

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA MECÂNICA

ADILSON GOMES POLTRONIERI JUNIOR

**OTIMIZAÇÃO DO PERFIL NACA 4-DÍGITOS ASSIMÉTRICO
APLICADA A UMA TURBINA EÓLICA VERTICAL *DARRIEUS* PARA A
GERAÇÃO DESCENTRALIZADA**

ILHA SOLTEIRA
2022

ADILSON GOMES POLTRONIERI JUNIOR

**OTIMIZAÇÃO DO PERFIL NACA 4-DÍGITOS ASSIMÉTRICO
APLICADA A UMA TURBINA EÓLICA VERTICAL DARRIEUS PARA A
GERAÇÃO DESCENTRALIZADA**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina Trabalho de Graduação do Curso Superior de Engenharia Mecânica, da Universidade Estadual Paulista – UNESP, campus de Ilha Solteira, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Leandro Oliveira Salviano

ILHA SOLTEIRA

2022

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

P779o Poltronieri Junior, Adilson Gomes .
Otimização do perfil NACA 4-dígitos assimétrico aplicada a uma turbina
eólica vertical darrieus para a geração descentralizada / Adilson Gomes
Poltronieri Junior. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2022
66 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecânica) -
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2022

Orientador: Leandro Oliveira Salviano
Inclui bibliografia

1. Engenharias. 2. Engenharia mecânica. 3. Mecânica Dos Fluidos.



João Josué Barbosa

Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação
Diretor Técnico
CRB 8-5642

CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ATA DA DEFESA - TRABALHO DE GRADUAÇÃO

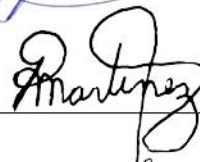
Ao quarto dia do mês de Janeiro de dois mil e vinte dois, às quatorze horas, em reunião pelo Google Meeting (<https://meet.google.com/yox-qbz-u-byn>), o discente ADILSON GOMES POLTRONIERI JUNIOR matriculado sob o RA 161052223, apresentou o Trabalho de Graduação intitulado OTIMIZAÇÃO DO PERFIL NACA 4-DÍGITOS ASSIMÉTRICO APLICADA A UMA TURBINA EÓLICA VERTICAL DARRIEUS PARA A GERAÇÃO DESCENTRALIZADA, tendo como banca examinadora o PROF. DR. LEANDRO OLIVEIRA SALVIANO (Orientador/Presidente), PROF. MSc. PEDRO HENRIQUE BARSANAOR DE BARROS MARTINEZ, PROF. MSc. GABRIEL BERTACCO DOS SANTOS. Após exposição e arguição, o discente foi **APROVADO** pela Comissão Examinadora. Encerrada as atividades, lavro a presente Ata.

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Leandro Oliveira Salviano
(Orientador/Presidente)



Prof. Msc. Pedro Henrique Barsanaor de
Barros Martinez

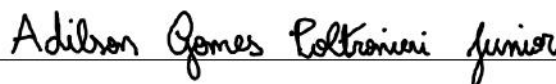


Prof. Msc. Gabriel Bertacco dos Santos



Discente:

Adilson Gomes Poltronieri Junior



Ilha Solteira, 4 de Janeiro de 2022.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família, por todas as condições dadas para minha formação, ao apoio e incentivo para o desenvolvimento da minha graduação.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Leandro Oliveira Salviano, pelo suporte dado tanto academicamente quanto pessoalmente para a realização deste trabalho.

Aos meus amigos de graduação e de projeto de pesquisa, pela oportunidade de aprender e evoluir ao lado deles.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, pelo apoio dado ao desenvolvimento deste trabalho através da concessão da bolsa de estudo de Iniciação Científica referente ao processo 2019/20438-7.

RESUMO

JUNIOR, Adilson G. P. Otimização do perfil NACA 4-dígitos assimétrico aplicada a uma turbina eólica vertical *Darrieus* para a geração descentralizada. 2022. Proposta de Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Graduação em Engenharia mecânica, Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira, 2022.

A demanda energética vem crescendo nas últimas décadas atrelada aos novos meios de produção e ao crescimento econômico, sendo necessário o desenvolvimento e aprimoramento de novas fontes energéticas renováveis e sustentáveis, ao passo em que as fontes convencionais, como o petróleo e seus derivados, apresentam-se como recursos finitos e nocivos ao meio ambiente. Dessa forma, fontes alternativas como a energia eólica tornam-se cada vez mais atrativas, abrindo espaço para o desenvolvimento de novas tecnologias e para otimização dos equipamentos e recursos disponíveis. Neste contexto, este trabalho tem por objetivo contribuir para o desenvolvimento da tecnologia eólica do país, tendo foco nas turbinas eólicas de pequena escala para a geração de energia descentralizada. Para tanto, foi realizada a otimização do perfil NACA assimétrico 4-dígitos aplicada a uma turbina eólica vertical *Darrieus* por meio de simulações numéricas, avaliando-se a influência dos parâmetros do perfil NACA no coeficiente de potência (C_p) da turbina. Foi considerado um escoamento bidimensional, incompressível, turbulento e em regime transitório, sob a condição operacional de TSR igual a 2,63, submetendo os parâmetros que compõem os dígitos do perfil NACA ao processo de otimização indireta por superfície de resposta. Com a otimização, foi obtido o perfil ótimo NACA 1621, apresentando uma melhora no coeficiente de potência na ordem de 5,42% (comparado à referência NACA 0021). Através dos resultados obtidos, foi possível identificar alguns parâmetros necessários para o aumento da eficiência deste tipo de turbina, de modo que a geração de energia descentralizada seja mais viável e atrativa, favorecendo e incentivando a instalação de turbinas eólicas em aplicações urbanas e em regiões afastadas com distribuição de energia ineficiente, permitindo um melhor aproveitamento do vasto potencial eólico brasileiro.

Palavras-chave: Turbinas eólicas de pequena escala; Turbina *Darrieus*; Perfil NACA série 4; Técnicas de Metamodelagem; Otimização; CFD; Geração Descentralizada.

ABSTRACT

JUNIOR, Adilson G. P. Optimization of the asymmetric NACA 4-Digit profile applied to Darrieus Vertical Wind Turbine for a decentralized energy Generation. 2022. Proposta de Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Graduação em Engenharia mecânica, Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira, 2022.

The energy demand has been growing in recent decades with the new production means and economic growth, making necessary the development and improvement of new and sustainable energy resources, whereas conventional resources, such as oil and its derivatives, expose themselves as finite and harmful to the environment. Alternative resources such as wind energy are becoming increasingly attractive, making room for the development of new technologies and optimized equipment in these fields, so that energy production is supplied. Therefore, this paper aims to contribute to the development of the country's wind technology, focusing on small scale wind turbines for decentralized power generation. For this propose, the asymmetric 4-digit NACA profile applied to a Darrieus Vertical Wind Turbine was optimized by numerical simulation, evaluating the influence of NACA profile parameters on turbine power coefficient (C_p). It was considered a bidimensional, incompressible and turbulent flow in transitional regime, under the TSR operational conditions equal to 2.63, submitting NACA's parameters for an indirect optimization by response surfaces. From optimization, the optimal NACA 1621 profile was obtained, with an improvement in power coefficient in the order of 5.42 % (compared to the NACA profile reference 0021). Through the results obtained, it was possible to identify some necessary parameters for increasing this turbine efficiency, so that the decentralized power generation becomes more viable and attractive, favoring and encouraging the wind turbine installation at residential level and at remote areas with inefficient energy distribution, enabling a better use of use the huge Brazilian's wind potential.

Keywords: Small Scale Wind Turbine; Darrieus Turbine; 4-digit NACA profile; Metamodeling Techniques; Optimization; CFD; Decentralized generation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Composição da matriz elétrica brasileira (GW) – janeiro de 2019.....	11
Figura 2	– Evolução da capacidade instalada de energia eólica no Brasil.....	12
Figura 3	– Parque eólico <i>Horse Hollow</i> no estado estadunidense do Texas.....	13
Figura 4	– Turbina eólica <i>Darrieus</i> instalada sobre um prédio.	13
Figura 5	– Tipos construtivos de turbinas eólicas.....	15
Figura 6	– Turbinas eólicas de eixo vertical.	16
Figura 7	– Esquema da rotação de uma VAWT <i>Darrieus</i> em oito posições azimutais.	17
Figura 8	– Perfil aerodinâmico do tipo NACA 4-dígitos.	20
Figura 9	– Representação esquemática do domínio computacional.	24
Figura 10	– Domínio computacional, a) domínio computacional completo, b) núcleo rotativo e domínio auxiliar.	25
Figura 11	– Interface entre o domínio estacionário e rotativo.....	27
Figura 12	– Malha computacional: a) Interface entre os domínios estacionário e rotativo, b) Malha ao redor do aerofólio, e c) Elementos prismáticos sobre o perfil. .	29
Figura 13	– Convergência do C_p em função do número de revoluções, a) $k - \omega$ SST, e b) <i>Transition SST</i>	34
Figura 14	– Critério de y^+ nas pás da turbina para a última revolução	35
Figura 15	– Número de Courant na interface deslizante para a última revolução .	35
Figura 16	– Coeficiente de potência para análise do <i>time-step</i> angular	37
Figura 17	– Fluxograma aplicado na abordagem de otimização indireta por superfície de resposta.	42
Figura 18	– DoE gerado e respectivos valores simulados de C_p	44
Figura 19	– Matriz de dispersão dos parâmetros de entrada (m, p, t).	45
Figura 20	– Distância RSM (Gaussiano Exponencial Isotrópico).	47
Figura 21	– Perfil otimizado NACA 1621.....	48
Figura 22	– Comparação entre os coeficientes de potência (C_p) do perfil otimizado e do perfil de referência para a configuração de turbina analisada (Tabela 10).....	49
Figura 23	– Comparativo entre o comportamento aerodinâmico do perfil otimizado e do perfil de referência. a) Coeficiente de sustentação (C_l) e b) Coeficiente de arrasto (C_d).	50

Figura 24 – Coeficiente de Potência a) da turbina e b) de cada pá isolada (perfil NACA 1621) para última rotação.....	51
Figura 25 – Campo a) de velocidade e b) de pressão da turbina para o ângulo azimutal com maior C_p (93°) – Perfil NACA 1621.....	52
Figura 26 – Campo de velocidade das pás da turbina para o ângulo azimutal com maior C_p (93°) - Perfil NACA 1621. a) Pá 1; b) Pá 2; e c) Pá 3	53
Figura 27 – Campo de pressão das pás da turbina para o ângulo azimutal com maior C_p (93°) - Perfil NACA 6427. a) Pá 1; b) Pá 2; e c) Pá 3	54
Figura 28 – Campo a) de velocidade e b) de pressão da turbina para o ângulo azimutal com menor C_p (38°) – Perfil NACA 1621.....	56
Figura 29 – Campo de velocidade das pás da turbina para o ângulo azimutal com menor C_p (38°) - Perfil NACA 1621). a) Pá 1; b) Pá 2; e c) Pá 3.....	57
Figura 30 – Campo de pressão das pás da turbina para o ângulo azimutal com menor C_p (38°) - Perfil NACA 1621. a) Pá 1; b) Pá 2; e c) Pá 3.	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Características geométricas da turbina eólica vertical.....	23
Tabela 2	– Dimensões do domínio computacional.....	24
Tabela 3	– Características do modelo utilizado no GCI e na validação.	31
Tabela 4	– Configurações principais da simulação numérica.....	32
Tabela 5	– Características das malhas obtidas para o cálculo do GCI.	32
Tabela 6	– Erros de discretização.	32
Tabela 7	– Validação numérica para TSR 2,63.....	38
Tabela 8	– Configurações finais para as simulações numéricas.....	39
Tabela 9	– Parâmetros para a elaboração do DoE.	40
Tabela 10	– Configuração da turbina para a simulação numérica do DoE.	43
Tabela 11	– Valores residuais das principais superfícies de resposta com melhores resultados.....	46
Tabela 12	– Valores de C_p reais e virtuais para o conjunto de perfis NACA de referência.	48

SUMÁRIO

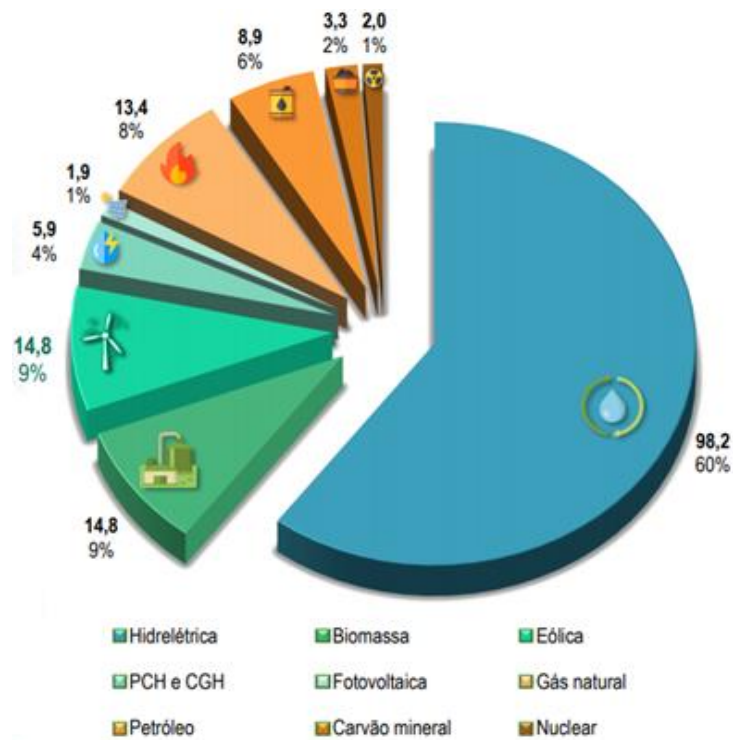
1.	INTRODUÇÃO	11
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1.	Turbinas eólicas de pequena escala	15
2.2.	Aerodinâmica das Turbinas Eólicas <i>Darrieus</i>	16
2.3.	Parametrização do perfil NACA.....	19
3.	METODOLOGIA NUMÉRICA.....	22
3.1.	Equações Governantes	22
3.2.	Domínio Computacional e Condições de Contorno.....	23
3.3.	Crítério de y^+ e o número de Courant	25
3.4.	Caracterização da malha.....	28
3.5.	Análise de sensibilidade de malha	30
3.6.	Convergência por número de revoluções.....	33
3.7.	Análise do <i>time-step</i> angular	36
3.8.	Validação numérica	37
3.9.	<i>Design of Experiment</i> (DoE)	39
3.9.1.	Método <i>Optimal Space-Filling Design</i> (OSF).....	40
3.9.2.	Técnicas de Metamodelagem	41
4.	RESULTADOS	43
4.1.	Definição do DoE.....	43
4.2.	Treinamento e teste dos modelos de metamodelagem (RSM)	46
4.3.	Otimização.....	48
4.4.	Análise física do perfil.....	51
5.	CONCLUSÕES	60
6.	ESCOPO PARA TRABALHOS FUTUROS	62
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

1. INTRODUÇÃO

Atender às necessidades energéticas é fundamental para suprir as necessidades da população e garantir o crescimento econômico, sendo necessária uma produção de energia contínua e cada vez maior. Devido ao progressivo e eminente esgotamento das fontes de energias convencionais e do aumento das emissões de CO₂, a demanda por energias renováveis vem aumentando consistentemente (TUMMALA e colab., 2016). Neste aspecto, pode-se destacar a energia eólica que, dentre as fontes renováveis, representa aquela com mais rápido crescimento em tecnologia energética em todo o mundo (WANG, Tongguang, 2012).

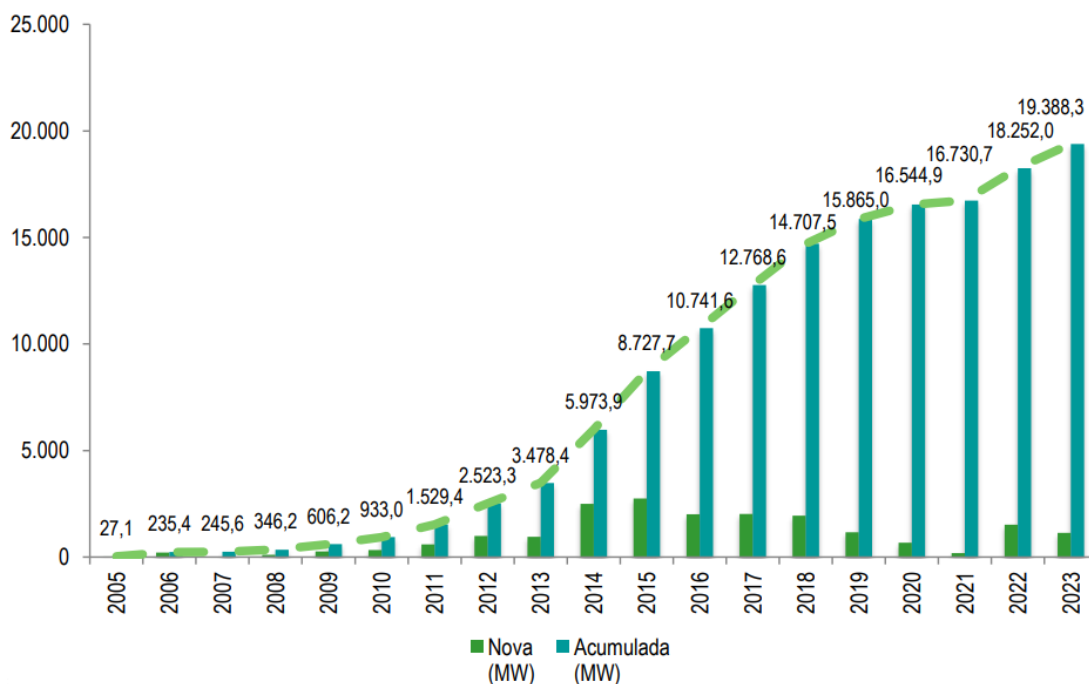
No Brasil, a energia eólica apresenta um constante crescimento na matriz energética, alcançado 9% de participação na demanda nacional em janeiro de 2019, conforme apresentado na Figura 1, período no qual atingiu uma capacidade eólica instalada acumulada de 14,79 MW. A evolução da capacidade instalada no país é ilustrada na Figura 2.

Figura 1 – Composição da matriz elétrica brasileira (GW) – janeiro de 2019.



Fonte: (ABEEÓLICA, 2019).

Figura 2 – Evolução da capacidade instalada de energia eólica no Brasil.



Fonte: (ABEEÓLICA, 2019).

Esta geração de eletricidade se dá por meio das turbinas eólicas, que são responsáveis por absorver parte da energia cinética do vento que é convertida em energia mecânica e posteriormente em energia elétrica. Neste aspecto, é comum um maior enfoque aos grandes parques eólicos (Figura 3). Entretanto, a instalação destes parques representa impactos potenciais nas condições climáticas e sociais da região em que se encontram (WANG, C. e PRINN, 2010), tornando a aplicação descentralizada de turbinas eólicas de pequena escala uma opção viável e sustentável.

