

**Calibração de um Sistema de Monitoramento de  
Integridade Estrutural Baseado em Impedância  
Eletromecânica de Baixo Custo**

**Bruno Pereira Barella**

*brunobarella@hotmail.com*

**Stanley Washington Ferreira de Rezende**

*stanley-washington@hotmail.com*

UFG/RC - IMTec - Matemática Industrial

**Roberto Mendes Finzi Neto**

*finzi@mecanica.ufu.br*

**Karina Mayumi Tsuruta**

*karinamayumi@yahoo.com.br*

UFU - FEMEC - LMest

**José dos Reis Vieira de Moura Junior**

*zereis@ufg.br*

UFG/RC - IMTec - Matemática Industrial

**Resumo**

Estruturas metálicas sofrem a ação de cargas e esforços durante a sua vida útil, sujeitas a danos estruturais como fadiga, corrosão, trincas e deformações plásticas. Desta forma, para se detectar um dano utiliza-se as respostas dinâmicas das estruturas e compara-se dois estados, com dano e sem dano. Estas respostas dinâmicas são obtidas a partir de um sinal que representa a impedância eletromecânica da estrutura. Assim, estas assinaturas de impedância devem representar fielmente a estrutura analisada. A partir da comparação das assinaturas de impedância da placa de baixo custo utilizada na UFG com o sistema SySHM desenvolvido pelo LMest/UFU, pode-se constatar que a placa de baixo custo necessita de uma calibração em sua assinatura

de impedância. Este trabalho propõe um método para determinar um modelo matemático o qual será utilizado para converter os sinais adquiridos pela placa de baixo custo, em sinais aptos para análise.

**Palavras-chave:** Modelo matemático de ajustamento, integridade estrutural, impedância eletromecânica.

## 1 Introdução

Com o intuito de obter uma máxima utilização de determinada estrutura e garantir a efetiva segurança de sua operação, técnicas de monitoramento estrutural são empregadas para evitar a interrupção de suas operações e que a estrutura possa ser monitorada durante seu uso.

O objetivo principal da análise estrutural é detectar danos incipientes com o intuito de prever a vida útil do sistema. Desta forma, dano é definido como uma alteração adversa causada na estrutura, que afeta o seu desempenho presente ou futuro (3; 6). Estes danos estruturais correspondem em uma alteração das propriedades do sistema como rigidez, massa ou amortecimento. Estas características afetam diretamente a resposta dinâmica da estrutura, sendo possível identificar a presença de tais danos pela contínua inspeção destas propriedades.

O método de monitoramento de integridade estrutural (SHM) baseado em impedância eletromecânica atua de forma a comparar as respostas de frequência da estrutura pertinentes a dois estados: com dano e sem. A propriedade que está diretamente relacionada com alterações de massa, rigidez e amortecimento é a impedância mecânica, a qual pode ser obtida pela impedância eletromecânica de elementos piezoelétricos acoplados nos sistemas mecânicos.

Esta NDT (técnica de avaliação não destrutiva) baseada na obtenção e comparação de variações das funções de resposta em frequência utiliza pastilhas piezoelétricas, e os sinais referentes à impedância eletromecânica são utilizados para representar as características pertinentes ao estado de saúde da estrutura (4). Tais elementos atuam tanto como sensores, captando a frequência da estrutura, quanto como atuadores, excitando a estrutura.

Os materiais mais utilizados são titanato-zirconato de chumbo (PZT), um piezocerâmico, e o fluorido de polivinilideno (PVDF), um piezopolímero (1).

Desta maneira métricas para a quantificação de danos faz-se necessária a partir de dois estados da estrutura, com dano e sem. O emprego de tais técnicas para a quantificação de danos é necessária pois os sinais referentes a estrutura com e sem dano estão expostos a variações associadas ao meio ambiente e não propriamente ao dano (8).

A métrica de dano mais utilizada neste processo é o Raiz Quadrada do Desvio Médio (RMSD). A equação (1) representa este modelo sendo  $Re(Z_{1,i})$  é a parte real do sinal de impedância eletromecânica da estrutura em condições iniciais para a frequência  $i$ ,  $Re(Z_{2,i})$  é a parte real do sinal de impedância eletromecânica da estrutura em uma nova condição (com dano) e  $n$  é a quantidade de pontos amostrados para determinada faixa de frequência  $i$  (8).

$$RMSD = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{(Re(Z_{1,i}) - Re(Z_{2,i}))^2}{Re(Z_{1,i})^2} \right)} \quad (1)$$

O presente trabalho apresenta uma comparação entre as assinaturas de impedância de dois sistemas diferentes, e em seguida, propõe um método para a correção do sinal de impedância eletromecânica obtido pela placa de aquisição de baixo custo. Para a realização deste trabalho foi coletado um sinal de impedância eletromecânica a partir da placa de aquisição SYSHM desenvolvida pelo LMest UFU.

