



ANÁLISE NUMÉRICA DE UM ROTOR DE EIXO VERTICAL HÍBRIDO COMBINANDO TURBINAS DARRIEUS DE TRÊS LÂMINAS E SAVONIUS DE DUAS PÁS

Rhuandrei Gabriel da Silva Inácio¹; Gustavo da Cunha Dias²; Liércio André Isoldi³;
Luiz Alberto Oliveira Rocha⁴; Rafael Adriano Alves Camargo Gonçalves⁵;
Elizaldo Domingues dos Santos⁶

Resumo: O presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um modelo de dinâmica dos fluidos computacional para a simulação de turbinas verticais híbridas combinando rotores Darrieus e Savonius. Para isso, primeiramente são verificados o coeficiente de potência (C_p) para três diferentes velocidades de ponta de pá (λ) para turbinas Darrieus e Savonius, simuladas de forma isolada. Em um segundo momento, são realizadas as simulações para a mesma velocidade de ponta de pá da turbina Darrieus externa (λ_D) sendo analisado o comportamento transiente da turbina e os coeficientes instantâneos e médios de potência para a turbina híbrida. São considerados escoamentos incompressíveis, turbulentos, transientes em um domínio bidimensional. A modelagem do problema consiste na solução numérica das equações de conservação de massa e quantidade de movimento nas direções x e y transientes e médias no tempo através do método de volumes finitos (MVF) disponível no software Ansys FLUENT (versão 2022 R1). Para o fechamento da turbulência é empregado o modelo $k - \omega$ SST (*Shear Stress Transport*). Os resultados demonstraram que o modelo computacional apresentou bons resultados para os rotores Darrieus e, principalmente, Savonius quando comparado com a literatura. O rotor híbrido apresentou aumento do C_p médio para $TSR = 1,0$ e diminuição para $TSR = 1,5$ quando comparado com a turbina Darrieus.

Palavras-chave: Simulação Numérica; Escoamento Turbulento; Rotor Savonius; Rotor Darrieus; Rotor Híbrido

¹ Universidade Federal do Rio Grande / rhuandreigabriel99@gmail.com

² Universidade Federal do Rio Grande / falecomgustavodias@hotmail.com

³ Universidade Federal do Rio Grande / liercioisoldi@furg.br

⁴ Universidade Federal do Rio Grande do Sul / luizrocha@mecanica.ufrgs.br

⁵ Universidade Federal do Rio Grande / rafaelcamagon@gmail.com

⁶ Universidade Federal do Rio Grande / elizaldosantos@furg.com

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, os efeitos climáticos têm se tornado mais severos, afetando em alta escala o ambiente e atraindo olhares da comunidade internacional para os agentes causadores que contribuem para tal desequilíbrio. A comunidade científica tem direcionado parte dos estudos para o campo de fontes renováveis de energia, a fim de aumentar sua participação na matriz energética e diminuir a dependência de combustíveis fósseis. De acordo com o relatório “*Low Emissions Scenario*” da Statkraft (2023), acredita-se que até 2050 mais de 80% da energia consumida no mundo será renovável. Cabe ressaltar também a estimativa de aumento de 8 vezes na produção por fontes eólicas.

Com o intuito de aproveitar e analisar a capacidade de geração de energia por meio eólico, as regiões urbanas vêm se potencializando como prováveis objetos de estudo. Uma das razões para isso é a distância entre o ponto de geração e centro de carga de potência, que dificulta a chegada de redes de energia e gera perdas por transmissão e distribuição. Uma alternativa para a geração mais próxima do ponto de carga é o uso de turbinas eólicas de eixo vertical (VAWTs – *Vertical Axis Wind Turbines*) devido a vantagens como a simplicidade do design, inexistência de mecanismo de guinada, facilidade de manuseio e produção independente da direção do vento (Jacob e Charterjee, 2018).

As VAWTs apresentam características próprias bem definidas que as diferenciam uma das outras. Por exemplo, a turbina Darrieus do tipo-H é um modelo que se beneficia da sustentação gerada nos seus perfis aerodinâmicos e que apresentam desse modo melhores coeficientes de potência em faixas de razão de velocidade mais elevadas ($TSR > 1$). Contudo, apresentam dificuldades de auto partida em baixas velocidades (Elkhoury *et al.*, 2015). Por outro lado, a turbina Savonius utiliza principalmente o efeito de arrasto para sua operação, obtendo um melhor desempenho de auto partida em baixas velocidades ($TSR < 1$) (Blackwell *et al.*, 1977). Para elevadas razões de velocidade de ponta de pá, surgem forças de arrasto excessivas (arrasto parasita), reduzindo sua capacidade de geração de potência.

As modelagens de hibridização de turbinas surgem da necessidade de beneficiamento da ampla faixa de magnitudes de velocidade dos ventos disponível. Logo, uma das formas de minimizar ou corrigir as dificuldades de operação de algumas turbinas VAWTs consiste na combinação de novos modelos tais como os híbridos Darrieus-Savonius. Porém, a caracterização dos principais parâmetros de influência sobre a turbina se tornam necessários para compreensão e novas sugestões de aperfeiçoamento. No campo de revisões da temática de fatores geométricos de influência, destaca-se as contribuições de Sarma *et al.* (2021). Nesse trabalho foi realizada uma extensiva análise que classifica os diversos estudos em torno dos rotores híbridos e suas configurações, auxiliando na interpretação dos efeitos físicos gerados pela razão de raios (RR), razão de aspecto (AR), razão de sobreposição (OR), entre outros.

A presente pesquisa procura contribuir com a avaliação numérica dos coeficientes de potência (C_p) para diferentes valores de TSR (*Tip Speed Ratio*) de 1.0; 1.25; e 1.5 para os rotores Savonius e Darrieus isolados, bem como busca compreender o comportamento do escoamento turbulento sobre as turbinas e validar o presente modelo numérico através da comparação com resultados numéricos e experimentais da literatura. Para finalizar, são propostos novos resultados de C_p para uma turbina híbrida Darrieus/Savonius composta de uma turbina Darrieus com as mesmas dimensões da configuração Darrieus isolada e com uma turbina Savonius de menor dimensão montada de forma concêntrica ao rotor

Darrieus. A partir dessa nova configuração, pretende-se diminuir as forças de arrasto parasitas em altas velocidades para o caso da turbina Savonius, porém, mantendo o benefício da auto partida, que é uma fragilidade para as turbinas Darrieus. Nesse trabalho, serão estudados três diferentes valores de TSR para o caso da turbina híbrida, buscando-se analisar os efeitos físicos da mudança de geometria do problema (zonas de alta ou baixa pressão ao longo das pás) e como essas podem afetar o desempenho da turbina. Para todos os casos é considerado um escoamento turbulento de ar em um domínio bidimensional e no regime transiente. O número de Reynolds baseado no diâmetro do rotor Darrieus (D) é $Re_D = 438.200$.

