

ESTUDO DO EFEITO DA ESPESSURA DO AEROFÓLIO SOBRE O AUMENTO ROTACIONAL EM SEÇÕES DE PÁS DE TURBINA EÓLICA

Nathan Oliveira Assis, nathan.oliveira@unesp.br¹
Daniel Sampaio Souza, daniel.s.souza@unesp.br¹

¹Universidade Estadual Paulista (UNESP), Av. Profª Isette Corrêa Fontão, 505 - Jardim das Flores - São João da Boa Vista/SP - CEP 13876-750,

Resumo. O entendimento da atuação de forças aerodinâmicas sobre turbinas eólicas é de suma importância para o projeto das mesmas. O aumento rotacional é um fenômeno observado nas simulações e experimentos com pás rotativas. Trata-se do aumento dos carregamentos aerodinâmicos. Sabe-se que a destruição da vorticidade radial atribuída à força de Coriolis está relacionada à redução da região de separação, portanto, associada ao aumento rotacional. O trabalho descrito aqui investiga a influência da espessura de um aerofólio sobre os efeitos do aumento rotacional. As análises foram realizadas utilizando Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) considerando a força de Coriolis e centrífuga como termos fontes nas equações de Navier-Stokes e assumindo periodicidade ao longo da envergadura. Os resultados mostraram que o coeficiente de sustentação do aerofólio modificado possui menor sensibilidade aos efeitos rotacionais. Quanto ao coeficiente de arrasto, o aerofólio modificado apresentou aumento, ao passo que o aerofólio original obteve uma redução causada pela rotação. A distribuição do termo de destruição da vorticidade foi mais amena do que em outros casos com ângulos de ataque mais altos.

Palavras chave: Turbina eólica. Aerodinâmica. Aumento rotacional. Asas rotativas. Método dos volumes finitos.

Abstract. Understanding the aerodynamic forces on wind turbines is of major importance for their design. Rotational augmentation is a phenomenon observed in simulations and experiments with rotating blades. This phenomenon addresses the increase in aerodynamic load. It is known that the destruction of the radial vorticity attributed to the Coriolis force is related to the reduction of the separation region and, therefore, associated with the rotational effects. This paper describes investigations on the influence of airfoil thickness on the effects of rotational augmentation. Analyzes were performed using Computational Fluid Dynamics (CFD) considering Coriolis and centrifugal force as source terms in the Navier-Stokes equations and assuming periodicity in the spanwise direction. The results showed that the modified airfoil's lift coefficient is less sensitive to rotational effects. As for the drag coefficient, the modified airfoil showed an increase, while the original airfoil had a reduction. The distribution of the vorticity destruction term was milder than in other cases with higher angles of attack.

Keywords: wind turbine, aerodynamics, rotational augmentation, rotating blades, finite volume method.

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento das forças aerodinâmicas atuando sobre pás rotativas é imprescindível para o projeto das mesmas. No entanto, ainda existe um longo caminho a ser percorrido. Nesse sentido, um fenômeno observado nas simulações de hélices e corroborado por experimentos laboratoriais (Harris, 1966) é o aumento dos coeficientes aerodinâmicos quando comparados a aerofólios em movimento retilíneo. A fim de obter projetos mais eficientes, um conhecimento profundo do funcionamento de tais aparatos se faz necessário.

Conhecido como aumento rotacional, as causas disso ainda estão sendo estudadas. Na literatura, encontram-se algumas vertentes que buscam explicá-lo. Assim sendo, ainda que o papel de cada um destes fatores não esteja completamente especificado, as forças centrífuga e de Coriolis (Mauro *et al.*, 2017) e o gradiente de pressão ao longo da envergadura são comumente estudados como potenciais responsáveis pelo aumento da sustentação (Herráez *et al.*, 2014) e a existência de um escoamento radial ao longo da envergadura da pá, conhecido como “bombeamento centrífugo” (Lindenburg, 2003).

Existem duas explicações dominantes para a existência desse escoamento radial. A primeira atribui esse fluxo ao gradiente de pressão forçando o ar a se mover de regiões de alta pressão (raiz) para regiões de baixa pressão (ponta). Outra vertente considera o gradiente de pressão muito pequeno para forçar tal condição, atribuindo o deslocamento do ar à força centrífuga (Herráez *et al.*, 2014).

