

CONFIGURAÇÃO ÓTIMA DE SENSORES EM PÁS DE HELICÓPTERO: UMA ABORDAGEM MULTIOBJETIVO COM RECONSTRUÇÃO DE MODO DE VIBRAÇÃO PELA KRIGAGEM

Felipe Martarella de Souza Mello¹ (IC), Guilherme Ferreira Gomes (PQ)¹

¹Universidade Federal de Itajubá – Campus Itajubá.

Palavras-chave: Otimização do Posicionamento de Sensores; Otimização multiobjetivo; Vibrações mecânicas; Análise modal experimental; Krigagem

Introdução

O Monitoramento da Integridade Estrutural (*Structural Health Monitoring – SHM*) desempenha um papel fundamental na redução de custos e aumento da confiabilidade em estruturas mecânicas, principalmente em estruturas de grande porte, a partir da coleta de dados durante a operação. Os sistemas de SHM não se limitam apenas na avaliação estrutural não destrutiva, abrange todas as áreas do conhecimento que torna este monitoramento viável como: integração de sensores; transmissão e análise de dados; capacidade de processamento integrada a estrutura, entre outras (BALAGEAS *et al.*, 2010).

O sensor é um ponto crucial em um sistema SMH, pois é a partir de sensores que se torna possível a coleta de dados de uma estrutura ou equipamento em operação. É neste contexto em que se encontra a Otimização do Posicionamento de Sensores (*Sensor Placement Optimization – SPO*), cujo principal objetivo é determinar o arranjo da rede de sensores para o SMH. No entanto, atingir este objetivo não é trivial, uma vez que os sensores devem atender algumas características como: (1) monitorar apenas a condição real da estrutura hospedeira e ser independente a mudanças do ambiente; (2) transmitir o sinal de forma confiável; (3) determinar a quantidade necessária de sensores a fim de garantir uma boa qualidade na análise dinâmica; (4) determinar o posicionamento de cada sensor; (5) ser capaz de mensurar a performance do conjunto (BARTHORPE *et al.*, 2009)

O SPO é um problema muito comum em diversos ramos da engenharia. Assim, o aprofundamento nos estudos nesta área, desenvolveu diversos métodos tendo uma vasta aplicação em sistemas mecânicos. O principal método usado no estudo do SPO possui como base a informação modal gerada pela resposta em vibração (MORLIER *et al.*, 2018).

Modos de vibração reduzidos (ou interpolados) são aqueles obtidos por meio de um número finito de

sensores. Desde que bem interpolado, o modo reduzido consegue representar fielmente a forma modal no domínio contínuo. Vários métodos de interpolação estão disponíveis e dentre eles o método da krigagem (ou simplesmente *kriging*) tem ganhado bastante atenção.

Neste sentido, destaca-se o trabalho de Morlier *et al.* (2018) que realizou um processo de SPO a partir da metamodelagem da krigagem adaptativa intitulada otimização global eficiente, EGO-SPO. Os resultados demonstram que houve a redução de 30% da quantidade de sensores necessários para a reconstrução dos modos de vibração.

Outras pesquisas recentes sobre o uso da krigagem em sistemas de SHM, pode-se citar o trabalho de Pavlack *et al.* (2022) que investigou o desempenho da uma metodologia orientada para quantificação de danos com base no uso do metamodelo obtido pelo *Chaos-kriging*. Awadallah *et al.* (2020) desenvolveram um modelo de krigagem capaz de prever a localização de trincas, cujo a validação experimental demonstrou 95% de acurácia.

Este trabalho, consiste em um aprofundamento do estudo desenvolvido por Mello, Pereira e Gomes (2023) propondo uma abordagem inovadora para maximizar a qualidade de dados adquirida pelos sensores, além de determinar a quantidade mínima necessárias de sensores no sistema. Quanto a maximização da qualidade do sinal, considerou as principais métricas do SPO em conjunto com a reconstrução dos modos de vibração a partir do método da krigagem ordinária. O processo de SPO foi conduzido pelo Algoritmo Multiobjetivo de Lichtenberg (MOLA) e a estrutura de estudo foi a pá do rotor principal da aeronave AS-350. A fim de validar a metodologia proposta, foi realizado o ensaio de vibração livre.

