

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

PEDRO HENRIQUE MARTINEZ DE BARROS

**ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO DESEMPENHO AERODINÂMICO
DE UMA TURBINA EÓLICA VERTICAL DARRIEUS DE PEQUENA
ESCALA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ILHA SOLTEIRA
2020

PEDRO HENRIQUE MARTINEZ DE BARROS

**ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO DESEMPENHO AERODINÂMICO
DE UMA TURBINA EÓLICA VERTICAL DARRIEUS DE PEQUENA
ESCALA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa
de Pós-Graduação de Engenharia Mecânica da
Universidade Estadual Paulista – UNESP, como
requisito para a obtenção do título de Mestre.
Área de concentração: Ciências Térmicas

Prof. Dr. Leandro Oliveira Salviano

Orientador

Ilha Solteira
2020

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

B277a Barros, Pedro Henrique Martinez de.
Análise de sensibilidade do desempenho aerodinâmico de uma turbina
eólica vertical Darrieus de pequena escala / Pedro Henrique Martinez de
Barros. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2021
86 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de
Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Ciências Térmicas, 2021

Orientador: Leandro Oliveira Salviano
Inclui bibliografia

1. Energias renováveis. 2. Energia eólica. 3. Turbina eólica vertical de
Darrieus.


Raiane da Silva Santos

Serviço Técnico de Referência, Atendimento ao Usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação
CRB3 - 9999

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Análise de sensibilidade do desempenho aerodinâmico de uma turbina eólica vertical Darrieus de pequena escala

AUTOR: PEDRO HENRIQUE MARTINEZ DE BARROS

ORIENTADOR: LEANDRO OLIVEIRA SALVIANO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ENGENHARIA MECÂNICA, área: Ciências Térmicas pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. LEANDRO OLIVEIRA SALVIANO (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP

Prof. Dr. ALUISIO VIAIS PANTALEÃO (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Prof. Dr. ALEX ÁLISSON BANDEIRA SANTOS (Participação Virtual)
Centro Integrado de Manufatura e Tecnologia / Centro Universitário SENAI CIMATEC

Ilha Solteira, 22 de janeiro de 2021

AGRADECIMENTOS

Externo meus sinceros agradecimentos primeiramente a Deus, por toda a condição e oportunidade que tem me dado em minha vida. Agradeço à minha família pelo suporte, pelos valores morais e éticos me ensinados e por ser minha base forte no mundo. À minha noiva e futura esposa Vivian Valéria Barsanaor de Araújo por ser minha companheira, por acreditar em meus sonhos, me incentivar e ser o motivo pelo qual me dedico a ser melhor a cada dia.

Agradeço ao meu orientador, Professor Doutor Leandro Oliveira Salviano, pelo suporte dado em todas as etapas do trabalho, pelas situações profissionais, pelo enorme zelo, compromisso e pela amizade que criamos.

Aos Professores Doutores José Luiz Gasche e Aluisio Viais Pantaleão, pelas sugestões apresentadas no exame geral de qualificação.

Aos Professores do curso de pós-graduação, pelos conhecimentos transmitidos.

Aos colegas de curso e amigos do Laboratório de Simulação Computacional em Ciências Térmicas, pela rica troca de ideias e por permitirem o monopólio temporário dos recursos disponíveis para realização desse trabalho.

E por fim, agradeço à CAPES pelo auxílio financeiro. “O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001”

RESUMO

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

A demanda por fontes de energias alternativas e renováveis vem substancialmente crescendo nos últimos anos em decorrência, entre outros, de aspectos econômicos e ambientais das fontes convencionais, como o petróleo e seus derivados. Nesse contexto, fontes de energia como a solar e a eólica tem emergido como fontes renováveis atrativas. O crescimento da energia eólica no Brasil e no mundo vislumbram a possibilidade de desenvolvimento de novas tecnologias e equipamentos mais eficientes que atendam às necessidades energéticas. Desta forma, o objetivo deste trabalho é contribuir para o desenvolvimento de equipamento eólico, que possa ser empregado na geração elétrica descentralizada, por meio da análise de sensibilidade, usando o método Smoothing Spline-ANOVA (SS-ANOVA), de uma turbina eólica vertical de pequena escala do tipo *Darrieus* através da Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), operando com baixo TSR (*tip-speed ratio*). A modelagem numérica considera um escoamento incompressível, transitório, bidimensional e turbulento. Os parâmetros geométricos da turbina eólica que são analisados são: arqueamento do perfil (m), posição do arqueamento (p), espessura do perfil aerodinâmico (t), corda do perfil (c) e o ângulo de incidência das pás (α), sendo os três primeiros baseados na parametrização NACA-4 dígitos. Estes cinco parâmetros operacionais são submetidos a análise de sensibilidade SS-ANOVA, permitindo identificar que o índice de contribuição do ângulo de incidência (α) sobre o coeficiente de potência é o maior entre os demais, com contribuição de 69%. A outra contribuição significativa sobre o coeficiente de potência é a combinação do parâmetro ângulo de incidência (α) e corda do perfil (c), apresentando um índice de 15%. A contribuição referente à interação dos parâmetros ângulo de incidência (α) e espessura do perfil (t) apresenta um índice de contribuição de 4%. Através do estudo fenomenológico do escoamento, concluiu-se que o aumento do coeficiente de sustentação médio ($\overline{C_l}$), associado a um coeficiente de arrasto médio ($\overline{C_d}$) que seja o menor quanto possível, de modo que a eficiência aerodinâmica média ($\overline{C_l}/\overline{C_d}$) seja o maior possível, provoca o aumento do coeficiente de potência médio ($\overline{C_p}$).

Palavras-chave: Energia eólica. Turbina vertical *Darrieus*. CFD. Análise de sensibilidade.

ABSTRACT

BARROS, Pedro H. M. Sensitivity analysis of the aerodynamic performance of a small scale Darrieus vertical wind turbine. 2020. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira, 2020.

Demand for alternative and renewable energy sources has been substantially increasing in recent years due, among others, to economic and environmental aspects of conventional sources, such as oil and its derivatives. In this context, energy sources such as solar and wind have emerged as attractive renewable sources. The growth of wind energy in Brazil and in the world envision the possibility of developing new technologies and more efficient equipment that meet energy needs. Thus, the objective of this work is to contribute to the development of wind equipment, which can be used in decentralized electrical generation, through sensitivity analysis, using the Smoothing Spline-ANOVA (SS-ANOVA) method, of a small-scale vertical wind turbine of Darrieus type through Computational Fluid Dynamics (CFD), operating at low TSR. Numerical modeling considers an incompressible, transient, two-dimensional and turbulent flow. The geometric parameters of the wind turbine that are analyzed are: profile camber (m), camber position (p), aerodynamic profile thickness (t), profile chord (c) and the blade incidence angle (α), the first three being based on NACA-4 digit parameterization. These five operational parameters are submitted to SS-ANOVA sensitivity analysis, allowing to identify that the contribution rate of the angle of incidence (α) on the power coefficient is the highest among the others, with a contribution of 69%. The other significant contribution on the power coefficient is the combination of the angle of incidence (α) and profile chord (c) parameters, with an index of 15%. The contribution regarding the interaction of the angle of incidence (α) and profile thickness (t) parameters has a contribution rate of 4%. Through the phenomenological study of the flow, it was concluded that the increase in the average lift coefficient ($\overline{C_l}$), associated with an average drag coefficient ($\overline{C_d}$) that is as small as possible, so that the mean aerodynamics efficiency ($\overline{C_l} / \overline{C_d}$) is as large as possible, causes an increase in the average power coefficient ($\overline{C_p}$).

Keywords: Wind energy. Darrieus vertical turbine. CFD. Sensitivity analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Capacidade instalada e capacidade acumulada em 2017.....	13
Figura 2	- Matriz elétrica brasileira no final de 2018.....	14
Figura 3	- Aumento histórico da capacidade instalada de energia eólica no Brasil em MW.....	14
Figura 4	- Velocidade média do ar à 80m.....	15
Figura 5	- Parque eólico de Dabancheng, na província chinesa de Xinjiang.....	16
Figura 6	- Turbinas eólicas de eixo vertical.....	20
Figura 7	- Turbina eólica de eixo horizontal.....	20
Figura 8	- Triângulo de velocidades sobre um perfil aerodinâmico.....	22
Figura 9	- Esquema da rotação de uma VAWT de <i>Darrieus</i> em oito posições azimutais.....	23
Figura 10	- Representação dos parâmetros geométricos da turbina.....	25
Figura 11	- Perfil aerodinâmico do tipo NACA 4-dígitos.....	25
Figura 12	- Perfis NACA-4 dígitos simétricos.....	27
Figura 13	- Perfis NACA-4 dígitos assimétricos.....	28
Figura 14	- Domínio computacional com as condições de contorno estabelecidas..	34
Figura 15	- Interface entre Domínio Fixo e Rotativo.....	36
Figura 16	- Malha computacional.....	38
Figura 17	- Validação numérica para a turbina de <i>Darrieus</i>	42
Figura 18	- Convergência do coeficiente de potência (C_p) em função do número de revoluções.....	44
Figura 19	- Critério de y^+ nas pás.....	45
Figura 20	- Número de Courant máximo para a última revolução na interface deslizante.....	45
Figura 21	- <i>Time-step</i> angular para uma turbina eólica <i>Darrieus</i>	46
Figura 22	- Análise do <i>time-step</i> angular.....	47
Figura 23	- Distribuição espacial das variáveis para diferentes tipos de DoE.....	49
Figura 24	- Matriz de dispersão dos parâmetros.....	50
Figura 25	- Coeficiente de Potência Instantâneo C_p da Turbina Eólica de <i>Darrieus</i>	54

Figura 26	- Campo de velocidade para a configuração padrão da turbina eólica (Tabela 5).....	56
Figura 27	- Campo de pressão para a configuração padrão da turbina eólica (Tabela 5).....	57
Figura 28	- Campo de velocidade para as pás da turbina.....	58
Figura 29	- Campo de pressão para as pás da turbina.....	59
Figura 30	- Comparação do C_p instantâneo e $\overline{C_p}$ para algumas configurações da turbina.....	60
Figura 31	- Ranqueamento dos efeitos principais e de interação das variáveis de entrada sobre o Coeficiente de Potência $\overline{C_p}$	62
Figura 32	- C_p e $\overline{C_p}$ para turbina com NACA1311 com $c = 173\text{mm}$ e diferentes ângulos de incidência, α	63
Figura 33	- Campo de velocidade para NACA1311 com $c = 173\text{mm}$ 3 $\alpha = 5,9$	64
Figura 34	- Campo de velocidade para NACA1311 com $c = 173\text{mm}$ 3 $\alpha = 0$	65
Figura 35	- Ranqueamento dos efeitos principais e de interação das variáveis de entrada sobre o Coeficiente de Potência $\overline{C_p}$ para o DoE com 192 casos.....	67
Figura 36	- Ranqueamento dos efeitos de interação das variáveis de entrada, exceto o ângulo de incidência, sobre o Coeficiente de Potência $\overline{C_p}$	69
Figura 37	- C_p e $\overline{C_p}$ para a turbina NACA6427, $c = 137\text{mm}$ e $\alpha = 0^\circ$ em comparação com o modelo de validação.....	70
Figura 38	- C_p e $\overline{C_p}$ para turbina com NACA6427 com $c = 137\text{mm}$ e diferentes ângulos de incidência, α	71
Figura 39	- Comparação do efeito dos coeficientes aerodinâmicos no coeficiente de potência. (a) Coeficiente de sustentação, C_l ; (b) Coeficiente de arrasto, C_d ; (c) Coeficiente de potência, C_p	72
Figura 40	- Comparativo quanto aos coeficientes aerodinâmicos e $\overline{C_p}$	74
Figura 41	- Ponto de máximo $\overline{C_p}$ para a configuração 1 mostrada na Figura 40.....	75
Figura 42	- Ponto de mínimo $\overline{C_p}$ para a configuração 1 mostrada na Figura 40.....	75
Figura 43	- Ponto de máximo $\overline{C_p}$ para a configuração 4 mostrada na Figura 40.....	76
Figura 44	- Ponto de mínimo $\overline{C_p}$ para a configuração 4 mostrada na Figura 40.....	76
Figura 45	- Comparação do escoamento das pás das turbinas no ponto de máximo C_p	77

Figura 46	-	Comparação do escoamento das pás das turbinas no ponto de mínimo C_p	78
------------------	---	--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Características geométricas fixas da turbina.....	34
Tabela 2	- Dimensões do domínio computacional.....	35
Tabela 3	- Configurações principais da simulação.....	39
Tabela 4	- Detalhes das malhas utilizadas para a análise de sensibilidade e erros de discretização.....	41
Tabela 5	- Principais características do modelo de validação.....	41
Tabela 6	- Configurações finais para as simulações e número de casos para o DoE...	48
Tabela 7	- Faixas para cada variável de entrada para a construção do DoE.....	50
Tabela 8	- Valores máximos e mínimos do C_p da Turbina Eólica <i>Darrieus</i>	55
Tabela 9	- Índices de Colinearidade dos parâmetros submetidos ao método SS-ANOVA para o DoE com 100 casos.....	61
Tabela 10	- Índices de Colinearidade dos parâmetros submetidos ao SS-ANOVA para o DoE com 192 casos.....	67
Tabela 11	- Índices de Colinearidade dos parâmetros submetidos ao SS-ANOVA para o DOE com 192 casos (excluindo o ângulo de incidência).....	68
Tabela 12	- Configuração da Turbina com maior $\overline{C_p}$ da amostra.....	69
Tabela 13	- Compilação dos coeficientes médios para a análise da contribuição da variação do ângulo de incidência (α) no coeficiente de potência médio ($\overline{C_p}$).....	73

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	ENERGIA EÓLICA.....	17
1.2	TURBINAS EÓLICAS DE PEQUENA ESCALA.....	17
1.2.1	Classificação das turbinas eólicas de pequena escala.....	18
1.3	AERODINÂMICA DAS TURBINAS EÓLICAS DE <i>DARRIEUS</i>	21
1.4	ASPECTOS GEOMÉTRICOS E OPERACIONAIS PARA A ANÁLISE DA TURBINA EÓLICA.....	24
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	29
3	METODOLOGIA.....	32
3.1	MODELO DE TURBULÊNCIA.....	32
3.1.1	Equações de transporte $k - \omega$ SST.....	33
3.2	DOMÍNIO COMPUTACIONAL E CONDIÇÕES DE CONTORNO.....	33
3.3	CRITÉRIO DE y^+ E O NÚMERO DE COURANT.....	35
3.4	CARACTERIZAÇÃO DA MALHA COMPUTACIONAL.....	37
3.5	ANÁLISE DE CONVERGÊNCIA DE MALHA.....	39
3.6	VALIDAÇÃO NUMÉRICA.....	41
3.6.1	Convergência por número de revoluções.....	43
3.6.2	Análise do <i>time-step</i> angular.....	46
3.7	DESIGN DE EXPERIMENTOS (DoE).....	48
3.7.1	Método <i>Optimal Space-Filling Design</i> (OSF).....	49
3.8	METODOLOGIA <i>SMOOTHING SPLINE</i> -ANOVA (SS-ANOVA).....	51
4	RESULTADOS.....	54
5	CONCLUSÃO E FUTUROS TRABALHOS.....	79
	REFERÊNCIAS.....	81

1 INTRODUÇÃO

Fatores como o aquecimento global, a escassez de energia, o rápido esgotamento dos combustíveis fósseis e o crescimento exponencial da demanda por energia em vários países em desenvolvimento criaram uma excelente oportunidade para a aceitação em larga escala de tecnologia em energia renovável (KUMAR *et al.*, 2018). Portanto, atender às necessidades futuras de energia do mundo resulta em uma maior pressão sobre as fontes de energia convencionais e seus infortúnios.

