

Otimização da faixa de frequência no estudo da integridade de estruturas utilizando os métodos de busca aleatória e colônia de formigas

João Paulo Moreira Bento¹
Bruno Pereira Barella²

Romes Antônio Borges³
José dos Reis Vieira de
Moura Júnior⁴

Resumo: As técnicas de monitoramento da integridade estrutural nas últimas décadas vêm sendo foco de muitas pesquisas, e o método de impedância eletromecânica é uma das tecnologias utilizadas para realizar o monitoramento de estruturas. A partir deste procedimento são fornecidos dados onde pode-se comparar o componente defeituoso e o não defeituoso. O objetivo deste trabalho é encontrar o melhor intervalo de frequência o qual é possível identificar a falha. Para tanto, os métodos de otimização de busca aleatória e algoritmo de colônia de formigas foram implementados para avaliar a função objetivo métrica de dano a cada intervalo e fornecer informações sobre maior ou menor divergência de características estruturais do componente em estudo. Por fim, os resultados obtidos nos mostram que ambos os métodos de otimização utilizados

-
- 1 Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, aluno de mestrado em Modelagem e Otimização da Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia. Contato: joaopaulo.moreira.bento@gmail.com. Bolsista de mestrado CAPES.
 - 2 Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, aluno PIVIC do curso de Matemática Industrial. Contato: brunobarella@hotmail.com.
 - 3 Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, professor da Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia. Contato: romes@ufg.br.
 - 4 Universidade Federal de Goiás – UFG. Regional Catalão, professor da Unidade Acadêmica Especial de Matemática e Tecnologia. Contato: zereis@ufg.br.

convergem para faixa de maior diferença entre os sinais do componente com falha e sem falha.

Palavras-chave: Falha estrutural, Integridade estrutural baseado em impedância, Otimização numérica.

Introdução

O Monitoramento da Integridade Estrutural ou mais conhecido como *SHM* do inglês – Structural Health Monitoring – é uma tecnologia que lida com o desenvolvimento e implementação de técnicas de detecção, inspeção e monitoramento de danos em estruturas. Esta tecnologia vem sendo utilizada principalmente nas áreas da engenharia aeronáutica, civil e mecânica (MOURA JUNIOR, 2008). Existem variados procedimentos para realizar o monitoramento da integridade estrutural atualmente, neste trabalho o processo que será abordado é o do método de impedância eletromecânica.

O *SHM* utilizando a técnica da Impedância Eletromecânica é baseado na excitação de altas frequências na estrutura através de um sensor/atuador, pois são nas altas frequências que existe a possibilidade de se encontrar danos de pequenas intensidades, como trincas, furos, entre outros, na estrutura analisada (AFSHARI, 2012). Este é um método de análise da integridade estrutural que está classificado como sendo não destrutivo, pois ele não afeta as características mecânicas da estrutura após serem concluídos os ensaios, segundo Bray e McBride (1992) e Palomino (2008).

O funcionamento deste método é simples. Sobre a estrutura em estudo é colada um sensor/atuador *PZT* (Titanato-Zirconato de Chumbo). Este *PZT* é excitado em alta frequência e sofre uma deformação. Essa deformação causa uma excitação (vibração) na estrutura. É realizada então a medição da impedância (resistência da estrutura) através do *PZT*. Ela possui duas parcelas, a parte imaginária (representa alterações capacitivas do *PZT*) e a parte real (representa a resistência mecânica da estrutura quanto a vibração induzida pelo *PZT*). Quando houver uma mudança de rigidez ou da massa da estrutura (falha), os picos do sinal da impedância serão alterados (MOURA JUNIOR, 2008).

Utilizando de métodos de otimização busca-se encontrar o intervalo de frequência com a maior diferença entre dois sinais obtidos pelo método da impedância, os quais indicam que podem existir danos estruturais no objeto de estudo, tais como trincas, furos ou corrosões. A otimização de acordo com Vanderplaats (1999), tem o propósito de analisar determinado problema e encontrar os melhores valores para as variáveis de projeto. Desta forma algumas técnicas podem ser usadas ou implementadas para atingir o propósito: maximizar ou minimizar um índice de desempenho ou uma dada função objetivo.