O bombeamento centrífugo é observado tanto em simulações numéricas quanto em turbinas experimentais trabalhando em regime próximo ao estol. Trata-se da combinação da recirculação do fluido na região de baixa pressão e o fluxo radial no sentido da raiz para as pontas das pás (Herráez *et al.*, 2014).

Um ponto que parece não haver concordância na literatura é quanto aos efeitos rotacionais no coeficiente de arrasto

de aerofólios. Sobre isso, alguns autores sugerem que eles podem ser dependentes do tipo de aerofólio utilizado (Herráez *et al.*, 2014). Além do mais, para o coeficiente de pressão, a rotação da pá parece ter duas consequências importantes: o aumento do pico de sucção e a redução da inclinação da curva do gradiente de pressão adverso. Esse último acaba induzindo o ponto de separação da camada limite para o bordo de fuga. Isso é comumente atribuído à força de Coriolis, que força o ar descolado da superfície ao bordo de fuga.

Outro fenômeno associado a efeitos rotacionais é a estabilização de um vórtice no bordo de ataque de asas de moscas e outros insetos investigado por (Werner *et al.*, 2019) e (Wojcik and Buchholz, 2014). Nessas condições, o bombeamento centrífugo parece não ter grande relevância (Rodrigues *et al.*, 2022). Por outro lado, resultados de Werner *et al.* (2019) indicam que um mecanismo de destruição de vorticidade associado à força de Coriolis tem efeito significativo na estabilização do vórtice de bordo de ataque.

Simulações mostraram que para um modelo quasi-3D para $Re = 10^6$, a destruição da vorticidade radial causada pelo gradiente da componente tangencial da força de Coriolis está relacionada à redução da região de separação e, portanto, está relacionada ao aumento rotacional (Wojcik and Buchholz, 2014). Porém, não é do conhecimento dos autores uma investigação que analise a influência da geometria do aerofólio sobre o aumento rotacional de maneira sistemática.

O trabalho descrito aqui investiga o efeito da espessura do aerofólio nos fenômenos potencialmente relacionados ao aumento das forças aerodinâmicas devido à rotação, focando em particular no mecanismo descrito por Werner *et al.* (2019). As análises serão baseadas em simulações de dinâmica dos fluidos computacional (CFD), usando a plataforma OpenFOAM. As simulações levam em conta o efeito das forças centrífuga e de Coriolis, assumindo periodicidade do escoamento na direção da envergadura (Souza and Gennaro, 2020) e executadas considerando aerofólios com diferentes espessuras em condições de operação representativas de uma pá de turbina eólica de pequeno porte.

2. Metodologia

O objetivo é representar o escoamento sobre uma seção de pá a uma distância R do eixo de um rotor com velocidade angular constante $\Omega = \Omega e_y$, onde e_y é o vetor unitário na direção axial como na Fig. 1. Para isso, as equações governantes para escoamento permanente incompressível em coordenadas cilíndricas para um referencial girando com a pá são consideradas na forma adimensional:

$$\frac{1}{Ro} \frac{V_r}{r} + \frac{1}{Ro} \frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{\partial V_\theta}{r \partial \theta} + \frac{\partial V_y}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} V_r \frac{1}{Ro} \frac{\partial V_\theta}{\partial r} + V_\theta \frac{\partial V_\theta}{r \partial \theta} + V_y \frac{\partial V_\theta}{\partial y} + \frac{1}{Ro} \frac{V_r V_\theta}{r} = \\ - \frac{\partial p}{r \partial \theta} + \frac{1}{Re} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial V_\theta}{\partial r} + \frac{\partial^2 V_\theta}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 V_\theta}{r^2 \partial \theta^2} + \frac{\partial^2 V_\theta}{\partial y^2} - \frac{V_\theta}{r^2} + 2 \frac{1}{Ro} \frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial \theta} \right) + 2 \left(\frac{1}{Ro} \right)^2 V_r \end{aligned} \quad (2)$$

$$V_r \frac{1}{Ro} \frac{\partial V_y}{\partial r} + V_\theta \frac{\partial V_y}{r \partial \theta} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} = - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{Re} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial V_y}{\partial r} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 V_y}{r^2 \partial \theta^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} V_r \frac{1}{Ro} \frac{\partial V_r}{\partial r} + V_\theta \frac{\partial V_r}{r \partial \theta} + V_y \frac{\partial V_r}{\partial y} - Ro \frac{V_\theta^2}{r} = \\ - Ro \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{Re} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{\partial^2 V_r}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 V_r}{r^2 \partial \theta^2} + \frac{\partial^2 V_r}{\partial y^2} - \frac{V_r}{r^2} - 2Ro \frac{1}{r} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} \right) - 2V_\theta + \frac{1}{Ro} r \end{aligned} \quad (4)$$