## 2 Metodologia

O método de impedância eletromecânica consiste em associar a impedância elétrica obtida através da pastilha PZT, com a impedância mecânica da estrutura que é afetada pela presença de dano. As pastilhas PZTs monitoram mudanças na massa, rigidez e amortecimento da estrutura, as mesmas medem respostas dinâmicas locais (8; 7).

Quando é aplicado uma tensão nos terminais da pastilha PZT, a mesma comporta-se como um atuador, ou seja, realiza uma deformação mecânica. Caso haja uma deformação mecânica, a mesma comporta-se como um sensor, ou seja, capta oscilações provenientes da estrutura em forma de sinais

elétricos. Desta forma, caso exista algum dano (alterações no comportamento dinâmico da estrutura), isto se manifestará na resposta elétrica do PZT. Assume-se que a parcela imaginária possui características capacitivas do sensor PZT enquanto a parcela real demonstra aspectos da impedância mecânica da estrutura (10).

A partir das amostras coletadas por uma placa de aquisição de sinal, realiza-se uma análise qualitativa destes sinais. Por meio da plotagem dos dois conjuntos de dados referentes ao sinal com dano e sem dano, analisa-se os desvios nas curvas dos sinais e com isto é possível identificar a presença de dano. Para uma quantificação deste dano será utilizada a métrica de dano apresentada anteriormente pela equação (1).

Para a primeira coleta de sinal utilizou-se a placa EVAL AD5933EBZ da empresa *Analog Device* (2). A placa foi calibrada com um circuito misto contendo um resistor de  $1200 \Omega$ ,  $1 \text{ M} \Omega$  e uma pastilha piezoelétrica do tipo titanato zirconato de chumbo, como é apresentado na figura (1).

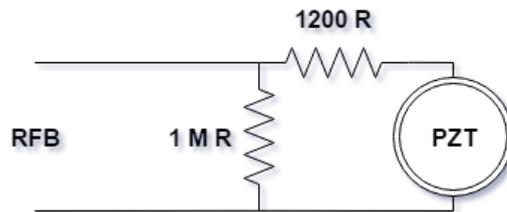


Figura 1: Circuito de calibração da placa de baixo custo

Posteriormente coletou a segunda assinatura de impedância a partir da placa de aquisição SySHM desenvolvida pelo LMest/UFU.

De posse das duas assinaturas de impedância, plotou-se ambas, e constatou-se que o sinal obtido a partir da placa de baixo custo possui as principais características do sinal obtido pela placa SySHM, porém, existe um certo atraso e um aumento de amplitude em algumas regiões. Assim, faz-se necessário um modelo para a correção da assinatura de impedância da placa de baixo custo.

Para a construção do modelo de correção do sinal utilizou-se o método dos mínimos quadrados (MMQ) para obter uma equação que permite corrigir o sinal referente a placa de baixo custo. O MMQ foi implementado no *software*

MATLAB<sup>®</sup>. Como o sinal possui muitos picos, devido a ressonância da estrutura em dada frequência, foi necessário realizar um ajuste da equação de primeiro grau obtida a partir do MMQ. Este ajuste proposto foi um aumento no grau da equação de forma de tentativa e erro.

Para realizar uma melhor análise dos sinais realizou-se a plotagem dos resíduos entre o novo sinal obtido a partir da nova equação e a assinatura de impedância obtida pela placa SySHM e obteve-se o coeficiente de determinação ( $R^2$ ). Este coeficiente varia entre 0 e 1, indicando, em porcentagem, o quanto o modelo consegue explicar os valores observados. Quanto maior o  $R^2$ , mais explicativo o modelo é, e melhor ele se ajusta à amostra.

### 3 Resultados

Com o auxílio da plotagem das duas assinaturas de impedâncias obtidas através das placas de aquisição foi possível constatar a necessidade da utilização do modelo para a correção do sinal da placa de baixo custo. A figura (2) apresenta os dois sinais referentes ao corpo de prova utilizado.

