

Aplicações tecnológicas

Dimensionamento de um sistema de medição de potência de turbina eólica em túnel de vento

Design of a wind turbine power measurement system in a wind tunnel

Charles Rech¹ , Simone Ferigolo Venturini¹ , Cristiano Frandaloso Maidana¹ ,
Andre Francisco Caldeira¹ , Mathias Verdum de Almeida¹ ,
Arthur Sandri Lunkes¹ , Maximiliano Silveira de Souza¹ 

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

RESUMO

Neste artigo é proposto o dimensionamento de um sistema de medição de potência e torque para turbinas eólicas. É verificada a resolução de medição, conforme equação de Kline Mc Klintock, considerando a incerteza da medição em uma célula de carga de 0,2%, com aplicação da força em uma distância conhecida de 3 cm e resolução de 1 mm e uma volta por rotação. Com base neste projeto, determinou-se que, com a instrumentação proposta, o túnel de vento permite medições de potência até 370 W para rotações até 1200 rpm e força de até 1 kgf aplicado a célula de carga proposta obtendo incerteza de 7,4 W, ou seja, em torno de 2%.

Palavras-chave: Turbinas eólicas; Túnel de vento; Dimensionamento de medição de torque e potência

ABSTRACT

This article proposes the design of a power and torque measurement system for wind turbines. The measurement resolution is verified according to the Kline Mc Klintock equation, considering the uncertainty measurement in a load cell of 0.2% with the application of force at 3 cm and a resolution of 1 mm, and one revolution per rotation. Based on this project, it was determined that with the proposed instrumentation, the wind tunnel allows measurements of power up to 370 W for rotations up to 1200 rpm and force up to 1 kgf applied to the proposed load cell, obtaining an uncertainty of 7.4 W, i.e., around 2%.

Keywords: Wind turbines; Wind tunnel; Torque and power measurement design



INTRODUÇÃO

Com o aumento da população e dispositivos elétricos há, também, uma maior demanda de geração de energia elétrica, que tem sido um desafio constante, visto que há limitações das fontes quanto a serem termoelétricas, nuclear e até mesmo hidrelétrica. Uma fonte alternativa que vem crescendo, dentre outras, é a eólica, que utiliza energia disponível nas correntes de ar para converter em energia elétrica.

A Siemens Gamesa, por exemplo, no final do ano 2022 fabricou a maior e mais poderosa turbina eólica do planeta, com recorde de produção de 359 MWh em 24h [11]. No mesmo ano, a empresa Power Collective desenvolve uma turbina eólica para telhado capaz de gerar energia renovável até nove vezes mais potência se comparada com turbinas eólicas similares [9].

Em 2023, uma empresa francesa produziu uma turbina eólica semelhante a uma árvore, que funciona com ventos fracos. As turbinas até então tradicionais funcionam somente com altas correntes de vento [7].

As turbinas eólicas que são instaladas em alto mar, conhecidas como offshore, são capazes de produzir mais energia, visto que não há barreiras e as velocidades dos ventos são, em média, maiores que no continente. Em setembro do ano de 2022, uma empresa norueguesa desenvolveu um novo tipo de turbina eólica Offshore contra rotativa que produz o dobro de energia com menos impacto ao meio ambiente [12].

No Brasil, segundo o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, em 2016 foi registado um pedido de licenciamento ambiental de instalação de turbina eólica offshore e um outro pedido em 2019. Já em 2020 foram registrados cinco pedidos, enquanto que em 2021 foram registrados quinze e em 2022, até o início mês de agosto, já tinham sido registrados 44 pedidos. [5]. É notório, portanto, que há um alto apelo ambiental e investimento na produção de energia elétrica proveniente da energia eólica.

No estado do Rio Grande do Sul, uma empresa da gigante Iberdrola estuda



investir em energia eólica no mar e hidrogênio verde. Controlada pelo grupo espanhol Iberdrola, a Neoenergia formalizará a sua intenção de investir na geração de energia eólica offshore no Rio Grande do Sul, com potencial de desenvolver juntamente um projeto de hidrogênio verde [6].

Para avaliação de modelos de turbinas faz-se necessário, portanto, o desenvolvimento de ferramentas para avaliação do seu desempenho. Este trabalho apresenta o dimensionamento da instrumentação de túnel de vento para caracterização do torque e potência de turbinas eólicas. O primeiro modelo a ser ensaiado é uma turbina do tipo Savonius, que após sua avaliação, é possível caracterizar a qualidade da instrumentação proposta a partir de resultados obtidos com suas devidas incertezas de medição.

