



## Modelagem e Simulação de Uma Turbina Eólica de Eixo Vertical Rotor Savonius

DOI: 10.37702/2175-957X.COBENGE.2024.4912

**Autores:** RAPHAEL DUARTE BRITTO, FELIPE MOURA RIBEIRO, CARLOS HENRIQUE SILVA DE VASCONCELOS, LINDOLPHO OLIVEIRA DE ARAUJO JUNIOR

**Resumo:** Este artigo destaca a importância do investimento na produção de energia a partir de fontes renováveis, como a energia eólica, e como esse investimento pode ser realizado por meio da modelagem de turbinas eólicas. Além disso, será discutido o impacto de um projeto aberto para a comunidade de engenharia. O foco estará na modelagem de uma turbina eólica de eixo vertical (VAWT) do tipo Savonius, juntamente com os resultados de simulação que demonstram o comportamento do torque e da potência. Essa análise fornecerá insights valiosos sobre como esses projetos podem beneficiar e influenciar a comunidade de engenharia, promovendo avanços e inovações no campo das energias renováveis.

**Palavras-chave:** Energia eólica; fontes renováveis; turbinas eólicas de eixo vertical; modelo de simulação de uma vawt; modelagem de turbinas eólicas; rotor savonius.

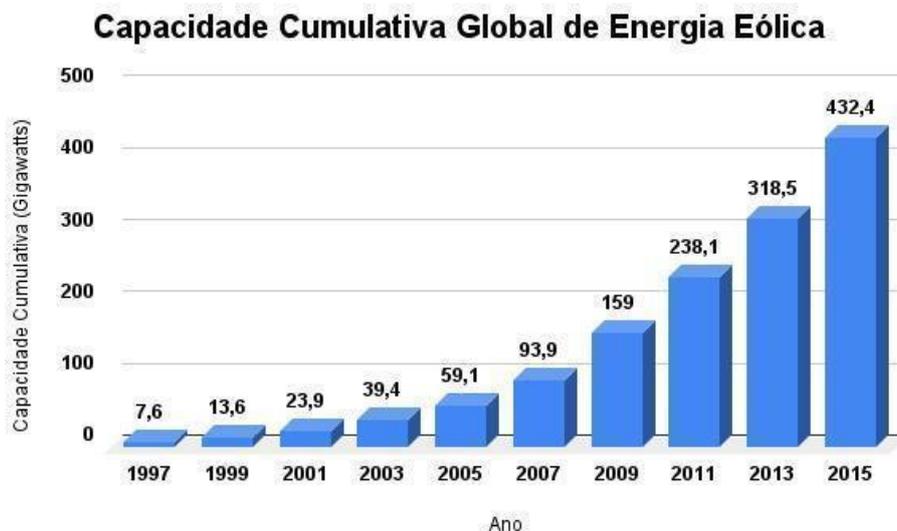
# MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE UMA TURBINA EÓLICA DE EIXO VERTICAL ROTOR SAVONIUS

## 1. INTRODUÇÃO

Atualmente, muito discute-se a respeito da sustentabilidade direcionada às inúmeras metodologias para geração de energia. Globalmente, uma das formas mais comuns e crescentes de fonte renovável é a energia eólica conforme mostrado pela pesquisa apresentada pelo Global Wind Energy Council em 2016 (GWEC 2016) conforme Figura 1. Tratando-se de utilizar a velocidade do vento para geração elétrica. Para este modelo, muito é necessário projetar em relação à localidade na qual planeja-se instalar, necessitando de ser o mais geograficamente plano possível no caso de aerogeradores clássicos, de eixo horizontal (TEEH - Horizontal Axis Wind Turbine - HAWT). Contudo, este trabalho tem o foco no aerogerador de eixo vertical do tipo rotor savonius (TEEV - Vertical Axis Wind Turbine - VAWT).

Inovações em comodidade do espaço geográfico se destacam, como é o caso do aerogerador de eixo vertical possuindo melhor portabilidade conforme mostrado por Tummala et al. (2016), além de ser mais adaptável a questões meteorológicas. Vale ressaltar que este modelo de aerogerador, em sua maioria, apresenta menor eficiência de geração em comparação aos aerogeradores clássicos, de eixo horizontal. Ainda sobre este tipo de turbina, pode-se dizer que novas metodologias foram desenvolvidas ao longo do tempo por ser uma recente opção em estudo. Contudo, duas configurações destacam-se em suas aplicações sendo elas: Savonius e Darrieus apresentado por Paraschivoiu et al. (2002) e Gupta e Biwas (2011). Cada uma baseia-se em determinadas situações, abordando determinados levantamentos matemáticos.