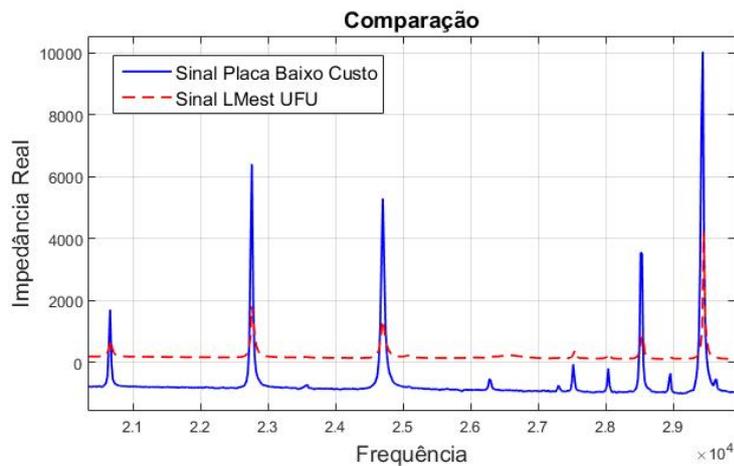


Figura 2: Comparação entre os sinais das duas placas

A figura (3) apresenta a placa SySHM desenvolvida pelo LMest/UFU para a aquisição de sinais de impedância eletromecânica. A mesma foi utilizada neste trabalho por ter sido validada anteriormente para utilização.

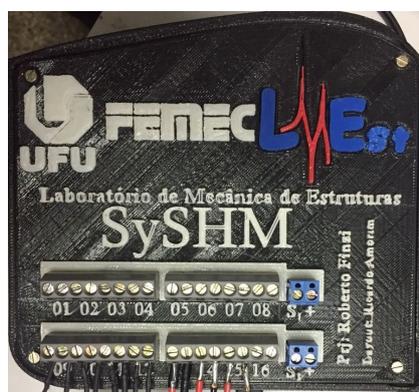


Figura 3: Sistema de aquisição desenvolvido pela LMest UFU

A figura (4) apresenta a placa de baixo custo utilizada no experimento, a qual contém um circuito integrado AD5933, conversor de impedância de alta precisão, juntamente com um gerador de frequência de até 16MHz. A aquisição do sinal é amostrada pelo conversor analógico digital, o sistema possui um limite de aquisição de 511 pontos. O circuito integrado realiza uma transformada de Fourier discreta. A placa opera com tensão de 2,7 V até 5,5 V (2).



Figura 4: Sistema de aquisição de baixo custo

O corpo de prova utilizado no experimento foi uma viga de alumínio, com 400 x 25 x 3 mm e uma pastilha piezoelétrica de diâmetro 20 mm por 2 mm de espessura, conforme a figura (5). O corpo de prova esteve sob dois apoios estofados com o intuito de se simular uma condição de contorno bi-apoiada,

e remover possíveis perturbações do meio nas características dinâmicas da estrutura, ou seja, alterações em sua assinatura de impedância.

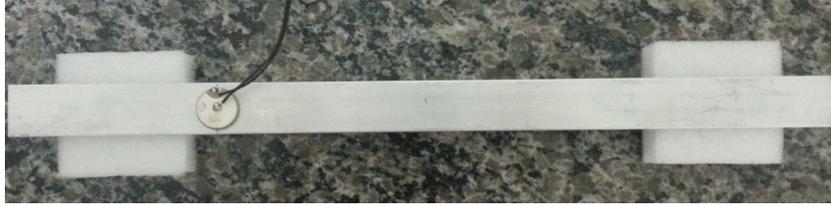


Figura 5: Viga de alumínio utilizada como corpo de prova

Após a constatação da necessidade do emprego do modelo para a correção da assinatura de impedância da placa de baixo custo, construiu-se o programa para a realização do MMQ o qual gerou a equação (2). A escolha do grau (17/10) foi de caráter empírico.

$$f(x) = 0.00061882804278x^{17/10} + 111.951248659822483, \quad (2)$$

sendo  $x$  o vetor da parte real da impedância eletromecânica (placa de baixo custo), a ser transformado.

Após esta transformação plotou-se os sinais com o intuito de compará-los. A figura (6) apresenta o novo sinal obtido através do modelo.

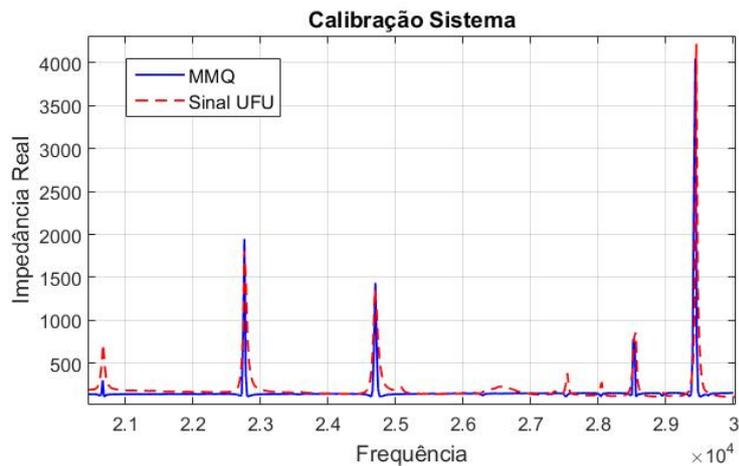


Figura 6: Comparação entre as assinaturas de impedância (transformação e SySHM)

A figura (7) apresenta os resíduos entre o sinal transformado e o sinal da placa SySHM do LMest/UFU.