2 MODELAGEM MATEMÁTICA E NUMÉRICA

A seguir são apresentados a descrição do problema físico a ser analisado, que trata de escoamentos turbulentos sobre três diferentes configurações de turbinas: Darrieus, Savonius e Darrieus/Savonius, os indicadores de performance, bem como a modelagem matemática e numérica dos escoamentos turbulentos estudados.

2.1 Descrição do Problema

O domínio computacional a ser estudado é apresentado na figura 1 para todos os rotores investigados. A região rotacional (cinza) tem seu diâmetro definido de forma a não influenciar as condições de simulação, proporcional ao diâmetro da turbina e com todos os rotores rotacionando no sentido anti-horário. Além disso, no presente estudo, uma rotação constante é imposta no domínio representando uma condição de estabilidade do escoamento sobre a turbina. Na região externa ao domínio rotacional, é considerado um domínio estático. Além disso, a altura e comprimento do domínio computacional foram definidos de forma a evitar influência das condições de contorno no escoamento em torno da turbina. Foi utilizado um comprimento ($L = 26D$), altura ($H = 12D$), comprimento relativo à entrada ($L_I = 12D$). Para os casos de verificação, foram considerados os diâmetros $D = 800$ mm para a turbina Darrieus, e $D = 1800$ mm para a turbina Savonius. Para a turbina híbrida foram considerados diâmetros de $D_D = 800$ mm e $D_S = 320$ mm para os rotores Darrieus e Savonius, respectivamente, que conduzem a uma Razão de Raio $RR = 0,4$. Os valores propostos se baseiam nos artigos de Akwa *et al.* (2012), Santos *et al.* (2022) e Hosseini *et al.* (2018). Os detalhes da região rotacional com as dimensões das turbinas Savonius, Darrieus e híbrida podem ser vistas na figura 2(a) – (c), respectivamente.

As condições de contorno são apresentadas na tabela 1, sendo as variáveis aplicadas durante a simulação de todos os rotores. Ressalta-se que os parâmetros utilizados nos casos da turbina híbrida foram definidos a partir das configurações do rotor Darrieus. A Intensidade de Turbulência (IT) é definida por $IT(\%) = 100 \cdot \sqrt{\bar{u}'^2} / V_\infty$, onde \bar{u}' é o campo médio das flutuações (tensão de Reynolds) e V_∞ é a velocidade da corrente livre (Schlichting *et al.*, 2000).

Os parâmetros geométricos da turbina Savonius são apresentados na figura 2(a). Para o caso de verificação foi empregada uma sobreposição de pás ($a = 0$ mm), perfis com

espessura ($e = 7.2$ mm), corda ($c = 972$ mm) e uma sobreposição ($s = 144$ mm). O rotor Darrieus tipo H apresentado na figura 2(b) possui 3 aerofólios de modelo NACA 0018, que foi utilizado pois apresenta uma maior sustentação em baixas velocidades, o que é uma tendência dos perfis espessos. Foi considerado também um comprimento de corda $C = 200$ mm e um ângulo de ataque de $\varphi = 0^\circ$.

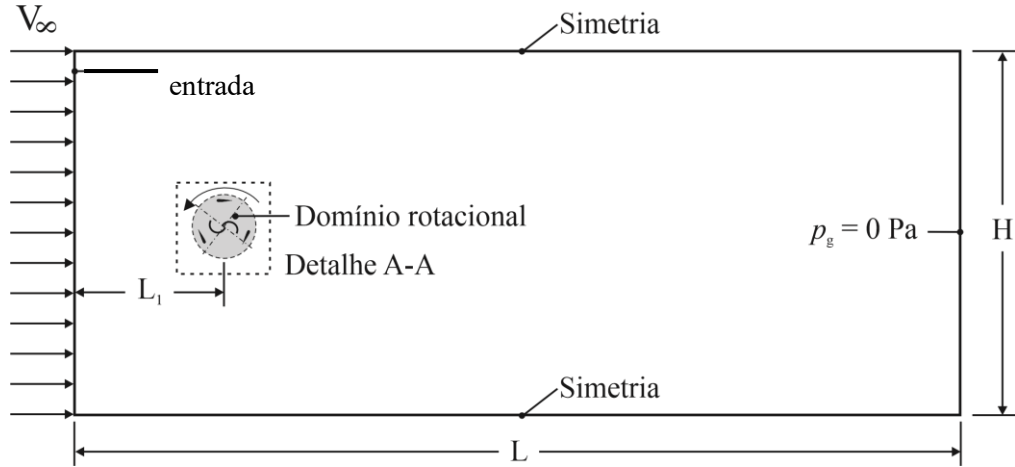


Figura 1: Domínio Computacional empregado nas simulações.

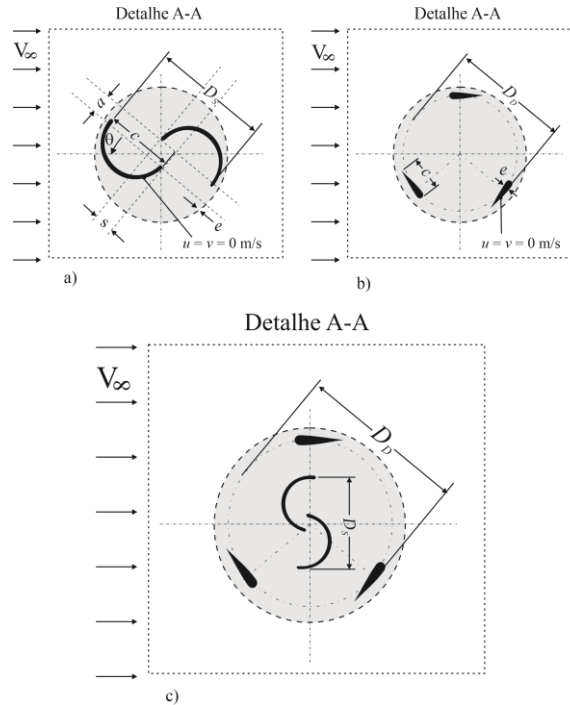


Figura 2: Visão detalhada dos diferentes rotors investigados: **a)** Savonius, **b)** Darrieus, **c)** Híbrido Darrieus/Savonius

O modelo híbrido esquematizado na figura 2(c) possui o rotor Darrieus com as mesmas dimensões usadas no caso de verificação, enquanto para a turbina Savonius as dimensões são: $a_s = 0$ mm, $e_s = 1$ mm, $c_s = 168$ mm e $s_s = 16$ mm. Como está sendo abordado um domínio bidimensional, assume-se que os rotors Darrieus e Savonius possuem a mesma altura (profundidade no caso do presente domínio computacional).

