



ENGENHARIAS

Influência do número de estágios no torque estático da turbina eólica Savonius***Influence of the number of stages on the static torque of the Savonius wind turbine***Lucas Santin Bianchin¹, Daniel Beck², Denílson José Seidel³**RESUMO**

A energia eólica para a geração de eletricidade cresceu muito nos últimos anos. Para sua extração são utilizadas turbinas eólicas, as quais convertem a energia cinética do vento em energia mecânica, que posteriormente é convertida em energia elétrica por um gerador. Dentre as turbinas de eixo vertical pode-se dar destaque àquelas do tipo Savonius. Os rotores Savonius apresentam vários parâmetros geométricos que influenciam no seu desempenho, dentre eles o número de estágios, e atualmente estão sendo realizados diversos trabalhos de Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) para avaliar a eficiência de diferentes configurações. Dessa forma, o objetivo principal deste trabalho é analisar com o auxílio da CFD a influência de diferentes números de estágios no torque estático da turbina Savonius. Para isso, foram avaliados rotores com um, dois e três estágios. As simulações de CFD foram realizadas utilizando o software *SolidWorks Flow Simulation 2016*, o qual resolve as equações de conservação utilizando o modelo de turbulência $k-\epsilon$ com funções de amortecimento e o método de discretização por Volumes Finitos. Através da avaliação das simulações foi possível definir que o rotor com um estágio é o que proporciona maior valor de torque estático à turbina Savonius, entretanto o aumento do número de estágio faz com que se diminua a dependência do rotor em relação à direção do escoamento.

Palavras Chave: Turbina eólica Savonius; dinâmica dos fluidos computacional; torque estático; número de estágios.

ABSTRACT

Wind power for electricity generation has grown a lot in recent years. For its extraction wind turbines are used, which convert the kinetic energy of the wind into mechanical energy, which later is converted into electric energy by a generator. Among the turbines of vertical axis can be emphasized those of the type Savonius. The Savonius rotors present several geometric parameters that influence their performance, among them the number of stages, and several Computational Fluid Dynamics (CFD) researches have been performed to evaluate the efficiency of different configurations. Thus, the main objective of this work is to analyze with the support of CFD the influence of different numbers of stages in the static torque of the

¹ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-rio-grandense – IFSul, Câmpus Passo Fundo/RS – Brasil. E-mail: lucas.sbianchin@hotmail.com

² Idem. E-mail: daniel.beck@passofundo.ifsul.edu.br

³ Idem. E-mail: denilson.seidel@passofundo.ifsul.edu.br



Savonius turbine. For this, rotors with one, two and three stages were evaluated. CFD simulations were performed using the SolidWorks Flow Simulation 2016 software, which solves the conservation equations using the $k-\varepsilon$ turbulence model with damping functions and the finite volume discretization method. By evaluating the simulations, it was possible to conclude that the one-stage rotor provides the highest static torque value to the Savonius turbine, however, increasing the number of stages decreases the rotor dependence on the flow direction.

Keywords: *Savonius wind turbine; computational fluid dynamics; static torque; number of stages.*

1. INTRODUÇÃO

A energia eólica é a forma limpa de energia mais abundante e disponível para conversão no planeta (WENEHUBUN *et al.*, 2015), uma vez que é obtida pela conversão da energia do deslocamento das massas de ar em eletricidade por meio de turbinas eólicas. (ALBUQUERQUE; MATOS, 2016). Essas turbinas convertem, devido à geração de torque, a energia cinética do vento em energia mecânica, que posteriormente é convertida em energia elétrica por um gerador elétrico. (HASHEM; MOHAMED, 2018).

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, no entanto, possui 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 dos mais novos conceitos de TEEV é uma combinação entre as turbinas Savonius e Darrieus com o intuito de unir as características de ambas as turbinas para obter um rotor com bom torque de partida e bom desempenho aerodinâmico. 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).

Muitos parâmetros são fundamentais no desempenho de uma turbina Savonius, principalmente em relação aos valores de coeficiente de torque. Dentre todos os possíveis parâmetros, um dos mais importantes e mais estudados é o número de estágios da turbina. (AKWA, 2010; KOTHE, 2016).