MATERIAIS E MÉTODOS

Dados do túnel

O túnel de vento subsônico utilizado possui um acionamento composto por um ventilador axial modelo AC 500 com vazão nominal de 2,5 m³/s e 6 pás, as quais possuem um ângulo de inclinação de 24°. Sua fonte de alimentação é um motor trifásico com 1,0 CV de potência, 4 polos, rendimento de 81% e uma rotação nominal de 1715 rpm quando a frequência é 60 Hz. O sistema é formado por um bocal possuindo um ângulo de 30° e um comprimento de contração de 344 mm. Para minimizar os escoamentos secundários é utilizado uma câmara de estabilização formada por colmeias quadradas, com comprimento de 147 mm. Contém dois tubos de desenvolvimento, cada um com 1170 mm de comprimento, para que o escoamento siga de maneira atenuado na seção de testes. A seção de testes foi definida em um formato cilíndrico com comprimento de 578 mm e diâmetro de 300 mm (Figura 1). A área da seção de testes é de 0,545 m² e a velocidade é de até 35 m/s [10].

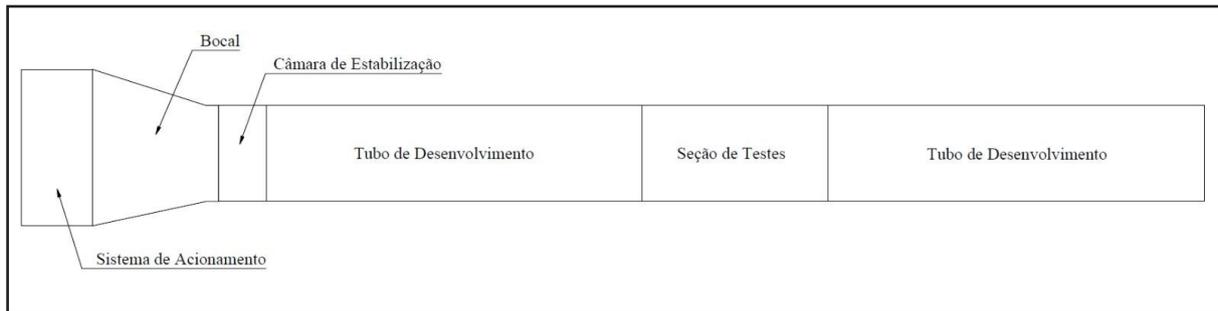


Figura 1. desenho esquemático do túnel de vento

Dados do modelo

Nas turbinas eólicas de eixo vertical o vento atinge perpendicularmente o eixo de rotação e transforma a energia cinética em energia mecânica que, posteriormente, pode ser convertida em energia elétrica. O modelo utilizado inicialmente para validação do projeto é uma turbina Savonius de duas pás, com 0,070 m tanto na largura, quanto na altura. Foi calculado uma potência máxima de 200 W a uma rotação em torno de 1200 rpm, considerando a velocidade de ponta da pá, com a velocidade do vento de 30 m/s [1,3]

Dados do escoamento

Considerando a temperatura de 20°C, a pressão atmosférica padrão de 101325 Pa e a constante padrão do ar de 287 J/kg.K, a massa específica do ar é da ordem de $\rho_{ar}=1,20 \text{ kg/m}^3$ e viscosidade absoluta de $\mu=1,79 \times 10^{-5} \text{ Pa.s}$. Nesse caso, o escoamento interno é classificado como turbulento, pois apresenta número de Reynolds, $Re=2,25 \times 10^5$, superior a $2,3 \times 10^5$. [4]

Incerteza do resultado

A medição de torque e potência é feita por um período mínimo de 60 segundos, em que é possível considerar um regime permanente do escoamento, visto que a variação ao longo do tempo é pequena. A determinação de tais grandezas são dependentes da resolução da medição de força aplicada a uma distância no dinamômetro e da



resolução da medição da rotação medida no fotoresistor. Cada valor medido tem sua incerteza e para estimar a incerteza geral, assume-se que cada incerteza é pequena o suficiente conforme a expansão de Taylor de primeira ordem. Sob essa aproximação, a incerteza total é uma função linear das variáveis independentes e essa abordagem foi estabelecida por S. J. Kline e F. A. McClintock em 1953 [2].

Metodologia

Segundo Plint [8], são encontrados diferentes métodos para a medição da potência onde a aplicação da carga ou frenagem, contrárias ao movimento do eixo, resultam em reações. Os valores dessas reações podem ser medidos através de células de carga conectadas ao eixo de rotação por meio de uma viga em balanço. Alternativamente, pode-se utilizar um dinamômetro que ao absorver o conjugado está atuando como freio, transformando trabalho mecânico em calor, ou seja, pela ação de correntes induzidas para representar cargas mecânicas. A diferença de atuação dá-se pela existência de medidas diretas de conjugado e/ou força realizadas no dinamômetro.