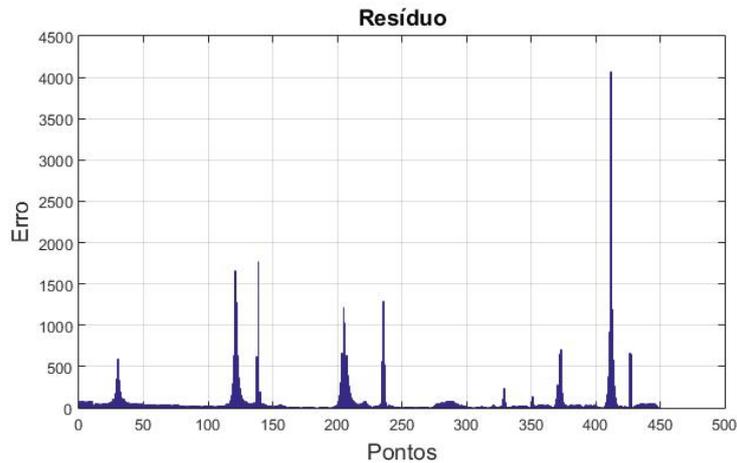


Figura 7: Resíduos entre os dois sinais

Pode evidenciar que apesar de possuir alguns desvios, o modelo obteve um bom resultado comparado com o estado inicial do sinal da placa de baixo custo.

Posteriormente obteve-se o coeficiente de determinação  $R^2$ , com o intuito de se avaliar o grau da qualidade do ajuste obtido através do modelo proposto. Este obteve o valor de 0.8490, assim constatando uma boa qualidade do ajuste.

## 4 Conclusões

O uso de sistemas de baixo custo podem viabilizar a aplicação da técnica de impedância eletromecânica na manutenção de sistemas críticos do cotidiano (galpões, perfis estruturais, pontes rolantes, pontes e etc), em que devido ao custo, um sistema complexo e de maior custo, tornaria o monitoramento inviável.

Este trabalho pode evidenciar a capacidade do sistema de aquisição de baixo custo, e a partir de um modelo pode corrigir o sinal de impedância eletromecânica, tornando-o apto a aplicação do método de análise de integridade estrutural.

Com este procedimento de ajuste proposto pretende-se realizar uma série de outras avaliações e diversos tipos de estruturas podendo tirar melhores conclusões sobre a capacidade real do uso da placa de aquisições de baixo custo em condições mais adversas.

## Referências

- BANKS, H. Thomas; SMITH, Ralph Charles; WANG, Yun. (1996) **Smart material structures: modeling, estimation, and control**. John Wiley & Son Ltd.
- DEVICES, Analog. (2013) **AD5933 Datasheet**. (2008-05-11) [2009-06-30]. [http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/AD5933.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD5933.pdf).
- FREITAS, Everaldo Silva de. (2016) **Análise experimental de diafragmas piezelétricos comerciais para detecção de dano estrutural baseada na impedância eletromecânica**.
- GOPALAKRISHNAN, Srinivasan; RUZZENE, Massimo; HANAGUD, Sathyanaraya. (2011) **Computational techniques for structural health monitoring**. Springer Science & Business Media.
- GRISSE, Benjamin Luke. (2004) **Considerations of the impedance method, wave propagation, and wireless systems for structural health monitoring**. Tese de Doutorado. Virginia Tech.
- INMAN, Daniel J. et al. (2005) **Damage Prognosis: For Aerospace, Civil and Mechanical Systems**. John Wiley & Sons.
- MOURA JÚNIOR, José dos Reis Vieira. (2008) **Uma contribuição aos sistemas de monitoramento de integridade estrutural aplicada a estruturas aeronáuticas e espaciais**. Tese de Doutorado.
- PALOMINO, Lizeth Vargas. (2008) **Análise das métricas de dano associadas à técnica da impedância eletromecânica para o monitoramento de integridade estrutural**.
- PARK, Gyuhae et al. (2003) **Overview of piezoelectric impedance-based health monitoring and path forward**.

RAJU, Vinod. (1997) **Implementing Impedance Based Health Monitoring**. Tese de Doutorado. Virginia Polytechnic Institute and State University.