

ESTUDO EM CFD DA BANCADA DE TESTES EÓLICOS EDIBON PARA OBTENÇÃO DO PERFIL DE VELOCIDADESPedro L. B. Souza¹ (IC), Angie L. E. Sarmiento (PQ)¹¹Universidade Federal de Itajubá**Palavras-chave:** Bancada eólica experimental. CFD. Perfil de velocidades. Turbina eólica. Ventilador axial.**Introdução**

Os testes em túnel de vento permanecem como ferramentas experimentais fundamentais para validar projetos e analisar o comportamento aerodinâmico sob condições controladas. No entanto, a caracterização precisa do perfil de velocidades ainda representa um desafio, uma vez que métodos tradicionais, como o tubo de Pitot, apresentam limitações em escoamentos não uniformes ou altamente turbulentos (Cejpek et al., 2022).

A Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) surge como alternativa robusta e complementar, permitindo a obtenção de dados detalhados e espacialmente contínuos que muitas vezes não são alcançáveis por técnicas experimentais convencionais (Younoussi e Ettaouil, 2024). Entre os modelos de turbulência, o $k-\omega$ SST se destaca pela capacidade de capturar separações de camada limite e gradientes de pressão adversos, fenômenos relevantes em turbomáquinas e sistemas aerodinâmicos (Menter, 1994).

Assim, o presente trabalho tem como objetivo caracterizar o perfil de velocidades na bancada de testes eólicos da Edibon®, utilizando CFD com o modelo de turbulência $k-\omega$ SST e a ferramenta *Fan Zone* do ANSYS Fluent®, além de comparar os resultados numéricos com dados experimentais.

Metodologia

O primeiro passo consistiu em medir os principais componentes da bancada experimental de energia eólica para representar com precisão suas dimensões físicas. Essas medições foram então usadas para criar um modelo 3D simplificado (Figura 1), mas representativo, da seção de teste. A geometria foi modelada usando o ANSYS SpaceClaim®, garantindo a compatibilidade com as etapas de malha e configuração de CFD. Para permitir o uso da ferramenta 3D *Fan Zone*

no ANSYS Fluent®, o ventilador axial não foi modelado com pás detalhadas. Em vez disso, a região do ventilador foi simplificada como um volume toroidal rotativo, representando a localização e o tamanho do rotor (Figura 2). Essa abordagem permite a simulação do efeito do ventilador no fluxo sem a necessidade de resolução completa das pás, reduzindo o custo computacional e, ao mesmo tempo, preservando as principais características do fluxo.

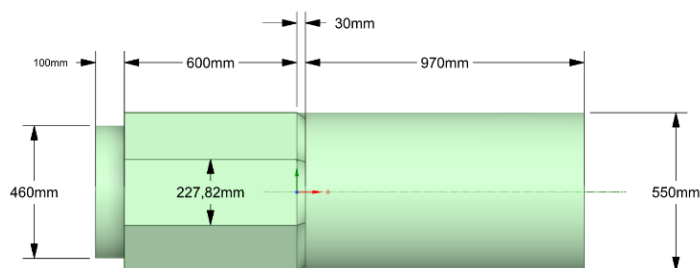


Figura 1 – Vista lateral do domínio

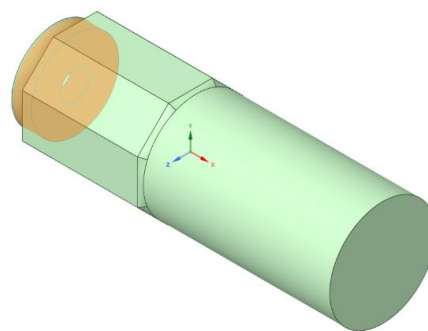


Figura 2 – Domínio com destaque à área rotativa

A seguir, o processo de malha foi conduzido usando o fluxo de trabalho *Watertight Geometry* no ANSYS Fluent Meshing®, uma abordagem adequada para geometrias criadas no SpaceClaim. Inicialmente, a Malha 1 (Figura 3) foi gerada com as configurações

