



SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE UMA TURBINA SAVONIUS PARA USO COM DISPOSITIVOS CONVERSORES DE ENERGIA DAS ONDAS DO TIPO COLUNA DE ÁGUA OSCILANTE

Gustavo Rodrigues^{1*2}; Jeferson Souza³

Resumo: Novos processos de geração de energia renovável são estudados constantemente para, posteriormente, serem implementados na matriz energética. Uma dessas tecnologias em destaque é a energia das ondas. Neste trabalho, um modelo numérico bidimensional para rotores Savonius é utilizado para prever o desempenho aerodinâmico de turbinas eólicas de eixo vertical de pequena escala. Os resultados são relatados analisando o desempenho aerodinâmico e as forças que atuam nos rotores. O coeficiente de potência (C_p) é comparado com dados experimentais para dois estudos. Para análise numérica deste trabalho, o modelo utilizado incluiu as equações para o escoamento turbulento (*Reynolds-Averaged-Navier-Stokes*) em específico o modelo $k-\omega$ SST, balanço da quantidade de movimento, balanço de energia e conservação da massa. Estes modelos estão implementados no software OpenFOAM e foram resolvidos numericamente em regime transiente utilizando uma formulação em Volumes Finitos. Este trabalho tem como objetivo validar o modelo proposto, a fim que se possa avançar para geometria de uma turbina carenada e sem a imposição de velocidade angular fixada no rotor (método 6DoF). A diferença observada quando os valores obtidos são comparados com resultados da literatura mostram que o modelo ainda precisa de alguns ajustes, contudo os resultados qualitativos já são satisfatórios.

Palavras-chave: Savonius; Mecânica dos fluidos computacional (CFD); OpenFOAM.

^{1*}gvrodrigues2012@gmail.com

²Universidade Federal do Rio Grande, FURG. Av. Itália, km 8, bairro Carreiros, Rio Grande, RS, Brasil.

³Universidade Federal do Rio Grande, FURG. Av. Itália, km 8, bairro Carreiros, Rio Grande, RS, Brasil

1 INTRODUÇÃO

O Mundo, de uma forma geral, tem buscado mudar a matriz energética para um modelo com maior participação das energias mais limpas, promovendo e incentivando a adoção de fontes renováveis de energia. A tendência de produzir energia de forma renovável devido à necessidade de diversificar a matriz energética e à redução da emissão de carbono na atmosfera requer investimentos no âmbito da pesquisa. (Jenniches, 2018).

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), do Ministério de Minas e Energia, alguns exemplos de fontes renováveis de energia são: hidráulica, solar, eólica, das ondas do mar, das marés, geotérmica e biomassa (Empresa de pesquisa energética, 2022).

De acordo com Cruz e Sarmiento (2004), os oceanos contêm um enorme potencial de produção de energia renovável capaz de contribuir com as necessidades crescentes deste recurso no mundo. Ainda segundo os autores, o potencial elétrico mundial atribuído à energia provinda das ondas oceânicas é de 2 TW o que é equiparável à média anual do consumo de energia elétrica em todo o globo.

Para tornar a energia das marés em energia útil faz-se necessário convertê-la de alguma forma; uma das opções é através de uma coluna de água oscilante combinada com uma turbina para converter a energia pneumática gerada pelas ondas em movimento de rotação, que é o movimento útil para geração de energia (Paixão Conde e Gato, 2008).

O equipamento de coluna de água oscilante (CAO) é um dos meios para aproveitar a movimentação das ondas oceânicas, criando compressão e descompressão de ar no interior do dispositivo, podendo assim, ser aproveitado para gerar força motriz a uma turbina, que por sua vez, converte a energia na forma de movimento de rotação em energia elétrica (Santos, 2021).

Como exemplo de turbina que se adequa a este propósito e que é parte do estudo proposto pelo presente artigo, destaca-se a turbina do tipo Savonius (Savonius, 1930). Esta turbina, devido ao fato de suas pás serem dispostas em um único plano, permite que uma análise numérica bidimensional seja utilizada em seu modelo. Vale destacar que, a modelagem do dispositivo CAO tem sido restrita a simulação de dispositivos sem turbina ou câmaras com turbina, mas sem o acoplamento com o canal de ondas (Letzow et al., 2017; Santos et al., 2022).