Tabela 1: Condições de Contorno utilizadas nos casos estudados.

Parâmetros/Turbina	Savonius	Darrieus / Híbrida
V_{∞}	7 m/s	8 m/s
IT (%)	1,0	1,0
$Re_D = \rho V_{\infty} D_{S,D} / \mu$	$86,70 \times 10^4$	$43,82 \times 10^4$
Viscosidade dinâmica (μ)	$1,7894 \times 10^{-5}$ Pa.s	
Massa específica (ρ)	$1,225$ kg/m ³	
TSR = $\eta R / V_{\infty}$	1,0 / 1,25 / 1,5	
η (rad/s)	7,77 / 9,72 / 11,66	20 / 25 / 30
Tempo de análise do escoamento (t_f)	3,5 s	
Tempo para análise estatística	$1,75 \text{ s} \leq t \leq 3,5 \text{ s}$	

* Subscritos S, D – Savonius e Darrieus, respectivamente

Os parâmetros geométricos adimensionais possuem grande influência no desempenho da turbina eólica como retratado nas revisões de Sarma *et al.* (2021), principalmente no rotor híbrido que está submetido a diferentes efeitos fluidodinâmicos de dois rotores. Neste trabalho, busca-se desenvolver um modelo computacional para simular turbinas híbridas, possibilitando a análise futura de parâmetros investigados na literatura, como descrito por Mohamed (2013), incluindo razão de solidez (σ), razão de sobreposição (OR), razão de raios (RR) e razão de aspecto (AR). No entanto, neste estudo, esses valores serão considerados constantes para cada caso e não serão objeto de investigação.

Para analisar o desempenho das turbinas, é monitorado o C_P , que é obtido a partir do coeficiente de momento (C_m), que é a relação entre o torque gerado pela turbina eólica e o torque desenvolvido pelo escoamento livre. Os coeficientes C_m e C_p são dados, respectivamente, por :

$$C_m = \frac{T_{turbina}}{\frac{1}{2} \rho A_v V_{\infty}^2 R_{S,D}} \quad (1)$$

$$C_p = \frac{P_{turbina}}{\frac{1}{2} \rho A_v V_{\infty}^3} = C_m \times \text{TSR} \quad (2)$$

onde $T_{turbina}$ representa o torque na turbina, e A_v representa a área de varredura da turbina ($D \times H$).

2.2 Equações Governantes do Escoamento Turbulento

Para a modelagem matemática dos escoamentos turbulentos, transientes, incompressíveis e em um domínio bidimensional, são resolvidas as equações de conservação de massa e do balanço da quantidade de movimento médias no tempo (após a aplicação de um operador de média temporal). Essa metodologia é denominada URANS (*Unsteady*

Reynolds Averaged Navier Stokes) e as equações de conservação de massa e balanço da quantidade de movimento nas direções x e y médias no tempo são dadas, respectivamente, por (Wilcox, 2006):

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

$$\rho \left[\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + (\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} \right) \right] \quad (4)$$

$$\rho \left[\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + (\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} \right) \right] \quad (5)$$

onde \bar{u} e \bar{v} representam a média temporal das componentes da velocidade nas direções x e y (m/s), p é a pressão média no tempo (N/m²), μ é a viscosidade dinâmica (kg/(m·s)) e μ_t é a viscosidade turbulenta (kg/(m·s)), que é oriunda do problema de fechamento devido à aplicação do operador média temporal nos termos advectivos das equações (4) e (5).

Para a solução de μ_t é utilizado o modelo $k-\omega$ SST, que prevê apropriadamente o escoamento externo (cisalhantes livres) em esteiras de vórtices. Esse modelo possui alteração gradual no cálculo de μ_t , utilizando-se o modelo $k-\omega$ em regiões internas da camada limite (próximos de parede) e $k-\epsilon$ na região distante da turbina onde há maior isotropia do escoamento turbulento. A equação da viscosidade turbulenta segue os estudos de Menter *et al.* (2003), sendo expressa como:

$$\mu_t = \frac{\bar{\rho} \cdot \alpha_1 \cdot k_T}{\max(\alpha_1 \omega_T, S_T F_2)} \quad (6)$$

A viscosidade turbulenta, equação (6), é obtida a partir da solução de equações de transporte da energia cinética da turbulência (k) e de sua taxa de dissipação específica (ω) dadas, respectivamente, por:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_i k)}{\partial x_i} = \tilde{P}_k - \frac{k^{\frac{3}{2}}}{L_T} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] \quad (7)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_i \omega)}{\partial x_i} = \frac{\alpha}{\mu_t} \tilde{P}_k - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_i} + 2(1 - F_1) \frac{\sigma_{\omega 2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \quad (8)$$

em que \tilde{P}_k é uma função que evita a geração de turbulência em zonas estagnadas. Os valores para $\beta = 0,09$; $\sigma_k = 0,85$; $\sigma_\omega = 0,5$; são valores de constantes e utilizados quando necessários. O índice i representa a direção do escoamento do fluido ($i=1$ é o escoamento na direção x e $i=2$ o escoamento na direção y), sendo utilizadas as constantes $\beta_1 = 3/40$; $\alpha_1 = 5/9$; $\sigma_2 = 0,44$; $\beta_2 = 0,0828$; $\sigma_{k2} = 1$; $\sigma_{\omega 2} = 0,856$.

As funções de mistura F_1 e F_2 são combinações definidas por Menter *et al.* (2003), que servem para ajustar a solução entre os modelos $k-\omega$ e $k-\epsilon$, dadas por:

$$F_1 = \tanh \left\{ \left\{ \min \left[\max \left(\frac{k^{\frac{1}{2}}}{\beta^* \omega y}, \frac{500v}{y^2 \omega} \right), \frac{4\rho \sigma_{\omega 2} k}{CD_{kw} y^2} \right] \right\}^4 \right\} \quad (9)$$

$$F_2 = \tanh \left\{ \left[\max \left(\frac{2k^{\frac{1}{2}}}{\beta^* \omega y}, \frac{500v}{y^2 \omega} \right) \right]^2 \right\} \quad (10)$$

2.3 Parâmetros da Modelagem Numérica

Para a solução do modelo matemático, é utilizado o método de volumes finitos (MVF) disponível no *software* comercial Ansys Fluent, versão 2022 R1 (Versteeg e Malalasekera, 2007; ANSYS, 2022). O computador utilizado para realização das simulações apresenta um processador Intel® Core™ i7-5820K CPU @ 3.30GHZ de seis núcleos e 16.0 GB de RAM. O tempo de processamento de cada simulação foi aproximadamente 30 h.

