

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE UMA TURBINA EÓLICA DO TIPO DARRIEUS UTILIZANDO PERFIS NACA SIMÉTRICO E ASSIMÉTRICO

Gustavo da Silva Dias, gs.dias@unesp.br¹
Pedro Henrique Martínez De Barros, p.barros@unesp.br¹
Leandro Oliveira Salviano, leandro.salviano@unesp.br¹

¹ Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - UNESP, Faculdade de Engenharia de Iha Solteira – FEIS, Av. Brasil Sul, 56 - Centro, Cep. 15385-000, Ilha Solteira – SP.

Resumo. Devido aos desafios relacionados ao desenvolvimento sustentável dos grandes parques eólicos surge a necessidade de desenvolvimento tecnológico relacionados à geração de energia eólica em pequena escala. Desta forma, o presente trabalho avaliou a modelagem computacional de uma turbina eólica vertical do tipo *Darrieus* de pequeno porte para aplicação em um ambiente urbano. A simulação numérica avaliou o impacto das características geométricas do perfil da pá e do número de pás no coeficiente de desempenho (C_p) da turbina, que quantifica a eficiência de conversão da energia cinética em energia mecânica de eixo. Foram avaliados dois perfis NACA de 4 dígitos (NACA 0021 e NACA 6421), considerando turbinas eólicas com 3 e 5 pás, operando com baixo TSR (*Tip Speed Ratio*). Os resultados mostram que sob as condições operacionais em análise a configuração do perfil simétrico (NACA 0021) apresentou melhor desempenho. Além disso, o aumento do número de pás de 3 para 5 resultou na diminuição do Coeficiente de Potência (C_p).

Palavras chave: Turbina Eólica Vertical *Darrieus*, Simulação Numérica, Perfil NACA.

Abstract. Due to the challenges related to the sustainable development of large wind farms, there is a need for technological development related to small scale wind power generation. Thus, the present work evaluated the computational modeling of a *Darrieus* small vertical wind turbine for application in an urban environment. The numerical simulation evaluated the impact of the geometrical characteristics of the blade profile and the number of blades on the turbine's performance coefficient (C_p), which quantifies the efficiency of converting kinetic energy to mechanical energy. Two 4-digit NACA profiles (NACA 0021 and NACA 6421) were evaluated, considering wind turbines with 3 and 5 blades, operating at low TSR (*Tip Speed Ratio*). The results showed that under the operational conditions the analysis of configuration for a symmetrical profile (NACA 0021) is better than for a asymmetrical profile (NACA 6421). In addition, the increase in the number of blades from 3 to 5 resulted in a decrease in the Power Coefficient (C_p).

Keywords: *Darrieus* Vertical Wind Turbines, Numerical Simulation, NACA Profile.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, vem crescendo o interesse pelo aproveitamento dos recursos energéticos sustentáveis. Isso ocorre devido ao aumento mundial na demanda energética, às preocupações com o esgotamento dos recursos de combustíveis fósseis, às ações de mitigação das mudanças climáticas e, conseqüentemente, o aquecimento global (Parakkal et al. 2019). Como a população mundial está crescendo rapidamente, o consumo global de energia deverá aumentar em 56% entre 2010 e 2040 (KC, Whale, and Urmee 2019). Em 2015, os combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás natural) contabilizaram 78,4% do consumo global de energia, sendo a quota de energias renováveis e energia nuclear de 19,3% e 2,3%, respectivamente. Assim, em todo o mundo, a parcela de energia renovável aumentará para enfrentar as mudanças climáticas até 2030 (KC et al. 2019). Nesse cenário, entre as diferentes fontes de energias sustentáveis (vento, solar, onda, geotérmica e maré), a energia eólica se torna uma alternativa atraente para produzir energia.

Considerando o enorme potencial eólico brasileiro, a geração de energia descentralizada torna-se bastante atraente (Nascimento, Mendonça, and Cunha 2012). Para a geração descentralizada, as turbinas eólicas verticais de pequeno porte do tipo *Darrieus*, Fig.1, se destacam, sendo uma interessante alternativa para a geração de energia elétrica em meios urbanos ou regiões rurais isoladas. Além disso, seu desenvolvimento pode contribuir com a geração descentralizada híbrida associada à energia solar fotovoltaica, complementando a geração em momentos de intermitência solar, atribuindo ao sistema de geração robustez e confiabilidade. Juntamente a este potencial eólico, a aplicação de ferramentas de simulação computacional, como a Dinâmica dos Flúidos Computacional (CFD), tem demonstrado ser uma excelente opção de análise e tomada de decisão, exercendo um papel fundamental para o

desenvolvimento de novas tecnologias, barateando custos com protótipos para a geração de dados, possibilitando aumentar a eficiência dos projetos nacionais, tornando-os mais competitivos diante do mercado internacional.

