

Decomposição em Modos Dinâmicos de Simulações Aerodinâmicas em Larga Escala de Projéteis Base-Bleed

Thiago N. E. Rodrigues¹, Rachel M. Lucena², Maurício F. Lemos³,
Norberto Mangiavacchi², Gustavo P. Oliveira¹

¹Programa de Pós-Graduação em Informática, UFPB, João Pessoa

²Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UERJ, Rio de Janeiro

³Instituto de Pesquisas da Marinha, IPqM, Rio de Janeiro

thiago.ney@estudantes.ufpb.br, gustavo.oliveira@ci.ufpb.br

Resumo. *Este trabalho estuda a aplicação da Decomposição em Modos Dinâmicos (DMD) para analisar e reduzir dados de simulações CFD de projéteis militares com tecnologia base-bleed (sistema que reduz o arrasto aerodinâmico). A partir de 870 simulações bidimensionais axissimétricas, o DMD identificou modos dinâmicos dominantes do campo de velocidade axial. A técnica resultou em uma redução de dimensionalidade de aproximadamente 99,31% e destacou modos relevantes. Os próximos passos envolvem usar esses modos em modelos de aprendizado de máquina para aplicações em defesa nacional.*

1. Introdução

Projéteis militares do tipo *base-bleed* (PBB) possuem alcance estendido devido à liberação de gases que agem sobre baixas pressões na esteira do projétil, reduzindo o arrasto aerodinâmico e, consequentemente, aumentando o desempenho do lançamento [Neubarth et al. 2022]. No entanto, a compreensão dos mecanismos físicos da queima do material propelente e sua influência sobre a trajetória do projétil é complexa.

Tradicionalmente, simulações da dinâmica dos fluidos computacional (CFD) são utilizadas para modelar os fenômenos físicos e químicos, tais como os envolvidos no voo de projéteis base-bleed (PBBs), embora exijam alto custo computacional. Como alternativa, técnicas data-driven vêm sendo aplicadas para complementar essas análises. Neste sentido, este trabalho propõe o uso da *Decomposição em Modos Dinâmicos* (DMD) como método de redução de dimensionalidade, com o objetivo de extrair características relevantes do movimento dos PBBs, otimizar a engenharia de atributos e viabilizar a aplicação em modelos de aprendizado de máquina com grandes volumes de dados.

2. Metodologia

Inicialmente, a base de dados processada para este estudo compõe 870 conjuntos de simulações numéricas bidimensionais axissimétricas executadas no software *OpenFOAM*. As simulações consideram variáveis como número de Mach, temperatura de queima de propelente e vazão de exaustão, que totalizam cerca de 1,8 bilhão de pontos de dados. Cada simulação armazena cerca de 26.700 nós (pontos discretos no espaço onde os valores das variáveis são calculados ou armazenados como parte da simulação). Depois do

processamento dos dados (compilação, limpeza e adequação do padrão necessário para análises do DMD), extraímos uma região de malha particular de maior interesse correspondente à base do projétil, isto é, parte de trás, por onde saem os gases da queima do material propelente.

Em seguida, aplicamos a técnica de DMD. O DMD busca encontrar a matriz A , tal que $X' \approx AX$, bem como seus autovalores λ_i e autovetores ϕ_i que descrevem as características dinâmicas dominantes do sistema, onde $X = [x_1, x_2, \dots, x_{m-1}]$ e $X' = [x_2, x_3, \dots, x_m]$ são *snapshots* do sistema dinâmico em tempos especificados [Benner et al. 2017]. Para obter a forma reduzida de A , usa-se frequentemente a Decomposição em Valores Singulares (SVD), chegando-se a $A \approx \tilde{A} = U^* X' V \Sigma^{-1}$ [Taira et al. 2017].

3. Resultados e Considerações Iniciais

A técnica de DMD foi aplicada ao campo de velocidade axial para extrair os modos dinâmicos (padrões de movimento do fluido) a partir do operador \tilde{A} . Os autovetores correspondentes foram interpolados (via Delaunay) para visualização (Fig. 1). Identificou-se um modo dominante (Fig. 1a) que destaca regiões de maior energia no escoamento, enquanto os modos de baixa energia foram filtrados como ruído (Fig. 1b). Essa abordagem reduziu a dimensionalidade em 99,31% e acelerou a análise.



Figura 1. Primeiro e segundo modos dinâmicos.

Como continuidade deste trabalho, proporemos a utilização das características extraídas pelo DMD como variáveis de entrada em modelos de aprendizado de máquina. O objetivo é desenvolver módulos de software capazes de auxiliar a descrição do movimento de PBBs para fins estratégicos de defesa nacional.

Agradecimentos. Os autores agradecem à CAPES pelo financiamento da pesquisa no âmbito do Programa Pró-Defesa V.

Referências

- Benner, P., Ohlberger, M., Cohen, A., and Willcox, K. (2017). *Model Reduction and Approximation*. Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, PA.
- Neubarth, L., Lucena, R., Mangiavacchi, N., Chahub, D., Pinheiro, G., Pontes, J., Ferrapontoff Lemos, M., and Júnior, L. (2022). Mathematical model for propellant grain geometry regression.
- Taira, K., Brunton, S., Dawson, S., Rowley, C., Colonius, T., McKeon, B., Schmidt, O., Gordeyev, S., Theofilis, V., and Ukeiley, L. (2017). Modal analysis of fluid flows: An overview. *AIAA Journal*, 55.