

Dinamômetro para Medição do Desempenho de Turbinas Eólicas de Eixo Vertical em Túnel de Vento

Dynamometer for Performance Measurement of Vertical Axis Wind Turbines in a Wind Tunnel

Mathias Verдум de Almeida¹ , Charles Rech¹ , Arthur Sandri Lunkes¹ ,
André Francisco Caldeira¹ , Cristiano Frandalozo Maidana¹ ,
Simone Ferigolo Venturini¹ 

¹ Universidade Federal de Santa Maria, Cachoeira do Sul, RS, Brasil

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo o desenvolvimento e a análise de um dinamômetro para a caracterização do desempenho de turbinas Savonius em ambiente controlado de túnel de vento. O dinamômetro, projetado para medir torque e potência, foi utilizado para avaliar uma turbina em escala reduzida de 60 mm de diâmetro, sendo dimensionado com base em valores máximos encontrados na literatura para turbinas do tipo Savonius. Uma análise detalhada das incertezas de medição foi conduzida para garantir a confiabilidade dos resultados. A análise revelou menor incerteza a 12 m/s, com valores de coeficiente de potência (C_p) de 3,8%, coeficiente de torque (C_t) 3,1% e tip speed ratio (TSR) de 2,2%. Os resultados demonstram a adequação do dinamômetro para ensaios em túnel de vento nesta velocidade.

Palavras chave: Turbina; Savonius; Instrumentação de túnel de vento

ABSTRACT

The present work aimed at the development and analysis of a dynamometer for characterizing the performance of Savonius turbines in a controlled wind tunnel environment. The dynamometer, designed to measure torque and power, was used to evaluate a scaled-down turbine with a 60 mm diameter, dimensioned based on maximum values found in the literature for Savonius-type turbines. A detailed analysis of the measurement uncertainties was conducted to ensure the reliability of the results. The analysis revealed lower uncertainty at 12 m/s, with coefficient of power (C_p) of 3.8%, coefficient of torque (C_t) of 3.1%, and tip speed ratio (TSR) of 2.2%. The results demonstrate the suitability of the dynamometer for wind tunnel tests at this velocity.

Keywords: Turbine; Savonius; Wind tunnel instrumentation



INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com as mudanças climáticas e a busca por alternativas energéticas mais limpas têm impulsionado significativamente o desenvolvimento e a implementação de tecnologias de energia renovável em escala global. Dentro desse cenário, o Brasil tem emergido como um ator relevante no setor de energia eólica ^[1], mostrando um notável crescimento nos últimos anos. Em 2023, o país registrou um expressivo aumento de 18,79% em sua capacidade instalada de energia eólica, o que o colocou na posição de terceiro maior instalador de energia eólica em solo (onshore) em todo o mundo ^[2]. Atualmente, a energia eólica desempenha um papel crucial na matriz energética brasileira, representando 15,2% do total e se consolidando como a segunda maior fonte de energia do país ^[2].

Desse modo, a crescente integração de energia renovável variável (ERV) no sistema elétrico brasileiro apresenta desafios e oportunidades. Por um lado, a maior penetração de fontes como solar e eólica pode aumentar a variabilidade da carga e exigir soluções para o equilíbrio entre oferta e demanda. Por outro lado, a ERV pode contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa ^[2]. Nesse contexto, a descentralização da geração de energia emerge como uma estratégia promissora para aumentar a segurança energética, reduzir as perdas de transmissão e distribuição e promover a participação ativa dos consumidores^[2].

Assim, a utilização de turbinas eólicas de eixo vertical Savonius apresenta-se como uma alternativa interessante para diversificar e descentralizar a matriz de energia eólica brasileira. Essas turbinas, ideais para geração de energia em pequena escala e aplicações isoladas da rede (off-grid), oferecem baixo custo de fabricação e instalação, além de alta confiabilidade. Operando por arrasto aerodinâmico, funcionam com ventos de baixa velocidade e em qualquer direção, dispensando sistemas de controle. Sua baixa necessidade de manutenção e operação silenciosa facilitam a instalação em telhados, edifícios, torres de comunicação e áreas rurais. A versatilidade do sistema permite ainda a integração com sistemas fotovoltaicos em cogeração ^[3-6].

Desta forma, o presente trabalho teve como objetivo dimensionar e analisar as incertezas de um dinamômetro para a caracterização experimental de diferentes variações



de turbinas eólicas Savonius em escala, utilizando o túnel de vento do laboratório de engenharia mecânica da Universidade Federal de Santa Maria, Campus Cachoeira do Sul.

MATERIAIS E MÉTODOS

O túnel de vento utilizado para as análises possui uma seção de testes com 315 mm de diâmetro e uma velocidade máxima de operação de 12 m/s. Visando minimizar as distorções nos resultados decorrentes da aceleração do fluido ao redor do corpo de prova, a área transversal bloqueada pela turbina deve ser limitada a menos de 5% da área total da seção de testes, como mostrado por Ross ^[7]. Atendendo a essa exigência, as análises foram realizadas em uma turbina Savonius convencional com um diâmetro de 60 mm e uma razão de aspecto unitária ($H/D = 1$) correspondendo a uma razão de bloqueio de 4,62%.