A proposta deste trabalho considera VAWTs (*Vertical Axis Wind Turbine*) do tipo *Darrieus* usados para geração descentralizada de energia em residências, pequenas propriedades (especialmente aquelas localizadas longe da rede de distribuição de energia elétrica), edifícios ou em outros ambientes urbano. Uma modelagem numérica 2D é realizada considerando um escoamento turbulento e transitório. A análise de sensibilidade da malha é garantida pelo Índice de Convergência de Malha (GCI), e a verificação dos resultados numéricos é realizada através da comparação com dados experimentais.

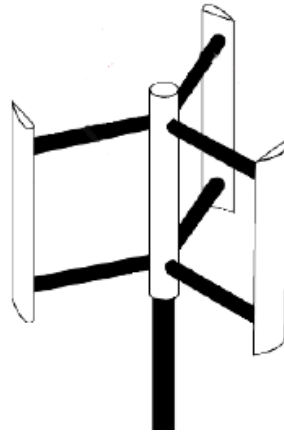


Figura 1. Turbina Eólica de eixo vertical do tipo *Darrieus*

2. METODOLOGIA

O torque produzido pela turbina eólica *Darrieus*, é devido ao escoamento do ar através do perfil das pás, onde um triângulo de velocidade é gerado a cada posição azimutal. Na análise de turbinas eólicas é introduzido um conceito fundamental que é a “velocidade de ponta de pá” (*Tip-Speed Ratio* - TSR), onde a parte dos parâmetros relacionados às condições operacionais e geométricas da turbina eólica vertical pode ser sintetizada por meio da introdução do adimensional TSR, que compila essencialmente a velocidade de incidência do vento, a rotação da turbina e seu diâmetro, de acordo com a Eq. (1).

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{U_\infty} \quad (1)$$

onde: ω_r é a velocidade angular do rotor, U_∞ é a velocidade de incidência do vento e R é o raio da turbina.

Outro fator importante que influencia as forças aerodinâmicas atuantes em uma turbina é a solidez (σ), calculada de acordo com a Eq. (2).

$$\sigma = \frac{Nc}{2R} \quad (2)$$

onde: N é o número de pás, c a corda do perfil e R o raio do rotor.

Em termos de desempenho, são vários os parâmetros envolvidos necessários para quantificar o desempenho de uma turbina eólica *Darrieus*, sendo o coeficiente de torque (C_t) e de potência (C_p) os principais, conforme mostrados pelas Eq. (3) e (4), respectivamente.

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

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho A U_\infty^3} \quad (4)$$

onde: T é o torque no eixo da turbina, P é a potência mecânica de saída, U_∞ é a velocidade incidência do vento, ρ é a densidade do fluido, A é a área projetada do rotor e R é o raio do rotor.

Ainda, os coeficientes de torque e de potência podem ser relacionados por meio da velocidade de ponta de pá (λ), tal qual apresentado na Eq.(5).

$$C_p = \lambda C_t \quad (5)$$

Para a modelagem da turbina eólica foram utilizados os *softwares* do pacote comercial ANSYS 19.0. O desenvolvimento da geometria da turbina foi realizado no ANSYS *Design Modeler*, a geração da malha e a solução das equações governantes foram realizadas pelo ANSYS *Meshing* e ANSYS *Fluent* respectivamente.

2.1. Equações Governantes

Para a modelagem da dinâmica do escoamento do fluido Newtoniano (ar) através do VAWTs (*Vertical Axis Wind Turbine*) *Darrieus*, foram resolvidas as equações de Navier-Stokes (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes* - RANS) (Hashem and Mohamed 2018), considerando o algoritmo *Coupled* (Rezaeiha, Kalkman, and Blocken 2017) para o acoplamento pressão-velocidade. A discretização foi feita usando o método dos volumes finitos com esquema de interpolação *Upwind* de segunda ordem. Foram consideradas as hipóteses de escoamento bidimensional, incompressível e turbulento em regime transitório, sendo estas adequadas para a modelagem da dinâmica do escoamento (Elsakka et al. 2019). Dessa forma, considerando um fluido Newtoniano (ar), as equações governantes da continuidade e quantidade de momento na forma tensorial, são mostradas pelas Eq. (6) e (7), respectivamente.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_i \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\overline{u'_i u'_j}) \quad (7)$$

2.2. Domínio Computacional e Condições de Contorno

Para a modelagem numérica realizada, foi considerada uma turbina eólica em duas dimensões (2D) com as características geométricas mostradas na Tab. 1.