Tartuferi et al. (2019) tiveram como objetivo melhorar o desempenho aerodinâmico do rotor eólico Savonius seguindo duas abordagens diferentes: a primeira baseia-se no desenvolvimento de pás inovadoras com formato de aerofólio, enquanto a segunda diz respeito ao uso de um novo sistema de cortina, auto orientado em relação à direção do vento. O que mostrou que a adoção do sistema de cortina transportadora-defletora é mais eficaz em termos de aumento de potência, mas, ao mesmo tempo, torna a construção do rotor mais complexa.

Wekesa et al. (2016) desenvolveram e testaram uma turbina Savonius de pequena escala em um túnel de vento para analisar o efeito da intensidade da turbulência induzida na aerodinâmica e no desempenho da turbina eólica de eixo vertical (VAWT). Além disso, foram realizadas simulações usando um código CFD para comparação entre as medições experimentais e os dados numéricos. Os resultados experimentais mostraram que a produção de energia pelo fluxo turbulento gerado pela borda foi um pouco maior do que a produzida pelo fluxo uniforme, mas a redução drástica foi em velocidades de vento acima de 7 m/s.

Frikha et al. (2016) testaram cinco configurações com diferentes números de estágios, comparando os resultados do experimento no túnel de vento com os resultados numéricos que visualizam o campo de velocidade, a pressão estática, a pressão dinâmica, a vorticidade, a energia cinética turbulenta, a taxa de dissipação turbulenta e a viscosidade turbulenta. Os valores mais altos da velocidade foram obtidos com o rotor de um, três e quatro estágios. Os valores máximos da pressão estática foram registrados com o rotor de quatro estágios, enquanto os valores mínimos da pressão dinâmica foram obtidos com o rotor de cinco estágios. Os valores mínimos das características turbulentas foram registrados com o rotor de um e dois estágios, enquanto os valores máximos da vorticidade foram obtidos com o rotor de dois e cinco estágios.

Hassan Saeed et al. (2019) estudaram quatro modificações nas pás do rotor e, com o auxílio da simulação bidimensional CFD, compararam-nas com os dados experimentais usando quatro modelos de turbulência para determinar qual era o mais adequado. Indicando que o modelo de turbulência *realizable k-ε* mostrou-se mais preciso em comparação com os outros modelos para alcançar a validação.

Blackwell et al. (1977) realizou um experimento com rotor Savonius em um túnel de vento onde analisou diversos parâmetros, como, influência do número de Reynolds, proporção do diâmetro por espessura das pás do rotor e efeitos da sobreposição das pás para rotores de 2 ou 3 pás.

Santos et al. (2024) realizou um experimento com rotor Savonius em um dispositivo de coluna oscilante utilizando o método de design construtal. Neste trabalho foi analisada a adição de defletores e constatado que a razão da altura pelo comprimento da câmara hidropneumática influencia o comportamento dos indicadores de performance do dispositivo, especialmente em termos da potência pneumática, onde, variações de até 100 W foram observadas.

O objetivo do presente trabalho é desenvolver a modelagem computacional, bidimensional, para uma turbina do tipo Savonius (em rotação, através de uma malha móvel) no duto de admissão e saída de ar do dispositivo. Para esta modelagem, é aplicado o método dos volumes finitos (MVF). Com relação às malhas computacionais, as mesmas foram geradas através do software livre GMSH 4.8.0 (Geuzaine e Remacle, 2019) e a resolução das equações médias no tempo da continuidade, balanço da quantidade de movimento, e modelo de turbulência *k-ω SST*, são efetuadas com software livre OpenFOAM (Greenshields, 2022).

2 MODELAGEM COMPUTACIONAL

Para a realização deste trabalho, foi utilizado o software livre OpenFOAM, uma plataforma para resolução de modelos de engenharia, utilizando os modelos de balanço de energia, quantidade de movimento, turbulência e massa através de uma discretização por volumes finitos do domínio computacional mostrado na figura 1.