Metodologia

O método da Krigagem é um processo de interpolação que correlaciona os valores em um espaço por meio de um conjunto de amostras, neste contexto, a Krigagem pode ser utilizada na reconstrução dos modos de vibração

(MORLIER *et al.*, 2018) e (CHANG; PAKZAD, 2014). Desta forma, o kriging foi utilizado para reconstruir os modos de vibração da estrutura de estudo, além de constituir uma das funções objetivo do algoritmo de otimização.

No presente trabalho, o objeto de estudo para a análise de SPO é a pá do rotor principal do helicóptero AS HB-350, na qual foi implementada o método de SPO e posteriormente o ensaio de vibração livre para validar os resultados numéricos.

Pereira *et al.* (2022a) em seu trabalho elaborou o modelo numérico da pá do helicóptero a partir da modelagem inversa, sendo o modelo numérico utilizado para o desenvolvimento do presente trabalho. A pá possui um comprimento total de 4665mm, onde 3890mm corresponde a seção aerodinâmica cujo perfil é o NACA0012 (Figura 1). O modelo numérico (Figura 2) foi desenvolvido no ANSYS APDL e região da seção aerodinâmica foi gerada por duas cascas simétricas definidas por elementos do tipo SHELL281 e então efetuou-se a análise modal para os dose primeiros modos de vibração.



Figura 1 – Pá do rotor principal da Aeronave AS350.



Figura 2 – Modelo numérico.

A Tabela 1 apresenta as propriedades mecânicas resultantes da modelagem inversa.

Tabela 1 – Propriedades mecânicas da pá do rotor.

Propriedades	Pá aeronave AS-350
E_1	135 GPa
E_2	9,0 GPa
G_{12}	7,3 GPa
ν_{12}	0,264
ρ	1491,1 kg/m ³

O algoritmo otimizador responsável pelo processo de SPO é o Multiobjetivo de Lichtenberg, ou MOLA (PEREIRA *et al.*, 2022b) combinado com o *Feature Selection*, que permite variar quantidade de sensores durante a otimização.

O problema de SPO precisa de um grupo de locais candidatos a sensores para que seja possível realizar a otimização. Neste caso, os nós contidos no modelo numérico são considerados pontos candidatos a sensores e é a partir deste nós que se define o campo de busca do algoritmo de otimização. No entanto devido à complexidade da geometria, fez-se necessário adotar

algumas simplificações como: i) os pontos candidatos a sensores estão restringidos a seção aerodinâmica da pá; ii) a otimização ocorre sobre a linha média de arqueamento do perfil, resultando em uma superfície plana com comprimento (envergadura) e largura (corda do perfil); iii) considerar apenas nos nós contidos no extradorso do perfil. A partir destas simplificações definiu-se o campo de busca do MOLA e os limites laterais Equação 1, sendo k os 891 pontos candidatos a sensores.

$$\begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}_{k \times 1} \leq \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_k \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}_{k \times 1} \quad (1)$$

A otimização ocorre frente a três funções objetivos. A primeira fundamenta-se na redução do número de sensores. A segunda, consiste em avaliar a erro da interpolação, que pode ser mensurado pela diferença da norma de Frobenius (GOMES *et al.*, 2019). Por fim, a última função objetivo busca maximizar a qualidade do sinal adquirida pelo sensor, para isso, utilizou-se as principais métricas de SPO, são elas: *The Eigenvector Product* – EVP, *Fisher Information Matrix* – FIM, *Effective Independence* – EI, *Average Driving Point Residue* – ADPR, *Information Entropy* – IE e *Kinetic Energy* – KE.

