



## ENGENHARIAS

**Influência do número de pás no torque estático da turbina eólica Savonius*****Influence of the number of blades on the static torque of the Savonius wind turbine***Lucas Santin Bianchin<sup>1</sup>, Daniel Beck<sup>2</sup>, Denílson José Seidel<sup>3</sup>**RESUMO**

Turbinas eólicas são as responsáveis por converter a energia cinética do vento em energia mecânica, a qual é posteriormente convertida em energia elétrica por um gerador. Em geral, a turbina eólica do tipo Savonius apresenta como característica bons valores de coeficiente de torque estático, o que indica que a turbina é capaz de realizar a autopartida. O rotor Savonius é formado pelo conjunto de uma série de parâmetros geométricos e a alteração de um ou mais deles modifica o desempenho da turbina. Dessa forma, o objetivo principal deste trabalho é analisar com o auxílio da Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) a influência do número de pás no torque estático da turbina Savonius. Para isso, foram avaliados rotores com duas, três e quatro pás. As simulações de CFD foram realizadas utilizando o software Solidworks Flow Simulation 2016. Através da avaliação das simulações foi possível verificar que o aumento do número de pás diminuiu o torque estático da turbina Savonius, e conseqüentemente sua capacidade de autopartida.

**Palavras-chave:** Turbina eólica Savonius; Dinâmica dos fluidos computacional; torque estático; número de pás.

**ABSTRACT**

*Wind turbines are responsible for converting the kinetic energy of the wind into mechanical energy, which is later converted into electrical energy by a generator. In general, the Savonius wind turbine has good values of static torque coefficient, which indicates that the turbine is capable of self-starting. The Savonius rotor is formed by the set of a series of geometric parameters and changing one or more of them changes the performance of the turbine. In this way, the main objective of this research is to analyze with the aid of Computational Fluid Dynamics (CFD) the influence of the number of blades in the static torque of the Savonius turbine. For this, rotors with two, three and four blades were evaluated. CFD simulations were performed using Solidworks Flow Simulation 2016 software. Through the simulations evaluation it was possible to verify that the increase of the number of blades decreases the static torque of the Savonius turbine, and consequently its capacity of self-starting.*

**Keywords:** savonius wind turbine; computational fluid dynamics; static torque; number of blades.

<sup>1</sup> Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-rio-grandense – IFSul, Câmpus Passo Fundo/RS – Brasil. E-mail: [lucas.sbianchin@hotmail.com](mailto:lucas.sbianchin@hotmail.com)

<sup>2</sup> Idem. E-mail: [daniel.beck@passofundo.ifsul.edu.br](mailto:daniel.beck@passofundo.ifsul.edu.br)

<sup>3</sup> Idem. E-mail: [denilson.seidel@passofundo.ifsul.edu.br](mailto:denilson.seidel@passofundo.ifsul.edu.br)



## 1. INTRODUÇÃO

A energia eólica é resultante do movimento de massas de ar devido ao aquecimento irregular na crosta terrestre. O seu uso pelo homem é bastante antigo, desde quando se usava o vento para movimentar os barcos, a maioria à vela. (ALBUQUERQUE; MATOS, 2016).

O elevado desenvolvimento da tecnologia de conversão da energia eólica em outras formas de energia (como, por exemplo, a elétrica) é notável nos últimos anos, tanto pelo desenvolvimento de rotores maiores, como pelo aumento da capacidade de produção de eletricidade instalada mundialmente. Enquanto em 1982 a maior turbina eólica instalada apresentava diâmetro de rotor de 15 metros e capacidade de 55 kW, em 2010 já existiam turbinas com rotor de 126 metros e capacidade de 7500 kW. (GASCH *et al.*, 2011).

Consoante Gawade e Patil (2015), é estimado que no planeta Terra existam cerca de 10 milhões de MW de energia eólica que podem ser extraídos. Segundo a Global Wind Energy Council (GWEC), a capacidade global instalada de produção de energia elétrica a partir de energia eólica cresceu de 23900 MW, em 2001, para 539581 MW, em 2017.

As turbinas eólicas apresentam inicialmente duas classificações quanto à orientação de seu eixo de rotação: ou são turbinas eólicas de eixo vertical (TEEVs), em que o eixo de rotação da turbina é perpendicular ao fluxo de vento; ou são turbinas eólicas de eixo horizontal (TEEHs), quando o eixo de rotação da turbina é paralelo ao escoamento. (WENEHUBUN *et al.*, 2015).

