

## ANÁLISE ESTRUTURAL MODAL DO HARPIA P71

**Luiz Fernando Pimenta<sup>1</sup>, Renan Pereira<sup>2</sup>, William Mancinis<sup>2</sup>, Álvaro Pivetta<sup>2</sup>,  
Victor Galvão<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Universidade do Vale do Paraíba/Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento, Avenida Shishima Hifumi, 2911, Urbanova - 12244-000 - São José dos Campos-SP, Brasil, lfpimentag@gmail.com.

<sup>2</sup>Psyche Aerospace, Rua Salviano José da Silva, 20, Jardim Vale do Sol - 12238-573- São José dos Campos-SP, Brasil, renan.pereira72@hotmail.com, william.mancinis@gmail.com, alvaro.pivetta@gmail.com, victor.galvao@psycheaerospace.com,

### Resumo

O Harpia P-71 é um drone projetado para realizar pulverizações de forma autônoma, utilizando inteligência artificial. Este artigo apresenta uma análise modal da parte estrutural do chassi e braço do drone Harpia P71, destinado a operações em plantações na região de Campo Verde, Mato Grosso. O estudo foca na identificação e validação das frequências naturais da estrutura, comparando-as com as frequências operacionais durante o voo. A importância desta análise reside na necessidade de garantir que as frequências naturais não coincidam com as operacionais, evitando ressonâncias que poderiam comprometer a integridade estrutural do drone. Os resultados obtidos foram comparados com a faixa de operação do motor elétrico, validando toda a análise modal e também a estrutura criada.

**Palavras-chave:** Drone. Análise modal. Vibração.

**Área do Conhecimento:** Engenharia Mecânica.

### Introdução

Por definição, um drone é qualquer aeronave, ou outro tipo de veículo, que opera com um alto grau de automatização. Em geral, todo drone é um aeromodelo ou uma aeronave não tripulada controlada remotamente (RPA, *Remotely Piloted Aircraft*). (ANAC, 2019)

Entre as décadas de 1970 e 1990, o agronegócio brasileiro recebeu um grande impulso com o avanço da ciência e tecnologia, permitindo o aproveitamento de regiões anteriormente consideradas inadequadas para a agropecuária. O Brasil passou a ser reconhecido como um protagonista que dominou a agricultura tropical, fortalecendo sua competitividade no mercado internacional (FERREIRA et al., 2022).

Segundo Montoya; Finamore, 2020, o sucesso do agronegócio foi tão grande, que o Brasil passou de país importador de produtos agropecuários na década de 1970, para estar no ranking como um dos maiores produtores de alimentos do mundo.

A introdução de drones como o Harpia P71 como alternativas de pulverização nas atividades agrícolas traz consigo desafios técnicos que precisam ser abordados para garantir sua operação segura e eficaz. Um dos principais desafios é relacionado à integridade estrutural do drone durante o voo. A análise estrutural vem como base para validação de uma estrutura. Foi dado um passo à frente com a análise dos modos de vibração dessa estrutura afim de minimizar qualquer tipo de ressonância.

Segundo Inman (2014), a análise modal é uma técnica fundamental para compreender o comportamento dinâmico de estruturas e sistemas. Ela permite a decomposição das respostas complexas de um sistema em seus modos de vibração naturais, facilitando a identificação de frequências naturais críticas e formas modais. Essa abordagem é essencial para prever possíveis problemas de ressonância e otimizar o desempenho estrutural, especialmente em aplicações onde a integridade e a segurança são prioridades.

A realização dessa análise modal é essencial para o sucesso da aplicação do Harpia P71 em campo, assegurando que o drone possa operar em ambientes desafiadores sem comprometer sua estrutura ou desempenho. Ao identificar e mitigar possíveis problemas de ressonância, este estudo contribui para

o desenvolvimento de drones mais robustos e confiáveis, que podem suportar as rigorosas demandas da agricultura moderna.

## Metodologia

O estudo utilizou o drone agrícola Harpia-P71, desenvolvido pela Psyche Aerospace, como objeto de análise modal. Esse drone, ilustrado na Figura 1, é equipado com um motor híbrido de etanol e baterias, sendo capaz de pulverizar até 40 hectares por hora, com uma autonomia de voo de 10 horas (RURAL, 2024).

Figura 1 – Drone Harpia-P71 da Psyche Aerospace.



Fonte: SILVA (2024).

A análise modal da parte estrutural do chassi e dos braços do Harpia P71 foi realizada em duas etapas principais: modelagem estrutural e análise modal. De acordo com Cook et al. (2001), o método dos elementos finitos é ideal para a análise estrutural de geometrias complexas, permitindo a discretização precisa da estrutura em pequenos elementos, o que facilita a avaliação detalhada do comportamento mecânico em regiões que seriam de difícil acesso analítico.