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

globais padrão. Essa discretização inicial mostrou-se insuficiente para o modelo de turbulência $k-\omega$ SST, especificamente por não atender ao valor de y^+ necessário para uma resolução precisa do fluxo próximo à parede. O modelo $k-\omega$ SST tipicamente requer $y^+ \approx 1$ para capturar adequadamente a subcamada viscosa (Menter, 1994). Para resolver isso, a Malha 2 (Figura 4) foi desenvolvida por meio de uma estratégia refinada. Isso incluiu a aplicação de funções de dimensionamento de faces (*face sizing*) para controle localizado de elementos, o uso da função *Improve Volume Mesh* para aprimoramento da qualidade geral e a redução do tamanho global das células. (Popescu et al., 2022; Garcia-Ribeiro et al., 2023). Essas modificações garantiram que o requisito de y^+ para o modelo $k-\omega$ SST fosse atendido. Ambas as malhas foram avaliadas usando métricas padrão: assimetria (*skewness*) e qualidade ortogonal. Conforme detalhado na Tabela 1, a Malha 2 satisfaz as diretrizes de malha da ANSYS Guideline® (*Orthogonal quality* > 0,7, *Skewness* < 0,5 para valores ótimos) e o critério crucial de y^+ , o que confirma sua adequação para simulações de CFD precisas e estáveis do campo de fluxo. Uma vez que a malha satisfaz os rigorosos critérios de y^+ , assimetria e qualidade ortogonal, enquanto mantinha uma contagem de células razoavelmente baixa, uma redução na qualidade foi considerada desnecessária para mitigar o custo computacional.

Tabela 1 – Refinamento da malha

Parâmetro	Malha 1 (inicial)	Malha 2 (refinada)	Recomendações ANSYS
Número de elementos	319 540	832 133	-
<i>Skewness</i> (média)	0.22854	0.01302	< 0.25
<i>Skewness</i> (min)	8.2×10^{-6}	9.8×10^{-10}	-
<i>Skewness</i> (max)	0.99995	0.77493	< 0.95
<i>Orthogonal quality</i> (média)	0.76315	0.98537	> 0.8
<i>Orthogonal quality</i> (min)	4.9×10^{-5}	0.05417	> 0.02
<i>Orthogonal quality</i> (max)	0.99999	1.0	≤ 1
Y^+	2.4	0.9197	= 1

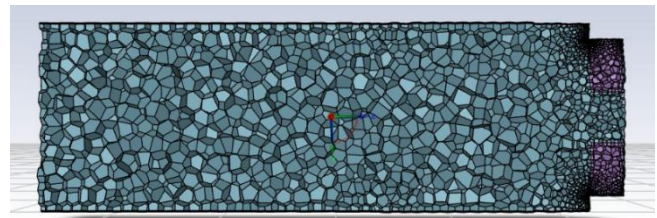


Figura 3 – Malha inicial

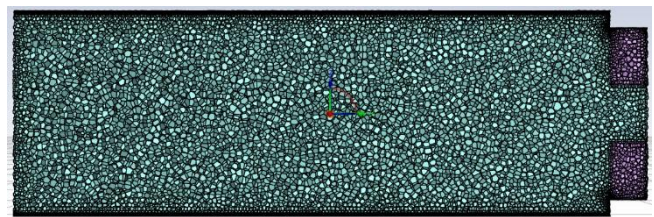


Figura 4 – Malha refinada

As simulações numéricas foram conduzidas utilizando o ANSYS Fluent®, com solver baseado em pressão em regime permanente (*steady-state*). Os efeitos rotacionais do ventilador foram incorporados por meio da abordagem *Moving Reference Frame* (MRF) amplamente utilizada em análises de turbomáquinas (Durkacz et al., 2021), com condições de contorno periódicas aplicadas às interfaces do domínio rotativo. O modelo de turbulência $k-\omega$ SST (*Shear Stress Transport*) foi selecionado para o fechamento da turbulência (Menter, 1994; Younoussi e Ettaouil, 2024).

Para o acoplamento pressão-velocidade, utilizou-se o algoritmo *Coupled*. A discretização espacial das equações de transporte foi configurada com esquemas *upwind* de segunda ordem, e os gradientes foram calculados pelo método dos mínimos quadrados baseado em células. Além disso, os fatores de *under-relaxation* para a densidade foram fixados em 0,45. O fluido de trabalho foi definido como ar, com densidade constante de $1,225 \text{ kg/m}^3$.

Para a zona do ventilador, o volume toroidal rotativo foi definido como interno. A geometria da *fan zone* e seus parâmetros operacionais encontram-se detalhados na tabela 2

Tabela 2 – Dados para *Fan Zone*

Parâmetro	Valor
Raio do cubo	0.08 m
Raio da ponta espessura	0.225 m
Ponto de inflexão	0.04 m
	0.83 m

Resultados e discussão

A análise CFD teve como objetivo avaliar a distribuição de velocidade na região do fluxo a montante da turbina, considerando diferentes seções axiais ao longo do túnel de vento da bancada experimental da. Os perfis de velocidade foram com os dados experimentais obtidos por meio de anemometria.

As comparações entre as seções (Figura 5 e Figura 6) mostram que o perfil de velocidades não se desenvolve totalmente até a região de testes. Na Seção 1, logo após o ventilador, observa-se forte não uniformidade, com núcleo central de baixa velocidade e intensidades maiores nas regiões laterais.