Um dos tipos mais conhecidos de TEEV é a Savonius, a qual tem inúmeras vantagens, como poder operar em qualquer direção do vento, ter alto torque de partida e uma geometria construtiva bastante simples, tendo, no entanto, baixa eficiência aerodinâmica. (JEON *et al.*, 2015). Outro tipo de TEEV, chamada de Darrieus, é a que apresenta as melhores eficiências, entretanto, não é capaz de realizar a autopartida. (ALBUQUERQUE; MATOS, 2016).

Um arranjo interessante de TEEV é uma combinação entre as turbinas Savonius e Darrieus e tem por objetivo unir as características de ambas as turbinas para obter um rotor com bom torque estático, ou seja, capaz de realizar a autopartida (característica da turbina Savonius), e também tenha bom desempenho aerodinâmico (característica da turbina Darrieus). No entanto, ainda existem poucos estudos relacionados a essa configuração de rotor e mais conhecimento é necessário para viabilizar o uso desse tipo de turbina. (CHAWLA *et al.*, 2015; ALBUQUERQUE; MATOS, 2016).

Em relação à capacidade de autopartida da turbina Savonius, alguns parâmetros geométricos são fundamentais para um bom desempenho. Dentre os possíveis parâmetros, um dos mais importantes é o número de pás. (AKWA, 2010; ALI, 2013; KOTHE, 2016).

Ali (2013) estudou experimentalmente a influência do número de pás no desempenho de autopartida de rotores Savonius, comparando turbinas com duas e com três lâminas. Chegou à conclusão de que o aumento do número de pás faz com que ocorra perda de eficiência.



Ainda, o aumento do número de pás em um rotor Savonius diminui as variações do torque em relação às suas posições angulares. Isso ocorre devido ao aumento da probabilidade de existir uma pá favorável ao escoamento. No entanto, a existência de maior número de pás também faz com que ocorra um efeito cascata, em que cada pá acaba interferindo no escoamento que deveria ir para a seguinte, diminuindo o valor do coeficiente de torque. (AKWA, 2010; KOTHE, 2016).

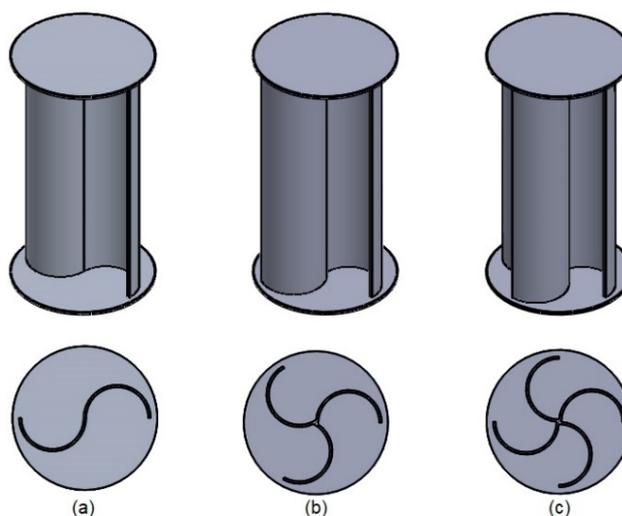
Fundamentado nisso, este estudo busca responder a pergunta: Como o aumento do número de pás impacta no torque estático da turbina Savonius, e conseqüentemente, em seu desempenho de autopartida?

Para responder essa questão realizaram-se simulações de Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) utilizando a plataforma *Flow Simulation* do *software* Solidworks 2016 para obter os valores de torque estático referentes a arranjos de turbinas Savonius com duas, três e quatro pás. A partir desses dados foi possível obter uma função que relacione o número de pás e o coeficiente de torque estático para inferir a capacidade de autopartida de turbinas Savonius com maior número de pás.

## 2. METODOLOGIA

O estudo da influência do número de pás consistiu na análise de turbinas Savonius com duas, três e quatro lâminas. Todos esses modelos foram utilizados com sobreposição nula, um estágio e placas nas extremidades com diâmetro 1,1 vez superior ao do rotor, que, segundo Akwa (2010), maximiza o desempenho da turbina. A Figura 1 mostra os diferentes tipos de turbinas Savonius simulados quando se variou o número de pás.

