

ANÁLISE FLUIDODINÂMICA DE GERADOR EÓLICO DE EIXO HORIZONTAL DE PEQUENO PORTE

Guilherme Vicente Toquini¹ (IC), Angie Lizeth Espinosa Sarmiento (PQ)¹

¹UNIFEI - Universidade Federal de Itajubá.

Palavras-chave: Micro turbina eólica de eixo horizontal (micro TEEH). *Computational Fluid Dynamics* - CFD. Coeficiente de potência – Cp. *Tip speed ratio* - TSR.

Introdução

O atual panorama energético brasileiro é caracterizado por uma distribuição precária de energia, que não alcança certas regiões, e se trata de uma situação que pode não mudar mesmo com o aumento da capacidade instalada. Por isso seria necessária uma melhora no sistema em geral ou o uso de novos dispositivos de geração de energia, que sejam condizentes com essa realidade.

Uma opção se trata dos modelos de microgeração de energia eólica, que são versáteis na instalação e suficientemente capazes de alimentar pequenas demandas. As turbinas eólicas de eixo horizontal (TEEH) de pequeno porte possuem maiores eficiências e geometrias mais simples em relação às turbinas eólicas de eixo vertical (TEEV) e podem possuir rotores com diâmetros menores até do que 1,25 m, nomeadas de "micro TEEH" (Tumala et al., 2016), o que as torna ainda mais versáteis para o transporte e instalação.

Dessa forma, as TEEH de pequeno porte têm um grande potencial para contribuir com uma melhora da qualidade de vida de pessoas que vivem em comunidades isoladas no país. Assim, tornam-se evidentes os benefícios da realização de estudos relacionados com o projeto aerodinâmico desse tipo de turbomáquina, a fim de se facilitar no futuro a sua implementação para atender condições locais específicas de projeto.

Dessa maneira, o objetivo do presente trabalho é desenvolver uma metodologia CFD rápida e eficiente para a predição do desempenho de TEEHs de pequeno porte e, seguidamente, aplicá-la na micro TEEH presente no Laboratório de Fontes Renováveis e Energia Solar (LabFRES) da Universidade Federal de Itajubá.

Metodologia

Para o desenvolvimento do presente trabalho, foi tomado como referência o estudo de Ajirlo *et al.* (2021), o qual apresentou uma metodologia detalhada de CFD, envolvendo análises que obtiveram resultados condizentes com ensaios experimentais realizados no simulador de micro TEEHs construído pelos próprios autores. Dessa forma, neste estudo foi reproduzido o

mesmo domínio computacional e os mesmos parâmetros de desempenho de Ajirlo *et al.* (2021), com o objetivo de se validar essa metodologia CFD.

Na abordagem CFD de Ajirlo *et al.* (2021) foi definido um domínio fluido somente para uma pá da turbina, ou seja, a simulação é realizada em apenas um dos canais de escoamento, mediante a utilização da condição de contorno de periodicidade rotacional, a partir de um referencial não inercial (MRF - *Moving Reference Frame*), o que simplifica a simulação por não utilizar a geometria completa do rotor.

Além disso, o domínio fluido é dividido em duas zonas, uma rotativa (ZR), para a região no entorno da pá da turbina, e outra estacionária (ZE), o que permite a utilização de dois tipos de malha, uma não-estruturada e outra estruturada, respectivamente. A ZR é discretizada por uma malha tetraédrica, mais refinada, e com elementos prismáticos na superfície da pá, já a ZE é discretizada por uma malha hexaédrica, obtendo uma redução no tempo de simulação e no recurso computacional necessário.

A geometria da pá foi feita no software SolidWorks® e as ZR e ZE no Ansys SpaceClaim®. O domínio computacional e as definições das superfícies para as condições de contorno podem ser vistos na Figura 1.

