

METODOLOGIA PARA A DETERMINAÇÃO DO DESEMPENHO AERODINÂMICO DE TURBINAS EÓLICAS DE EIXO HORIZONTAL DE PEQUENO PORTE EM UMA BANCADA EÓLICA MODELO EEE (EDIBON).

Pedro E. Duque¹ (IC), Angie L. E. Sarmiento (PQ)¹
¹Universidade Federal de Itajubá.

Palavras-chave: Coeficiente de potência. Efeito de blocagem. Método de correção de Bahaj. Microgeração eólica. Microturbina eólica de eixo horizontal (TEEH).

Introdução

De acordo com Worldometer (2023) a população mundial ultrapassou a marca de 8 bilhões de indivíduos no ano de 2023. Esse crescimento populacional traz consigo desafios e oportunidades significativas, afetando questões como recursos naturais e saúde pública. Sendo irrefutável a necessidade de considerar panoramas futuros de suprimento energético em grande Escala.

De acordo com a EPE (Empresa de Pesquisa Energética) (2023) a geração de energia elétrica através dos ventos no ano de 2013 foi de 6,578 GWh, enquanto no ano de 2022 foi de 81,632 GWh, isso representa um aumento maior do que 1240%, mostrando que, de fato, a energia eólica já é uma tendência no território nacional para ajudar a suprir a crescente demanda energética.

A microgeração de energia eólica representa uma abordagem inovadora na produção descentralizada de energia limpa e renovável. Essa tecnologia permite que indivíduos e comunidades gerem sua própria eletricidade a partir do vento, contribuindo para a redução da dependência de fontes tradicionais e não renováveis. Ao contrário dos parques eólicos em larga Escala, a microgeração ocorre em uma escala menor, muitas vezes integrada a estruturas residenciais ou comerciais.

Nesse contexto, o presente trabalho, pertencente ao grupo de pesquisa FDT (*Fluid Dynamics and Turbomachinery*) – UNIFEI, tem como objetivo desenvolver uma metodologia para a análise de turbinas de eixo horizontal de pequeno porte mediante testes experimentais realizados na bancada eólica modelo EEE modificado do fabricante Edibon.

Metodologia

Todo o procedimento experimental é feito para ser aplicado em uma bancada eólica modelo EEE. Essa bancada, disponível nas dependências do laboratório do grupo FDT -UNIFEI, possui um ventilador axial de 1,5 kW e uma vazão máxima de 2,96m³/s, podendo chegar a

uma velocidade média de, aproximadamente, 7m/s. Sua seção transversal era, originalmente, octogonal, porém, ela foi modificada e instrumentada por Fonseca (2022). Após a modificação, a seção transversal passou a ser um círculo de 0,55m de diâmetro para atender as normas técnicas. A Figura 1 mostra a bancada eólica EEE modificada.

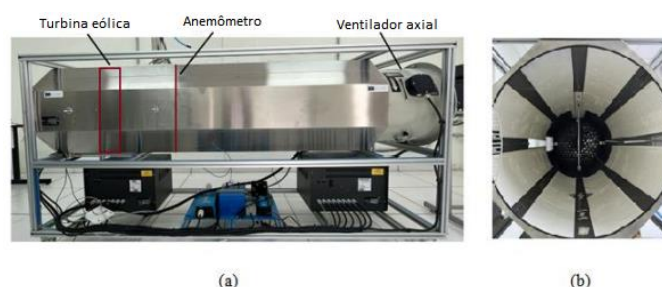


Figura 1 – Bancada eólica EEE modificada. (a) Vista lateral. (b) Vista frontal.

Para a simplificação da metodologia, ela foi dividida em três partes. A primeira parte diz respeito ao que precede o experimento em si, aqui, o responsável pela experimentação deve escolher o tipo de pá que será acoplada ao rotor padrão da bancada de estudos EEE, assim como o número de pás que será utilizado, o ângulo de montagem dessas pás e o ângulo com o qual o vento incidirá na turbina.

