

CORRELAÇÃO ENTRE O COEFICIENTE DE TORQUE ESTÁTICO E O ÂNGULO DE TORÇÃO DAS PÁS DE TURBINAS EÓLICAS SAVONIUS HELICOIDAIS

CORRELATION BETWEEN THE STATIC TORQUE COEFFICIENT AND THE BLADE TWIST ANGLE OF HELICAL SAVONIUS WIND TURBINES

Lucas Santin Bianchin¹

Daniel Beck²

RESUMO: A energia eólica apresenta crescente relevância no cenário mundial das energias renováveis, e as turbinas eólicas de eixo vertical constituem uma alternativa promissora para sistemas de geração distribuída. Entretanto, seu desempenho aerodinâmico ainda demanda aprimoramentos. Entre essas turbinas, o rotor Savonius destaca-se pela simplicidade construtiva e pela capacidade de autopartida. Este trabalho teve como objetivo avaliar a influência do ângulo de torção das pás sobre o coeficiente de torque estático de turbinas Savonius helicoidais. Foram analisadas onze configurações geométricas, com ângulos de torção variando de 0° a 1440°, por meio de simulações de Dinâmica dos Fluidos Computacional realizadas no módulo *Flow Simulation* do SolidWorks 2016. Previamente às simulações, foram conduzidas análises de independência do domínio computacional e de convergência da malha. Os resultados demonstraram que a configuração com ângulo de torção de 270° apresentou o maior coeficiente de torque estático médio entre os casos avaliados. Adicionalmente, foi obtida uma função de correlação entre o ângulo de torção das pás e o coeficiente de torque estático médio.

1

Palavras-chave: Turbina Savonius. Dinâmica dos Fluidos Computacional. Energia Eólica.

ABSTRACT: wind energy has gained increasing relevance in the global renewable energy landscape, and vertical-axis wind turbines represent a promising alternative for distributed power generation systems. However, their aerodynamic performance still requires improvement. Among these turbines, the Savonius rotor stands out for its simple construction and self-starting capability. This study aimed to evaluate the influence of blade twist angle on the static torque coefficient of helical Savonius turbines. Eleven geometric configurations were analyzed, with twist angles ranging from 0° to 1440°, through Computational Fluid Dynamics simulations performed using the Flow Simulation module of SolidWorks 2016. Prior to the simulations, analyses of computational domain independence and mesh convergence were conducted. The results showed that the configuration with a 270° twist angle achieved the highest mean static torque coefficient among the cases evaluated. Additionally, a correlation function relating the blade twist angle to the mean static torque coefficient was obtained.

Keywords: Savonius Turbine. Computational Fluid Dynamics. Wind Energy.

¹ Mestre em Matemática pela Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS). Engenheiro Mecânico pelo Instituto Federal Sul-Rio-Grandense (IFSUL) – campus Passo Fundo.

² Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-Rio-Grandense (IFSUL) – campus Passo Fundo.

I. INTRODUÇÃO

As energias renováveis têm ganhado cada vez mais espaço no cenário mundial em função dos constantes aumentos no preço do petróleo e também do objetivo de diminuir a utilização de combustíveis fósseis (BARAZARTE; GONZÁLEZ; RALL, 2011). Com o objetivo de gerar energia elétrica, tem crescido a geração distribuída, compreendendo principalmente as matrizes de painéis fotovoltaicos e os parques eólicos, sendo que nos próximos anos a energia eólica deve competir com a atual geração por termelétricas (GABRIEL FILHO et al., 2016).

A energia cinética dos ventos é convertida em energia mecânica com a utilização de turbinas eólicas, sendo que essa energia mecânica é convertida posteriormente em energia elétrica por um gerador. Em relação à orientação do seu eixo, as turbinas eólicas são divididas em dois grupos: ou são de eixo horizontal, ou são de eixo vertical. Nas turbinas eólicas de eixo horizontal o eixo de rotação é paralelo ao escoamento, enquanto que é perpendicular em turbinas eólicas de eixo vertical (WENEHENUBUN; SAPUTRA; SUTANTO, 2015).

As turbinas eólicas de eixo vertical geralmente possuem menores valores de coeficiente de potência, assim, a maioria dos estudos são voltados para melhorar seu desempenho (WENEHENUBUN; SAPUTRA; SUTANTO, 2015). No entanto, elas também apresentam algumas vantagens em relação a uma turbina de eixo horizontal, uma vez que não necessita de uma torre para suportá-la, ou seja, o rotor pode ser posicionado próximo ao solo. Ainda, enquanto as turbinas eólicas de eixo horizontal necessitam obrigatoriamente de um mecanismo que as posicionem na direção do vento para que se extraia a maior quantidade de energia, as de eixo vertical se movimentam sem depender da direção do escoamento (ALBUQUERQUE; MATOS, 2016). Conforme afirmam Hashem e Mohamed (2017) e Liang et al. (2017), ainda é preciso muito estudo relacionado às turbinas eólicas de eixo vertical para afirmar se terão suas vantagens sobrepostas às suas desvantagens, todavia, ainda como afirmam os autores, mais pesquisas podem proporcionar um futuro promissor para geração de energia elétrica em pequena escala utilizando-se turbinas eólicas de eixo vertical.

Dentre as turbinas eólicas de eixo vertical, as do tipo Savonius e do tipo Darrieus ganham destaque. A do tipo Savonius destaca-se por apresentar alto torque estático - o qual, segundo Dewan, Gautam e Goyal (2021), quanto maior for o seu valor melhor será a capacidade de autopartida da turbina - e uma geometria construtiva simples, porém possui baixo

desempenho aerodinâmico (JEON et al., 2014). Enquanto isso, a Darrieus apresenta boa eficiência aerodinâmica, todavia não é capaz de realizar a autopartida (ALBUQUERQUE; MATOS, 2016). Pensando nas vantagens de cada uma dessas duas configurações de turbina eólica, alguns trabalhos vêm sendo desenvolvidos com o objetivo de unir as características da Savonius e da Darrieus, buscando um rotor com bom desempenho aerodinâmico e também que seja capaz de realizar a autopartida (PALLOTTA; PIETROGIACOMI; ROMANO, 2019).