**Figura 1** - Diferentes tipos de turbinas Savonius analisadas em relação ao número de pás: (a) duas pás; (b) três pás; (c) quatro pás.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Todas as simulações numéricas partiram de uma turbina com área de seção do rotor de  $0,025 \text{ m}^2$  e razão de aspecto de 2, além de possuírem uma espessura de parede de 2 mm, tanto para as pás, quanto para as placas nas extremidades. A justificativa da escolha de uma razão de aspecto de 2 vem de Akwa (2010), o qual afirma que a partir



desse valor a turbina começa a apresentar maior eficiência energética. Já, a fundamentação do uso de uma área de seção do rotor de  $0,025 \text{ m}^2$  surge de dois argumentos: o primeiro, que essa área, juntamente com a razão de aspecto de 2, proporciona dimensões para a turbina que facilmente poderão ser reproduzidas em protótipos, com o intuito de, em trabalhos futuros, comparar os resultados obtidos neste estudo com experimentação em túnel de vento; e o segundo, se refere ao tamanho do domínio computacional utilizado, que depende das dimensões do rotor, ou seja, quanto maior forem as dimensões do rotor, maior deverão ser as dimensões do domínio computacional, e conseqüentemente, maior será o tempo de processamento.

Com o propósito de melhor avaliar os valores de torque estático obtidos, cada perfil de rotor foi simulado para diferentes posições angulares em relação à direção do fluxo de vento, consoante o que é mostrado na Figura 2, em que  $\theta$  representa o ângulo entre o eixo do rotor e o escoamento e, dessa forma, foi calculado um valor de torque estático médio. Da mesma maneira que em Akwa (2010),  $\theta$  foi variado de 30 em 30 graus.

**Figura 2** – Posição angular do rotor em relação à direção do escoamento.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Para a realização das simulações foi utilizado o *software* Solidworks 2016, um programa computacional desenvolvido pela Dassault Systèmes, sendo um completo *software* de modelagem 3D. Ele apresenta uma plataforma denominada *Flow Simulation* que permite que sejam realizados cálculos de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) utilizando o Método dos Volumes Finitos para que sejam estudados escoamentos e feitas análises do desempenho dos produtos desenvolvidos no *software*. (SOLIDWORKS, 2016).

Com o objetivo de obter os resultados desejados, o *software* Solidworks resolve simultaneamente as equações de continuidade, de conservação do movimento, equações de estado e as duas equações referentes ao modelo de turbulência utilizado pelo programa, denominado de  $k-\epsilon$  (em que  $k$  representa a energia cinética turbulenta e  $\epsilon$  a taxa de dissipação turbulenta) com funções de amortecimento, o que permite que sejam analisados fluxos laminares, transitórios ou turbulentos. (SOLIDWORKS, 2016).

Conforme Çengel e Cimbala (2012), o modelo de turbulência  $k-\epsilon$  requer que sejam especificados os valores da energia cinética turbulenta ( $k$ ) e da taxa de dissipação turbulenta ( $\epsilon$ ), entretanto, muitas vezes é mais apropriado especificar a intensidade da turbulência (IT) e a escala de comprimento turbulento ( $l$ ). A intensidade da turbulência representa a razão entre as velocidades turbulentas e as velocidades médias, enquanto a escala de comprimento turbulento significa a escala de



comprimento dos vórtices gerados pela turbulência.

Ainda de acordo com Çengel e Cimbala (2012), na falta de informações sobre o comportamento do escoamento, pode-se usar valores de “IT” como 10% e de “l” como metade do comprimento característico do objeto que experimenta o fluxo. Dessa forma, para a realização das simulações o valor da escala de comprimento turbulento utilizado foi de metade do diâmetro da turbina, ou seja, 55,9017 mm.

Outros dados de entrada são necessários para a realização das simulações, como os de velocidade não perturbada, temperatura e pressão do ar. Os valores utilizados foram de 7 m/s para a velocidade, 101325 Pa para a pressão e 293,15 K para a temperatura. A velocidade e a pressão servirão como condições de contorno para a execução dos cálculos pelo *software* e são condições ambientais adotadas no Solidworks (2016).