Com o rápido crescimento populacional, o consumo global de energia deverá aumentar em 56% entre 2010 e 2040. Em 2015, os combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás natural) contabilizaram 78,4% do consumo final global de energia, sendo a quota de renováveis e energia nuclear de 19,3% e 2,3%, respectivamente. Em todo o mundo, a parcela de energia renovável aumentará para enfrentar a mudança climática global até 2030 (KC *et al.*, 2019).

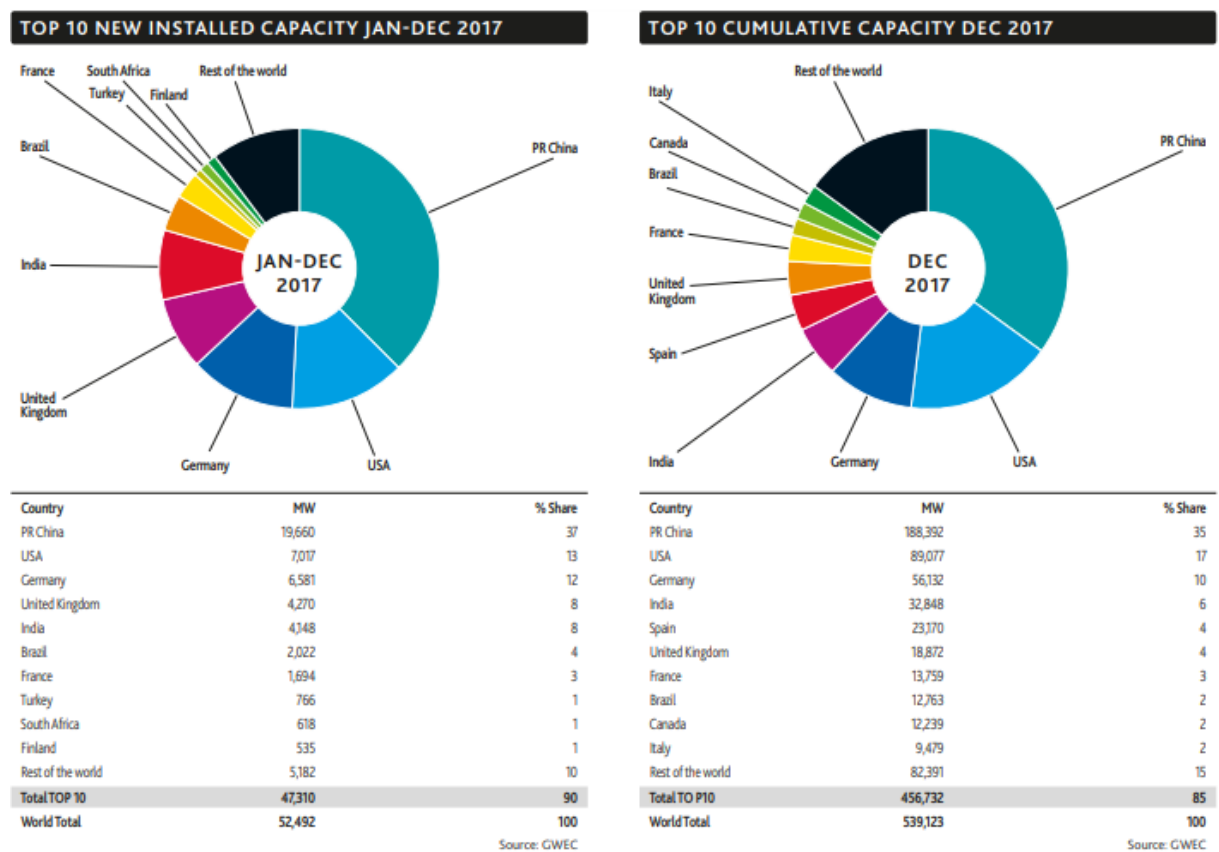
Nesse cenário, a energia cinética decorrente das correntes de ar (vento) tem sido uma importante fonte de energia devido à sua capacidade de renovação e sustentabilidade. O crescimento da produção de energia eólica no Brasil e no mundo (TUMMALA *et al.*, 2016) vislumbram possibilidades no estudo para o desenvolvimento de novas tecnologias e equipamentos mais eficientes, tanto em termos de grande escala (geração centralizada), quanto em termos de pequena escala (geração descentralizada).

É notória e evidente a enorme disponibilidade de recursos naturais que o Brasil dispõe os quais podem ser empregados para fins energéticos. Tais potenciais podem ser facilmente verificados em documentos oficiais produzidos pelo Ministério de Minas e Energia do Brasil, como o Plano Nacional 2030 (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA- EPE, 2019). As preocupações quanto aos impactos ambientais provocados pela expansão da oferta de energia a partir de fontes não renováveis, com discussões de amplitude continental, reforçam a busca por alternativas sustentáveis. Nesta circunstância, a energia eólica tem emergido como uma das alternativas renováveis mais promissoras, que pode, entre outras, ser utilizada com o intuito de reduzir os impactos ambientais ocasionados por energias não renováveis, além de atender o eminente aumento da demanda por energia em função das necessidades econômicas e do aumento populacional.

O Brasil possui um dos maiores recursos eólicos do mundo (SAWYER; DYRHOLM, 2018), excedendo as necessidades de eletricidade do país em cerca de três vezes. Em 2017, a geração de energia eólica do Brasil alcançou a produção de 10% e 11% da demanda nacional

de eletricidade em agosto e setembro, respectivamente (SAWYER; DYRHOLM, 2018). Em especial no Nordeste, a energia eólica forneceu mais de 60% da demanda de eletricidade, superando todos os recordes de geração anteriores durante um período em que os reservatórios hídricos para a geração de energia elétrica na região eram muito baixos. A capacidade de instalação e a capacidade acumulada, ou seja, a quantidade de geração de energia adicional e a geração acumulada em 2017 são mostradas na Figura 1. É possível observar que o Brasil figura entre os países que mais se destacam no que diz respeito à geração de energia eólica, o que justifica a pesquisa e desenvolvimento de novos equipamentos.

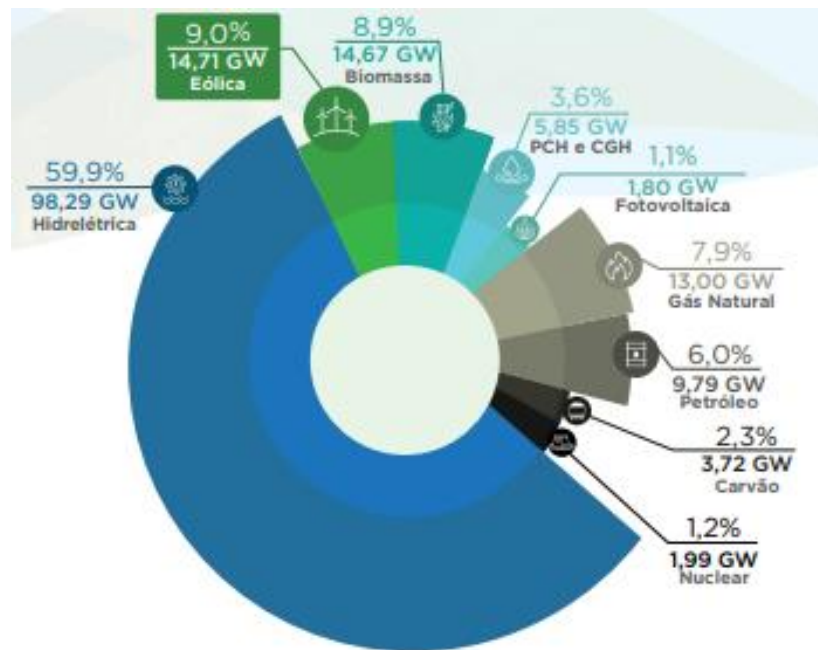
Figura 1 - Capacidade instalada e capacidade acumulada em 2017.



Fonte: (SAWYER; DYRHOLM, 2018)

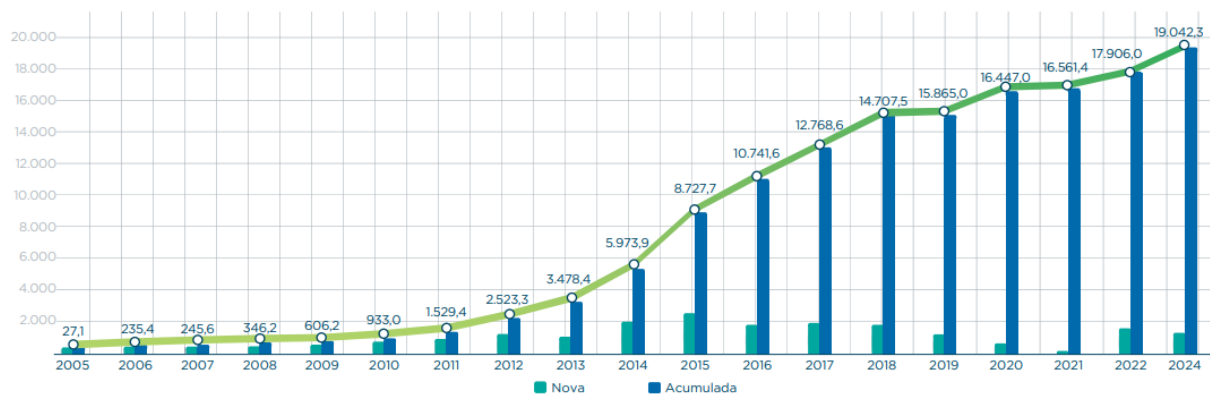
O número de usinas eólicas no Brasil tem aumentado consistentemente desde 2008. Com 14,71 GW de capacidade instalada até o final de 2018, já alcançou uma participação de 9% das fontes nacionais de energia elétrica (Figura 2). Até o final de 2024, esse número terá aumentado para 19 GW em função das contratações já realizadas nos leilões regulados e também no mercado livre (ABBEÓLICA, 2019). A Figura 3 apresenta o aumento na capacidade instalada de energia eólica no Brasil desde 2005.

Figura 2 - Matriz elétrica brasileira no final de 2018



Fonte: (ABBEÓLICA, 2019)

Figura 3 - Aumento histórico da capacidade instalada de energia eólica no Brasil em MW

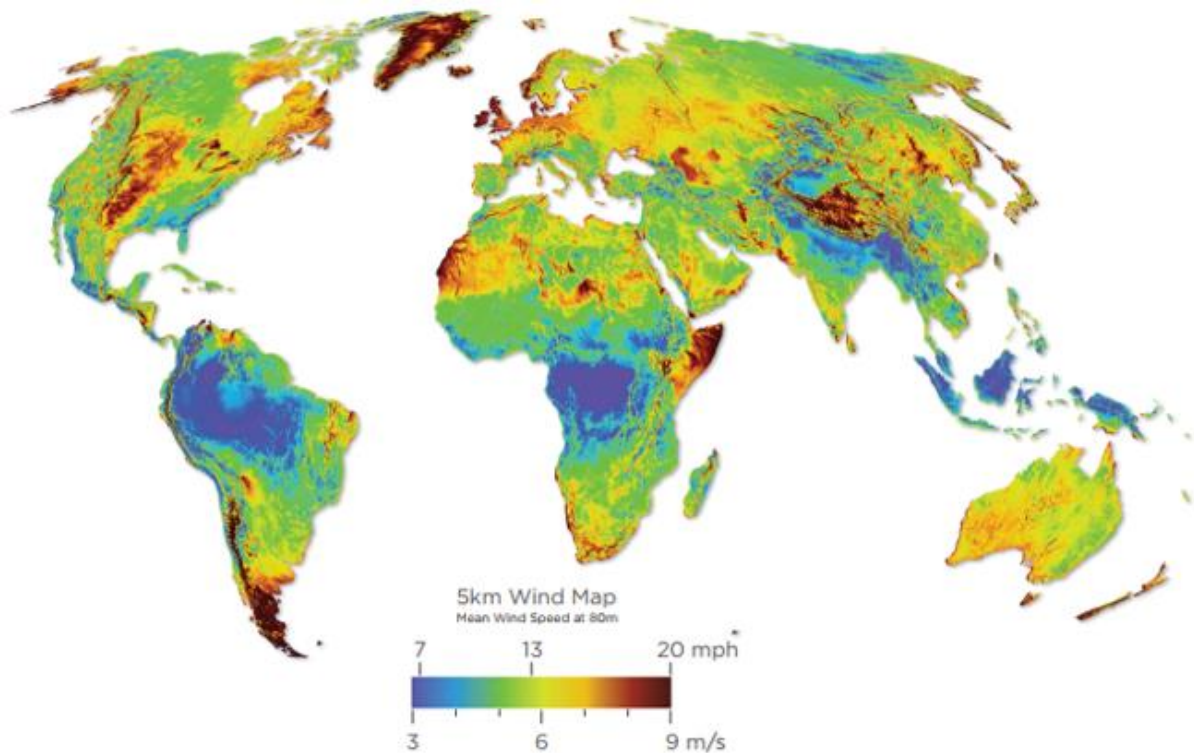


Fonte: (ABBEÓLICA, 2019)

O enorme potencial eólico brasileiro junto à crescente demanda por alternativas de energias renováveis de baixo custo que possam substituir, ou minimizar, a utilização de fontes de energia convencionais, fomentam a necessidade de pesquisa e desenvolvimento de turbinas eólicas com maior desempenho para atender a demanda de geração de energia em aplicações de pequena escala. Outro ponto importante é a redução de custos de produção de energia e, consequentemente, um melhor posicionamento industrial e empreendedor na busca por soluções técnicas pautadas no aumento da eficiência de conversão energética. Além disso, o

desenvolvimento de equipamentos que possam operar a baixa velocidade de incidência dos ventos é reforçado pelo mapa de velocidade média do vento a baixa altitude (HOSSAIN, 2014), conforme mostrado na Figura 4.