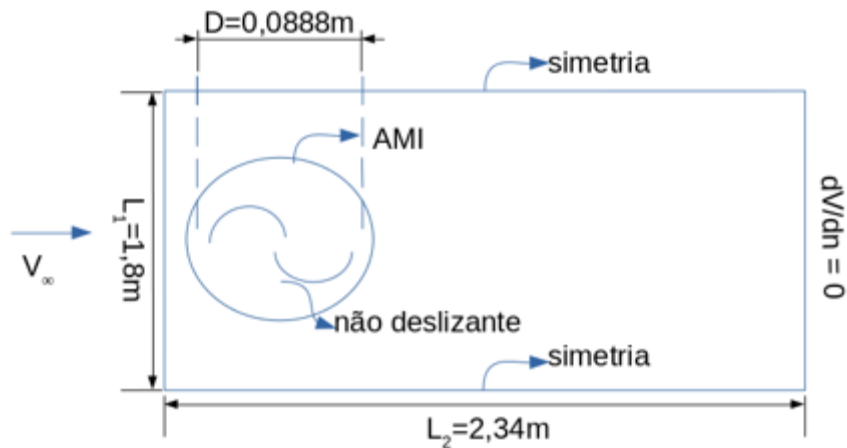


Figura 1: Desenho esquemático do domínio computacional (não está na escala).

A figura 1 mostra um desenho esquemático do domínio bidimensional com as condições de contorno utilizadas. Na região de entrada a condição é de velocidade prescrita, $V_{\infty} = 0,888\text{m/s}$, na saída do fluxo foi definida como não tendo gradiente de velocidade em relação à direção normal do escoamento, nas faces superior e inferior foi aplicada a condição de simetria. Nas pás do rotor foi aplicada a condição de não deslizamento e a região do rotor foi definido como AMI (*Arbitrary Mesh Interface*) para simular fluxos em regiões que se movem ou deformam em relação a outras, ou seja, para que haja a rotação fixa do rotor.

O domínio computacional bidimensional mostrado na figura 1 foi discretizado com o software Gmsh.

A figura 2 mostra a discretização de todo o domínio computacional. Nesta é possível observar que geralmente são utilizados volumes hexagonais cujas arestas são alinhadas com os eixos coordenados e possuindo aproximadamente 500.000 volumes

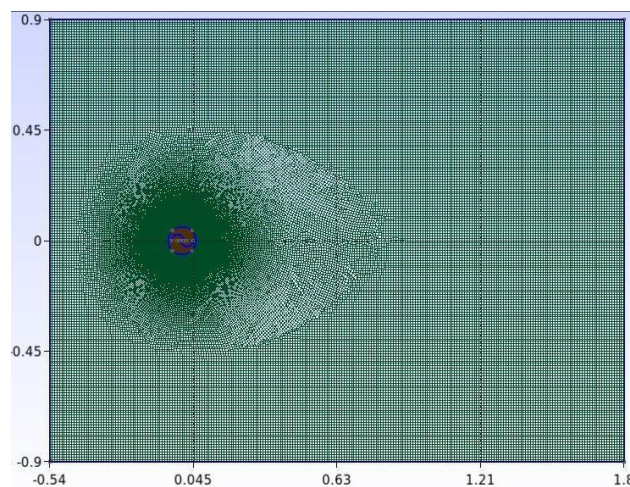


Figura 2: Discretização do domínio computacional.

Um detalhe da região próxima a turbina é mostrado na figura 3. A região circular (marrom) é a parte móvel do domínio computacional. Esta é responsável por simular o movimento das pás em relação à região mais afastada que é discretizada com uma malha fixa. Nesta região também são utilizados volumes hexagonais, contudo não é possível que suas arestas estejam perfeitamente alinhadas com os eixos coordenados. Existem também alguns volumes com formato triangular ou poliédrico os quais são necessários em algumas regiões do domínio. Próxima às pás (ver figura 3b), existe uma região de refinamento extra com uma camada de volumes regulares. Estes são necessários para a captura correta dos fenômenos de arrasto e sustentação.