O valor de 7 m/s para a velocidade foi o adotado por estar entre as velocidades utilizadas para avaliar o torque estático em outros trabalhos. Roy e Saha (2013) avaliaram o torque estático para as velocidades de 5,57 m/s, 6,69 m/s, 8,35 m/s e 10,44 m/s, De Oliveira (2014) utilizou velocidade de 6 m/s e Kothe (2016) utilizou 7,6 m/s. Além disso, Hayashi *et al.* (2005) verificaram que a velocidade do escoamento tem pouca influência nos valores do coeficiente de torque estático. Ainda, foram utilizadas a pressão atmosférica de 101325 Pa e a temperatura de 293,15 K, visto que esses são os valores considerados padrões ao nível do mar, de acordo com Shepherd e Zhang (2017).

A partir dessas considerações, avaliou-se a influência do número de pás no torque estático da turbina Savonius.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 1 exibe os valores do coeficiente de torque estático obtidos com as simulações de CFD para as três configurações de turbinas Savonius com diferentes números de pás em função da posição angular, com os parâmetros estabelecidos já relatados.

**Tabela 1** – Valores de coeficiente de torque estático (CT) obtidos com as simulações das diferentes posições angulares  $\rho$ / três configurações de número de pás analisadas.

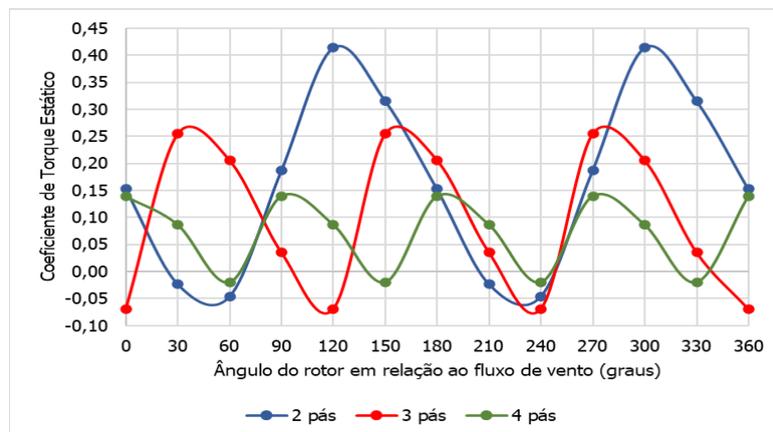
Posição angular	Coeficiente de Torque Estático ( $C_T$ )		
	Duas pás	Três pás	Quatro pás
0°	0.152507	-0.0698748	0.138935
30°	-0.0234346	0.254653	0.0867918
60°	-0.0467559	0.206212	-0.0194391
90°	0.186476	0.035484	0.138935
120°	0.414227	-0.0698748	0.0867918
150°	0.316043	0.254653	-0.0194391
Média de 360°	0.165433	0.0930423	0.0741605

Fonte: Elaborada pelos autores.



Os dados do coeficiente de torque estático da Tabela 1 aparecem graficamente em função da posição angular na Figura 3 para os três diferentes números de pás. Conforme pode ser observado na Figura 3, aumentar o número de pás proporciona a diminuição da amplitude do torque estático, diminuindo também a sua oscilação, conforme afirmam Akwa (2010) e Kothe (2016). Além disso, devido à diferença dos ciclos de torque estático para as diferentes configurações de turbinas Savonius em relação ao número de pás, é possível observar que, conforme se aumenta o número de pás, se aumenta também o número de picos e de vales de torque estático.

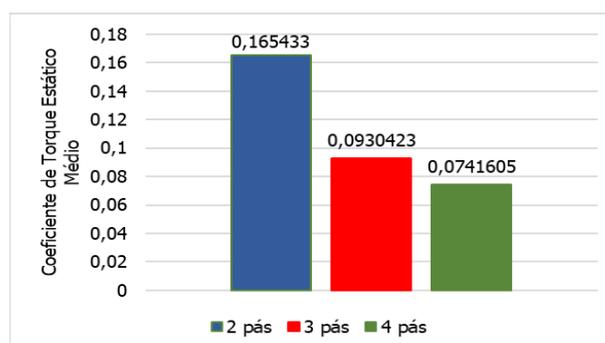
**Figura 3** – Coeficiente de torque estático em função da posição angular para as diferentes configurações de número de pás analisadas.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Ali (2013) verificou em um estudo experimental em túnel de vento que ao se aumentar o número de pás da turbina Savonius de duas para três ocorre perda de desempenho de autopartida, ou seja, o torque estático diminui. A partir das simulações realizadas neste trabalho, além de confirmar numericamente o resultado obtido por Ali (2013), também foi observado que o aumento de pás da turbina Savonius para quatro faz diminuir ainda mais o torque estático do rotor eólico, conforme ilustrado na Figura 4. A partir disso infere-se uma tendência de que à medida que se aumenta o número de pás, obtém-se menores valores de torque estático para a turbina Savonius.