Nesse sentido, a busca por alternativas que atendam a crescente demanda energética, especialmente para a geração descentralizada, e que possibilitem minimizar os efeitos negativos associados às fontes de energias convencionais, trazem à tona a importância e necessidade de pesquisas relacionadas ao desenvolvimento de turbinas eólicas verticais de pequeno porte, como é o caso das turbinas do tipo *Darrieus*, que figuram como opção para a geração de energia elétrica em meios urbanos ou regiões rurais isoladas (Figura 4).

Figura 3 – Parque eólico *Horse Hollow* no estado estadunidense do Texas.



Fonte: (EIA, 2019).

Figura 4 – Turbina eólica *Darrieus* instalada sobre um prédio.



Fonte: (PAGNINI e colab., 2018).

Destaca-se também a possível implementação da geração descentralizada híbrida, na qual se aliam as turbinas eólicas de pequeno porte com a energia solar fotovoltaica, de forma que a fonte eólica é utilizada para complementar o

fornecimento em momentos de intermitência solar, atribuindo ao sistema de geração descentralizada uma maior flexibilidade, robustez e confiabilidade.

Nesse cenário, a aplicação de ferramentas de simulação computacional, como a Dinâmica dos Flúidos Computacional (CFD), tem demonstrado ser uma excelente opção de análise e tomada de decisão, exercendo um papel fundamental para o desenvolvimento de novas tecnologias que possam aumentar a eficiência dos projetos nacionais, tornando-os mais competitivos diante do mercado internacional.

Somado a isto, com a nova regulação da ANEEL (Resolução Normativa ANEEL nº482/2012), que permite a injeção de energia na rede em troca de créditos em kWh na conta de luz (ANEEL, 2018), a instalação das turbinas eólicas nas residências pode se tornar viável economicamente para os consumidores, ao passo em que o custo da eletricidade está cada vez maior e o aumento nos investimentos em sistemas eólicos de pequeno porte pode reduzir os custos de implantação.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Turbinas eólicas de pequena escala

As turbinas eólicas podem ser classificadas de acordo com o seu eixo de rotação, podendo ser de eixo horizontal (*Horizontal Axis Wind Turbine* – HAWT) ou de eixo vertical (*Vertical Axis Wind Turbine* – VAWT), conforme mostrado na Figura 5.

Figura 5 – Tipos construtivos de turbinas eólicas.

a) Turbina de eixo horizontal



b) Turbina de eixo vertical

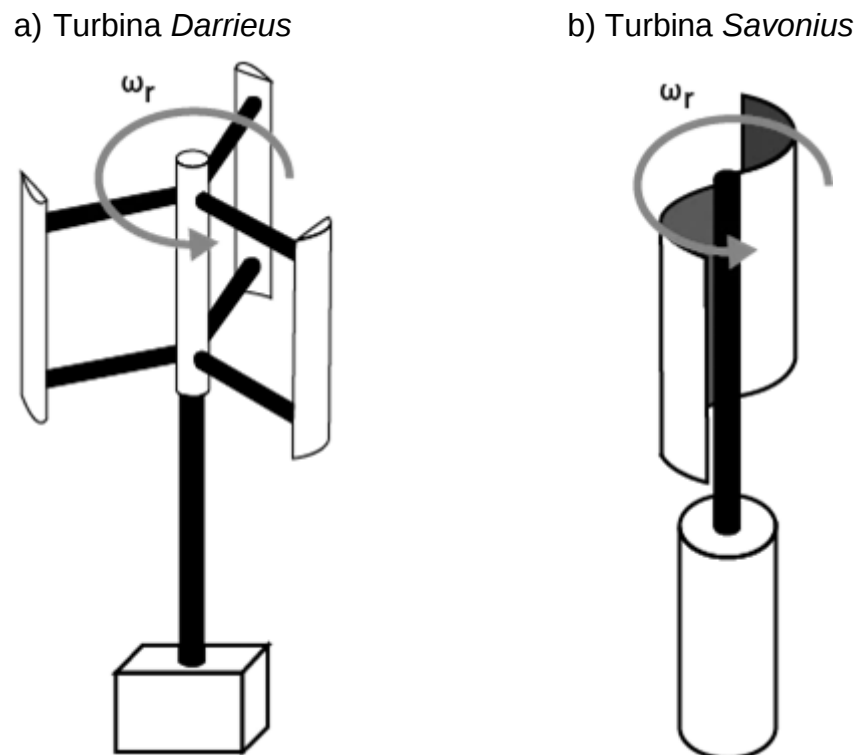


Fonte: (PINTO, 2013) e (JOHARI e colab., 2018).

Os grandes parques eólicos utilizam majoritariamente turbinas de eixo horizontal, uma vez que estes dispositivos possuem benefícios significativos para este tipo de aplicação centralizada, como a maior velocidade de incidência dos ventos (são instaladas em torres mais altas), maior facilidade de controle da velocidade do rotor e da potência gerada por meio da variação do ângulo das pás (PINTO, 2013), sendo o uso das turbinas de eixo vertical de certa forma preterido, limitando seu desenvolvimento tecnológico. Entretanto, as VAWT possuem aspectos interessantes para a aplicação em pequena escala, como, por exemplo, para a geração de energia em ambiente urbano. Dentre estes aspectos, é possível citar a independência da direção do vento, que permite a instalação próxima ao solo, o baixo nível de ruído e os custos mais baixos de fabricação e manutenção.

Existem dois tipos primários de VAWT: as baseadas na força de arrasto, conhecidas como *Savonius*, que apresentam menor eficiência, porém podem operar satisfatoriamente com pequenas velocidades de vento; e as baseadas na força de sustentação, conhecidas como *Darrieus* (LEE e LIM, 2015), conforme mostrado na Figura 6.

Figura 6 – Turbinas eólicas de eixo vertical.

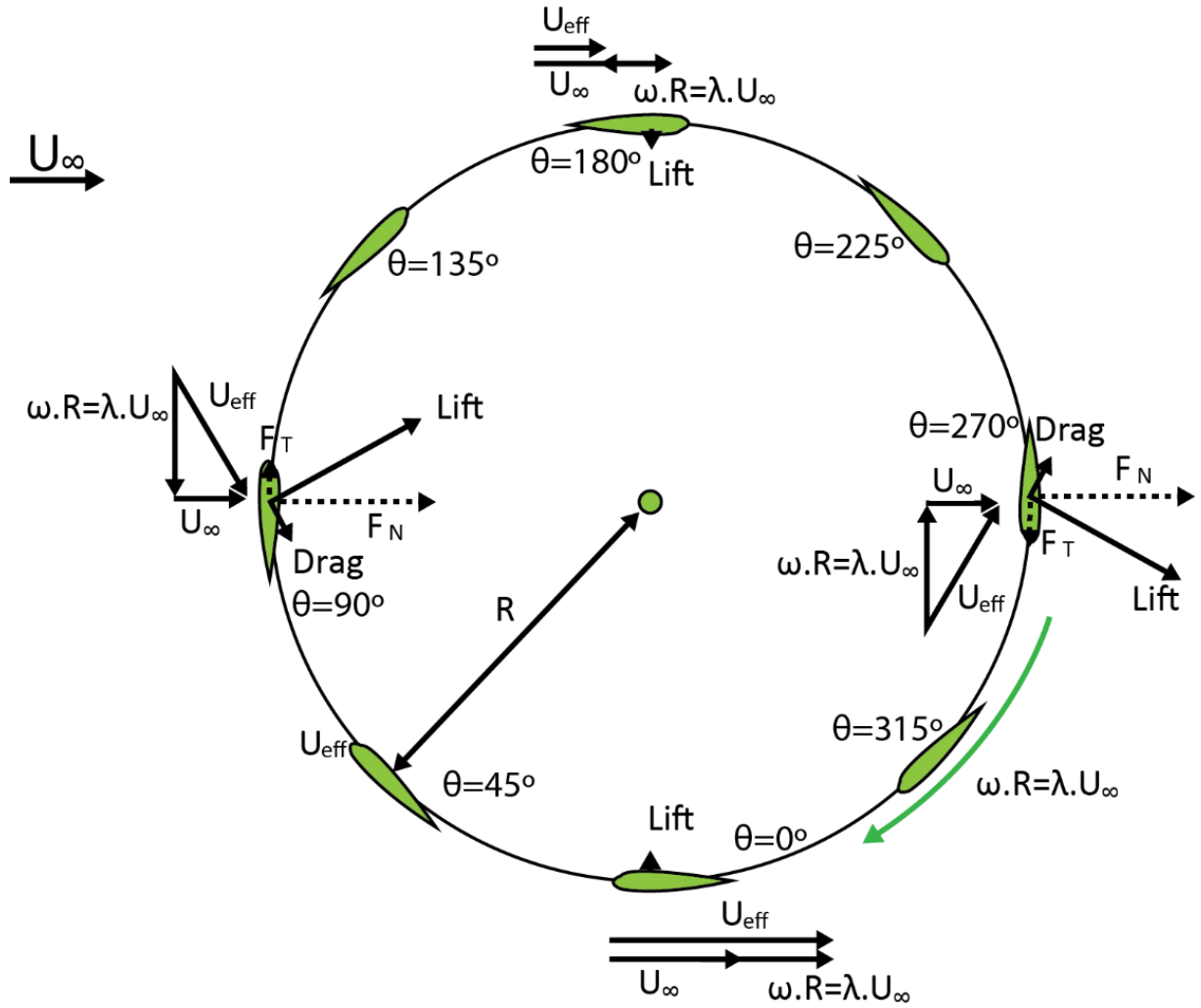


Fonte: (BARROS, 2020).

2.2. Aerodinâmica das Turbinas Eólicas *Darrieus*

Por trabalharem com variações do ângulo de ataque e da velocidade relativa da turbina durante cada revolução, as VAWTs possuem uma dinâmica de escoamento muito mais complexa comparada a HAWT (REZAEIHA e colab., 2018). Além disso, outros fenômenos dinâmicos se somam a esta complexidade, tais como o *stall* dinâmico, a interação da esteira e da pá da turbina, efeitos de curvatura e forças centrífugas na camada limite das pás (TESCIONE e colab., 2014). A Figura 7 mostra o triângulo de velocidades agindo sobre as pás durante a rotação e as componentes das forças de sustentação e arrasto.

Figura 7 - Esquema da rotação de uma VAWT *Darrieus* em oito posições azimutais.



Fonte: (BARROS, 2020).

A composição entre as forças de sustentação e arrasto é determinante no estabelecimento da eficiência aerodinâmica de uma turbina. Além disso, ao se trabalhar com turbinas eólicas, é introduzida a “velocidade de ponta de pá” (*Tip-Speed Ratio* - TSR). Nesse sentido, grande parte dos parâmetros relacionados às condições operacionais e geométricas da turbina eólica vertical pode ser sintetizada por meio da introdução do adimensional TSR, que compila essencialmente a velocidade de incidência do vento, a rotação da turbina e seu diâmetro de acordo com a Equação (1).

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

onde ω_r é a velocidade angular do rotor, u_∞ é a velocidade de incidência do vento e R é o raio da turbina (ABDALRAHMAN *et al.*, 2017)

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

$$\sigma = \frac{N c}{D} \quad (2)$$

onde: N é o número de pás da turbina, c é a corda do perfil aerodinâmico e D é o raio do rotor.

Em termos de desempenho, são vários os parâmetros envolvidos necessários para quantificar o desempenho de uma turbina eólica *Darrieus*, sintetizados na forma dos coeficientes de torque (C_t) e de potência (C_p), representados nas Equações (3) e (4), respectivamente.

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

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

onde: T é o torque no eixo da turbina, P é a potência mecânica de saída, U_∞ é a velocidade do vento, ρ é a massa específica do fluido, A é a área projetada do rotor e R é o raio do rotor (MOHAMED, 2019).

Ainda, os coeficientes de torque e de potência podem ser relacionados por meio da velocidade de ponta de pá (λ), Equação (5):

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

O desempenho aerodinâmico da turbina pode ser resumido pelos coeficientes de sustentação C_l e de arrasto C_d apresentando, respectivamente, nas Equações (6) e (7):

$$C_l = \frac{F_l}{\frac{1}{2} \rho A U_\infty^3} \quad (6)$$

$$C_d = \frac{F_d}{\frac{1}{2} \rho A U_\infty^3} \quad (7)$$

onde: F_l e F_d são, respectivamente, a força de sustentação e de arasto, U_∞ é a velocidade do vento, ρ é a densidade do fluido, A é a área projetada do rotor e R é o raio do rotor (ROY *et al.*, 2017).

2.3. Parametrização do perfil NACA

A parametrização geométrica de uma pá baseado no perfil NACA-4 dígitos é feita com base no arqueamento máximo do perfil (m) que corresponde ao primeiro dígito, na posição do arqueamento máximo (p) que corresponde ao segundo dígito, e na espessura do perfil (t) que corresponde aos dois últimos dígitos. Todos os valores variam em função percentual da corda do perfil (LU e colab., 2018).

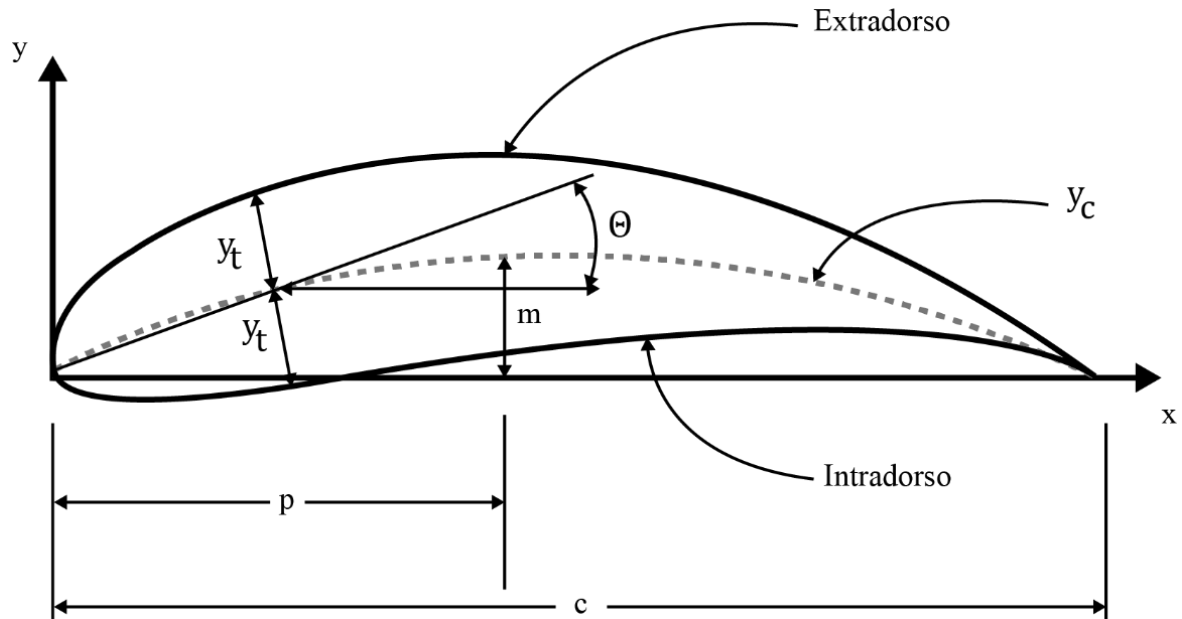
A linha de arqueamento y_c , mostrada na Figura 8 é gerada a partir de dois arcos de parábola, tangentes no ponto de arqueamento máximo (m), definida pelas Equações **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

$$y_c = \frac{m}{\left(\frac{p}{10}\right)^2} \left[2x \left(\frac{p}{10}\right) - x^2, \right] \text{ para } x \leq \left(\frac{p}{10}\right) \quad (8)$$

$$y_c = \frac{m}{\left[1 - \left(\frac{p}{10}\right)^2\right]} \left\{ \left[1 - 2\left(\frac{p}{10}\right) + 2x\left(\frac{p}{10}\right)\right] - x^2 \right\} \text{ para } x > \left(\frac{p}{10}\right) \quad (9)$$

onde: x e y_c é o par de coordenadas cartesianas para cada ponto do perfil e $\frac{p}{10}$ é a posição do arqueamento máximo.

Figura 8 - Perfil aerodinâmico do tipo NACA 4-dígitos.



Fonte: (BARROS, 2020).

A partir disso, um polinômio modificado define a distribuição de espessura de acordo com a Equação (10).

$$y_t = t(a_0\sqrt{x} - a_1x - a_2x^2 + a_3x^2 - a_4x^4), \quad (10)$$

onde: $a_0=1,4845$, $a_1=0,6300$, $a_2=1,7685$, $a_3=1,4215$ e $a_4=0,5075$.

A construção das coordenadas do extradorso, (x_u, y_u) , e do intradorso, (x_l, y_l) , é feita pela superposição das ordenadas da distribuição de espessura perpendicularmente à linha de arqueamento, de acordo com as Equações de (11) a (14).

$$x_u = x - y_t(\sin\theta) \quad (11)$$

$$y_u = y_c + y_t(\cos\theta) \quad (12)$$

$$x_l = x + y_t(\sin\theta) \quad (13)$$

$$y_l = y_c - y_t(\cos\theta) \quad (14)$$

onde: $\theta = \arctan(dy_c/dx)$, correspondente à inclinação da linha de arqueamento em relação a direção horizontal.

A partir dessas relações, é possível a construção de qualquer perfil NACA 4-dígitos, permitindo a variação automatizada da geometria das pás da turbina eólica.

3. METODOLOGIA NUMÉRICA

3.1. Equações Governantes

Para a modelagem da dinâmica do escoamento do fluido através da turbina eólica vertical, foram resolvidas as equações de Navier-Stokes (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes* - RANS) (HASHEM e MOHAMED, 2018), usando o algoritmo *Coupled* (REZAEIHA e colab., 2017) para o acoplamento pressão-velocidade. A discretização foi feita usando o método de volumes finitos com funções de interpolação de segunda ordem. Foram consideradas as hipóteses de escoamento bidimensional, incompressível e turbulento em regime transitório, sendo esta abordagem adequada para a modelagem da dinâmica do escoamento (BAI e colab., 2015). Dessa forma, considerando um fluido Newtoniano (ar), as equações governantes da Continuidade e *Momentum* na forma tensorial, respectivamente, são mostradas pelas Equações (15) e (16).

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \rho \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (15)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_i \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\overline{u'_i u'_j}) \quad (16)$$

A escolha do modelo de turbulência é fundamental para alcançar a adequada caracterização dos fenômenos dinâmicos envolvidos, em especialmente o descolamento da camada limite dinâmica, o gradiente adverso de pressão e a região de esteira. Desta forma, o modelo de fechamento *Transition SST* foi utilizado (ALMOHAMMADI e colab., 2015). Tal modelo é baseado no acoplamento das equações de transporte k- ω SST com duas outras equações de transportes, sendo uma para a intermitência e outra para a transição inicial, em termos do número de Reynolds.