A segunda fase, crucial para o experimento, envolve a coleta precisa de todos os dados relacionados à turbina. O procedimento é realizado da seguinte maneira: a turbina, preparada na primeira parte da metodologia, é devidamente fixada na bancada eólica. Ao ligar a bancada de estudo, a velocidade do vento, v , é medida em 10 pontos diferentes ao longo da seção transversal circular de 0,55m da bancada eólica modificada EEE, utilizando um anemômetro, para obter o perfil do escoamento do ar. Além disso, a corrente elétrica, I , e a diferença de potencial, V , geradas pela turbina, submetida a uma carga elétrica mínima, são coletadas no visor da bancada. A velocidade angular, ω , do rotor é medida com um

tacômetro. Esse procedimento é repetido variando a carga imposta ao rotor da turbina por meio de um reostato presente na bancada eólica, até alcançar o seu valor máximo. Essa abordagem nos fornece um conjunto abrangente de dados essenciais para construir a curva característica da turbina em estudo. Para concluir, a bancada deve ser desligada, a turbina deve ser retirada da bancada eólica e o ventilador axial deve ser ligado novamente na mesma potência utilizada anteriormente. Em seguida, o perfil de velocidade, sem a turbina dentro da bancada de estudos, deve ser levantado, repetindo o processo feito anteriormente. O fluxograma da Figura 2 esquematiza o procedimento experimental.

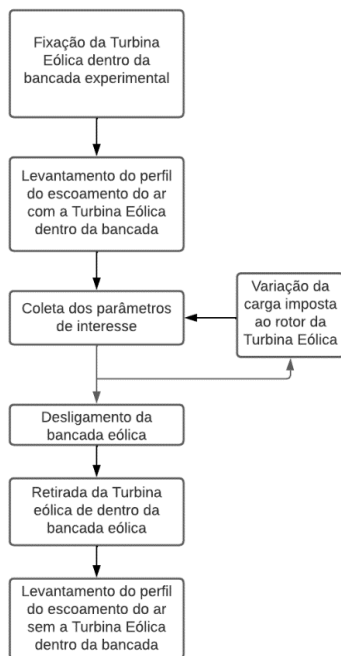


Figura 2 – Fluxograma do procedimento experimental para obtenção dos parâmetros de interesse da TEEH.

A terceira parte trata os dados obtidos durante o experimento da turbina eólica para construir a curva característica da configuração escolhida na primeira etapa da metodologia. Simplificando, começamos o tratamento de dados realizando uma regressão polinomial do sexto grau com os 10 pontos de velocidade do vento, v , medidos com a turbina dentro da bancada eólica. Isso nos permite descrever matematicamente o perfil do escoamento do ar. A velocidade média do escoamento com a turbina dentro da bancada eólica, \bar{v} , pode ser obtida integrando o polinômio resultante da regressão polinomial a partir da Equação 1.

$$\bar{v} = \frac{\int_a^b f(x) dx}{b-a} \quad (1)$$

Nessa metodologia a potência de eixo, geralmente utilizada para a análise de desempenho de turbinas eólicas, é substituída pela potência elétrica, uma vez que o equipamento para a coleta do torque aplicado no rotor não estava operante durante a realização do experimento. A potência elétrica é calculada mediante a Equação 2.

$$P_{el} = V I \quad (2)$$

O “Tip Speed Ratio” (TSR) e o coeficiente de potência (C_p) são os dois parâmetros necessários para obter a curva característica de uma turbina eólica. Esses dois parâmetros podem ser calculados de acordo com a Equação 3 e Equação 4, respectivamente.

$$TSR = \lambda = \frac{\omega R}{\bar{v}} \quad (3)$$

$$C_p = \frac{P_{el}}{0,5 \rho \bar{v}^3 A} \quad (4)$$

$$A = \pi R^2 \quad (5)$$

Onde A é a área varrida da turbina calculada pela Equação 5, R é o raio da TEEH e ρ é a massa específica do ar.

Com os procedimentos citados acima, foi possível obter a curva característica da turbina, entretanto, devido à pequena seção transversal da bancada eólica, é necessário corrigir alguns parâmetros para que a resposta obtida esteja de acordo com os resultados da turbina, caso ela estivesse em um ambiente aberto sem restrições laterais.

Vários são os métodos existentes para tentar corrigir esse fenômeno chamado de “efeito de blocagem”, entre eles, podemos citar o método de A.S. Bahaj (2007). Esse é um método de simples aplicação. As relações de correção são mostradas nas Equações (6) a (8).

$$FB = \frac{\bar{v}}{\bar{v}'} \quad (6)$$

$$C_p' = C_p \cdot FB^3 \quad (7)$$

$$\lambda' = \lambda \cdot FB \quad (8)$$

Onde FB é conhecido como o fator de blocagem, \bar{v}' é a velocidade média de incidência do vento sem a turbina dentro da bancada eólica, C_p' é o coeficiente de potência corrigido e λ' é o TSR corrigido.

Com os parâmetros λ' e C_p' é possível traçar a

curva característica de desempenho da turbina.