Tabela 1. Características geométricas da turbina

Parâmetros	
Diâmetro do Rotor da Turbina (D) [mm]	1030
Altura do Rotor (H) [mm]	1 (simulação 2D)
Comprimento da Corda do aerofólio (c) [mm]	85,8

As simulações numéricas são realizadas utilizando o modelo de turbulência *Transition SST*, com condições de contorno, identificadas na Fig. 2, velocidade prescrita na entrada do domínio computacional (*Inlet*), pressão prescrita de referência (*Gauge*) na saída do domínio computacional (*outlet*), simetria nas faces superior e inferior do domínio (*symmetry*), não-deslizamento nas paredes das pás (*no slip*) e deslizamento na interface do domínio rotativo (*Sliding Mesh*). O domínio computacional foi subdividido em três subdomínios. Assim, o domínio computacional consiste em um núcleo rotativo, no qual a turbina é localizada, um domínio estacionário envolvendo este núcleo rotativo (REZAEIHA A.; KALKMAN, 2017), e mais um domínio circular que envolve as pás com o intuito de controlar a qualidade da malha (principalmente a criação de prismas) ao redor do perfil aerodinâmico. Uma interface deslizante entre o domínio estacionário e o núcleo rotativo permite a rotação da turbina como é mostrado na Fig. 2.

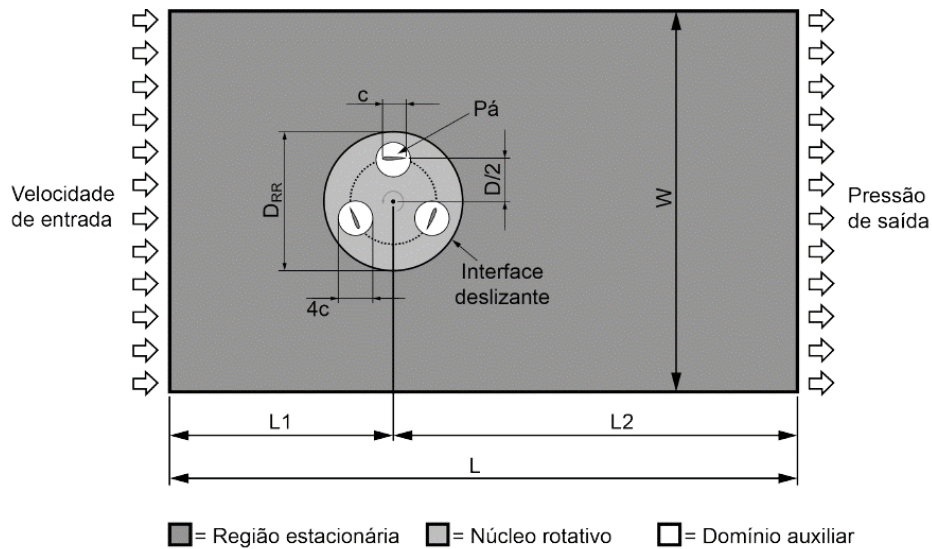


Figura 2. Domínio Computacional 2D

2.3. Caracterização da Malha Computacional

Devido às características inerentes ao escoamento na turbina eólica, foi utilizado o modelo de malha deslizante (*Sliding Mesh Model*), necessário para capturar os parâmetros dinâmicos de escoamento envolvidos na rotação das pás da turbina. Com isso, a partir do *software ANSYS Meshing* foi criada uma malha com células triangulares não estruturadas, conforme mostrado pela Figura 3.