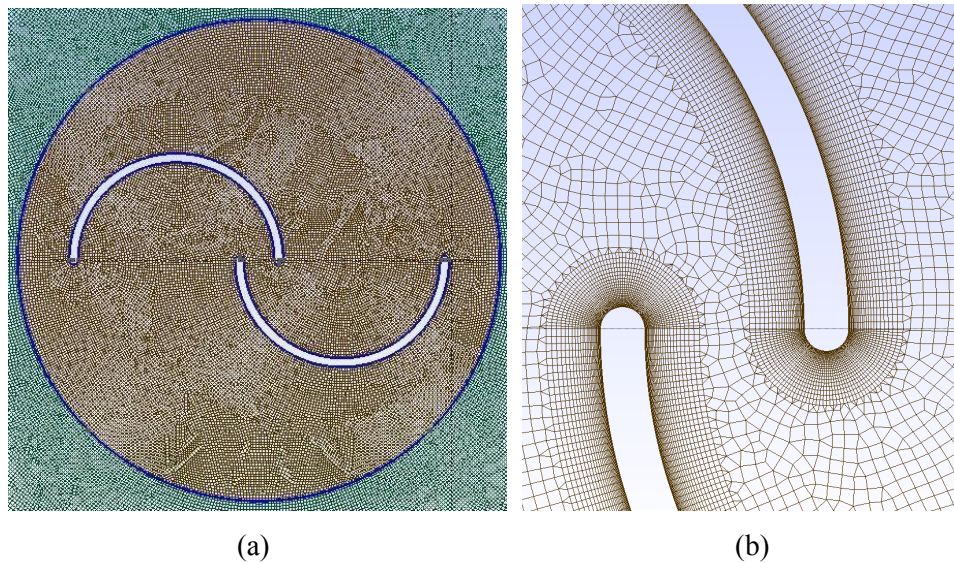


Figura 3: Detalhe da região da turbina.

3 MODELAGEM MATEMÁTICA

Foram usadas as equações de conservação da massa, quantidade de movimento (Navier-Stokes) e o modelo de turbulência $k-\omega$ SST:

3.1 Equações de conservação de massa e quantidade de movimento

No presente trabalho uma modelagem RANS (*Reynolds Average Navier-Stokes*) foi utilizada para a turbulência. Desta forma, as equações de balanço de massa e quantidade de movimento podem ser descritas como (Versteeg e Malalasekera, 2007),

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} \quad (2)$$

onde, ρ é a massa específica [kg/m³], $\vec{v}$ é o vetor velocidade [m/s], p é a pressão [Pa], t é o tempo [s], $\vec{g}$ é o vetor aceleração da gravidade [m/s], e $\bar{\tau}$ é o tensor taxa de deformação [Pa].

3.2 Modelo de turbulência

O modelo κ - ω SST pode ser descrito por duas equações (Menter, 1993). A equação do transporte da energia cinética turbulenta (κ) expressa por:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \kappa) + \nabla \cdot (\rho \kappa \vec{v}) = \nabla \cdot [(\mu + \sigma_\kappa \mu_t) \nabla \kappa] + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \bar{\tau}) - \beta^* \rho \omega \kappa \quad (3)$$

e a equação do transporte para a dissipação da energia específica (ω):

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \nabla \cdot (\rho \omega \vec{v}) = & \nabla \cdot [(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \nabla \omega] + \left(\frac{\alpha \omega}{\kappa}\right) \bar{\tau} \nabla \cdot \vec{v} - \beta \rho \omega^2 \\ & + 2(1 - F_1) \frac{\rho \sigma_{\omega 2}}{\omega} \nabla \kappa \nabla \omega \end{aligned} \quad (4)$$

onde, $\bar{\tau}$ é o tensor de Reynolds [N/m²], β e β^* são constantes do modelo [-], μ é a viscosidade dinâmica do fluido [kg/m.s], μ_t é a viscosidade turbulenta [kg/m s], σ_κ e σ_ω são o número de Prandtl para κ e ω respectivamente [-].

F_1 é uma função que intercala a equação que melhor representa a turbulência para o escoamento próximo da região de parede ou no escoamento livre, que é definida como:

$$F_1 = \tanh \left\{ \left\{ \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{\kappa}}{0,09 \omega y}, \frac{500 \nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4 \rho \sigma_{\omega 2} \kappa}{CD_{\kappa \omega} y^2} \right] \right\}^4 \right\} \quad (5)$$

onde, y é a distância até a próxima superfície [m], $\sigma_{\omega 2}$ é uma constante empírica do modelo [-] e $CD_{\kappa \omega}$ é a porção positiva do termo de difusão cruzada [-].

3.3 Descrição da simulação

Todas as simulações deste trabalho foram realizadas com o software OpenFOAM, mais especificamente com o *solver pimpleFoam*. Neste, o algoritmo pimple é utilizado para tratar o problema do acoplamento pressão-velocidade. De uma forma geral, todos

os termos envolvendo divergentes foram interpolados com um esquema *upwind* enquanto que os gradientes com um esquema de diferenças centradas.. O sistema de equações foi resolvido em regime transiente, sendo que o critério de convergência foi escolhido como 1×10^{-7} para todas as variáveis. O passo de tempo foi mantido constante e igual a 1×10^{-4} e o tempo total de simulação foi de aproximadamente 24 horas.