Uma vez que o sistema experimental emprega uma turbina em escala reduzida, a caracterização de seu desempenho requer a utilização de coeficientes adimensionais. O Tip Speed Ratio (TSR), apresentado na Equação 1, relaciona a velocidade do escoamento de ar com a velocidade da ponta da pá da turbina. Adicionalmente, os coeficientes de potência (C_p) e torque (C_t), definidos pelas Equações 2 e 3 ^[3, 4], são utilizados para quantificar a eficiência da turbina na conversão da energia eólica em potência mecânica e torque, respectivamente.

$$TSR = \frac{\omega R}{V} \quad (1)$$

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

$$C_t = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho AV^2 R} \quad (3)$$

Em que ω representa a velocidade angular, R o raio da turbina, V a velocidade do escoamento de ar, T o torque produzido pela turbina, ρ a massa específica do ar e A a área da seção transversal da turbina.



Na metodologia proposta neste estudo, a turbina instalada na seção de testes do túnel de vento é capaz de atingir velocidades de até 12 m/s, sendo acoplada a um gerador de campo permanente montado em balanço, o qual possui um braço de alavanca fixo de 30 mm. Dessa forma, ao variar a carga nos terminais do gerador, sua montagem em balanço resulta em uma força de reação que se opõe ao movimento da turbina. Esse momento de reação à frenagem é quantificado por meio de uma célula de carga conectada ao braço de alavanca do gerador. A velocidade angular do eixo da turbina é, por sua vez, determinada por um sensor de rotação H206, acionado pela passagem sequencial de um disco encoder com quatro aberturas. Os dados coletados são registrados por uma placa de prototipagem Arduino R4, e a configuração do sistema de medição é detalhada na Figura 1.

É importante ressaltar que a caracterização da turbina em termos de seus coeficientes adimensionais, definidos nas Equações 1 a 3, é possível através da medição exclusiva do torque e da velocidade angular gerados.

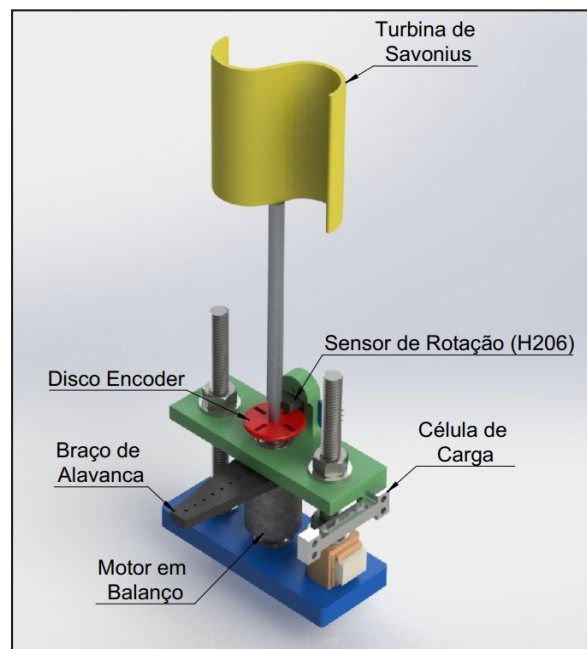


Figura 1 – Dinamômetro proposto

Fonte: Autores (2025)



É importante ressaltar que a caracterização da turbina em termos de seus coeficientes adimensionais, definidos nas Equações 1 a 3, é possível através da medição exclusiva do torque e da velocidade angular gerados.

A análise das incertezas inerentes ao sistema de medição foi conduzida seguindo o procedimento estabelecido por Kline e McClintock ^[8], sendo apresentada na Equação 4. Essa análise foi aplicada a cada um dos coeficientes adimensionais previamente descritos nas Equações 1 a 3.

$$U_y = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial x_1} u_1\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2} u_2\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_3} u_3\right)^2 + \dots} \quad (4)$$

Em que y representa a grandeza de interesse (C_p , C_t ou TSR), x_i as variáveis que possuem incerteza significativa (V , T , ω , R) e u_i as respectivas incertezas dos dispositivos utilizados.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir dos valores máximos de coeficiente de potência ($C_p = 0,31$), coeficiente de torque ($C_t = 0,51$) e *Tip Speed Ratio* ($TSR = 1,2$) para turbinas Savonius encontrados na literatura ^[3, 4], e utilizando as relações matemáticas expressas nas Equações 1 a 3, foram calculados os valores máximos de velocidade angular e força que o sistema pode atingir, os quais são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Funções e seus valores

Grandeza	Valor máximo
Velocidade angular	480 rad/s
Força (em relação ao braço de alavanca de 30 mm)	0,01667 kgf

A partir dos dados da Tabela 1, procedeu-se ao dimensionamento dos componentes do sistema de medição. O sistema emprega uma célula de carga com



capacidade de 0,050 kgf, amplificada por um módulo HX711 de 24 bits. A placa de prototipagem Arduino R4 foi configurada para operar a uma taxa de amostragem de, no mínimo, 310 Hz, assegurando a correta detecção dos quatro pulsos por revolução gerados pelo sensor de rotação na configuração implementada.