Turbinas com múltiplos estágios podem ser pensadas como configurações que apresentam diversos rotores trabalhando em série. É uma forma de diminuir a variação do torque ao longo das diferentes posições angulares da turbina e diminuir



ainda mais a dependência da direção do vento para que ocorra a partida. (KOTHE, 2016).

Segundo Akwa (2010), De Oliveira (2014) e Kothe (2016), aumentar muito o número de estágios faz com que aumente a inércia da turbina e com que diminua a razão de aspecto para cada estágio, diminuindo a performance do rotor.

Em relação ao torque estático, Kamoji *et al.* (2008) afirmam que o aumento do número de estágios faz com que o torque seja diminuído, no entanto, em um mesmo ciclo de 360° , ocorre menor variação do torque estático.

Estudos numéricos envolvendo turbinas Savonius são um atrativo atualmente, principalmente devido à economia de material e de tempo de pesquisa. A partir das soluções de equações governantes para o campo de pressão e de velocidades, muitos dados sobre a aerodinâmica dessas turbinas podem ser obtidos e existem diversos programas computacionais atualmente que proporcionam esse tipo de estudo. (AKWA, 2010).

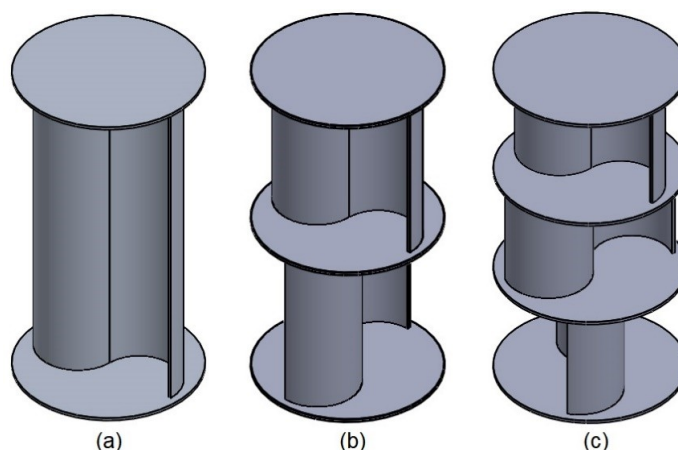
Fundamentado nisso, este estudo busca responder: como diferentes números de estágios impactam no torque estático da turbina Savonius?

Para responder essa questão pretende-se comparar o efeito de três diferentes números de estágios no torque estático da turbina Savonius. Esses valores de torque estático serão obtidos através de simulações de Dinâmica dos Fluidos Computacional utilizando a plataforma *Flow Simulation* do *software* Solidworks 2016.

2. METODOLOGIA

A análise referente ao efeito do número de estágios nos valores de torque estático partiu de turbinas Savonius sem sobreposição, com placas usuais nas extremidades e com duas pás. Foram estudadas três variações, com um, dois e três estágios, ilustrados na Figura 1. O formato com dois estágios apresentou rotores defasados em 90° , enquanto aquele com três estágios apresentou rotores defasados em 60° .

Figura 1 - Diferentes tipos de turbinas Savonius analisadas em relação ao número de estágios: (a) um estágio; (b) dois estágios; (c) três estágios.



Fonte: 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, em 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, o qual diz respeito 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 θ 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), θ foi variado de 30 em 30 graus.

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



Fonte: 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 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 da continuidade, da conservação do movimento, equações de estado e as duas equações referentes ao modelo de turbulência utilizado pelo programa, denominado de k- ϵ 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 e da taxa de dissipação turbulenta, 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 que 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 utilizada 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 condição de contorno para a execução dos cálculos pelo software. O Solidworks (2016) chama esses valores de condições ambientais, uma vez que as simulações serão de escoamento externo.

O valor de 7 m/s para a velocidade foi o adotado pois está compreendido 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, é utilizada 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 estágios no torque estático da turbina Savonius.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 1 apresenta os valores de coeficiente de torque estático obtidos com as simulações computacionais para as três diferentes configurações de turbina Savonius em relação ao número de estágios: com um, com dois e com três rotores em série.