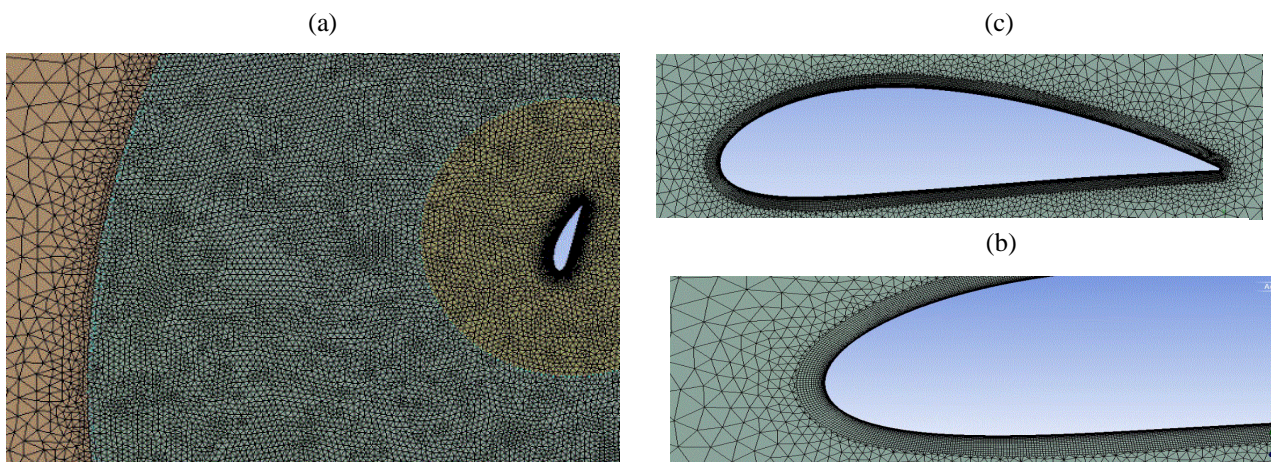


Figura 3. Malha Computacional: (a) Interface entre Domínios Fixo e Rotativo; (b) Detalhes ao redor do Aerofólio; (c) Camadas de elementos prismáticos sobre o Perfil NACA.

O tamanho dos elementos entre o domínio fixo e rotativo são similares para minimizar erros numéricos na interface quanto ao balanço do fluxo de massa e quantidade de movimento, conforme mostrado pela Figura 3a. Além disso, o tamanho do primeiro elemento no perfil (Figura 3b) é definido de forma a atender a condição de $y^+ < 1$, condição essa necessária para atender aos critérios sugeridos para o modelo de turbulência. Para melhor caracterizar os gradientes sobre ao perfil aerodinâmico, camadas de prismas são desenvolvidas, conforme indicado pela Figura 3c.

3. VALIDAÇÃO NUMÉRICA

A validação da modelagem numérica, Fig. 4, ocorreu por meio da comparação com os dados experimentais (Raciti Castelli, Englaro, and Benini 2011), os quais são amplamente divulgados na comunidade acadêmica. As análises foram realizadas com o mesmo intervalo de tempo angular de 1° realizado por Castelli (Raciti Castelli et al. 2011), Hashem (Hashem and Mohamed 2018) e Mohamed (Mohamed 2019).

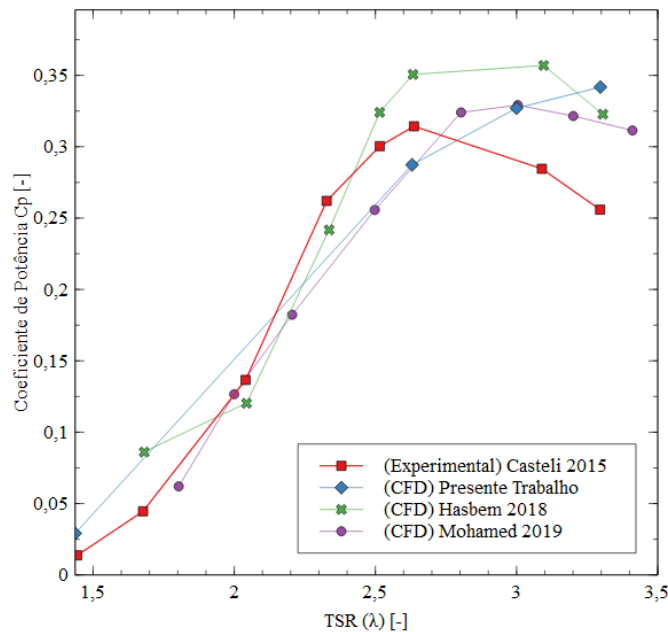


Figura 4. Gráfico de validação numérica.