Inicialmente, a modelagem da estrutura do chassi e dos braços do drone foi desenvolvida utilizando software de elementos finitos (FEA). O modelo foi criado com o objetivo de capturar com precisão as características geométricas e os materiais utilizados na estrutura, aspectos essenciais para a eficácia da análise modal subsequente.

Posteriormente, foi realizada a análise modal para determinar as frequências naturais da estrutura. Essa etapa foi crucial para identificar potenciais problemas de ressonância que poderiam comprometer a integridade estrutural do drone durante a operação. Segundo Rao, 2017 a análise traz informações sobre as formas modais e as frequências associadas, que são críticas para entender o comportamento dinâmico do drone. As equações básicas utilizadas incluem a Equação do movimento dada pela Equação 01:

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = F(t) \quad (1)$$

onde  $M$  é a matriz de massa,  $C$  a matriz de amortecimento,  $K$  a matriz de rigidez e os vetores  $x(t)$  de deslocamento e por fim  $F(t)$  sendo o vetor de forças aplicadas no sistema.

De acordo com Rao, 2017 as soluções da equação do movimento dependem das ações ou forças externas  $F(t)$ , com dois cenários principais, de resposta livre, sem ação de força externa quando  $F(t)$  é igual a zero. A solução é descrita na Equação 2 logo abaixo:

$$x(t) = A\cos(w_n t) + B\sin(w_n t) \quad (2)$$

Onde  $w_n$  é a frequência natural do sistema, e  $A$  e  $B$  são constantes determinadas pela própria condição inicial. E o segundo cenário é quando essa força é diferente de zero, ou seja, com força

externa. Se a força é harmônica, ou seja,  $F(t) = F_0 \cos(\omega t)$ , a solução pode mostrar se o sistema está em ressonância, que ocorre quando a frequência da força externa coincide com a frequência natural.

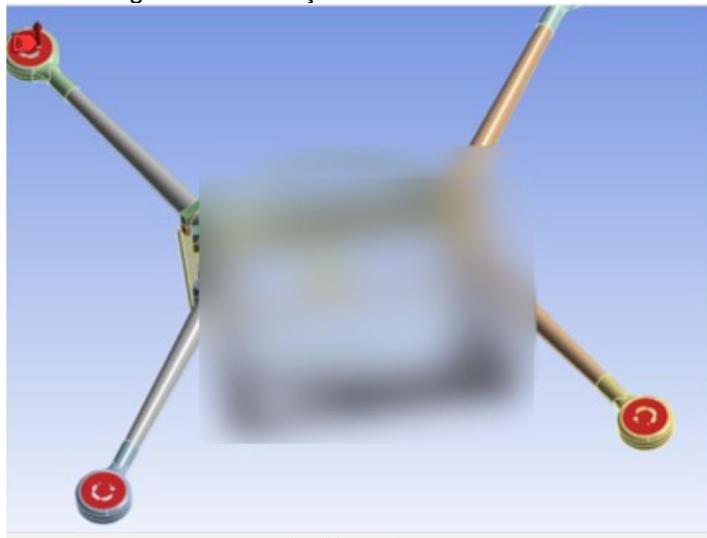
Partindo para os materiais da estrutura, foram utilizadas dois tipos de liga de alumínio diferente a Tipo A para a estrutura e Tipo B para as soldas, e os braços foram confeccionados com o material de fibra de carbono.

A fibra de carbono exige uma configuração específica dependendo da forma como é laminada. De acordo com Chung D. D. L., 2002, a disposição das camadas e a orientação de cada uma são cruciais para garantir as propriedades mecânicas desejadas, como resistência, rigidez e desempenho em condições específicas de carga. A orientação das fibras influencia diretamente o comportamento do material sob tensões, podendo ser projetada para resistir a forças em direções específicas ou para maximizar a rigidez em determinados eixos.

Para que a melhor trama pudesse ser encontrada foi feito diversos teste em simulação, até conseguir um resultado onde mais se adequava aos objetivos.

As condições de contorno utilizadas foram especificadas de acordo com a operação do drone. Segundo Zienkiewicz, et al. 2005, a correta definição dessas condições é essencial para garantir que os resultados da simulação sejam representativos do comportamento real da estrutura em estudo. Sendo a fixação na parte inferior do trem de pouso, com as forças de 8000N distribuídas nas pontas do braço, representando o motor e o efeito do mesmo. Essas condições de contorno estão representadas na Figura 2.

Figura 2 – Condições de contorno do sistema.

