

Otimização da faixa de frequência dos sinais de impedância adquiridos no monitoramento da integridade estrutural em tubulações industriais

Optimization of frequency range of impedance signals acquired in the monitoring of structural integrity in industrial pipelines

Renan Garcia Rosa¹, Camila Pereira da Silva², Stanley Washigton Ferreira de Rezende³, José dos Reis Vieira de Moura Júnior⁴

RESUMO

Através da implementação de um sistema de SHM nas tubulações, é possível monitorar a integridade estrutural de forma contínua e reduzir, assim, os riscos de acidentes que podem prejudicar a população e o meio ambiente. A técnica proposta é baseada em transdutores do tipo PZT, que são colados na superfície do corpo principal do tubo por meio de um adesivo de alta rigidez, e tem como vantagem básica a simplicidade. Os sensores, devidamente posicionados, são excitados em uma determinada faixa de frequência, gerando uma resposta que é medida através da impedância elétrica. Para detectar o dano, as diferentes medições são analisadas usando-se índices de falha métrica tradicionais na área de SHM. Buscando otimizar a faixa de frequência dos sinais de impedância coletados, um algoritmo bioinspirado denominado Busca Cuco foi aplicado visando encontrar a maior divergência entre o sinal Baseline e de Dano, encontrando a frequência mais sensível da estrutura onde o monitoramento deve ocorrer.

Palavras-chave: Monitoramento da Integridade Estrutural. Tubulações Industriais. Modelagem e Otimização. Baixo Custo.

ABSTRACT

Through the implementation of an SHM piping system, it is possible to continuously monitor structural integrity and thus reduce the risk of accidents that could harm the population and the environment. The proposed technique is based on PZT-type transducers, which are glued to the surface of the main body of the tube by means of a high stiffness adhesive, and has as basic advantage the simplicity. The sensors, properly positioned, are excited in a certain frequency range, generating a response that is measured through the electrical impedance. To detect the damage, the different measurements are analyzed using traditional metric failure rates in the SHM area. In order to optimize the frequency range of the impedance signals collected, a bioinspired algorithm called Cuco Search was applied in order to find the greatest divergence between the Baseline and Dano signals, finding the most sensitive frequency of the structure where the monitoring should occur.

Keywords: Structural Integrity Monitoring. Industrial Piping. Modeling and Optimization. Low Cost.

¹ Bacharel em Matemática Industrial e Mestrando em Modelagem e Otimização, Universidade Federal de Goiás-Regional Catalão ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4317-8680>.

E-mail: renangarcia@gmail.com

² Bacharel em Matemática Industrial e Mestrando em Modelagem e Otimização, Universidade Federal de Goiás-Regional Catalão ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5626-5222>.

³ Mestre em Modelagem e Otimização, Universidade Federal de Goiás - Regional Catalão ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3163-9862>

⁴ Doutor em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Catalão ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8701-8355>.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente é comum a ocorrência de diversos tipos de problemas industriais devido a defeitos em estruturas de tubulações de fluidos em ambientes industriais. Estes tipos de falhas podem trazer desde o trivial prejuízo financeiro (paradas de produção) até aspectos permanentes como perdas humanas ou impactos ambientais (FARRAR, 2005).

Por outro lado, o método de monitoramento da integridade estrutural baseado em impedância eletromecânica tem se mostrado promissora na detecção e acompanhamento de falhas incipientes (trincas de poucos milímetros) (MOURA; STEFFEN, 2008). Assim, a principal justificativa de desenvolvimento do trabalho proposto é a implementação de uma técnica que tem obtido bons resultados na indústria aeronáutica/espacial para um problema real de grande impacto nos ambientes industriais (transporte de líquidos e gases).

Sistemas de Monitoramento da integridade estrutural buscam detectar danos estruturais. Mais conhecida como SHM (do inglês *Structural Health Monitoring*), é uma tecnologia que desenvolve e implementa técnicas para detecção, inspeção e monitoramento de danos em estruturas, que estão sujeitas a longos períodos de uso intermitente e vulneráveis a falhas (HALL, 1999).

O método de Impedância Eletromecânica é um procedimento para detecção de danos em estruturas que, de forma não destrutiva, monitora as mudanças causadas por falhas. Este monitoramento ocorre por meio de cerâmicas piezelétricas, transdutores de baixo custo que são acoplados na estrutura, de uma forma que não interfiram no comportamento natural do sistema dinâmico estrutural (CIANG et al., 2008; STASZEWSKI LEE, 2007; MOURA JR, 2008).

A presença de um dano estrutural é identificada a partir da função resposta em frequências da estrutura. A obtenção desta função é que explica a técnica de monitoramento estrutural baseado em impedância eletromecânica (PARK, INMAN 2005).