As figuras 3, 4 e 5 apresentam a discretização do domínio computacional nos rotores Savonius, Darrieus e híbrido, respectivamente, bem como o refinamento nas regiões que apresentam maior intensidade dos gradientes de velocidade, i.e., nas paredes das turbinas.

Nas configurações dos métodos de solução da simulação, apresentadas na tabela 2, para o acoplamento da pressão-velocidade foi utilizado o algoritmo SIMPLE (*Semi Implicit Method for Pressure Linked Equations*). Para tratar dos termos advectivos foi aplicado a função de interpolação de *Upwind* de primeira ordem, com *Flux Type Rhie-Chow: distance based*.

As simulações foram consideradas convergidas quando os resíduos da continuidade, velocidade em x e y (equações da quantidade de movimento) e equações de transporte de k e ω foram menores que 10^{-6} . Foram empregados 2000 passos de tempo, com passo de tempo de $\Delta t = 0,00175$ s, resultando em um tempo final de simulação de $t_f = 3,5$ s. No intervalo $1,75 \text{ s} \leq t \leq 3,75 \text{ s}$ foi realizado o monitoramento RMS (*Root Mean Square*) de C_m e C_p para comparação entre os diferentes rotores e TSR investigados. O número máximo de iterações por passo de tempo aplicado foi de 180.

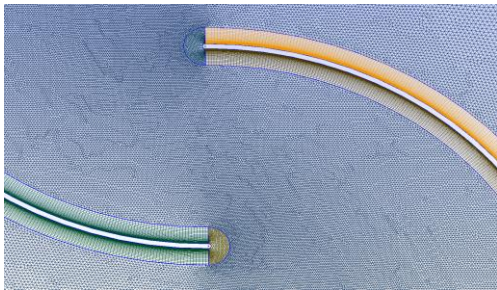


Figura 3: Refinamento do perfil da turbina Savonius.

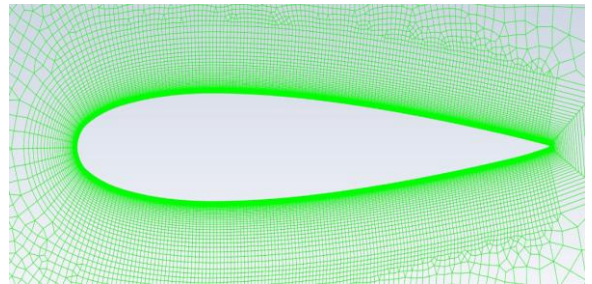


Figura 4: Refinamento e estruturação do Aerofólio da turbina Darrieus.

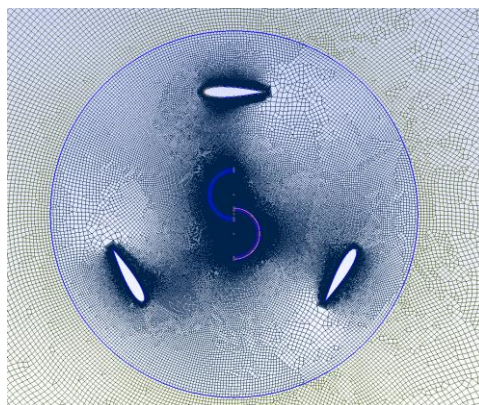


Figura 5: Refinamento de malha da turbina híbrida.

Tabela 2: Parâmetros de configuração para as simulações

Seção	Parâmetros	Configuração
<i>Solver</i>	<i>Type</i>	<i>Pressure-Based</i>
<i>Methods</i>	<i>Pressure-Velocity Coupling</i>	<i>SIMPLE</i>
	<i>Gradient</i>	<i>Least Squares Cell Based</i>
<i>Spatial Discretization</i>	<i>Pressure</i>	<i>Second Order</i>
	<i>Momentum</i>	
	<i>Turbulent Kinetic Energy</i>	<i>First Order Upwind</i>
	<i>Specific Dissipation Rate</i>	
	<i>Transient Formulation</i>	<i>First Order Implicit</i>
<i>Solution Controls</i>	<i>Pressure</i>	0,3
	<i>Momentum</i>	0,7
	<i>Turbulent Kinetic Energy</i>	0,8
	<i>Continuity</i>	
<i>Monitor / Residual</i>	<i>x – Velocity</i>	10^{-6}
	<i>y – Velocity</i>	
	<i>K</i>	
	Ω	

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O objetivo principal deste trabalho é avaliar a eficiência da turbina híbrida em relação aos modelos individuais, composto pelos modelos Darrieus tipo H e Savonius. Primeiramente é apresentado o comportamento instantâneo do C_p dos modelos utilizados na verificação, seguido por uma avaliação do coeficiente de potência médio ($\overline{C_p}$) em função do TSR dos modelos Darrieus, Híbrido e Savonius de menor dimensão.

3.1 Análise do Coeficiente de Potência Instantâneo

Nas figuras 6, 7 e 8 são apresentados os coeficientes de potência instantâneo (C_p) para TSR = 1.0, 1.25 e 1.5, respectivamente. Os resultados de C_p em função do tempo indicam que o comportamento da turbina híbrida é bastante similar ao comportamento da turbina Darrieus, com pequenas diferenças nas regiões de crista e cava devido à influência

da turbina Savonius de menor diâmetro, que com o aumento da velocidade de rotação apresenta um acréscimo de arrasto parasita. Este acréscimo conduz a uma redução C_p médio, sendo o principal precursor da queda de eficiência da turbina híbrida em elevadas magnitudes de TSR. A turbina Savonius utilizada na verificação possui uma variação de magnitude de C_p maior do que o obtido para as turbinas Darrieus e híbrida. Além disso, essa diferença é intensificada para maiores TSRs, devido ao aumento do arrasto nas lâminas de retorno, reduzindo o C_p médio. Devido à imposição forçada da rotação da turbina e da inércia, uma vez que o escoamento parte do repouso, foi utilizada para análise dos coeficientes médios os resultados obtidos para $t \geq 1,75$ s.