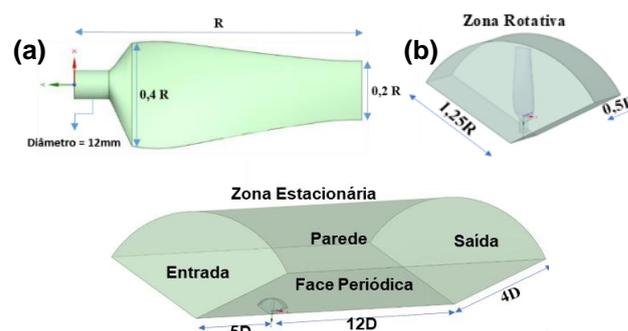


Figura 1 – Geometria da pá (a) e das zonas, ZR (b) e ZE (c) do domínio fluido.

O parâmetro mais influente no resultado do torque gerado pelo rotor e no número final de elementos é o grau de discretização espacial na superfície da pá, assim, foi estabelecido um valor máximo, igual a 3 mm, para a

dimensão dos elementos nessa superfície. O resultado da malha da ZR feita no software Ansys Fluent Meshing® ficou com aproximadamente 5,3 milhões de elementos e pode ser visto na Figura 2.

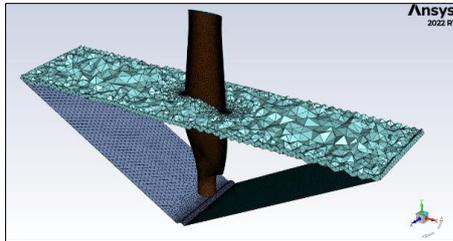


Figura 2 – Malha da ZR.

Já para a geometria da micro TEEH do LabFRES – UNIFEI (Figura 3 (a)), foi definido o valor máximo de 6mm na superfície da pá, por ela ter o dobro de dimensão. Além disso, foi feita uma análise de independência de malha que resultou em uma malha ótima de 17,4 milhões de elementos.

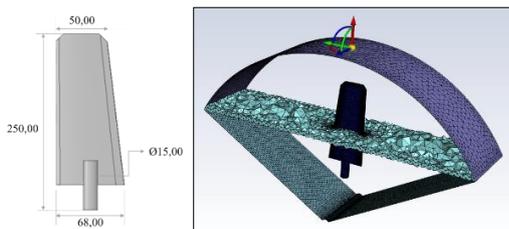


Figura 3 – Geometria da pá da micro TEEH do LabFRES - UNIFEI (a) e malha da ZR (b)

Para a geração da malha na ZE foi utilizada a abordagem “blocking” pelo software ANSYS ICEM CFD®. Nesse método de geração de malha o refinamento é feito definindo-se o número de divisões para cada aresta do domínio fluido. Além disso, considerando o estudo de Hsiao *et al.* (2013), foi feito um arredondamento no vértice central do domínio para permitir uma melhor adequação da malha hexaédrica. O resultado da discretização da ZE, com 476 mil elementos, pode ser visto na Figura 4 e foi o mesmo para os dois casos.

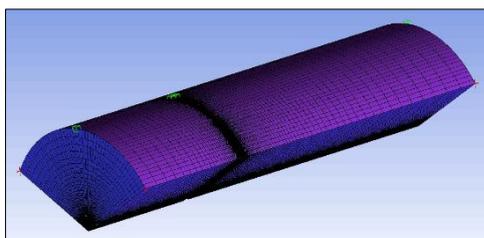


Figura 4 – Malha da ZE.

Por fim, a malha final da validação apresentou um número total de aproximadamente 5,8 milhões de

elementos, um valor somente 3,6% maior em relação à referência de Ajirlo *et al.* (2021), de 5,6 milhões.

Dessa forma, com o objetivo de avaliar o desempenho da micro TEEH, a velocidade de incidência do vento, V , é fixada enquanto é variada a velocidade angular da turbina, ω , que é caracterizada por diferentes valores para a Razão de Velocidade da Ponta da Pá (*Tip Speed Ratio - TSR*), Equação (1). Assim, para cada condição é aferido um valor de Coeficiente de Potência C_p , (Equação (2)), o qual representa a eficiência da turbina eólica, obtendo-se a sua curva característica.

$$C_p = \frac{T\omega}{\frac{1}{2}\rho AU_\infty^3} \quad (1)$$

$$TSR = \frac{\omega R}{U_\infty} \quad (2)$$

Sendo T , ω , A e R , o torque, a velocidade angular, a área varrida e o raio da TEEH, respectivamente, e ρ e U_∞ , a massa específica e a velocidade de escoamento do ar.