O método de monitoramento implementado utiliza um baixo custo de implementação, necessitando basicamente de uma placa de aquisição de assinaturas de impedância e algumas pastilhas piezelétricas. Ao longo do tempo, com o desenvolvimento tecnológico, surgiram novos materiais que estão sendo utilizados de forma promissora como sensores e como atuadores, incorporando de forma simples a uma estrutura qualquer para monitoramento contínuo da saúde mecânica. Estes novos sistemas são denominados como Estruturas Inteligentes. Elas utilizam estes novos

materiais, denominados por materiais inteligentes e vêm ganhando destaque no setor aeronáutico e entre outras áreas aplicadas ao redor do mundo nos últimos 20 anos (MOURA JR, 2008; BAPTISTA, 2010; GOMES, 2004; WU et al, 2010).

A motivação para o uso do SHM é tanto científica como econômica. Do ponto de vista científico, monitorar e detectar danos estruturais significa conquistar um elevado grau de segurança. Do ponto de vista econômico, sistemas com essa capacidade permitem uma economia significativa em manutenção, substituindo uma manutenção corretiva por uma preditiva contínua, onde a estrutura é analisada em períodos contínuos e comparada com a estrutura em perfeitas condições, garantindo assim a segurança efetiva e a redução do custo da manutenção (MOURA JR, 2008).

Em uma estrutura como tubulações, vários tipos de danos podem ocorrer, variando de microfissuras a flambagem ou parafusos soltos. Isso torna difícil identificar os danos usando um único modo de detecção. Para focalizar o monitoramento da estrutura nas regiões mais críticas, onde pode ocorrer mais dano, propõe-se o algoritmo Busca Cuco para otimizar a faixa de frequência dos sinais de impedância coletados.

Busca Cuco (Cuckoo Search – CS) é um algoritmo inspirado no parasitismo das crias de algumas espécies do pássaro cuco que se caracterizam por colocar ovos em ninhos de outras espécies de aves hospedeiras (BACANIN,2012).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Como em várias estruturas mecânicas, as tubulações industriais permanecem em atividade por muitas horas seguidas, ficando passível a ocorrência de falhas que trazem tanto prejuízo econômico quanto graves perdas humanas, em caso de acidentes (FARRAR, 2003).

Através da implementação de um sistema de SHM nas tubulações, é possível monitorar a integridade estrutural de forma contínua e reduzir, assim, os riscos de acidentes que podem prejudicar a população e o meio ambiente. Uma bancada de testes foi projetada com o objetivo de simular os mecanismos de dano que ocorrem em tubulações industriais reais e aplicar a técnica de impedância eletromecânica no monitoramento de tal estrutura.

O protótipo da tubulação está ilustrado na Figura 1.

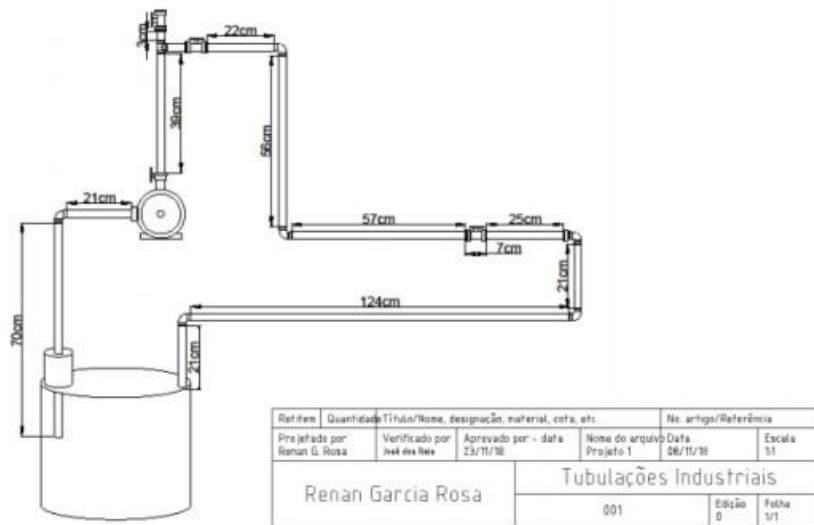


Figura 1. Desenho do Sistema de tubulação.

O método de monitoramento implementado utiliza um baixo custo de implementação, necessitando basicamente de uma placa de aquisição de assinaturas de impedância e algumas pastilhas piezelétricas. Para a aquisição das assinaturas de impedância, a placa da Analog Devices, modelo EVAL AD5933-EBZ, foi validada e calibrada para tal objetivo. A Figura 2 ilustra a placa de aquisição calibrada.