A Equação 2 condensa os três objetivos da otimização, onde Φ^{MEF} é a matriz do modo de vibração calculado pelo método de elementos finitos e Φ^{kri} corresponde a matriz de interpolação obtida pela krigagem. O índice n, indica o modo de vibração avaliado.

$$\begin{cases} \text{Minimizar } F_2 = N_S \\ \text{Minimizar } F_2 = \sum_{n=1,3,4,5,6} \|\Phi_n^{MEF} - \Phi_n^{int}\|_F(2) \\ \text{Maximizar } F_3 = M_{SPO} \end{cases}$$

Importante ressaltar que para avaliar as seis métricas de SPO abordada neste trabalho, foram efetuadas ao todo seis otimizações. O método a fim de determinar a solução ótima foi o TOPSIS.

Tendo por intuito avaliar experimentalmente a metodologia numérica abordada, realizou-se o ensaio de vibração livre sobre a pá. Para tanto, a pá foi fixa sobre a mesa inercial e mapeou todos os pontos resultantes da solução ótima obtida pelo TOPSIS (Figura 3). O sinal de vibração foi mensurado por um acelerômetro uniaxial em conjunto com o martelo de impacto. A função de resposta em frequência (FRF), foi obtida mantendo o acelerômetro fixo em um ponto e variando o ponto de impacto, respeitando o conjunto solução obtida pela otimização. A partir dos dados do ensaio, pode-se reconstruir os modos

de vibração, além de avaliar o comportamento dinâmico da estrutura. Ademais, os dados coletados foram processados pelo filtro de Savitzky-Goley no intuito de amenizar a influência de ruídos na resposta do sinal.



Figura 3 – Montagem do ensaio de vibração.

Resultados e discussão

Ao todo foram realizados seis processos de otimização distintos variando apenas a terceira função objetivo. A Tabela 2 apresenta a solução ótima avaliada pelo TOPSIS comparando a quantidade de sensores, erro de interpolação e tempo decorrido da otimização. Pode-se observar que a métrica IE apresentou o menor erro de interpolação dentre as demais, no entanto, a métrica EVP apresentou um erro de apenas 1,5% utilizando a metade de sensores, além de menor custo computacional entre todas as métricas.

Tabela 2 – Comparação da solução TOPSIS

Métrica	F_1	F_2 [%]	Δt [h]
EVP	13	1,5	13
FIM	14	2,6	25
EI	15	1,1	27
ADPR	25	2,1	21
IE	26	0,82	23
KE	32	1	14

A Figura 4 ilustra a Frente de Pareto para as métricas EVP (Figura 4-a) e IE (Figura 4-b). Em ambas as frentes de Pareto nota-se o comportamento de *knee-point*, comportamento típico de otimizações onde ocorre saturação em um dos objetivos. Quanto a métrica de SPO o aumento da quantidade de sensores impõe a condição de maior aquisição de sinal, e por consequência, maior o valor calculado pela métrica. No entanto, em uma condição real de aplicação, o conjunto solução com quantidades excessiva de sensores não se torna viável e foge da premissa de minimizar a quantidade de sensores. A Figura 5 contém a interpolação feita pela krigagem para a métrica EVP em cada um dos modos avaliados.

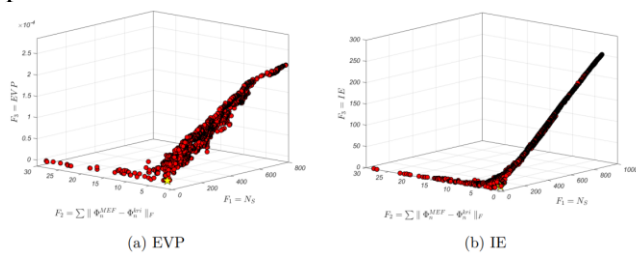


Figura 4 – Frente de Pareto de algumas métricas abordadas nas otimizações.

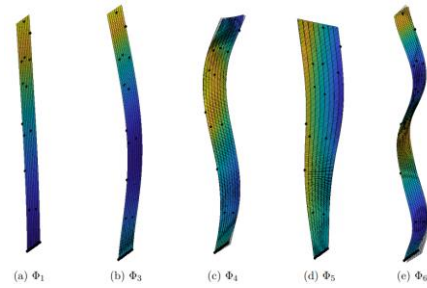


Figura 5 – Reconstrução dos modos numericamente pela métrica EVP.