Para realizar esta análise, adotou-se o método de otimização de busca aleatória por se tratar de um método simples e eficaz, que procura aleatoriamente a melhor faixa de frequência onde há a maior divergência dos sinais. E também o método de colônia de formigas, que é um método bioinspirado no comportamento de formigas que deixam rastros de feromônios para que os próximos passos a serem analisados, se acumulem nas proximidades do possível intervalo ótimo.

Este trabalho está estruturado como segue. Na Seção 1 é apresentada a formulação matemática e a resolução do problema de otimização utilizando os algoritmos de busca aleatória e ACF. Na seção 2 é abordado o procedimento experimental utilizado para obter os sinais da viga com e sem falha através do método de impedância eletromecânica. Na seção 3 são apresentados e discutidos os resultados obtidos. E ao final do trabalho são apresentadas as conclusões obtidas.

1 Desenvolvimento

Este trabalho tem como principal foco obter a melhor faixa de frequência para o estudo de danos estruturais a partir de sinais obtidos pelo método de impedância eletromecânica. Para realizar a otimização a função objetivo utilizada para ambos os métodos será a métrica de danos.

1.1 Função objetivo – métrica de danos

De acordo com Palomino (2008), as métricas de danos são técnicas estatísticas que podem ser utilizadas para avaliar melhor a medida realizada pelo método da impedância eletromecânica. Para que este método seja capaz de mensurar as variações entre os sinais, deve-se realizar medidas que correspondam a um sinal de referência, ou seja a estrutura sem danos. Desta maneira as comparações entre o sinal da estrutura sem danos e com danos podem ser mensuradas.

Segundo Bitencourt e Steffen Júnior (2010) os gráficos apresentados pelos sinais medidos através do método da impedância eletromecânica, nos permitem apenas avaliar qualitativamente se a estrutura possui alguma falha ou não, entende-se então que o principal propósito da métrica de dano neste problema é poder avaliar de forma quantitativa a diferença entre as medições realizadas pelo método da impedância quando uma estrutura está sem danos e quando ela tem algum tipo de dano.

A métrica de dano que foi utilizada neste trabalho foi inicialmente apresentada por Sun *et al.* (1995) e é descrita como sendo o “desvio médio da raiz quadrada (RMSD)”, ela é indicada na Equação 1.

$$M = \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{(Re(z_{i1}) - Re(z_{i2}))^2}{(Re(z_{i1}))^2}} \quad (1)$$

Da equação 1, temos que M representa a métrica de dano calculada, $Z_{i,1}$ representa o sinal medido da estrutura sem danos e $Z_{i,2}$ representa o sinal medido da estrutura com danos no intervalo de frequência i , e n representa a quantidade de frequências avaliadas no intervalo definido (BITTENCOURT; STEFFEN JUNIOR, 2010). Quanto maior o valor apresentado por M , maior é a diferença entre os sinais da estrutura com e sem falha.

1.2 Restrições do problema

Para este trabalho, as duas restrições para a avaliação da melhor faixa de frequência para estudo serão:

- A quantidade de pontos do sinal obtido. A placa que adquire os sinais de impedância nos fornece 501 pontos para avaliar a estrutura entre a faixa de frequência de 25Khz e 40Khz.
- O range para encontrar a melhor faixa de frequência para estudo. Foi determinado que para este trabalho será usada uma variação entre ± 10 e ± 20 do ponto ótimo escolhido, ou seja, a melhor faixa de frequência para análise poderá variar entre 21 e 41 pontos.

1.3 Método da busca aleatória

Os métodos de ordem zero geralmente são confiáveis e fáceis de programar, são bem eficazes quando trabalham com funções não convexas e descontínuas e em muitos casos podem trabalhar com valores discretos nas variáveis de projeto. O preço pago por esta generalidade é que os métodos de ordem zero geralmente necessitam que a função seja avaliada milhares de vezes para encontrar o ponto ótimo, mesmo o problema sendo muito simples. O método escolhido para se trabalhar neste problema foi o método da busca aleatória. De acordo com Vanderplaats (1999) este método é considerado o método de ordem zero mais simples de ser implementado e por isso ele é tão utilizado.