A Figura 4 mostra que os resultados numéricos concordam com os dados experimentais reportados por Casteli (Raciti Castelli et al. 2011), para os TSRs analisados (TSR = 2,03 e TSR = 2,63), embora valor máximo do Coeficiente de Potência não tenha sido completamente caracterizado. Este aspecto, como já discutido na literatura, é devido ao modelo de turbulência empregado, *Transition SST* e as simplificações previstas durante a simulação numérica em duas dimensões (2D). Desta forma, para os valores de TSRs investigados neste trabalho, os resultados numéricos são considerados adequados e realistas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para o estudo da influência da simetria e assimetria do perfil NACA-4 dígitos no desempenho da turbina de *Darrieus*, foram definidos os aerofólios mostrados na Fig. 5, utilizados tanto para a configuração de turbina de 3 pás, quanto para a configuração com 5 pás.

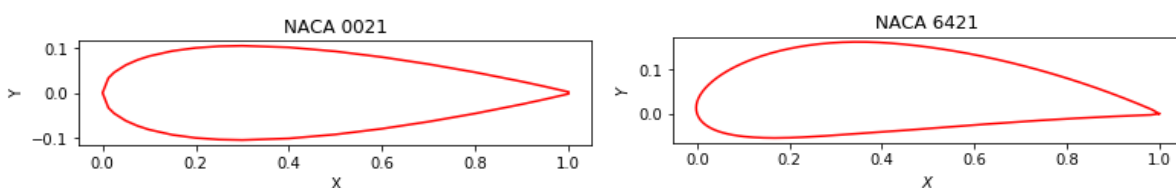


Figura 5. Aerofólios utilizados no estudo; NACA 0021 (perfil simétrico) e NACA 6421 (perfil assimétrico).

A Tabela 2 mostra os valores do Coeficiente de Potência Médio ($\overline{C_p}$) para as turbinas com 3 e 5 pás, operando com os TSR's (*Tip Speed Ratio*) investigados (2,03 e 2,63). Como pode ser verificado, a conversão energética da turbina eólica *Darrieus* é superior para o perfil simétrico NACA 0021, independente do TSR avaliado. O maior C_p é verificado para a configuração com 3 pás, perfil NACA 0021 e TSR = 2,63.

A partir da figura 6, avaliou-se o coeficiente de torque instantâneo (C_t) em função do ângulo azimutal (θ), durante a última rotação da turbina para TSR = 2,63, para ambos os perfis NACA 0021 e NACA 6421. Logo, conclui-se que o aumento do número de pás não refletiu em um aumento de C_t , pois para as configurações de turbinas eólicas de 3 pás, o C_t no ponto de máximo se mostrou maior que os das turbinas eólicas com configuração de 5 pás.

O efeito da solidez no desempenho da turbina por meio do aumento do número de pás e mantendo a corda dos perfis e o raio do rotor, utilizando a Eq. (2), também foi analisado. A solidez para as configurações de 3 pás e 5 pás, obteve os valores de $\sigma_1=0,49$ e $\sigma_2=0,83$, respectivamente. De acordo com (Meana-Fernández et al. 2018), que avaliou os efeitos da solidez no desempenho de turbinas eólicas, valores de solidez acima da faixa de 0,4-0,6 na velocidade de ponta de pá analisada ($\lambda=2,63$), como indicado nos resultados apresentados, causa apenas um aumento na carga da turbina sem aumentar a potência extraída, corroborando os resultados apresentados na Tab.2 e detalhados na Fig.6.

Tabela 2. Valores do Coeficiente de Potência Médio ($\overline{C_p}$) para cada configuração.

Perfil NACA	Número de pás	TSR(λ)	$\overline{C_p}$
0021	3	2,03	0,158
		2,63	0,295
	5	2,03	0,095
		2,63	0,243
6421	3	2,03	0,047
		2,63	0,098
	5	2,03	0,045
		2,63	0,058