A partir dos dados obtidos no ensaio de vibrações, plotou-se todas as FRF simultaneamente para então determinar as frequências naturais da pá do rotor. A Figura 6 contém a FRF sem aplicação do Filtro de Savitzky-Goley, enquanto a Figura 7, apresenta a FRF após o tratamento do filtro. Ao analisar com cuidado as FRFs, pode-se observar um elevado nível de ruído para baixas frequências (0 – 15Hz). A Tabela 3 compara os valores das frequências naturais calculadas pelo MEF e pelo ensaio experimental. Pode-se observar que as frequências de ensaio e as numéricas estão bastante próximas, com exceção da terceira. Tais resultados podem ser explicados devido as incertezas de medição e danos estruturais não previsto pelo modelo numérico.

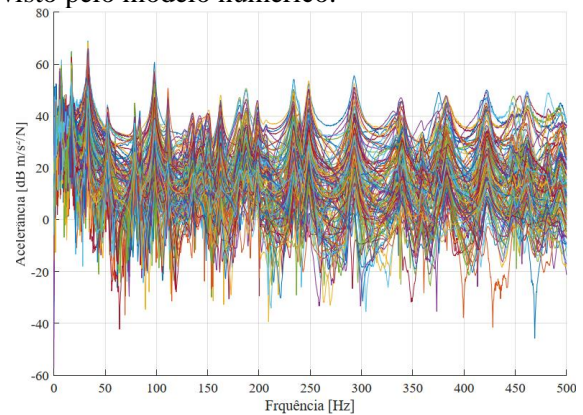


Figura 6 – FRF

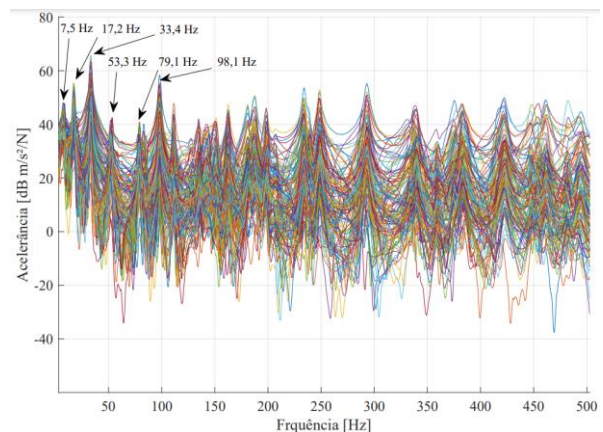


Figura 7 – FRF após aplicação do filtro de Savitzky-Goley.

Tabela 3 – Comparação entre as frequências naturais numérica e experimental.

Dado	ω_1 [Hz]	ω_2 [Hz]	ω_3 [Hz]	ω_4 [Hz]	ω_5 [Hz]	ω_6 [Hz]
Numérico	7,4	20,1	41,6	57,9	78,2	97,4
Ensaio	7,5	17,2	33,4	53,3	79,1	98,1

A partir da parte imaginária da FRF, pode-se reconstruir os modos de vibração. A Figura 7 apresenta a reconstrução dos modos de vibração utilizando a métrica IE e interpolação pela krigagem. Observando a reconstrução destes modos, nota-se que a krigagem teve dificuldade na reconstrução de modos de 7,5Hz, 79,1Hz e 98,1Hz (Figura 8 – a, e e f). Quanto a reconstrução do modo a 7,5Hz pode ser justificada devido a intensidade de ruído durante o ensaio, prejudicando as informações modais coletadas, uma vez que, os resultados obtidos pelas demais métricas também apresentaram reconstruções bastante duvidosas. No entanto, os modos de 79,1Hz e 98,1Hz não apresentam uma carga elevada de ruído, e assim, esperava-se uma reconstrução que melhor representasse o comportamento dinâmico.