O método da busca aleatória utilizada neste trabalho consiste em selecionar um ponto aleatoriamente dentro de uma região delimitada e fazer a comparação com o seu vizinho, se o vizinho escolhido não for melhor, é realizada uma nova busca, este processo se repete até o número fixado de iterações ocorrer. Pode acontecer de a solução final apresenta não ser a solução global do problema, mas apenas uma solução local (SOUZA, 2003). Deve-se deixar claro que para encontrar a melhor faixa de frequência serão utilizadas as posições (variáveis inteiras) que a mesma possui dentro do vetor sinal obtido pelo experimento, ou seja, como dado de entrada do algoritmo é fornecida uma posição aleatoriamente dentro do espaço determinado (cada posição possui um valor associado) são realizados os

cálculos utilizando a métrica de danos e o dado de saída é também uma posição dentro do espaço determinado.

1.4 Algoritmo de colônia de formigas

O algoritmo de colônia de formiga (ACF), que é mais conhecido por sua sigla em inglês ACO (Ant Colony Optimization) foi idealizado por Marco Dorigo e seus colegas no início da década de 90, como sendo um novo modelo de método metaheurístico inspirado na natureza (DORIGO *et al.*, 1991).

De acordo com Bonabeau *et al.* (1999), os insetos que vivem em colônias são extremamente organizados e disciplinados em relação as suas atividades coletivas, como por exemplo a busca pela comida. E o algoritmo de colônia de formigas é baseado nesta busca que as formigas realizam atrás de alimento.

Dorigo *et al.* (1991), baseou-se no brilhante experimento realizado por Deneubourg *et al.* (1990) para desenvolver o ACF. O experimento que consistia basicamente em uma ponte dupla onde uma colônia de formigas da espécie *I. humilis* era ligada a uma fonte de alimentos. Observou-se que inicialmente as formigas escolhiam o caminho a ser percorrido aleatoriamente. Após ter encontrado o alimento, elas voltavam ao ninho, e no percurso de volta eram deixadas trilhas de feromônio. Após um certo período as formigas deixavam de percorrer o caminho aleatoriamente e se organizavam e seguiam o fluxo deixado pelos seus próprios rastros de feromônio, que era também o menor caminho a ser percorrido.

Para o ACF utilizou-se da mesma concepção empregada ao método da busca aleatória, onde que para obter a melhor faixa de frequência serão utilizadas as posições (cada posição possui um valor associado) dentro do espaço determinado como dados de entrada e saída.

A Figura 24.1 ilustra o comportamento das formigas no final deste experimento.

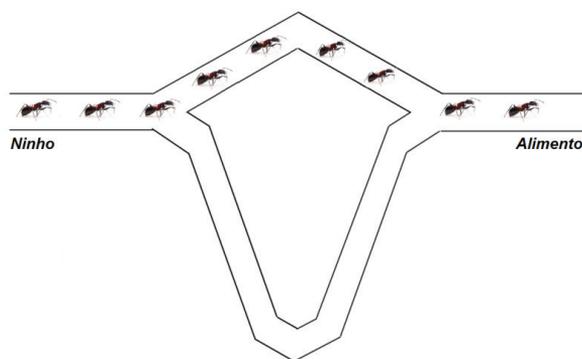


Figura 24.1 Comportamento das formigas no experimento da ponte dupla.

Fonte: Adaptado de Dorigo e Stützle (2004)

2 Procedimentos utilizados

O experimento consiste em realizar a medição dos sinais de impedância em uma viga em diferentes condições, para então poder realizar a implementação dos algoritmos propostos e fornecer no final a melhor faixa de estudo para análise.

O monitoramento do sinal de impedância eletromecânica da viga é feito através da placa EVAL-AD5933EBZ, que é apresentada na Figura 24.2.