Figura 1 – Crescente capacidade de produção de energia eólica nos últimos anos

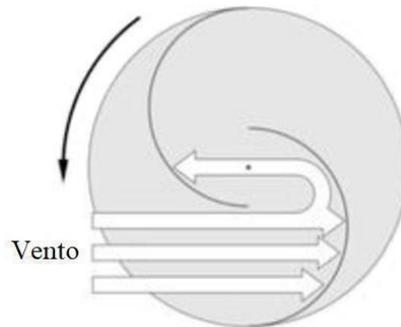


Fonte: GWEC 2016.

## 1.1. Aerogerador Vertical: Rotor Savonius

O rotor Savonius é um dos modelos mais simples e robustos de ser projetado, no qual suas pás de rotação baseiam-se em um cilindro/tubo previamente seccionado. Este tipo de rotor foi inventado pelo engenheiro finlandês Sigurd J. Savonius em Savonius et al. (1931). Geralmente apresentando três ou quatro pás, suas disposições no eixo de rotação devem ser equivalentes entre si. Direcionado seu funcionamento ao princípio de força de arrasto, o modelo Savonius apresenta alto torque inicial, porém podendo auto iniciar sua rotação (CHANDRASHEKHAR *et al.*, 2019).

Figura 3 – Overlap ratio



Fonte: Aymane e Seikh (2017).

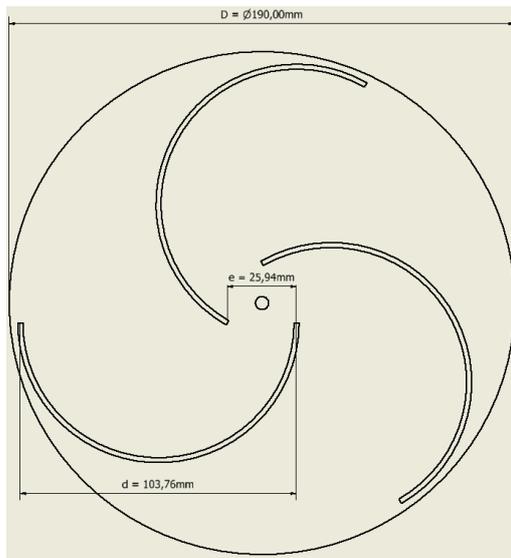
## 2. DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL

Para um projeto pioneiro, direcionado aos aerogeradores verticais, é de caráter sugestivo a adoção da metodologia descrita pelo modelo Savonius. Assim como todos, mesmo necessitando de uma extensiva memória de cálculo direcionada à modelagem e construção, apresenta facilidades quanto às questões aerodinâmicas e meteorológicas. Para fins de análises do comportamento da turbina mediante a ação do vento, é necessário estudar a eficiência da mesma no que se refere à curva de potência, torque e a potência mecânica gerada. Para isso, é de suma importância ter conhecimento das características físicas da turbina tal como o dimensionamento e o tipo de material a ser utilizado. Em muitas das vezes deve-se analisar variáveis de aplicação para que seja realizado o dimensionamento adequado.

### 2.1. Dimensionamento das pás

Segundo os autores Shah e Alsibiani (2020), Bianchin *et al.* (2020), Saikot *et al.* (2022) e Mennet (2004), a geometria do rotor Savonius possui algumas características exclusivas como a taxa de sobreposição (*overlap ratio*) e a taxa de aspecto (*aspect ratio*). O *aspect ratio* é uma medida adimensional que mede a relação da altura da turbina e o diâmetro da mesma. É uma medida importante para otimização visto que pequenas ou elevadas resultam em perda de eficiência da turbina. Já o *overlap ratio* também é uma medida adimensional, mas que indica a relação do quão sobreposto as pás estão entre si em relação ao diâmetro. O significado físico desta taxa é a abertura de uma passagem para o vento escoar de um rotor para o outro aproveitando parte da energia que seria perdida conforme a figura abaixo.

Figura 4 – a) Dimensionamento de um rotor Savonius - b) Protótipo construído



a



b

Fonte: Autoria própria.

### 3. MODELAGEM

Como dito anteriormente, por caracterizar-se como um modelo de baixas eficiências energéticas no geral, muito recorre-se a modelagens visando alcançar melhores resultados. Para esta topologia de aerogeradores, tradicionalmente são visadas as modelagens de três características correlacionáveis, são elas: Coeficiente de Potência, Torque e Potência.