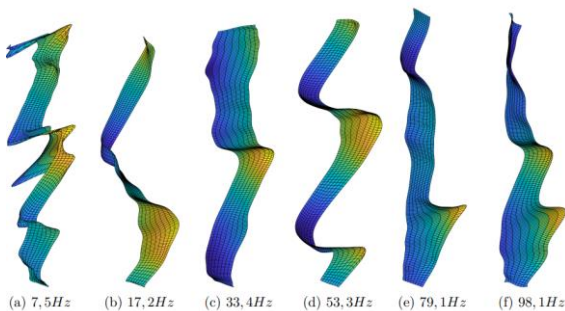


Figura 8 – Reconstrução dos modos a partir de dados experimentais da métrica IE.

Conclusões

O objetivo principal do presente trabalho é validar experimentalmente a metodologia desenvolvida para a Otimização do posicionamento de sensores, assim a partir deste trabalho, destacam-se as seguintes conclusões:

- O estudo numérico mostra que a otimização do posicionamento de sensores a partir do MOLA, indica a complexidade do problema abordado. O resultado numérico da otimização evidencia o comportamento de *knee-point* para todas as métricas consideradas na otimização;
- A solução TOPSIS varia entre 13 a 32 sensores com todas as reconstruções com erro de interpolação inferiores a 3%, mostrando que o processo de SPO aliado ao MOLA é bastante promissor (vide Tabela 2);
- Os resultados experimentais validaram o comportamento dinâmico da estrutura, resultando em valores de frequências naturais

muito próximo a aquelas obtidas pelo MEF (Tabela 3 e Figura 7).

- A reconstrução pelo *kriging* a partir dos dados experimentais enfrentou dificuldades (Figura 8), indicando a sensibilidade excessiva do interpolador a incertezas durante as medições.

Agradecimentos

Agradeço ao Prof. Dr. Guilherme Ferreira gomes pelo apoio, pelos ensinamentos que tornaram possível a realização deste trabalho. Obrigado pelas palavras de incentivo, dedicação e paciência.

A UNIFEI agradeço a oportunidade concedida a mim a fazer parte desta instituição.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro.

Referências

- AWADALLAH, M.; EL-SINAWI, A. Effect and detection of cracks on small wind turbine blade vibration using special kriging analysis of spectral shifts. *Measurement*, Elsevier, v. 151, p. 107076, 2020.
- BALAGEAS, D.; FRITZEN, C.-P.; GÜEMES, A. Structural health monitoring. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2010. v. 90
- BARTHORPE, R. J.; WORDEN, K. Sensor placement optimization. *Encyclopedia of structural health monitoring*, Wiley Online Library, 2009
- CHANG, M.; PAKZAD, S. N. A parameter optimization for mode shapes estimation using kriging interpolation. In: *Special Topics in Structural Dynamics*, Volume 6. [S.l.]: Springer, 2014. p. 287–293
- MORLIER, J. et al. An ego-like optimization framework for sensor placement optimization in modal analysis. *Smart Materials and Structures*, IOP Publishing, v. 27, n. 7, p. 075004, 2018
- PEREIRA, J. L. J. et al. Multi-objective sensor placement optimization of helicopter rotor blade based on feature selection. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Elsevier, v. 180, p. 109466, 2022
- PEREIRA, J. L. J. et al. Multi-objective lichtenberg algorithm: A hybrid physics-based meta-heuristic for solving engineering problems. *Expert Systems with Applications*, Elsevier, v. 187, p. 115939, 2022.
- GOMES, G. F. et al. A multiobjective sensor placement optimization for SHM systems considering fisher information matrix and mode shape interpolation. *Engineering with Computers*, Springer, v. 35, n. 2, p. 519–535, 2019
- PAVLACK, B. et al. Polynomial chaos-kriging metamodel for quantification of the debonding area in large wind turbine blades. *Structural Health Monitoring*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 21, n. 2, p. 666–682, 2022.
- MELLO, F. M. S.; PEREIRA, J. L. J.; GOMES, G. F. Multi-objective sensor placement optimization in SHM systems with kriging-based mode shape interpolation. *Journal of Sound and Vibration*, Elsevier, 2023