

DESENVOLVIMENTO DE UM SIMULADOR VIRTUAL DE TÚNEL DE VENTO DE BAIXO CUSTO PARA ANÁLISE AERODINÂMICA DE AEROMODELOS

Caio de Lima Antunes, Felipe Vicente Pereira, Gustavo Entony dos Santos Costa, Heidi Korzenowski, Wagner dos Santos Clementino de Jesus.

Fundação Vale Paraibana de Ensino/Colégio Técnico Unidade Centro, Avenida Paraibuna, 75, Centro - 12245-020 - São José dos Campos-SP, Brasil, Caioantunesla@gmail.com, felipevp.sjc@gmail.com, gustavoentonydosantos18@gmail.com, heidi@univap.br, wagner@univap.br.

Resumo

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um simulador virtual de túnel de vento de baixo custo para análise aerodinâmica de aeromodelos. A metodologia empregou modelagem tridimensional no *Blender*, com conversão para VRML, possibilitando a simulação do escoamento de ar sobre diferentes tipos de asas. Para os cálculos de sustentação, foi utilizada a equação de Bernoulli, relacionando velocidade do vento, densidade do ar, área da asa e coeficiente de sustentação. O sistema apresentou resultados consistentes, evidenciando variações na sustentação conforme o tipo de asa e representando graficamente a relação entre velocidade e força aerodinâmica. Além disso, os testes puderam ser armazenados e exportados, permitindo comparações entre diferentes experimentos. O simulador mostrou-se eficaz e acessível, proporcionando uma alternativa prática a ensaios físicos. Conclui-se que a ferramenta cumpre os objetivos propostos e pode contribuir para o ensino e a pesquisa em aerodinâmica, com potencial de expansão para novas condições de simulação.

Palavras-chave: Aerodinâmica. Simulação virtual. Aeromodelos. Túnel de vento.

Curso: Ensino Médio, Técnico em Informática

Introdução

Desde os primórdios da aviação, a compreensão do escoamento do ar e seus efeitos sobre as aeronaves é essencial para otimizar desempenho, estabilidade e segurança (Alves e Ferro, 2024). A aerodinâmica, ao analisar o comportamento do ar e sua interação com diferentes geometrias, influencia diretamente fatores como sustentação, arrasto e eficiência (Ramírez, 2024). Os túneis de vento possibilitam a reprodução controlada dessas condições, mas seu elevado custo restringe o acesso a testes físicos (Ferreira, 2023).

A simulação virtual apresenta-se como alternativa viável e complementar, permitindo a análise de parâmetros como velocidade do vento, ângulo de ataque e configuração estrutural antes da construção de protótipos (Moreira Junior, 2009).

Apesar de ser uma ferramenta avançada, a simulação ainda não consegue substituir completamente os túneis de vento físicos, que continuam sendo essenciais para validar os modelos computacionais e garantir a precisão dos resultados (Almeida et al., 2017).

Objetiva-se com esse trabalho o desenvolvimento de um simulador de túnel de vento para aeromodelos visa democratizar o estudo aerodinâmico, oferecendo uma ferramenta de baixo custo, interativa, capaz de apoiar pesquisas e otimizações em engenharia, potencializando inovações com alcance amplo a partir de intervenções em escala reduzida.

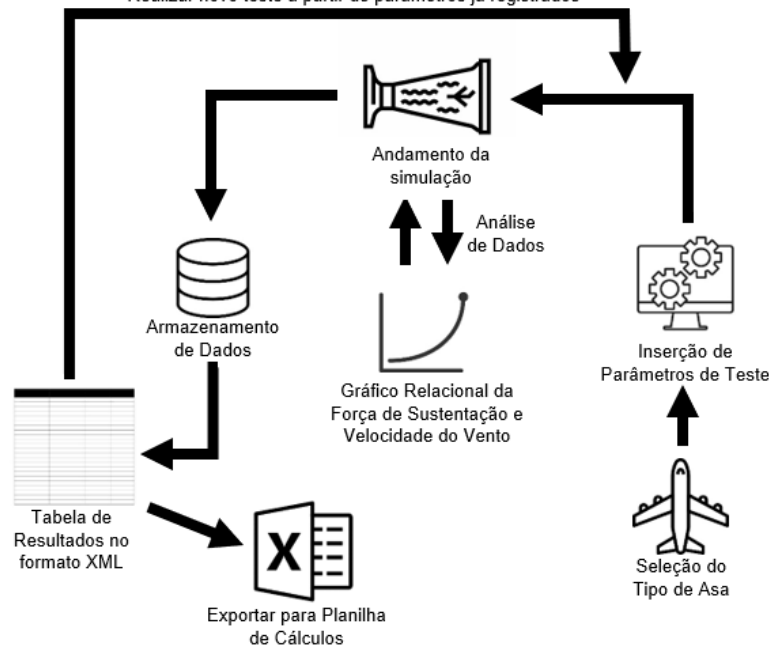
Metodologia

O diagrama da Figura 1 mostra a sequência operacional do sistema de simulação virtual de túnel de vento, que inclui a escolha do tipo de asa, definição dos parâmetros de teste, execução da simulação e geração dos dados. Esses dados são apresentados em gráfico de força de sustentação em relação a velocidade do vento, armazenados em banco de dados e podem ser consultados em tabelas em formato *Extensible Markup Language* (XML), exportados para planilhas ou usados para repetir simulações com parâmetros anteriores.

