

INFLUÊNCIA DO PERFIL NO DESEMPENHO AERODINÂMICO DE UMA MICROTURBINA EÓLICA DE EIXO HORIZONTAL CONSIDERANDO O EFEITO DE BLOQUEAGEM

Samuel G. Carvalho¹ (IC), Angie L. E. Sarmiento¹ (PQ)

¹Universidade Federal de Itajubá.

Palavras-chave: Análise experimental. Efeito de bloqueagem. Impressão 3D.

Introdução

A crescente demanda por sistemas de energia sustentáveis tem impulsionado a diversificação das fontes de geração, com destaque para a microgeração eólica, que favorece a produção local de energia renovável e amplia o acesso à eletricidade (Parag & Sovacool, 2016). Um dos principais desafios das turbinas eólicas de pequeno porte é o desempenho em condições de baixo número de Reynolds ($Re < 5 \times 10^5$), que resulta em aumento do arrasto, redução da sustentação e estol prematuro (Winslow et al., 2018). Para superar essas limitações, diversos estudos propõem perfis aerodinâmicos otimizados a fim de melhorar o desempenho em ventos fracos e otimizar a razão sustentação/arrasto (Momeni et al., 2019).

A eficiência dos perfis varia conforme as condições operacionais, com destaque para o NACA 4412 e o SG6043, que apresentam bom desempenho nesses cenários específicos (Yossri et al., 2021). Metodologias como BEM, CFD e modelos híbridos BEM-CFD mostram-se eficazes no design de turbinas, embora testes experimentais continuem indispensáveis para a análise de escoamentos complexos (Rye et al., 2015).

Nos testes em túnel de vento, o efeito de bloqueagem precisa ser corrigido, pois as paredes do túnel distorcem o fluxo ao redor da turbina, aumentando artificialmente os valores de sustentação e potência (Pope & Harper, 1966). O estudo de Ryi et al. (2015) aplicou correções baseadas na formulação de Glauert (1933), demonstrando que a influência desse efeito cresce com a razão de bloqueagem, o que reforça a necessidade de ajustes nos ensaios experimentais.

O estudo avaliou experimentalmente o desempenho de uma microturbina eólica com diferentes pás, aplicando correções para altas razões de bloqueagem, a fim de obter dados aerodinâmicos mais precisos e validar uma metodologia de menor custo em relação aos testes convencionais em túnel de vento.

Metodologia

Os testes foram realizados utilizando a unidade de energia eólica do fabricante EDIBON, mostrada na Figura 1. Originalmente projetada com uma seção transversal octagonal, a estrutura foi modificada por Fonseca (2022) para uma geometria circular, resultando em um diâmetro interno de 0,55 m e um comprimento total de 2 m.

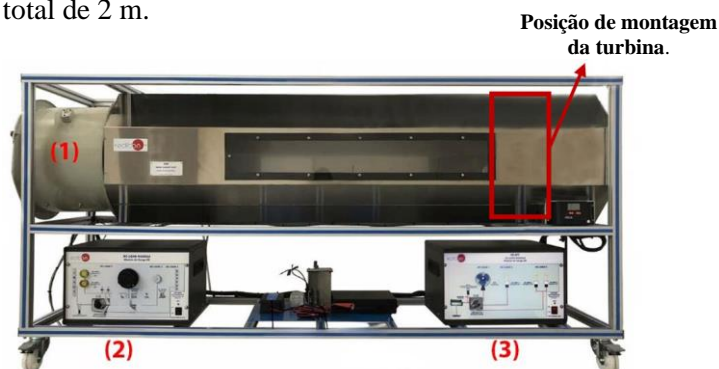


Figura 1 – Vista exterior da bancada de testes EDIBON: (1) Ventilador axial; (2) Módulo de corrente contínua (CC); (3) Módulo de corrente alternada (CA). Autoria própria.

A turbina utilizada nos experimentos, mostrada na Figura 2, possui uma torre de suporte que ajusta o ângulo de guinada (γ) e um rotor modular com até seis pás. O diâmetro varrido é de 0,5 m, e o gerador acoplado é trifásico. O ângulo das pás (β) é ajustável e fixado com parafuso. O fluxo de ar é gerado por um ventilador axial de 1,5 kW e vazão máxima de 2,96 m³/s, controlado por potenciômetro, simulando diversas condições de vento. Um módulo de corrente contínua (CC) permite conectar a turbina a um reostato, possibilitando variar a resistência total do circuito e alterar a velocidade de rotação da turbina. No presente estudo foi escolhida uma configuração de montagem com 3 pás, $\beta = 0^\circ$ e $\gamma = 0^\circ$. Sensores foram instalados na turbina e na bancada de testes para a aquisição dos dados experimentais (Rosa &

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

Vale, 2024), como mostra a Figura 3. O torque foi medido com uma célula de carga e a velocidade de rotação com um tacômetro infravermelho. A velocidade do vento foi medida com um tubo de Pitot conectado a um sensor de pressão diferencial.