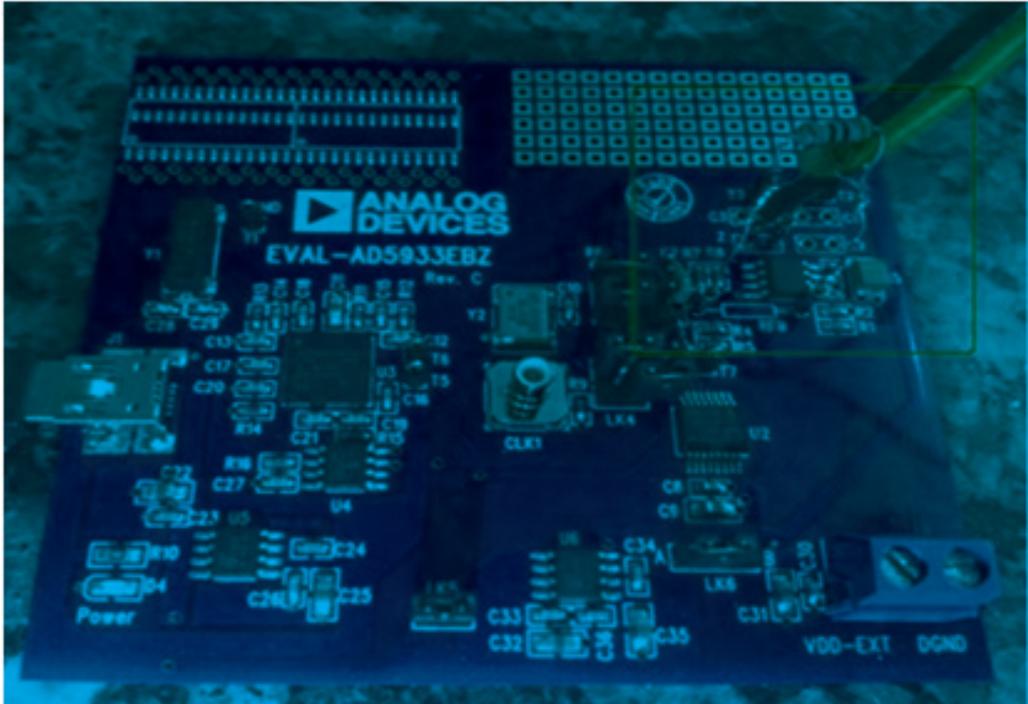


Figura 24.2 Placa utilizada para realizar a leitura dos sinais.

Fonte: Elaborado pelos autores

Para o experimento, foi utilizada uma viga dobrada com dimensões de $150 \times 25 \times 3 \text{ mm}$ e a extremidade dobrada tem 35 mm de comprimento. A Figura 24.3.a apresenta a viga na condição sem danos, e a Figura 24.3.b apresenta a mesma viga na condição com dano (o parafuso simula um dano físico na viga, ele é preso com porca e arruelas na ponta da viga). Na Figura 24.3 também é possível observar o sensor/atuador Piezoelétrico na viga, o modelo utilizado neste experimento é o do tipo Titanato-Zirconato de Chumbo (PZT) com dimensões de $73 \times 25 \text{ mm}$.



Figura 24.3.a Placa sem parafuso (placa em perfeito estado).



Figura 24.3.b Placa com parafuso (simulando a falha).

Fonte: Elaborado pelos autores

A faixa de frequência utilizada neste experimento foi de 25–40KHz com um passo de 30Hz, totalizando 501 pontos para análise. 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 neste sinal. A Figura 24.4 apresenta o sinal plotado das duas vigas em questão.