3.2. Domínio Computacional e Condições de Contorno

A modelagem numérica proposta para este trabalho considera uma turbina eólica vertical em duas dimensões. A elaboração da geometria foi realizada por meio do *software* ANSYS *Design Modeler*, ferramenta computacional do pacote ANSYS *Academic Research CFD*, sendo as características geométricas fixas da turbina apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Características geométricas da turbina eólica vertical.

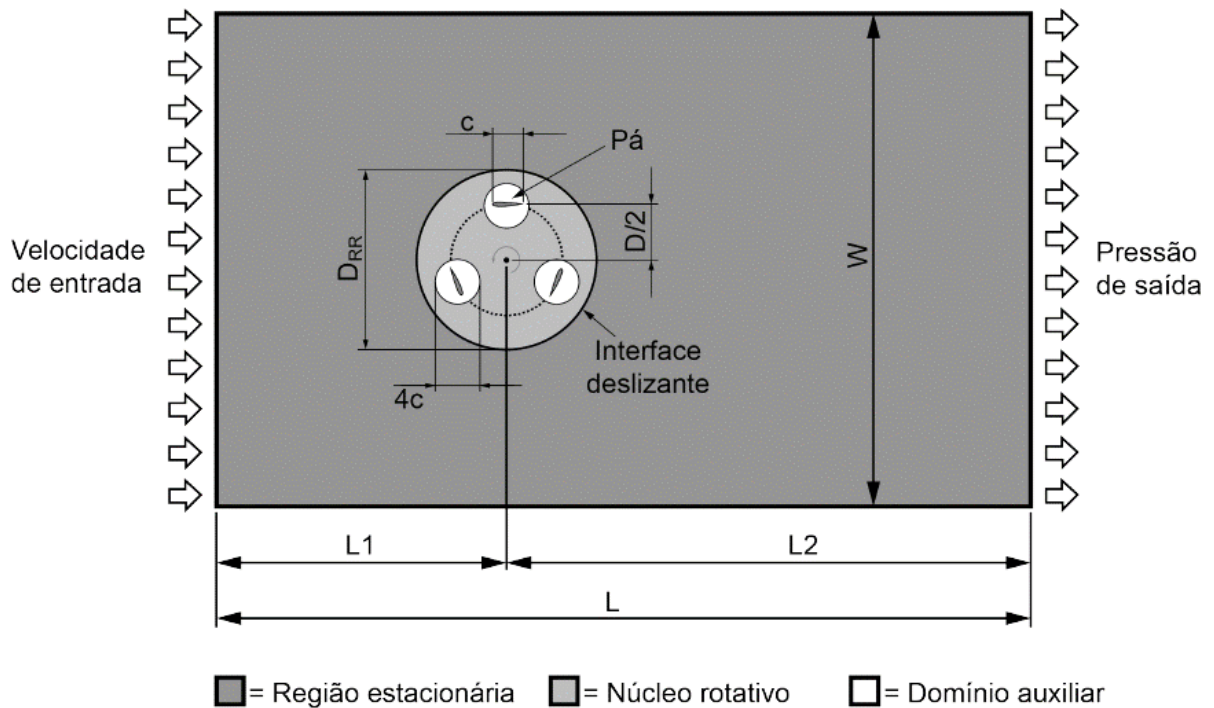
Parâmetro	Valor
Diâmetro do rotor (D) [mm]	1030
Altura do rotor (H) [m]	1 (simulação 2D)
Número de pás (N)	3

Fonte: Autoria Própria, 2022.

Ao passo em que a turbina eólica reproduzida representa uma máquina rotativa, a simulação de sua rotação exigiu a divisão do domínio computacional em três subdomínios. Nesse sentido, o domínio é formado por um núcleo rotativo que contém a turbina, por um subdomínio estacionário que envolve este núcleo rotativo e por um subdomínio circular auxiliar que envolve cada uma das pás, utilizado como forma de controle da qualidade das malhas ao redor dos perfis aerodinâmicos, principalmente no que diz respeito à criação de elementos prismáticos sobre os perfis de pá. A construção de uma interface deslizante localizada entre o domínio estacionário e o núcleo rotativo permite a rotação da turbina.

As condições de contorno consideram velocidade prescrita na entrada do domínio computacional e pressão prescrita na saída do domínio. Além disso, é considerada simetria nas faces superior e inferior, não-deslizamento nas paredes das pás e deslizamento na interface do domínio rotativo (*Sliding Mesh*). A Figura 9 apresenta uma representação esquemática do domínio computacional.

Figura 9 – Representação esquemática do domínio computacional.



Fonte: Adaptado de (BALDUZZI e colab. 2016)

Seguindo as recomendações presentes na literatura (REZAEIHA e colab., 2017), as dimensões do domínio computacional são apresentadas na Tabela 2.

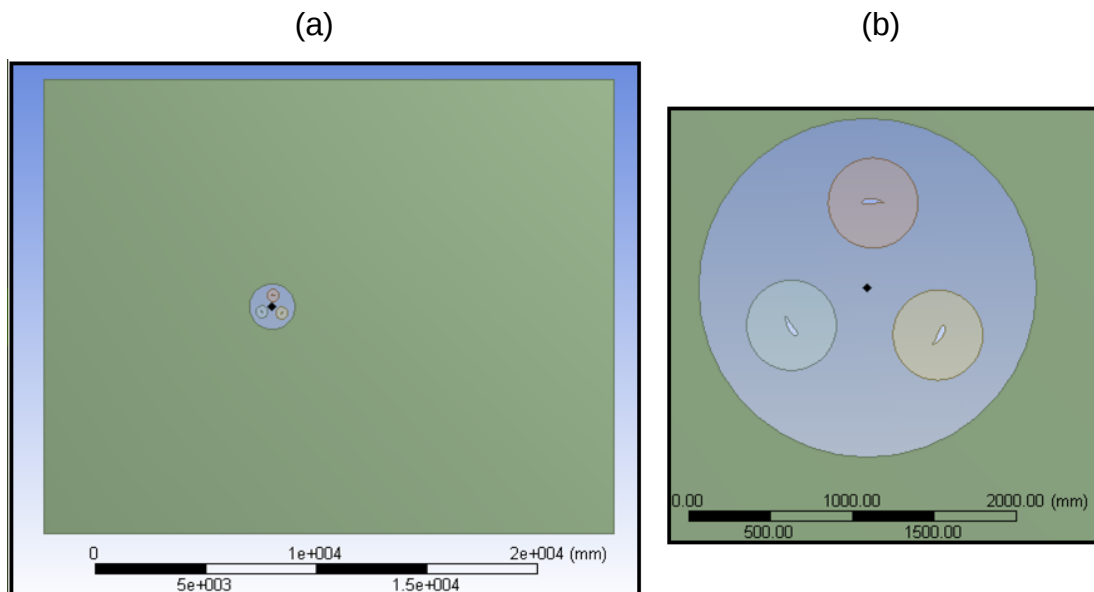
Tabela 2 – Dimensões do domínio computacional.

Parâmetro	Valor
Distância da entrada (L1)	10 D
Distância da saída (L2)	15 D
Distância do domínio rotativo (D_{RR})	1,5 D
Largura do domínio (W)	20 D

Fonte: Autoria Própria, 2022.

Dessa forma, é apresentado na Figura 10 o domínio computacional estabelecido para o trabalho, com destaque para o núcleo rotativo e para o domínio auxiliar.

Figura 10 – Domínio computacional: a) domínio computacional completo, b) núcleo rotativo e domínio auxiliar.



Fonte: Autoria Própria, 2022.

3.3. Critério de y^+ e o número de Courant

A obtenção de uma modelagem numérica do escoamento exige atenção e manipulação adequada de diversas variáveis que controlam a qualidade da malha, ao passo que, um estudo pormenorizado destas resulta em uma melhor representatividade do fenômeno físico. Dentre estas variáveis, é válido destacar a distância adimensional da parede (y^+) e o número de Courant (Co). As análises a respeito do critério de y^+ se encontram amplamente difundidas na literatura, com recomendações de valores de $y^+ \sim 1$ suficientes para capturar adequadamente o escoamento próximo às paredes, na subcamada viscosa, enquanto que, em relação ao número de Courant, são poucos os trabalhos que apresentam uma análise mais aprofundada.

Como o número de Courant é significativo para o estudo de casos transitórios, é verificada a necessidade de um melhor detalhamento do mesmo. Nesse sentido, o número de Courant pode ser definido por meio da Equação (17).

$$Co = \frac{u \Delta t}{\Delta x} \quad (17)$$

onde: u é a velocidade local do escoamento no elemento de malha, Δt é o *time-step* correspondente à discretização temporal e Δx é dimensão local de uma célula da malha correspondente à discretização espacial.

Ao se trabalhar com modelos que apresentam taxas de rotação de ordem média e grande, começam a ser encontrados problemas para a resolução da vorticidade oriundos do forte acoplamento existente nas equações de movimento. Isso se deve aos elevados gradientes de pressão resultantes das grandes taxas de rotação, que acarretam em problemas na convergência da solução (TRIVELLATO e CASTELLI, 2014). Além disso, outra imprecisão dos modelos transitórios corresponde ao passo de tempo (*time-step*), que deve ser cuidadosamente escolhido para reforçar a precisão da solução e minimizar possíveis problemas de convergência. Os pontos apresentados conduzem ao difundido critério CFL (*Courant-Friedrichs-Lewy*) para a estabilidade numérica, que recomenda um limite para o número de Courant, tal qual expresso na Equação (18).

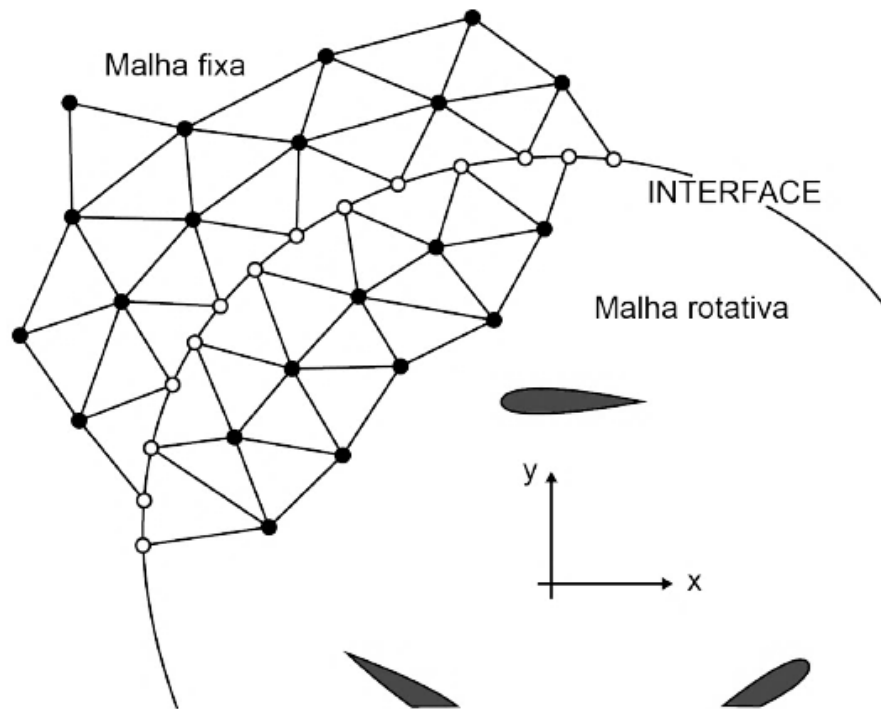
$$CFL = Co < 1 \quad (18)$$

Nesse aspecto, é válido ressaltar que, para a determinação do tamanho do passo de tempo, a utilização de métodos implícitos de discretização é considerada mais estável, garantindo resultados com melhor estabilidade numérica.

No que diz respeito à fronteira comum entre o domínio rotativo e o domínio estacionário, esta é definida como uma interface conservativa, na qual as condições de contorno são fornecidas. Nesse sentido, a Figura 11 apresenta um exemplo representativo desta interface, que é composta por uma malha triangular não estruturada.

A fim de se evitar problemas de discrepância, é interessante reproduzir a malha conforme apresentado, de modo que os elementos na interface entre o domínio fixo e o rotativo apresentem a mesma dimensão, e, com isso, a análise do número de Courant tenha maior precisão (TRIVELLATO e CASTELLI, 2014).

Figura 11 – Interface entre o domínio estacionário e rotativo.



Fonte: Adaptado de (TRIVELLATO e CASTELLI 2014).

Assim como previamente apresentado na Equação (18), valores de $Co < 1$ são recomendados para manter a estabilidade numérica através de uma análise de estabilidade linear. Entretanto, ao se aumentar o *time-step*, os efeitos de não linearidade são cada vez mais salientes, podendo conduzir a soluções de caráter oscilatório (BALDUZZI e colab., 2016). Dessa forma, estudos recentes apontam que o número de CFL deve ser tão pequeno quanto o possível, com valores menores que 0,5 (TRIVELLATO e CASTELLI, 2014).

Na prática, é importante ser levada em conta a interpretação física do critério de CFL, que se refere basicamente ao número de Courant, consistindo na razão entre a distância convectiva durante um intervalo de tempo (*time-step*) e a discretização espacial local. Em outras palavras, atender ao critério de CFL significa apresentar um intervalo de tempo que permita que as informações de interesse tenham tempo suficiente para percorrer o elemento de malha.

3.4. Caracterização da malha

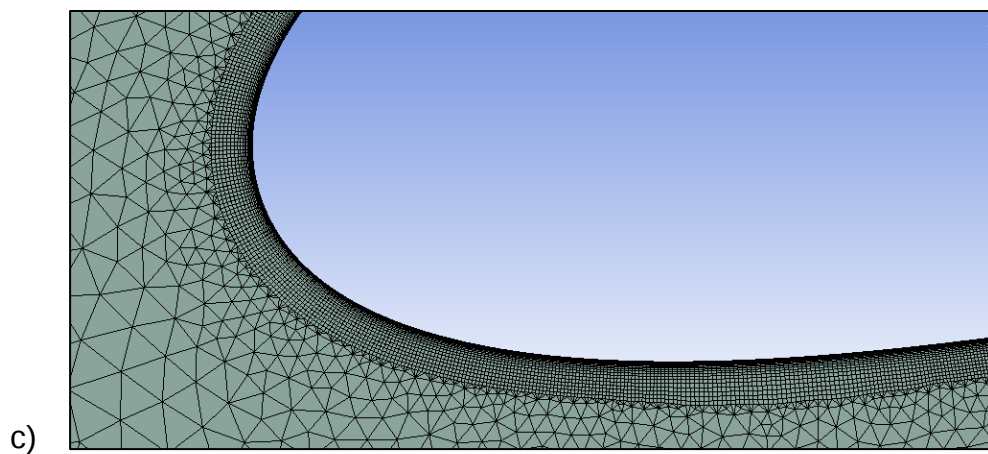
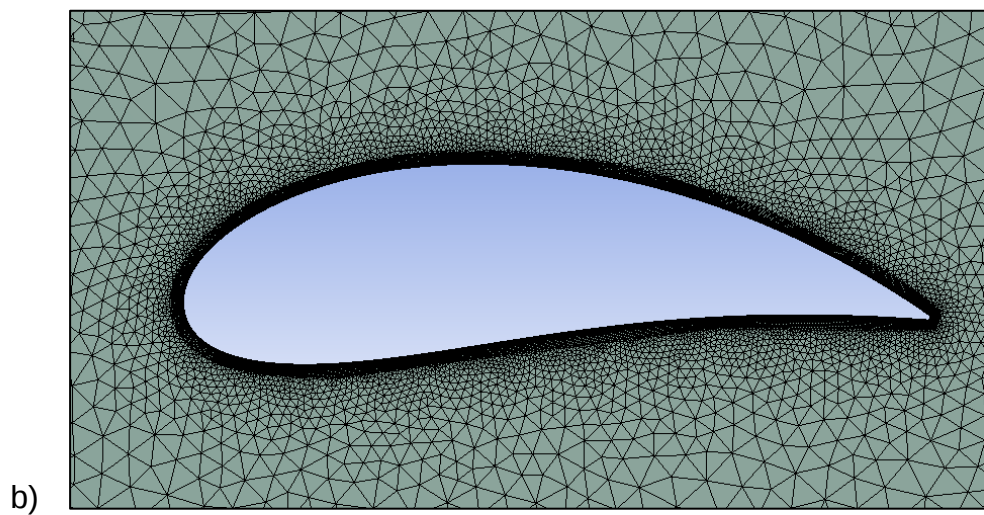
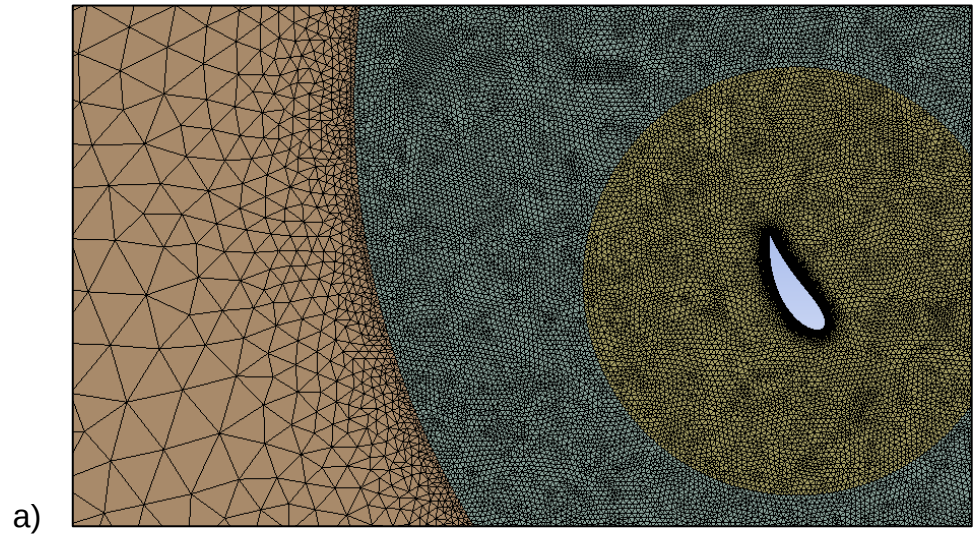
Devido às características inerentes ao escoamento da turbina eólica, a construção da malha computacional exigiu a utilização do modelo de malha deslizante (*Sliding Mesh Model*), sendo este necessário para se capturar corretamente os parâmetros dinâmicos envolvidos na rotação das pás. Neste caso, o método aplicado apresenta resultados mais acurados ao trabalhar com simulações de escoamentos com referências móveis, condições típicas em máquinas rotativas, porém exige uma demanda computacional consideravelmente mais elevada.

A partir disso, através do *software* ANSYS *Meshing*, foi construída uma malha com células triangulares não estruturadas, como apresentado na Figura 12. Conforme previamente exposto na Figura 11, buscou-se manter similares os tamanhos das células presentes entre os domínios fixo e rotativo, de forma a minimizar erros numéricos na interface e controlar o número de Courant, tal qual apresentado na Figura 12a.