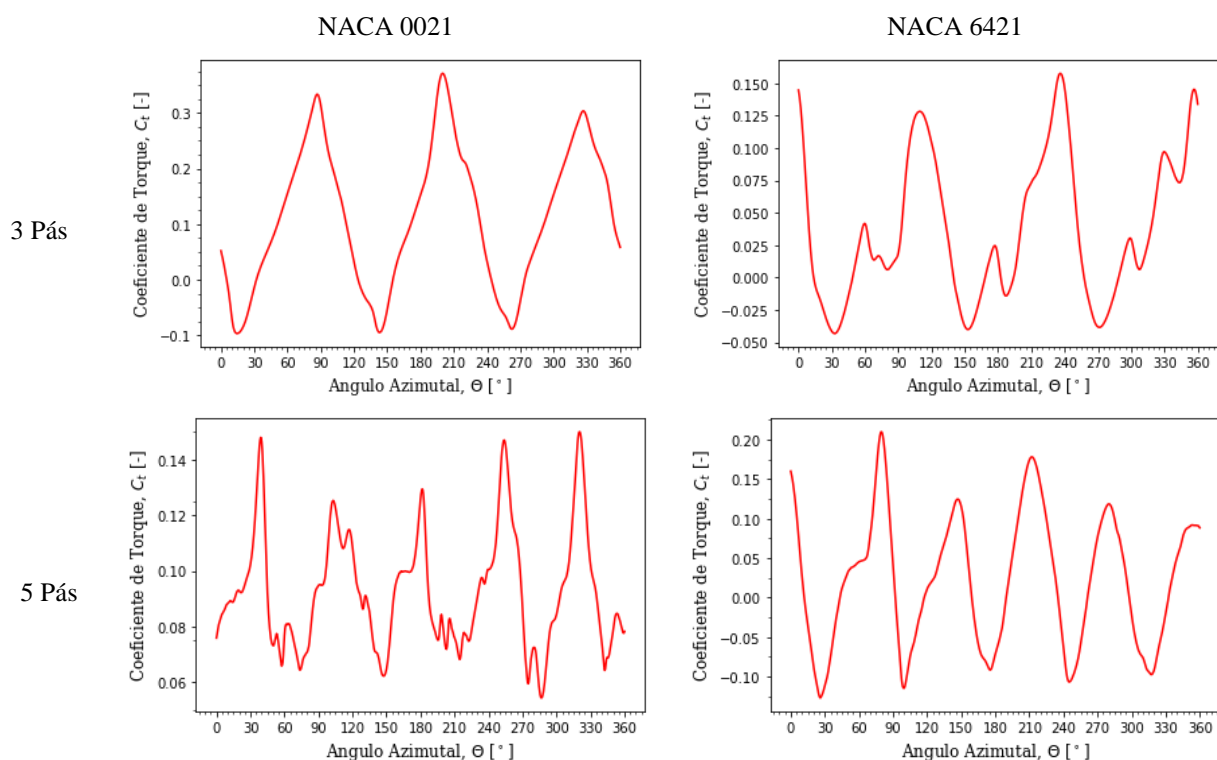


Figura 6. Valores do Coeficiente de Torque instantâneo (C_t) em função do ângulo azimutal (θ), para TSR = 2,63

Para uma visão mais ampla do impacto do aumento do número de pás, de 3 para 5 pás, e da influência do perfil NACA sobre o Coeficiente de Potência (C_p), as Figuras de 7 a 10 mostram os campos de velocidade para as quatro configurações, e os respectivos pontos de C_p máximo identificados na Fig. 6.

Por meio da comparação entre os campos de velocidade, é possível observar que a mudança de um perfil simétrico (NACA0021) para um perfil assimétrico (NACA6421) gerou um aumento da separação do escoamento, causando uma esteira mais perturbada no bordo de fuga dos perfis aerodinâmicos à montante, diminuindo a sustentação e aumentando a força de arrasto nos perfis de cada pá à jusante. O aumento do número de pás de 3 para 5 gera um aumento na perturbação do escoamento, fazendo com que o escoamento que atinge o bordo de ataque das outras pás seja mais perturbado, causando um impacto negativo no desempenho da turbina durante a rotação.

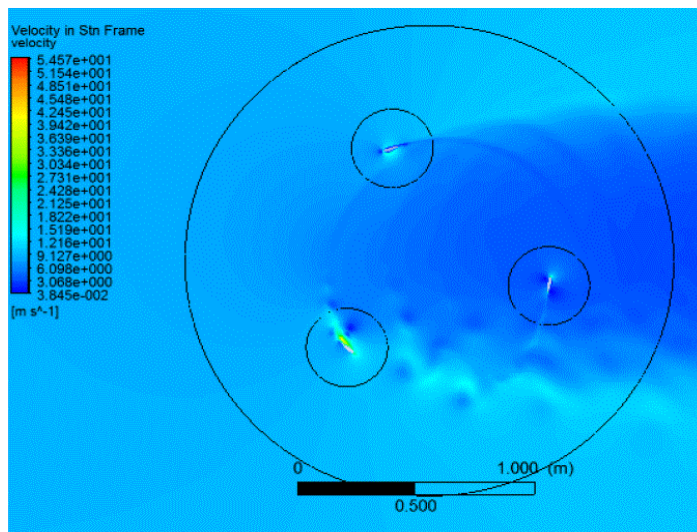


Figura 7. Campo de velocidade da turbina utilizando um perfil NACA0021, 3 pás, em $\Theta = 85^\circ$, para TSR = 2,63