#### 3.1. Modelagem do Coeficiente de Potência

O coeficiente de potência do rotor Savonius segundo Aravind et al. (2012), de forma análoga aos HAWT, é dada pela fórmula:

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left( \frac{c_2}{\lambda} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{\frac{c_5}{\lambda}} + c_6 \lambda \quad (1)$$

onde  $\lambda$  é chamado de *tip ratio speed* (TSR) e é dado pela relação da velocidade tangencial do rotor pela velocidade do vento. O TSR pode ser encontrado pela equação 2.

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda_1 + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (2)$$

Para o perfil da turbina eólica estudada por este trabalho vale ressaltar que as constantes da equação 1 possui os seguintes valores:

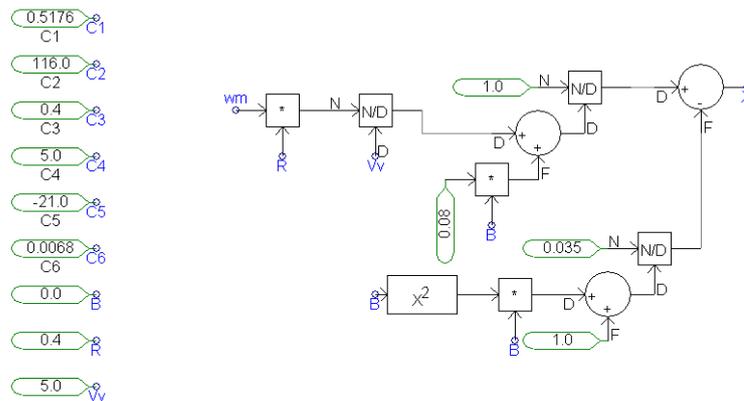
Tabela 1 – Coeficiente constantes da eq. de modelagem.

Variáveis	Valor
C1	0,5176
C2	116,0
C3	0,4
C4	5,0
C5	-21,0
C6	0,0068

Fonte: Aravind et al. (2012).

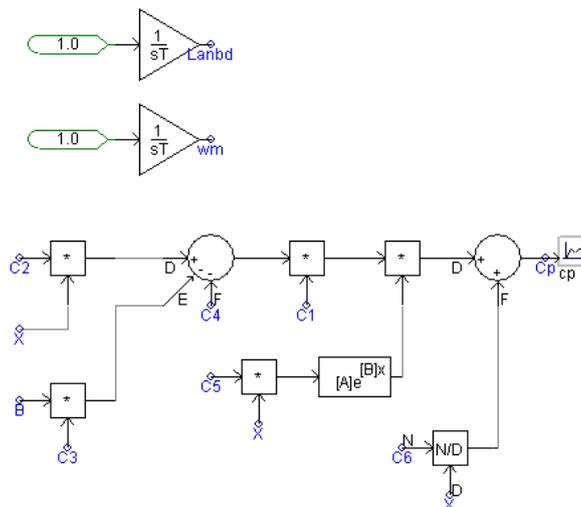
Através do auxílio do software PSCad, foi implementado um diagrama de blocos utilizando os valores das constantes conforme a figura 5 para obter a curva do coeficiente de potência da turbina estudada.

Figura 5 – Diagrama do cálculo de  $1/\lambda$



Fonte: Autoria própria.

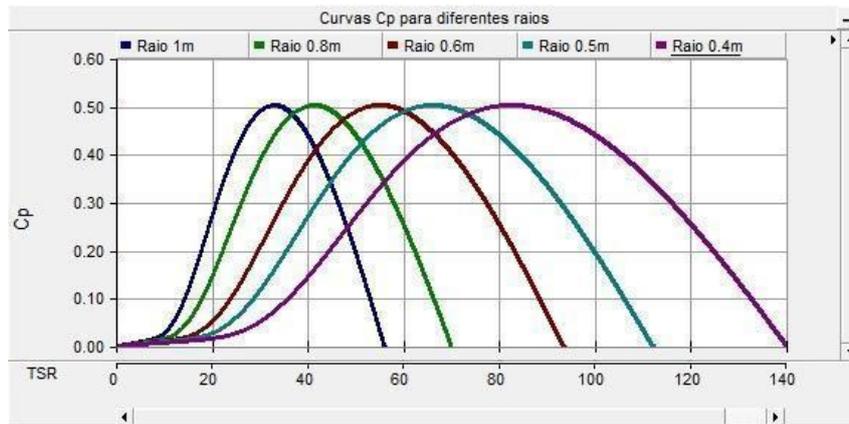
Figura 6 – Modelagem do coeficiente de potência da turbina



Fonte: Autoria própria.

Com os diagramas de blocos projetados, é possível que sejam realizadas simulações indicando como as grandezas que envolvem o modelo interagem entre si através da exibição de gráficos. Atribuindo valores genéricos para o raio de um VAWT modelado a partir dos diagramas de blocos pré-definidos, poderíamos obter curvas de funcionamento como apresentadas a seguir:

Figura 7 – Curvas de potências de rotor Savonius com vários raios



Fonte: Autoria própria.