À medida que o escoamento avança, ocorre maior uniformização, mas mesmo na Seção 5, correspondente à área de testes, o perfil não está completamente desenvolvido.

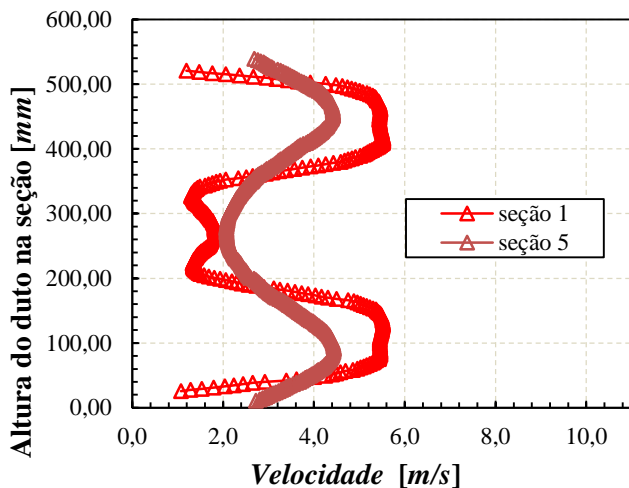


Figura 5 – CFD diferença de velocidade entre seções

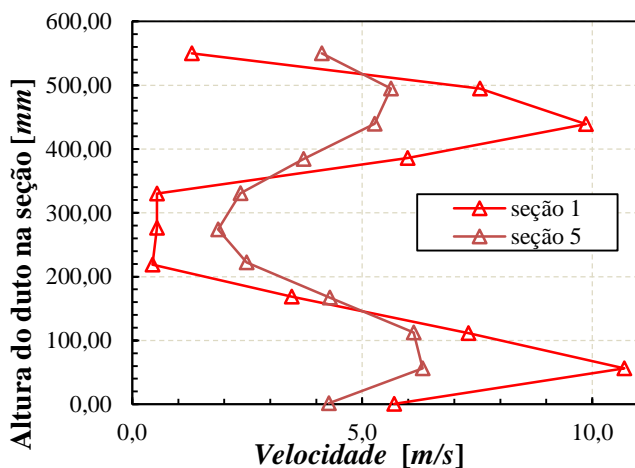


Figura 6 – experimental diferença de velocidade entre seções

A comparação com os dados experimentais (Figuras 7 e 8) indica boa concordância geral, mas com diferenças locais: na Seção 1, regiões lentas foram de 1,7 m/s (CFD) contra 0,5 m/s (exp.), e rápidas de 10,5 m/s (CFD) contra 5,32 m/s (exp.); já na Seção 5, as regiões lentas apresentaram 1,9 m/s (CFD) e 2,1 m/s (exp.), e as rápidas 6,3 m/s (CFD) contra 4,4 m/s (exp.).

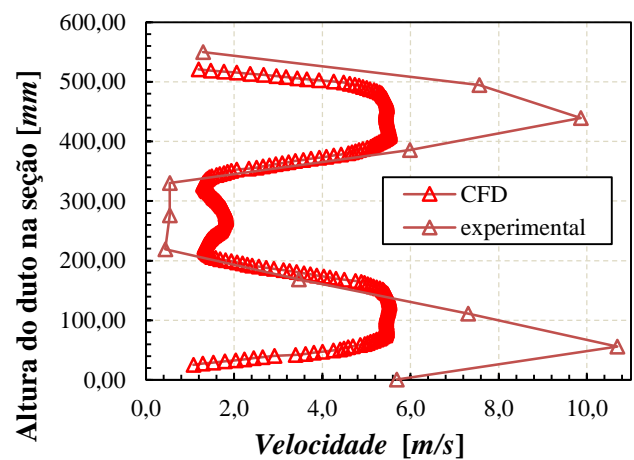


Figura 7 – CFD x experimental –seção 1

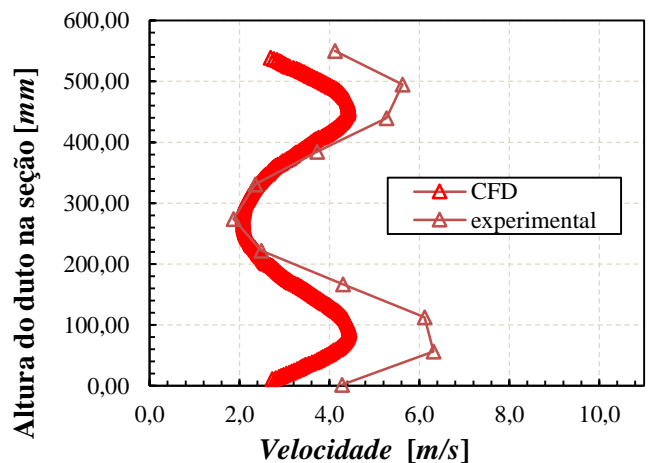


Figura 8 – CFD x experimental –seção 5

O contorno de velocidades (Figura 9) reforçam que o escoamento tenderia a se estabilizar apenas em uma distância maior que a disponível na bancada, implicando que a turbina opera em condições de entrada não totalmente desenvolvidas.