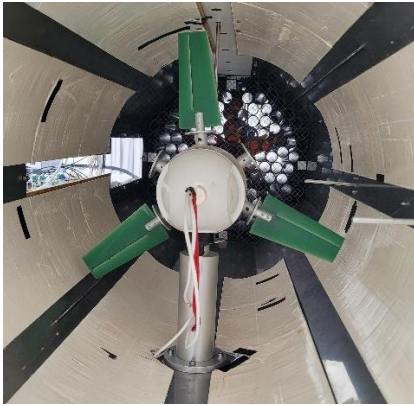


Figura 2 – Turbina com três pás instalada dentro da bancada de testes.

Todos os sensores foram conectados a uma PCB, e um software dedicado garantiu a sincronização das leituras em tempo real. Os dados foram processados por um microcontrolador Arduino MEGA 2560, armazenados em um cartão SD e transferidos para análise. Foram testadas quatro pás com os respectivos perfis aerodinâmicos: O padrão da bancada (B1), o SG6043 (B2), o SG6043 com afunilamento e torção geométrica (B3) e o NACA4412 com afilamento, torção e uma fenda (Rayhan *et al*, 2024).

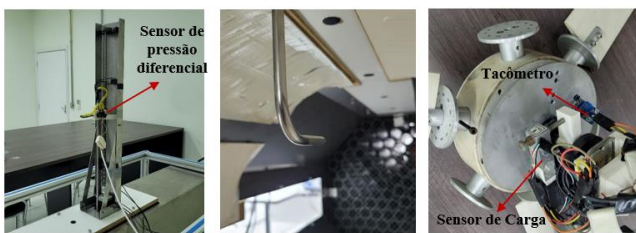


Figura 3 – Suporte para o tubo de Pitot acoplada a um eixo e motor de passo (Esquerda). Tubo de Pitot posicionada dentro da bancada de testes (Centro). Sensor de carga e tacômetro instalados dentro da turbina (Direita). Autoria própria.

As pás B2, B3 e B4 foram fabricadas por impressão 3D, sendo a pá B2 feita em PLA e pá B3 em ABS, ambas com revestimento em resina. Já a lâmina B4 foi impressa diretamente em resina. A Figura 4 mostra as quatro pás

utilizadas nos testes, enquanto a Tabela 1 apresenta os dados de construção. As dimensões geométricas da turbina são definidas pelos seguintes parâmetros: Corda na base da pá, C ; Corda no topo da pá, C' ; Ângulo de torção da base da lâmina, Ab ; Ângulo de torção no topo da lâmina, At ; e Comprimento total da lâmina, L .



Figura 4 – Quatro pás da turbina utilizadas no experimento. Autores.

Tabela 1. Dados geométricos para as pás B1, B2, B3 e B4 da turbina.

Pá	Perfil	C (mm)	C' (mm)	Ab (°)	At (°)	L (mm)
B1	Padrão	66	48	0	0	143
B2	SG6043	60	46	0	0	143
B3	SG6043	60	36	0	10	143
B4	NACA4412	70	45	0	10	143

As Equações 1 a 5, são utilizadas no processamento dos dados.

$$A = \pi R^2 \quad (1)$$

$$P_{DISP} = \frac{1}{2} \rho A \bar{v}^3 \quad (2)$$

$$P_e = T \omega \quad (3)$$

$$C_p = \frac{P_e}{P_{DISP}} \quad (4)$$

$$TSR = \lambda = \frac{\omega R}{\bar{v}} \quad (5)$$

A área varrida pelo rotor é representada por A , o raio externo da turbina é R , C_p é o coeficiente de potência, T é o torque, P_e é a potência de eixo, P_{DISP} é a potência disponível no escoamento, TSR (ou λ) é a razão de ponta de pá e ω é a velocidade angular do rotor.