Os dados exibidos na Tabela 1 são ilustrados na forma de um gráfico que relaciona o coeficiente de torque estático versus a posição angular pela Figura 3. Esse gráfico demonstra o que é afirmado por Kamoji *et al.* (2008). Segundo os autores, o aumento do número de estágios faz com que ocorra menor variação do torque estático ao longo das posições angulares.

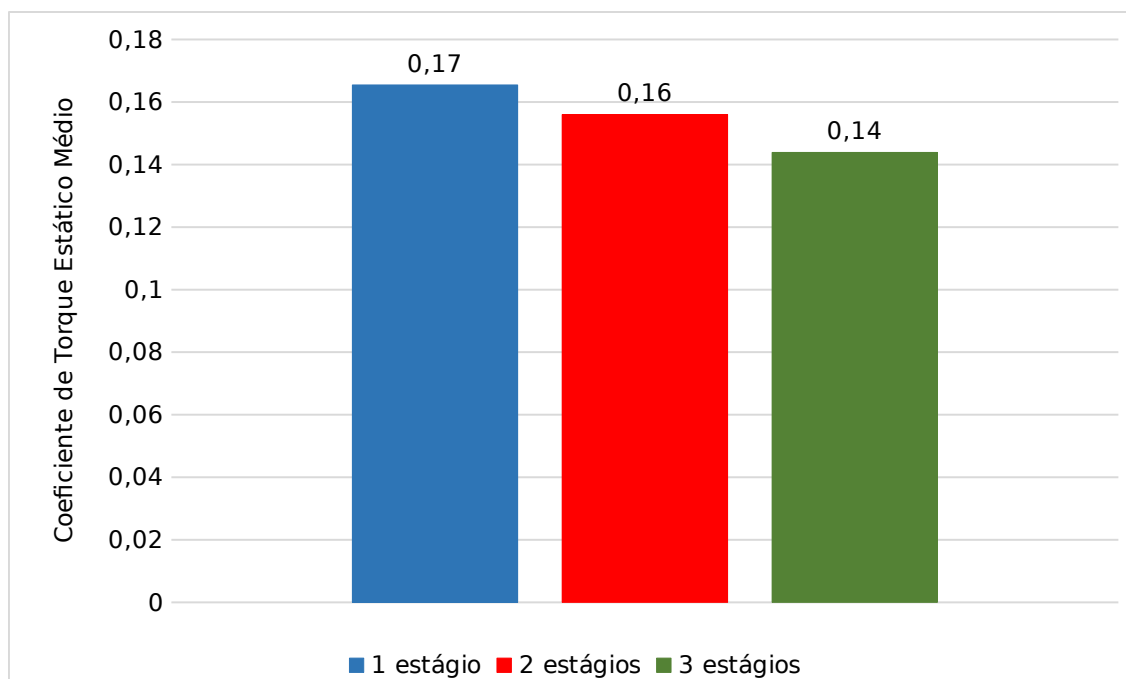


Tabela 1 – Valores de coeficiente de torque estático (C_T) obtidos com as simulações para as diferentes posições angulares para as três configurações de número de estágios analisadas.

Posição angular (θ)	Coeficiente de Torque Estático (C_T)		
	Um estágio	Dois estágios	Três estágios
0°	0,152507	0,169076	0,126668
30°	-0,0234346	0,260729	0,163986
60°	-0,0467559	0,0347609	0,126668
90°	0,186476	0,169076	0,163986
120°	0,414227	0,260729	0,126668
150°	0,316043	0,0347609	0,163986
Média de 360°	0,165433	0,147272	0,143547

Fonte: Autores.

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



Fonte: Autores.