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

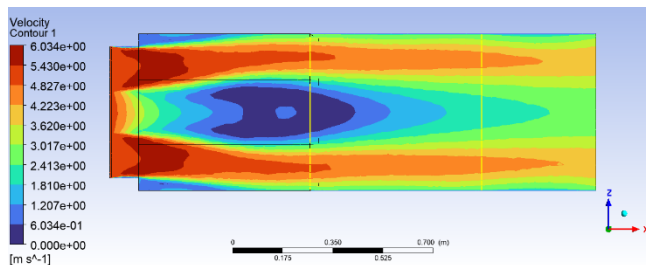


Figura 9 – Contorno de velocidades

Conclusões

Este estudo realizou com sucesso uma análise CFD da bancada de teste de energia eólica Edibon, com o objetivo principal de caracterizar o perfil de velocidade do fluxo na entrada da turbina. Utilizando o ANSYS Fluent e o modelo de turbulência $k-\omega$ SST, juntamente com uma estratégia de independência de malha, realizando o refinamento até atingir o critério de $Y+$ imposto pelo modelo de turbulência e um modelo simplificado de *Fan Zone*, a metodologia numérica provou ser robusta e computacionalmente eficiente.

As simulações de CFD capturaram efetivamente as características complexas do fluxo induzido pelo ventilador axial, revelando perfis de velocidade distintos com zonas de aceleração lateral e uma região central de baixa velocidade que se tornou progressivamente mais uniforme ao longo da seção de teste. A comparação quantitativa com dados experimentais obtidos via anemometria demonstrou boa concordância, apoiando a validade geral da estratégia de simulação, apesar de pequenas discrepâncias locais atribuídas a simplificações do modelo e incertezas experimentais.

As informações detalhadas e espacialmente contínuas do perfil de velocidade fornecidas por esta análise de CFD são altamente relevantes, oferecendo uma base sólida para futuras pesquisas que visem avaliar com precisão o impacto do posicionamento da turbina no desempenho e na eficiência. Isso contribui significativamente para o avanço do conhecimento científico e da inovação tecnológica no setor de energia eólica, em direção a soluções mais sustentáveis.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao programa PIVIC pela IC e à FAPEMIG pelo apoio financeiro por meio do projeto “Análise Numérica e Experimental de

Microgeradores Eólicos para Aplicações em Regiões Remotas no Brasil”. Agradecem também à Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) e ao Grupo de Pesquisa TIES-FDT – Dinâmica dos Fluidos e Turbomáquinas pelo suporte ao desenvolvimento deste trabalho.

Referências

CEJPEK, O. et al. Analysis of velocity profile measurements obtained by different methods in low-speed, small-scale wind tunnel. In: EPJ Web of Conferences. v. 264, p. 01007, 2022. DOI: 10.1051/epjconf/202226401007. Disponível em: <https://doi.org/10.1051/epjconf/202226401007>

MENTER, F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*, v. 32, n. 8, p. 1598–1605, 1994.

YOUNOUSSI, S.; ETTAOUIL, A. Calibration method of the $k-\omega$ sst turbulence model for wind turbine performance prediction near stall condition. *Heliyon*, v. 10, n. 1, p. e24048, 2024. ISSN 2405-8440. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e24048. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844024000793>.

GARCIA-RIBEIRO, D.; MALATESTA, V.; MOURA, R. C. Assessment of rans-type turbulence models for cfd of horizontal wind turbines. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2023. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/374501531>.

POPESCU, F. et al. A robust and efficient cfd approach for horizontal-axis wind turbines. *Journal of Marine Science and Engineering*, v. 10, n. 9, p. 1243, 2022. DOI: 10.3390/jmse10091243. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2077-1312/10/9/1243>.

DURKACZ, J. et al. Cfd modelling and prototype testing of a vertical axis wind turbines in planetary cluster formation. *Energy Reports*, v. 7, p. 119–126, 2021. ISSN 2352-4847. DOI: 10.1016/j.egyr.2021.06.019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484721003838>.

FONSECA, Fábio de Paula Oliveira. Projeto de instrumentação de bancada de ensaios aerodinâmicos e elaboração de procedimentos experimentais para testes de aerogeradores. 2022. 92 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2022.