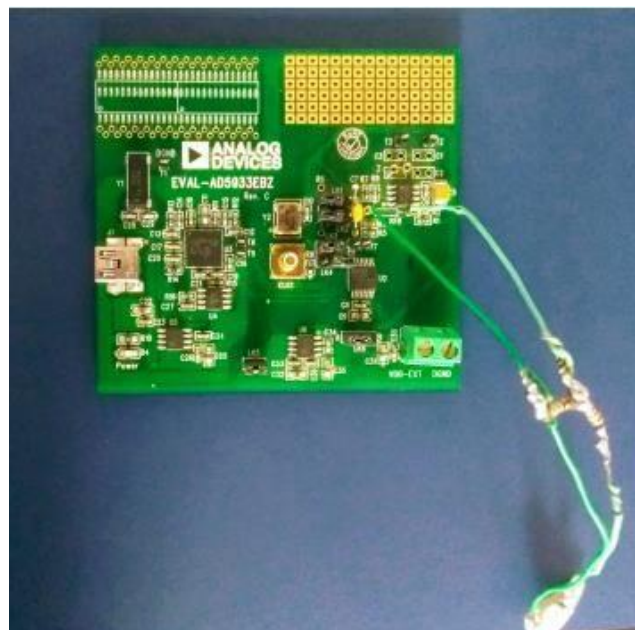


Figura 2. EVAL – AD5933EBZ.

O AD5933 é um sistema conversor de impedância de alta precisão que combina um gerador de frequência on-board com um conversor analógico-digital (ADC) de 12 bits e 1 MSPS. O gerador de frequência permite uma impedância complexa externa ser excitada com uma frequência conhecida.

O sinal de resposta da impedância é amostrado pelo ADC onboard e uma Transformada de Fourier (TFD) é processada por um dispositivo integrado. O algoritmo TFD retorna um sinal real (R) e um sinal imaginário (I) em cada frequência de saída.

Uma vez calibrada, a magnitude da impedância e sua relativa fase da impedância em cada ponto de frequência ao longo da varredura é facilmente calculado.

O sistema de aquisição de sinais a ser desenvolvido é composto por 3 elementos: a placa de aquisição EVAL AD5933-EBZ, transdutores piezelétricos (inicialmente um acoplado em uma braçadeira compatível com as dimensões do cano) e um computador para processamento dos dados.

Os transdutores piezelétricos, também conhecido como pastilhas piezelétricas, é o tipo de sensor que detecta sinais e vibrações a partir de informações de sua tensão de saída. Nesse sistema foi utilizado pastilhas de 22 milímetros de diâmetro, com um peso de aproximadamente 0,8 gramas e está ilustrado na Figura 3.

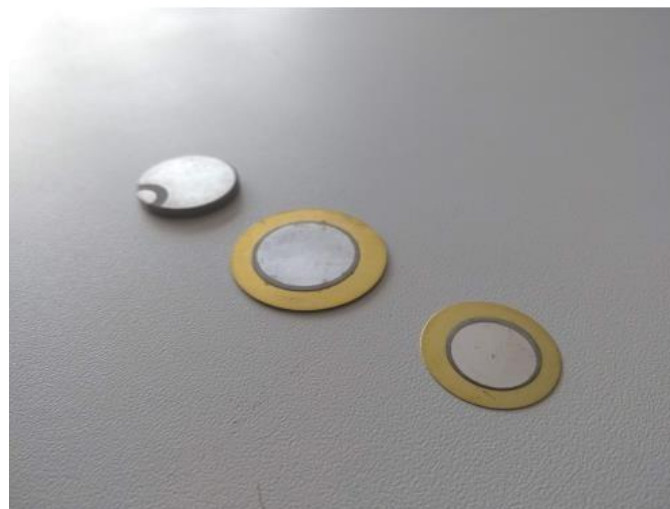


Figura 3. Pastilhas Piezelétricas

Para comunicação com a placa de aquisição de sinais é necessário a soldagem de dois fios de cobre, um na extremidade metálica mais extrema do Transdutor Piezoelétrico e outro na parte central branca (sendo está o terminal positivo). Importante lembrar que para realizar o procedimento de soldagem na parte branca, o ferro de solda deve ser utilizado de forma rápida ou deve-se deixá-lo no máximo a 200°C.

Para o acoplamento do transdutor na tubulação da bancada foi necessário a modelagem de uma estrutura que, com a pastilha colada em sua face, envolva o tubo, tornando possível a interação pastilha e tubulação. A braçadeira, estrutura assim nomeada, foi impressa em 3d utilizando PLA (ácido polilático) como material para impressão e está ilustrada na Figura 4.