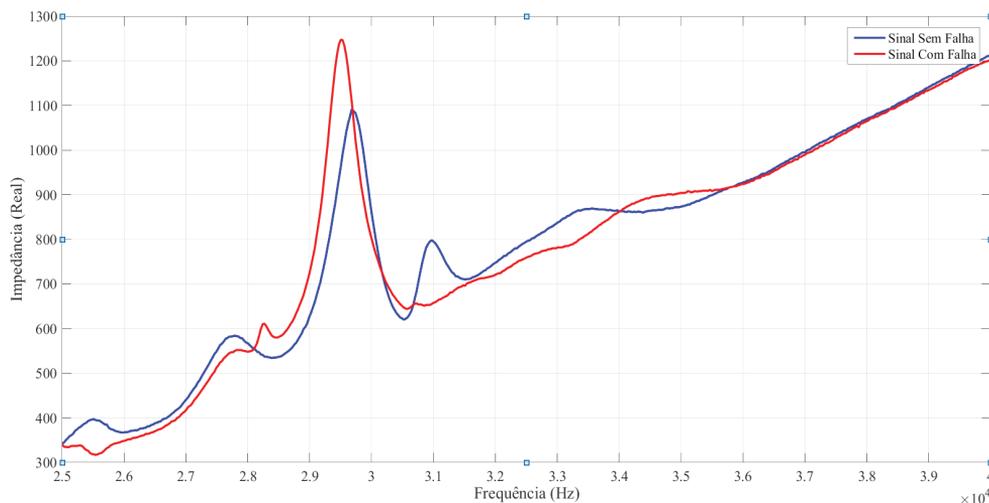


Figura 24.4 Sinal da parte real da impedância obtido pelo experimento.

Fonte: Elaborado pelos autores

3 Discussão e resultados

Utilizando o método da busca aleatória optou-se por realizar 5000 iterações para que o resultado pudesse se estabilizar no ponto de máxima diferença entre os sinais. Com este método, após serem realizadas 20 simulações, conclui-se que o melhor ponto está na posição 135 que corresponde a frequência de 29020Hz. A melhor faixa de frequência por este método foi compreendida entre 28420-29620Hz. A Tabela 24.1 apresenta os resultados para a melhor posição em cada uma das 20 simulações realizadas pelo método de busca aleatória.

Tabela 24.1 Tabela de simulação (método de busca aleatória).

<i>Simulação</i>	<i>Melhor Posição</i>
1	134
2	135
3	135
4	134
5	135
6	134
7	135
8	135
9	134
10	135
11	135
12	136
13	134
14	135
15	133
16	135
17	135
18	135
19	135
20	136
<i>Média</i>	<i>135</i>

(Fonte: Elaborado pelos autores)

A Figura 24.5.a apresenta a faixa otimizada pelo método da busca aleatória no sinal da impedância obtido pelo experimento, e a Figura 24.5.b apresenta esta faixa isolada.

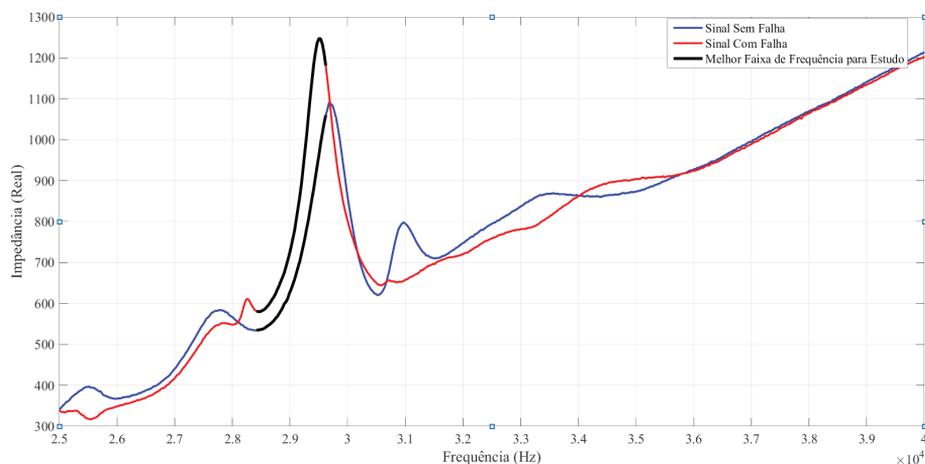


Figura 24.5.a Faixa ótima utilizando o método da busca aleatória.