Em relação a turbina Savonius, existe uma gama bastante grande de parâmetros geométricos que influenciam em seu desempenho, e como aborda Akwa (2010), alguns deles são: número de pás; número de estágios; presença ou não de placas nas extremidades; presença ou não de eixo central; afastamento e sobreposição das pás e ângulo de torção de pás helicoidais (ϕ), dentre outros.

Um rotor Savonius convencional, ou seja, aquele que apresenta duas pás, um estágio, sobreposição nula entre as pás e nenhum grau de torção possui intervalos de torque estático negativo, o que impede que o rotor de partida em certas posições angulares (DAMAK; DRISS; ABID, 2018; KAMOJI; KEDARE; PRABHU, 2009). No entanto, conforme Zhao et al. (2009), o uso de pás helicoidais com um ângulo de torção de 180° permite que a turbina realize partida em qualquer direção do vento e, além disso, o mínimo valor do torque estático para uma turbina Savonius helicoidal com torção de 180° nas pás é bastante superior ao mínimo demonstrado para uma Savonius convencional. Em relação ao desempenho dinâmico, Damak, Driss e Abid (2013) compararam uma Savonius convencional e uma helicoidal com torção de 180° e obtiveram melhor performance com a segunda configuração. Zhao et al. (2009) variaram o ângulo de torção das pás em 90° , 180° , 270° e 360° e verificaram o maior coeficiente de potência para a configuração de pás torcidas em 180° . Todavia, os autores não apresentaram a comparação das quatro configurações em uma análise estática, o que permitiria afirmar qual apresenta melhor capacidade de autopartida. Além disso, são escassos os trabalhos na literatura que abrangem o comportamento do torque estático de turbinas Savonius helicoidais com o aumento do ângulo de torção (ϕ).

Baseado nisso, este trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento do coeficiente de torque estático de turbinas Savonius helicoidais com a variação do ângulo de torção das pás. Para isso, será comparado o efeito de onze diferentes ângulos de torção, variando de 0° até 1440° , no torque estático da turbina Savonius. Esses valores de torque estático serão obtidos através de

simulações de Dinâmica dos Fluidos Computacional utilizando a plataforma *Flow Simulation* do *software* Solidworks 2016. Indo além, de posse dos dados obtidos numericamente, pretende-se correlacionar os valores do coeficiente de torque estático com o ângulo de torção das pás através de ajuste de curvas.

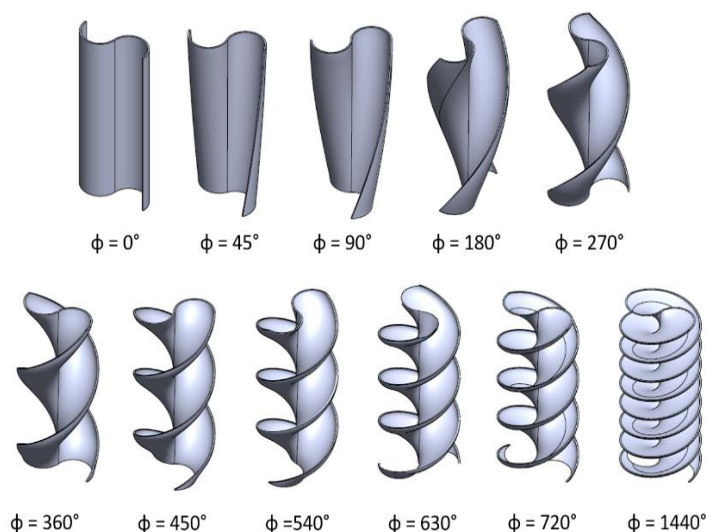
2. METODOLOGIA

2.1. Configurações de rotor avaliadas em condição estática

Com o intuito de avaliar a relação entre o ângulo de torção e o torque estático de turbinas Savonius helicoidais, foram analisados estaticamente onze configurações distintas de rotores, sendo que todos apresentaram duas pás, um estágio, razão de sobreposição entre pás nula e placas nas extremidades. Os valores de ângulo de torção utilizados nas simulações computacionais foram os seguintes: 0° , 45° , 90° , 180° , 270° , 360° , 450° , 540° , 630° , 720° e 1440° . O formato do rotor Savonius com esses ângulos de torção pode ser visualizado na Figura 1, com a ressalva de que estão sendo apresentados sem as placas nas extremidades com o objetivo de permitir melhor visualização do comportamento das pás da turbina à medida que se aumenta o ângulo de torção.

Todas as simulações numéricas partiram de uma turbina com área de seção do rotor de 0,025 m² e razão de aspecto de 2, além de possuírem uma espessura de parede de 2 mm, tanto para as pás, quanto para as placas nas extremidades. A justificativa da escolha de uma razão de aspecto de 2 vem de Akwa (2010), o qual afirma que a partir desse valor a turbina começa a apresentar maior eficiência energética. Já, a fundamentação do uso de uma área de seção do rotor de 0,025 m² surge de dois argumentos: o primeiro, em que essa área, juntamente com a razão de aspecto de 2, proporciona dimensões para a turbina que facilmente poderão ser reproduzidas em protótipos, com o intuito de, em trabalhos futuros, comparar os resultados obtidos neste estudo com experimentação em túnel de vento; e o segundo, o qual diz respeito ao tamanho do domínio computacional utilizado, que depende das dimensões do rotor, ou seja, quanto maior forem as dimensões do rotor, maior deverão ser as dimensões do domínio computacional, e consequentemente, maior será o tempo de processamento.