4 PARÂMETROS DE PERFORMANCE

Em todos os casos simulados neste estudo o número de Reynolds foi mantido o mesmo, sendo que, quando foram necessárias alterações no diâmetro, os valores da viscosidade cinemática do fluido foram também modificados para manter o mesmo *Re*. O número de Reynolds é definido por

$$Re = \frac{DU_{inf}}{\nu} \quad (6)$$

onde U_{inf} é a velocidade do vento no escoamento [m/s], ν é a viscosidade cinemática do fluido [m²/s] e D o diâmetro da turbina [m]. Todos os parâmetros são ajustados para manter um número de Reynolds constante e igual a 864000.

Outro fator importante para a análise de desempenho neste estudo é a razão de velocidade de ponta (λ), que neste trabalho teve uma variação de 0,25; 0,5; 1 e 1,5 gerando as respectivas velocidades angular do rotor. Quando feitas alterações na geometria do rotor este parâmetro, junto ao número de Reynolds, é mantido o mesmo para comparação dos coeficientes aerodinâmicos. Esse valor adimensional pode ser expresso por (Gasch e Tvele, 2012):

$$\lambda = \frac{U_{tan}}{U_{inf}} \quad (7)$$

onde U_{tan} é a velocidade de tangencial na ponta das pás da turbina [m/s] e é dada pela seguinte expressão:

$$U_{tan} = \omega \cdot \frac{D}{2} \quad (8)$$

onde ω é a velocidade angular da turbina [rad/s] e D é o diâmetro da turbina Savonius [m].

Segundo Gasch e Tvele (2012) o coeficiente de torque dinâmico (C_t) e de potência (C_p) gerados por um rotor como Savonius são calculados, respectivamente, pelas equações,

$$C_t = \frac{M}{\frac{1}{4}\rho U_{inf}^2 D^2 H} \quad (9)$$

e

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho U_{inf}^3 DH} \quad (10)$$

onde H é a altura do rotor [m], M é o torque dinâmico [Nm] e P é a potência produzida pelo rotor [W].

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As simulações realizadas permitiram a criação da curva do coeficiente de potência da turbina com qual se fez a comparação com os trabalhos de (Akwa et al., 2012) e de (Blackwell et al., 1977) a fim de se validar o modelo computacional, evidenciado pela Figura 4.

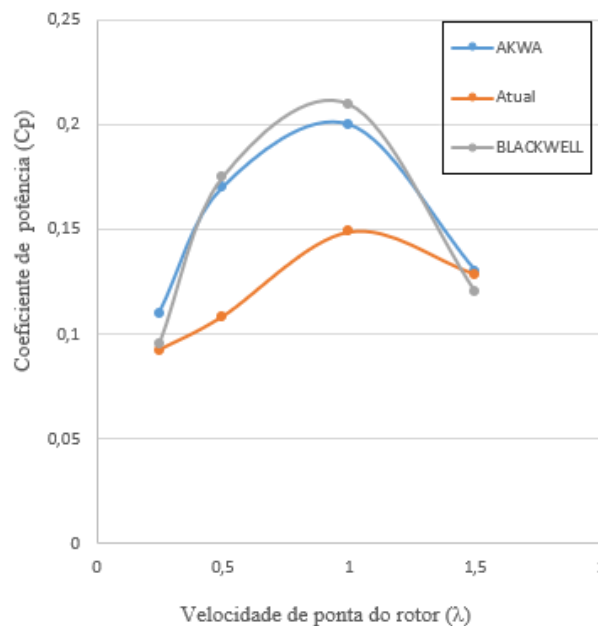


Figura 4: Curva do coeficiente de potência versus a velocidade de ponta

Na Figura 4 é exposta a relação do coeficiente de potência *versus* a velocidade aparente do rotor, e também a comparação com os trabalhos de (Akwa et al., 2012) e de (Blackwell et al., 1977). A diferença observada entre os valores do presente trabalho e os da referência, principalmente para os valores intermediários da velocidade de ponta do rotor, mostra que o modelo ainda não está devidamente ajustado. Refinamento de

malha e modelo de turbulência estão sendo investigados com a perspectiva de diminuir estas diferenças.