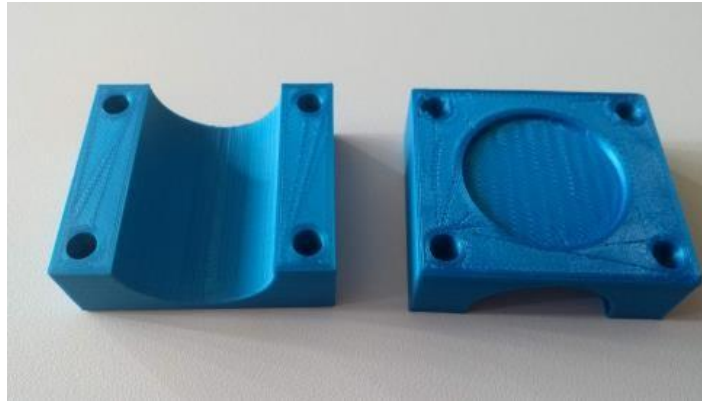


Figura 4. Braçadeira impressa em uma impressora 3D

Para manipulação dos dados, utilizou-se o ambiente Matlab, software que recebe/envia dados de uma porta serial conectada no Arduíno. Com os dados recebidos, o programa plota a assinatura de impedância do sistema monitorado. Com esses componentes acima identificados, o sistema final para o experimento ficou como ilustrado na Figura 5.



Figura 5. Sistema Final para Monitoramento

Inicialmente, colheu-se as amostras do Baseline, tubulação funcionando naturalmente, ou seja, sem a presença de dano. Posteriormente, colheu-se as amostras com cada dano diferente, para, assim, realizar o tratamento e análise dos dados. Para ambos os casos, colheu-se 10 amostras para cada faixa de frequência de 10 kHz até 100 kHz, aumentando de 10 em 10 kHz.

Como os sinais de impedância eletromecânica captados para cada estado apresentaram uma certa variação (devido a não ter um controle preciso do ambiente onde foi realizado a coleta dos mesmos), foi necessário efetuar a normalização dos sinais, para poder ser realizada uma comparação de forma significativa dos sinais de cada posição entre si. Esta etapa é denominada como compensação de temperatura (Rabelo, 2016).

De acordo com a Figura 6 é possível verificar os sinais sem danos na Figura a) e na b) depois ser feito o processo de normalização/compensação de temperatura.

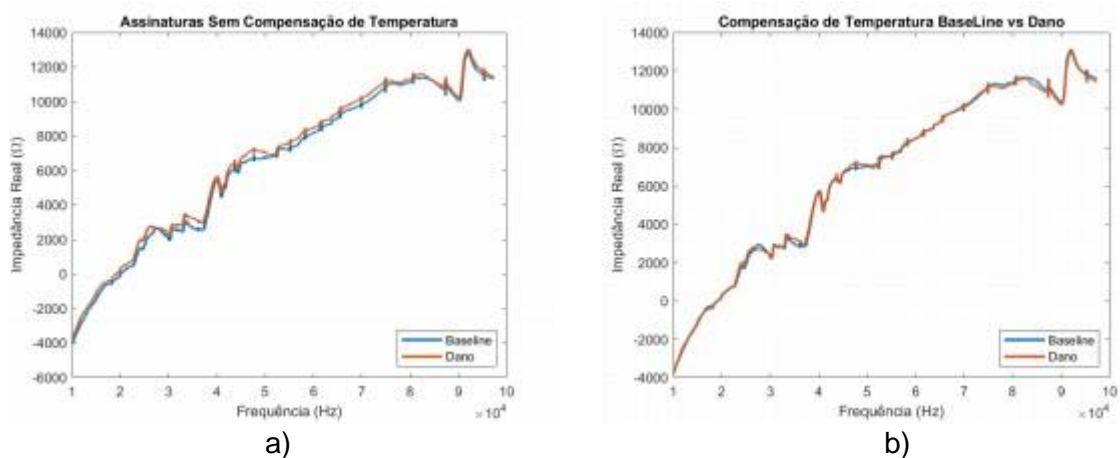


Figura 6. Sinais de impedância eletromecânica na faixa de 10-100kHz

Feita a normalização/compensação de temperatura, os sinais podem ser comparados de uma forma mais eficaz, onde é possível observar na Figura 6 b) que os sinais tendem a estar mais próximos.

3. RESULTADOS

O estudo de caso apresentado neste capítulo aborda o ensaio de monitoramento da integridade estrutural baseado em impedância eletromecânica para identificação de falhas,

encontrando a faixa que mais diverge entre os sinais da tubulação em quatro estados diferentes, um estado sem danos e três com dano.

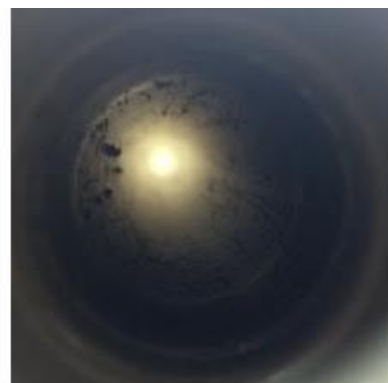
Um importante aspecto desta técnica é a correta determinação da banda de frequência mais sensível para realização do SHM para este tipo de dano. Em geral, a obtenção da banda para uma dada estrutura é determinada pelo método de tentativa e erro e o tipo de sinal mais utilizado para análise de impedância eletromecânica é o que corresponde à parte real (RAJU, 1997).