Figura 4 - Velocidade média do ar à 80m.



Fonte: (HOSSAIN, 2014).

Deste modo, a crescente busca por alternativas que atendam a crescente demanda por energia elétrica, especialmente para a geração descentralizada, e que possam minimizar os efeitos negativos associados às fontes de energias convencionais, colocam em evidência a energia eólica e reforçam a necessidade de pesquisas aderentes ao desenvolvimento de turbinas eólicas verticais de pequeno porte do tipo *Darrieus*, que surgem como atraente alternativa para a geração de energia elétrica em meios urbanos ou regiões rurais isoladas.

O desenvolvimento desta tecnologia contribui também para a geração descentralizada híbrida, associada à energia solar fotovoltaica, complementando a geração em momentos de intermitência solar, atribuindo ao sistema de geração robustez e confiabilidade. Ademais, a aplicação de ferramentas de simulação computacional, como a Dinâmica dos Fluidos 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.

Outro atrativo para a aplicação de uma turbina eólica de pequena escala é que o custo da eletricidade tem aumentado ao longo do tempo, enquanto o valor para instalar sistemas eólicos de pequeno porte faz o caminho inverso. 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 (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA- ANEEL, 2019), a geração descentralizada de energia tornou-se viável economicamente para consumidores residenciais de quase todo o Brasil.

Vários países a fim de atender à crescente demanda de energia estão instalando parques eólicos de grande escala tanto em terra, quanto em alto mar (como é o caso da Figura 5). No entanto, estudos mostram que este tipo de empreendimento tem contribuindo para as mudanças danosas às condições climáticas globais (WANG; PRINN, 2010). É neste contexto que surge a discussão sobre a viabilidade e a sustentabilidade dos parques eólicos de grande escala para a produção de energia renovável, uma vez que tem sido reportado um significativo impacto nas condições climáticas globais, além da enorme ocupação territorial.

Figura 5 - Parque eólico de Dabancheng, na província chinesa de Xinjiang.



Fonte: (HOSSAIN, 2014).

Desta maneira, uma alternativa atraente é a instalação de sistemas descentralizados, isto é, utilizando turbinas eólicas de pequena escala, visto que as mesmas podem gerar até 10 KW (TUMMALA *et al.*, 2016), o que é suficiente para a maioria das necessidades domésticas (VAN HOOFF *et al.*, 2011). A instalação dessas turbinas pode minimizar os impactos gerados pelos grandes parques eólicos.

1.1 ENERGIA EÓLICA

Energia eólica se refere ao processo de gerar eletricidade usando o vento, que é escoamento de ar que ocorre naturalmente na atmosfera terrestre. Para tal, são necessárias turbinas eólicas que convertam a energia cinética (energia mecânica) do vento em eletricidade (TUMMALA *et al.*, 2016).

No que diz respeito a geração de energia eólica, existem três principais vertentes:

- Geração de escala utilitária (*Utility-scale wind*): Turbinas eólicas que variam em geração de 100 quilowatts à vários megawatts, onde a eletricidade é entregue à rede elétrica e distribuída para o usuário final por empresas de energia elétrica ou operadores de sistemas de energia (AWEA, 2018).
- Pequena escala ou distribuída (*Small-scale*): Pequenas turbinas eólicas menores que 100 quilowatts são usadas para alimentar diretamente uma casa, fazenda ou pequena empresa e não estão conectadas à rede (AMERICAN WIND ENERGY ASSOCIATION- AWEA, 2018).
- Produção marítima (*Offshore wind*): Turbinas eólicas que são erguidas em águas profundas. As turbinas eólicas *offshore* são maiores que as turbinas terrestres e podem gerar mais energia (AWEA, 2018).

1.2 TURBINAS EÓLICAS DE PEQUENA ESCALA

Embora a geração eólica em grande escala esteja estabelecida, existem alguns desafios para o desenvolvimento sustentável desta tecnologia. Por exemplo, as principais barreiras de grandes parques eólicos são possíveis alterações climáticas (WANG; PRINN, 2010), aceitabilidade pública e perdas na transmissão e distribuição de eletricidade aos consumidores (KC *et al.*, 2019). Uma alternativa a estas limitações é a instalação de sistemas de rede descentralizada, ou seja, a utilização de turbinas eólicas de pequena escala que podem gerar até 10 KW (TUMMALA *et al.*, 2016), o que é suficiente para a maioria das necessidades

domésticas (VAN HOOFF *et al.*, 2011), uma vez que a instalação de pequenas turbinas pode minimizar, entre outros, os impactos ambientais, a interferência em ondas de rádio e TV, a emissão de ruído e, em alguns casos, até mesmo a poluição visual (GHASEMIAN *et al.*, 2017).

Até o final de 2014, houve um aumento notável na instalação de pequenas turbinas eólicas, ou *Small-Scale Wind Turbines* (SWT), com capacidade global de 830 MW, o que representou um aumento de 10.9% em comparação ao ano de 2013. Também está previsto que a capacidade global de SWTs atinja 2000 MW em 2020, o que criaria um lucrativo mercado de energia eólica para fabricantes e pesquisadores (TUMMALA *et al.*, 2016).

Considerando a emergente possibilidade de aplicação descentralizada de pequenas turbinas eólicas, compreender as características fenomenológicas do escoamento através destes tipos de equipamentos pode trazer vantagens e econômicas e, consequentemente, aumento na competitividade nacional.

1.2.1 Classificação das turbinas eólicas de pequena escala

As turbinas podem ser classificadas em duas categorias:

1. Classificação baseada no eixo de rotação:

a) **Turbinas Eólicas de Eixo Vertical** (*Vertical Axis Wind Turbines* - VAWTs): São aquelas cujo eixo do rotor está na direção vertical. A instalação dessas turbinas é geralmente no solo ou no teto de residências ou pequenas propriedades, tornando-as mais fáceis para manutenção.

O interesse por esse tipo de turbina tem sido crescente devido às várias vantagens, como (REZAEIHA *et al.*, 2018a):

- Capacidade omnidirecional (é funcional para qualquer que seja a direção do vento): nenhum sistema de guinada (utilizado para controlar a posição do rotor da turbina eólica em relação à direção do vento) é necessário (*yaw system*).
- Emissão de ruído muito baixo: devido à operação com TSR relativamente baixa e diâmetros pequenos, a velocidade da ponta das pás é muito baixa (CHEN, Wei Hsin *et al.*, 2017).
- Baixo custo de fabricação: devido a perfis de pá simples, bem como na simplicidade no sistema de controle, ou seja, sem necessidade de inclinação (*pitch system*) e guinada (*yaw system*).

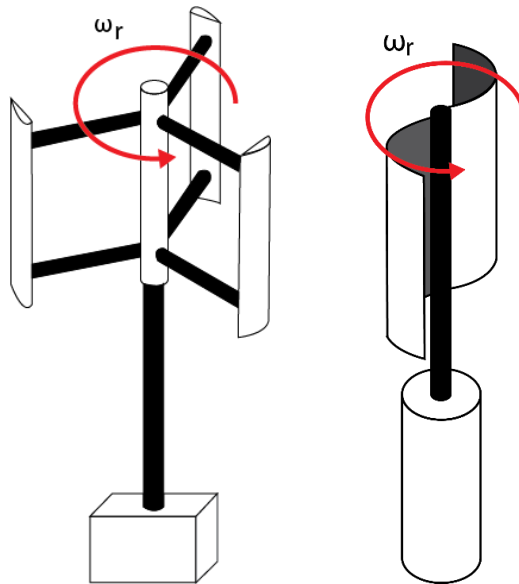
- Baixo custo de instalação e manutenção: devido o gerador estar no solo ou em pequenas alturas.
- Escalabilidade: a altura da turbina pode variar com um mínimo impacto no desempenho.
- Robustez e confiabilidade.
- Visualmente atraente.
- Alta eficiência de espaço: comparada com as turbinas de eixo horizontal.

As turbinas eólicas de eixo vertical são classificadas em dois tipos principais:

- Turbinas Eólicas de Darrieus:** É um tipo de turbina eólica de eixo vertical que consiste em um número de pás retas ou curvas montadas em uma estrutura vertical (Figura 6a). Essas turbinas funcionam a partir das forças de sustentação (*lift-based*) produzidas durante a rotação (STOUT *et al.*, 2017).
 - Turbinas Eólicas de Savonius:** São turbinas eólicas baseadas na força de arrasto (*drag-based*), que consistem em “colheres” (como são chamadas as pás devido a característica da seção transversal em “S”), conforme mostrado na Figura 6b, (STOUT *et al.*, 2017). Devido a esse arrasto, a eficiência dessas turbinas é menor em relação a outros tipos de turbinas.
- b) **Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal** (*Horizontal Axis Wind Turbines* - HAWTs): São turbinas cujo eixo do rotor está na horizontal (Figura 7). Estas turbinas são altamente dependentes da direção do vento e, portanto, geralmente são operadas em alturas mais altas que a VAWT.

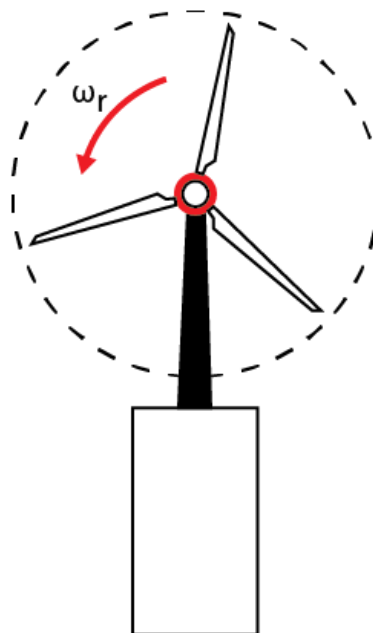
Figura 6 - Turbinas eólicas de eixo vertical.

(a) Turbina de *Darrieus* (b) Turbina *Savonius*



Fonte: Autoria própria (2020).

Figura 7 - Turbina eólica de eixo horizontal



Fonte: Autoria própria (2020).

2. Classificação baseada nas forças de sustentação (*lift*) e arrasto (*drag*):

- a) **Turbinas de sustentação (*lift-type*):** Onde a força predominante para promover a rotação da turbina é a força de sustentação. Turbina eólica de *Darrieus* e Turbinas eólicas de eixo horizontal (Figura 6a e Figura 7, respectivamente), são exemplos.
- b) **Turbinas de arrasto (*drag-type*):** Onde a força predominante para promover a rotação da turbina é a força de arrasto. Turbina eólica de *Savonius* (Figura 6b), é um exemplo deste tipo de dispositivo.

1.3 AERODINÂMICA DAS TURBINAS EÓLICAS DE *DARRIEUS*

Os aspectos fenomenológicos do escoamento de ar através das VAWTs é muito mais complexa em comparação com as HAWTs (REZAEIHA *et al.*, 2018a), complexidade essa atribuída a conversão instável de potência devido as grandes variações no ângulo de ataque e da velocidade relativa da turbina durante cada revolução. Outros aspectos que ressaltam essa complexidade são o efeito *stall* dinâmico (TESCIONE *et al.*, 2014), a interação da esteira e da pá da turbina, efeitos de curvatura, forças centrífugas na camada limite das pás (TESCIONE *et al.*, 2014) e vórtices nas pontas das pás.

A eficiência aerodinâmica nas turbinas é função das forças de sustentação, de arrasto e também da “velocidade de ponta de pá” (*tip-speed ratio* - TSR). O TSR é um importante parâmetro quando se trabalha com turbinas eólicas e é dado por (ABDALRAHMAN *et al.*, 2017):

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

onde ω_r é a velocidade angular do rotor, u_∞ é a velocidade de incidência do vento e R é o raio da turbina.

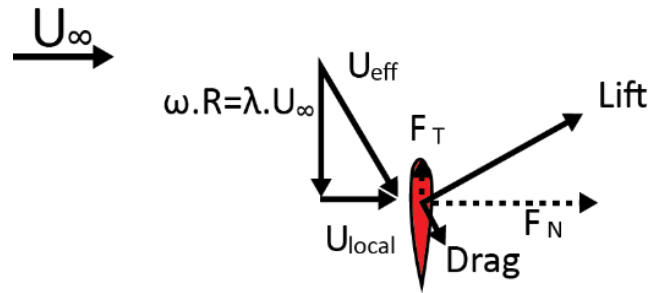
Outro parâmetro essencial que afeta as forças no perfil aerodinâmico da turbina é a solidez (σ), calculada como:

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

onde N é o número de pás, c a corda do perfil e D o diâmetro do rotor.

Torque é produzido a partir do escoamento de ar sobre o perfil das pás da turbina eólica. Como em qualquer perfil rotativo em turbomáquinas, um triângulo de velocidade é gerado a cada ponto. A Figura 8 mostra o triângulo de velocidades em um perfil aerodinâmico sujeito a rotação.

Figura 8 - Triângulo de velocidades sobre um perfil aerodinâmico.



Fonte: Autoria própria (2020).