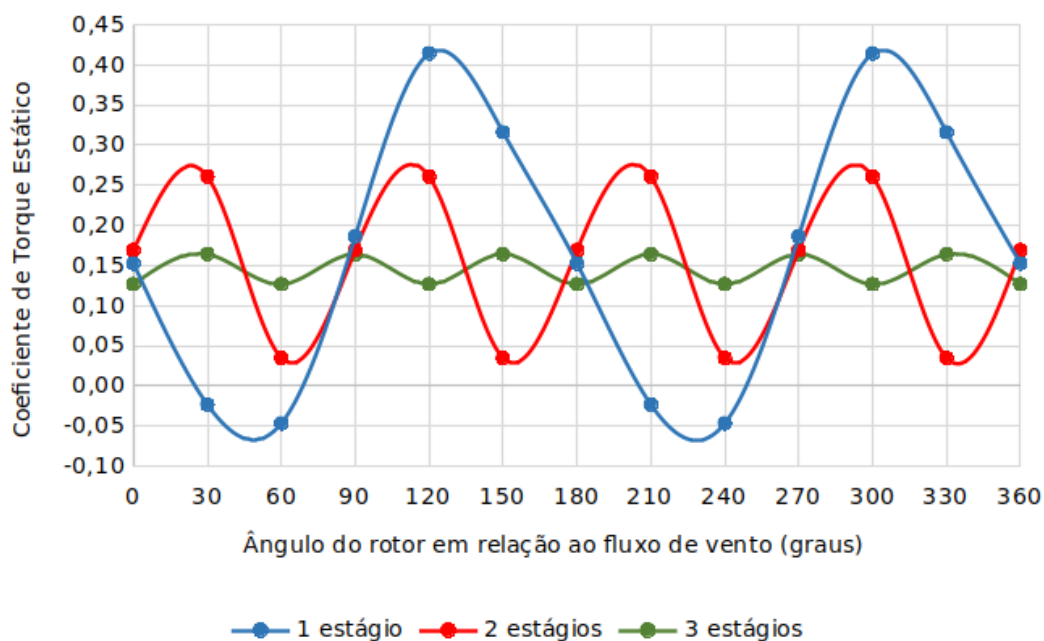
Na Figura 3 é possível observar que o aumento do número de estágios faz com que seja diminuída a amplitude do torque estático. Para as configurações de um, dois e três estágios, a amplitude do coeficiente de torque estático é, respectivamente, 0,461, 0,226 e 0,0373. Dessa forma, aumentar o número de estágios faz com que sejam diminuídas as variações do torque estático, e, de acordo com Kothe (2016), se diminua a dependência da posição angular para que ocorra a partida da turbina eólica. O que



ocorre com o aumento do número de estágios é que há um aumento na possibilidade de se encontrar uma pá em posição favorável ao escoamento, semelhante ao que ocorre com o aumento no número de pás, uma vez que ao se utilizar três estágios é, por exemplo, como se estivesse sendo utilizada uma configuração de seis lâminas, tanto que a curva apresentada na Figura 3 para a condição de 3 estágios possui seis picos de torque estático.

Todavia, quando se aumenta o número de estágios, uma pá não interfere no escoamento que deveria ir para a seguinte, como ocorre quando se adiciona pás à turbina. (AKWA, 2010; KOTHE, 2016). Dessa forma, enquanto que o aumento de duas para quatro pás gera uma perda de torque estático de cerca de 55,17%, o aumento do número de estágios de um para três causa uma perda relativamente menor, de 13,02%. A Figura 4 exibe a variação do coeficiente de torque estático médio em função do número de estágios.

Figura 4 - Variação do coeficiente de torque estático médio de acordo com o número de estágios da turbina Savonius.



Fonte: Autores.

Conforme a Figura 4, o aumento do número de estágios também acarreta em perda de eficiência de autopartida, resultado apontado por Kamoji *et al.* (2008). Em relação à condição de um estágio, as turbinas com dois e com três rotores em série causam, respectivamente, 5,73% e 13,02% de perda de desempenho. Segundo Akwa (2010), De Oliveira (2014) e Kothe (2016) isso ocorre, pois, o aumento do número de estágios faz com que seja diminuída a razão de aspecto, ocasionando em menores valores de torque estático. De acordo com os autores, a diminuição da razão de aspecto faz com que seja intensificado o efeito de borda na turbina, acarretando em menor eficiência.