Figura 1 - Diferentes rotores avaliados numericamente, com seus respectivos ângulos de torção.



Fonte: Autores (2026).

Com o propósito de melhor avaliar os valores de torque estático obtidos, cada perfil de rotor foi simulado para diferentes posições angulares em relação à direção do fluxo de vento, de acordo com o que é mostrado na Figura 2, em que θ representa o ângulo entre o centro do rotor e o escoamento e, a partir disso, foi calculado um valor de torque estático médio. Da mesma maneira que em Akwa (2010), θ foi variado de 30 em 30 graus.

5

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



Fonte: Autores (2026).

Com os valores de torque obtidos com as simulações computacionais, é possível calcular o coeficiente de torque estático (C_{TE}), a partir da Equação 1, em que T é o torque obtido com as simulações, ρ é a massa específica do ar, A é a área da seção projetada do rotor pela qual passa o vento, V_{∞} é a velocidade não perturbada do escoamento e R é o raio do rotor. Conforme Oliveira (2014), a Equação 1 é uma relação entre o torque aproveitado pela turbina e aquele disponível no escoamento e é uma medida para avaliar a eficiência de autopartida da turbina eólica.

$$C_{TE} = T / (\rho A V_{\infty}^2 R / 2) \quad (1)$$

2.2. Dados de entrada e o modelo de turbulência da plataforma *flow simulation* do *software solidworks 2016*

Para a realização das simulações foi utilizado o *software* Solidworks 2016, um programa computacional desenvolvido pela Dassault Systèmes, sendo um completo *software* de modelagem 3D. Ele apresenta uma plataforma denominada *Flow Simulation* que permite que sejam realizados cálculos de CFD utilizando o Método dos Volumes Finitos para que sejam estudados escoamentos e feitas análises do desempenho dos produtos desenvolvidos no *software* (SOLIDWORKS, 2016).

Com o objetivo de obter os resultados desejados, o *software* Solidworks resolve simultaneamente as equações da continuidade, da conservação do movimento, equações de estado e as duas equações referentes ao modelo de turbulência utilizado pelo programa, denominado de k - ϵ com funções de amortecimento, o que permite que sejam analisados fluxos laminares, transitórios ou turbulentos (SOLIDWORKS, 2016).

O modelo de turbulência k - ϵ requer que sejam especificados os valores da energia cinética turbulenta (k) e da taxa de dissipação turbulenta (ϵ), entretanto, muitas vezes é mais apropriado especificar a intensidade da turbulência (IT) e a escala de comprimento turbulento (l). A intensidade da turbulência representa a razão entre as velocidades turbulentas e as velocidades médias enquanto que a escala de comprimento turbulento significa a escala de comprimento dos vórtices gerados pela turbulência (ÇENGEL; CIMBALA, 2012).

De acordo com Çengel e Cimbala (2012), na falta de informações sobre o comportamento do escoamento, pode-se usar valores de IT como 10% e de l como metade do comprimento característico do objeto que experimenta o fluxo. Dessa forma, para a realização das simulações o valor da escala de comprimento turbulento utilizada foi de metade do diâmetro da turbina, ou

seja, 55,9 mm.

Outros dados de entrada são necessários para a realização das simulações, como os de velocidade não perturbada, temperatura e pressão do ar. Os valores utilizados foram de 7 m/s para a velocidade, 101325 Pa para a pressão e 293,15 K para a temperatura. A velocidade e a pressão servirão como condição de contorno para a execução dos cálculos pelo *software*. O Solidworks (2016) chama esses valores de condições ambientes, uma vez que as simulações serão de escoamento externo.

O valor de 7 m/s para a velocidade foi utilizado pois está compreendido entre as velocidades utilizadas para avaliar o torque estático em outros trabalhos. Roy e Saha (2013) avaliaram o torque estático para as velocidades de 5,57 m/s, 6,69 m/s, 8,35 m/s e 10,44 m/s, Oliveira (2014) utilizou uma velocidade de 6 m/s e Kothe (2016) utilizou 7,6 m/s. Além disso, Hayashi, Li e Hara (2005) verificaram que a velocidade do escoamento tem pouca influência nos valores do coeficiente de torque estático. Ainda, é utilizada a pressão atmosférica de 101325 Pa e a temperatura de 293,15 K, visto que esses são os valores considerados padrões ao nível do mar (SHEPHERD; ZHANG, 2017).

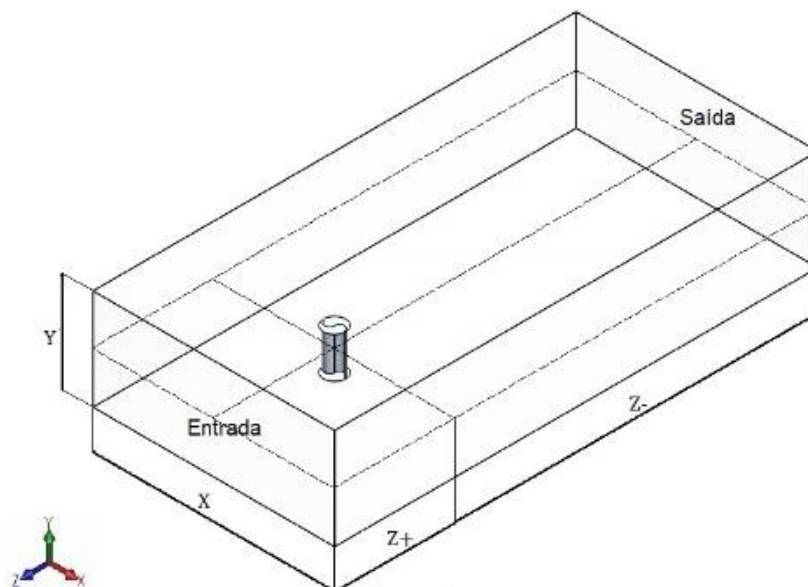
2.3. Tamanho do domínio computacional

7

As dimensões utilizadas para o domínio computacional são baseadas no trabalho de Akwa (2010), que as atribui valores múltiplos das dimensões do rotor. A Figura 3 exibe as dimensões variadas para a análise do tamanho do domínio computacional. Os valores Z_+ , Z_- e X são múltiplos do diâmetro (D) do rotor enquanto Y é múltiplo da altura (H). Ainda, o escoamento de ar percorre o domínio no sentido negativo do eixo Z .

