

**Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics**

---

# Estudo Numérico do Comportamento Dinâmico de Esteiras Aerodinâmicas Induzidas por Pás Rotativas.

Lucas Gustavo Alves Ferreira<sup>1</sup>

Universidade Estadual Paulista (UNESP) - Campus de São João da Boa Vista.

Carlos do Carmo Pagani Júnior<sup>2</sup>

Universidade Estadual Paulista (UNESP) - Campus de São João da Boa Vista.

Carlos De Marqui Júnior<sup>3</sup>

Universidade de São Paulo (USP) - Escola de Engenharia de São Carlos.

## 1 Introdução

Este trabalho tem por objetivo estudar numericamente o comportamento dinâmico da esteira aerodinâmica não estacionária induzida pelo movimento rotativo de pás flexíveis de um rotor de helicóptero em voo pairado. Para tal, o Modelo de Esteira Dinâmica Generalizada, definido no domínio do tempo, será formulado como um problema linear cuja solução em termos de autovetores representa os campos de velocidade do escoamento induzido, ou modos do escoamento induzido, no plano do rotor. As partes real e imaginária dos autovalores associados representam, respectivamente, os componentes de amortecimento e frequência dos modos associados. Este trabalho reproduz resultados apresentados na literatura, porém com a perspectiva futura de aprofundar o estudo sobre o modelo de esteira aerodinâmica e acoplar dinamicamente o domínio aerodinâmico ao domínio estrutural não linear para definir um modelo aeroelástico capaz de simular o comportamento dinâmico de sistemas de pás rotativas.

A sustentação do helicóptero decorre do deslocamento contínuo de massas de ar através do disco do rotor. Este fenômeno é produzido pelo movimento rotativo das pás e gera um campo de escoamento induzido na forma de uma esteira helicoidal abaixo do rotor [1]. O Modelo de Esteira Dinâmica Generalizada provem da teoria do escoamento potencial incompressível aplicada a um disco atuador, e utiliza uma formulação puramente analítica e matricial para representar os estados dinâmicos do escoamento induzido em termos de um número finito de modos harmônicos e radiais [2,3]. O campo de velocidade induzida (adimensionalizada) no plano do rotor é representado por uma expansão em série de funções harmônicas (séries de Fourier) com periodicidade azimutal, e funções radiais (polinômios

---

<sup>1</sup>lucas.gustavo.5@hotmail.com

<sup>2</sup>c.pagani@unesp.br

<sup>3</sup>demarqui@sc.usp.br

de Legendre), sendo os coeficientes da expansão deduzidos a partir do Modelo de Esteira Dinâmica Generalizada.

Os estados dinâmicos do escoamento podem ser determinados a partir de uma análise de autovalores aplicada ao modelo de esteira dinâmica em condições de voo pairado, voo axial ou voo em translação. Resultados apresentados por Fei [4] e Wang [5] mostram que os autovalores podem ser fortemente acoplados sob a condição de voo em translação, e as formas modais perdem a simetria verificada na condição de voo pairado, apresentando forte dependência em relação ao ângulo de avanço das pás. Não obstante, a descrição dos estados dinâmicos a partir de sua representação em termos de um número finitos de modos harmônicos e modos radiais associados permite uma compreensão básica sobre o comportamento físico da esteira induzida, bem como a sua potencial aplicação em modelos aeroelásticos.

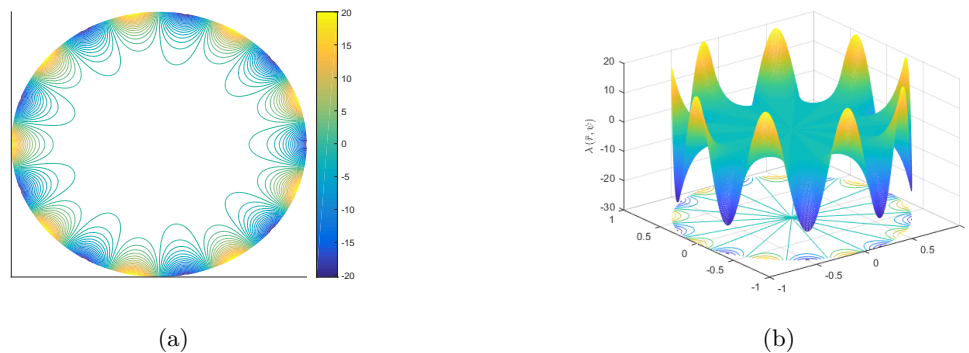


Figura 1: Gráficos com curvas de contorno 2D e 3D, representando os autovetores obtidos a partir da formulação linear do Modelo de Esteira Dinâmica Generalizada com escoamento induzido associado ao 9º modo harmônico e à 1ª função de forma radial.

## Referências

- [1] J. M. SEDDON, and S. NEWMAN. *Basic Helicopter Aerodynamics*. Wiley, 2001.
- [2] C. He, Development and application of a generalized dynamic wake theory for lifting rotors, Ph.D. Thesis, Georgia Institute of Technology, 1989.
- [3] D. A. PETERS, C. He, and A. A. SU. Closed-form, finite-state model for the unsteady aerodynamics of rotors. In: ATLURI, S.N. et al. (Ed.). *Computational Mechanics*. Berlin: Springer-Verlag, 1988.
- [4] Z. FEI. A Rigorous solution for finite-state inflow throughout the flowfield, Ph.D. thesis, Washington University in St. Louis, 2013.
- [5] Y. R. WANG. The Effect of wake dynamics on rotor eigenvalues in forward flight, Ph.D. thesis, Georgia Institute of Technology, 1992.