Resultados e discussão

Para a realização do experimento, foi escolhida a configuração da turbina como segue. 3 pás “standard” da bancada de estudos EEE (Figura 3), ângulo de montagem, β , de 0° e ângulo de incidência do vento, γ , de 0° .

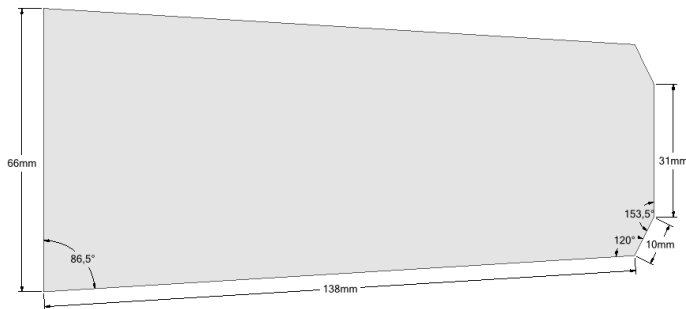


Figura 3 – Modelo representativa da pá padrão da bancada eólica.

A Figura 4 mostra a bancada eólica pronta para a experimentação após a montagem da configuração da turbina citada acima.



Figura 4 – Configuração da turbina pronta para ser experimentada.

O experimento foi realizado 5 vezes. Em cada uma dessas vezes, o potenciômetro do ventilador foi colocado em uma posição diferente, com o intuito de levantar a curva característica do desempenho da turbina para diferentes valores de \bar{v} .

O perfil de velocidade com a turbina dentro da bancada eólica, para as 5 velocidades distintas, pode ser observado na Figura 5.

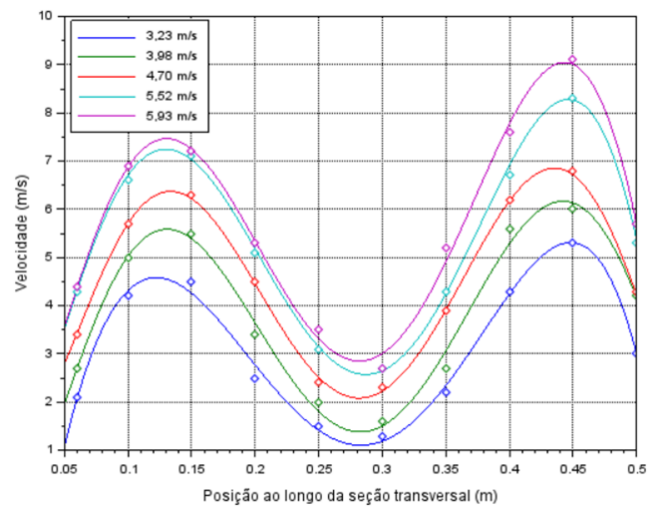


Figura 5 – Perfil de velocidade do escoamento com a turbina dentro da bancada eólica para 5 diferentes valores de \bar{v} .

Os valores de velocidade média de cada curva, calculados através da Equação 1, podem ser vistos na legenda da Figura 5. Os perfis possuem uma grande similaridade entre si. Fica claro que as velocidades mais altas são aquelas nas quais o experimento foi realizado com o ventilador axial em uma potência mais elevada. Nota-se que os perfis não estão desenvolvidos hidrodinamicamente, pois o equipamento, diferentemente de um túnel de vento, possui um comprimento muito pequeno, evitando com que o escoamento se desenvolva.

Com os dados coletados durante o experimento foi possível calcular diversos valores de TSR e C_p . Esses valores foram plotados e uma regressão polinomial do terceiro grau foi utilizada para que a curva característica da turbina fosse plotada para os 5 experimentos realizados. Essas curvas podem ser vistas na Figura 6.

Analisando as curvas, é possível observar valores de coeficiente de potência próximos de 0,65. De acordo com Albert Betz, a quantidade máxima de energia que uma turbina pode extrair do vento é 59,3%, desse modo, o máximo valor que uma curva, presente na Figura 6, poderia atingir é de 0,593. Os valores obtidos são grandes devido ao efeito de bloqueio, o espaço limitado para que o ar escoar faz com que a velocidade em torno da turbina aumente consideravelmente, tornando inválido o valor médio da velocidade de incidência do vento, \bar{v} , utilizado para o cálculo do TSR e C_p .

