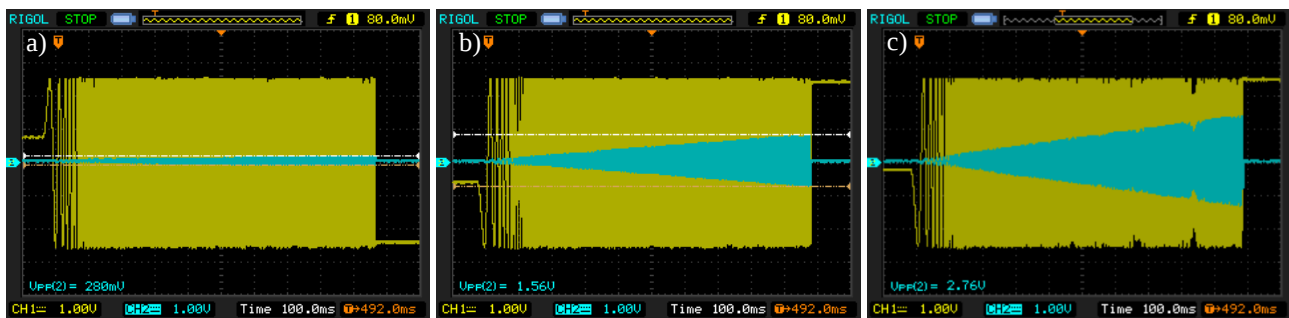


Figura 10. Teste com pzt, a) ganho de 10x, b) ganho de 50x e c) ganho de 100x

Porém com os dados de amostragem do osciloscópio, é pouco os dados extraídos, para calcular a impedância do sistema segundo o critério Nyquist em geral para reconstruir com precisão a forma de onda original, a taxa de amostragem deve ser pelo menos 5 vezes a frequência máxima do sinal. Com isso uma segunda validação será feita com um aparelho para aquisição de dados por ter uma melhor resolução de amostragem.

A seguinte etapa do trabalho é usar um equipamento de aquisição de dados portátil recentemente adquirido por o grupo de pesquisa de SIPROMEC e poder suprir os problemas com a coleta de dados com o osciloscópio.

3. CONCLUSÃO

Se pode concluir que o amplificador foi fabricado e testado com sucesso, a coleta de dados de voltagem não foi realizada como se esperava por a quantidade de dados que dá para salvar do osciloscópio. Tendo os dados de voltagem podemos calcular a impedância elétrica assim como as assinaturas para diferentes frequências, isto se realizará na seguinte etapa.

4. REFERÊNCIAS

- Baptista, F. G. e Filho, V. J. 2009 A new impedance measurement system for PZT-based structural health monitoring. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, New York, v. 58, n. 10, p. 3602-3608, 2009.
- Campeiro, L. M. 2018, “Detecção de Dano Estrutural Baseada na Técnica da Impedância Eletromecânica em Ambientes Ruidosos”. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru-SP.
- Cortez, N.E., 2015. “Desenvolvimento de um sistema de SHM sem fio e com compensação automática de temperatura”. Tese (doutorado). Universidade Estadual Paulista. Faculdade de engenharia de Ilha Solteira.

- Gonçalves, D. R., de Moura, J. D. R. V., e Pereira, P. E. C. 2020, “Monitoramento de integridade estrutural na Impedância Eletromecânica utilizando o método de krigagem ordinária”. HOLOS, 2, 1-16
- Oliveira, W. S. e Castillo, P. C. A., 2024, “Desenvolvimento de um medidor de impedância portátil (mip) para detecção de danos” Anais da IX Semana Acadêmica da Engenharia Mecânica SAEM 2024. p. 18. Marabá-PA.
- Tebaldi, A., 2003, “Detecção de Falhas Estruturais Usando Sensores e Atuadores Piezelétricos e Algoritmos Genéticos”. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira- SP.
- Venâncio, J. D., 2022. “Sistemas alternativos de medição de impedância de transdutores piezelétricos para sistemas de monitoramento de integridade estrutural”.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores desejam manifestar seu agradecimento à Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisas do Pará (FAPESPA) por apoiarem esse trabalho no âmbito da Chamada Pública – Nº 005/2022 – FAPESPA / FAPESP. - FOMENTO À PESQUISA COLABORATIVA ENTRE FAPESPA E FAPESP e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processo. Nº. 2022/10174-5 e a Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará (UNIFESSPA). Agradecer ao grupo de pesquisa SIPROMEC-UNIFESSPA.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.