Ainda presando pela qualidade da malha, o tamanho do primeiro elemento de malha no perfil foi definido de forma a atender a condição de $y^+ < 1$, sendo esta necessária para satisfazer os critérios sugeridos para o modelo de turbulência utilizado (*Transition SST*), assim como apresentado na Figura 12b.

Por fim, para melhor caracterizar os gradientes sobre o perfil aerodinâmico, foram desenvolvidas camadas de malha prismáticas, conforme indicado na Figura 12c. Dessa forma, obteve-se uma malha com aproximadamente 600.000 elementos.

Figura 12 – Malha computacional: a) Interface entre os domínios estacionário e rotativo, b) Malha ao redor do aerofólio, e c) Elementos prismáticos sobre o perfil.



Fonte: Autoria Própria, 2022.

3.5. Análise de sensibilidade de malha

Para a realização da análise de sensibilidade de malha, foi considerada a metodologia proposta por (CELIK e colab., 2008), conhecida como metodologia *GCI - Grid Convergence Index*. O método consiste em analisar a variação percentual dos valores numéricos da grandeza de interesse (no caso da turbina eólica, o coeficiente de potência (C_p)) para três densidades de malha.

Inicialmente, deve ser definido o tamanho representativo das malhas h . Para cálculos bidimensionais, ele é dado pela Equação (19).

$$h = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Delta A_i) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (19)$$

onde: ΔA_i é a área do i -ésimo elemento da malha, e N é o total de elementos utilizados.

A partir disso, as malhas subsequentes devem estar dispostas de maneira que as Equações (20) e (21) sejam satisfeitas.

$$r_{21} = \left(\frac{h_{\text{malha refinada}}}{h_{\text{malha mediana}}} \right) > 1,3 \quad (20)$$

$$r_{32} = \left(\frac{h_{\text{malha mediana}}}{h_{\text{malha grosseira}}} \right) > 1,3 \quad (21)$$

São então selecionadas três malhas, uma grosseira, uma mediana e uma refinada, de forma que o fator de refinamento r seja maior que 1,3, sendo este valor baseado no empirismo, não em uma definição formal. Selecionadas as malhas, são feitas simulações para o cálculo das variáveis de interesse, sendo neste trabalho considerado o Coeficiente de Potência (C_p) da turbina eólica. Com isso, seguindo os procedimentos analíticos apresentados por (CELIK e colab., 2008) define-se o valor de GCI.

Satisfeito o critério de GCI, a malha intermediária é então selecionada para a continuidade das análises, seguindo para a validação do modelo por meio da

comparação dos resultados numéricos com dados experimentais disponíveis na literatura. É importante ressaltar que se deve realizar o mínimo possível de refinamentos e *offsets* de correção do número de elementos das malhas, uma vez que malhas com elevados elementos demandam grande custo computacional e seu benefício, em termos de exatidão numérica das grandezas calculadas, pode não justificar seu custo.

Para a realização das simulações numéricas necessárias, tanto para a análise de sensibilidade de malha quanto para a validação numérica, foi utilizada uma configuração padrão de turbina *Darrieus*, conforme apresentado na Tabela 3. A configuração em questão é baseada no trabalho desenvolvido por CASTELLI e colab. (2011).

Tabela 3 – Características do modelo utilizado no GCI e na validação.

Parâmetro	Valor
Perfil aerodinâmico	NACA 0021
Corda (c) [mm]	85,8
Diâmetro da turbina (D) [mm]	1030
Solidez (σ)	0,5
Número de pás (N)	3
Velocidade de entrada (U_{∞}) [m/s]	9
Pressão de saída (P) [atm]	1

Fonte: Autoria Própria, 2022.

Na Tabela 4 é apresentada as configurações principais da modelagem numérica utilizadas para as simulações, sendo alguns dos parâmetros discutidos em seções futuras.

Para garantir a robustez dos resultados das simulações para diferentes valores de *time-step* angulares, foram conduzidas duas análises de GCI, uma com *time-step* angular de $0,5^\circ$ e outra com 1° . A partir disso, são apresentadas na Tabela 5 as características das malhas obtidas, sendo o número de elementos das malhas referente ao núcleo rotativo e, na Tabela 6, os erros de discretização calculados para as análises. Para os cálculos de GCI, foi considerado um fator de segurança de 1,25.

Tabela 4 – Configurações principais da simulação numérica.

Parâmetro	Especificação
Modelo de turbulência	<i>Transition SST</i>
Solver	<i>Pressure-based</i>
Propriedades do fluido	Incompressível
Algoritmo de solução	<i>Coupled</i>
<i>Time-step</i> angular	0,5° e 1°
Iterações por <i>time-step</i>	30
Revoluções para convergência	10

Fonte: Autoria Própria, 2022.

Tabela 5 – Características das malhas obtidas para o cálculo do GCI.

Malha	Número de elementos (N)
Refinada (1)	450947
Mediana (2)	262123
Grosseira (3)	152118

Fonte: Autoria Própria, 2022.

Tabela 6 – Erros de discretização.

Parâmetro	<i>Time-step angular</i>	
	0,5°	1°
r_{21}	1,312	1,312
r_{32}	1,313	1,313
Cp_1	0,303	0,299
Cp_2	0,295	0,287
Cp_3	0,184	0,180
GCI_{32} (%)	3,557	5,650

Fonte: Autoria Própria, 2022.

Avaliando os valores de GCI mostrados na Tabela 6, a incerteza numérica na solução entre a malha grosseira e mediana é de 3,56% e 5,65%, para os *time-steps* angulares de 0,5° e 1°, respectivamente. Estes valores são considerados baixos e satisfatórios para os objetivos deste trabalho, sendo assim, pela metodologia GCI, é

justificável a escolha pela utilização da malha de refino mediano para as demais configurações e simulações numéricas do modelo.

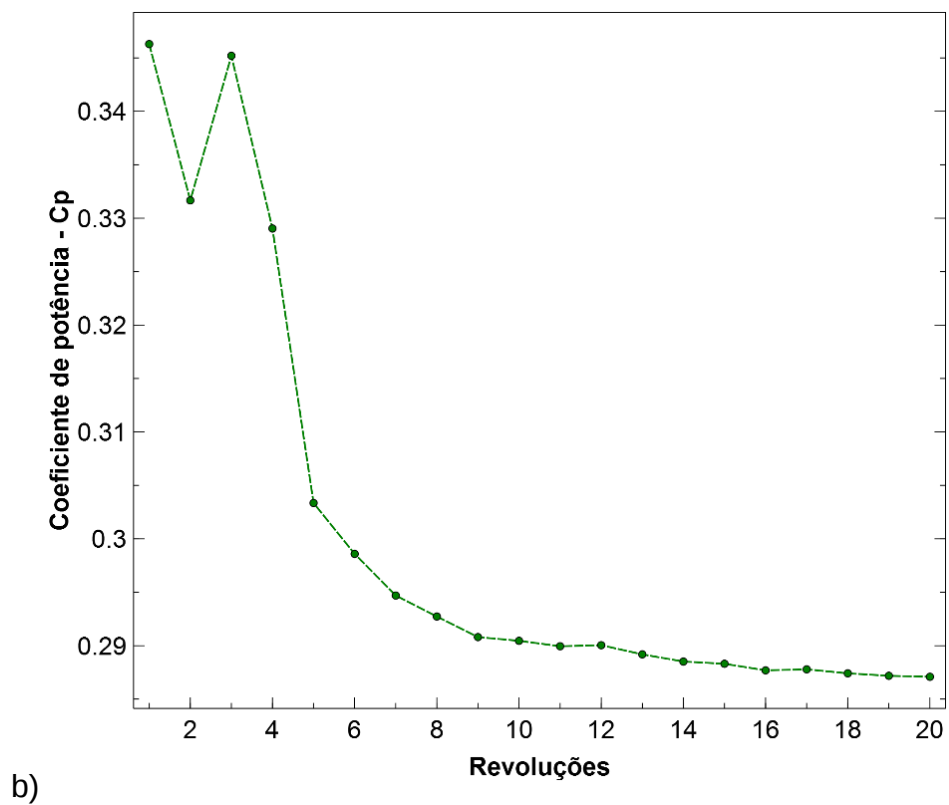
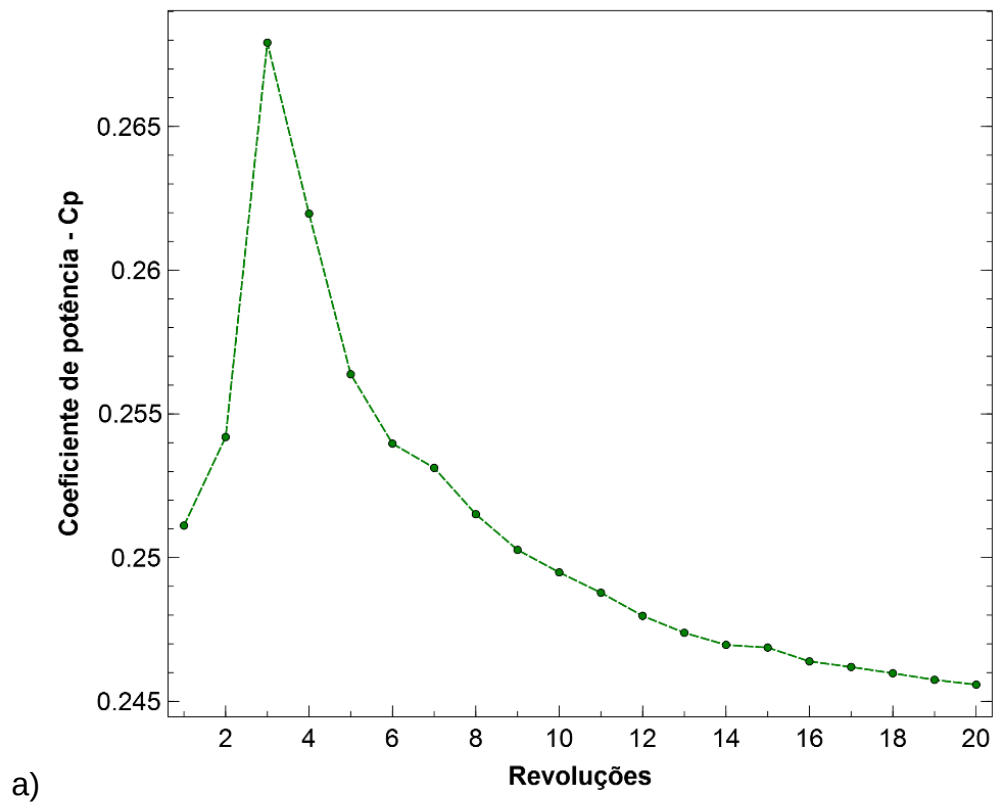
3.6. Convergência por número de revoluções

Além do alto tempo de processamento das simulações transitórias, que se deve ao fato da determinação do coeficiente de potência (C_p) da turbina eólica necessitar que o sistema atinja uma condição de estabilização, podendo ser necessárias mais de 30 revoluções (CASTELLI e colab., 2011), o próprio processo de otimização demanda uma série de simulações. Com isso, o tempo requerido para executar uma única simulação e, conseqüentemente, o tempo total do processo passa a ser uma preocupação. Foi então avaliada a convergência por número de revoluções considerando dois modelos de turbulência ($k-\omega$ SST e *Transition* SST). Essa avaliação foi feita a partir dos mesmos dados utilizados na análise do GCI, sendo os resultados apresentados na Figura 13.

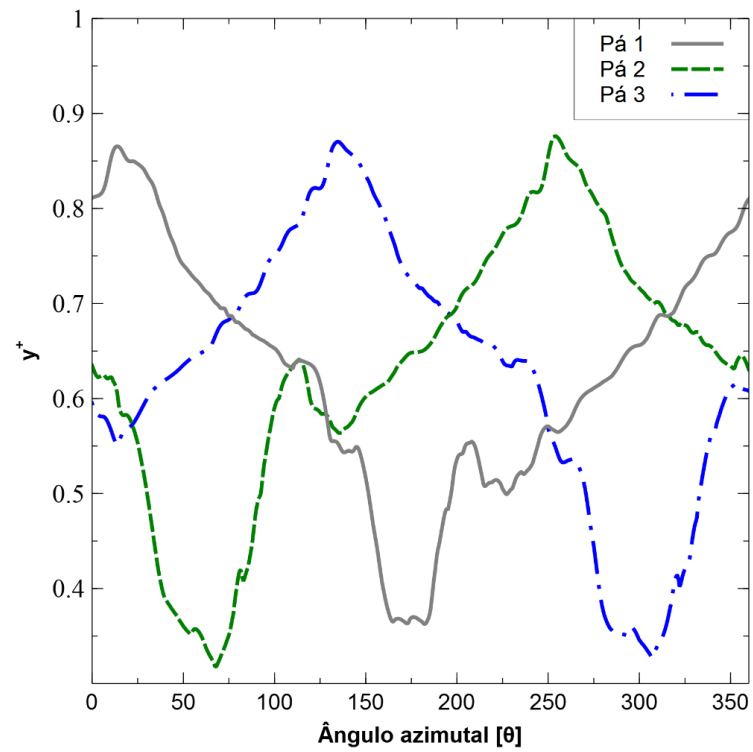
Comparando os dois modelos apresentados na Figura 13, observa-se que o *Transition* SST converge com um menor número de revoluções, demandando, assim, menor recurso computacional. Além de convergir mais rapidamente, o modelo em questão também conduz a valores numéricos mais próximos aos experimentais, conforme será apresentado e discutido na Tabela 7 referente à validação numérica, sendo a opção mais adequada para conduzir o processo de otimização.

Como forma de reafirmar a robustez da solução numérica obtida utilizando o modelo de turbulência *Transition* SST, a Figura 14 atesta o atendimento ao critério de y^+ monitorado em cada uma das três pás da turbina, enquanto a Figura 15 mostra o número de Courant monitorado na interface deslizante, sendo ambas para a última revolução após a convergência.

Figura 13 – Convergência do C_p em função do número de revoluções, a) $k - \omega$ SST, e b) *Transition* SST.

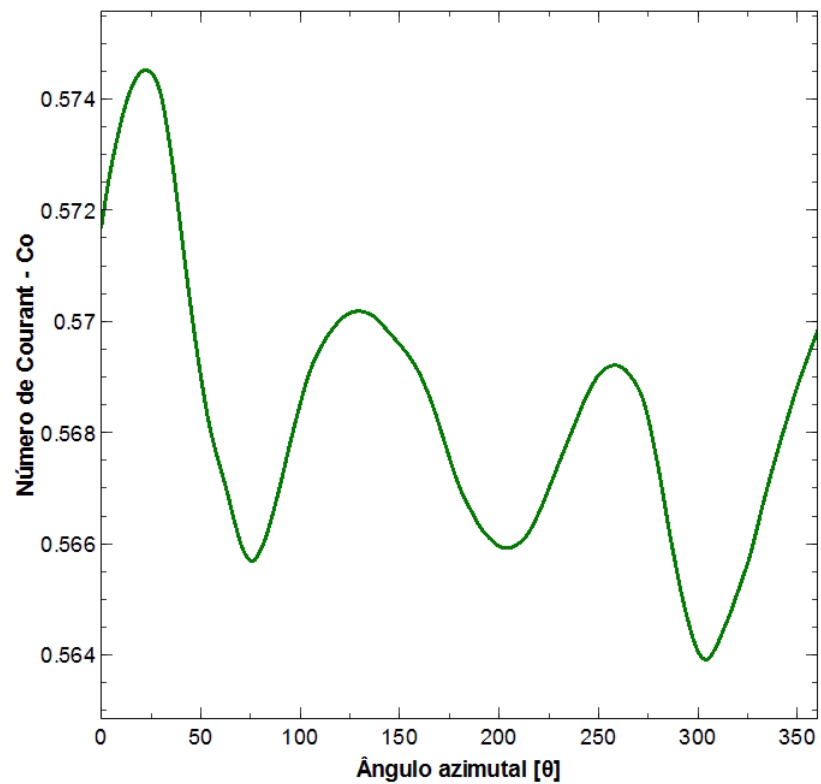


Fonte: Autoria Própria, 2022.

Figura 14 – Critério de y^+ nas pás da turbina para a última revolução

Fonte: Autoria Própria, 2022.

Figura 15 – Número de Courant na interface deslizante para a última revolução



Fonte: Autoria Própria, 2022.

3.7. Análise do *time-step* angular

De forma a aumentar a robustez do modelo numérico e se obter resultados mais acurados, foi estudada também a influência do *time-step* angular na determinação do coeficiente de potência da turbina. O *time-step* angular diz respeito à discretização temporal da simulação. Nesse sentido, ao serem fixados os parâmetros da turbina e estabelecida a velocidade de ponta de pá, é definida a velocidade de rotação da turbina. Ao se estipular o *time-step* angular como 1° , por exemplo, os passos temporais da simulação são discretizados em função do tempo que a turbina leva para percorrer um grau em sua posição azimutal, sendo então uma revolução completa caracterizada por 360 *time-steps*.

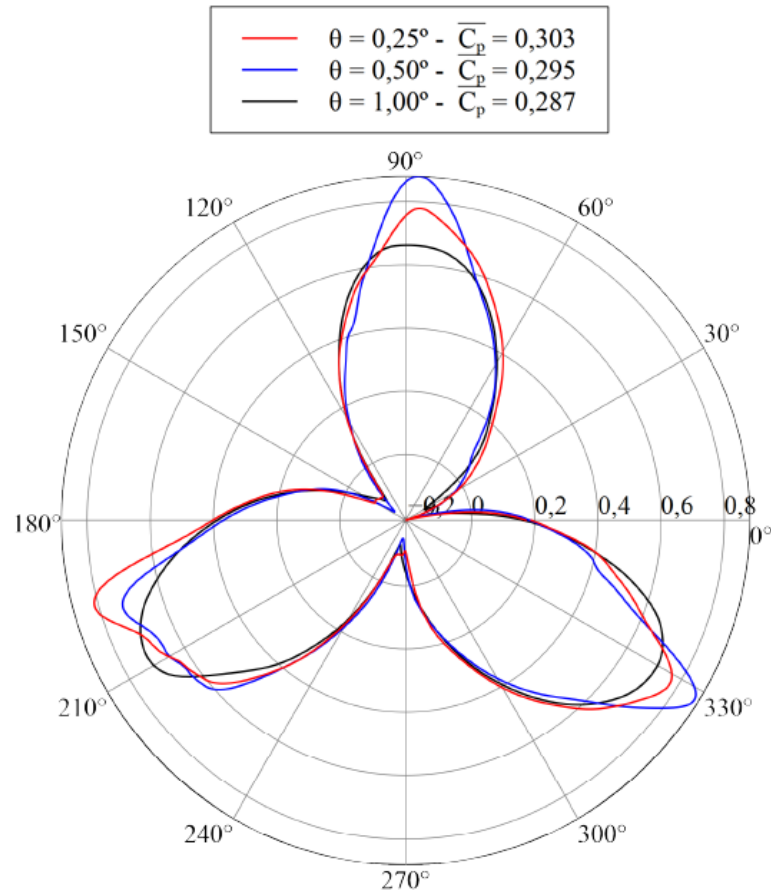
Assim, observa-se que quanto menor o *time-step* angular, maior o refino do modelo, sendo cada vez menores os passos da simulação e mais próximos do fenômeno físico real. Entretanto, a diminuição do *time-step* angular impacta consideravelmente no tempo de simulação, visto que para cada posição azimutal que a turbina assume é necessária uma série de subiterações para se convergir a solução.