Para corrigir o efeito de blocagem, utilizou-se a

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

abordagem de Rye *et al*, (2015), uma variação da correção de Glauert (1933). O método de Glauert calcula a velocidade corrigida (U') por meio de sistemas de equações, permitindo corrigir as distorções causadas pelo efeito de blocagem. A Figura 5 mostra as curvas de U' em função do coeficiente de força axial, C_T , extrapoladas e interpoladas, adaptando-se a índices de blocagem de 10% a 90%. O índice de blocagem para o presente estudo é de 82%. Os valores de C_T são calculados pelas Equações (7) e (8) utilizando os valores experimentais de C_P .

$$\alpha = A/A' \tag{6}$$

$$C_P = 4a(1 - a)^2 \tag{7}$$

$$C_T = 4a(1 - a) \tag{8}$$

Onde α é índice de blocagem, A é a área varrida pelo rotor, A' é a área da seção de testes da bancada eólica, C_T é o coeficiente de força axial e a o fator de indução axial. Após estimar o valor da velocidade do escoamento corrigida, os parâmetros de interesse podem ser corrigidos através das Equações (9) e (10).

$$C'_P = C_P \frac{1}{U'^3} \tag{9}$$

$$\lambda' = \lambda \frac{1}{U'} \tag{10}$$

Onde C'_P é o coeficiente de potência corrigido, λ' é a razão de ponta de pá corrigida e U' é a velocidade do escoamento corrigida.

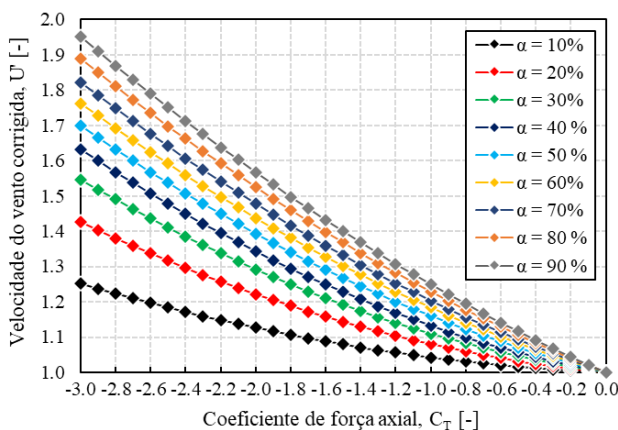


Figura 5 – Relação entre a velocidade de vento corrigida (U') e coeficiente de força axial (C_T) para diferentes índices de blocagem (α). Fonte: Autoria própria.

Resultados e discussão

A Figura 6 apresenta medições com um tubo de Pitot e um sensor de pressão diferencial para uma rotação do ventilador axial. As medições permitiram calcular a velocidade média do vento, \bar{v} . Observou-se que o perfil de velocidade obtido foi diferente do esperado, com valores mais altos nas bordas e menores no centro, devido à limitação do comprimento da bancada de testes, não possibilitando o desenvolvimento total do escoamento. A rotação do ventilador axial também afetou o fluxo de ar, resultando em velocidades mais altas próximas às pás e menores na região central. A velocidade média do vento obtida foi de 5,27 m/s.

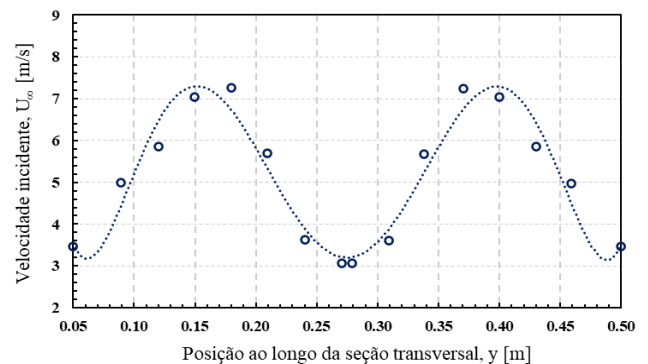


Figura 6 – Perfil de velocidade com a turbina dentro da bancada eólica. Fonte: Autoria própria.

A Figura 7 apresenta as curvas características da turbina, mostrando que o coeficiente de potência aumenta até o ponto de projeto e depois diminui. Os resultados superaram o limite de Betz, segundo o qual a extração máxima de energia por uma turbina é de 59,3% do fluxo disponível, devido ao efeito de blocagem provocado pelas paredes do túnel de vento.

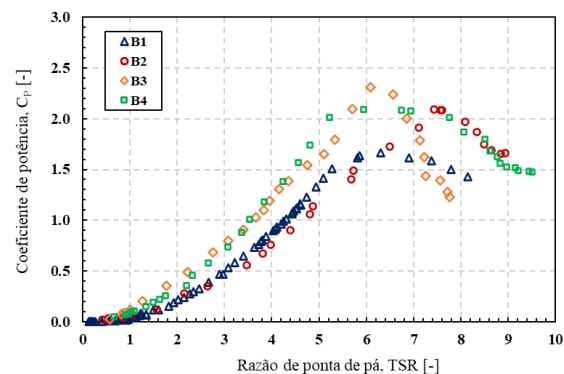


Figura 7 – Coeficientes de potência pela razão de ponta de pá antes da correção, para uma velocidade média do vento de 5,27 m/s. Fonte: Autoria própria.