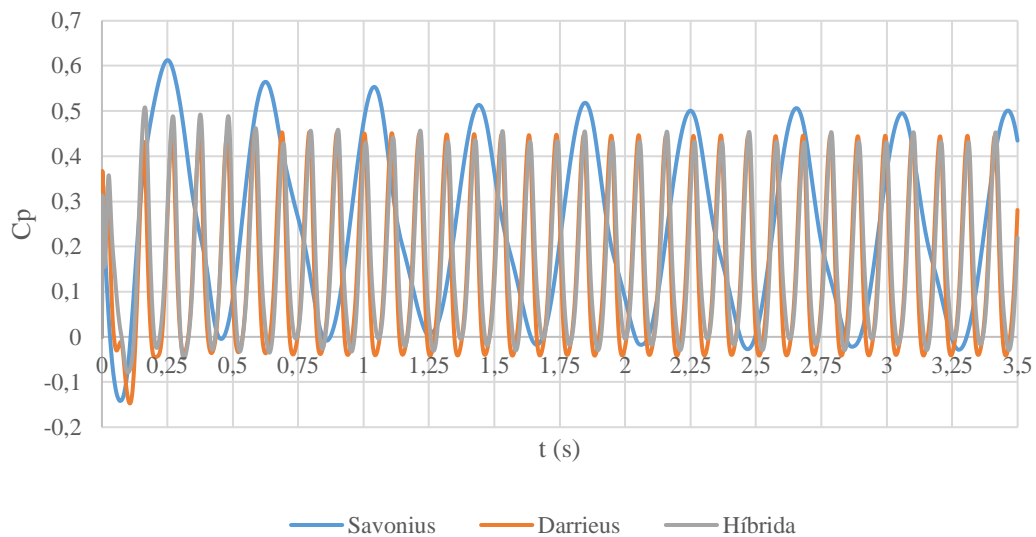


Figura 6: Coeficiente de potência instantâneo para TSR = 1,0.

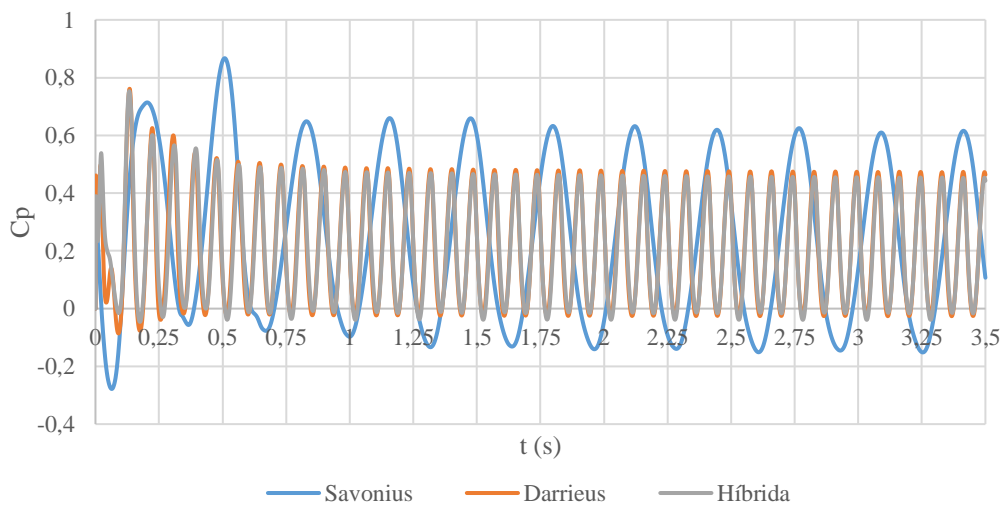


Figura 7: Coeficiente de Potência instantâneo para TSR = 1,25.

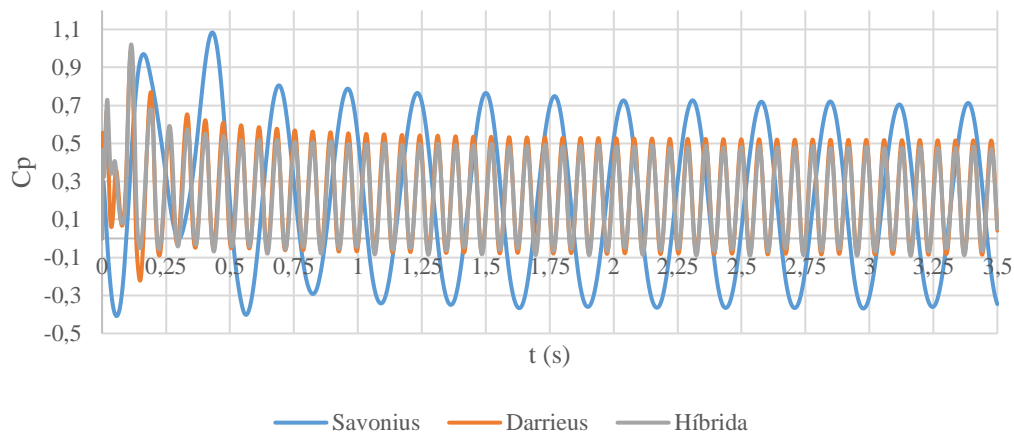


Figura 8: Coeficiente de potência instantâneo para TSR = 1,5.

3.2 Verificação Rotor Savonius e Darrieus

Para avaliar a confiabilidade do modelo computacional empregado, os resultados de C_p médio obtidos para os rotores Savonius e Darrieus isolados para diferentes magnitudes de TSR são comparados com resultados experimentais e numéricos da literatura (Blackwell *et al.*, 1977; Akwa *et al.*, 2012; Elkhoury *et al.*, 2015; Martins, 2020; Santos *et al.*, 2022; Zart e Oliveira, 2023).

No âmbito qualitativo, a figura 9 apresenta os campos de pressão e velocidade no rotor Savonius, a uma velocidade angular de 7,77 rad/s (corresponde ao TSR = 1.0), onde foi obtido $C_p = 0,23$. Comparando com os campos apresentados no trabalho de Akwa *et al.* (2012), é possível perceber alguns aspectos importantes de similaridade como a diminuição da velocidade a jusante da turbina (formação de esteiras), a queda de pressão na ponta de pá, demonstrando a formação e desprendimento de vórtices, além dos picos concentrados de pressão na parte convexa da pá e uma diferença de pressão positiva entre a região côncava e convexa da pá de avanço, sendo responsável pelo movimento da turbina. Para verificação deste modelo, a Figura 10 ilustra a comparação de C_p em função de TSR com resultados do experimento de Blackwell *et al.* (1977) e resultados numéricos da literatura. Como pode ser visto, os resultados obtidos no presente trabalho possuem magnitudes similares as previamente obtidas na literatura, pelo estudo de Akwa *et al.* (2012) e o experimento de Blackwell *et al.* (1977). Dessa forma, o modelo pode ser considerado válido para a simulação da turbina Savonius.