Observa-se que quanto maior o raio da turbina, menor o valor necessário do TSR para chegar ao valor máximo do coeficiente.

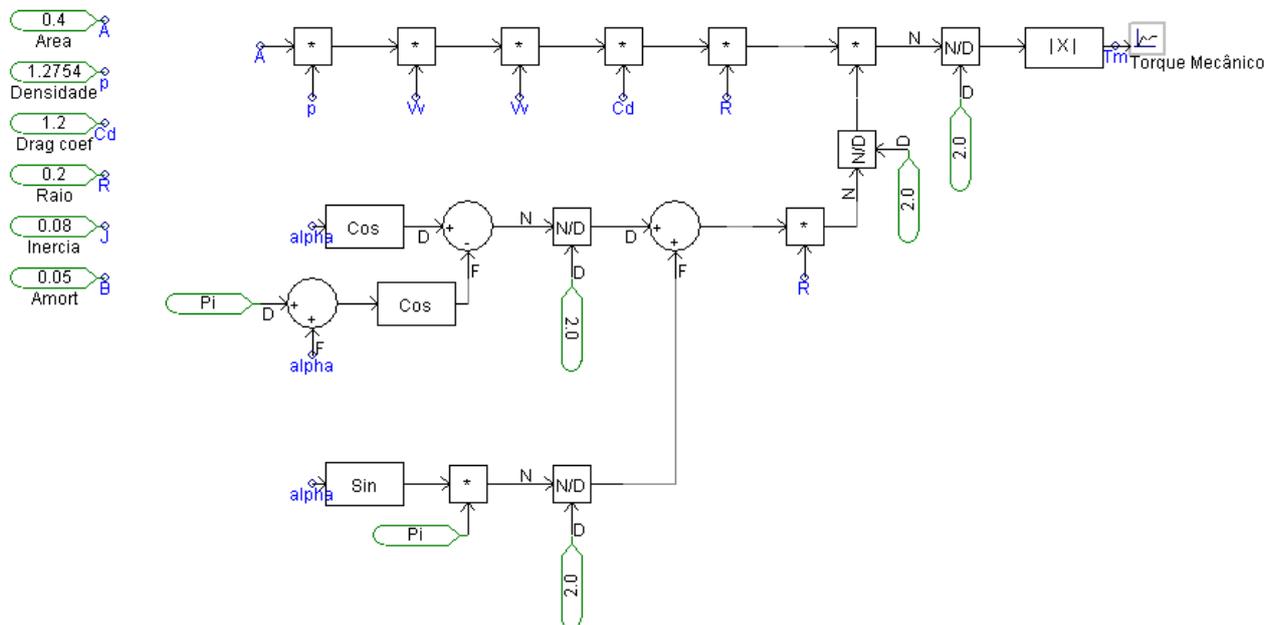
### 3.2. Modelagem do Torque

O torque mecânico gerado de uma turbina vertical é senoidal segundo Yadav (2017) conforme a equação 3 devido a mudança da área de incidência do vento durante o giro. Quando a área das pás está a 90° em relação ao vento, isto quer dizer que as componentes da força do vento está:

$$T_m = \left( \frac{1}{2} \rho V^2 A R C_d \right) * \frac{R}{2} \left\{ \frac{1}{2} [\cos(\alpha) - \cos(\alpha + \pi)] + \frac{\pi}{2} \sin(\alpha) \right\} \quad (4)$$

onde A representa a área transversal do rotor, R é o raio das pás, Cd é o coeficiente de arrasto e ρ é a densidade do ar.

Figura 8 – Modelagem do Torque



Fonte: Autoria própria.

### 3.3. Modelagem da Potência

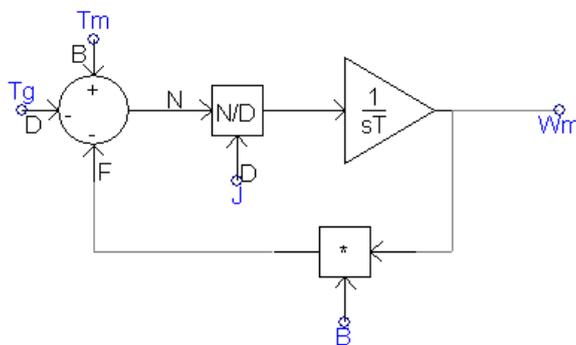
A potência mecânica gerada de um aerogerador quando conhecido o Torque e a velocidade angular pode ser encontrado pela fórmula:

$$P_m = T_m w_m \quad (5)$$

### 3.4. Modelagem do parâmetros de entrada: ângulo de giro, velocidade do vento e velocidade angular da turbina

Para encontrar a velocidade angular do gerador, utiliza-se a equação da turbina como mostra o diagrama abaixo:

Figura 9 – Diagrama que calcula a velocidade angular da turbina



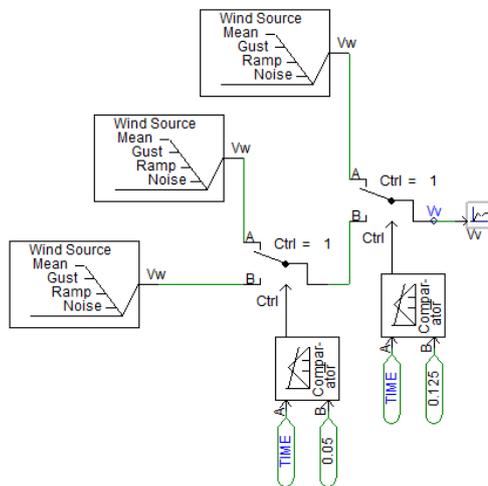
Fonte: Autoria própria.

No diagrama da Figura 9, B é o amortecimento, J é o momento de inércia da turbina e TI é o torque produzido pelo gerador.

Quanto à velocidade do vento, foram estimados três valores de velocidades sendo alterados de acordo com o tempo especificado na simulação que, no caso do diagrama

abaixo, em 0.05s e 0.125s haverá a troca das velocidades. Foram levados em consideração ruídos do vento visando resultados mais realistas. Segue o diagrama:

Figura 10 – Simulação da velocidade do vento



Fonte: Autoria própria.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para melhor visualização do comportamento do torque mecânico gerado e a potência mecânica gerada na turbina, foram simuladas diversas situações alterando variáveis de entrada como a velocidade do vento e velocidade de rotação da turbina.

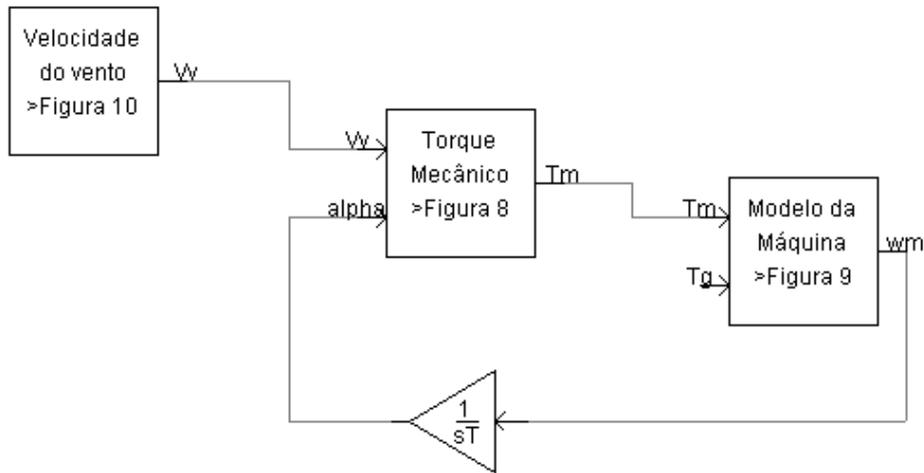
Tabela 2 – Valores das variáveis de entrada.

Variáveis	Valor	Unidade
$\rho$	1,2754	kg/m <sup>3</sup>
R	0,2	m
H	1,2	m
A	0,4	m <sup>2</sup>
J	0,08	kg. m <sup>2</sup>
$\beta$	0,05	adimensional

Fonte: Autoria própria.

O diagrama a seguir mostra as conexões entre as modelagens das equações necessárias para a simulação.

Figura 11 – Diagrama da modelagem completa

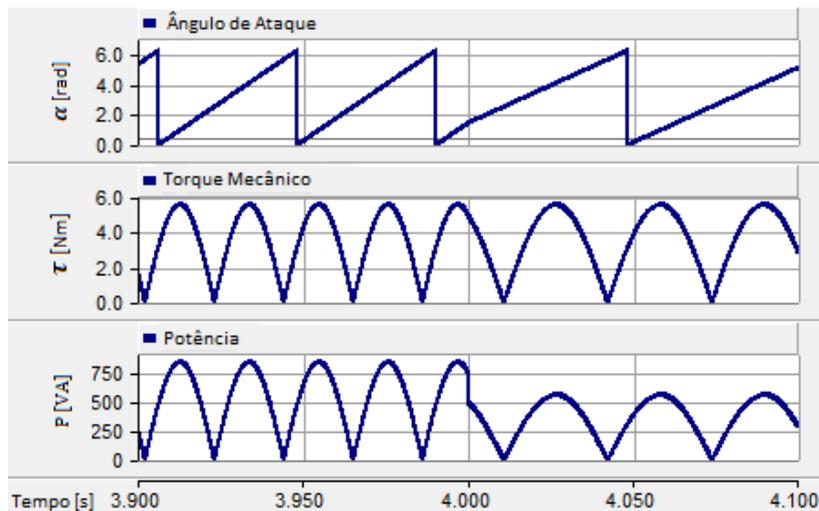


Fonte: Autoria própria.