**Figura 4** – Variação do coeficiente de torque estático médio de acordo com o número de pás da turbina Savonius.



Fonte: Elaborada pelos autores.



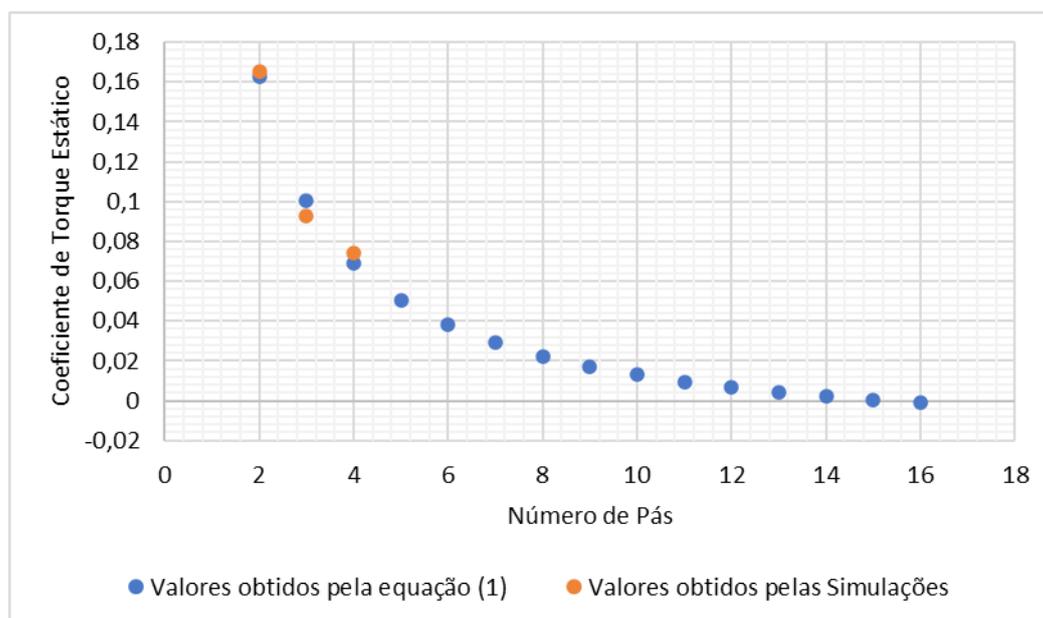
Como pode ser observado na Figura 4, o aumento do número de pás faz com que seja prejudicada a capacidade de auto partida da turbina. Aumentar o número de pás de duas para três faz com que o torque estático seja diminuído em 43,76%, e em 55,17% quando se compara as condições com duas e com quatro pás. Segundo Kothe (2016), isso ocorre porque quando se aumenta o número de pás, eleva-se também a chance de uma pá interferir no escoamento que deveria ir para a seguinte, fazendo com que a eficiência de autopartida seja prejudicada.

Com os dados obtidos através das simulações no *software* Solidworks 2016 foi possível obter a equação (1), a qual relaciona o coeficiente de torque estático da turbina Savonius e o número de pás.

$$C_{TE} = -0,02453209 + \frac{0,3749834}{n}, \forall n \in \mathbb{N} / n > 1 \quad (1)$$

Na equação (1),  $C_{TE}$  representa o coeficiente de torque estático e  $n$  representa o número de pás da turbina eólica. A equação (1) foi obtida pelo Método dos Mínimos Quadrados. Esse método, segundo Chapra e Canale (2016), consiste em obter uma reta (ou uma curva linearizada) que melhor se ajuste um conjunto de dados, utilizando como critério a minimização da soma dos quadrados do erro (distância vertical entre a curva e os pontos de dados). Uma maneira de medir a qualidade do ajuste é por meio do coeficiente de determinação, um número compreendido entre 0 e 1, de forma que “Quanto mais próximo o coeficiente de determinação estiver da unidade, melhor será o ajuste”. (BARROSO *et al.*, 1987, p. 330). Para a equação (1), o coeficiente de determinação obtido foi 0,9816. A Figura 5 apresenta graficamente alguns valores do coeficiente de torque estático em função do número de pás obtidos com a equação (1).