A velocidade de incidência do vento U_∞ resulta em uma velocidade local na pá U_{local} que, juntamente com a rotação da turbina, geram o movimento circular da pá. Essa velocidade U_{local} pode ser decomposta em duas componentes, a componente da velocidade tangencial e a velocidade normal ao perfil.

$$U_T = \omega R - U_{local} \sin \theta \quad (3)$$

$$U_N = U_{local} \cos \theta \quad (4)$$

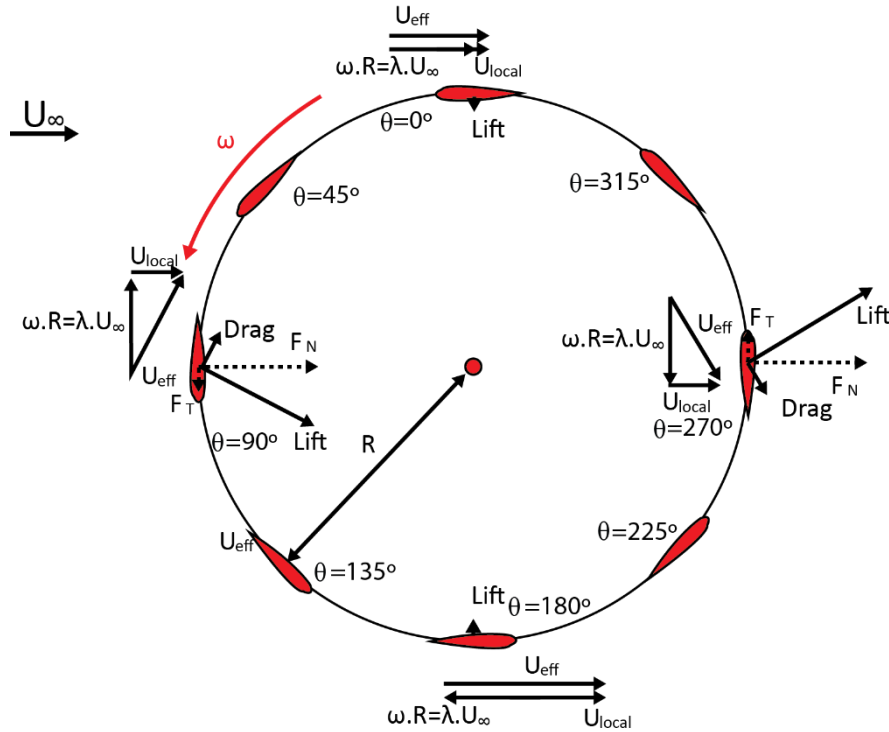
onde θ correspondente à posição azimutal.

A velocidade efetiva U_{eff} é dada pela equação:

$$U_{eff} = \sqrt{U_T^2 + U_N^2} \quad (5)$$

O esquema mostrado na Figura 9 apresenta o triângulo de velocidades sobre as pás, a direção das forças de sustentação (*Lift*) e arrasto (*Drag*) e sua decomposição em forças normais F_N e tangenciais F_T , em $\theta = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ e 270° .

Figura 9 - Esquema da rotação de uma VAWT de *Darrieus* em oito posições azimutais.



Fonte: Adaptado de (SIMÃO FERREIRA *et al.*, 2009)

O desempenho de uma turbina eólica *Darrieus* é função de vários parâmetros, tais como velocidade do vento, U_∞ , a potência mecânica de saída, P , o torque no eixo da turbina, T , e a área projetada do rotor, A . Pela combinação desses parâmetros, pode-se obter (MOHAMED, 2019):

$$C_t = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho A R U_\infty^2} \quad (6)$$

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

onde C_t e C_p são o coeficiente de torque e o coeficiente de potência, respectivamente.

A Equação (8) mostra a relação entre estes coeficientes.

$$C_p = \lambda C_t \quad (8)$$

O coeficiente de sustentação (C_l) e o coeficiente de arrasto (C_d) são dados por (ROY *et al.*, 2017):

$$C_l = \frac{F_L}{0,5\rho U_\infty^2 A} \quad (9)$$

$$C_d = \frac{F_D}{0,5\rho U_\infty^2 A} \quad (10)$$

onde, F_L e F_D são a força de sustentação e de arrasto, respectivamente.

Os valores de C_N (coeficiente de força normal) e C_T (coeficiente de força tangencial) são calculados por (ROY *et al.*, 2017):

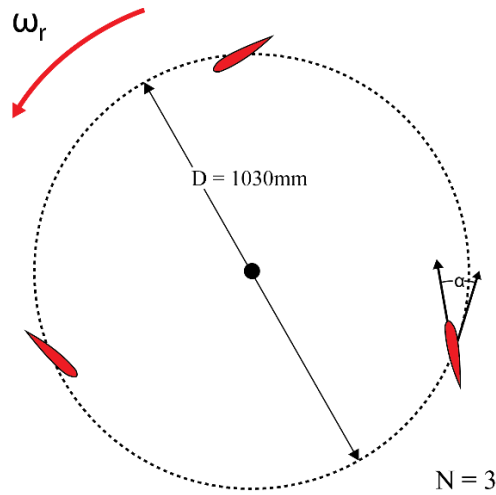
$$C_N = C_l \cos \alpha + C_d \sin \alpha \quad (11)$$

$$C_T = C_l \sin \alpha + C_d \cos \alpha \quad (12)$$

1.4 ASPECTOS GEOMÉTRICOS E OPERACIONAIS PARA A ANÁLISE DA TURBINA EÓLICA

Nesta pesquisa, são considerados cinco parâmetros geométricos para a análise de sensibilidade de uma turbina de 3 pás, sendo eles: o ângulo de ataque (α) (Figura 10), a espessura do perfil aerodinâmico (t), o arqueamento máximo do perfil (m), a posição do arqueamento (p) e a corda do perfil (c), mostrados na Figura 11.

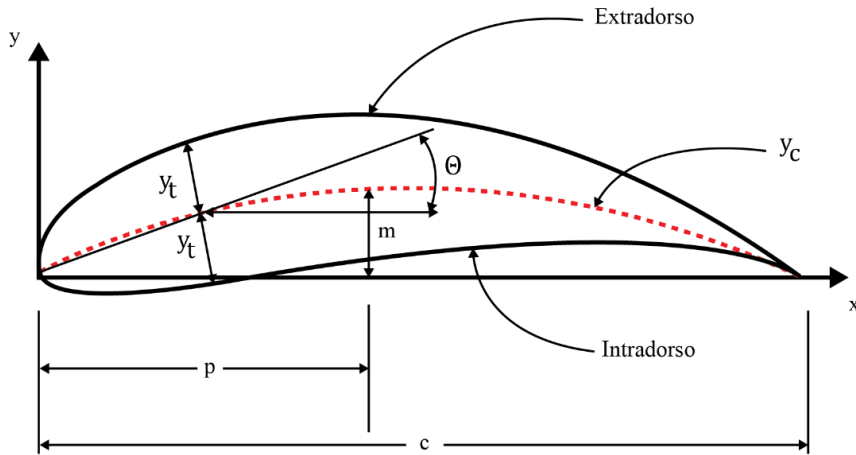
Figura 10 - Representação dos parâmetros geométricos da turbina



Fonte: Autoria própria (2020).

Para os parâmetros geométricos do perfil, será realizada a parametrização NACA-4 dígitos, que é uma representação sistemática de aerofólios com base na espessura (t), no arqueamento máximo do perfil (m) e na sua respectiva posição (p) (LU *et al.*, 2018).

Figura 11 - Perfil aerodinâmico do tipo NACA 4-dígitos



Fonte: Autoria própria (2020).

A linha de arqueamento y_c mostrada na Figura 11 é gerada a partir de dois arcos de parábola, tangentes no ponto de arqueamento máximo (m), como mostra a Equação (13) e a Equação (14).

$$y_c = \frac{m}{(p/10)^2} \left[2x \left(\frac{p}{10} \right) - x^2 \right], x \leq (p/10) \quad (13)$$

$$y_c = \frac{m}{[1 - (p/10)]^2} \left\{ \left[1 - 2 \left(\frac{p}{10} \right) \right] + 2x \left(\frac{p}{10} \right) - x^2 \right\}, x > (p/10) \quad (14)$$

onde (x, y_c) é o par de coordenadas cartesianas para cada ponto da linha de arqueamento do perfil e $p/10$ é a posição do arqueamento máximo.

Em seguida um polinômio modificado define a distribuição de espessura como mostra a Equação (15).

$$y_t = t(a_0\sqrt{x} - a_1x - a_2x^2 + a_3x^3 - a_4x^4) \quad (15)$$

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 seguintes equações.

$$x_u = x - y_t \sen\Theta, \quad (16)$$

$$y_u = y_c + y_t \cos\Theta, \quad (17)$$

$$x_l = x + y_t \sen\Theta, \quad (18)$$

$$y_l = y_c - y_t \cos\Theta, \quad (19)$$

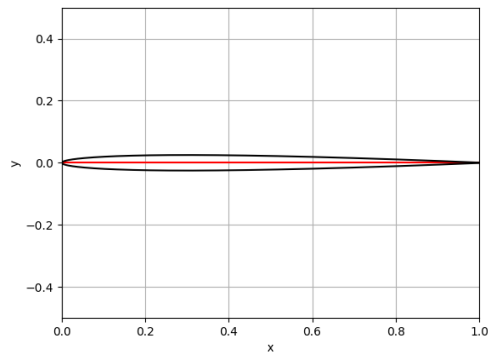
onde $\Theta = \arctan(\Delta y_c / \Delta x)$, que é a inclinação da linha de arqueamento em relação a direção horizontal.

Com a parametrização NACA-4 dígitos é possível gerar perfis simétricos e assimétricos. Alguns exemplos de perfis simétricos e assimétricos são representados na

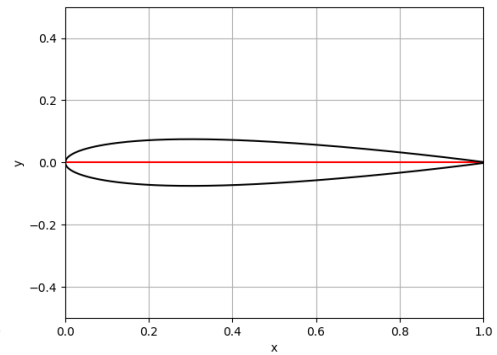
Figura 12 e Figura 13, respectivamente.

Figura 12 - Perfis NACA-4 dígitos simétricos.

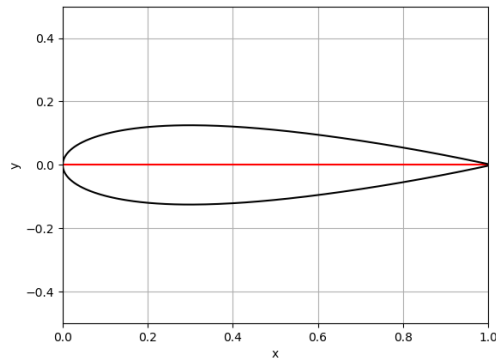
(a) NACA0005



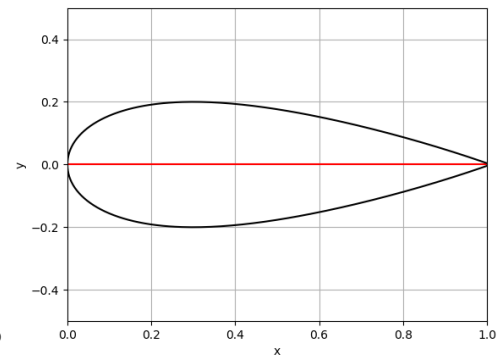
(b) NACA0015



(c) NACA0025



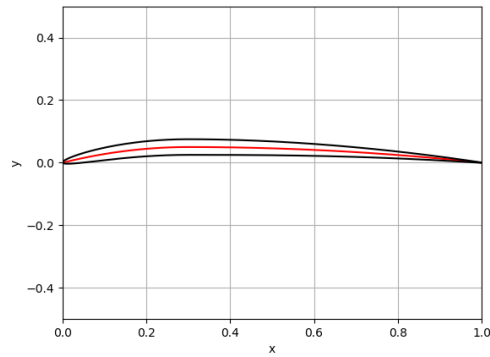
(d) NACA0040



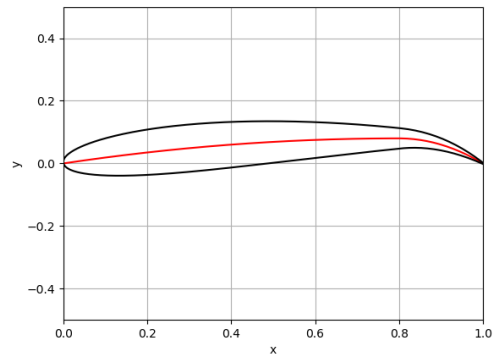
Fonte: Autoria própria (2020).

Figura 13 - Perfis NACA-4 dígitos assimétricos.

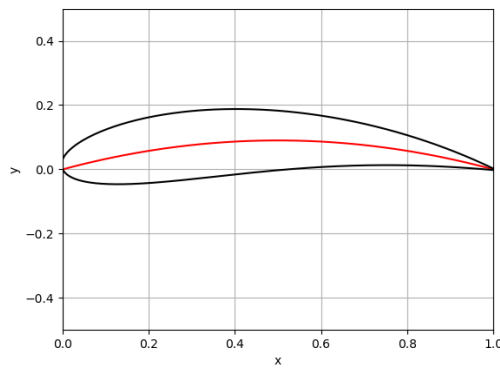
(a) NACA5305



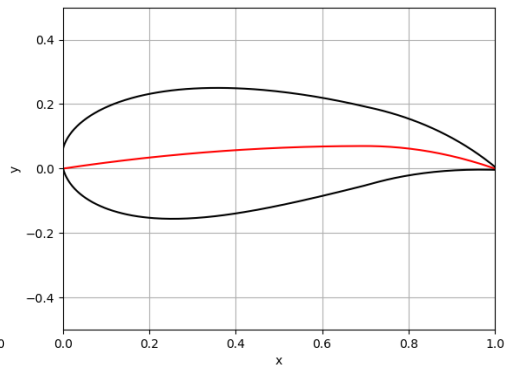
(b) NACA8815



(c) NACA9521



(d) NACA7740



Fonte: Autoria própria (2020).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A aplicação de ferramentas de simulação computacional, como a Dinâmica dos Flúidos Computacional (CFD), tem demonstrado ser uma excelente opção de análise para turbinas de pequena escala do tipo *Darrieus* (HAMEED, 2013; NACCACHE; PARASCHIVOIU, 2018; REZAEIHA *et al.*, 2017; ROY *et al.*, 2017; SRANPAT *et al.*, 2017).

Análises para a turbina *Darrieus* com perfil aerodinâmico das pás sendo do tipo NACA 4 dígitos são muito comuns, em especial os perfis simétricos, visto a facilidade de encontrar dados experimentais para validação do modelo numérico (BAI *et al.*, 2015; BALDUZZI *et al.*, 2016; MUKESH *et al.*, 2014; STOUT *et al.*, 2017; TUMMALA *et al.*, 2016). Muito ainda se discute no que diz respeito aos parâmetros operacionais e geométricos da turbina a serem empregados na simulação, assim como direcionamentos para o tamanho do domínio computacional, discretização espacial e temporal (RACITI CASTELLI *et al.*, 2011; REZAEIHA *et al.*, 2017; REZAEIHA *et al.*, 2018a; SRANPAT *et al.*, 2017; TRIVELLATO; RACITI CASTELLI, 2014).