#### 4.1. Comportamento da turbina mediante alteração da velocidade angular

Como descrito anteriormente, o ângulo de ataque ( $\alpha$ ) sempre estará presente, e dessa forma, obtendo respostas como a potência. Seja considerado um regime cíclico, modificando a velocidade angular no tempo de  $t=4.00s$ , é possível ver as alterações de comportamento do torque mecânico e da potência.

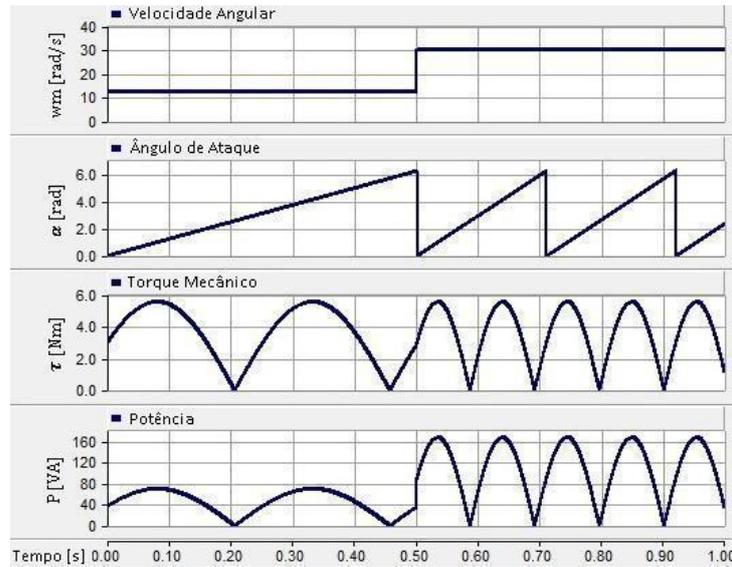
Figura 12 – Comportamento da turbina sob variação da velocidade angular



Fonte: Autoria própria.

Já para outro ensaio, no qual se modificaria a velocidade angular da turbina também em  $t=0.5s$ , pode-se observar as reações do ângulo de ataque, torque mecânico e potência.

Figura 13 – Comportamento da turbina sob variação da velocidade angular



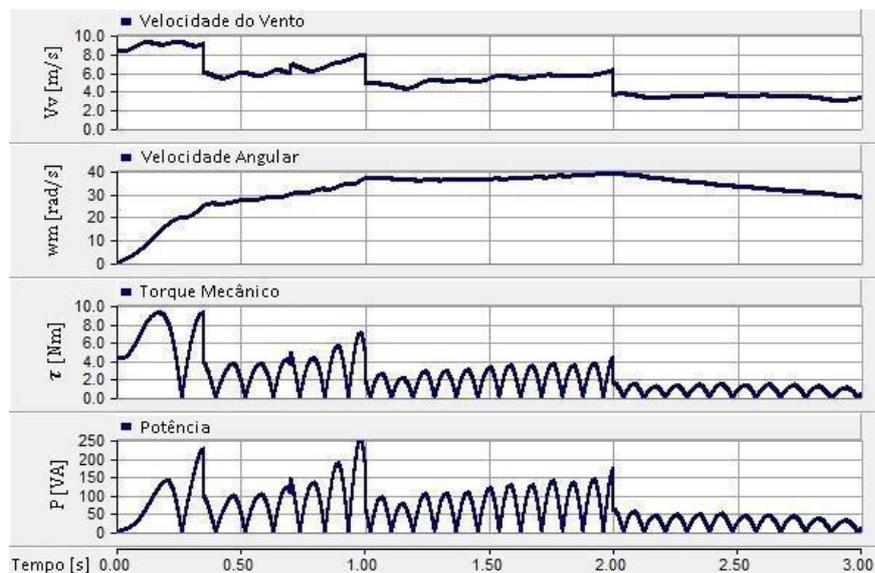
Fonte: Autoria própria.