A aplicação da Equação 4 para a análise de incertezas em uma condição de baixa velocidade de vento (6 m/s), seguindo a abordagem de Roy e Saha^[3], resultou em incertezas combinadas de 7,5% para C_p , 5,8% para C_t e 4,4% para TSR. Em contraste, a mesma análise realizada para uma velocidade de vento de 12 m/s indicou incertezas de 3,8% para C_p , 3,1% para C_t e 2,2% para TSR. A inspeção das Equações 1 a 4 sugere que a maior magnitude das incertezas em baixas velocidades é influenciada pelos coeficientes C_p e C_t , os quais mostram uma dependência mais acentuada da velocidade do escoamento.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O dimensionamento e a análise de incerteza do dispositivo desenvolvido mostraram a maior confiabilidade do sistema proposto em velocidades de vento mais elevadas, especificamente a 12 m/s. Nessa condição, as incertezas obtidas para os coeficientes adimensionais de potência (C_p), torque (C_t) e Tip Speed Ratio (TSR) foram de 3,8%, 3,1% e 2,2%, respectivamente, valores considerados adequados para a medição proposta. Esses resultados indicam que o dispositivo pode ser fabricado e utilizado para o ensaio de turbinas eólicas de eixo vertical em escala no túnel de vento disponível no Campus da Universidade Federal de Santa Maria em Cachoeira do Sul

AGRADECIMENTOS

À Projelmec – Ventilação Industrial – por fornecer o túnel de vento.

REFERÊNCIAS

- [1] International Energy Agency. (2024). Renewables 2023. www.iea.org
- [2] Associação Brasileira de Energia Eólica e Novas Tecnologias. (2024). Boletim Anual 2023.



- [3] Roy, S. & Saha, U. K. (2015). Wind tunnel experiments of a newly developed two-bladed Savonius-style wind turbine. *Appl Energy* 137, 117–125
- [3] Akwa, J. V., Viemo, H. A. & Petry, (2012). A. P. A review on the performance of Savonius wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* vol. 16 3054–3064 Preprint at <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.056>
- [4] Alom, N. & Saha, U. K. (2019). Influence of blade profiles on Savonius rotor performance: Numerical simulation and experimental validation. *Energy Convers Manag* 186, 267–277
- [5] Abraham, J. P., Plourde, B. D., Mowry, G. S., Minkowycz, W. J. & Sparrow, E. M. (2012). Summary of Savonius wind turbine development and future applications for small-scale power generation. *Journal of Renewable and Sustainable Energy* vol. 4 Preprint at <https://doi.org/10.1063/1.4747822>
- [6] Ross, I. J. (2010) wind tunnel blockage corrections: an application to vertical-axis wind turbines.
- [7] Beckwith, T. G., Marangoni, R. D. & Lienhard V, J. H. *Mechanical Measurements*. (Pearson Learning Solutions, 2011).
- [8] Kline S.J., McClintock F.A., (1953) Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments, *Mechanical Engineering*, 75, 3-8,

Sobre os autores:

Mathias Verdum de Almeida

Universidade Federal de Santa Maria, Cachoeira do Sul, RS, Brasil
Email: mathias.verdum@acad.ufsm.br - <https://orcid.org/0009-0002-5371-9441>

Charles Rech

Universidade Federal de Santa Maria, Cachoeira do Sul, RS, Brasil
Email: charles.rech@ufsm.br - <https://orcid.org/0000-0001-8523-6300>

Arthur Sandri Lunkes

Universidade Federal de Santa Maria, Cachoeira do Sul, RS, Brasil
Email: arthur.lunkes@acad.ufsm.br - <https://orcid.org/0009-0005-7750-8421>

André Francisco Caldeira

Universidade Federal de Santa Maria, Cachoeira do Sul, RS, Brasil
Email: andre.caldeira@ufsm.br - <https://orcid.org/0000-0002-4939-2709>

Cristiano Frandalozo Maidana

Universidade Federal de Santa Maria, Cachoeira do Sul, RS, Brasil
Email: cristiano.maidana@ufsm.br - <https://orcid.org/0000-0003-3137-6177>

Simone Ferigolo Venturini

Universidade Federal de Santa Maria, Cachoeira do Sul, RS, Brasil
Email: sfventurini@gmail.com - <https://orcid.org/0000-0002-9439-0008>

Como citar este artigo

Almeida, M. V. de, Rech, C, Lunkes, A. S, Caldeira, A. F, Maidana, C. F, & Venturini, S. F. (2025) Dinamômetro para Medição do Desempenho de Turbinas Eólicas de Eixo Vertical em Túnel de Vento. *JESTA*, Cachoeira do Sul, (3) e92121, Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/JESTA/article/view/92121/version/82678>.