Fonte: Elaborado pelos autores

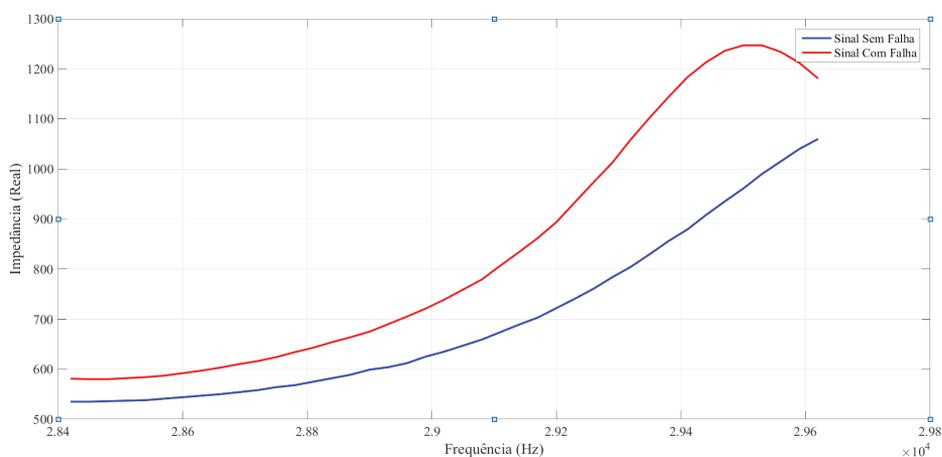


Figura 24.5.b Faixa ótima utilizando o método da busca aleatória.

Fonte: Elaborado pelos autores

Utilizando o ACF (algoritmo de colônia de formigas) foram produzidas 20 simulações e em cada simulação foram realizadas 100 iterações. O resultado obtido em todas as simulações foi de que o melhor ponto está localizado na posi-

ção 135 que corresponde a frequência de 29020Hz, e a melhor faixa de frequência otimizada por este método foi compreendida entre 28420-29620Hz. A Tabela 24.2 apresenta os resultados para a melhor posição em cada uma das 20 simulações pelo método do ACF.

Tabela 24.2 Tabela de simulação (ACF).

<i>Simulação</i>	<i>Melhor Posição</i>
1	135
2	135
3	135
4	135
5	135
6	135
7	135
8	135
9	135
10	135
11	135
12	135
13	135
14	135
15	135
16	135
17	135
18	135
19	135
20	135
<i>Média</i>	<i>135</i>

(Fonte: Elaborado pelos autores)

A Figura 24.6.a apresenta a faixa otimizada pelo algoritmo da busca aleatória no sinal da impedância obtido pelo experimento, e a Figura 24.6.b apresenta esta faixa isolada.

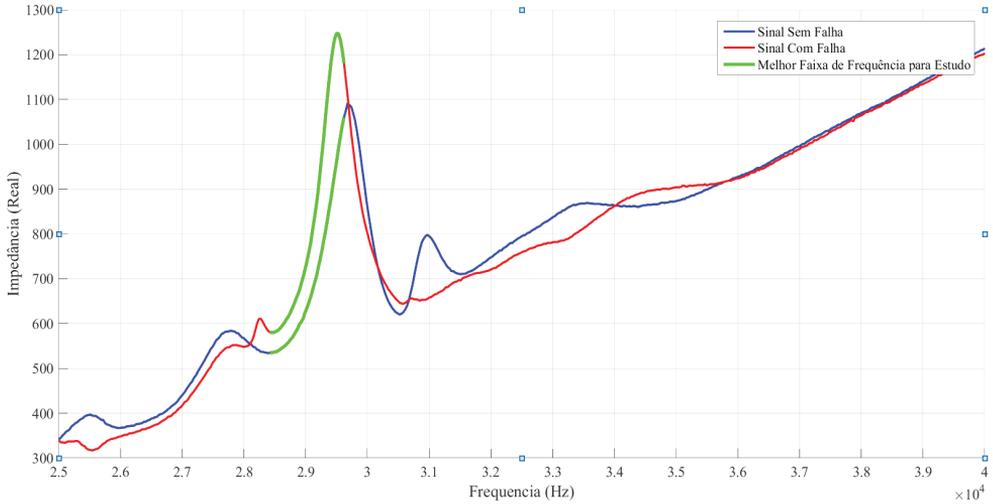


Figura 24.6.a Faixa ótima utilizando o ACF.