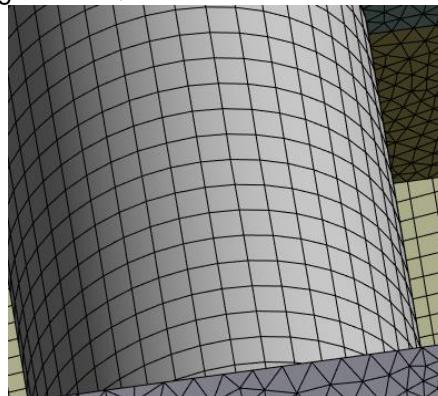


Fonte: Os autores.

## Resultados e Discussão

A malha computacional gerada sobre a superfície do drone, assim como no seu interior está apresentado na Figura 3.

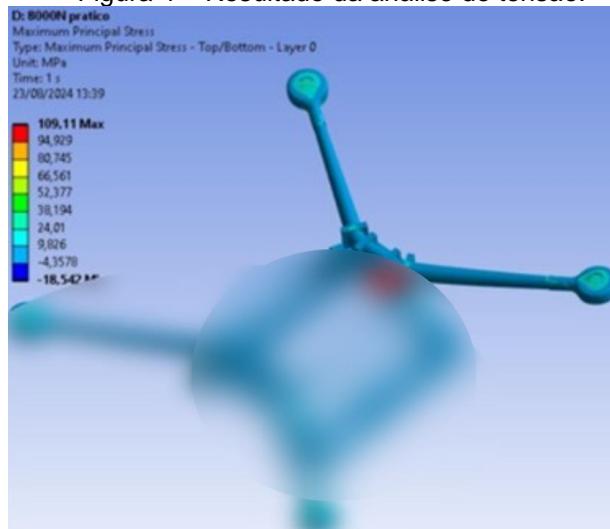
Figura 3 – Qualidade de malha da análise.



Fonte: Dos autores.

Para poder partir para a análise modal, foi realizado uma análise estática estrutural como parâmetro inicial da vibração, validando a estrutura para a modal. Provindo das condições de contorno mostradas anteriormente, tem-se os resultados apresentados de tensão na Figura 4.

Figura 4 – Resultado da análise de tensão.



Fonte: Os autores.

Para a modal, foram especificados para a saída de 10 modos de vibração para que seja realizado um comparativo dessas frequências com a operação dos motores que estão fixados nas pontas dos braços da estrutura.

O motor possui uma faixa operacional de até 4000 rpm. Durante os testes realizados com o drone, constatou-se que o motor opera predominantemente entre 1500 e 3000 rpm. No entanto, para adotar uma abordagem mais conservadora e garantir a segurança e confiabilidade do sistema, considerou-se uma faixa de operação mais ampla, de 1500 a 4000 rpm.

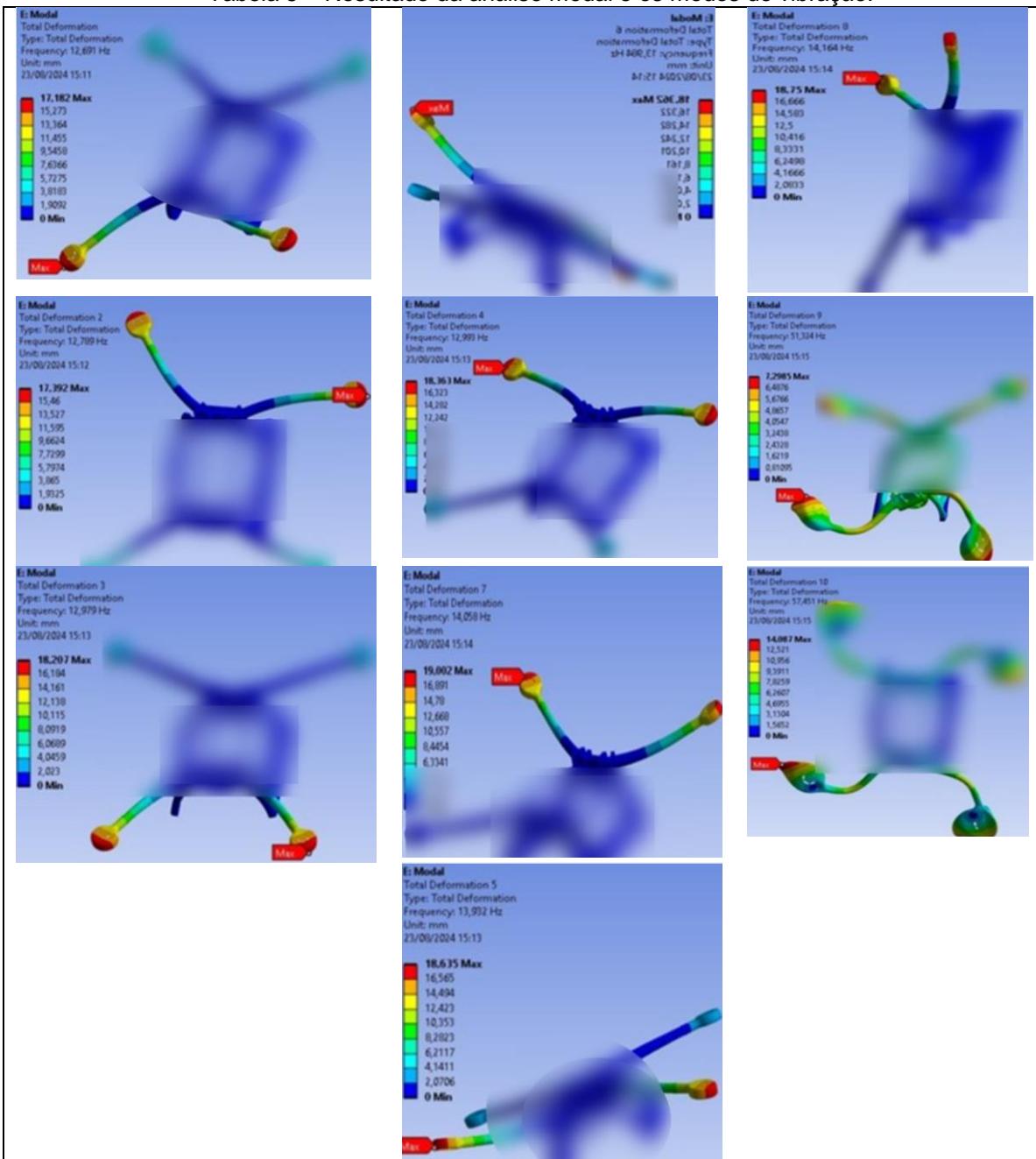
Assim, ao converter a rotação para hertz, obtém-se que a faixa de operação do motor está entre 25 e 66 hertz. Partindo da análise modal, os dados obtidos pela mesma, dos 10 modos de vibrar, estão apresentados em parte escrita na Tabela 4 e de forma visual na Tabela 5.