É possível encontrar trabalhos com a análise de turbinas de 2 e 3 pás para diferentes valores de TSR (que relaciona a velocidade do escoamento) e diferentes perfis. No entanto, sem detalhes da relação de cada parâmetro geométrico sobre o coeficiente de potência, bem como suas possíveis interações, mas somente uma análise comparativa entre perfis diferentes.

Raciti Castelli *et al.* (2011) fazem um estudo para uma turbina vertical do tipo *Darrieus* com 3 pás e com perfil aerodinâmico NACA0021, com corda $c = 85,8\text{mm}$ e confrontam o modelo numérico com dados experimentais da mesma configuração. Esses dados experimentais são muito utilizados por diversos autores como forma de validação do modelo numérico (HASHEM; MOHAMED, 2018; MOHAMED, 2019), inclusive para esse trabalho.

É comum encontrar na literatura trabalhos que estudam uma única configuração da turbina de *Darrieus*, mais especificamente para os perfis simétricos NACA0012, NACA0015, NACA0018 e NACA0021 (HAMEED, 2013).

Outros trabalhos avaliam perfis aerodinâmicos que possuem pequenas diferenças de geometria entre si, como por exemplo o trabalho realizado por ROY *et al.*, 2017. No entanto existe carência de trabalhos que analisem todos os perfis enquadrados dentro de uma parametrização específica. ROY *et al.*, 2017 avaliam uma turbina de 3 pás para 12 perfis aerodinâmicos, sendo 4 deles simétricos e provenientes da parametrização NACA-4 dígitos (NACA0012, NACA0015, NACA0018 e NACA0021), 4 provenientes da parametrização

NACA-5 dígitos (NACA23015, NACA23018, NACA23021 e NACA63215) e 4 perfis Selig (S1046, S1048, S2027 e SG6040), no entanto o valor da corda do perfil (c) é constante e nenhuma consideração foi feita para o ângulo de incidência (α). Com o número reduzido de casos avaliados (amostra), não seria possível fazer uma análise de sensibilidade (metodologia de regressão não paramétrica) dos parâmetros geométricos robusta o suficiente, então os autores se reservam no direito de fazer uma análise comparativa comum entre os perfis de cada grupo e achar os melhores candidatos entre eles.

Hashem e Mohamed (2018) realizam um dos estudos com maior amostra para turbinas de *Darrieus* de 3 pás, levando em consideração a análise aerodinâmica de uma turbina com 24 perfis aerodinâmicos diferentes e, nesse caso também selecionam os melhores candidatos para cada tipo de parametrização. Novamente, não analisam outros parâmetros geométricos que não estejam relacionados ao formato do perfil das pás e não aprofundam a discussão dos efeitos fenomenológicos do escoamento associados a cada um dos parâmetros em si.

Ghasemian *et al.* (2017), apresentam um estudo contendo 20 configurações possíveis (relacionadas exclusivamente aos perfis aerodinâmicos) e criam uma discussão sobre os efeitos da espessura e da assimetria no desempenho das turbinas de *Darrieus*. Essa discussão abre caminho para análises mais completas dos efeitos da geometria das pás no coeficiente de potência (C_p).

Alguns autores apresentam estudos relevantes para turbinas com perfis de pá exclusivamente assimétricos, como é o caso de (BAUSAS; DANAIO, 2015; JAFARYAR *et al.*, 2016), esses últimos fazem uso de 15 perfis do tipo NACA 4-dígitos assimétricos. Dado o grande emprego de perfis NACA 4-dígitos nas análises das turbinas de *Darrieus*, temos um argumento para a escolha desse tipo de parametrização no presente trabalho.

Devido a rotação da turbina, existem especulações sobre a influência do ângulo de incidência (α) das pás no desempenho da turbina, uma vez que os coeficientes aerodinâmicos são funções do mesmo (ABDALRAHMAN *et al.*, 2017; LI, CHAO *et al.*, 2013).

O fato de que os fenômenos físicos provenientes da rotação da turbina são complexos, implica na dificuldade de encontrar relações diretas deles com os parâmetros geométricos da turbina. Por esse motivo, um bom caminho é recorrer a ferramentas estatísticas e, portanto, fazer um estudo amostral robusto e contundente.

Este trabalho, além de estudar os aspectos da parametrização NACA-4 dígitos, analisa uma grande quantidade de perfis (simétricos e assimétricos), acrescento à análise outros 2 parâmetros geométricos da turbina, sendo eles a corda do perfil (c) e o ângulo de incidência (α). Outra novidade desse trabalho diz respeito à análise de sensibilidade dos parâmetros

geométricos da turbina utilizando a metodologia *Smoothing Spline ANOVA* (SS-ANOVA), que é uma metodologia de regressão não paramétrica usada para fins estatísticos e será explicada na Seção 3.8. Esta metodologia não tem sido empregada nos estudos de turbinas eólicas, sendo, portanto, carente de investigação. Tal abordagem só é possível devido ao grande número de configurações (amostra) submetidas a Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD).

3 METODOLOGIA

Para a modelagem da dinâmica do escoamento do fluido através da turbina, serão resolvidas as equações de Navier-Stokes (*Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes - URANS*) (HASHEM; MOHAMED, 2018), usando o algoritmo *Coupled*, como proposto por REZAEIHA *et al.*, 2017) para o acoplamento pressão-velocidade. A discretização é realizada através da Metodologia dos Volumes Finitos, considerando as hipóteses de escoamento bidimensional, incompressível e turbulento em regime transitório. Essas hipóteses são adequadas para a modelagem da dinâmica do escoamento de acordo com (HASHEM; MOHAMED, 2018).

Dessa maneira, a equação da continuidade pode ser apresentada na forma tensorial como mostra a Equação (20), (HASHEM; MOHAMED, 2018).

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (20)$$

E as equações de quantidade de momento podem ser escritas conforme mostrado pela Equação 21.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_i \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\overline{u'_i u'_j}) \quad (21)$$

3.1 MODELO DE TURBULÊNCIA

O modelo de turbulência utilizado é o *Transition SST (Shear Stress Transport)* que é baseado no acoplamento das equações de transporte $k - \omega$ SST (Equação (20) e Equação (21)), com duas outras equações de transporte, uma para a intermitência e outra para o critério de transição inicial, em termos do número de Reynolds (Re) (ANSYS FLUENT THEORY GUIDE, 2013). Uma correlação empírica (MENTER, 2004) foi desenvolvida para cobrir tanto a transição, quanto escoamentos livres em baixa intensidade de turbulência.

3.1.1 Equações de transporte k – ω SST

As equações de transporte k – ω SST ocorrem através de uma mistura entre os modelos k – ω (utilizado para situações próximas à parede) e k – ε (para situações longe da parede) (VACCARI *et al.*, 2017), que são calculados através do transporte de tensão de cisalhamento turbulenta. É escrito em função de k e ω que representam a energia cinética turbulenta e a taxa de dissipação específica, respectivamente. O modelo k – ω e o k – ε são ambos multiplicados por uma função que engloba os dois modelos e depois são somados (ANSYS FLUENT THEORY GUIDE, 2013). As equações da energia cinética turbulenta e da dissipação específica turbulenta ficam escritas como:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} k) = P_k - \beta^* \rho k \omega + \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] \quad (22)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \omega) = \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \tilde{\beta} \rho \omega^2 + (1 - F_1) \rho \frac{2}{\alpha_\omega} \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\nu_t}{\sigma_\omega} \right) \nabla \omega \right] \quad (23)$$

onde β^* , σ_ω , σ_k , α_ω , e $\tilde{\beta}$ são constantes que valem 0,09, 2, 2, 0,52 e 0,075, respectivamente.

Já F_1 corresponde à função responsável por unir os modelos k – ε e k – ω conhecida como função de mistura. Essa função se caracteriza por possuir os valores iguais a:

- 1 (conduzindo ao modelo k – ω padrão) na extremidade interna da camada limite turbulenta e,
- 0 (correspondendo ao modelo k – ε padrão) na região de corrente livre.

A escolha pelo modelo de turbulência *Transition SST* é justificada na Seção 3.6.

3.2 DOMÍNIO COMPUTACIONAL E CONDIÇÕES DE CONTORNO

Este trabalho considera VAWTs do tipo *Darrieus* utilizadas para a geração de energia descentralizada em residências, pequenas propriedades (principalmente se essas estiverem situadas longe da rede de distribuição elétrica), repartições públicas, prédios ou em ambiente urbano diverso.

Neste trabalho é utilizado o software *Design Modeler*, que é uma ferramenta computacional do pacote ANSYS *Academic Research CFD* para o desenvolvimento da

geometria. Para esse trabalho as características geométricas fixas da turbina eólica são mostradas na Tabela 1.

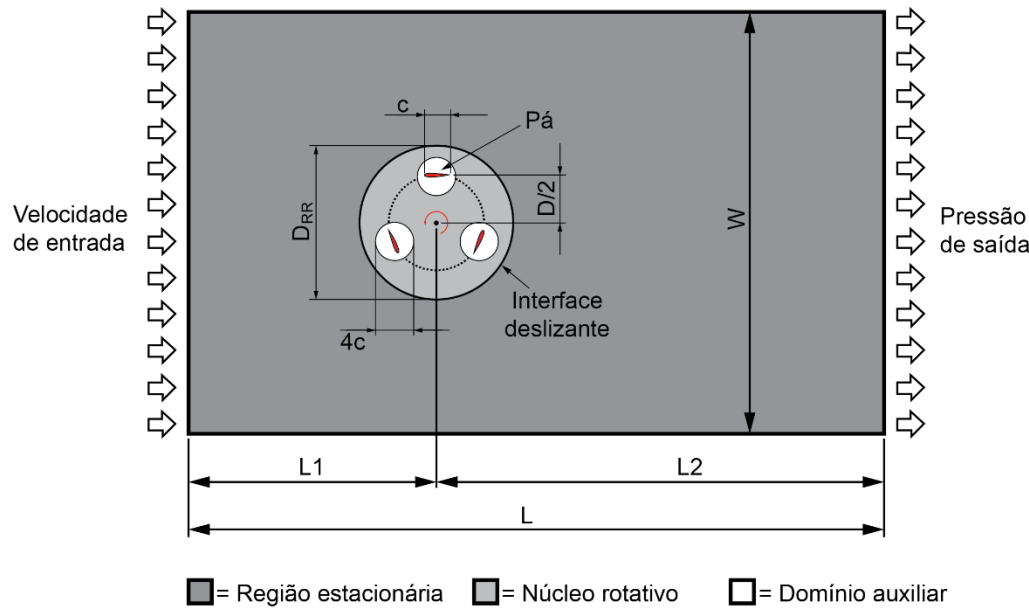
Tabela 1 - Características geométricas fixas da turbina.

Características	
Diâmetro do rotor da turbina (D) [mm]	1030
Altura do rotor (H) [m]	1 (simulação 2D)
Número de pás (N) [-]	3

Fonte: Autoria Própria (2020).

Como o objetivo do presente trabalho foi reproduzir a operação de uma máquina rotativa, foi necessário subdividir o domínio computacional em três subdomínios. Assim, o domínio computacional consiste em um núcleo rotativo, no qual a turbina é localizada, um domínio estacionário envolvendo este núcleo rotativo (REZAEIHA *et al.*, 2017), e mais um domínio circular que envolve as pás com intuito de controlar a qualidade da malha (principalmente quanto a criação de prismas) ao redor do perfil aerodinâmico. Uma interface deslizante entre o domínio estacionário e o núcleo rotativo permite a rotação da turbina como é mostrado na Figura 14.

Figura 14 - Domínio computacional com as condições de contorno estabelecidas.



Fonte: Autoria Própria (2020).

As dimensões do domínio computacional mostradas na Figura 14 seguem as recomendações presentes nos principais trabalhos na literatura (Rezaeiha et al., 2017; Rezaeiha et al., 2018a; Rezaeiha et al., 2018b), e estão representadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Dimensões do domínio computacional.

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

Fonte: Autoria Própria (2020).

3.3 CRITÉRIO DE y^+ E O NÚMERO DE COURANT

Uma análise robusta do fenômeno físico pode ser feita verificando as duas principais variáveis que descrevem a qualidade da modelagem numérica próximo à parede, ou seja, a distância adimensional (y^+) e o Número de Courant (Co). É comum na literatura que um valor de $y^+ \sim 1$ é adequado para descrever bem o escoamento próximo às paredes, por outro lado, não tem sido muito comum encontrar análises sobre o Número de Courant, o que é fundamental para os casos transitórios. O número de Courant é definido como (TRIVELLATO; RACITI CASTELLI, 2014):

$$Co = \frac{u\Delta t}{\Delta x} \quad (24)$$

onde u é a velocidade do escoamento local no elemento da malha; Δt (*time-step*) e Δx (dimensão de uma célula da malha) são as discretizações temporais e espaciais, respectivamente.