Para quantificar a variação causada pela mudança deste parâmetro, foram então realizadas simulações com *time-steps* angulares menores ($0,5^\circ$ e $0,25^\circ$). As simulações foram feitas com os mesmos parâmetros utilizados para a análise de sensibilidade de malha, alterando-se somente o parâmetro de interesse. A Figura 16 apresenta os resultados obtidos para o coeficiente de potência (C_p) considerando a última revolução (após a convergência).

A partir dos resultados expostos, é visível que a redução do *time-step* aproxima consideravelmente os resultados da solução numérica dos valores experimentais ($C_p = 0,312$), posteriormente apresentados para a validação numérica. Entretanto, a escolha do *time-step* a ser utilizado deve levar em conta ainda o recurso computacional disponível, o tempo necessário para a realização de cada simulação e a quantidade total de simulações para a otimização. Como, foram geradas 50 amostras para o treinamento das superfícies de resposta, conforme apresentado em seções subsequentes, definiu-se um valor de *time-step* angular de $0,5^\circ$ a ser utilizado nas simulações numéricas, que consumiram um tempo aproximado de 2 dias cada. Com isso, teve-se um tempo suficiente para os objetivos

deste trabalho, ao passo em que foi mantida uma configuração com acuracidade satisfatória.

Figura 16 – Coeficiente de potência para análise do *time-step* angular.



Fonte: Autoria Própria, 2022.

3.8. Validação numérica

O trabalho de validação da modelagem numérica proposta foi feito comparando-se dados obtidos por meio de simulação numérica considerando os dois modelos de turbulência estudados ($k-\omega$ SST e *Transition* SST) com dados experimentais (CASTELLI e colab., 2011) amplamente difundidos na comunidade acadêmica.

As características da turbina da qual os dados experimentais foram retirados foram previamente apresentadas na Tabela 3. Basicamente, trata-se de medições em um túnel de vento, considerando uma configuração com uma turbina

Darrieus de lâminas verticais de alumínio e fibra de carbono, com perfil NACA 0021 e 3 pás.

Conforme apresentado anteriormente, as simulações consideraram um *time-step* angular de $0,5^\circ$, e, seguindo a análise de GCI realizada, foi utilizada a configuração de malha com refino mediano. Sendo o objetivo do projeto em questão a otimização do perfil NACA 4-dígitos, foi então determinada uma condição de operação padrão para a turbina. Nesse sentido, já tendo sido definidos o diâmetro do rotor e a velocidade de incidência do vento, a rotação da turbina foi fixada para manter uma velocidade de ponta de pá (TSR) característica. Com isso, o valor de TSR escolhido se baseou nos dados experimentais disponíveis, que indicam um maior coeficiente de potência para um TSR de 2,63.

Dessa forma, a validação do modelo computacional foi conduzida nessa condição específica de operação, de forma a direcionar a faixa de trabalho para os parâmetros de interesse da otimização. Dessa forma, a Tabela 7 apresenta os resultados obtidos no processo de validação numérica do modelo.

Tabela 7 – Validação numérica para TSR 2,63.

$C_{p_{experimental}}$	$C_{p_{numérico}}$	$C_{p_{numérico}}$	Erro %	Erro %
	(k – ω SST)	(<i>Transition</i> SST)	$C_{p_{numérico}}$ (k – ω SST)	$C_{p_{numérico}}$ (<i>Transition</i> SST)
0,312	0,246	0,295	21,15	8,01

Fonte: Autoria Própria, 2022.

Tratando-se de uma simulação numérica bidimensional, ao se analisar os erros percentuais relativos aos dados experimentais, pode-se concluir que os resultados obtidos estão bem postados em relação à experimentação, e, portanto, a modelagem numérica proposta para o projeto é satisfatória. Ao atender os critérios de y^+ , Co e executar uma análise de GCI satisfatória, os resultados da simulação numérica tornam-se suficientemente precisos para a aplicação de interesse.

Ainda analisando os resultados apresentados na Tabela 7, observa-se que o modelo de turbulência *Transition* SST conduz a resultados numéricos mais próximos aos valores experimentais do que o modelo k – ω SST. Entretanto, considerando a necessidade de simular diversas configurações durante o processo de otimização, foi feita uma análise de convergência por número de revoluções para cada um dos

modelos de turbulência, para se verificar qual deles demanda menor tempo de simulação, ou seja, qual apresenta menor custo computacional;

A Tabela 8 apresenta uma síntese das configurações finais utilizadas nas simulações para o processo de otimização, contendo os pontos discutidos e analisados nos processos de GCI e validação numérica.

Tabela 8 – Configurações finais para as simulações numéricas.

Parâmetro	Especificação
Modelo de turbulência	<i>Transition SST</i>
Solver	<i>Pressure-based</i>
Propriedades do fluido	Incompressível
Algoritmo de solução p-v	<i>Coupled</i>
<i>Time-step</i> angular	0,5°
Iterações por <i>time-step</i>	30
Revoluções para convergência	10
Número de casos para Superfície de Resposta	30

Fonte: Autoria Própria, 2022.

3.9. *Design of Experiment* (DoE)

Assim como anteriormente discutido, o alto tempo de simulação envolvido no projeto faz com que a abordagem de otimização direta seja proibitiva. Com isso, a utilização de técnicas de metamodelagem apresenta-se como solução para reduzir o tempo de processamento. Dessa forma, os parâmetros de entrada referentes aos dígitos do perfil NACA e os respectivos resultados de C_p foram obtidos a partir da simulação numérica de uma amostragem inicial (*Design of Experiment – DoE*), gerando dados de entrada/saída para o posterior treinamento e teste dos algoritmos de metamodelagem e submissão da superfície de resposta escolhida ao método de otimização.

Essencialmente, o DoE consiste em uma ferramenta estatística capaz de distribuir as variáveis de entrada em um campo amostral de maneira a permitir que se identifique seus efeitos principais e a maneira como interagem entre si (NAZEMIAN e colab., 2019). Com isso, é possível se trabalhar com restrições de

recursos (no caso, recursos computacionais) mantendo a significância dos resultados planejados.

São vários os tipos de DoEs disponíveis para se determinar a distribuição das variáveis de entrada no espaço amostral. Para este projeto, foi utilizado o método *Optimal Space-Filling Design* (OSF), conhecido também por *Uniform Latin Hypercube Sampling* (ULHS).

3.9.1. Método *Optimal Space-Filling Design* (OSF)

O método de amostragem OSF consiste em uma otimização do método LHS (*Latin Hypercube*). Assim como no LHS, o espaço amostral é dividido de forma que nenhum ponto compartilhe uma linha ou coluna do espaço de *design* com qualquer outro ponto, porém é garantido ainda maximizar a distância entre os pontos e gerar uma distribuição espacial mais uniforme (ANSYS, 2018).

A escolha deste método se deu pelo mesmo representar uma escolha útil para casos com tempo computacional limitado, ao passo que o número de pontos da amostra pode ser especificado mantendo a qualidade da distribuição. Além disso, ele possui uma boa capacidade para preencher os espaços de *design*, sendo apropriado para o levantamento de superfícies de resposta que utilizam técnicas de metamodelagem mais complexas, como por exemplo: Kriging, Regressão Não-Paramétrica ou Redes Neurais (ANSYS, 2018). A partir disso, a Tabela 9 mostra os parâmetros referentes ao perfil NACA utilizados para a obtenção do DoE, sendo destacada a faixa operacional para cada um deles.

Tabela 9 – Parâmetros para a elaboração do DoE.

Parâmetro	Faixa operacional	Incremento
Arqueamento (m)	1 a 9	1
Posição do arqueamento (p)	1 a 9	1
Espessura do perfil (t)	5 a 40	1

Fonte: Autoria Própria, 2022.

3.9.2. Técnicas de Metamodelagem

As técnicas de metamodelagem, também conhecidas como superfícies de resposta, correspondem a aproximações utilizadas para substituir soluções exatas, como forma de representar simulações e processamentos complexos e obter modelos mais simples e de processamento rápido. A metodologia proposta envolve o treinamento de uma função a partir de um conjunto de dados amostrais considerando as informações de entrada e suas respectivas saídas, de forma que represente o comportamento do modelo original (SIMPSON e colab., 2001).

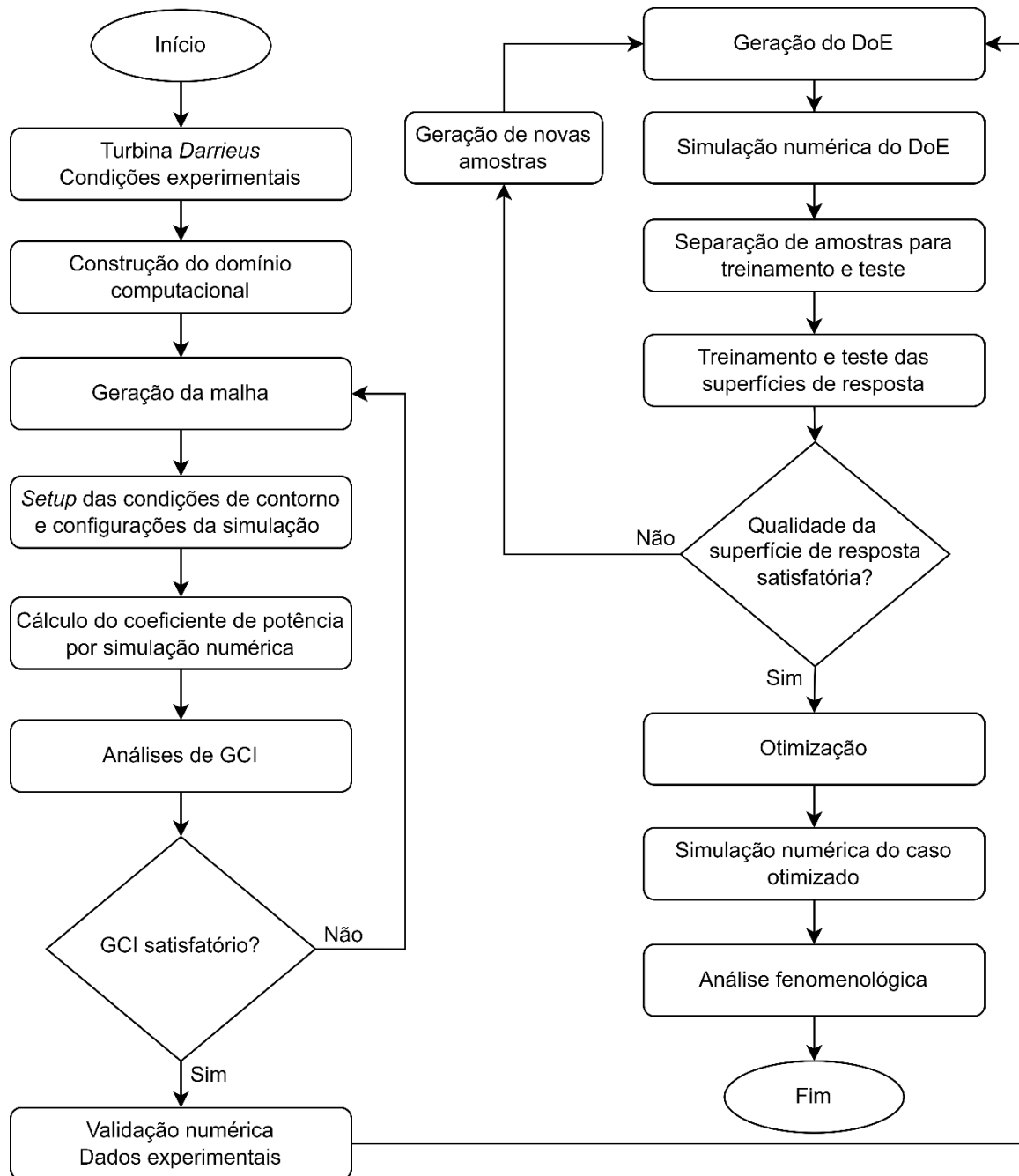
São várias as possibilidades de utilização dos metamodelos, cada qual possuindo características específicas e se adequando a um problema característico. De maneira geral, a metamodelagem se baseia na adequação do sistema aproximado à função de interesse, sendo então o metamodelo “treinado” para fornecer respostas para a função que coincidam com os parâmetros de entrada e saída propostos (JIN e colab., 2001).

Para este trabalho, metamodelos como *Neural Networking*, *Radial Basis Function* e *Kriging* foram avaliados. Diferente da otimização direta, que requer um grande conjunto de simulações para avaliar diretamente a função objetivo e as restrições impostas ao modelo, abordagens envolvendo metamodelos utilizam amostras de forma a extrapolar o fenômeno observado, requerendo que suas aplicações sejam extremamente criteriosas e robustas para gerar resultados significativos (SALVIANO e colab., 2015).

Como exemplo da metodologia proposta, a Figura 17 mostra o fluxograma para uma otimização a partir da Metodologia de Superfície de Resposta (*Response Surface Methodology* - RSM) utilizado no trabalho.

Neste trabalho, para a geração do DoE, treinamento e teste dos metamodelos, assim como para a submissão das superfícies de respostas ao processo de otimização foi utilizado o *software* modeFRONTIER.

Figura 17 - Fluxograma aplicado na abordagem de otimização indireta por superfície de resposta.



Fonte: Adaptado de (SALVIANO e colab., 2015).

4. RESULTADOS

4.1. Definição do DoE

Utilizando-se do método OSF, foi gerado inicialmente um DoE contendo 50 amostras. A configuração adotada para a turbina na realização das simulações é apresentada na Tabela 10.

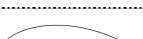
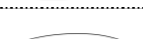
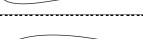
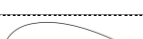
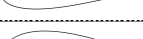
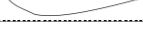
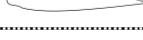
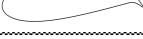
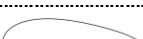
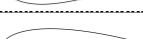
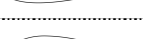
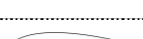
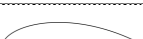
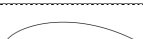
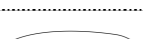
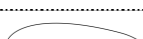
Tabela 10 – Configuração da turbina para a simulação numérica do DoE.

Parâmetro	Valor
Corda (c) [mm]	137
Diâmetro da turbina (D) [mm]	1030
Solidez (σ)	0,8
Número de pás (N)	3
Velocidade de entrada (U_{∞}) [m/s]	9
Pressão de saída (P) [atm]	1

Fonte: Autoria Própria, 2022.

As amostras foram então submetidas ao modelo numérico proposto, sendo simulados os valores do coeficiente de potência para cada um dos casos. As amostras geradas, assim como os respectivos valores de C_p calculados numericamente são apresentados na Figura 18.

Figura 18 – DoE gerado e respectivos valores simulados de C_p .

m	p	t	Perfil NACA	C_p	m	p	t	Perfil NACA	C_p
5	8	05		-0,127	1	3	31		0,277
2	5	37		0,112	3	4	13		0,079
5	6	18		0,328	8	2	37		-0,062
9	5	25		0,302	9	6	08		-0,141
4	9	24		0,278	6	2	39		-0,002
1	2	35		0,214	4	1	19		0,087
6	9	26		0,188	8	3	30		0,325
6	7	17		0,296	7	7	10		-0,026
7	7	30		0,192	8	6	28		0,249
4	7	40		-0,134	1	5	16		0,34
5	1	21		0,092	2	9	15		0,327
9	1	11		-0,264	7	4	29		0,298
2	8	33		0,199	2	8	11		0,055
3	9	24		0,303	1	2	16		0,315
9	3	21		0,11	3	9	26		0,267
8	6	26		0,271	6	2	13		-0,128
2	1	40		0,249	1	2	18		0,338
5	9	17		0,243	8	4	34		0,241
6	4	27		0,349	5	9	38		0,039
9	8	12		-0,119	4	1	6		-0,232
2	7	35		0,130	7	3	36		0,294
7	5	20		0,333	9	5	17		0,114
8	8	16		0,152	4	8	28		0,259
5	2	33		0,276	8	6	12		-0,038
8	5	6		-0,169	6	7	24		0,289

Fonte: Autoria Própria, 2022.

De forma a verificar a validade estatística do DoE gerado, é utilizada uma matriz de dispersão dos parâmetros de entrada no espaço amostral, conforme observado na Figura 19.

Figura 19 – Matriz de dispersão dos parâmetros de entrada (m, p, t).



Fonte: Autoria Própria, 2022.

Abaixo da diagonal principal da Figura 19 são apresentadas as correlações para cada par de variáveis de entrada. Estes valores podem variar entre -1 e +1, sendo que para resultados próximos de +1 as variáveis possuem forte correlação direta, para resultados próximos de -1 possuem forte correlação inversa e, para resultados próximos a 0, são pouco correlacionados. Como o método proposto garante uma distribuição uniforme no espaço amostral, os resultados obtidos indicam que as variáveis foram alocadas de forma a apresentarem baixa correlação entre si.

4.2. Treinamento e teste dos modelos de metamodelagem (RSM)

Com os resultados numéricos obtidos, foram treinadas superfícies de resposta utilizando-se de diversos metamodelos, buscando a configuração com melhor representatividade do fenômeno estudado, ou seja, aquela que fornecesse uma função que melhor adequasse os parâmetros de entrada (dígitos do perfil NACA) ao parâmetro de saída (coeficiente de potência). Para tanto, o DoE simulado foi subdividido, sendo separada uma parcela das amostras para o treinamento das superfícies e outra para os testes de validação (cerca de 10% do DoE utilizado para validação).

Foram então treinadas superfícies de resposta com métodos distintos, sendo utilizados e avaliados modelos de Rede Neural, Funções de Base Radial (*Spline* poli harmônica, Multiquadrática Inversa, Gaussiano) *Kriging* (Exponencial, Gaussiano, Matérn 5/2, Matérn 3/2), SDV Polinomial, Regressão *Stepwise*, Interpolação de Shepard e vários processos Gaussianos anisotrópicos e isotrópicos (Gaussiano, Exponencial, Matérn 5/2, Matérn 3/2, Racinal Quadrático).

Para se quantificar a qualidade das superfícies de respostas treinadas, foram utilizadas as amostras separadas para os testes de validação. Nesse aspecto, foram comparados estatisticamente os casos simulados para os testes com os valores virtuais obtidos por meio das RSMs, sendo avaliados os valores residuais alcançados (erros máximos absolutos, erros médios absolutos, regressão, erros máximos relativos, erros médios relativos, erros médios, e erros normalizados) e a distância entre os pontos reais (modelo numérico) e virtuais (RSM).