Na validação, a velocidade de incidência do vento, V , foi de 4 m/s, seguindo o estudo de Ajirlo *et al.* (2021). Na simulação da micro TEEH do LabFRES - UNIFEI o valor usado para a velocidade foi de 5,92 m/s, que corresponde ao ponto de operação que apresentou o maior valor de C_p , dentre alguns ensaios experimentais realizados.

Como aprimoramento, também foram implementados e acrescentados à metodologia a utilização dos números adimensionais *GRV* (*Grid-Reduced Vorticity*) e y^+ , para avaliar o grau de refinamento da discretização espacial: o primeiro (*GRV*), estabelecido por Balduzzi *et al.* (2016), especificamente para simulações de TEEV Darrieus H de pequeno porte, se trata de um valor adimensionalizado da vorticidade, que estima a variação de velocidade dentro de um volume da malha, indicando a adequabilidade da predição dos gradientes de velocidade em uma determinada região; o segundo (y^+), nomeado como distância adimensional à parede, se trata de um critério referente à discretização da camada limite para o qual é requerido um determinado valor máximo, a depender do modelo de turbulência empregado. Dessa forma, como no presente trabalho foi utilizado o modelo de turbulência $k-\omega$ SST, o valor máximo recomendado de y^+ é 1 (Ansys Fluent Manual, 2009).

Para a simulação o software utilizado foi o ANSYS Fluent®, onde utilizou-se o solucionador pressure-based em regime permanente e o fluido de trabalho foi o ar, com massa específica constante igual 1,225 kg/m³. Pela abordagem RANS (Reynolds-averaged Navier–Stokes), utilizou-se o algoritmo de acoplamento pressão-velocidade *coupled*, as equações de discretização espacial foram configuradas como de segunda ordem a montante (*upwind*), sendo utilizado o método baseado em células de mínimos quadrados (*least squares cell based*) para os

gradientes. Além disso, os fatores de sub-relaxação para a massa específica foram definidos iguais a 0,45.

Para as condições de contorno, as seguintes configurações foram especificadas:

- Escorregamento nulo na face superior da ZR e na superfície da pá (paredes); interface nas superfícies em contato com a ZR e a ZE; periodicidade rotacional a 120°, do tipo conforme, nas superfícies laterais dos dois subdomínios; eixo nas faces do arredondamento do domínio;
- Velocidade do vento na entrada: 4 m/s e 5,92 m/s, constante, com intensidade de turbulência igual a 4% e comprimento representativo igual ao diâmetro do redirecionador do escoamento do túnel de vento (25 mm para o primeiro caso e 33mm para o segundo);
- Pressão de saída: 0 Pa (manométrica), com intensidade de turbulência igual a 4% e comprimento representativo igual ao raio da pá (125 mm e 250mm).

Resultados e discussão

Na Figura 5 são apresentados para a velocidade de 4 m/s os contornos de pressão estática resultantes da simulação da turbina na sua condição de TSR nominal (torque máximo), igual a 3,5, em comparação com os contornos do artigo de Ajirlo *et al.* (2021), para uma mesma escala.

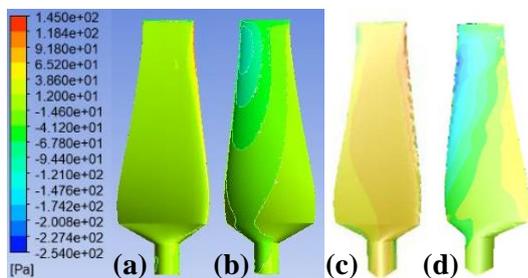


Figura 5 – Contornos de pressão estática para os lados de pressão (a,c) e de sucção (b,d) do presente trabalho (à esquerda) em comparação com o estudo de Ajirlo *et al.* (2021) (à direita), para uma mesma escala.