Quando são feitas simulações numéricas com médias e grandes taxas de rotação, a vorticidade é difícil de ser resolvida devido ao forte acoplamento existente nas equações de momento, afinal, grandes taxas de rotação envolvem grandes gradientes de pressão na direção radial e isso introduz dificuldades na obtenção da solução convergida (TRIVELLATO; RACITI CASTELLI, 2014). Essas dificuldades são ainda intensificadas por outra fonte de

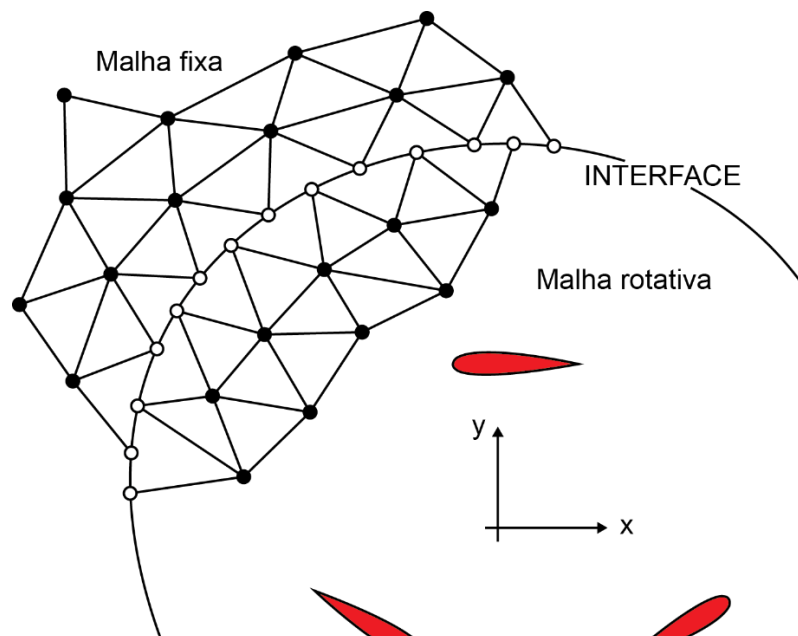
imprecisão decorrente dos modelos numéricos transitórios; o passo de tempo (*time-step*) deve ser escolhida corretamente para obter resultados confiáveis. Esse problema leva ao amplamente conhecido critério CFL (Courant-Friedrichs-Lewy) para a estabilidade numérica, que impõe um limite ao valor máximo permitido de Co , e é matematicamente expresso em uma dimensão como (TRIVELLATO; RACITI CASTELLI, 2014):

$$CFL = Co < 1 \quad (25)$$

Nesse contexto ainda é importante ressaltar que para garantir a estabilidade do cálculo, métodos implícitos de discretização são considerados mais estáveis no que diz respeito ao tamanho do *time-step*.

A fronteira comum entre o domínio rotativo e o domínio fixo é definida como uma interface conservativa. A Figura 15 apresenta um exemplo dessa interface, composta por uma malha triangular não estruturada.

Figura 15 - Interface entre Domínio Fixo e Rotativo



Fonte: Adaptado de (TRIVELLATO; RACITI CASTELLI, 2014).

É boa prática reproduzir a malha de maneira tal que os elementos na interface do domínio fixo com o domínio rotativo tenham a mesma dimensão, desta maneira a análise do número de Courant é mais precisa e, conseqüentemente, evita dificuldades numéricas

(TRIVELLATO; RACITI CASTELLI, 2014). A Figura 15 mostra a discretização feita para a presente modelagem numérica.

Mesmo para $Co < 1$, oscilações numéricas podem ser verificadas, especialmente devido aos efeitos de não linearidade (BALDUZZI *et al.*, 2016). Alguns trabalhos indicam que um Co operacional entre 5 e 10 para turbomáquinas, resolvido com um esquema implícito, fornece as melhores propriedades de amortecimento de erros (AMANO; SUNDEN, 2011; HEAM, 2008). No entanto, estudos recentes apontam que, na prática, como regra geral, o número de CFL deve ser tão pequeno quanto o praticamente permitido, sendo praticado na modelagem de turbinas eólicas o valor igual ou menor a 0,5 (TRIVELLATO; RACITI CASTELLI, 2014).

A interpretação física para a condição de CFL é a razão entre a distância convectiva durante um intervalo de tempo (*time-step*), $u\Delta t$, e a discretização espacial local, Δx , ou seja, o intervalo de tempo deve permitir que as informações tenham tempo suficiente para percorrer o elemento da malha. Para problemas bidimensionais pode ser descrita como:

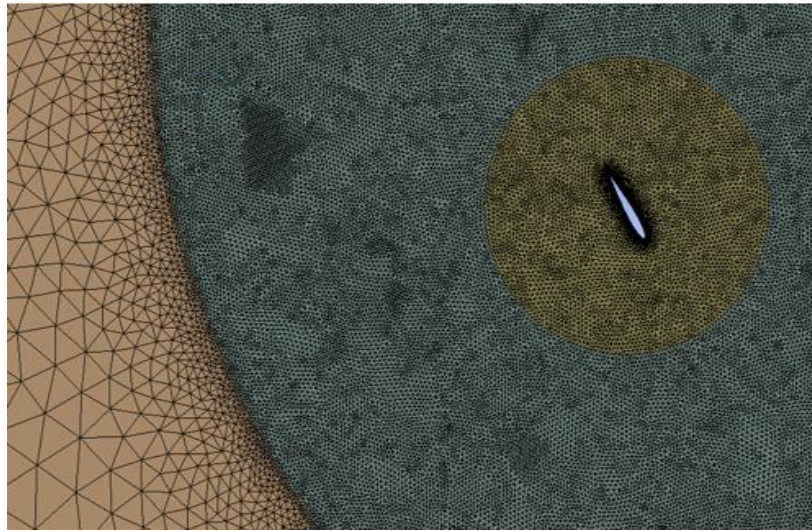
$$\Delta L = \max (\Delta x, \Delta y). \quad (26)$$

3.4 CARACTERIZAÇÃO DA MALHA COMPUTACIONAL

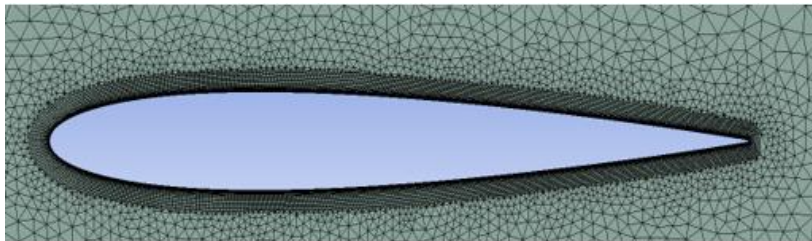
O modelo de malha deslizante (*Sliding Mesh Model*) é usado para capturar os parâmetros dinâmicos do escoamento devido à rotação das pás da turbina. Com isso, uma malha com células triangulares não estruturadas é criada usando o *software* ANSYS Meshing, conforme mostrado na Figura 16.

Figura 16 - Malha computacional.

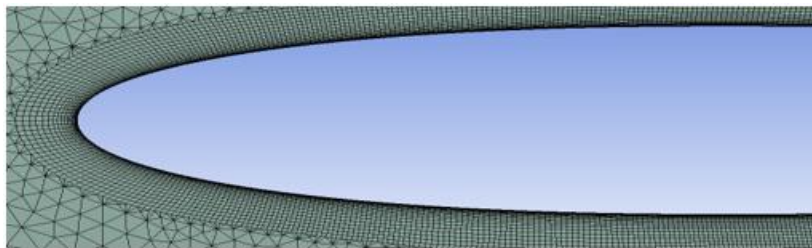
(a) Interface entre os domínios Fixo e Rotativo.



(b) Detalhes ao redor do aerofólio.



(c) Camadas de elementos prismáticos sobre o Perfil NACA.



Fonte: Autoria Própria (2020).

O tamanho das células entre os domínios fixo e rotativo são similares para minimizar erros numéricos na interface, conforme mostrado pela Figura 16a. Além disso, o tamanho do primeiro elemento no perfil (Figura 16b) é definido de maneira tal a atender à condição de $y^+ < 1$, sendo essa necessária para atender aos critérios sugeridos para o modelo de turbulência (*Transition SST*). Para melhor caracterizar os gradientes sobre ao perfil aerodinâmico, camadas de prismas são desenvolvidas, conforme indicado pela Figura 16c. Com isso, obteve-se uma malha com aproximadamente 612.000 elementos.

Ainda nesse trabalho são geradas outras duas malhas, sendo uma mais grosseira e uma mais refinada para análise de convergência de malha (*Grid Convergence Index-GCI*), que será exposta na Seção 3.5.

Considerando as exigências necessárias apresentadas para que a análise numérica seja robusta e tenha acuracidade suficiente para representar o fenômeno físico do escoamento através da turbina eólica *Darrieus*, foram consideradas as seguintes configurações:

Tabela 3 - Configurações principais da simulação.

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

Fonte: Autoria Própria (2020).

3.5 ANÁLISE DE CONVERGÊNCIA DE MALHA

Com o intuito de avaliar a independência dos resultados em função do refino da malha computacional, um caso de referência foi analisado para três tipos de malha: grosseira, mediana e refinada. Dessa maneira é possível empregar a metodologia GCI (*Grid Convergence Index*), proposto por (ÇELİK & MERAL, 2019), para quantificar os erros de discretização.

A metodologia GCI é baseada no método de extrapolação de Richardson (RICHARDSON; GAUNT, 1927; RICHARDSON, 1910) e amplamente utilizada em análises de CFD (BALDUZZI *et al.*, 2016; DEZAN *et al.*, 2019; GHASEMIAN *et al.*, 2017; REZAEIHA *et al.*, 2017; REZAEIHA *et al.*, 2018b; TUMMALA *et al.*, 2016).

Para a execução do GCI alguns passos foram definidos. O primeiro deles é definir o tamanho h representativo das malhas. Para cálculos tridimensionais (CELIK *et al.*, 2008) propõe,

$$h = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Delta V_i) \right]^{1/3}. \quad (27)$$

E, para cálculos bidimensionais:

$$h = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Delta A_i) \right]^{1/2}. \quad (28)$$

onde ΔV_i é o volume, ΔA_i é a área do i -ésimo elemento e N é o número total de elementos usados na simulação.

É então definido três tipos de malhas diferentes, sendo uma grosseira, uma mediana e uma refinada para as simulações e determinar o valor das variáveis importantes para o objetivo do estudo (CELIK *et al.*, 2008). Para a escolha dessas diferentes malhas é desejável que o fator de refinamento entre as malhas, r , seja maior que 1,3 (valor baseado no empirismo e não em definição formal), ou seja,

$$r_{21} = \frac{h_{refinada}}{h_{mediana}} > 1,3 \quad (29)$$

$$r_{32} = \frac{h_{mediana}}{h_{grosseira}} > 1,3 \quad (30)$$

Após esses procedimentos, as simulações são conduzidas para a determinação do valor das variáveis importantes para o objetivo do trabalho (nesse caso o C_p) e, seguindo o procedimento analítico apresentado por Celik *et al.* (2008) é possível definir o valor de GCI.

Para esse trabalho foram conduzidas duas análises GCI, sendo uma para as simulações usando um *time-step* angular de 1° e outra para as simulações com *time-step* angular de 0,5°. O intuito dessas duas análises foi garantir a robustez da simulação para os diferentes valores de *time-step* angulares. A Tabela 4 mostra os resultados dessa análise.

Tanto as análises GCI quanto a validação numérica (Seção 3.6) foram feitas para uma configuração padrão de turbina Darrieus que é apresentada na Tabela 5. Tal configuração é baseada no trabalho desenvolvido por (RACITI CASTELLI *et al.*, 2011).

Tabela 4 - Detalhes das malhas utilizadas para a análise de sensibilidade e erros de discretização.

	1°	0,5°
N_1, N_2, N_3	450947, 262123, 152118	450947, 262123, 152118
r_{21}	1,3116	1,3116
r_{32}	1,3127	1,3127
C_{p1}	0,296888	0,302563
C_{p2}	0,28709	0,294454
C_{p3}	0,180052	0,184032
GCI^{32} (%)	0,41927	0,26794

Fonte: Autoria Própria (2020).

Portanto, de acordo com a Tabela 4, a incerteza numérica na solução entre as duas malhas (mediana e grosseira) utilizando o modelo de turbulência Transition SST é de 0,27% (*time-step* angular de 0,5°). Essa pequena porcentagem de incerteza justifica a escolha da utilização da malha mediana para as simulações.

Tabela 5 - Principais características do modelo de validação.

Características	Valor
Perfil aerodinâmico	NACA 0021
Corda (c) [mm]	85,8
Diâmetro do rotor 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 (2020).

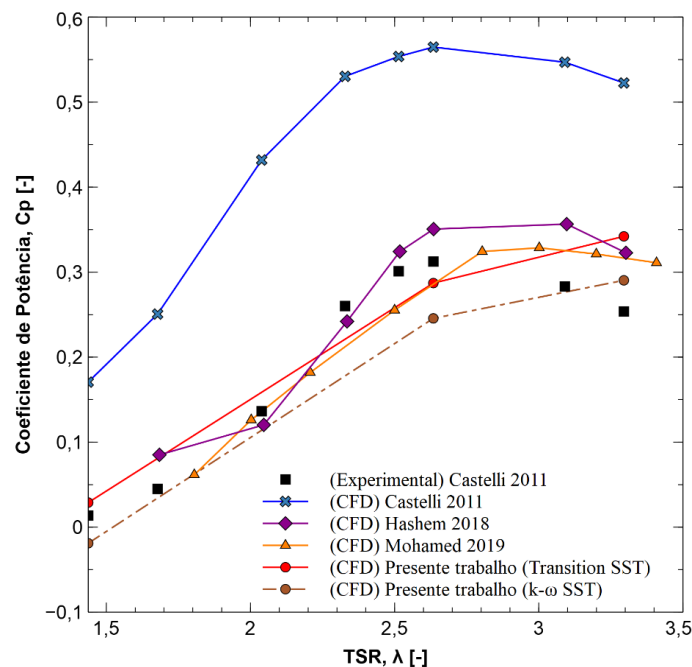
3.6 VALIDAÇÃO NUMÉRICA

Para analisar a validade da modelagem numérica proposta, foram feitas simulações para dois modelos de turbulência, sendo eles, o $k - \omega$ SST e o Transition SST. Os resultados

numéricos foram comparados com dados experimentais (RACITI CASTELLI; ENGLARO; BENINI, 2011) amplamente difundidos na comunidade acadêmica.

Para uma primeira comparação, foram feitas simulações com *time-step* angular de 1° que é o mesmo desenvolvido por (RACITI CASTELLI *et al.*, 2011), (HASHEM; MOHAMED, 2018; MOHAMED, 2019). A partir da análise de GCI, é importante lembrar que os resultados de C_p apresentados na Figura 17 são referentes à configuração de malha mediana.

Figura 17 - Validação numérica para a turbina de *Darrieus*.



Fonte: Autoria Própria (2020).

É possível verificar que ao atender os critérios de y^+ , Co e realizando uma adequada análise de sensibilidade de malha, os resultados da simulação numérica tornam-se suficientemente satisfatórios para os propósitos do trabalho. A partir da Figura 17, é possível concluir ainda que o modelo de turbulência *Transition SST* permite obter valores numéricos mais próximos dos valores experimentais do que aqueles resultantes do modelo $k-\omega$ SST. No entanto, como o objetivo do trabalho é conduzir a análise de sensibilidade dos parâmetros da turbina eólica, foi feita ainda uma análise da convergência por número de revoluções para os dois modelos de turbulência com intuito de decidir qual deles demanda menor recurso computacional (tempo de simulação).