Os dados obtidos referentes aos valores residuais estão dispostos na Tabela 11, sendo filtradas as superfícies de resposta melhores resultados.

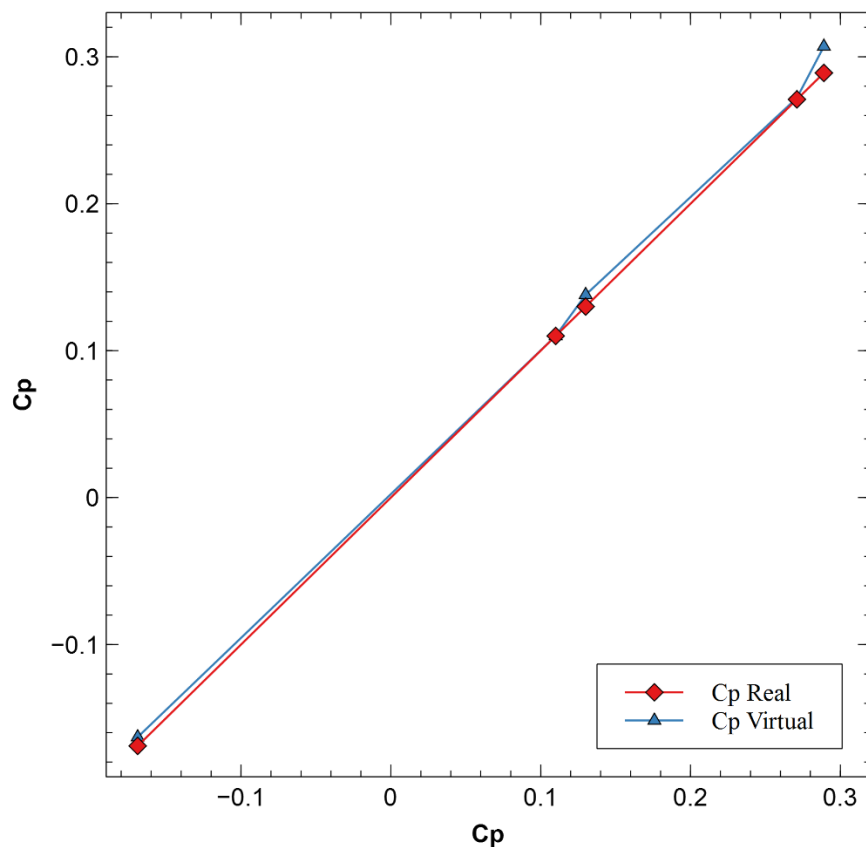
Tabela 11 – Valores residuais das superfícies de resposta com melhores resultados

Modelo	Erro Médio	Erro Máximo	Regressão
Gaussiano Exponencial Isotrópico	3,21 %	6,08 %	0,997
Kriging Exponencial Anisotrópico	3,27 %	6,35 %	0,997
Função de Base Radial Multiquadrática	4,06 %	9,37 %	0,994
Rede Neural	6,46 %	16,52 %	0,998

Fonte: Autoria Própria, 2022.

Analisando-se os resultados expressos na Tabela 11, é possível verificar que as RSMs treinadas se aproximam dos valores simulados, gerando valores virtuais de C_p próximos aos valores reais simulados numericamente. Dentre os metamodelos testados, o que melhor representa o conjunto de amostras de validação corresponde ao Gaussiano Exponencial Isotrópico, apresentando valores de erro médio, erro máximo e regressão de 3,21%, 6,08% e 0,997, respectivamente. A distância entre os pontos virtuais da RSM e os pontos reais obtidos por simulação numérica é apresentada na Figura 20.

Figura 20 - Distância RSM (Gaussiano Exponencial Isotrópico).



Fonte: Autoria Própria, 2022.

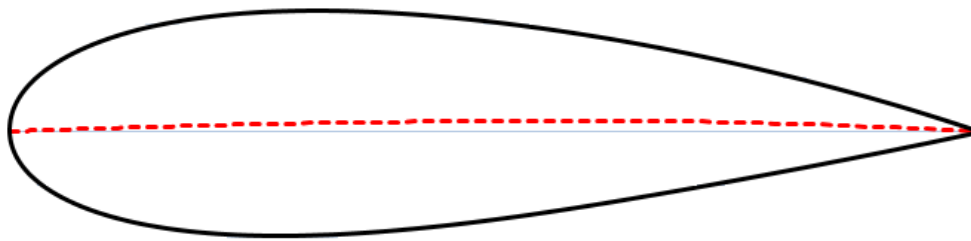
De acordo com a literatura, para que uma superfície de resposta seja submetida ao processo de otimização com robustez é preciso que os valores dos parâmetros de qualidade levantados sejam inferiores a 10% para o erro máximo e 5% para o erro médio, e o mais próximo possível de 1 para a regressão (FORRESTER e colab., 2008). A partir disso, os resultados obtidos para a superfície

de resposta treinada demonstram serem suficientes para dar sequência ao processo de otimização.

4.3. Otimização

Para a realização da otimização foi utilizado o Algoritmo Genético NSGA-II com o tamanho da população variável. A RSM de melhor qualidade treinada (Modelo Gaussiano Exponencial Isotrópico) foi submetida ao algoritmo de otimização, retornando o perfil otimizado NACA 1621, perfil levemente arqueado conforme ilustrado na Figura 21.

Figura 21 – Perfil otimizado NACA 1621



Fonte: Autoria Própria, 2022

Como forma de analisar os resultados obtidos, foi construída a Tabela 12, que contém os valores de coeficiente de potência para alguns perfis de interesse nas configurações adotadas, sendo apresentados os valores reais (obtidos por meio de simulação numérica) e virtuais (obtidos através da RSM treinada).

Tabela 12 – Valores de C_p reais e virtuais para o conjunto de perfis NACA de referência.

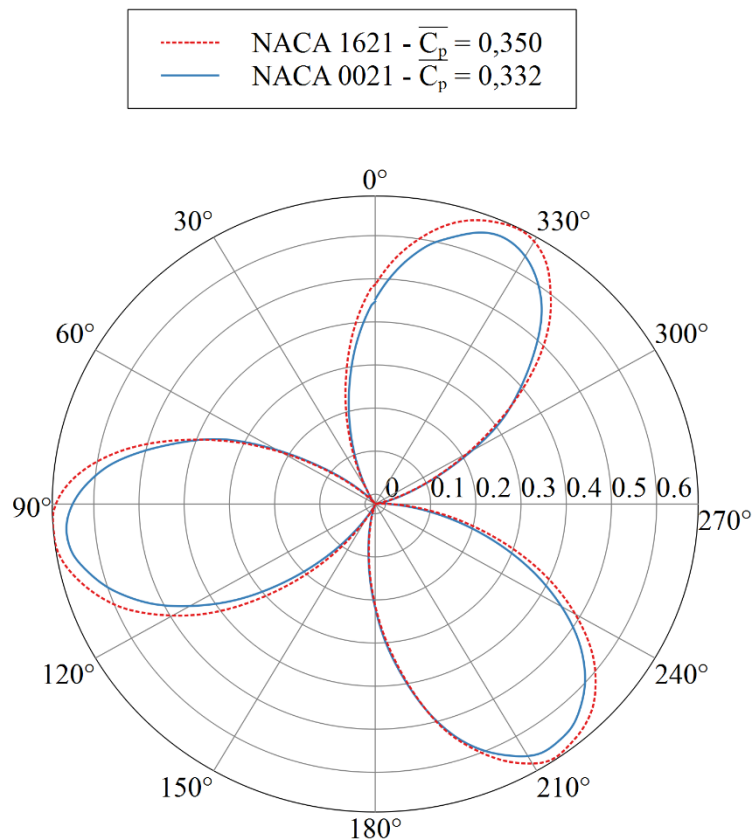
Perfil NACA	C_p real	C_p virtual	Erro (%)
0021 (corda 85,8 mm)	0,295	-	-
0021 (corda 137 mm)	0,332	-	-
1621 (corda 137 mm)	0,350	0,404	15,43

Fonte: Autoria Própria, 2022

A Tabela 12 traz como referência o perfil NACA 0021, amplamente utilizado nos estudos envolvendo turbinas eólicas do tipo *Darrieus*. Como a faixa de operação estudada não compreende perfis simétricos, a superfície de resposta não apresenta valores de C_p virtual para este perfil.

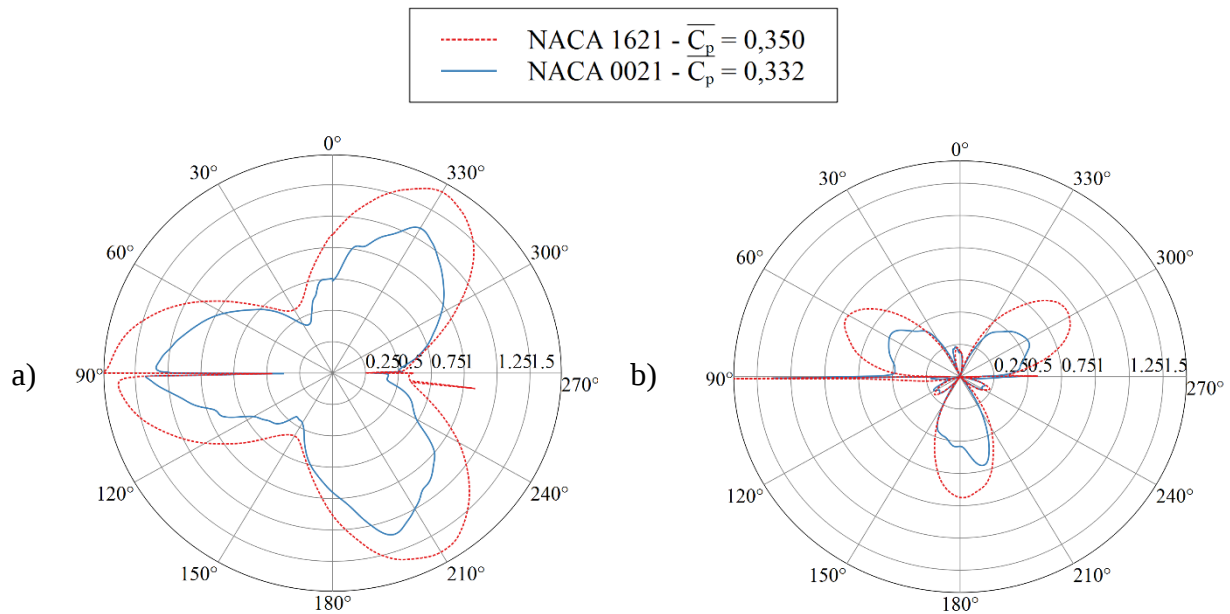
Analisando o coeficiente de potência real, o perfil apontado pelo método de otimização apresenta um ganho aproximado de 5,42% em relação à referência (considerando a corda de 137 mm), e um ganho aproximado de 18,64% em relação à referência usada para validação do modelo (corda de 85,8 mm). Esse incremento no valor do coeficiente de potência pode ser melhor observado através da Figura 22, que ilustra o comportamento da curva de C_p considerando a última rotação da turbina para o perfil otimizado e para o perfil de referência. O comparativo entre o comportamento aerodinâmico dos perfis é apresentado na Figura 23.

Figura 22 – Comparação entre os coeficientes de potência (C_p) do perfil otimizado e do perfil de referência para a configuração de turbina analisada (Tabela 10).



Fonte: Autoria Própria, 2022

Figura 23 – Comparativo entre o comportamento aerodinâmico do perfil otimizado e do perfil de referência. a) Coeficiente de sustentação (C_l) e b) Coeficiente de arrasto (C_d)



Fonte: Autoria Própria, 2022

Embora haja um ganho considerável no coeficiente de potência obtido para o perfil otimizado, o valor virtual calculado pela superfície de resposta apresentou um erro na ordem de 15,43%, conforme descrito na Tabela 12. Este ponto indica que, apesar da qualidade obtida para a superfície de resposta treinada estar dentro do proposto pela literatura, ainda é necessário aumentar o tamanho da amostra de forma que a mesma seja capaz de gerar uma RSM suficientemente precisa para capturar adequadamente os fenômenos dinâmicos e os extrapolar para toda a faixa operacional analisada. O erro referente ao valor virtual de C_p pode ser relacionado, assim como exposto na Figura 20, à característica da RSM selecionada em exceder sua estimativa para os valores mais elevados de C_p , os quais caracterizam a região alvo da otimização.

Como os fenômenos físicos envolvidos na variação do perfil aerodinâmico têm um alto grau de complexidade, a obtenção do único parâmetro de saída em análise (C_p) é fortemente influenciada por todo o escoamento que se desenvolve através da turbina, ao passo em que pequenas mudanças de geometria podem

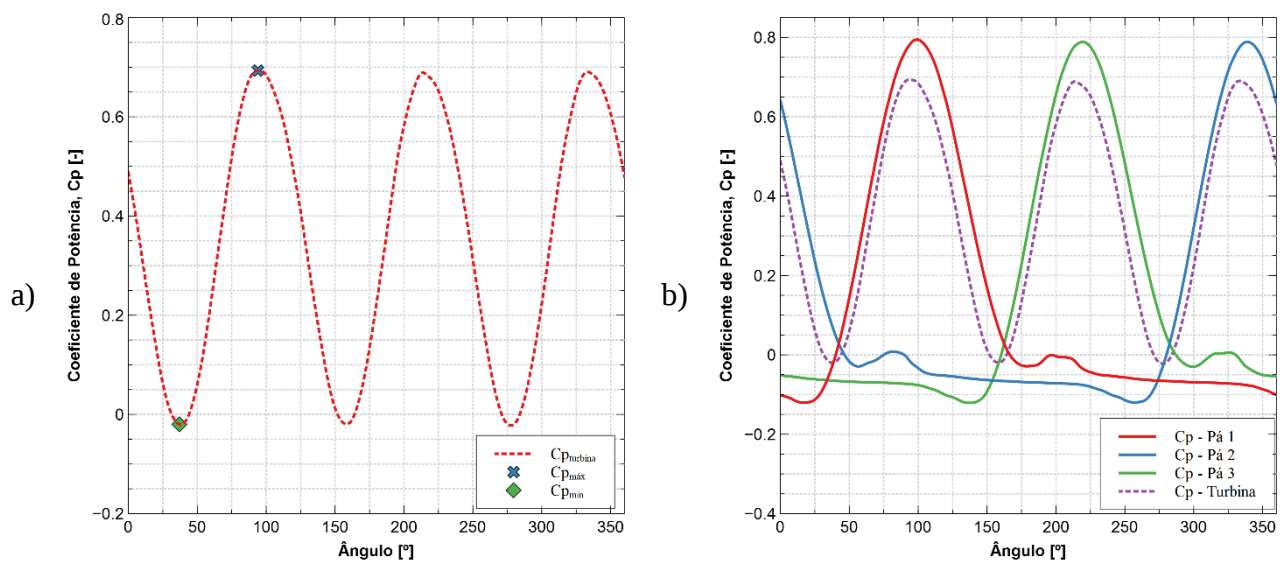
impactar significativamente nos coeficientes aerodinâmicos de sustentação e arrasto, e, conseqüentemente, no desempenho da turbina como um todo.

Apesar disso, a qualidade da RSM treinada e os resultados dos perfis assimétricos indicam que, para esse conjunto de perfis, a superfície de resposta é capaz de prever de forma consistente o coeficiente de potência, possibilitando a obtenção de um perfil com melhor desempenho que o perfil de referência.

4.4. Análise física do perfil

Sendo o perfil NACA 1621 àquele com melhores resultados em termos do coeficiente de potência, foi realizada uma análise física dos parâmetros envolvidos em seu escoamento. Primeiramente são apresentados mais detalhadamente os resultados de C_p obtidos por meio da simulação numérica, permitindo uma visualização mais clara do comportamento da turbina eólica em sua última rotação e da contribuição individual de cada uma das pás em sua composição, tal qual apresentado na Figura 24.

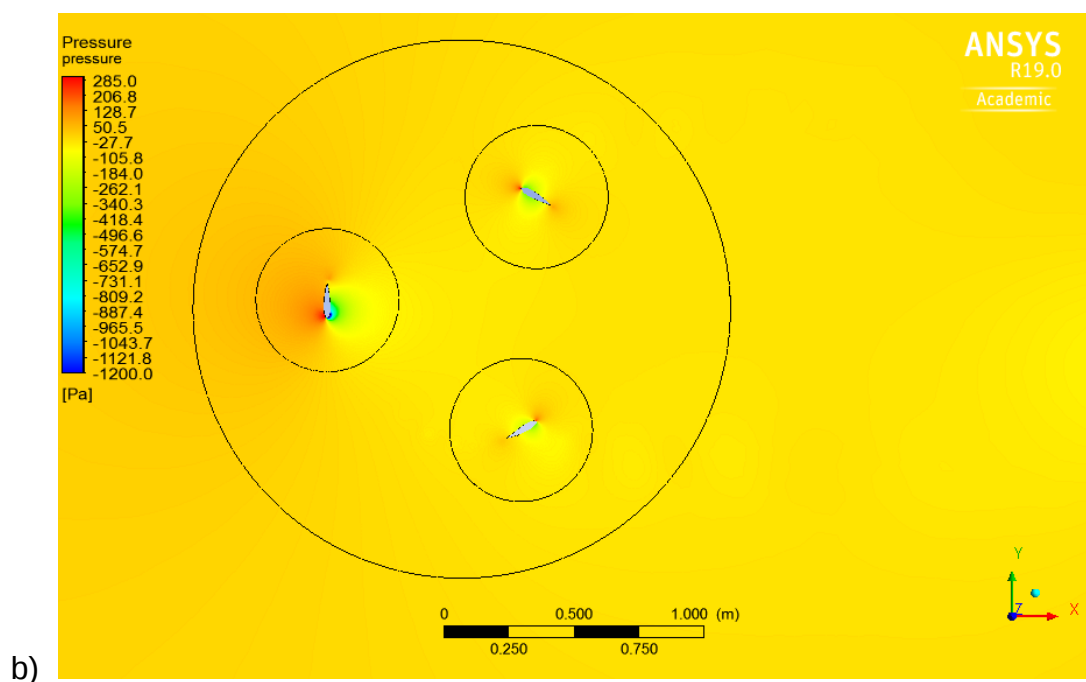
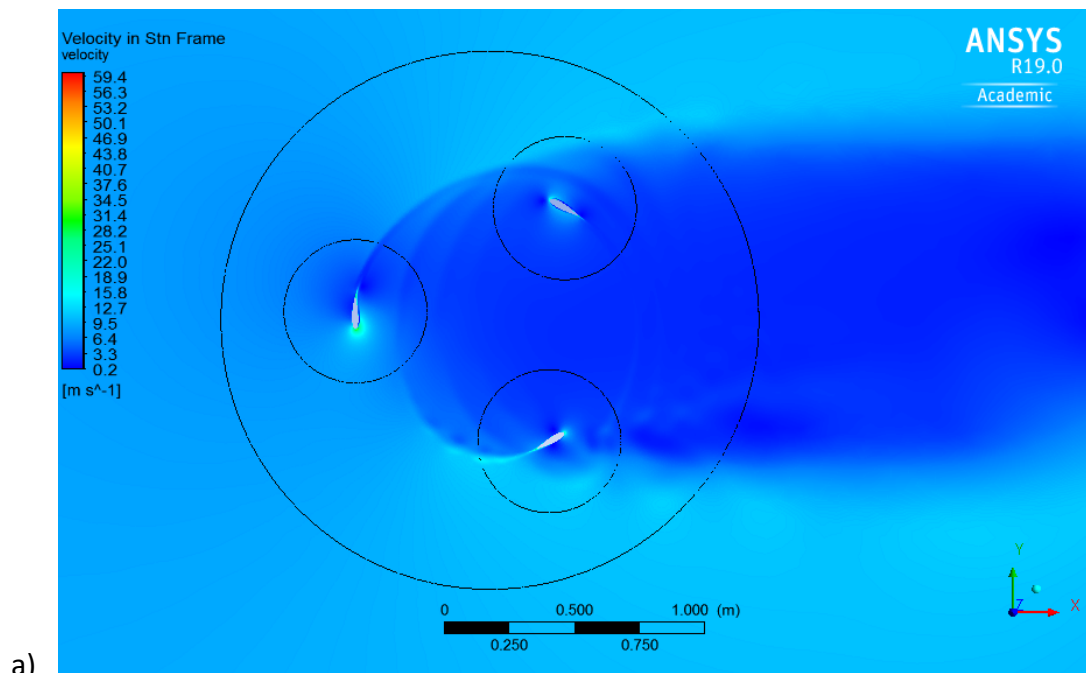
Figura 24 – Coeficiente de Potência a) da turbina e b) de cada pá isolada (perfil NACA 1621) para última rotação.