O experimento consiste na realização de medições dos sinais de impedância eletromecânica através do acoplamento do PZT (responsável pela associação da impedância elétrica do PZT com a impedância mecânica da estrutura) na tubulação em estudo, em duas condições diferentes. Na primeira condição a tubulação está íntegra e na segunda condição é simulada uma falha, para então poder ser realizada a análise dos sinais.

As três falhas são realizadas separadamente (uma por vez), onde a primeira falha é a danificação da parte interna do tubo com riscados. A segunda falha é o acréscimo de massa (massa epóxi de aproximadamente 5 gramas) no interior do tubo, simulando o entupimento parcial da tubulação. E a terceira falha é o acoplamento de um filtro no tubo com o objetivo de dificultar a passagem do fluxo de água, ou seja, um encrustamento em menor escala. A Figura 7 ilustra os danos simulados na tubulação.



a) Entupimento parcial



b) Tubo riscado internamente



c) Filtro de tecido no tubo d) Tubos utilizados nos experimentos

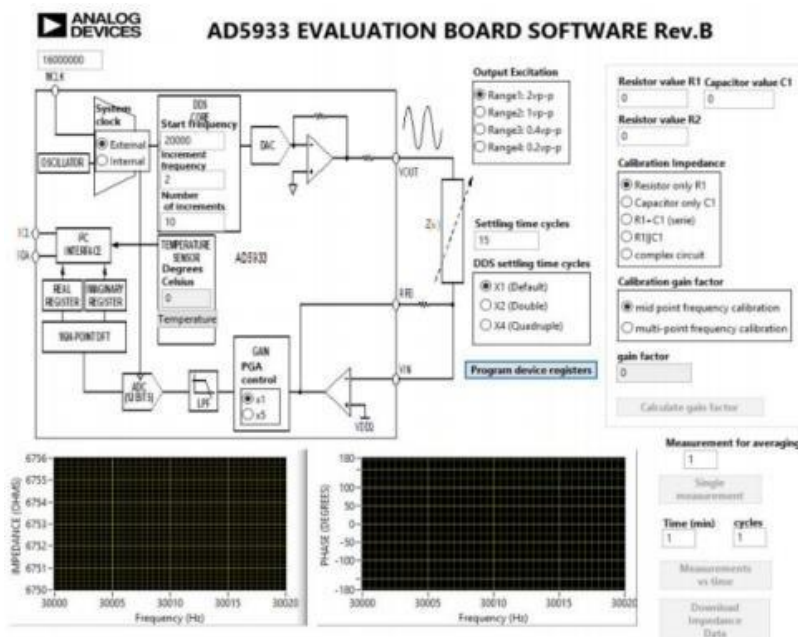
Figura 7. Ilustração dos danos simulados no experimento

A seção da tubulação (tubo de teste do tipo *Polyvinyl chloride* (PVC)) utilizado neste ensaio possui as seguintes dimensões: 55cm de comprimento e 1,7mm de espessura. O sensor/atuator utilizado neste experimento é o do tipo Titanato-Zirconato de Chumbo (PZT) com dimensões de 22 x 0.6mm. A Figura 8 ilustra a estrutura e o sensor devidamente fixado.



Figura 8. Tubo para monitoramento da estrutura juntamente com o sensor acoplado.

O monitoramento do sinal de impedância eletromecânica da tubulação é feito através da placa EVAL-AD5933EBZ, que é apresentada na Figura 2. A placa faz comunicação com um computador através da conexão USB, e a partir do software AD5933 Evaluation Board Software Rev.B é realizada a medição do sinal de impedância. A interface deste software é apresentada na Figura 9.



. **Figura 9.** Interface do software utilizado para realizar o ensaio de SHM.

A faixa de frequência utilizada neste experimento foi no total (de 10–100kHz), evoluindo de 10 em 10 kHz e com um passo de 19,57Hz, totalizando 511 pontos por coleta para análise. É importante ressaltar que, esta faixa de frequência foi selecionada através do método de tentativa e erro. Deve-se trabalhar apenas com a parte real do sinal da impedância medida para poder realizar as análises, devido ao fato de que as propriedades mecânicas da estrutura estão armazenadas nesta parte do sinal.

Foram realizadas 10 amostras na condição da tubulação sem falha e outras 10 amostras na condição da tubulação com falha para cada faixa de frequência. A média destas amostras é apresentada na Figura 10, onde os sinais de impedância eletromecânica da tubulação em questão estão plotados depois ser feito o processo de normalização/compensação de temperatura.