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

A Figura 8 apresenta os valores corrigidos, com uma redução significativa nos parâmetros, todos abaixo do limite de Betz. A turbina de eixo horizontal da bancada de testes EDIBON EEE teve o melhor desempenho com a lâmina B3, equipada com torção geométrica e um perfil aerodinâmico SG6043. Porém, observa-se que a pá com fenda, além de apresentar um acréscimo no desempenho em relação a pá padrão da bancada, amplia a faixa operacional da turbina, já que a fenda atua na redução do descolamento da camada limite do escoamento.

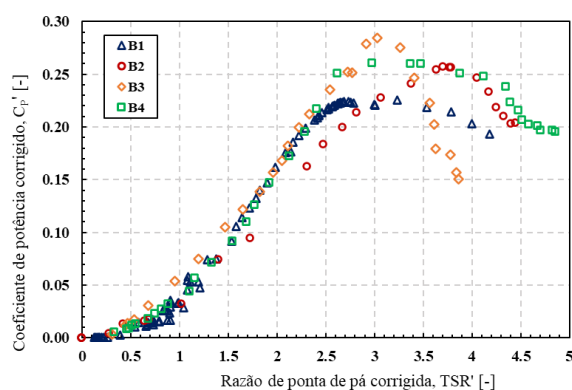


Figura 8 – Coeficientes de potência pela razão de ponta de pá corrigidos, para uma velocidade média do vento de 5,27 m/s. Fonte: Autoria própria.

Conclusões

O estudo desenvolvido para analisar a influência do perfil das pás no desempenho de turbinas eólicas de pequeno porte, utilizando uma bancada de testes da EDIBON, obteve resultados satisfatórios, com todos os valores abaixo do limite de Betz. Conclui-se que a alteração do perfil exerce forte influência no desempenho da turbina, pois perfis otimizados para ventos fracos, conforme indicado na literatura, mostraram ganhos significativos também nos testes experimentais, o que abre espaço para o desenvolvimento, com baixo custo, de pás voltadas especificamente a turbinas eólicas de pequeno porte; além disso, a aplicação de fendas demonstrou ampliar a faixa operacional da turbina, podendo ser aplicado para melhorar o desempenho. No entanto, destaca-se a importância de melhorar continuamente o processo de coleta e análise de dados, já que isso afeta diretamente a precisão dos resultados. Além disso, embora o método de Glauert tenha sido bem aplicado, ele não foi validado para índices de blocagem tão altos quanto os observados na bancada de testes, sugerindo a necessidade de mais experimentos para validar sua eficácia em condições similares. O estudo representa um avanço no

desenvolvimento de turbinas eólicas de pequeno porte, mas ressalta a importância de melhorias contínuas nos procedimentos experimentais e na análise de dados para alcançar resultados mais precisos.

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

- PARAG, Y. e SOVACOL, BK. Electricity Market Design for the Prosumer Era. *Nature Energy*, 1, Article nº 16032, 2016.
- WINSLOW, J. et al. Basic understanding of airfoil characteristics at low Reynolds numbers (10^4 – 10^5). *J. Aircraft*, 55, pp. 1050–1061. <https://doi.org/10.2514/1.C034415>. 2018.
- MOMENI, F. et al. Plant leaf-mimetic smart wind turbine blades by 4D printing. *Renew. Energy*, 130, pp. 329–351. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.05.095>.
- YOSSRI, W. et al. Airfoil type and blade size effects on the aerodynamic performance of small-scale wind turbines: computational fluid dynamics investigation. *Energy*, 229, 120739. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120739>.
- RYI, J. et al. Blockage effect correction for a scaled wind turbine rotor by using wind tunnel test data. *Renewable Energy*, v. 79, p. 227–235, jul. 2015.
- POPE, A.; HARPER, J. J. *Low Speed Wind Tunnel Testing*. New York: John Wiley & Sons, 1966.
- GLAUERT, H. Wind tunnel interference on wings, bodies and airscrews. *Aeronautical Research Committee, Reports and Memoranda No. 1566*, 1933.
- FONSECA, F. de P. O. Projeto de Instrumentação da Bancada de Ensaio Aerodinâmico e Elaboração de Procedimentos Experimentais para Testes de Aerogeradores. 2022 <UNIFEI>
- ROSA, M.S., VALE, H.R., 2024. Sistema para instrumentação e aquisição de dados com Arduino em uma bancada para testes de microturbinas eólicas. 2024 <UNIFEI>
- RAYHAN, Asif Mahmud; HOSSAIN, Md Shahriar; MIM, Rokeiya Haque; ALI, Mohammad. Computational and experimental study on the aerodynamic performance of NACA 4412 airfoil with slot and groove. *Heliyon*, v. 10, 2024.