Fonte: Autoria Própria, 2022

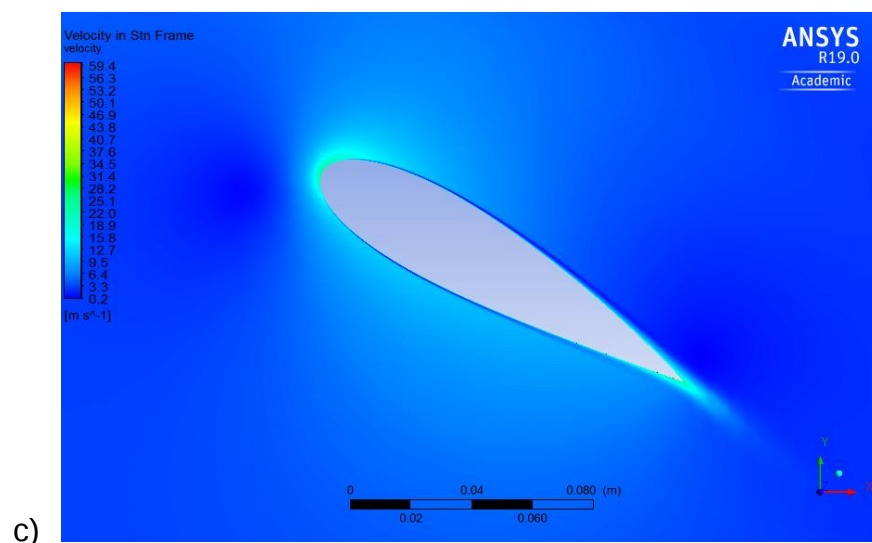
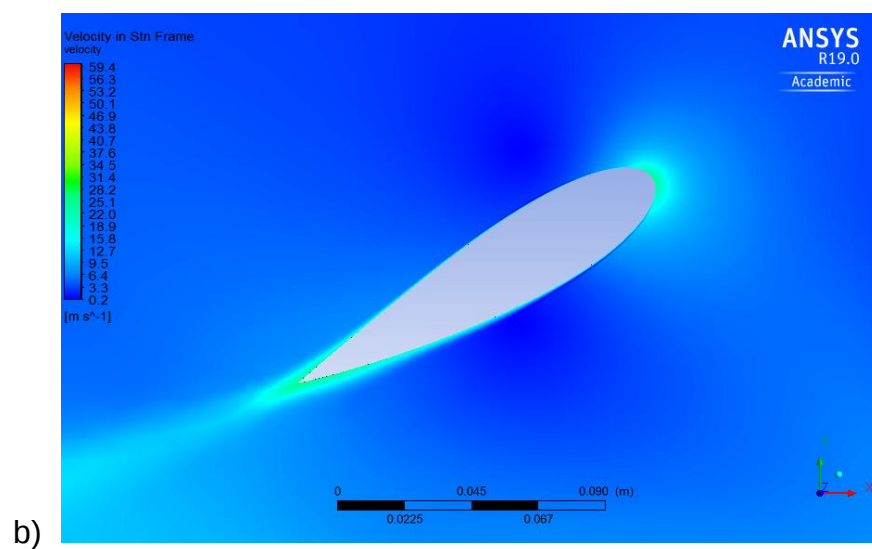
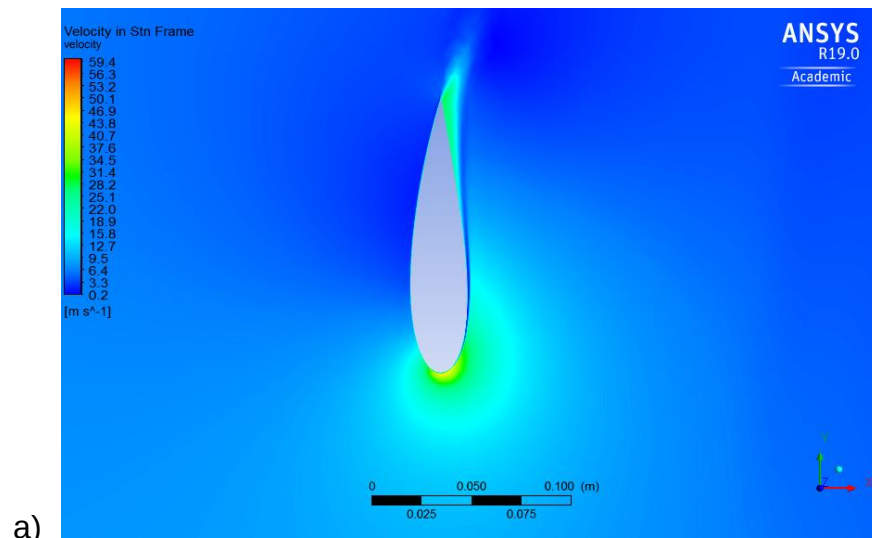
Com base nos ângulos azimutais de máximo e mínimo coeficiente de potência (destacados na Figura 24a) foram extraídos campos de velocidade e pressão que são apresentados nas Figura 25, Figura 26 e Figura 27 para o ângulo de 93° (máximo C_p) e nas Figura 28, Figura 29 e Figura 30 para o ângulo de 38° (mínimo C_p).

Figura 25 – Campo a) de velocidade e b) de pressão da turbina para o ângulo azimutal com maior C_p (93°) – Perfil NACA 1621



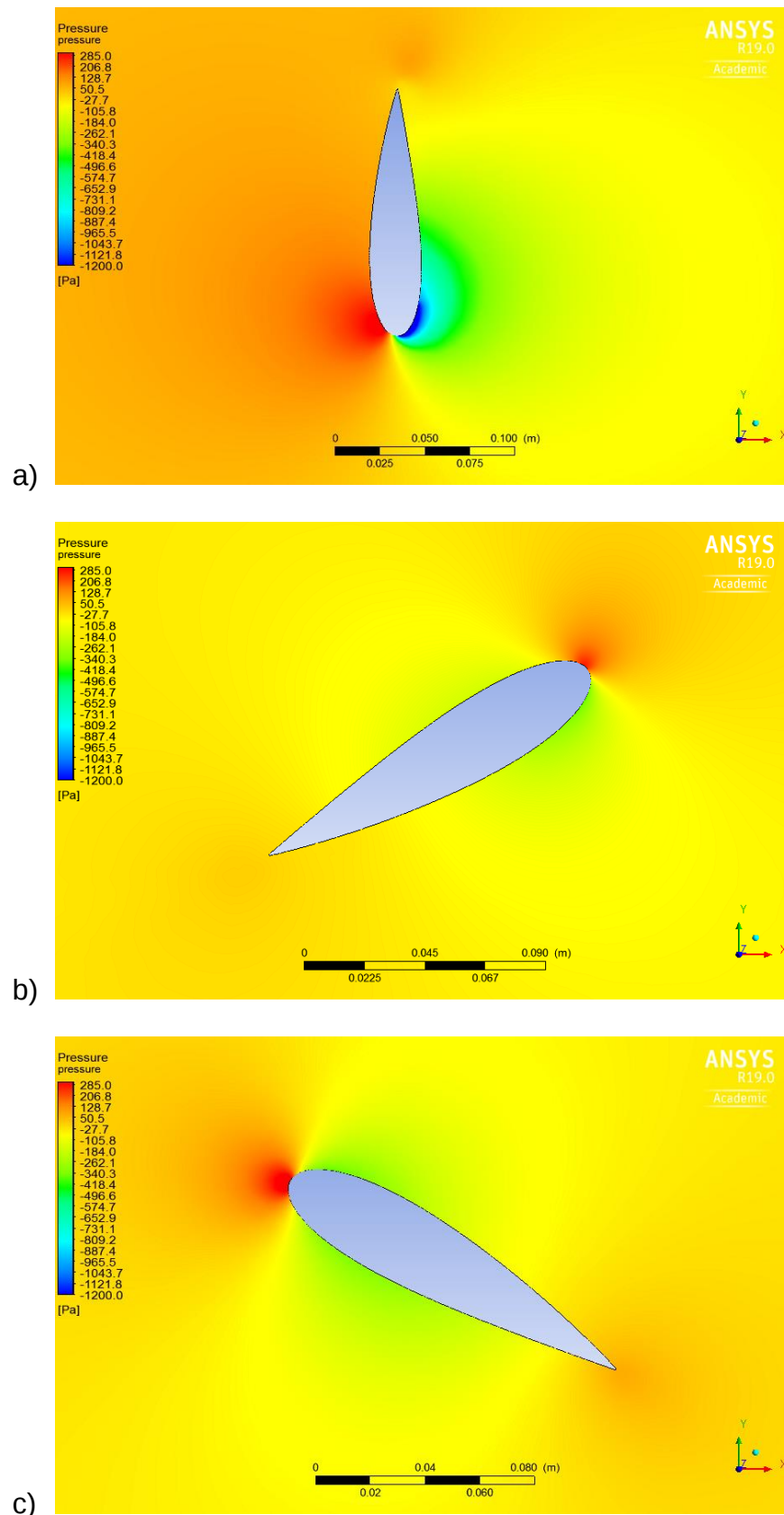
Fonte: Autoria Própria, 2022

Figura 26 – Campo de velocidade das pás da turbina para o ângulo azimutal com maior C_p (93°) - Perfil NACA 1621. a) Pá 1; b) Pá 2; e c) Pá 3



Fonte: Autoria Própria, 2022

Figura 27 - Campo de pressão das pás da turbina para o ângulo azimutal com maior C_p (93°) - Perfil NACA 6427. a) Pá 1; b) Pá 2; e c) Pá 3



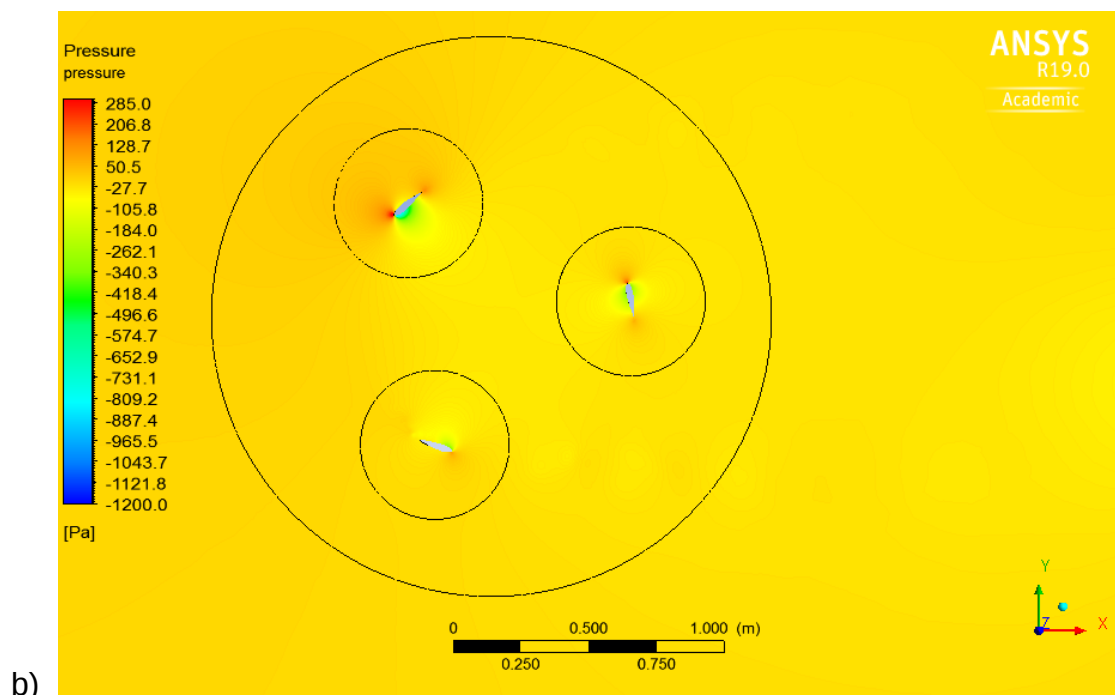
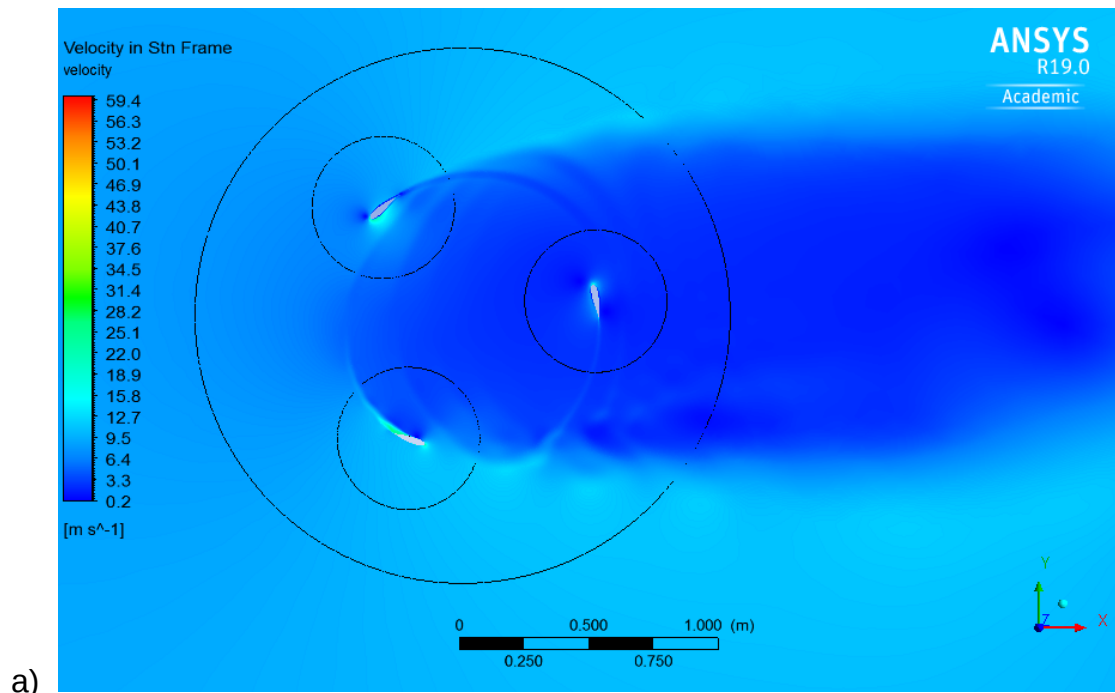
Fonte: Autoria Própria, 2022

Analisando os campos de velocidade e pressão apresentados para o ângulo com maior coeficiente de potência, é possível observar a contribuição significativa da pá 1 na constituição valor de C_p . Na Figura 27a, distingue-se a presença de uma região de alta pressão ao longo do extradorso e de uma região de baixa pressão ao longo do intradorso, que resulta em um gradiente de pressão favorável e um consequente incremento na geração de sustentação. Em relação ao campo de velocidade da pá 1, ilustrado na Figura 26a, tem-se destaque para a separação do escoamento no bordo de fuga do perfil, levando à formação de uma esteira que perturba o escoamento que incide nas demais pás.

Para os campos de pressão das pás 2 e 3 apresentados, respectivamente, nas Figuras 27b e 27c, observam-se regiões de baixa pressão tanto no intradorso quanto no extradorso do perfil, que resultam em gradientes de pressão adversos e uma consequente geração de sustentação reduzida.