A análise do tamanho do domínio computacional consistiu de duas etapas: a primeira, na qual foi avaliada a altura Y , mantendo-se constante as demais dimensões; e a segunda, na qual foram examinados os valores de X , Z_+ e Z_- , utilizando a altura Y que melhor se adequou ao estudo, conforme a primeira etapa. Foi chegado à conclusão de que o domínio com as dimensões de X , Z_+ e Z_- iguais a, respectivamente, 18, 9 e 27 diâmetros e de Y igual a 5 vezes a altura fosse o utilizado para as simulações deste estudo.

Figura 3 - Dimensões a serem avaliadas para determinação do tamanho do domínio computacional.



Fonte: Autores (2026).

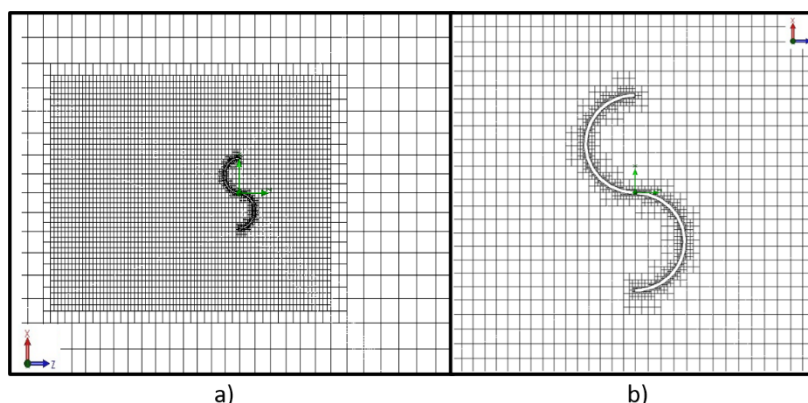
2.4. Região de refinamento da malha computacional

O *software* Solidworks 2016 oferece a alternativa de criar uma malha local com um refinamento diferenciado em relação às demais regiões do domínio computacional (SOLIDWORKS, 2016). Essa opção se torna interessante quando se deseja maior precisão em determinado espaço, ou seja, neste estudo, a criação de uma malha local mais refinada apenas ao redor da turbina eólica pode auxiliar o processo de simulação, diminuindo seu tempo, uma vez que não é necessária uma malha tão refinada em todo o domínio computacional. Além disso, também é possível aumentar o número de volumes finitos na interface do escoamento de ar com a pá do rotor, aumentando a precisão dos resultados do torque obtidos com as simulações.

O tamanho da região de refinamento da malha utilizado também foi proporcional às dimensões da turbina eólica. Tendo como referência o centro do rotor, utilizou-se valores de 1,5 diâmetros no sentido positivo e negativo do eixo x e também no sentido positivo do eixo z, 1 vez a altura no sentido positivo e negativo do eixo y e 3 diâmetros no sentido negativo do eixo z. Além disso, a opção de malha local do *Flow Simulation* apresenta níveis de refinamento. Para esse estudo foi escolhido nível 2 para o refinamento da região de fluido e nível 5 para o refinamento dos volumes na interface do ar com a pá da turbina. A Figura 4a ilustra a diferença entre a malha da região mais refinada e a malha do restante do domínio e a Figura 4b exibe com

maiores detalhes o refinamento próximo a pá da turbina Savonius. Como pode-se notar por essa ilustração, os volumes finitos vão ficando cada vez menores conforme se aproxima da superfície da pá.

Figura 4 - Região de refinamento da malha computacional – a) diferença entre a malha da região mais refinada e a malha do restante do domínio computacional; b) detalhe do refinamento gerado pela opção malha local na interface do ar com a pá da turbina.



Fonte: Autores (2026).

2.5. Convergência da malha computacional

A análise da convergência da malha computacional deste estudo é realizada utilizando-se a metodologia de Índice de Convergência da Malha (GCI – Grid Convergence Index). Esse método foi utilizado nos trabalhos de Oliveira (2014) e Kothe (2016) e é basicamente um comparativo das soluções de três diferentes refinamentos de malha.

Dessa forma, foram utilizados três refinamentos da malha computacional, um grosseiro, um médio e um mais fino, sendo que com eles foram geradas malhas com 100.530, 175.530 e 511.916 elementos de volume, respectivamente. Com esses refinamentos da malha computacional, foram obtidos resultados para o coeficiente de torque estático de 0,152507 para a malha mais fina, 0,152787 para a malha média e 0,153972 para a malha grosseira. A partir desses dados, é possível calcular o Índice de Convergência (IC), sendo que, para a análise da convergência da malha, utilizou-se uma turbina Savonius com 0° de torção na posição de 0° com o escoamento.