Tabela 4 – Modos de vibração.

Modos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
[Hz]	12,691	12,789	12,979	12,993	13,932	13,984	14,058	14,164	51,234	57,451

Fonte: Os autores

Tabela 5 – Resultado da análise modal e os modos de vibração.



Fonte: Os autores.

## Conclusão

A análise modal estrutural do Harpia P71 permitiu validar a integridade do chassi e dos braços do drone sob as condições operacionais previstas. A avaliação das frequências naturais foi fundamental para assegurar que não ocorresse ressonância durante a operação, o que poderia comprometer a integridade da estrutura. A faixa de operação do motor, entre 25 e 66 Hz, foi utilizada como base para comparação com os modos de vibração identificados. Os resultados indicaram que as frequências naturais do sistema estão suficientemente afastadas da faixa operacional do motor, minimizando assim o risco de amplificação excessiva das deformações. Essa validação é crucial para garantir que o Harpia P71 opere de forma segura e eficiente em ambientes agrícolas, suportando as rigorosas demandas impostas pelas operações de pulverização em larga escala. O estudo contribui significativamente para

o desenvolvimento de drones agrícolas mais robustos, com maior confiabilidade estrutural e desempenho otimizado para aplicações futuras.

## Referências

- CHUNG, D. D. L. (2002). ***Carbon Fiber Composites***. Butterworth-Heinemann.
- Cook, R. D., Malkus, D. S., Plesha, M. E., & Witt, R. J. (2001). ***Concepts and Applications of Finite Element Analysis*** (4th ed.). John Wiley & Sons.
- FERREIRA et al. **A contribuição e relevância do Agronegócio para o Brasil**. Revista CEDS, v. 2, n. 10, p. 1-21, 2022.
- MONTOYA, M.A.; FINAMORE, E.B. **Os recursos hídricos no agronegócio brasileiro: uma análise insumo-produto do uso, consumo, eficiência e intensidade**. Revista Brasileira de Economia, v. 74, n. 4, p. 441-464, 2020.
- RAO, S. S. (2017). ***Mechanical Vibrations*** (6th ed.). Pearson.
- SILVA, Eliane. **Startup começa a testar 'superdrone' em lavouras de Mato Grosso**. Globo Rural. Rio de Janeiro, 25 jun. 2024. Disponível em:< <https://globorural.globo.com/tecnologia-e-inovacao/noticia/2024/06/startup-comeca-a-testar-superdrone-em-lavouras-de-mato-grosso.ghtml>>.
- ZIENKIEWICZ, O. C., Taylor, R. L., & Zhu, J. Z. (2005). ***The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*** (6th ed.). Butterworth-Heinemann.
- Inman, D. J. (2014). ***Engineering Vibration*** (4th ed.). Pearson.