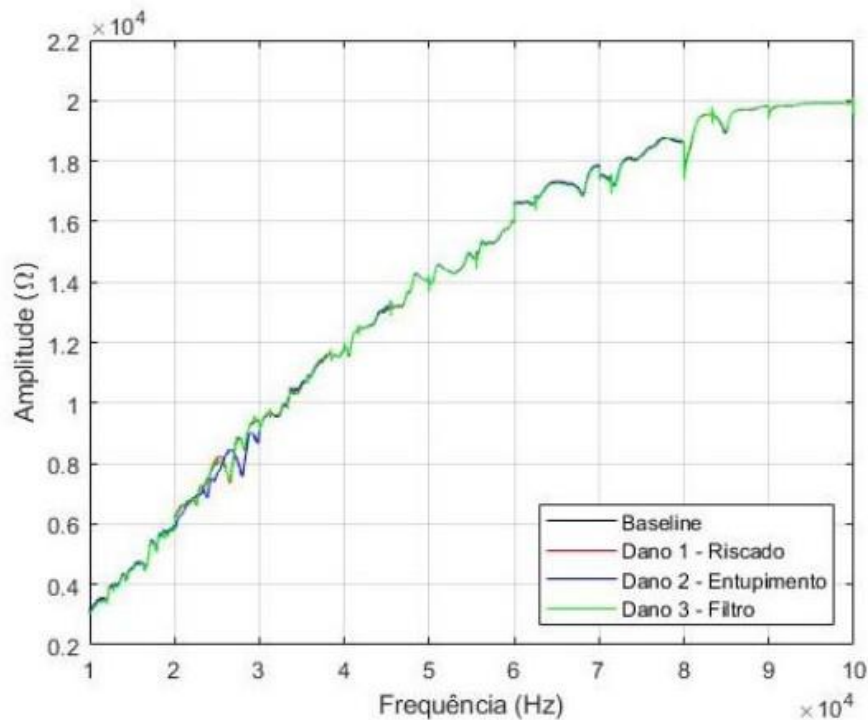


Figura 10. Medição dos sinais de impedância eletromecânica da tubulação sem falha e com as três falhas.

Para a otimização pelo algoritmo Busca Cuco foram realizadas variações no número de ninhos (5, 25, 50 e 100) e na quantidade de iterações (10, 50 e 100) para verificar a eficácia do algoritmo em encontrar a faixa com a maior divergência entre os sinais. Foram realizadas 9 simulações para cada uma das cinco diferentes iterações utilizadas. Iniciando com uma população de 5 ninhos e 10 iterações, pode-se observar que o resultado não é preciso, apresentando variação do ponto ótimo nas 09 posições diferentes.

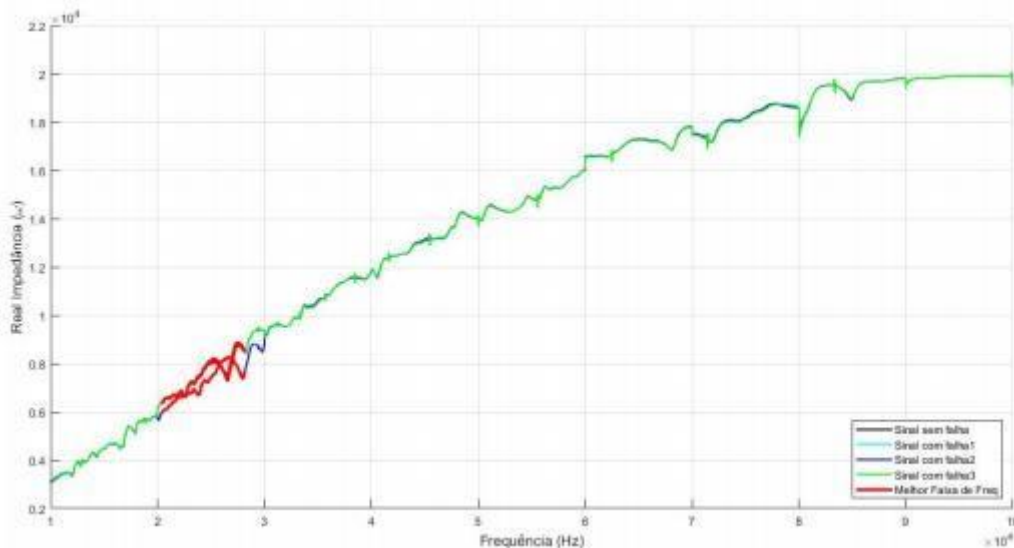
Com a população de 25 ninhos e 50 iterações, é possível observar que o resultado já apresenta significativas melhoras se comparado com o resultado anterior, apresentando seis posições diferentes do ponto ótimo. Já com a população de 50 ninhos e 50 iterações, observa-se que o resultado foi o mesmo, apresentado ponto ótimo sempre na posição 0.1433. E os resultados apresentados para a população de 50 ninhos e 100 iterações e para a população de 100 ninhos e 100 iterações, também foi o mesmo, ou seja, o ponto ótimo sempre na posição 0.1433.