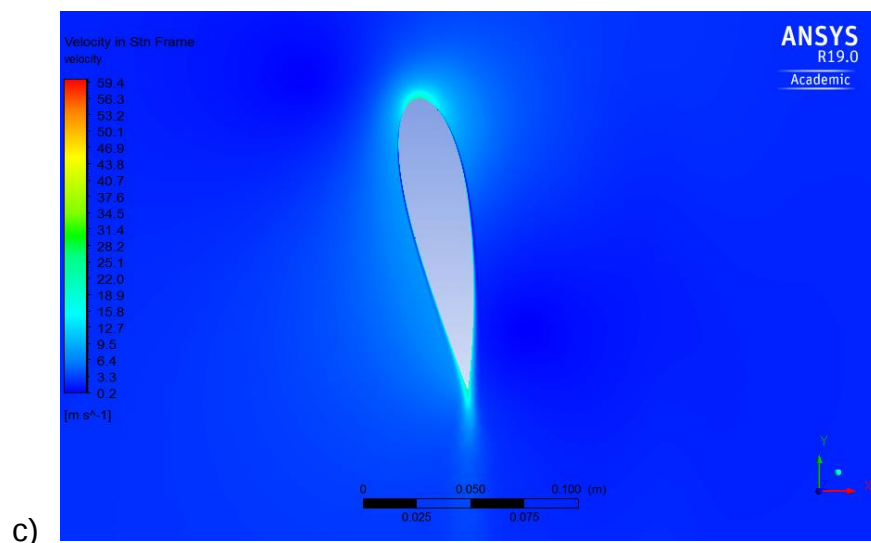
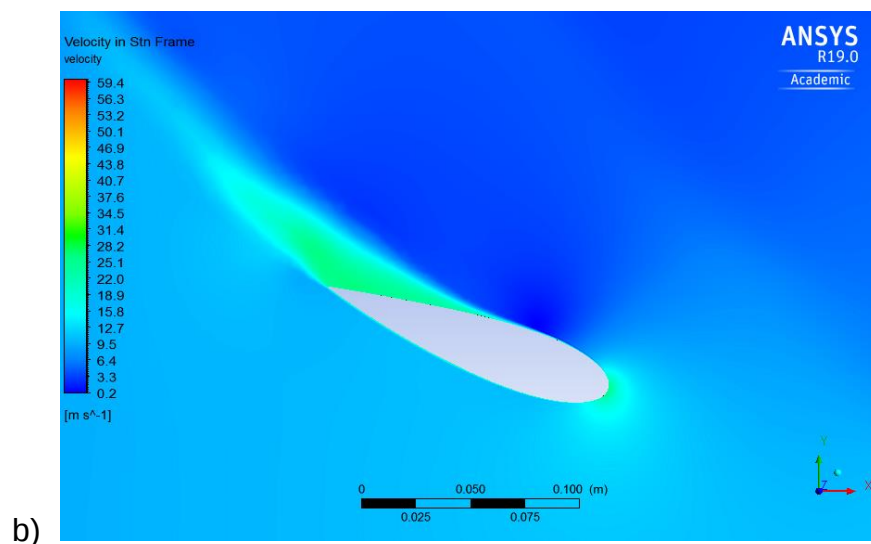
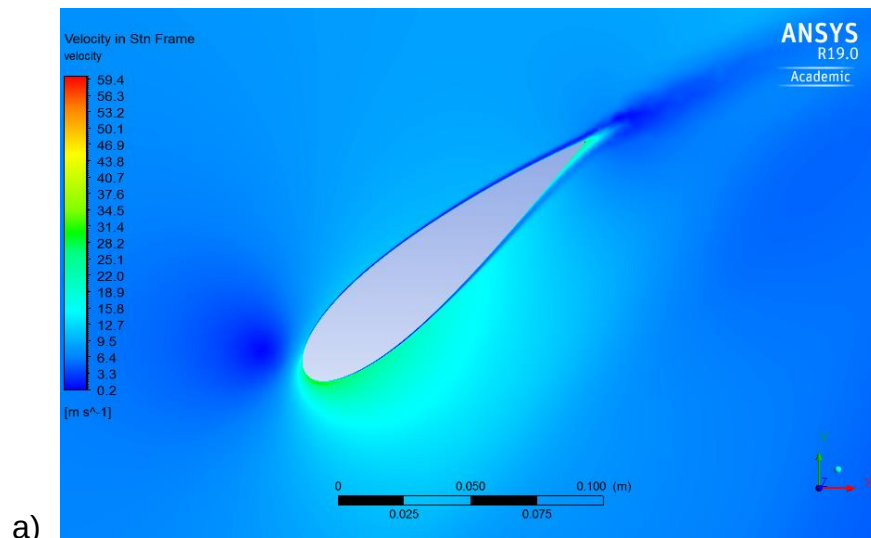
A perturbação do escoamento ligada à rotação das pás forma a esteira aerodinâmica que incide sobre elas, assim como pode ser observado na Figura 25, caracterizando uma zona de arrasto marcada por um escoamento com baixos valores de velocidade. Em contrapartida, o escoamento incidente na pá 1 para o ângulo azimutal em análise encontra-se parcialmente fora dessa zona de arrasto, sofrendo menor influência das demais pás, e apresentando, dessa forma, melhor desenvolvimento e sustentação favorável para geração de torque, contribuindo quase que exclusivamente para o coeficiente de potência total, tal qual apresentado na Figura 24. As características adversas do escoamento nas pás 2 e 3 traduzem sua baixa eficiência, grande parte por estarem localizadas na esteira do escoamento, conforme previamente apresentado.

Figura 28 – Campo a) de velocidade e b) de pressão da turbina para o ângulo azimutal com menor C_p (38°) – Perfil NACA 1621.



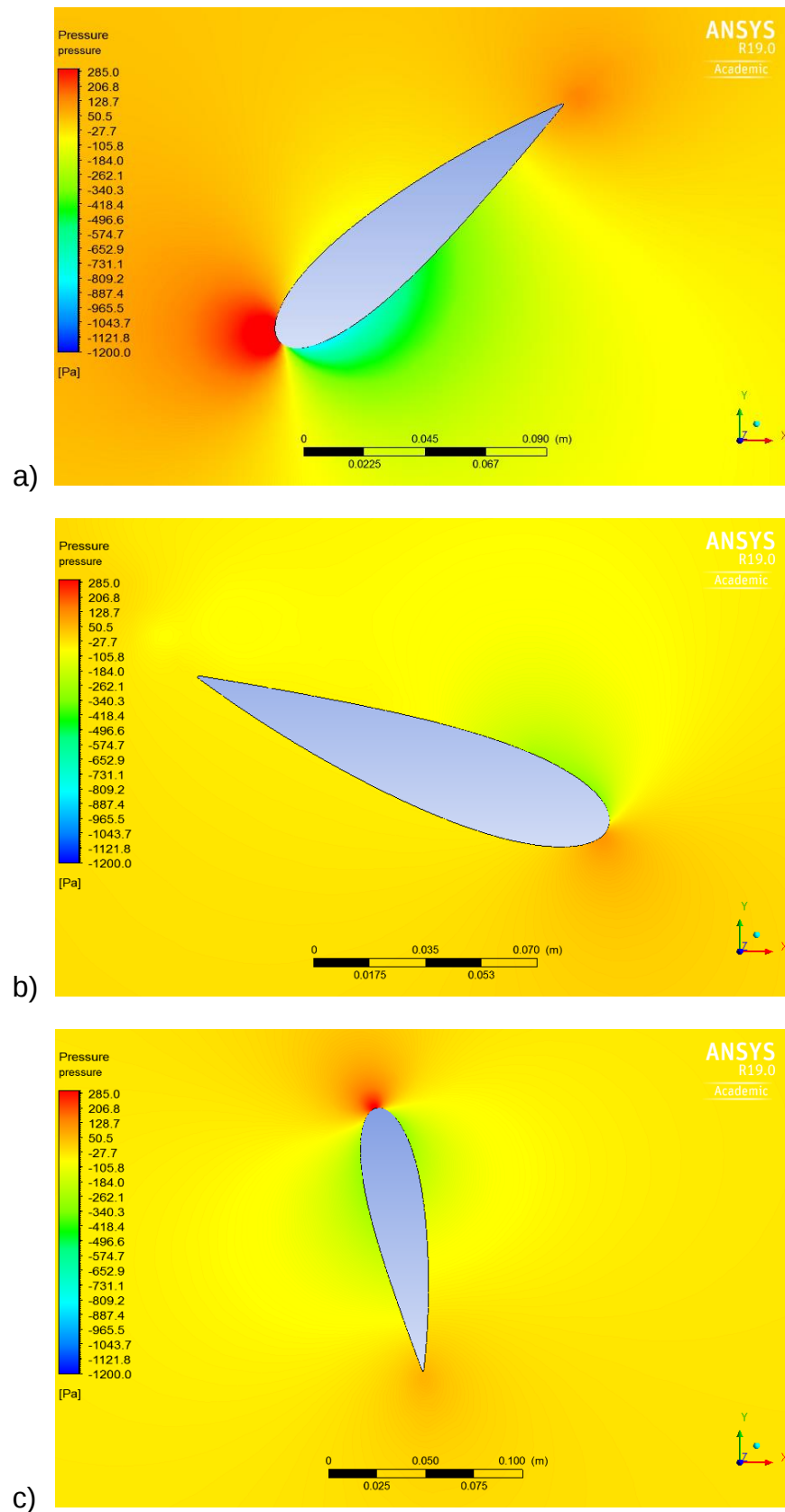
Fonte: Autoria Própria, 2022

Figura 29 - Campo de velocidade das pás da turbina para o ângulo azimutal com menor C_p (38°) - Perfil NACA 1621). a) Pá 1; b) Pá 2; e c) Pá 3



Fonte: Autoria Própria, 2022

Figura 30 - Campo de pressão das pás da turbina para o ângulo azimutal com menor C_p (38°) - Perfil NACA 1621. a) Pá 1; b) Pá 2; e c) Pá 3.



Fonte: Autoria Própria, 2022

Por meio dos campos de velocidade e pressão referentes ao ângulo de menor coeficiente de potência é possível ter uma visão mais ampla dos impactos negativos dos ângulos de incidência para esta configuração azimutal na determinação do C_p . Para os campos de velocidade das pás 1 e 2, apresentados na Figura 29, é notório o descolamento mais acentuado do escoamento nos perfis, gerando zonas de arrasto mais evidentes. Com o aumento da região de separação do fluxo na camada limite dos perfis, ocorre a formação de uma esteira mais acentuada caracterizada desde o bordo de ataque da pá 1 e a partir da região central da pá 2. Além de reduzir o desempenho aerodinâmico de cada pá individualmente, a perturbação do escoamento na região do bordo de fuga dos perfis afeta o escoamento na região do bordo de ataque das demais pás conforme a turbina rotaciona e reduz o desempenho aerodinâmico dos perfis como um todo.

Observando o campo de velocidade da turbina ilustrado na Figura 28a, tem-se que a pá 3 se encontra no centro da zona de arrasto gerada pelo escoamento perturbado pelas pás 1 e 2, justificando o gradiente de pressão adverso destacado na Figura 30c.

Dessa forma, uma menor sustentação e maior arrasto traduzem as contribuições quase nulas de cada uma das pás na formação do coeficiente de potência total da turbina, conforme previamente apresentado na Figura 24.

5. CONCLUSÕES

No presente trabalho foi realizada uma abordagem de otimização do perfil NACA de 4 dígitos assimétrico de uma turbina eólica de eixo vertical do tipo *Darrieus*, através de uma superfície de resposta acoplada ao método de otimização pelo Algoritmo Genético NSGA-II. Para tanto, foi construído um modelo computacional da turbina que foi submetido a simulações numéricas através do *software* ANSYS.

A criação da geometria da turbina e a construção da malha computacional foram feitas de forma a garantir os critérios de y^+ e número de Courant. Através da metodologia *Grid Convergence Index* (GCI), foi obtida uma malha com cerca de 260 mil elementos. A partir disso, o modelo passou por uma validação numérica, sendo comparados os resultados com dados experimentais.

De forma a avaliar os parâmetros a serem utilizados nas simulações, foram analisados a convergência por número de revoluções (utilizando dois modelos de turbulência: *Transition SST* e $k - \omega$ SST) e o *time-step* angular. Foram obtidos resultados superiores para o modelo *Transition SST*, que apresentou convergência satisfatória com 10 revoluções. Para o *time-step* angular, foi observada uma aproximação da solução numérica dos valores experimentais com a diminuição do ângulo, sendo adotado o *time-step* de $0,5^\circ$ por motivos de capacidade computacional.

Com isso, foi empregado o método de otimização por superfície de resposta para a determinação de um perfil assimétrico NACA ótimo para a turbina eólica *Darrieus*, sob a condição operacional de TSR igual a 2,63. As etapas envolvendo a geração do DoE, treinamento das RSMs e otimização foram realizadas através do *software* modeFrontier. Aplicando-se a abordagem proposta, foram obtidos os seguintes resultados e conclusões:

- A qualidade da superfície de resposta é diretamente proporcional à quantidade de amostras do DoE;
- A partir do DoE composto por 50 amostras foi realizado o treinamento das superfícies de resposta, obtendo-se os melhores resultados para o modelo Gaussiano Exponencial Isotrópico, que apresentou valores de erro médio,

erro máximo e regressão de 3,21%, 6,08% e 0,997, respectivamente, estando dentro da margem sugerida pela literatura;

- Realizando-se a otimização (por meio do Algoritmo Genético NSGA II) obteve-se o perfil otimizado NACA 1621;
- Comparando-se o resultado de simulação do perfil NACA 1621 com um perfil de referência (NACA 0021), obteve-se um aumento do coeficiente de potência na ordem de 5,42%;
- Analisando os campos de velocidade e pressão do perfil de maior C_p (NACA 1621), é possível verificar como o escoamento se desenvolve em cada uma das pás, e como os gradientes de pressão adversos e as regiões de esteira determinam os parâmetros de sustentação e arrasto do perfil, impactando diretamente no coeficiente de potência total da turbina.

6. ESCOPO PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados obtidos no presente trabalho, uma grande diversidade de estudos e vertentes pode ser posteriormente trabalhada para aprimorar o entendimento e aplicabilidade das turbinas eólicas do tipo *Darrieus* utilizando-se da modelagem computacional e a abordagem de otimização por superfície de resposta, sendo possível citar:

- Aumento da quantidade de amostras do DoE, melhorando a qualidade das superfícies de respostas treinadas;
- Análise de mais fatores envolvidos no desempenho da turbina, como:
 - Número de pás;
 - Corda do perfil;
 - Ângulo de ataque, etc;
- Ampliação da faixa operacional da turbina (análise para outros TSRs);

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEEÓLICA. **Associação Brasileira de Energia Eólica**. Disponível em: <<http://abeeolica.org.br/>>.

ALMOHAMMADI, K.M. e colab. **Modeling dynamic stall of a straight blade vertical axis wind turbine**. Journal of Fluids and Structures, v. 57, p. 144–158, 2015.

ANEEL. **Agência Nacional de Energia Elétrica**. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/>>.

ANSYS. **ANSYS Theory Guide**. Disponível em: <<https://ansyshelp.ansys.com>>.

BAI, Chi-Jeng e colab. **Computational fluid dynamics analysis of the vertical axis wind turbine blade with tubercle leading edge**. Journal of Renewable and Sustainable Energy, v. 7, n. 3, p. 033124, 5 Maio 2015.

BALDUZZI, Francesco e colab. **Critical issues in the CFD simulation of Darrieus wind turbines**. Renewable Energy, v. 85, p. 419–435, 2016.

BARROS, Pedro H. M. **Análise de sensibilidade do desempenho aerodinâmico de uma turbina eólica vertical *Darrieus* de pequena escala**. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira, 2020.

CASTELLI, M. R. e ENGLARO, A. e BENINI, E. **The Darrieus wind turbine: Proposal for a new performance prediction model based on CFD**. Energy, v. 36, n. 8, p. 4919–4934, 2011.

CELIK, I. e colab. **Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications**. Journal of Fluids Engineering, v. 130, n. 7, p. 078001, 2008.

EIA. **Types of wind - U.S. Energy Information Administration (EIA)**. Disponível em: <<https://www.eia.gov/energyexplained/wind/types-of-wind-turbines.php>>.

FERREIRA, C. J. S. e colab. **Visualization by PIV of dynamic stall on a vertical axis wind turbine Citation for published version (APA): Visualization by PIV of dynamic stall on a vertical axis wind turbine**. v. 46, n. 1, p. 97–108, 2009.

FORRESTER, A. e SOBESTER, A. e KEANE, A. **Engineering Design Via Surrogate Modelling A Practical Guide**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2008.

HASHEM, I. e MOHAMED, M. H. **Aerodynamic performance enhancements of H-rotor Darrieus wind turbine**. Energy, v. 142, p. 531–545, 2018.

JIN, R. e CHEN, W. e SIMPSON, T.W. **Comparative studies of metamodelling techniques under multiple modelling criteria**. Structural and Multidisciplinary Optimization, v. 23, n. 1, p. 1–13, 2001.

LEE, Young Tae e LIM, Hee Chang. **Numerical study of the aerodynamic performance of a 500W Darrieus-type vertical-axis wind turbine**. Renewable Energy, v. 83, p. 407–415, 2015.

LU, Xiaoqiang e colab. **An improved geometric parameter airfoil parameterization method**. Aerospace Science and Technology, v. 78, p. 241–247, 2018.

MODEFRONTIER. **modeFRONTIER Documentation Guide**. Disponível em: <<https://www.esteco.com/modelfrontier>>.

MOHAMED, M. H. **Criticism study of J-Shaped darrieus wind turbine: performance evaluation and noise generation assessment**. Energy, [S. l.], v. 177, p. 367–385, 2019.

NAZEMIAN, Mehrdad e NESHAAT, Elaheh e SARAY, Rahim Khoshbakhti. **Effects of piston geometry and injection strategy on the capacity improvement of waste heat recovery from RCCI engines utilizing DOE method**. Applied Thermal Engineering, v. 152, p. 52–66, 2019.

PAGNINI, Luisa e PICCARDO, Giuseppe e REPETTO, Maria Pia. **Full scale behavior of a small size vertical axis wind turbine**. Renewable Energy, v. 127, p. 41–55, 2018.

PINTO, Milton de Oliveira. **Fundamentos de energia eólica**. [S.l.]: Grupo Gen - LTC, 2013.

REZAEIHA, Abdolrahim e KALKMAN, Ivo e BLOCKEN, Bert. **CFD simulation of a vertical axis wind turbine operating at a moderate tip speed ratio: Guidelines for minimum domain size and azimuthal increment**. Renewable Energy, v. 107, p. 373–385, 2017.

REZAEIHA, Abdolrahim e MONTAZERI, Hamid e BLOCKEN, Bert. **Characterization of aerodynamic performance of vertical axis wind turbines Characterization of aerodynamic performance of vertical axis wind turbines: Impact of operational parameters**. Energy Conversion and Management, v. 169, p. 45–77, 2018.

ROY, S.; BRANGER, H.; LUNEAU, C.; BOURRAS, D.; PAILLARD, B. **Design of an offshore three-bladed vertical axis wind turbine for wind tunnel experiments**. International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering - OMAE v. 10, 2018.

SALVIANO, L.O. e DEZAN, J.D. e YANAGIHARA, J.I. **Optimization of winglet-type vortex generator positions and angles in plate-fin compact heat exchanger: Response Surface Methodology and Direct Optimization**. International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 82, p. 373–387, 2015.

SIMPSON, Timothy W e colab. **Metamodels for computer-based engineering design: survey and recommendations**. v. 17, n. 2, p. 129–150, 2001.

TESCIONE, G. e colab. **Near wake flow analysis of a vertical axis wind turbine by stereoscopic particle image velocimetry**. Renewable Energy, v. 70, p. 47–61, 2014.

TRIVELLATO, F. e CASTELLI, R. M. **On the Courant–Friedrichs–Lewy criterion of rotating grids in 2D vertical-axis wind turbine analysis**. Renewable Energy, v. 62, p. 53–62, 2014.

TUMMALA, Abhishiktha e colab. **A review on small scale wind turbines**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 56, p. 1351–1371, 2016.

WANG, C. e PRINN, R. G. **Potential climatic impacts and reliability of very large-scale wind farms**. Atmospheric Chemistry and Physics, v. 10, n. 4, p. 2053–2061, 2010.

WANG, Tongguang. **A brief review on wind turbine aerodynamics**. Theoretical and Applied Mechanics Letters, v. 2, n. 6, p. 062001, 2012.