Onde $r = r^* / c$ é a coordenada radial, $V_r = V_r^* / (\Omega c)$, $(V_\theta, V_y) = (V_\theta^*, V_y^*) / U$ são as componentes da velocidade, $p = p^* / (\rho U^2)$, U é a velocidade de escoamento livre para a seção considerada e $(\partial r, r \partial \theta, \partial y) = (\partial r^*, r^* \partial \theta, \partial y^*) / c$ é um deslocamento de comprimento infinitesimal. Observe que o sobrescrito * denota variáveis dimensionais. Os números adimensionais relevantes são o número de Reynolds baseado na corda $Re = Uc / \nu$, onde ν é a viscosidade cinemática, o número de rotação $Ro = \Omega c / U$ e a razão corda pelo raio c / R .

Para poder assumir a periodicidade na direção da amplitude, a análise deve ser restrita. Primeiro, deve-se mapear o incremento azimutal de comprimento $r d\theta$ para uma linha reta, cujo comprimento será referido como dx . Para que isso seja razoável, os efeitos da curvatura devem ser desprezíveis, o que é verdade para valores baixos de c / R . Por outro lado, no limite $c / R \rightarrow 0$, os efeitos rotacionais desaparecem, e o escoamento é aquele sobre um aerofólio em movimento linear. Os efeitos de curvatura foram desprezados ao retirar todos os termos proporcionais a r^{-1} e r^{-2} das equações governantes, exceto aqueles proporcionais a $O(V_\theta / r)$, uma vez que a componente da velocidade azimutal é proporcional a r . Com essas simplificações, e substituindo os deslocamentos radiais dr por deslocamentos no sentido da envergadura dz , as equações governantes podem ser reescritas como:

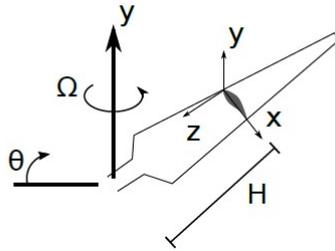


Figura 1. Representação esquemática do referencial

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{1}{Ro} \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0, \quad (5)$$

$$V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} + V_z \frac{1}{Ro} \frac{\partial V_x}{\partial z} + \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} \right) = 2 \left(\frac{1}{Ro} \right)^2 V_z - \frac{1}{Ro} \frac{V_z V_x}{r}, \quad (6)$$

$$V_x \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} + V_z \frac{1}{Ro} \frac{\partial V_y}{\partial z} + \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 V_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial z^2} \right) = 0, \quad (7)$$

$$V_x \frac{\partial V_z}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_z}{\partial y} + V_z \frac{1}{Ro} \frac{\partial V_z}{\partial z} + Ro \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 V_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} \right) = Ro \frac{V_x^2}{r} - 2V_x + \frac{1}{Ro} r, \quad (8)$$

O sistema composto pelas versões dimensionais da Eq. (5) a Eq. (8) foi resolvido usando o OpenFOAM, uma ferramenta numérica de código aberto para a solução de equações diferenciais parciais com base no método de volumes finitos. O esquema de discretização por diferença central foi usado para o termo viscoso. Os termos convectivos foram discretizados com esquema upwind (Warming and Beam, 1976). O acoplamento velocidade-pressão foi realizado pelo algoritmo SIMPLE com os termos do lado direito das Eq. (6) e Eq. (8) tratados explicitamente.

O aerofólio S809 foi simulado em um número de Reynolds baseado na corda de 1 milhão e ângulo de ataque de 12° . Este aerofólio, projetado para pás de turbinas eólicas, tem espessura igual a 21% do comprimento da corda (Somers, 1997). O aerofólio modificado, nomeado S809mod, foi obtido utilizando o software *xflr5*, no ambiente *Direct foil design*, com a ferramenta *Scale camber and thickness*. O novo aerofólio possui espessura de 16% do comprimento da corda. Outros parâmetros como posição da espessura máxima, posição e valor do camber máximo e raio do bordo de ataque foram preservados. Ambos os aerofólios podem ser vistos na Fig. 2.