Tabela 1. Simulações realizadas com o CS para comparação do ponto ótimo

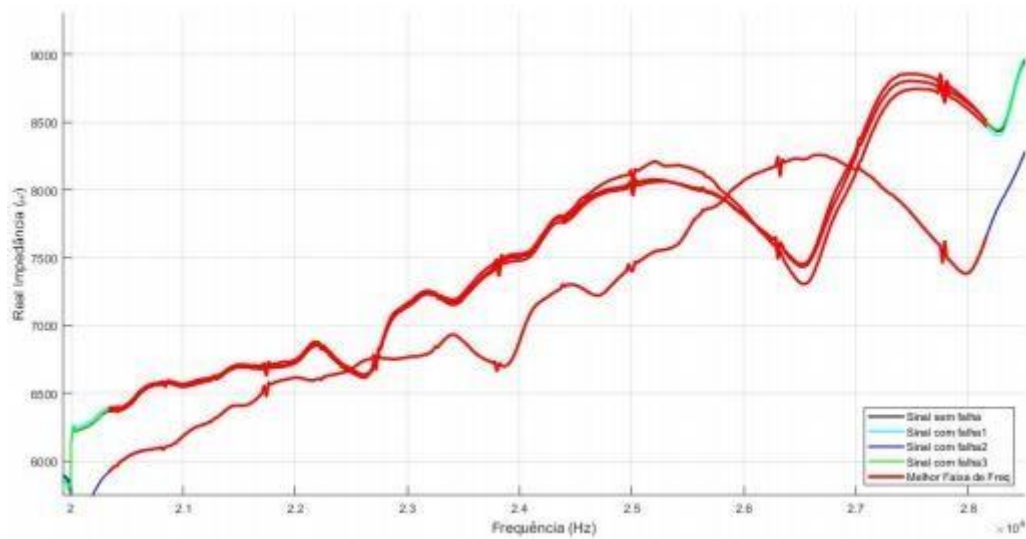
Simul	1	2	3	4	5	6	7	8	9
5-10	0.1729	0.1263	0.1682	0.1706	0.1528	0.1609	0	0.1641	0.1451
25-50	0.1434	0.1433	0.1432	0.1432	0.1433	0.1434	0.1427	0.1428	0.1433
50-50	0.1434	0.1433	0.1432	0.1427	0.1428	0.1432	0.1433	0.1433	0.1434
50-100	0.1433	0.1433	0.1433	0.1433	0.1433	0.1433	0.1433	0.1433	0.1433
100-100	0.1433	0.1433	0.1433	0.1433	0.1433	0.1433	0.1433	0.1433	0.1433

De acordo com a Tabela 1 é possível afirmar que há uma significativa melhora nos resultados quando a quantidade da população de ninhos é ampliada de 5 para 25. E utilizando a população de 50 e 100 ninhos os resultados são sempre os mesmos, ponto ótimo sempre na posição 0.1433 com a faixa de frequência de maior divergência entre os sinais compreendida entre 20333 28161Hz.

Para uma melhor visualização a Figura 11 apresenta a faixa otimizada (em destaque pelas linhas contínuas em vermelho) pelo Algoritmo Busca Cuco no sinal da impedância obtido pelo experimento. Onde na Figura 11 a) tem-se o sinal completo e na Figura 11 b) a região de maior divergência



a)



b)

Figura 11. Medição dos sinais de impedância, apresentando a faixa com maior divergência dos sinais.

4. DISCUSSÃO

Com base na Figura 11, observa-se a possibilidade do uso da otimização de faixa de frequência pela aplicação do Busca Cuco, como método para encontrar a faixa de maior divergência entre os sinais de impedância sem e com o dano, auxiliando na identificação de falhas na estrutura e seu posterior monitoramento.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foram mostrados os conceitos básicos referentes ao monitoramento da integridade estrutural baseado em impedância eletromecânica e a otimização pelo algoritmo Busca Cuco. Na parte de SHM, percebe-se que é um tema estudado a décadas e existe um constante aprimoramento das técnicas.

Existem inúmeros métodos para realizar o SHM, mas o foco desta monografia foi a utilização da técnica não-destrutiva de impedância. A otimização neste trabalho foi utilizada para fornecer a região no domínio da frequência mais sensível às mudanças impostas ao sistema, onde possui maior diferença entre os sinais de impedância eletromecânica sem danos e com dano.

O estudo de caso teve como finalidade simular um cenário real de uma indústria qualquer, onde a tubulação em constante funcionamento possui quatro estados. O primeiro

modo é de funcionamento íntegro e os três estados restantes são situações diferentes de falha. O primeiro estado de falha compreende a simulação de desgastes na estrutura interna do cano, que podem ser causadas por algum dos tipos de corrosão.