Fonte: Elaborado pelos autores

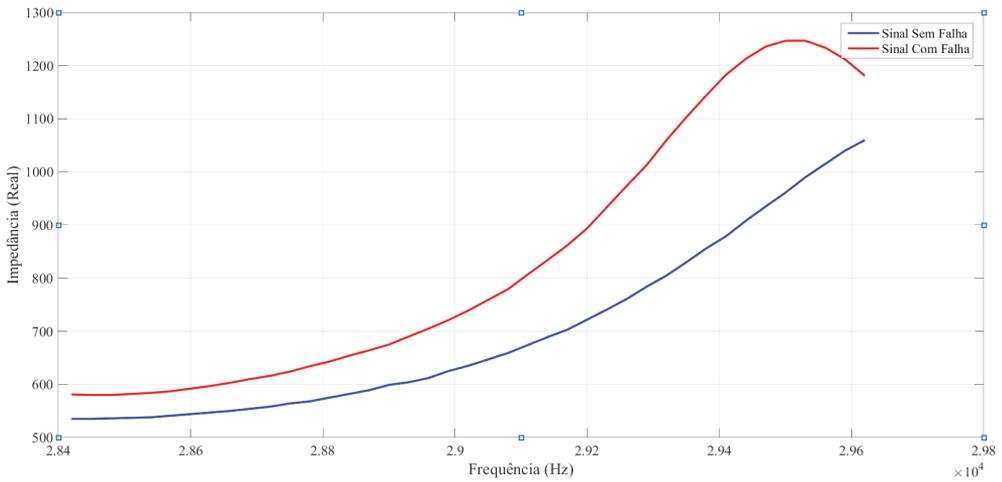


Figura 24.6.b Faixa ótima utilizando o ACF.

Fonte: Elaborado pelos autores

A Figura 24.7 apresenta o sinal obtido pelo experimento (em azul o sinal sem falha e em vermelho o sinal com falha), e a faixa ótima para estudo pelos dois métodos de otimização (em cor verde a melhor faixa de frequência utilizando o método do ACF e em preto tracejado a melhor faixa de frequência utilizando o método de

busca aleatória). Observa-se que ambos os métodos de otimização convergiram para o mesmo resultado, e por isto estão sobrepostos no gráfico abaixo.

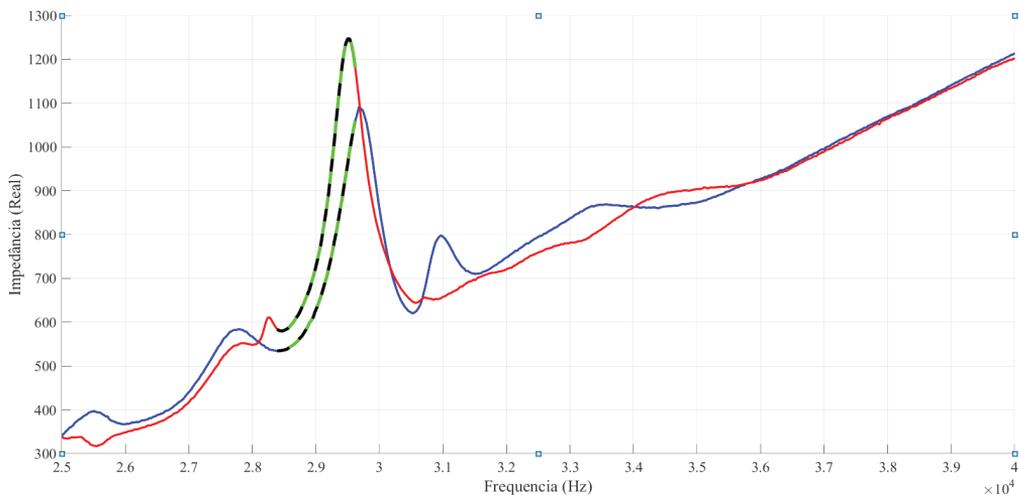


Figura 24.7 Melhor faixa de frequência otimizada pelos métodos da busca aleatória e ACF.