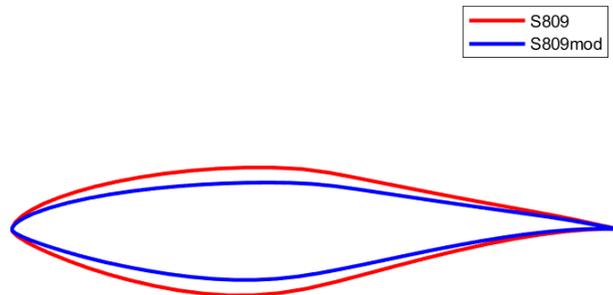


Figura 2. Representação dos aerofólios S809 e S809mod

Para a discretização do domínio, foi utilizada uma malha tipo C. O domínio computacional e detalhes da malha nas proximidades do aerofólio são mostrados na Fig. 3. A dependência da solução em relação ao domínio e refinamento da malha foram investigadas em trabalhos anteriores dos autores (Souza and Gennaro, 2020). Para evitar dificuldades para convergir a solução, os termos fonte das Eq. (6) e Eq. (7) foram considerados apenas dentro da porção interna do domínio (Fig. 3 (a)), e foi adotado $\Delta y = 3c$.

Devido à sua capacidade de simular com precisão escoamentos turbulentos com separação massiva, o modelo $k - \omega$ SST foi usado para modelar o efeito da turbulência no fluxo médio no tempo (Menter, 1994).

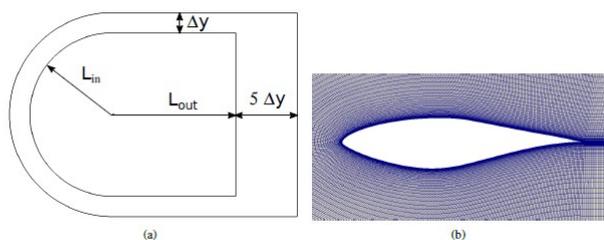


Figura 3. (a) Domínio computacional e (b) detalhe da malha nas proximidades do aerofólio

Na entrada do domínio, valores fixos para velocidade, energia cinética turbulenta k taxa específica de dissipação de turbulência ω foram impostos com base em experimentos em túnel de vento realizados na Universidade de Delft (Somers, 1997). Pressão fixa foi imposta no limite de saída, condição de parede de deslizamento livre foi considerada para os limites de domínio superior e inferior e parede sem deslizamento para o aerofólio.

3. Resultados

A Fig. 4 apresenta uma comparação dos coeficientes de sustentação e arrasto nas condições de movimento retilíneo ($Ro = \infty$) e diferentes valores do número de Rossby.

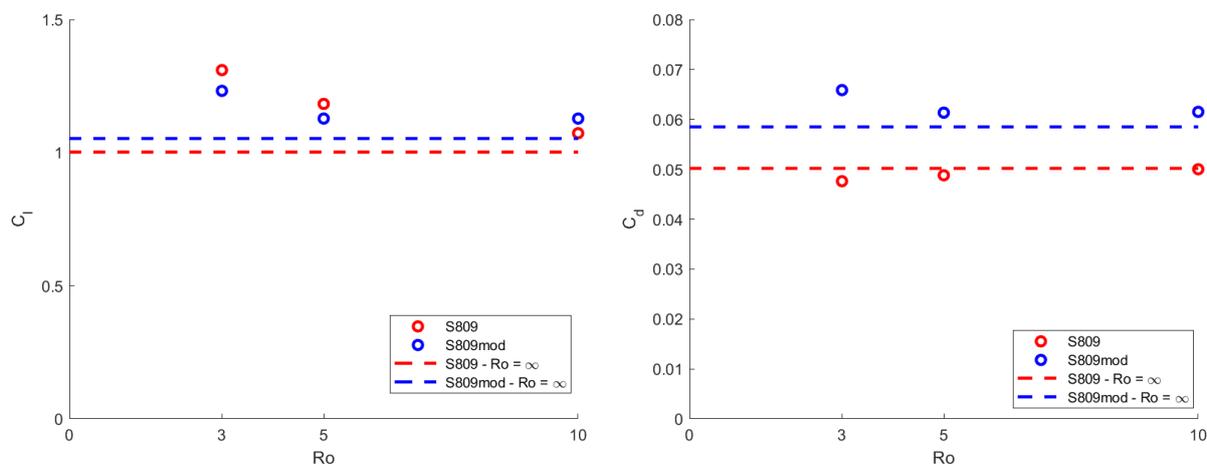


Figura 4. Coeficiente de sustentação (esquerda) e arrasto (direita) para diferentes valores do número de Rossby