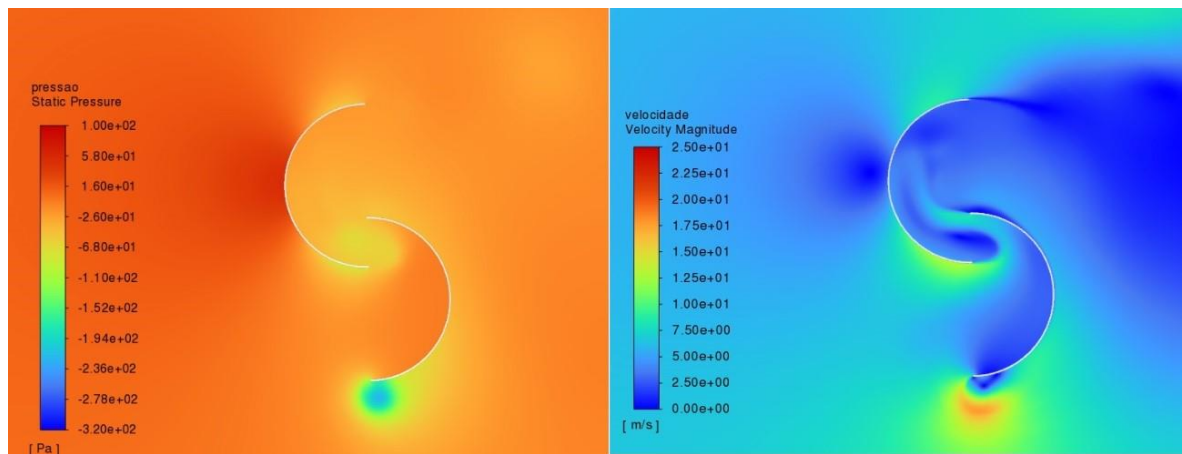


Figura 9: Turbina Savonius para o caso $TSR = 1,0$: **(a)** campo de pressão, **(b)** campo de velocidades.

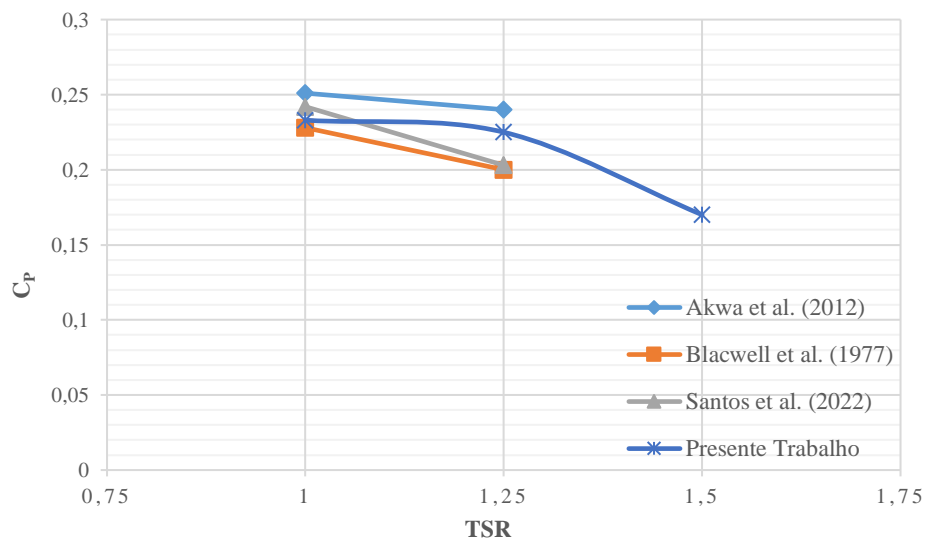


Figura 10: Comparação do C_p médio em função do TSR para a turbina Savonius.

Para a verificação do rotor Darrieus, na figura 11 é apresentado os campos de pressão e velocidade a uma velocidade angular de 20 rad/s (corresponde ao $TSR = 1.0$). Os campos qualitativos são bastante similares aos preditos numericamente por Elkhoury *et al.* (2015), Martins (2020). A figura 12 mostra os valores médios de C_p para três valores de TSR, onde para $TSR = 1,0$ os resultados apresentam uma excelente concordância, enquanto para $TSR = 1,5$ foi obtido $C_p = 0,218$ no presente trabalho e $C_p = 0,169$ no trabalho de Elkhoury *et al.* (2015). Embora se chegue a valores relativamente próximos, é importante avaliar em trabalhos futuros outros valores de TSR para identificar a curva de C_p em função do TSR em uma faixa mais ampla de TSR.

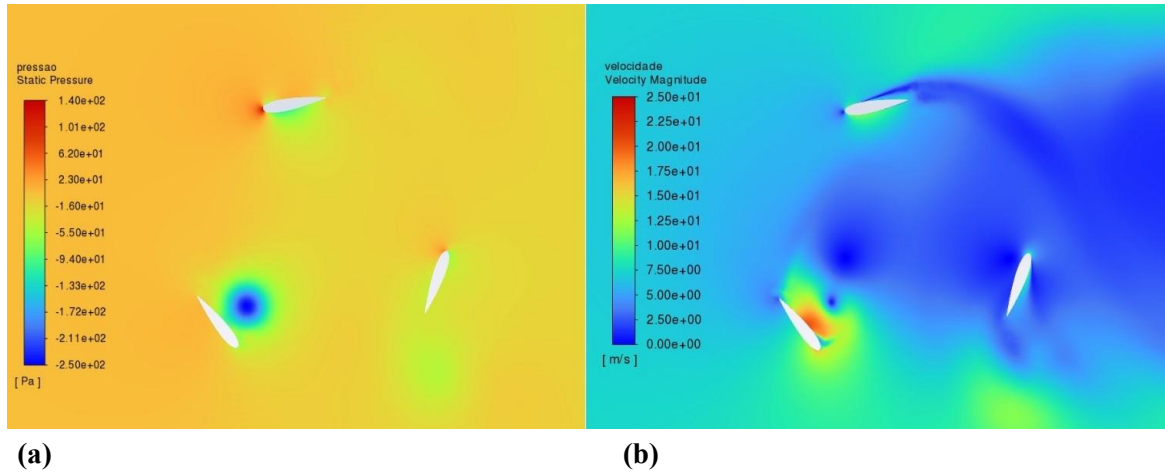


Figura 11: Turbina Darrieus para $TSR = 1,0$: (a) campo de pressão, (b) campo de velocidades.