Fonte: Elaborado pelos autores

Conclusão

Este trabalho apresentou duas formas alternativas de identificar a melhor faixa de frequência de sinais obtidos através do método da impedância eletromecânica, utilizando métodos de otimização. Ao trabalhar com toda a faixa de frequência medida pelo experimento pode-se encobrir a diferença entre os sinais que apresenta a falha. Deve-se então utilizar a métrica de danos como função objetivo para encontrar a faixa de frequência onde está a maior diferença entre os sinais das estruturas com e sem falha, reduzindo assim a quantidade de pontos a serem analisados e tornando a faixa mais sensível.

Utilizando o método da busca aleatória, mesmo com as 5000 iterações, verificou-se que o ponto ótimo variava entre as posições 133, 134, 135 e 136. Já o algoritmo de colônia de formigas utilizou apenas 100 iterações, alcançando o ponto 135. Apesar desta pequena divergência entre os pontos ótimos, pode-se concluir que ambos os métodos convergiram para a mesma faixa de frequência.

Ao utilizar o algoritmo de busca aleatória pode-se concluir que ele é um algoritmo mais simplificado, de fácil implementação e são necessárias muitas iterações para poder chegar ao ponto ótimo da função. Já o ACF é um código mais sofisticado e de maior complexidade para ser implementado, mas em contrapartida são necessárias poucas iterações para chegar ao ponto ótimo da função.

Referências

- AFSHARI, M. **Vibration- and Impedance-based Structural Health Monitoring Applications and Thermal Effects**. 144 f. Tese (Doutorado) – Curso de Mechanical Engineering, Virginia Polytechnic Institute, Blacksburg, 2012.
- Bitencourt, T. F.; Steffen Júnior, V. **Monitoramento da integridade estrutural de aeronave**. Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de engenharia mecânica. 2010.
- BONABEAU, E.; DORIGO, M.; THERAULAZ, G. **Swarm Intelligence From Natural to Artificial Systems**. Oxford University Press, New York, 1999.
- Bray, D. E.; McBRIDE, D. **Non-destructive Testing Techniques**. N.Y.: AWiley-Interscience Publications, 1992.
- Deneubourg, J. L.; Aron, S.; Goss, S.; Pasteels, J. M. **The self-organizing exploratory pattern of the argentine ant**. vol. 3, pp. 159–168. 1990.
- Dorigo, M.; Maniezzo, V.; Colorni, A. **Positive Feedback as a Search Strategy**. 1991.
- DORIGO, M.; Stützle, T. **Ant Colony Optimization**. Massachusetts Institute of Technology. Cambridge, 2004.
- MOURA JÚNIOR, J. R. V. **Uma contribuição aos sistemas de monitoramento de integridade estrutural aplicada a estruturas aeronáuticas e espaciais**. 268 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.
- PALOMINO, L. V. **Análise das métricas de dano associadas à técnica da impedância eletromecânica para o monitoramento de integridade estrutural**. 117 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.
- SOUZA, M. J. F. **Inteligência Computacional para Otimização**. Notas de aula. Departamento de Computação. Universidade Federal de Ouro Preto. 2003.
- Sun, F.P.; ChaudHry, Z.; Liang, C.; Rogers, C.A. **Truss Structure Integrity Identification Using PZT Sensor-Actuator**. Vol. 6. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**: 1995.

VANDERPLAATS, G. N. **Numeric Optimization Techniques for Engineering Design**. 3^a ed. Vanderplaats Research & Development: 1999.