Por esse motivo, é de extrema importância utilizar algum método para corrigir esse efeito. Após a utilização do método de Bahaj (2007), os valores de TSR e C_p

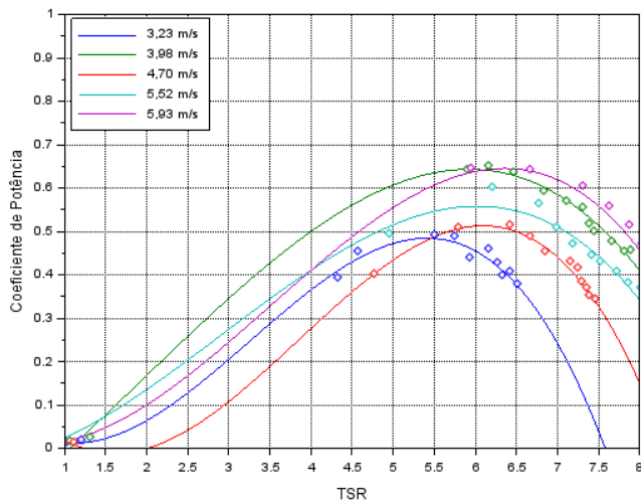


Figura 6 - C_p x TSR para 5 velocidades médias de incidência do vento distintas.

foram corrigidos. As curvas características da turbina podem ser vistas na Figura 7.

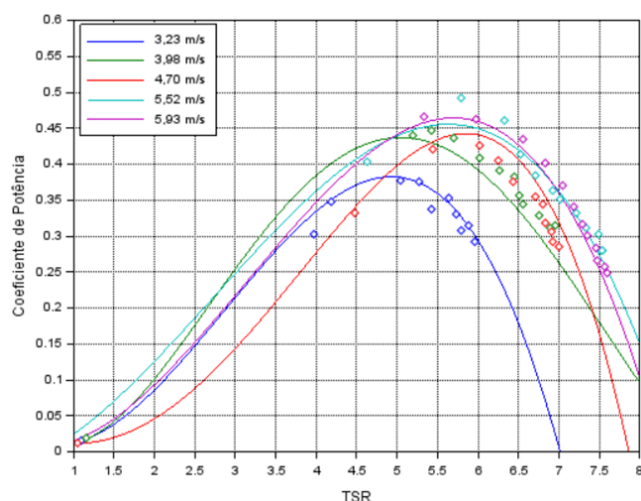


Figura 7 - C_p x TSR corrigido para 5 velocidades médias de incidência do vento distintas.

É possível observar que, depois da correção de Bahaj, os coeficientes foram ajustados, apresentando valores máximos de, aproximadamente, 0,45. Todos os valores observáveis se encontram abaixo do valor limite imposto por Betz. O método utilizado mostrou sua eficácia, diminuindo, em média, 24% do valor dos coeficientes de potência. Por último, nota-se que os maiores coeficientes de potência estão situados entre os valores de TSR 5 e 6, sendo essa a região de projeto da turbina.

Conclusões

A partir da Figura 7, é possível observar que a

metodologia cumpriu com seu objetivo, levantar as curvas características de desempenho de uma turbina eólica de eixo horizontal TEEH.

Os coeficientes de potência encontrados, entretanto, estão um pouco acima do esperado. Ajirlo et al. (2021) realizou procedimentos experimentais com uma turbina NACA 4412 e encontrou coeficientes de potência inferiores a 0,4. Levando em conta que as pás dessa turbina possuem um formato aerodinâmico mais adequado comparado às pás utilizadas nesse trabalho, infere-se que os valores de C_p , aqui encontrados, deveriam ser menores dos que os encontrados por Ajirlo, o qual não aconteceu. Entretanto, conclui-se que a metodologia desenvolvida é passível de aplicação para ter resultados preliminares do desempenho da turbina.

Com o intuito de melhorar a confiabilidade desta metodologia, algumas sugestões são deixadas para futuros experimentos.

A aquisição da velocidade do vento, v , e da velocidade angular, ω , foi feita manualmente, sugere-se que essa aquisição seja feita automaticamente através de sensores apropriados. A potência utilizada para o cálculo do coeficiente de potência foi a potência elétrica, P_{el} , porém, a utilização da potência de eixo, P_e , da turbina para o cálculo desse parâmetro, seguindo seu fundamento, é de fundamental importância. Por último, recomenda-se a utilização de outros métodos de correção para o efeito da blocagem, com o intuito de obter resultados mais confiáveis.

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 FAPEMIG 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

Bahaj, A.S. et al. *Power and thrust measurements of marine current turbines under various hydrodynamic flow conditions in a cavitation tunnel and a towing tank*. 2007.

FONSECA, F. de P. O. *Projeto de Instrumentação de Bancada de Ensaios Aerodinâmicos e Elaboração de Procedimentos Experimentais para Testes de Aerogeradores*. 2022. <UNIFEI>.