Inicialmente com o valor de 12 rad/s e sendo alterada para 30 rad/s, a velocidade angular provocou uma diminuição da inclinação de  $\alpha$ , redução do período do torque resultante e elevação do valor de pico, assim como redução do período, da potência gerada. Vale ressaltar que, alterando-se a velocidade angular, as grandezas de torque e potência irão ter seus ciclos reduzidos ao mesmo período de tempo.

#### 4.2. Comportamento da turbina mediante alteração da velocidade do vento e velocidade angular da turbina

Assim como eventuais oscilações da velocidade angular, o protótipo está sujeito de forma integral a variações da velocidade do Vento ( $V_v$ ). A partir de um valor inicial, simulando reduções aos marcos de  $t=0.40s$ ,  $t=1.00s$  e  $t=2.00s$  para a velocidade do vento, podemos observar as seguintes respostas de variáveis em análise:

Figura 14 – Comportamento da turbina mediante a variação da velocidade do vento



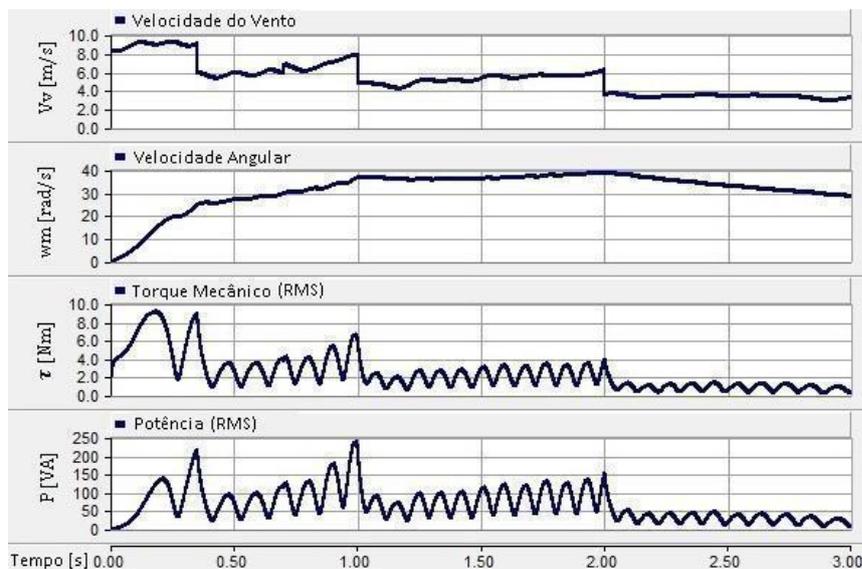
Fonte: Autoria própria.

Mesmo não havendo correlação direta com o ângulo de ataque, a velocidade do vento irá influenciar diretamente em respostas de outras variáveis, como é o caso da velocidade angular, torque mecânico e potência. Sendo mais específico, variações direcionadas à velocidade do vento irão provocar oscilações na velocidade angular, que como visto anteriormente, influencia diretamente no torque mecânico e potência.

De forma característica, em exigir uma partida da inércia, o torque apresenta alto módulo. Através da intensidade do vento, o protótipo assume aumento de sua velocidade angular, proporcionando observar uma resistência ao movimento de giro relacionando-se com a inércia no segundo gráfico apresentado. Já visto anteriormente, variações da velocidade angular irão proporcionar quedas ou elevações do torque, e consequentemente, da potência. Pequenas variações, e respostas a elas, podem ser minuciosamente analisadas comparando-se os três últimos gráficos apresentados, levando-se em enfoque observações direcionadas aos marcos de  $t=0.40s$ ,  $t=1.00s$  e  $t=2.00s$ .

Outra análise construtiva ao projeto refere-se em se analisar valores eficazes do torque mecânico e potência sob as mesmas condições apresentadas no cenário anterior. Valores eficazes são obtidos através da topologia de valor RMS (*Root Mean Square*) das variáveis desejadas, observa-se abaixo tais resultados ao aplicar esta metodologia.

Figura 15 – Comportamento da turbina com valores RMS



Fonte: Autoria própria.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Mesmo que o crescimento energético proveniente de fontes renováveis seja cada vez mais almejado em escala global, tal crescimento deve ser realizado com clareza e eficiência. Para que sejam implementados de forma apropriada, cabe às projeções das gerações energéticas, de qualquer que seja o porte, recorrerem às modelagens muitas vezes complexas como controle automático. Dessa forma, serão obtidos os melhores resultados considerando a situação de implementação da planta, alcançando a melhor eficiência deste projeto.

Além disso, é importante destacar o papel promissor da energia renovável no processo de transição energética. O uso de fontes renováveis não apenas contribui para a

redução das emissões de gases de efeito estufa, mas também promove a sustentabilidade e a segurança energética a longo prazo. Investimentos em tecnologias e infraestruturas de energia renovável são essenciais para alcançar um futuro energético mais limpo e eficiente.