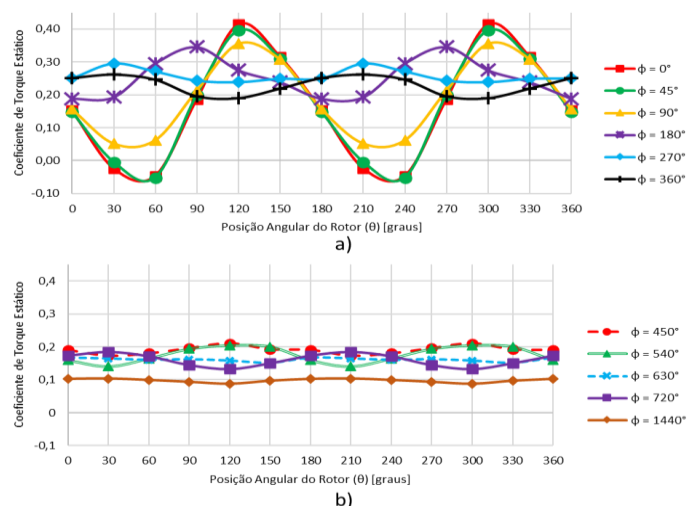
Segundo Oliveira (2014) e Kothe (2016), quanto mais próximo de 1 estiver o Índice de Convergência, mais próximo da solução “exata” está o resultado encontrado com a simulação. Para os valores de coeficiente de torque estático e número de volumes da malha mencionados

acima, encontra-se um valor de IC de 0,9984. Esse número é bastante próximo de 1, indicando que a solução da simulação está dentro de um intervalo de convergência, e, além disso, muito próximo da própria solução “exata”, que é aquela cujo IC é igual a 1.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da execução das simulações computacionais utilizando a plataforma *Flow Simulation* do software Solidworks 2016, foram obtidos, em função da posição angular entre o rotor e o escoamento, os valores de coeficiente de torque estático apresentados na Figura 5.

Figura 5 - Coeficiente de torque estático em função da posição angular do rotor (θ) para os diferentes ângulos de torção das pás do rotor helicoidal Savonius (ϕ) – a) de $\phi = 0^\circ$ até $\phi = 360^\circ$; b) de $\phi = 450^\circ$ até $\phi = 1440^\circ$.



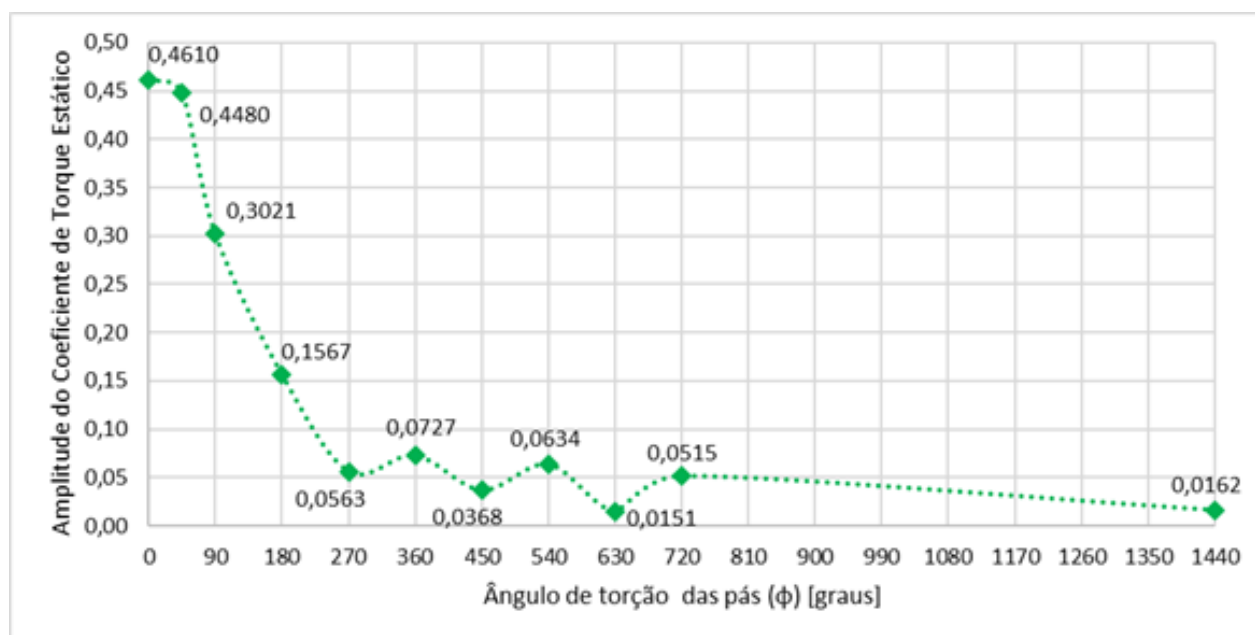
Fonte: Autores (2026).

A partir da Figura 5 é possível observar o comportamento do torque estático da turbina Savonius à medida que é variado o ângulo de torção das pás. Conforme Kamoji, Kedare e Prabhu (2009) e Damak, Driss e Abid (2018) o rotor Savonius com duas pás sem torção ($\phi = 0^\circ$) apresenta regiões com torque estático negativo, o que impede o rotor de dar partida em certas posições angulares. Inclusive, observa-se também que aumentar o ângulo de torção para 45° não soluciona o problema de intervalos de torque estático negativo. Todavia, para ângulos de torção acima de 90° os rotores Savonius helicoidais apresentaram torque positivo independentemente da posição angular.

Outra importante informação que pode ser obtida na Figura 5 está relacionada à

diferença entre o valor máximo e mínimo do torque estático em função da posição angular. Também identificado no trabalho de Zhao et al. (2009), o mínimo valor do torque estático para uma turbina Savonius helicoidal com torção de 180° nas pás é bastante superior ao mínimo demonstrado para uma Savonius sem torção. Além disso, a partir da Figura 5 é possível observar que há uma tendência de o coeficiente de torque estático não variar com a posição angular à medida que se aumenta muito o ângulo de torção. Como pode ser visualizado, o coeficiente de torque estático permanece praticamente constante, independentemente da posição angular, para a turbina com ângulo de torção igual a 1440° . No entanto, a partir da Figura 5 fica difícil inferir sobre a relação entre a amplitude do coeficiente de torque estático e o ângulo de torção (ϕ). Para que fique mais esclarecedor, então, foi desenvolvida a Figura 6.