Tanto para o aerofólio original (S809) quanto para o aerofólio modificado (S809mod) foi observado um aumento no coeficiente de sustentação. No entanto, o aerofólio S809mod aparenta ter menor sensibilidade ao aumento do C_l . Na condição de $Ro = 3$ o aerofólio S809 apresentou aumento do coeficiente de sustentação em torno de 30,7%, enquanto o aerofólio modificado apresentou apenas 17%.

Os resultados para o coeficiente de arrasto estão em concordância com Herráez *et al.* (2014). O aerofólio S809 apresentou redução máxima de 5%, por outro lado, o aerofólio S809mod apresentou aumento de 12,6%. Isso indica que os efeitos do aumento rotacional no coeficiente de arrasto são dependentes do tipo do aerofólio.

A distribuição do coeficiente de pressão ao longo do aerofólio pode ser visto na Fig. 5. Percebe-se que a rotação aumenta o pico de sucção no extradorso de ambos os aerofólios. Em contrapartida, no intradorso os efeitos da rotação são marginais. O ponto de separação sofreu um deslocamento em direção ao bordo de fuga de 12,24% para o S809mod e de aproximadamente 10% para o aerofólio original.

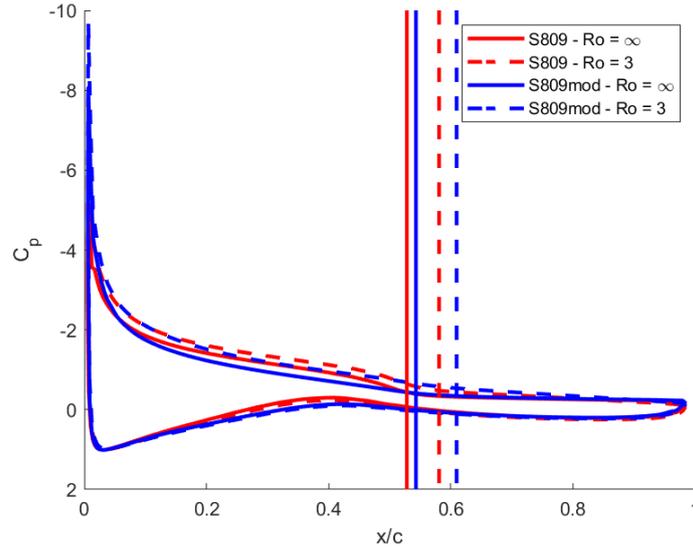


Figura 5. Distribuição do coeficiente de pressão e ponto de separação no extradorso ao longo de x/c para o caso sem rotação e com $Ro = 3$

O campo da variável S_ω foi calculado como na Eq. (9) para os casos de $Ro = 3$. Essa variável representa o efeito da força de Coriolis sobre a componente radial da vorticidade.

$$S_\omega = -2\Omega \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right) \quad (9)$$

Os campos da variável S_ω para ambos aerofólios podem ser visualizados na Fig. 6.