Assim, cabe ao projetista da turbina eólica decidir qual número de estágios utilizar, uma vez que aumentar o número de estágios causa perda de eficiência e aumenta a quantidade de massa devido à presença dos discos que separam cada um dos rotores



em série, entretanto, mais estágios diminuem a amplitude do torque estático, fazem com que não haja intervalos de torque estático negativo e, ainda segundo Kothe (2016), faz com que se diminua a dependência da turbina em relação à direção do vento.

4. CONCLUSÃO

Neste trabalho foram desenvolvidas simulações de Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) utilizando a versão educacional do software Solidworks Flow Simulation 2016 com o principal objetivo de analisar a influência de diferentes números de estágios nos valores de torque estático, e conseqüentemente, no desempenho de autopartida da turbina Savonius.

Do estudo do número de estágios foi constatado que as turbinas com dois e com três rotores em série causam, respectivamente, 5,73% e 13,02% de perda de desempenho em relação à condição com um estágio apenas. De acordo com Akwa (2010), De Oliveira (2014) e Kothe (2016) isso acontece, pois, o aumento do número de estágios aumenta os efeitos de borda na turbina eólica. No entanto, o aumento do número de estágios faz com se tenha menor dependência da direção do vento para que ocorra a autopartida do rotor, diminuindo a amplitude do torque estático.

5. REFERÊNCIAS

- AKWA, João Vicente. **Análise aerodinâmica de turbinas eólicas Savonius empregando dinâmica dos fluidos computacional**. 2010. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.
- ALBUQUERQUE, Igor Magalhães; MATOS, Francisco Frederico dos Santos. A characterization of vertical axis wind turbines. **IEEE Latin America Transactions**, v.14, n.10, p.4255-4260, 2016.
- ÇENGEL, Yunus A.; CIMBALA, John M. **Mecânica dos Fluidos: fundamentos e aplicações**. Porto Alegre: AMGH, 2012.
- CHAWLA, Shubham; CHAUHAN, Amit; BALA, Saroj. Parametric study of hybrid Savonius-Darrieus turbine. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON RECENT ADVANCES IN ENGINEERING & COMPUTATIONAL SCIENCES (RAECS), 2015, Chandigarh. **Anais...** Chandigarh: Panjab University, 2015.
- DE OLIVEIRA, Cássia Pederiva. **Análise do desempenho de uma turbina Savonius helicoidal com torção de 180° empregando simulação numérica**. 2014. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.
- HASHEM, I.; MOHAMED, M. H. Aerodynamic performance enhancements of H-rotor Darrieus wind turbine. **Energy**, v.142, p.531-545, jan. 2018.
- HAYASHI, Tsutomu; LI, Yan; HARA, Yutaka. Wind tunnel tests on a different phase three-stage Savonius rotor. **JSME International Journal**, v.48, n.1, p.9-16, 2005.



JEON, Keum Soo; JEONG, Jun Ik; PAN, Jae-Kyung.; RYU, Ki-Wahn. Effects of end plates with various shapes and sizes on helical Savonius wind turbines. **Renewable Energy**, v.79, p.167-176, jul. 2015.

KAMOJI, M. A.; KEDARE, S. B.; PRABHU, S. V. Experimental investigations on single stage, two stage and three stage conventional Savonius rotor. **International Journal of Energy Research**, v.32, p.877-895, 2008.

KOTHE, Leonardo Brito. **Estudo comparativo experimental e numérico sobre o desempenho de turbinas Savonius helicoidal e de duplo-estágio**. 2016. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

ROY, Sukanta; SAHA, Ujjwal 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, William; ZHANG, Li. **Electricity generation using wind power**. 2. ed. Singapore: World Scientific, 2017.

SOLIDWORKS. **Flow Simulation 2016 Technical Reference**. 2016.

WENEHEBUBUN, Frederikus; SAPUTRA, Andy; SUTANTO, Hadi. 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: **01/05/2019**

Aceito em: **11/05/2020**