Para a instrumentação do túnel de vento é necessário, portanto, ligar os sensores de medição de vazão, rotação e força exercida no eletrogerador em um sistema de aquisição de dados e confeccionar um *software* para converter as variáveis lidas em grandezas físicas desejadas, que podem ser as de rotação, torque e potência. Logo, para medição de força é utilizada uma célula de carga de 1 kgf $\pm 0,2\%$, a qual converte a carga que atua sobre ela em saída elétrica, estando ligada, por meio de uma haste de 0,030 m $\pm 0,1$ mm, em um eletrogerador eletromagnético em balanço com potência máxima de 370 W (Figura 2).

Para o controle da velocidade de rotação do ventilador é utilizado um inversor de frequência Siemens Micromaster 6SE3116-8CB40, cuja amplitude varia de 0 até 65 Hz. Para medição de rotação utiliza-se um módulo de sensor ótico. Para medição de vazão utiliza-se um tubo de Pitot associado a um módulo de pressão do tipo



MPX piezo-resistivo. Os dados de rotação e força na célula de carga são adquiridos e processados por um conversor A/D Arduino e convertidos em potência, torque e rotação da turbina por meio de software.

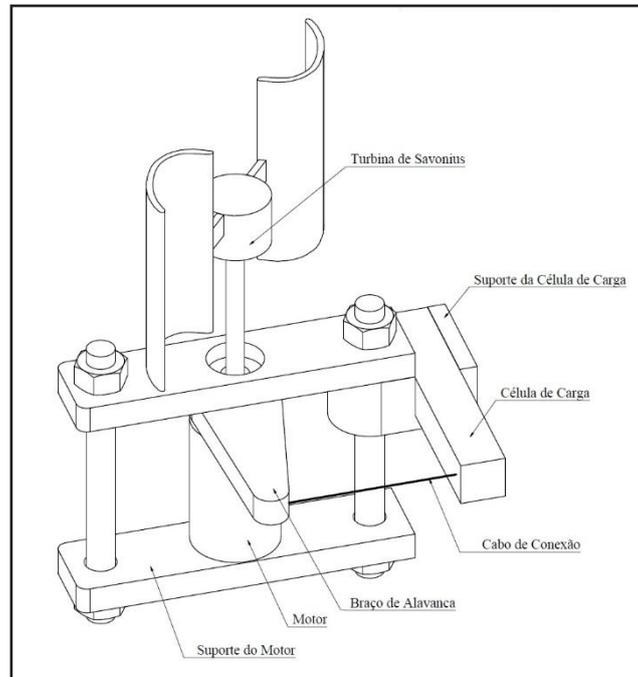


Figura 2. Desenho esquemático do sistema de medição.

CONCLUSÃO

Com o dimensionamento da instrumentação do túnel de vento verificou-se que é possível medir as grandezas pertinentes como torque e potência de uma turbina eólica utilizando um eletrogerador como freio. A célula de carga selecionada possui incerteza de 0,2% e a distância de aplicação da força de 0,1 mm. Considerando que o sensor de rotação tem resolução de uma medição por volta e com velocidade máxima da turbina de 1200 rpm, a incerteza da medição é da ordem de 0,5% conforme Kleine Mc Clintock [2], para potência máxima de 370 W. O objetivo de dimensionar a instrumentação do túnel de vento foi alcançado e cabe agora trabalhar na implementação para que seja disponibilizado para utilização em projetos que envolvam modelos de perfis aerodinâmicos como turbinas. Pretende-se, ao final deste trabalho, ter um túnel de



vento instrumentado para propiciar ensaios de modelos aerodinâmicos que pode ser para confecção de trabalhos de pesquisa, trabalhos de conclusão de curso, trabalhos de disciplinas, aulas de instrumentação e aulas de medições.

AGRADECIMENTOS

Ao programa FIPE 2022 pelo auxílio de bolsa IC para execução do projeto.