Figura 6 - Amplitude do coeficiente de torque estático em função do ângulo de torção das pás (ϕ).



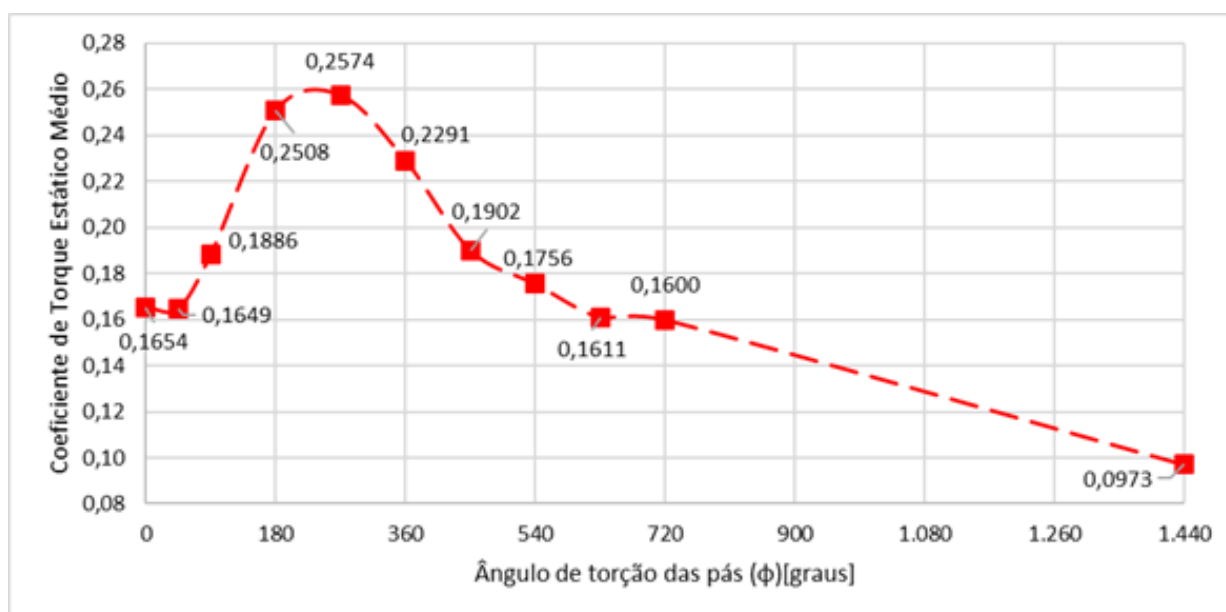
Fonte: Autores (2026).

A partir da Figura 6 fica mais claro o comportamento da amplitude do coeficiente de torque estático com a variação do ângulo de torção das pás do rotor Savonius. Observa-se que a amplitude é diminuída drasticamente ao aumentar-se o ângulo de torção de 0° para 270° . A amplitude do torque estático para uma turbina Savonius com ângulo de torção das pás de 270° é mais do que oito vezes menor do que aquela de uma Savonius convencional. No entanto, a partir de $\phi = 270^\circ$ verificou-se comportamento oscilatório para a amplitude do coeficiente de

torque estático em função do ângulo de torção das pás. No intervalo entre $\phi = 720^\circ$ e $\phi = 1440^\circ$ não foram realizadas outras simulações, todavia acredita-se que o comportamento oscilatório continue também ali. Dos valores de ângulo de torção avaliados, o que apresentou menor amplitude foi aquele com $\phi = 630^\circ$, no entanto, pelo comportamento gráfico apresentado na Figura 6, acredita-se que a amplitude deve diminuir ainda mais para ângulos de torção iguais a 810° , 990° , 1170° e assim sucessivamente e trabalhos futuros podem abordar com maior precisão o comportamento de rotores Savonius helicoidais para ângulos de torção bastante grandes.

Com o intuito de identificar qual ângulo de torção das pás proporciona maior coeficiente de torque estático para a turbina Savonius foram calculadas as médias a partir dos valores obtidos para as posições angulares apresentadas na Figura 5, as quais podem ser observadas na Figura 7.

Figura 7 - Coeficiente de torque estático médio em função do ângulo de torção das pás (ϕ).



Fonte: Autores (2026).

A Figura 7 ilustra o comportamento do coeficiente de torque estático à medida que se aumenta o ângulo de torção das pás da turbina Savonius. Pela Figura 7 é possível observar que aumentar o ângulo de torção das pás é benéfico para o desempenho de autopartida até certo ponto, sendo que o desempenho é máximo para $\phi = 270^\circ$. Aumentar o ângulo de torção demasiadamente é prejudicial e, neste estudo, o maior ângulo de torção das pás ($\phi = 1440^\circ$) foi

aquele que proporcionou menor valor médio para o torque estático.

Da Figura 7 é possível observar graficamente que existem, principalmente, três intervalos de variação do ângulo de torção com comportamentos distintos em função do coeficiente de torque estático. Primeiro, entre $\phi = 0^\circ$ e $\phi = 45^\circ$ não houve variação significativa no coeficiente de torque estático (apenas 0,302%), o que permite aproximar o valor do coeficiente de torque estático médio para outros valores de ângulo de torção desse intervalo como sendo a média entre o obtido com $\phi = 0^\circ$ e com $\phi = 45^\circ$ (deve-se considerar também que aumentar o ângulo de torção das pás de 0° para 45° não produz muita alteração geométrica, conforme apresentado na Figura 1, e também o comportamento do torque estático em função da posição angular do rotor é bastante similar para ambos, conforme Figura 5). Segundo, entre $\phi = 45^\circ$ e $\phi = 450^\circ$ o comportamento é semelhante à uma função polinomial de segundo grau e, por fim, a partir de $\phi = 450^\circ$ a variação do coeficiente de torque estático com o ângulo de torção das pás tende a ser linear.