3.6.1 Convergência por número de revoluções

Sendo o objetivo do trabalho realizar a análise de sensibilidade para os parâmetros geométricos da turbina, muitas simulações serão executadas, logo, surge a preocupação quanto ao tempo requerido para executar as simulações numéricas. Nesse contexto, foi necessário avaliar a convergência por número de revoluções para os dois modelos de turbulência citados nesse trabalho, com o intuito de tomar a decisão mais adequada.

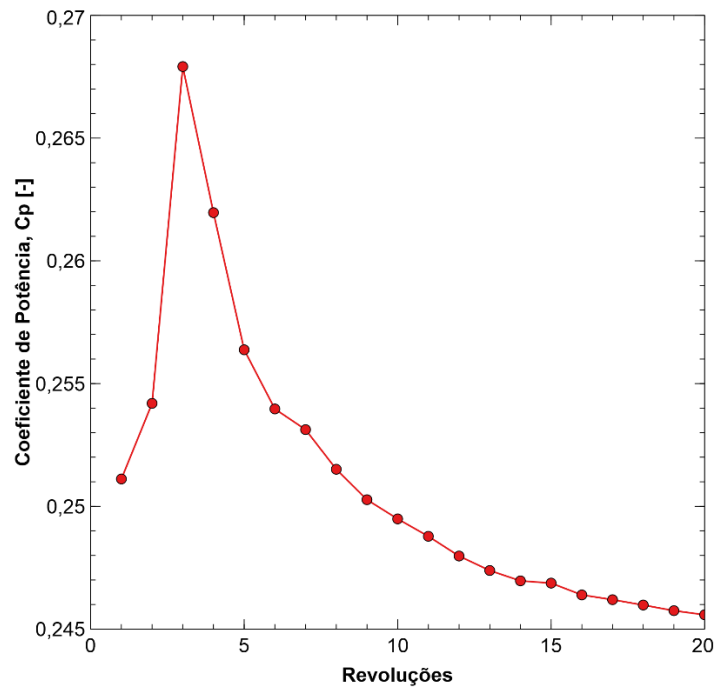
Para avaliar a convergência, foram rodadas simulações para o mesmo modelo da validação (Tabela 5) e $\lambda=2,63$. A Figura 18 mostra a convergência por número de revoluções para o modelo $k - \omega$ SST e *Transition* SST, respectivamente.

Comparando os dois modelos de turbulência (Figura 18a e Figura 18b), é possível identificar que o modelo *Transition* SST converge com um número menor de revoluções. Assim, conclui-se que o modelo de turbulência *Transition* SST, além de permitir valores numéricos mais próximos aos experimentais, ainda apresenta a característica de convergir com um menor número de revoluções, logo, é pertinente utilizá-lo para conduzir as simulações decorrente do DoE (*Design of Experiment*) necessário para a aplicação da análise de sensibilidade através do método SS-ANOVA.

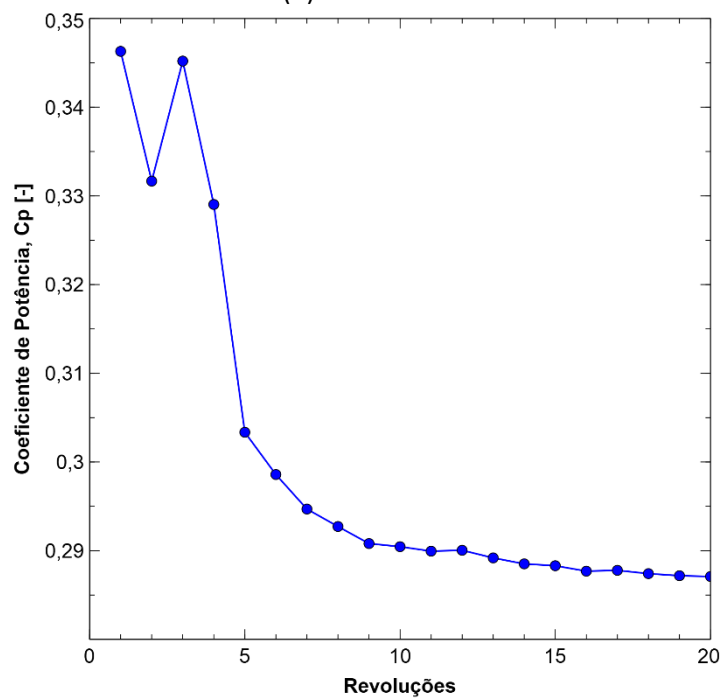
A robustez da solução numérica utilizando o modelo de turbulência *Transition* SST também é verificada pela análise do y^+ (nas pás da turbina), Figura 19, enquanto a Figura 20 mostra o atendimento do número de Co (avaliada na interface deslizante) para a última revolução.

Figura 18 - Convergência do coeficiente de potência (C_p) em função do número de revoluções.

(a) $k - \omega$ SST

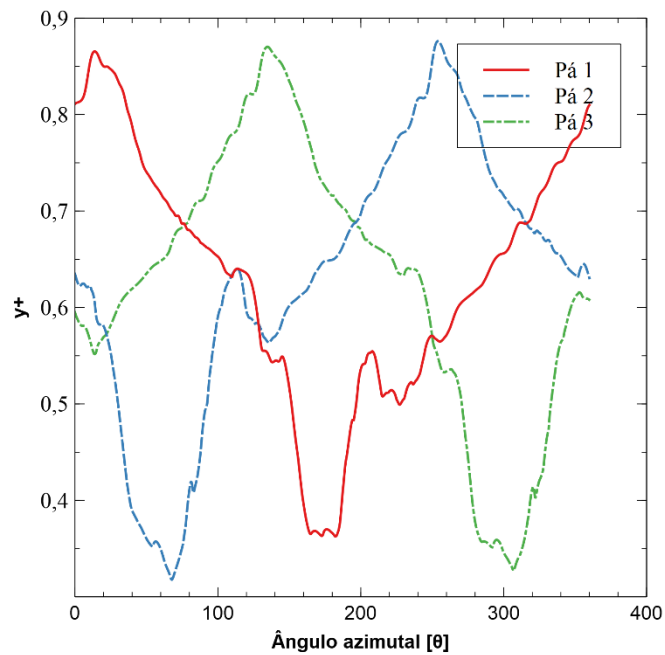


(b) Transition SST



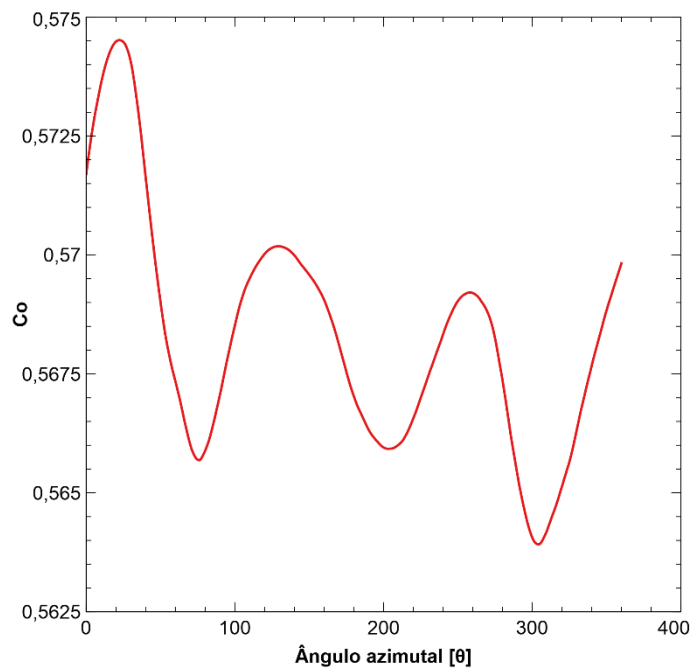
Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 19 - Critério de y^+ nas pás.



Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 20 - Número de Courant máximo para a última revolução na interface deslizante.



Fonte: Autoria Própria (2020).

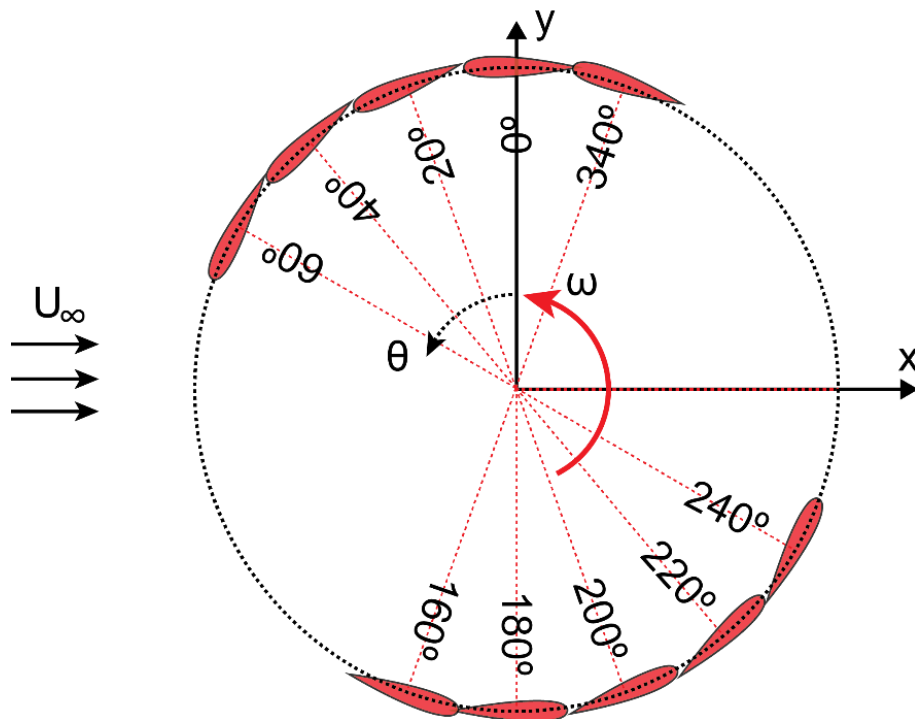
Dado o exposto, é possível observar que para a última revolução $y^+ < 1$ e $Co < 1$ na interface deslizante, muito próximo do valor de 0,5, conforme a recomendação.

3.6.2 Análise do *time-step* angular

Embora os dados experimentais fornecidos por Castelli et al. (2011) sejam amplamente utilizados e são referência para inúmeros trabalhos sobre o tema, a abordagem numérica dessa mesma referência não é suficientemente robusta (ver Figura 17). Apesar das análises feitas neste presente trabalho (y^+ e Co) já fornecerem valores numéricos mais próximos aos dados experimentais, ainda não exime a necessidade de estudar um outro parâmetro importante para a acuracidade das simulações. Esse parâmetro é o *time-step* angular.

O *time-step* angular diz respeito a quantidade de posições azimutais (θ) nas quais uma pá da turbina assume durante uma revolução da turbina eólica. A Figura 21 esquematiza a variação da posição da pá durante a revolução.

Figura 21 - *Time-step* angular para uma turbina eólica Darrieus.



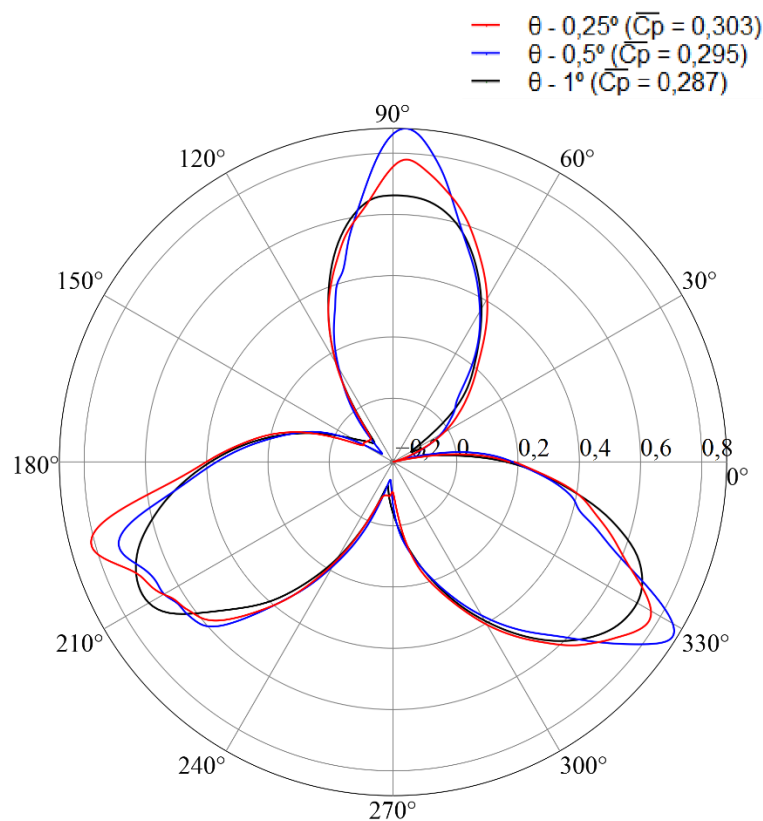
Fonte: Autoria Própria (2020).

Observando a literatura é possível concluir que a variação do ângulo azimutal θ deve ser o menor possível para uma melhor representação do fenômeno físico. Embora (RACITI CASTELLI *et al.*, 2011) executem a simulação com um *time-step* angular de 1° , nesse trabalho avaliamos valores de *time-step* angulares menores ($0,5^\circ$ e $0,25^\circ$). A Figura 22 mostra o coeficiente de potência (C_p) para a última revolução (após a convergência).

Dado o exposto na Figura 22, é possível concluir que quanto menor for o *time-step* angular, mais próximo é o resultado numérico do experimental ($\overline{C_p} = 0,312$). No entanto, a escolha do *time-step* angular também deve considerar o recurso computacional disponível e o tempo de processamento para cada simulação. Com o recurso disponível, o tempo de cada simulação aumenta para *time-step* angulares menores e, para a execução da análise de sensibilidade, as simulações foram realizadas com $\theta = 0,5^\circ$, visto que essas demandam muito tempo para serem concluídas e foi gerado um *Design* de Experimentos (DoE) inicial com 100 configurações (amostra) para realizar a análise de sensibilidade para os parâmetros geométricos da turbina eólica.

Dessa forma a Tabela 6 resume todas as configurações finais para as simulações.

Figura 22 - Análise do *time-step* angular.