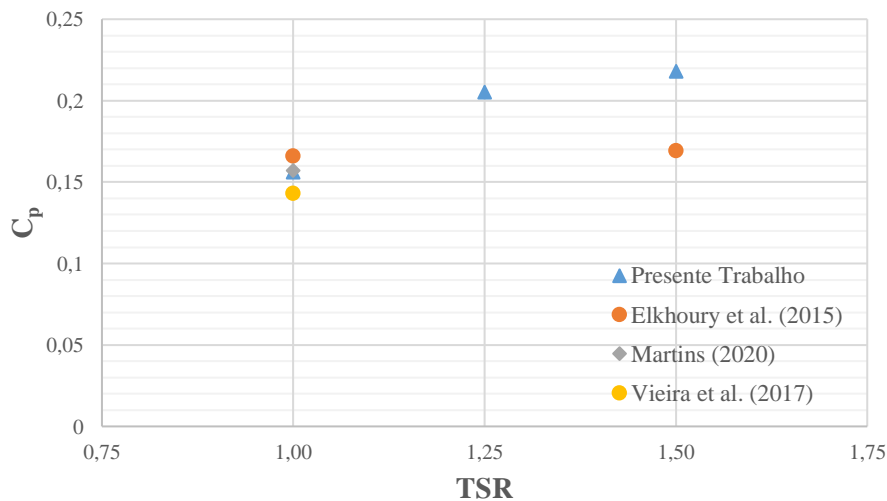


Figura 12: Comparação C_p médio em função do TSR para turbina Darrieus.

3.3 Novas Recomendações para a Turbina Híbrida

Com a integração dos modelos utilizados e propondo um modelo savonius de menor dimensão, foi realizada a análise do modelo híbrido, onde se manteve uma tendência similar à obtida para o rotor Darrieus. Na figura 13 foi observada uma significativa redução da velocidade a jusante do modelo Savonius, o que gera uma defasagem no torque gerado pela turbina Darrieus quando suas pás se deslocam nesta região. Um problema avaliado em valores de TSR maiores é o efeito de impermeabilidade que a turbina Darrieus pode provocar, evitando que o escoamento incida sobre o rotor Savonius, aumentando os efeitos de arrasto parasita.

A figuras 14 e 15 apresentam os resultados obtidos de C_p para três diferentes magnitudes do TSR e velocidade angular. É possível observar que o modelo híbrido atinge um valor de $C_p = 0,17$ para $TSR = 1,0$, ligeiramente superior à configuração Darrieus isolada. Com o aumento do TSR para $TSR = 1,5$, a turbina híbrida tem maior contribuição do modelo Darrieus, enquanto o modelo Savonius internamente conduz a uma queda do C_p .

para o modelo, o rotor Savonius (menor dimensão) isolado continuaria gerando potência (Figura 15) pois não está sofrendo influência de outra turbina. Esse comportamento foi concordante com o esperado na literatura, vide Sarma *et al.* (2021).

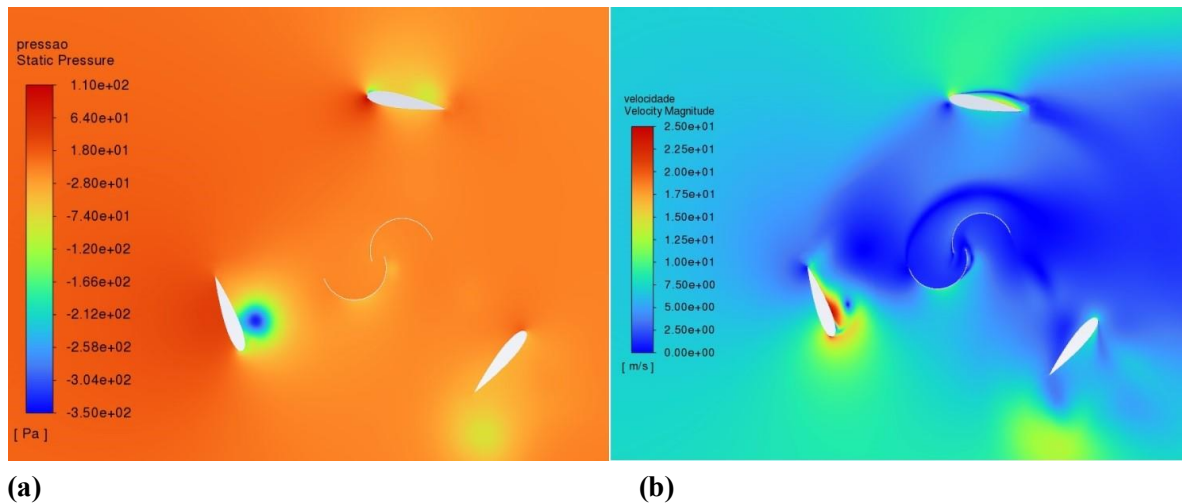
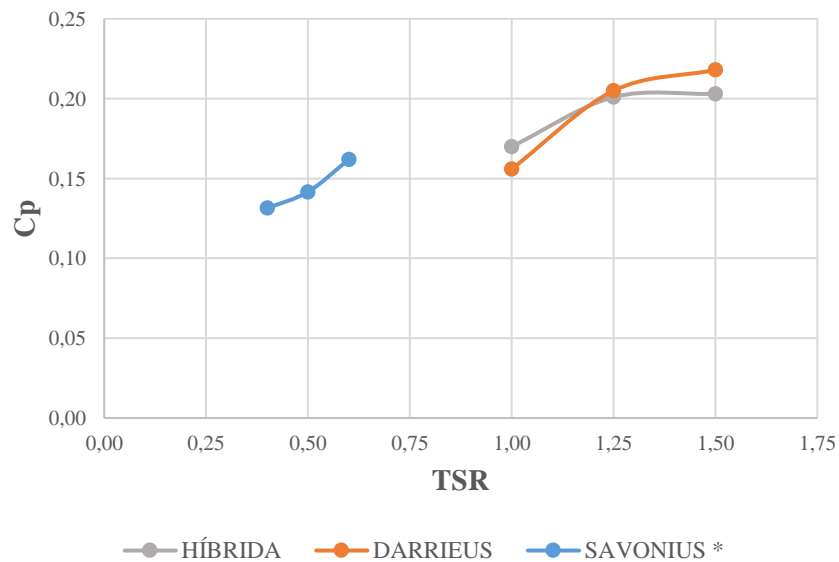


Figura 13: Turbina híbrida para $TSR = 1,0$: (a) campo de pressão, (b) campo de velocidades.