Uma das maneiras de determinar a curva que melhor se ajusta a um conjunto de dados é através do Método dos Mínimos Quadrados, o qual, segundo Chapra e Canale (2011) utiliza como critério a minimização da soma dos quadrados do erro (distância vertical entre a curva e os pontos de dados). Além disso, a melhor curva pode ser determinada pelo coeficiente de determinação R^2 , isto é, uma maneira de medir a qualidade do ajuste por um número compreendido entre 0 e 1, de forma que “Quanto mais próximo o coeficiente de determinação estiver da unidade, melhor será o ajuste” (BARROSO et al., 1987).

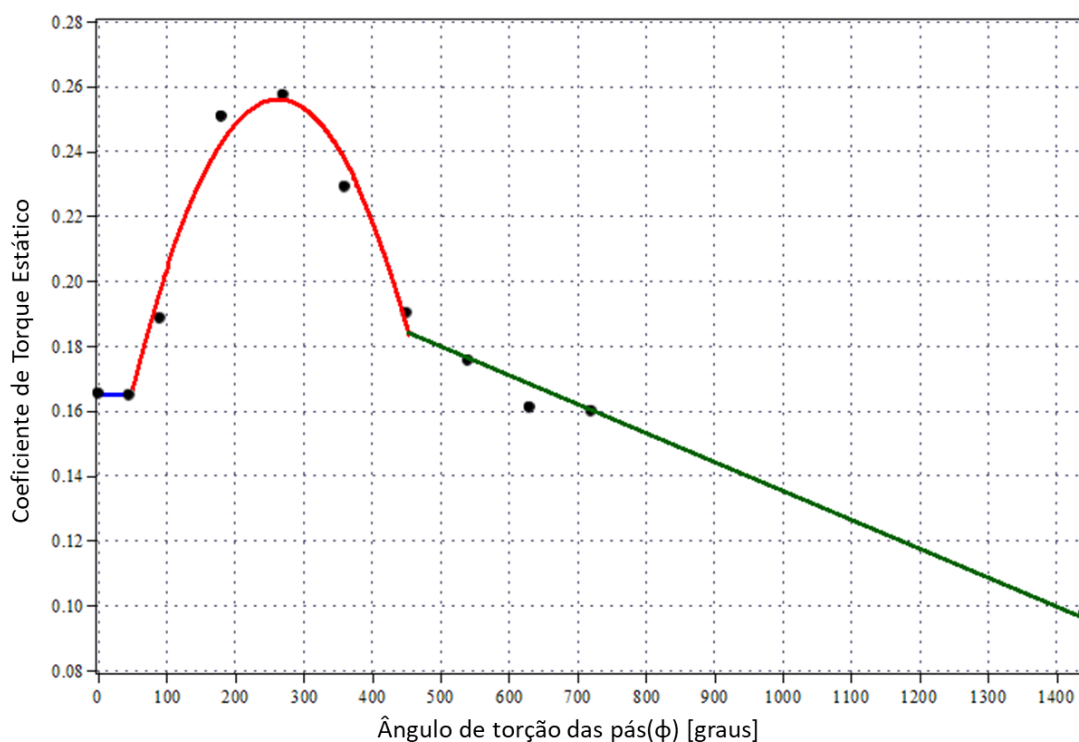
A partir disso, foi determinada uma função por partes para descrever o comportamento do coeficiente de torque estático em função do ângulo de torção das pás, a qual pode ser observada na Equação 2.

$$C_{TE}(\phi) = \begin{cases} 0,16515, & 0 \leq \phi < 45 \\ -1,982169 \cdot 10^{-6} \cdot \phi^2 + 0,001041762 \cdot \phi + 0,1191352, & 45 \leq \phi < 450 \\ -8,897236 \cdot 10^{-5} \cdot \phi + 0,2241031, & \phi \geq 450 \end{cases} \quad (2)$$

As curvas determinadas pelo Método dos Mínimos Quadrados para a Equação (2) obtiveram coeficiente de determinação de 0,9677 para a função polinomial de segundo grau (compreendida entre $\phi = 45^\circ$ e $\phi = 450^\circ$) e 0,9825 para a função linear (válida para ângulos de torção maiores do que 450°). Ambos valores do coeficiente de determinação foram próximos de 1, o que indica a qualidade do ajuste obtido. Além disso, isso também pode ser observado na

Figura 8, a qual ilustra simultaneamente os pontos apresentados na Figura 7 e as funções descritas pela Equação 2.

Figura 8 - Coeficiente de torque estático em função do ângulo de torção das pás e curvas obtidas com o ajuste.



Fonte: Autores (2026).

A partir da visualização gráfica do comportamento da Equação 2 juntamente com os pontos obtidos com as simulações numéricas no *software* Solidworks 2016 (Figura 8) e dos valores obtidos com o coeficiente de determinação é possível identificar dois intervalos de comportamento distinto para o coeficiente de torque estático em função do ângulo de torção das pás em turbinas Savonius helicoidais: um, com comportamento quadrático, entre $\phi = 45^\circ$ e $\phi = 450^\circ$; e outro, com comportamento linear para ângulos de torção das pás maiores do que 450° .