O segundo estado de falha simula o entupimento parcial da tubulação, onde dificulta a passagem de água e pode levar a rompimento de tubos. E o terceiro estado de falha compreende ao acoplamento de um filtro na junção dos tubos, simulando a ocorrência de incrustações no interior do tubo, dificultando a passagem do fluxo de água. A captação dos sinais de impedância eletromecânica destes estados foi feita utilizando a placa de aquisição de baixo custo.

Observa-se que a parte real dos sinais de impedância fornecem dados relevantes quanto a saúde da estrutura, e com a contribuição do método de otimização bioinspirado foi possível reduzir a região no domínio da frequência mais sensível as mudanças impostas ao sistema (maior diferença entre os sinais).

REFERÊNCIAS

- BACANIN, N. **Implementation and performance of an object-oriented software system for cuckoo search algorithm.** International Journal of Mathematics and Computers in Simulation, v. 6, n. 1, p. 185–193, 2012.
- BAPTISTA, F. G. et al. **Uma contribuição aos sistemas de monitoramento de integridade estrutural baseados na impedância eletromecânica.** Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2010.
- CASTRO, L. N. D.; ZUBEN, F. J. V. **Recent developments in biologically inspired computing.** [S.l.]: Igi Global, 2005.
- CAWLEY, P. **The impedance method of non-destructive inspection.** NDT international, Elsevier, v. 17, n. 2, p. 59–65, 1984.
- CIANG, C. C.; LEE, J.-R.; BANG, H.-J. **Structural health monitoring for a wind turbine system: a review of damage detection methods.** Measurement science and technology, IOP publishing, v. 19, n. 12, p. 122001, 2008.
- DU, G. et al. **An experimental feasibility study of pipeline corrosion pit detection using a piezoceramic time reversal mirror.** Smart Materials and Structures, IOP Publishing, v. 25, n. 3, p. 037002, 2016.
- FARRAR, C. **Damage prognosis team from weapon response group. Los Alamos National Laboratory, “An Introduction to Damage Prognosis”,** Pan American Advanced Study Institute on Damage Prognosis, Florianopolis, SC, Brasil, 2003.

GOMES, E. **Investigation of elevated temperature effects on multiple layer piezoelectric ultrasonic transducers with adhesive bondlines by self-heating in: Piezoelectric ceramics.** Annals of Discrete Mathematics, 2004.

GLOVER, F. W.; KOCHENBERGER, G. A. **Handbook of metaheuristics.** [S.l.]: Springer Science & Business Media, v. 57, 2006.

HALL, S. **The effective management and use of structural health data.** In: Proceedings of the 2nd International Workshop on Structural Health Monitoring, p. 265–275, 1999.

KOLBADINEJAD, M. et al. **An equivalent electrical circuit design for pipeline corrosion monitoring based on piezoelectric elements.** Journal of Mechanical Science and Technology, Springer, v. 27, n. 3, p. 799–804, 2013.

MAIO, C. E. B. **Técnicas para monitoramento de integridade estrutural usando sensores e atuadores piezoelétricos.** Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2011.

MOURA Jr. J. DOS REIS VIEIRA DE et al. **Uma contribuição aos sistemas de monitoramento de integridade estrutural aplicada a estruturas aeronáuticas e espaciais.** Universidade Federal de Uberlândia, 2008.

MOURA Jr., J. DOS REIS VIEIRA DE; STEFFEN Jr., V. **Impedance-based health monitoring: frequency band evaluation.** In: Proceedings of the 22nd International Modal Analysis Conference (IMAC XXII), Detroit, Michigan, USA, 2004.

PARK, G.; INMAN, D. J. **Impedance-based structural health monitoring. Damage Prognosis for Aerospace, Civil and Mechanical System,** Wiley Online Library, 2005.

PAYNE, R. B.; SORENSEN, M. D. **The cuckoos.** [S.l.]: Oxford University Press, v. 15, 2005.

RAJU, V. **Implementing impedance-based health monitoring.** Tese (Doutorado) — Virginia Tech, 1997.

RAO, SINGIRESU S. **Vibrações Mecânicas.** 1. ed. São Paulo, SP: Pearson Prentice Hall, p 424, 2008.

STASZEWSKI, W.; LEE, B.; TRAYNOR, R. **Fatigue crack detection in metallic structures with lamb waves and 3d laser vibrometry.** Measurement Science and Technology, IOP Publishing, v. 18, n. 3, p. 727, 2007.

WU, Z.; COCHRAN, S.; WU, B. **Investigation of elevated temperature effects on multiple layer piezoelectric ultrasonic transducers with adhesive bondlines by self-heating. Piezoelectric Ceramics.** India: Sciyo, p. 23–40, 2010.