**Figura 5** - Coeficiente de torque estático em função do número de pás e comparação gráfica entre os dados obtidos pelas simulações e aqueles ajustados pela equação (1).



Fonte: Elaborada pelos autores.



A partir da Figura 5 podemos observar uma tendência de comportamento do coeficiente de torque estático à medida que se aumenta o número de pás. Quanto maior o número de lâminas da turbina Savonius, menor deve ser o torque estático, o que indica que para obter-se melhor desempenho de autopartida deve-se optar por um rotor Savonius de duas pás.

#### 4. REFERÊNCIAS

- AKWA, J. V. **Análise aerodinâmica de turbinas eólicas Savonius empregando dinâmica dos fluidos computacional**. 2010. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.
- ALBUQUERQUE, I. M.; MATOS, F. F. S. A characterization of vertical axis wind turbines. **IEEE Latin America Transactions**, v.14, n.10, p.4255-4260, 2016.
- ALI, M. H. Experimental comparison study for Savonius wind turbine of two & three blades at low wind speed. **International Journal of Modern Engineering Research**, v.3, n.5, p.2978-2986, 2013.
- BARROSO, L. C. *et al.* **Cálculo Numérico com aplicações**. 2. ed. São Paulo: HARBRA, 1987.
- CHAPRA, S. C.; CANALE, R. P. **Métodos numéricos para engenharia**. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2016.
- ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos fluidos: fundamentos e aplicações**. Porto Alegre: AMGH, 2012.
- CHAWLA, S.; CHAUHAN, A.; BALA, S. Parametric study of hybrid Savonius-Darrieus turbine. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON RECENT ADVANCES IN ENGINEERING & COMPUTATIONAL SCIENCES (RAECS), 2., Chandigarh, 2015. **Anais...** Chandigarh: Panjab University, 2015.
- OLIVEIRA, C. P. **Análise do desempenho de uma turbina Savonius helicoidal com torção de 180° empregando simulação numérica**. 2014. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.
- GASCH, R.; TWELE, J.; OHDE K. Introduction to wind energy. In: GASCH, R.; TWELE, J. (Org.). **Wind power plants: fundamentals, design, construction and operation**. 2. ed. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011. p.1-14.
- GAWADE, S. G.; PATIL, D. S. Comparative study of a single stage Savonius with a combined Savonius-three bladed Darrieus. **International Journal for Technological Research In Engineering**, v.2, n.5, p.542-545, 2015.
- GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. **Global wind statistics 2017**. 2018.
- HAYASHI, T.; LI, Y.; HARA, Y. Wind tunnel tests on a different phase three-stage Savonius rotor. **JSME International Journal**, v.48, n.1, p.9-16, 2005.



JEON, K. S. *et al.* Effects of end plates with various shapes and sizes on helical Savonius wind turbines. **Renewable Energy**, v.79, n.1, p.167-176, 2015.

KOTHE, L. B. **Estudo comparativo experimental e numérico sobre o desempenho de turbinas Savonius helicoidal e de duplo-estágio**. 2016. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

ROY, S.; SAHA, U. K. Computational study to assess the influence of overlap ratio on static torque characteristics of a vertical axis wind turbine. **Procedia Engineering**, v.51, p.694-702, 2013.

SHEPHERD, W.; ZHANG, L. **Electricity generation using wind power**. 2. ed. Singapore: World Scientific, 2017.

SOLIDWORKS. **Flow simulation 2016 technical reference**. 2016.

WENEHEBUBUN, F.; SAPUTRA, A.; SUTANTO, H. An experimental study on the performance of Savonius wind turbines related with the number of blades. **Energy Procedia**, v.68, p.297-304, 2015.

Submetido em: **13/06/2019**

Aceito em: **10/09/2020**