O perfil de pressão, de velocidade e da vorticidade do escoamento são representadas pelas figuras 5, 6 e 7, respectivamente.

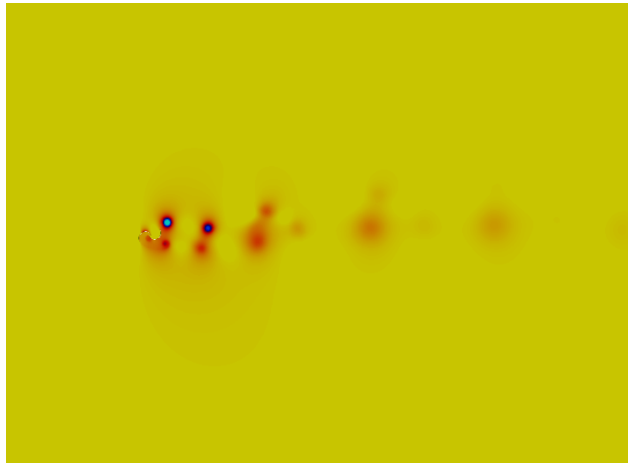


Figura 5: Perfil de pressão gerado no escoamento

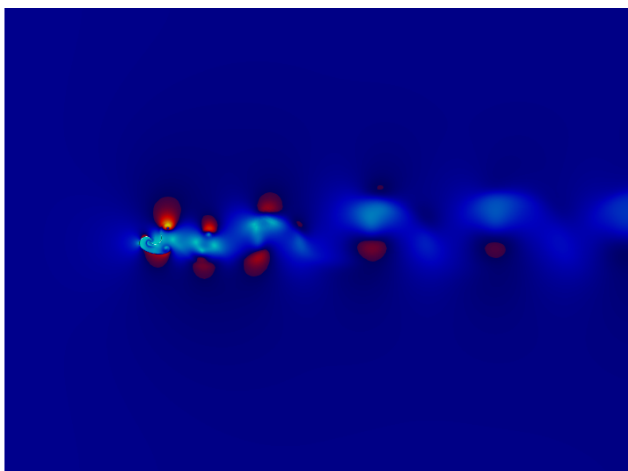


Figura 6: Perfil de velocidade gerado no escoamento

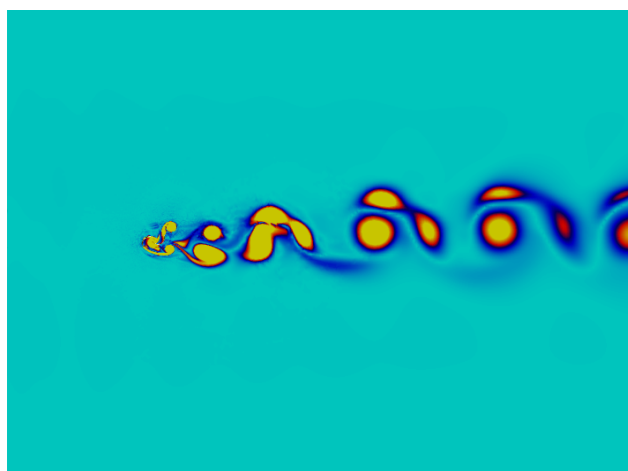


Figura 7: Perfil da vorticidade gerado no escoamento

Na Figura 5 é exposto o campo de pressão no escoamento, e é observado que na região próximos às pás se tem um gradiente negativo pela influência da rotação do rotor, e adiante se vê que o fenômeno é muito visto em escoamentos turbulentos e com aparição de vórtices.

Na Figura 6 é exposto o campo de velocidade mostrando alguns vórtices caracterizando o escoamento como turbulento e totalmente desenvolvido, chegando até o final do domínio computacional.

Na Figura 7 é exposto o campo de vorticidade evidenciando os vórtices gerados pela rotação do rotor, conforme o escoamento se completa os vórtices ficam mais dispersos.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho traz os passos iniciais da modelagem de uma turbina do tipo Savonius utilizando o *software* OpenFOAM. O modelo já apresenta resultados razoáveis mas ainda necessita de alguns ajustes. Esta é uma etapa intermediária para estudos futuros que irão também incluir um modelo de 6 graus de liberdade (6DoF) já implementado no *software* OpenFOAM, para que a turbina possa girar livremente com a atuação do fluxo de ar, ao invés da imposição da rotação, como foi feito no presente trabalho.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo fomento do projeto com uma bolsa de doutorado (Processo: 88887.840360/2023-00).