* Savonius- Análise do modelo de menor dimensão

Figura 14: Comparação C_p médio em função do TSR da turbina híbrida com demais modelos isolados.

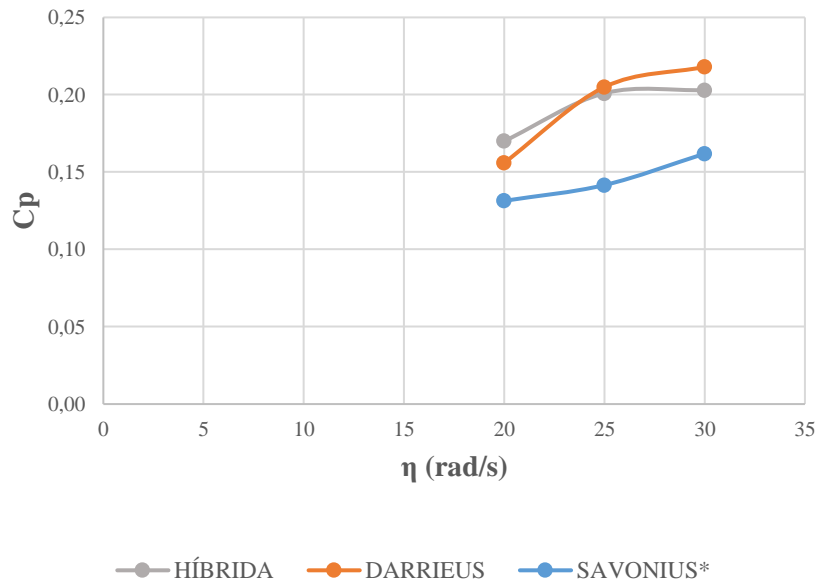


Figura 15: Comparação C_p médio em função da velocidade angular da turbina híbrida com demais modelos isolados.

4 CONCLUSÕES

No presente estudo, foi desenvolvido um modelo de dinâmica dos fluidos computacional para a abordagem de turbinas híbridas com rotores Darrieus e Savonius. O equacionamento foi resolvido com o MVF e o modelo $k - \omega$ SST foi utilizado no fechamento das equações médias no tempo (URANS) dos escoamentos turbulentos.

Os resultados indicaram que o modelo computacional reproduziu adequadamente o comportamento dos escoamentos turbulentos sobre os rotores Savonius e Darrieus isoladamente, gerando resultados de C_p similares aos obtidos experimentalmente e numericamente na literatura. Com relação à configuração híbrida, para os menores TSR = 1,0 investigados, a turbina híbrida obteve um aumento no C_p em comparação com a turbina Darrieus isolada, o que é uma tendência promissora para efeito de auto partida. Para o maior TSR = 1,5, contudo, a inserção da turbina Savonius conduziu à formação de efeitos de arrasto parasita reduzindo o C_p da turbina híbrida.

Para futuros trabalhos pretende-se avaliar outros valores de TSR para a completa caracterização da curva de C_p em função do TSR.

AGRADECIMENTOS

O autor R.G. da S. Inácio agradece ao CNPq pela bolsa de iniciação científica (Processo: 105226/2024-6). Os autores L.A. Isoldi, L.A.O. Rocha e E.D. dos Santos agradecem ao CNPq pela bolsa de produtividade (Processos: 307791/2019-0, 309648/2021-1, 308396/2021-9). Todos os autores agradecem ao CNPq pelo suporte financeiro na Chamada CNPq/MCTI N° 10/2023 – Universal (Process: 403408/2023-7).

REFERÊNCIAS

- Akwa, J. V.; Júnior, G. A. S.; Petry, A. P. (2012). “Discussion on the verification of the overlap ratio influence on performance coefficients of a Savonius wind rotor using computational fluid dynamics”. Em: *Renewable Energy* 38.1, pp.141-149. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.07.013>
- Blackwell, B. F.; Sheldahl, R. E.; Feltz, L. V. (1977). “Wind tunnel performance data for two and three-Bucket savonius rotors”. Em: *J. Energy* 2.3, pp. 160–164. doi: <https://doi.org/10.2514/3.47966>
- Elkhoury, M.; Kiwata, T.; Aoun, E. (2015). “Experimental and numerical investigation of a three-dimensional vertical-axis wind turbine with variable-pitch”. Em: *Journal of wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 139.1, pp.111-123. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2015.01.004>
- Hosseini, A. and Goudarzi, N. (2018). “CFD and Control Analysis of a Smart Hybrid Vertical Axis Wind Turbine”. Em: *AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. ASME 2018 power conference*. v.1, pp. V001T06A027. doi: <https://doi.org/10.1115/POWER2018-7488>
- Jacob, J.; Chatterjee, D. (2019). “Design methodology of hybrid turbine towards better extraction of wind energy”. Em: *Renewable Energy* 131.1, pp.625-643. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.07.064>
- Menter, F.R.; Kuntz, M.; & Langtry, R. (2003). Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model, pp. 625-63
- Mohamed, M.H. (2013).” Impacts of solidity and hybrid system in small wind turbines performance”. Em: *Energy* 57.1, pp. 495-504. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.06.004>
- Santos, A. L. dos et al. (2022) “Development of a computational model for investigation of and oscillating water column device with a savonius turbine”. Em: *Marine Science and Engineering* 10.1, pp 79. doi: <https://doi.org/10.3390/jmse10010079>
- Sarma, J.; Jain, S.; Mukherjee, P.; Saha, U. K. (2021) “Hybrid/Combined darrieus-savonius wind turbines: Erstwhile development and future prognosis”. Em: *Journal of Solar Energy Engineering* 143.1, pp.050801. doi: <https://doi.org/10.1115/1.4050595>
- Schlichting, H.; Gersten, K. (2000). *Boundary-Layer Theory*, 8ªed. Heidelberg, Alemanha: McGraw Hill. 802 p.
- Statkraft (2023). *Low Emissions Scenario*. Rel. técn. 06-27. Oslo, Noruega: Statkraft. URL: <https://www.statkraft.pt/lowemissions/>
- Versteeg, H.; Malalasekera, W. (1995). Computational fluid dynamics. The finite volume method, pp. 1–26.
- Wilcox, D.C. (2006). Turbulence Modeling for CFD. 3rd. ed. La Cañada Flintridge, CA, USA: DWC Industries, pp. 56.
- Zart, L. V. B.,& Oliveira, L. P. (2023). “Modelagem Computacional e Numérica de uma Turbina de Eixo Vertical Híbrido”. TCC - Universidade Federal do Rio Grande.