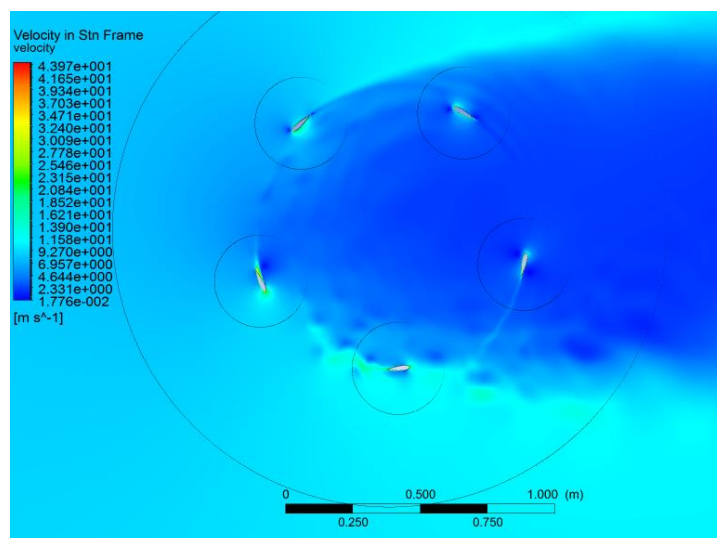


Figura 8. Campo de velocidade da turbina utilizando um perfil NACA0021, 5 pás, em $\Theta = 35^\circ$, para TSR = 2,63

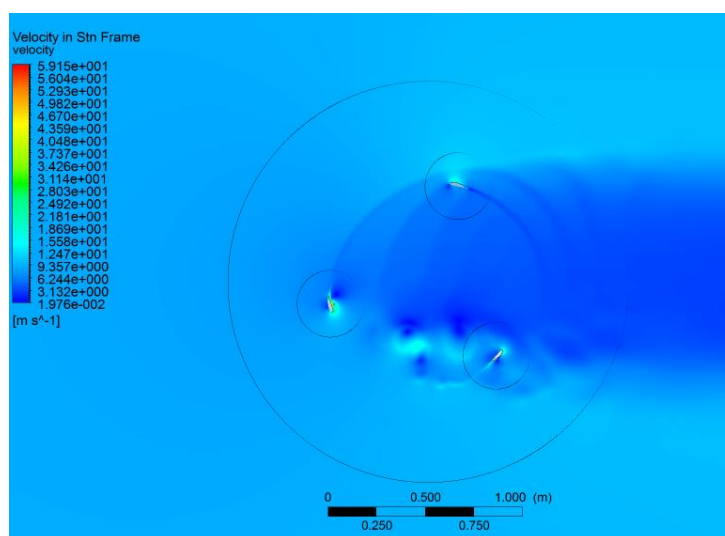


Figura 9. Campo de velocidade da turbina utilizando um perfil NACA6421, 3 pás, em $\Theta = 110^\circ$, para TSR = 2,63

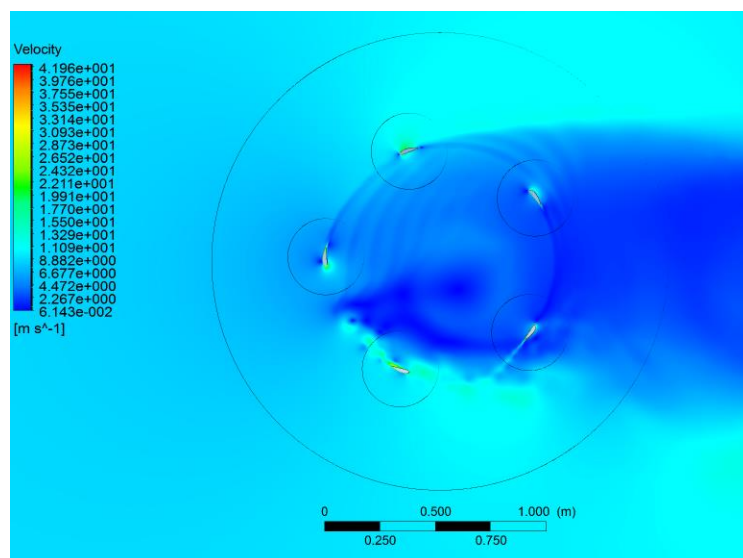


Figura 10. Campo de velocidade da turbina utilizando um perfil NACA6421, 5 pás, em $\Theta = 85^\circ$, para TSR = 2,63

4. CONCLUSÃO

Neste trabalho, uma abordagem computacional é desenvolvida para a análise do desempenho aerodinâmico de uma Turbina Eólica Vertical (VAWT) do tipo *Darrieus*, considerando uma modelagem bidimensional, transitória, turbulento e incompressível. As configurações utilizadas no estudo foram dois perfis de aerofólios da família NACA de 4 dígitos (NACA0021 e NACA6421) com números de pás que variam de 3 e 5 pás.