REFERÊNCIAS

- Akwa, J. V., G. Alves da silva júnior, A. P. Petry (2012). Discussion on the verification of the overlap ratio influence on performance coefficients of a Savonius wind rotor using computational fluid dynamics. *Renewable Energy*, 38(1), 141–149.
- Blackwell, B. F., R. E. Sheldahl, e L. V. Feltz (1977). Wind tunnel performance data for two and three bucket savonius rotors. *Journal of Energy*. Albuquerque, New Mexico, v. 2 n. 3, 160-164.
- Cruz, J. M. e A. J. Sarmiento (2004). *Energia das ondas: introdução aos aspectos tecnológicos, económicos e ambientais*. Portugal: Instituto do Ambiente Alfragide. 2004.
- Empresa de pesquisa energética (2022). *Balanço Energético Nacional*. Brasília: EPE, 2022.

- Frikha, S., Z. Driss, E. Ayadi, Z. Masmoudi, e M. S. Abid (2016). Numerical and experimental characterization of multi-stage Savonius rotors. *Energy*, 114, 382–404.
- Gasch, R., e J. Tvele (2012). *Wind Power Plants: Fundamentals, Design, Construction and Operation*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Geuzaine, C. e J.-F. Remacle (2019). *Gmsh Reference Manual*. Université de Liège and Université catholique de Louvain.
- Greenshields, C (2022). *OpenFOAM v10 User Guide*. London, UK: The OpenFOAM Foundation.
- Hassan Saeed, H. A., A. M. Nagib Elmekawy, e S. Z. Kassab (2019). Numerical study of improving Savonius turbine power coefficient by various blade shapes. *Alexandria Engineering Journal*.
- Jenniches, S. (2018). Assessing the regional economic impacts of renewable energy sources – A literature review. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 93, 35-51.
- Letzow, M., F. Levien, R. dos P. Pons, M. N. Gomes, J. A. Souza, L. A. O. Rocha, L. A. Isoldi, e E. D. Dos Santos (2017). Avaliação geométrica da câmara de um dispositivo de conversão de energia das ondas do tipo owc para diferentes comprimentos da borda frontal. *Revista Brasileira de Energia Renováveis*, v. 6, p. 454-471, 2017.
- Menter, F. R (1993). Zonal two equation $k-\omega$ turbulence models for aerodynamic flows. 23rd Fluid Dynamics, Plasmadynamics and Lasers Conference. Orlando, Florida.
- Paixão Conde, J. M., e L. M. C. Gato (2008). Numerical study of the air-flow in an oscillating water column wave energy converter. *Renewable Energy*, 33(12), 2637–2644.
- Santos, A. L. G (2021). Abordagem numérica e o método design construtal para avaliação geométrica de um dispositivo do tipo coluna de água oscilante considerando a inserção de turbina savonius. Tese. Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional, Rio Grande/RS.
- Santos, A. L. G., A. P. Petry, L. A. Isoldi, G. Dias, J. A. Souza, e E. D. dos Santos (2022). Desenvolvimento de um modelo computacional para a simulação de um dispositivo conversor de energia das ondas do tipo coluna de água oscilante considerando turbina Savonius. XXV ENMC, XIII ECTM, 9º MCSul e IX SEMENGO.
- Santos, A. L. G., R. S. Vieira, F. B. Teixeira, G. Dias, L. A. O. Rocha, L. A. Isoldi, J. A. Souza, e E. D. Dos Santos (2024). Numerical analysis of the effects of deflectors inserted inside the duct of an oscillating water column device with an existing Savonius turbine. *Ciência e Natura*, 46, spe 1, e87150.
- Savonius, S. J (1930). Wind Rotor –Patent 1,766,765, United States Patent Office.

- Tartuferi, M., V. D'Alessandro, S. Montelpare, e R. Ricci (2019). Enhancement of Savonius wind rotor aerodynamic performance: a computational study of new blade shapes and curtain systems. *Energy*, 79, 371–384.
- Versteeg, H. K., e W. Malalasekera (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. England Pearson Education Limited, second edition.
- Wekesa, D. W., C. Wang, Y. Wei, e W. Zhu (2016). Experimental and numerical study of turbulence effect on aerodynamic performance of a small-scale vertical axis wind turbine. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 157, 1–14.