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

REFERÊNCIAS

- [1] Alé, J. A. V. (2012). Turbinas eólicas de eixo vertical. Centro de Energia Eólica (CE-EÓLICA), Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS).
- [2] Beckwith, T. G., Marangoni, R. D., and Leinhard, J. H. (1993). Mechanical Measurements. Reading: Addison-Wesley, 5th edition
- [3] Burton, Tony., Jenkins, N., Sharpe, D., and Bossanyi, E. (2011). Wind energy handbook. John Wiley & Sons.
- [4] Çengel, Y. A., and Ghajar, A. J. (2012). Transferência de calor e massa: uma abordagem prática. Rio de Janeiro: AMGH
- [5] Ibama (2022) http://www.ibama.gov.br/phocadownload/licenciamento/2022-08-11_Usinas_Eolicas_Offshore_Ibama.pdf (acesso em 21/02/2023)
- [6] GZH exclusivo <https://gauchazh.clicrbs.com.br/colunistas/giane-guerra/noticia/2022/08/empresa-da-gigante-iberdrola-estuda-investir-em-energia-eolica-no-mar-e-hidrogenio-verde-no-rs-cl7hh35gv000r0163is8ev28w.html> (acesso em 06/11/2022)
- [7] New Wind (2023) [https://clickpetroleoegas.com.br/turbina-eolica-inedita-em-formato-de-arvore-com-mais-de-50-microturbinas-promete-revolucionar-o-mercado/\(acesso em 21/02/2023\)](https://clickpetroleoegas.com.br/turbina-eolica-inedita-em-formato-de-arvore-com-mais-de-50-microturbinas-promete-revolucionar-o-mercado/(acesso%20em%2021/02/2023))
- [8] Plint, M, A., and Martyr, A. (1997). Engine Testing Theory and Practice. Butterworth-Heinemann.
- [9] Power Collective (2022) [https://clickpetroleoegas.com.br/empresa-cria-turbina-eolica-para-telhados-residenciais-que-geram-ate-9-vezes-mais-energia-que-modelos-tradicionais/\(acesso em 06/11/2022\)](https://clickpetroleoegas.com.br/empresa-cria-turbina-eolica-para-telhados-residenciais-que-geram-ate-9-vezes-mais-energia-que-modelos-tradicionais/(acesso%20em%2006/11/2022))
- [10] Rocha, B. S. (2020). Análise Numérica E Experimental do Arrasto Aerodinâmico para Verificação de Um Túnel De Vento. TCC- Curso de Engenharia Mecânica Universidade Federal de Santa Maria - Campus Cachoeira do Sul.
- [11] SIEMES 92022) [https://clickpetroleoegas.com.br/siemens-desbanca-a-gigante-general-electric-a-maior-e-mais-poderosa-turbina-eolica-do-planeta-bate-recorde-de-producao-de-359mw-em-24h-energia-de-18-milhao-de-km-para-carro-eletrico/\(acesso em 06/11/2022\)](https://clickpetroleoegas.com.br/siemens-desbanca-a-gigante-general-electric-a-maior-e-mais-poderosa-turbina-eolica-do-planeta-bate-recorde-de-producao-de-359mw-em-24h-energia-de-18-milhao-de-km-para-carro-eletrico/(acesso%20em%2006/11/2022))
- [12] World Wide Wind (2022) [https://clickpetroleoegas.com.br/empresa-norueguesa-desenvolve-novo-tipo-de-turbina-eolica-offshore-contrarotativa-que-produz-o-dobro-de-energia-com-menos-impacto-ao-meio-ambiente/\(acesso em 06/11/2022\)](https://clickpetroleoegas.com.br/empresa-norueguesa-desenvolve-novo-tipo-de-turbina-eolica-offshore-contrarotativa-que-produz-o-dobro-de-energia-com-menos-impacto-ao-meio-ambiente/(acesso%20em%2006/11/2022))



Sobre os autores:

Charles Rech

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

Simone Ferigolo Venturini

Universidade Federal de Santa Maria Cachoeira do Sul, RS, Brasil
E-mail: sfventurini@gmail.com - <https://orcid.org/0000-0002-9439-0008>
URL: <https://www.ufsm.br/laboratorios/limsec/>

Cristiano Frandaloso Maidana

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

Andre Francisco Caldeira

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

Mathias Verdum de Almeida

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

Arthur Sandri Lunkes

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

Maximiliano Silveira de Souza

Universidade Federal de Santa Maria Cachoeira do Sul, RS, Brasil
E-mail: maximiliano.silveira@acad.ufsm.br - <https://orcid.org/0009-0000-5236-0196>
URL: <https://www.ufsm.br/laboratorios/limsec/>

Como citar este artigo

Rech, C., Venturini, S. F., Maidana, C. F., Caldeira, A. F., Almeida, M. V., Lunkes, A. S., & Souza, M. S. Dimensionamento de um sistema de medição de potência de turbina eólica em túnel de vento. *JESTA*, Cachoeira do Sul, (2) e74539, Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/JESTA/article/view/74539>. Acessado em: dia mês abreviado. ano.