Pela presença da zona de menor pressão no bordo de ataque do lado de sucção, é possível inferir que a física do problema está correta. Sendo essa a região de maior aceleração, haverá uma maior velocidade e, conseqüentemente, uma menor pressão. O gradiente de pressão observado entre o intradorso e o extradorso da pá é responsável pela geração da força de sustentação que, conseqüentemente, produz torque no eixo da turbina.

Para a construção da curva característica da turbina foram simulados cinco pontos de operação, ilustrados na Figura 6, onde também é apresentado os erros relativos percentuais entre os resultados do presente trabalho e de Ajirlo *et al.* (2021). A curva característica do presente

estudo ficou deslocada e superestimada em relação a Ajirlo *et al.* (2021) e uma hipótese para esse comportamento são as inerentes diferenças entre as duas geometrias, já que os autores não fornecem todas as informações necessárias referentes às dimensões da pá e alguns valores foram estimados. Ainda assim a curva simulada se aproximou bastante da curva de referência.

É importante se destacar que os pontos de operação das extremidades da curva característica (TSR mínimas e máximas) tendem a apresentar maiores instabilidades no funcionamento da TEEH. O escoamento nos pontos de menores TSR possuem maiores magnitudes de vorticidade, o que dificulta a predição dos gradientes de velocidade em uma malha não refinada o suficiente. Já nos pontos de maiores TSR, a pá está sujeita a maiores forças de arrasto, devido às maiores velocidades. Além disso em Ajirlo *et al.* (2021) não é claro quais os fatores de sub-relaxação que foram utilizados e eles podem gerar instabilidades numéricas no cálculo dos residuais, como ocorreu no ponto de TSR = 2.

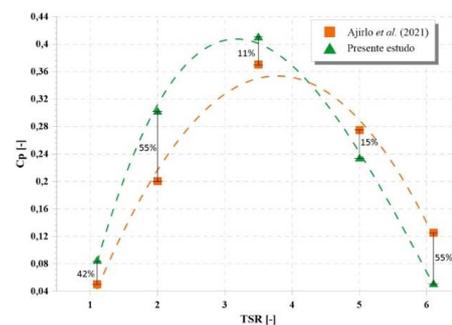


Figura 6 – Comparação entre as curvas características de Ajirlo *et al.* (2021) e do presente trabalho.

Analisando a Figura 7 observa-se que os valores de GRV na ZR têm uma tendência de aumentar com a diminuição dos valores de TSR, já que há maiores graus de vorticidade, o que resulta em maiores gradientes de velocidade.

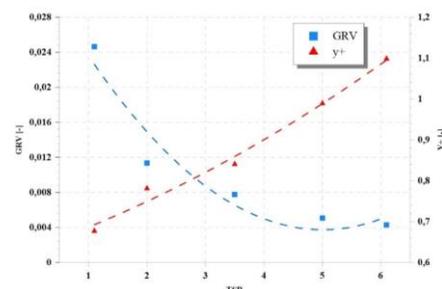


Figura 7 – Variação dos números adimensionais

Os maiores valores de GRV indicam uma menor adequabilidade da malha para as menores TSR.

Já os valores de y^+ ficaram adequados e só ultrapassaram um pouco o valor máximo de 1 no ponto de maior TSR, o que mostra que a camada limite foi bem descrita e que os valores encontrados são confiáveis.

No que se refere à micro TEEH do LabFRES - UNIFEI, os contornos de pressão estática nas superfícies da pá apresentados na figura 8 replicam o mesmo comportamento aerodinâmico apresentado na validação (Figura 5), sendo possível observar e destacar as diferenças entre o lado de pressão e o lado de sucção da pá, e havendo um gradiente negativo de pressão, no lado de sucção, do bordo de ataque ao bordo de fuga, ou seja, confirmando que a metodologia foi aplicada corretamente.