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

Figura 1 - Diagrama de funcionamento geral do Sistema

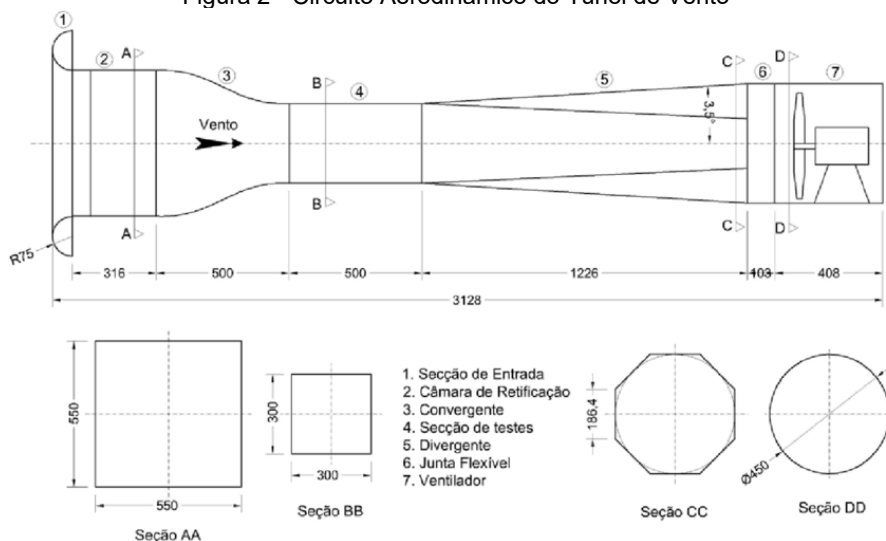
Realizar novo teste a partir de parâmetros já registrados



Fonte: Istock; Pinterest, 2025.

Com o propósito de efetuar a simulação do túnel de vento, foi empregada a linguagem *Virtual Reality Modeling Language* (VRML), destinada à modelagem de ambientes virtuais e simulações tridimensionais, em conjunto com o software *Blender 3D*, utilizado para a construção dos modelos e posterior conversão para VRML (Hwang, 2023). Por meio dessas ferramentas, foram elaborados os diferentes tipos de asa do aeromodelo, o ventilador e o túnel de vento, considerando as dimensões representadas na Figura – 2.

Figura 2 - Circuito Aerodinâmico do Túnel de Vento



Fonte: Núñez (2021).

No intuito de efetuar a análise aerodinâmica dos aeromodelos, aplicou-se a equação de Bernoulli, que estabelece a relação entre a velocidade do escoamento de ar e a pressão exercida sobre a superfície. A formulação de Bernoulli, descrita na Equação - 1, contempla a força de sustentação, representada por L , em função da densidade do ar (ρ), da velocidade do vento (V), da área da asa (S) e do coeficiente de sustentação (C_L).

$$L = \frac{1}{2} \rho \cdot V^2 \cdot S \cdot C_L \quad (1)$$

Resultados

Os resultados obtidos evidenciam que, com a utilização da equação de Bernoulli obtém-se precisão e assertividade, com isso podendo criar uma visualização em tempo real da simulação com a utilização do VRML a partir da inserção de parâmetros como a velocidade do vento, a densidade do ar, a área da asa e o tipo de asa selecionado, o sistema é capaz de executar a simulação tridimensional do túnel de vento, representando o escoamento de partículas de ar sobre a superfície do aeromodelo, o que corrobora com a imagem apresentada na Figura - 3 (A).

A execução das simulações possibilitou observar diferentes valores de força de sustentação para cada tipo de asa, os quais foram organizados em um gráfico exibido na Figura – 3 (B) que relaciona a velocidade do vento com a sustentação obtida.

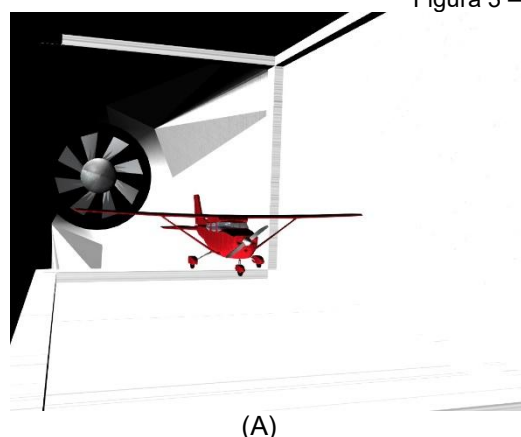


Figura 3 – Resultados do Sistema



Fonte: Autores (2025).