Com o modelo da turbina pronto, é possível iniciar a construção do protótipo físico e os resultados serão divulgados em um próximo trabalho.

### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao MEC/SESU/PET, FNDE, tutor e cotutor e CEFET-MG pelo apoio ao desenvolvimento deste trabalho.

### REFERÊNCIAS

GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. **GLOBAL WIND REPORT** 2015. Bruxelas, p. 76. 2016.

A. Tummala, R. K. Velamati, D. K. Sinha, V. Indraj, V. H. Krishna. A review on small scale wind turbines. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 56, p. 1351-1371, 2016.

R. Gupta, A. Biswas, and K. K. Sharma. Comparative study of a three bucket savonius rotor with a combined three-bucket savonius – three-bladed darrieus rotor. **Renewable Energy**, 33:1974–1981, 2008.

Ayman, Eddahmani and Naeem Sheikh. SAVONIUS VERTICAL WIND TURBINE : DESIGN , SIMULATION , AND PHYSICAL TESTING. 2017.

Paraschivoiu, I., Wind Turbine Design with Emphasis on Darrieus Concept. **Polytechnic**. Brooklyn, NY, 2002.

Savonius, S. J., 1931. The Savonius-rotor and its applications. **Mech. Eng.** 53(5), 333-338.

P. K. Chandrashekhar, S. Managuli and A. Shashank, Design of Small Scale Vertical Axis Wind Turbine. **International Conference on Power Electronics Applications and Technology in Present Energy Scenario** (PETPES), Mangalore, India, 2019, pp. 1-5

Shah, Mirsad & Alsibiani, Sameer. (2020). Design and construction of Savonius rotor. 65-77. 10.17993/3ctecno.2020.specialissue6.65-77.

Bianchin, L. S., Beck, D., & Seidel, D. J. 2020. **INFLUÊNCIA DA RAZÃO DE SOBREPOSIÇÃO NO TORQUE ESTÁTICO DA TURBINA SAVONIUS**. HOLOS, 6, 1–13.

Saikot MMH, Rahman M, Hosen MA, et al. Savonius Wind Turbine Performance Comparison with One and Two Porous Deflectors: A CFD Study. Preprints.org; 2022. DOI: 10.20944/preprints202208.0296.v1.

C. Aravind, R. Rajparthiban, R. Rajprasad, I. Grace, R. Teymourzadeh and M. Norhisam, Mathematical toolbox and its application in the development of laboratory scale vertical axis wind turbine, **IEEE International Conference on Power and Energy** (PECon), Kota Kinabalu, Malásia, 2012, pp. 99-104

YADAV, Yogendra Kumar. **Savonius wind turbine with electric generator: Model and test**. 2017. Tese – Clemson University, Carolina do Sul, EUA. 2017. Disponível em: [https://tigerprints.clemson.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=3433&context=all\\_theses](https://tigerprints.clemson.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=3433&context=all_theses). Acesso em: 21 jan.2023.

## MODELING AND SIMULATION OF A VERTICAL WIND TURBINE: ROTOR SAVONIUS

**Abstract:** *This article will portray the importance of investing in the production of energy from renewable sources, such as wind energy, and how such investment can be made through the modeling of wind turbines. Additionally, it will delve into the impact of an open project on the engineering community. The focus will be on modeling a vertical-axis wind turbine (VAWT) of the Savonius type, along with its respective simulation results, showcasing the behavior of torque and power. This analysis will provide valuable insights into how such projects can benefit and influence the engineering community, fostering advancements and innovations in the field of renewable energies.*

**Keyword:** *Wind energy, renewable energy, vertical axis wind turbine, simulation model of vawt, modeling wind turbine, savonius rotor.*

Resumo: Este artigo destaca a importância do investimento na produção de energia a partir de fontes renováveis, como a energia eólica, e como esse investimento pode ser realizado por meio da modelagem de turbinas eólicas. Além disso, será discutido o impacto de um projeto aberto para a comunidade de engenharia. O foco estará na modelagem de uma turbina eólica de eixo vertical (VAWT) do tipo Savonius, juntamente com os resultados de simulação que demonstram o comportamento do torque e da potência. Essa análise fornecerá insights valiosos sobre como esses projetos podem beneficiar e influenciar a comunidade de engenharia, promovendo avanços e inovações no campo das energias renováveis.

Palavras-chaves: Energia eólica; fontes renováveis; turbinas eólicas de eixo vertical; modelo de simulação de uma vawt; modelagem de turbinas eólicas; rotor savonius.