A modelagem numérica desenvolvida mostrou coerência com os dados experimentais apresentados por (Raciti Castelli et al. 2011), apesar da limitação do modelo de turbulência para caracterizar o ponto de máximo. O desempenho do rotor para diferentes configurações foi analisado através dos coeficientes de torque e potência, os quais foram obtidos em função da velocidade de ponta de pá (λ) de 2,03 e 2,63. Com isso, foi analisado que com o aumento da velocidade de ponta de pá ocorre um expressivo aumento do coeficiente de potência. Além disso, é possível avaliar as mudanças no comportamento do escoamento através da mudança da simetria do perfil da pá de um VAWT de *Darrieus* e no número de pás. A melhor configuração para esse estudo foi da Turbina Eólica Vertical do tipo *Darrieus* com perfil simétrico NACA0021, 3 pás, operando na condição de velocidade de ponta de pá (λ) de 2,63.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Elsakka, Mohamed M., Derek B. Ingham, Lin Ma, and Mohamed Pourkashanian. 2019. "CFD Analysis of the Angle of Attack for a Vertical Axis Wind Turbine Blade." *Energy Conversion and Management* 182(September 2018):154–65. doi: 10.1016/j.enconman.2018.12.054.
- Hashem, I., and M. H. Mohamed. 2018. "Aerodynamic Performance Enhancements of H-Rotor Darrieus Wind Turbine." *Energy* 142:531–45. doi: 10.1016/j.energy.2017.10.036.
- KC, Anup, Jonathan Whale, and Tania Urmee. 2019. "Urban Wind Conditions and Small Wind Turbines in the Built Environment: A Review." *Renewable Energy* 131:268–83. doi: 10.1016/j.renene.2018.07.050.
- Meana-Fernández, Andrés, Irene Solís-Gallego, Jesús Manuel Fernández Oro, Katia María Argüelles Díaz, and Sandra Velarde-Suárez. 2018. "Parametrical Evaluation of the Aerodynamic Performance of Vertical Axis Wind Turbines for the Proposal of Optimized Designs." *Energy* 147:504–17. doi: 10.1016/j.energy.2018.01.062.
- Mohamed, M. H. 2019. "Criticism Study of J-Shaped Darrieus Wind Turbine: Performance Evaluation and Noise Generation Assessment." *Energy* 177:367–85. doi: 10.1016/j.energy.2019.04.102.
- Nascimento, Thiago Cavalcante, Andréa Torres Barros Batinga de Mendonça, and Sieglinde Kindl da Cunha. 2012. "Inovação e Sustentabilidade Na Produção de Energia: O Caso Do Sistema Setorial de Energia Eólica No Brasil." *Cadernos EBAPE.BR* 10(3):630–51. doi: 10.1590/s1679-39512012000300010.
- Parakkal, Jabir Ubaid, Khadije El Kadi, Ameen El-Sinawi, Sherine Elagroudy, and Isam Janajreh. 2019. "Numerical

Analysis of VAWT Wind Turbines: Joukowski vs Classical NACA Rotor's Blades." *Energy Procedia* 158:1194–1201. doi: 10.1016/j.egypro.2019.01.306.

Raciti Castelli, Marco, Alessandro Englaro, and Ernesto Benini. 2011. "The Darrieus Wind Turbine: Proposal for a New Performance Prediction Model Based on CFD." *Energy* 36(8):4919–34. doi: 10.1016/j.energy.2011.05.036.

Rezaeiha, Abdolrahim, Ivo Kalkman, and Bert Blocken. 2017. "CFD Simulation of a Vertical Axis Wind Turbine Operating at a Moderate Tip Speed Ratio: Guidelines for Minimum Domain Size and Azimuthal Increment." *Renewable Energy* 107:373–85. doi: 10.1016/j.renene.2017.02.006.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.