Observou-se que os testes realizados no programa puderam ser armazenados em planilhas de cálculo, permitindo a exportação dos dados e a reexecução de simulações previamente salvas, ampliando a análise comparativa entre diferentes experimentos.

Discussão

Na comparação com ferramentas já existentes, destaca-se o OpenFOAM (*Open Source Field Operation and Manipulation*), amplamente utilizado em simulações de Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) (Agnelo, 2021). Trata-se de uma plataforma robusta e de alta precisão, porém complexa e abrangente, exigindo conhecimentos técnicos especializados, configurações avançadas e curva de aprendizado alta, o que pode torná-la de difícil aplicação em estudos voltados especificamente para aeromodelos.

Outro exemplo é o XFLR5 (*XFoil for Low Reynolds numbers version 5*), desenvolvido para análises de aerofólios, asas e aeromodelos em regime de baixo número de Reynolds. Apesar de sua praticidade e foco direcionado, o software apresenta limitações quanto à visualização tridimensional e à flexibilidade em simulações mais complexas.

Nesse contexto, o simulador proposto neste trabalho diferencia-se por unir acessibilidade e aplicação prática, oferecendo uma interface intuitiva, configuração simplificada e direcionamento direto ao estudo em túneis de vento virtuais para aeromodelos, apresentando-se como uma alternativa funcional e de fácil utilização em ambientes acadêmicos e experimentais.

Dessa forma, confirma-se a eficiência do sistema desenvolvido como alternativa para ensaios aerodinâmicos, possibilitando a realização de um grande número de testes sem a necessidade de equipamentos físicos, de maneira prática, acessível e interativa. Como possível aprimoramento futuro,

destaca-se a implementação da medição da intensidade do vento em diferentes regiões do aeromodelo, permitindo análises mais detalhadas do escoamento.

Conclusão

O desenvolvimento do simulador virtual de túnel de vento para aeromodelos atendeu plenamente aos objetivos propostos, ao proporcionar uma ferramenta acessível, interativa e de baixo custo para a análise aerodinâmica em pequena escala. Os resultados obtidos demonstraram que o sistema é capaz de reproduzir, de forma simplificada, parâmetros essenciais como sustentação, arrasto e comportamento do escoamento do ar, permitindo análises confiáveis sem a necessidade de estruturas físicas complexas. Além disso, o projeto apresenta potencial para aplicação em ambientes acadêmicos, pesquisas iniciais e no ensino de conceitos fundamentais de aerodinâmica. Como perspectiva futura, sugere-se a ampliação das funcionalidades do simulador, incorporando novas geometrias de asas, diferentes condições de escoamento e integração com módulos de análise de desempenho energético.

Referências

AGNELO, Douglas Pereira. **Cálculo dos efeitos dinâmicos em edificações usando a ferramenta de CFD Open FOAM**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021.

ALMEIDA, J. L.; BUENO, E.; KAWAMURA, M. **Projeto mecânico de um túnel de vento para testes aerodinâmicos**. Revista de Ciências Exatas e Tecnologia, v. 27, n. 2, 2021.

FERREIRA, R. **Visitamos o túnel de vento de R\$ 1 bilhão, da Ford**. Disponível em: <<https://www.webmotors.com.br/wm1/noticias/visitamos-o-tunel-de-vento-de-r-1-bilhao-da-ford>>. Acesso em: 4 abr. 2025.

HALL, Nancy. **Bernoulli's Principle**. Disponível em: <<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/bern.html>>. Acesso em: 15 maio 2025.

HWANG, Chongqian. **Simulation Methods Realized by Virtual Reality Modeling Language for 3D Animation**. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2023/1/012046/pdf>>. Acesso em: 24 jun. 2025.

ISTOCK. Disponível em <<https://www.istockphoto.com/br/vetor/%C3%ADcone-do-cassino-crash-jogo-de-cambling-ilustra%C3%A7%C3%A3o-vetorial-de-estilo-plano-isolada-gm1419930605-466123438>>. Acesso em: 06 set. 2025.

MOREIRA JUNIOR, O. **Construção e validação de um túnel de vento para ensaios de estimativa da deriva em pulverizações agrícolas**. 2018. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2018.

NÚÑEZ, G. J. Z. **Construção e Calibração do Túnel de Vento do Laboratório de Estudos Aerodinâmicos – LEA**. Disponível em: <https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Circuito-Aerodinamico-do-Tunel-de-Vento-mm_fig1_354042909>. Acesso em: 15 maio 2025.

PINTEREST. Disponível em <<https://br.pinterest.com/pin/510877151500219957/>>. Acesso em: 06 set. 2025.

RAMÍREZ, Alfredo. **Princípio de Bernoulli**. 2024. Disponível em: <<https://conceitos.com/principio-bernoulli/>>. Acesso em: 2 abr. 2025.