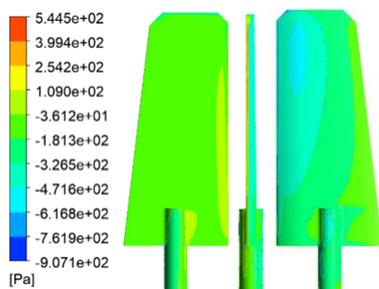


Figura 8 – Contornos de pressão estática da micro TEEH do LabFRES – UNIFEI.

Para a descrição de um ponto da curva característica foi tomado como base ensaios experimentais feitos em túnel de vento na turbina e foi escolhido a condição de TSR = 5,33, por se tratar do ponto em que foi aferido o maior C_p na velocidade do vento de 5,92 m/s. Os resultados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Resultados da simulação para a TSR de 5,33

C_p	y^+	GRV
0,0794	1,166	0,013

O valor de C_p encontrado foi bem baixo mas considerando que a pá não possui perfil aerodinâmico, ângulo de torção e nem ângulo de montagem, o resultado pode ser considerado válido. E a confiabilidade dos resultados também é dada devido aos valores encontrados para os números adimensionais. O valor de y^+ calculado ficou ligeiramente acima do máximo (1) e o valor do GRV foi muito próximo ao da validação, provando que houve uma boa adequabilidade da malha.

Conclusões

A metodologia desenvolvida foi validada com trabalhos relevantes na literatura (Ajirlo *et al.* (2021)), sendo esta capaz de prever o desempenho aerodinâmico da micro

TEEH do LabFRES – UNIFEI. Portanto, pode se dizer, que tal procedimento é passível de ser aplicado em outras TEEH de escala semelhantes.

O uso de números adimensionais para avaliar a adequabilidade da malha foi eficaz para acelerar o processo de discretização do problema. Os dados de GRV e y^+ guiaram o estudo de independência de malha, indicando as malhas que iriam apresentar os resultados mais confiáveis, baseados na predição dos gradientes de velocidade e na adequada discretização da camada limite da superfície da pá.

Os maiores valores de GRV indicam uma menor adequabilidade da malha na predição dos gradientes, o que resulta na conclusão de que em vez de se utilizar a mesma malha para todas as condições de operação, poderia ser realizado uma discretização mais refinada nos pontos de TSR inferiores, algo que será feito na continuação deste estudo para descrever a curva característica da micro TEEH do LabFRES – UNIFEI.

Agradecimentos

À FAPEMIG, processo APQ-00653-22, edital 001/2022, referente ao projeto: “Análise Numérica e Experimental de Microgeradores Eólicos para Aplicações em Regiões Remotas no Brasil”, com registro na DPI UNIFEI número PVDI297-2022, e ao Programa PIBIC CNPq pelo suporte financeiro. Agradeço também à Universidade Federal de Itajubá e aos professores e alunos do Grupo FDT (*Fluid Dynamics and Turbomachinery*) – UNIFEI por todo o aprendizado durante o desenvolvimento da IC.

Referências

- TUMMALA, A. et al. A review on small scale wind turbines. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 56, p. 1351-1371, 2016.
- AJIRLO, K. S. et al. Development of a wind turbine simulator to design and test micro HAWTs. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 43, p. 100900, 2021.
- HSIAO, Fei-Bin; BAI, Chi-Jeng; CHONG, Wen-Tong. The performance test of three different horizontal axis wind turbine (HAWT) blade shapes using experimental and numerical methods. **Energies**, v. 6, n. 6, p. 2784-2803, 2013.
- BALDUZZI, F. et al. Dimensionless numbers for the assessment of mesh and timestep requirements in CFD simulations of Darrieus wind turbines. **Energy**, v. 97, p. 246-261, 2016.
- MANUAL, U. D. F. ANSYS FLUENT 12.0. **Theory Guide**, p. 67, 2009.