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou como objetivo avaliar o comportamento do coeficiente de torque estático de turbinas Savonius helicoidais com a variação do ângulo de torção das pás. Para isso, foram realizadas simulações numéricas em condição estática com a plataforma *Flow*

Simulation do software Solidworks 2016 e foram comparados os resultados obtidos para ângulos de torção iguais a 0° , 45° , 90° , 180° , 270° , 360° , 450° , 540° , 630° , 720° e 1440° . As conclusões obtidas com esse estudo foram as seguintes:

1. Aumentar o ângulo de torção das pás de 0° para 45° não aumenta a capacidade de autopartida da turbina Savonius;
2. O ângulo de torção que proporcionou maior valor de coeficiente de torque estático médio foi o de 270° , 55,73% maior do que aquele obtido com a turbina Savonius convencional;
3. Aumentar o ângulo de torção de 0° para 270° reduz em mais do que oito vezes a amplitude do torque estático e existe uma tendência da diminuição da amplitude com o aumento do ângulo de torção, embora a partir de $\phi = 270^\circ$ existe uma relação oscilatória entre a amplitude do torque estático e o ângulo de torção das pás. Para os valores de ϕ avaliados, o que apresentou menor amplitude foi o de 630° ;
4. A relação entre o coeficiente de torque estático médio e o ângulo de torção das pás apresenta dois intervalos com comportamentos distintos: um quadrático, compreendido para $45^\circ \leq \phi < 450^\circ$ e outro linear, para $\phi \geq 450^\circ$;
5. Aumentar demasiadamente o ângulo de torção é prejudicial à capacidade de autopartida da turbina, uma vez que para $\phi = 1440^\circ$ foi obtido o menor valor de torque estático médio e há tendência de diminuir ainda mais para ângulos de torção maiores.

REFERÊNCIAS

- AKWA, J. V. **Análise Aerodinâmica de Turbinas Eólicas Savonius Empregando Dinâmica dos Fluidos Computacional**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.
- ALBUQUERQUE, I. M.; MATOS, F. F. S. A Characterization of Vertical Axis Wind Turbines. **IEEE Latin America Transactions**, v. 14, n.10, p. 4255-4260, 2016.
- BARAZARTE, R. Y.; GONZÁLEZ, G. G.; RALL, E. Comparison of Electric Generators used for Wind Generation. **IEEE Latin America Trans.**, v. 9 n.7, p. 1040-1044, 2011.
- BARROSO, L. C.; BARROSO, M. M.; CAMPOS FILHO, F. F.; CARVALHO, M. L.; MAIA, M. L. **Cálculo Numérico (com aplicações)**. 2ª ed. São Paulo: HARBRA, 1987.
- ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos Fluidos: fundamentos e aplicações**. Porto Alegre: AMGH, 2012.

CHAPRA, S. C.; CANALE, R. P. **Métodos Numéricos para Engenharia**. 5^a ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.

DAMAK, A.; DRISS, Z.; ABID, M. S. Experimental investigation of helical Savonius rotor with a twist of 180°. **Renewable Energy**, p. 136-142, 2013

DAMAK, A.; DRISS, Z.; ABID, M. S. Optimization of the helical Savonius rotor through wind tunnel experiments. **Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics**, p. 80-93, 2018.

DEWAN, A; GAUTAM, A; GOYAL, R. Savonius wind turbines: A review of recent advances in design and performance enhancements. **Materials Today: Proceedings**, 2021.

GABRIEL FILHO, L. R.; SERAPHIM, O. J.; CANEPPELE, F. L.; GABRIEL, C. P.; PUTTI, F. F. Analysis of Variables in Systems Hybrid Photovoltaic Wind in Rural Energization. **IEEE Latin America Trans.**, v.14, n.12, p. 4757-4761, 2016.

HASHEM, I.; MOHAMED, M. H. Aerodynamic Performance Enhancements of H-rotor Darrieus Wind Turbine. **Energy**, 2017.

HAYASHI, T.; LI, Y.; HARA, Y. Wind tunnel tests on a different phase three-stage Savonius rotor. **JSME International Journal**, v. 48, n. 1, p. 9-16, 2005.

JEON, S. J.; JEONG, J. I.; PAN, J. K.; RYU, K. W. Effects of end plates with various shapes and sizes on helical Savonius wind turbines. **Renewable Energy**, p. 1-10, 2014.

KAMOJI, M. A.; KEDARE, S. B.; PRABHU, S. V. Experimental investigations on single stage modified Savonius rotor. **Applied Energy**, p. 1064-1073, 2009.

KOTHE, L. B. **Estudo Comparativo Experimental e Numérico sobre o Desempenho de Turbinas Savonius Helicoidal e de Duplo-Estágio**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

LIANG, X.; FU, S.; OU, B.; WU, C.; CHAO, C. Y.; PI, K. A Computational Study of the Effects of the Radius Ratio and Attachment Angle on the Performance of a Darrieus-Savonius Combined Wind Turbine. **Renewable Energy**, 2017.

OLIVEIRA, C. P. **Análise do Desempenho de uma Turbina Savonius Helicoidal com Torção de 180° Empregando Simulação Numérica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

PALLOTTA, A., PIETROGIACOMI, D., & ROMANO, G. P. HYBRI – A combined Savonius Darrieus wind turbine: Performances and flow fields. **Energy**, 2019.

ROY, S.; SAHA, U. K. Computational study to assess the influence of overlap ratio on static torque characteristics of a vertical axis wind turbine. **Procedia Engineering**, v. 51, p. 694-702, 2013.

SHEPHERD, W.; ZHANG, L. **Electricity generation using wind power**. 2. ed. Singapore: World Scientific, 2017.

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

WENEHENUBUN, F.; SAPUTRA, A.; SUTANTO, H. An experimental study on the performance of Savonius wind turbines related with the number of blades. **Energy Procedia**, 297-304, 2015.

ZHAO, Z., ZHENG, Y., XU, X., LIU, W., & HU, G. Research on the Improvement of the Performance of Savonius Rotor Based on Numerical Study. **2009 International Conference on Sustainable Power Generation and Supply**, p. 1-6, 2009.