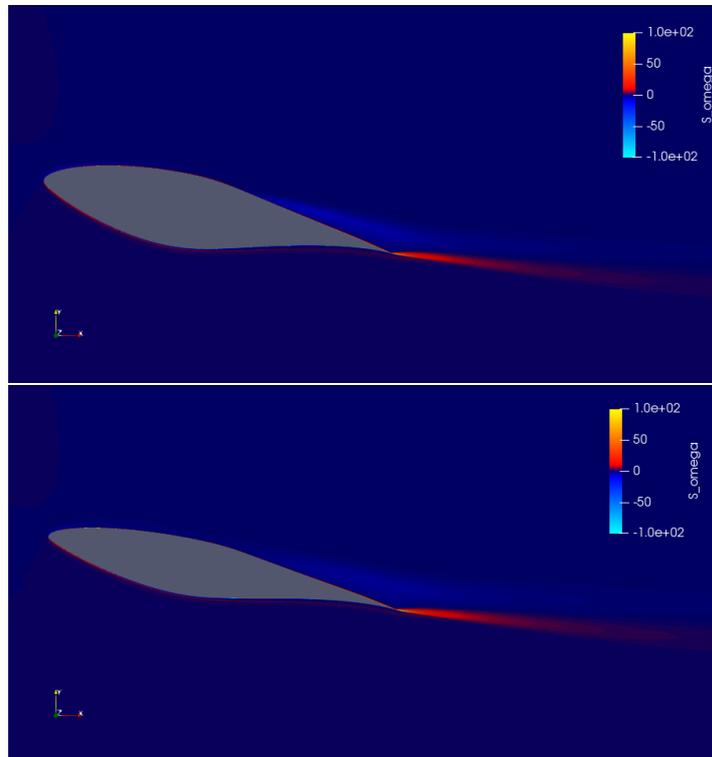


Figura 6. Campo S_ω para o aerofólio S809 (em cima) e S809mod (em baixo) para Rossby 3

É possível observar a existência de uma região de valor negativo da variável ligeiramente acima da região de recirculação. Esses resultados são menos expressivos do que outros casos estudados Alves and Souza (2022). Tal diferença pode ser explicada pelo baixo ângulo de ataque utilizado nas simulações. Nessas condições, o efeito da rotação é menos expressivo.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foi demonstrado que a espessura do aerofólio possui impacto no aumento rotacional. O fenômeno atua de forma diferente em aerofólios com espessuras distintas, podendo aumentar ou diminuir o coeficiente de arrasto. Apesar da redução significativa do vórtice no extradorso, a distribuição do termo S_ω foi pouco expressiva em comparação com outros casos estudados utilizando ângulos de ataque maiores. Isso significa que outros mecanismos podem ser relevantes no ângulo de ataque estudado.

5. AGRADECIMENTOS

N. Assis é grato à Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas (ABCM).

6. REFERÊNCIAS

- Alves, M.C.S. and Souza, D.S., 2022. “Simulação cfd do escoamento separado sobre um aerofólio de turbina eólica”. In *III Congresso Brasileiro de Fluidodinâmica Computacional*. Campinas, Brasil, pp. 1–4.
- Harris, F.D., 1966. “Preliminary study of radial flow effects on rotor blades”. *Journal of the American Helicopter Society*, Vol. 11, No. 3, pp. 1–21.
- Herráez, I., Stoevesandt, B. and Peinke, J., 2014. “Insight into rotational effects on a wind turbine blade using navier–stokes computations”. *Energies*, Vol. 7, No. 10, pp. 6798–6822.
- Lindenburg, C., 2003. “Investigation into rotor blade aerodynamics”. *ECN, Peten*.
- Mauro, S., Lanzafame, R. and Messina, M., 2017. “An insight into the rotational augmentation on hawks by means of cfd simulations—part i: State of the art and numerical results”. *International Journal of Applied Engineering Research*, Vol. 12, No. 21, pp. 10491–10504.
- Menter, F.R., 1994. “Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications”. *AIAA journal*, Vol. 32, No. 8, pp. 1598–1605.
- Rodrigues, P.T., Gennaro, E.M. and Souza, D.S., 2022. “Effect of coriolis acceleration on the span-wise vorticity field over a wind-turbine airfoil”. In *AIAA AVIATION 2022 Forum*. p. 3992.
- Somers, D.M., 1997. “Design and experimental results for the s809 airfoil”. Technical report, National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).
- Souza, D. and Gennaro, E., 2020. “Rotational effects on the spanwise periodic flow over a wind turbine airfoil”. *18th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering*, pp. 1–11.
- Warming, R. and Beam, R.M., 1976. “Upwind second-order difference schemes and applications in aerodynamic flows”. *AIAA Journal*, Vol. 14, No. 9, pp. 1241–1249.
- Werner, N.H., Chung, H., Wang, J., Liu, G., Cimbala, J.M., Dong, H. and Cheng, B., 2019. “Radial planetary vorticity tilting in the leading-edge vortex of revolving wings”. *Physics of Fluids*, Vol. 31, No. 4, p. 041902.
- Wojcik, C.J. and Buchholz, J.H., 2014. “Vorticity transport in the leading-edge vortex on a rotating blade”. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 743, pp. 249–261.