Fonte: Autoria Própria (2020).

Tabela 6 - Configurações finais para as simulações e número de casos para o DoE.

Parâmetro	Especificação
Modelo de turbulência	Transition SST
Solver	Pressure-based
Propriedades do fluido	Incompressível
Algoritmo de solução	Coupled
<i>Time-step</i> angular	0,5° (Seção 3.6)
Iterações por <i>time-step</i>	30
Revoluções para convergência	10 (Seção 3.5 e Seção 3.6)
Número de casos para o DoE	100

Fonte: Autoria Própria (2020).

3.7 DESIGN DE EXPERIMENTOS (DoE)

O *Design de Experimentos* (*Design of Experiments* - DoE) é definido como um ramo da estatística aplicada que lida com o planejamento, a condução, a análise e a interpretação de testes controlados para avaliar os fatores que controlam o valor de um parâmetro ou grupo de parâmetros (WANG, 2018). O DoE é uma poderosa ferramenta de coleta e análise de dados que pode ser usada em várias situações experimentais (YANG, 2018). Essencialmente o DoE fornece uma distribuição das variáveis de entrada em um campo amostral, permitindo, então, a aplicação de ferramentas estatísticas para identificar os efeitos principais e de interação entre as variáveis (NAZEMIAN, M. *et al.*, 2019).

O DoE se baseia no planejamento da entrega do experimento (nesse caso simulações numéricas) em condições estatisticamente adequadas ao método de análise empregado, dadas as restrições de recursos disponíveis (recurso computacional) (MARTINEZ, 2019). As principais preocupações incluem a validade, confiabilidade e replicabilidade da análise.

Existem várias abordagens para determinar o conjunto de pontos de *design* (combinações únicas das configurações das variáveis independentes) a serem usadas no DoE. Nesse trabalho é feito o levantamento do DoE utilizando o método *Optimal Space-Filling Design* (OSF) (BATES *et al.*, 2003), chamado também de *Uniform Latin Hypercube Sampling* (ULHS). Na literatura são encontrados muitos trabalhos que utilizam essa abordagem para

geração do DoE devido sua uniformidade (CHEN *et al.*, 2019; DEZAN *et al.*, 2019; KENNY, 1998; NAVID *et al.*, 2018; ZHANG *et al.*, 2020).

3.7.1 Método *Optimal Space-Filling Design* (OSF)

O método OSF gera um DoE de acordo com critérios específicos. Essencialmente, o OSF é um LHS (*Latin Hypercube Sampling*) que é otimizado várias vezes (BATES *et al.*, 2003). O método LHS é uma forma avançada do método de amostragem de Monte Carlo, onde nenhum ponto compartilha uma linha ou coluna do espaço de *design* com qualquer outro ponto (KENNY, 1998). O OSF é inicializado como um LHS e otimizado várias vezes, permanecendo um LHS válido (sem pontos compartilhando linhas ou colunas) e, ao mesmo tempo, obtendo uma distribuição espacial mais uniforme dos pontos (maximizando a distância entre os pontos).

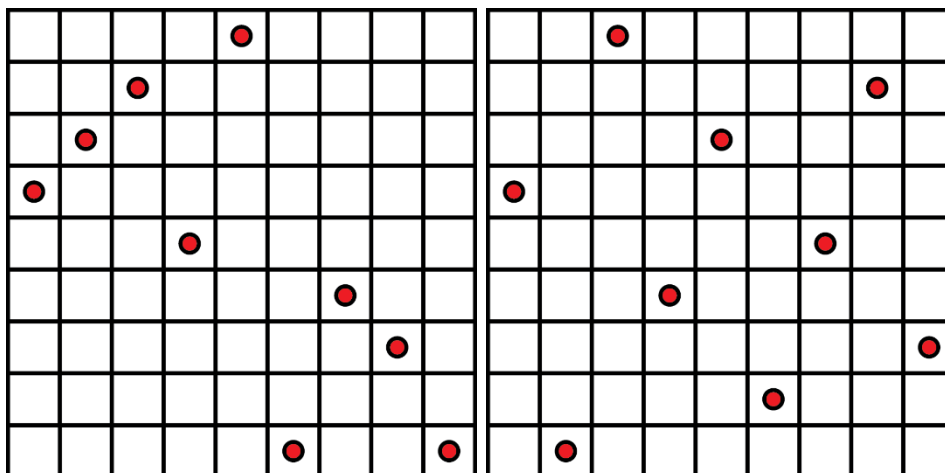
O OSF é capaz de distribuir os parâmetros igualmente por todo o espaço amostral, com o objetivo de obter o máximo de informações com o menor número de pontos (ANSYS FLUENT THEORY GUIDE, 2013).

A Figura 23 mostra a comparação entre os métodos LHS e OSF para 9 pontos de projeto (configurações).

Figura 23 - Distribuição espacial das variáveis para diferentes tipos de DoE.

(a) LHS com 9 pontos de design

(b) OSF com 9 pontos de design



Fonte: Autoria Própria (2020).

A Figura 23a mostra a distribuição espacial a partir do método LHS, enquanto a Figura 23b apresenta o resultado qualitativo para o método OSF, que é essencialmente um LHS que é

otimizado por várias iterações, maximizando a distância entre pontos para obter uma distribuição mais uniforme no espaço amostral (CLARICH *et al.*, 2014).

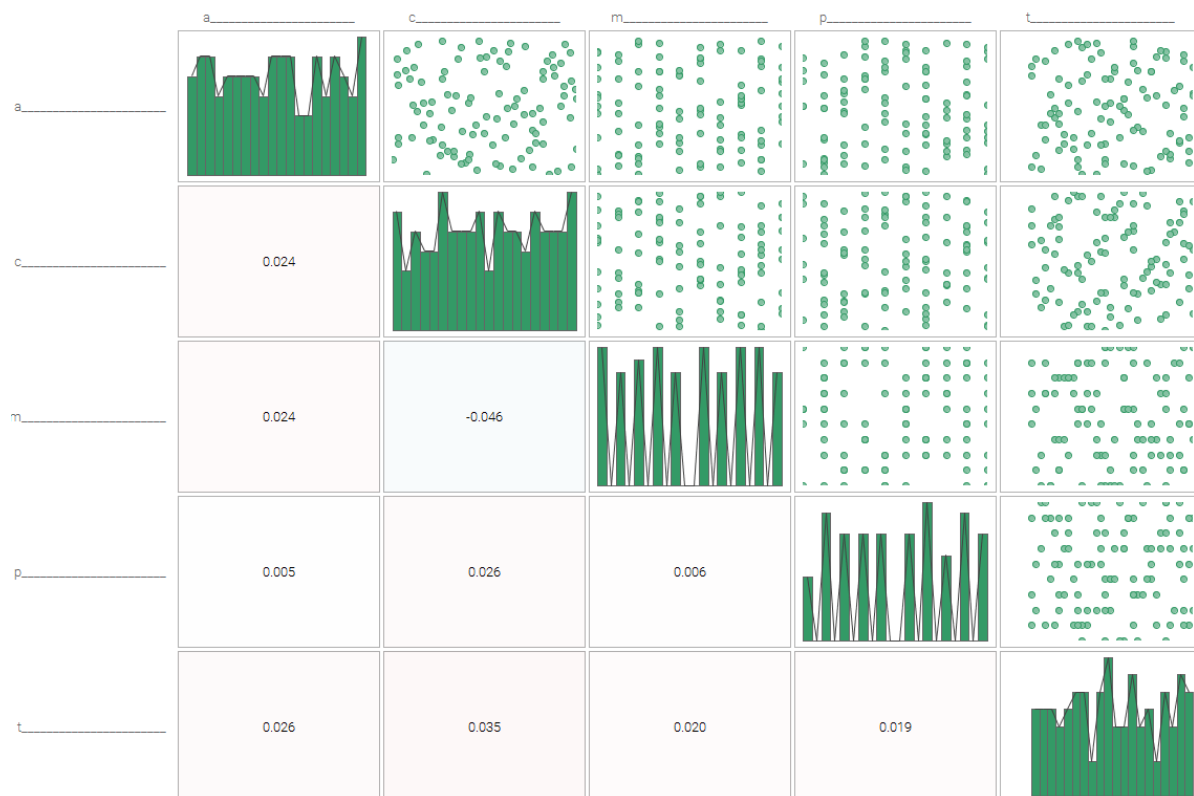
Nesse trabalho é feito um DoE com 100 configurações (amostra), considerando os parâmetros a serem analisados e suas respectivas faixas operacionais são mostradas na Tabela 7. O espaço amostral é mostrado na Figura 24.

Tabela 7 - Faixas para cada variável de entrada para a construção do DoE.

Parâmetro	Faixa operacional	Incremento
Arqueamento (m) [-]	0 - 9	1
Posição do arqueamento (p) [-]	1 - 9	1
Espessura do perfil (t) [-]	5 - 40	1
Corda do perfil (c) [mm]	50 - 200	0,5
Ângulo de incidência (α) [°]	-15 - 15	0,1

Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 24 - Matriz de dispersão dos parâmetros



Fonte: Autoria Própria (2020).

As correlações para cada par de variáveis de entrada são mostradas abaixo da diagonal da Figura 24, com valores entre -1 e +1; valores próximos a +1 mostram que as variáveis possuem uma forte correlação direta, valores próximos a -1 indicam que as variáveis possuem uma forte correlação inversa, enquanto valores próximos a zero sugerem baixa correlação entre esse par de variáveis (Correlação de Pearson (ESTECO, 2020)). Como os parâmetros foram distribuídos uniformemente no espaço amostral, espera-se que todas correlações sejam próximas de zero. Os gráficos de dispersão acima da diagonal mostram as configurações para cada par de variáveis e como estão distribuídas em um espaço bidimensional. A posição de cada ponto é determinada pelas coordenadas cartesianas das duas variáveis. É possível observar nos gráficos de dispersão apresentados que os valores dos parâmetros estão adequadamente dispersos.

Os gráficos da diagonal principal mostram a Função de Densidade de Probabilidade (*Probability Density Function* - PDF). Na teoria da probabilidade, uma Função de Densidade de Probabilidade (PDF), ou densidade de uma variável aleatória contínua, é uma função que descreve a probabilidade relativa de uma variável aleatória assumir um determinado valor. A probabilidade de que a variável aleatória esteja dentro de um determinado intervalo de valores é dada pela integral desta densidade variável ao longo desse intervalo. O gráfico de Função de Densidade de Probabilidade (PDF) resume graficamente a distribuição de uma variável, dividindo seu intervalo de valores em classes de tamanhos iguais e contando o número de amostras que se enquadram em cada classe. Nesse caso os gráficos de PDF mostrados na Figura 24, corroboram a uniformidade da distribuição dos valores dos parâmetros em suas faixas operacionais.

3.8 METODOLOGIA *SMOOTHING SPLINE*-ANOVA (SS-ANOVA)

Smoothing spline ANOVA (SS-ANOVA) é uma abordagem promissora para extrair informações de dados numerosos e ruidosos (HELWIG; MA, 2016). Os métodos SS-ANOVAs podem modelar dados multivariados e fornecerem boa interpretação do resultado de modelagem e previsão (GU, 2013). Além disso, assumindo que os parâmetros de suavização são selecionados por meio de validação cruzada, modelos SS-ANOVA mostram ter propriedades assintóticas desejáveis (GU, 2013; LI, 1987; WAHBA, 1990).

Um dos métodos de regressão não paramétrica mais populares que surgiu a partir literatura estatística é o *Smoothing Spline* ANOVA (SS-ANOVA). O método SS-ANOVA é

considerado uma técnica não paramétrica adequada para modelagem ou para estimar funções univariadas e multivariadas (RICCO; TURCO, 2013). Neste método, uma função F é reproduzida pelo espaço de Hilbert (RICCO; TURCO, 2013) e esta função tem uma decomposição ANOVA na qual,

$$F(t) = X + \sum_{\delta} f_{\delta}(t_{\delta}) + \sum_{\delta < \tau} f_{\delta\tau}(t_{\delta}, t_{\tau}) \quad (31)$$

onde X é a média, f_{δ} representa os efeitos principais e $f_{\delta\tau}$ representa os efeitos de interação de dois fatores.

Nesta abordagem, os efeitos de interação de três fatores e de ordem superior de interações são normalmente excluídos da decomposição ANOVA para reduzir os esforços computacionais e melhorar a interpretação dos resultados do modelo de regressão (RICCO; TURCO, 2013). Depois de ajustar uma SS-ANOVA, ou seja, depois que o modelo foi treinado sobre os dados de uma determinada amostra, é importante realizar alguns diagnósticos da qualidade do modelo. Uma ferramenta de diagnóstico útil para avaliar a qualidade do modelo é o índice de colinearidade (RICCO; TURCO, 2013).

Para garantir que os vetores de uma coluna (parâmetros) não sejam paralelos (pelo menos quase ortogonais) entre si, os índices de colinearidade devem ser próximos a 1,0. Por outro lado, se os parâmetros forem altamente correlacionados, os índices de colinearidade podem apresentar valores muito superiores a 1,0 (RICCO; TURCO, 2013). Algumas recomendações podem ser feitas para evitar esse problema, tais como: a seleção de bons pontos de amostragem, uma quantidade adequada de pontos de amostragem e evitar usar variáveis de entrada dependentes, por exemplo, variáveis linearmente dependentes. Nesse trabalho essas recomendações são consideradas e justificam o uso do método ULHS para criação de um DoE com distribuição uniforme.

A vantagem do método SS-ANOVA é a visualização de algumas relações entre as variáveis de entrada (parâmetros), o que não é facilmente observado quando são usados métodos de regressão paramétrica (RICCO; TURCO, 2013). No entanto, esse método estatístico normalmente requer altos recursos computacionais, o que é função tanto da complexidade do problema quanto do tamanho da amostra, o que acontece nesse trabalho.

No método SS-ANOVA o efeito das diferentes variáveis de entrada que compõem o modelo pode ser avaliado por meio do índice de contribuição (RICCO; TURCO, 2013), como mostrado na Equação (32):

$$\tau_i = \frac{r_i^*, r^*}{r^{*2}} \quad (32)$$

onde r_i^* e r^* são vetores coluna de comprimento n .

A relação entre esses dois vetores, baseada na função de decomposição ANOVA de um modelo treinado avaliado nos pontos de amostragem (RICCO; TURCO, 2013), é escrita da seguinte maneira:

$$r^* = \sum_{i=1}^k r_i^* \quad (33)$$

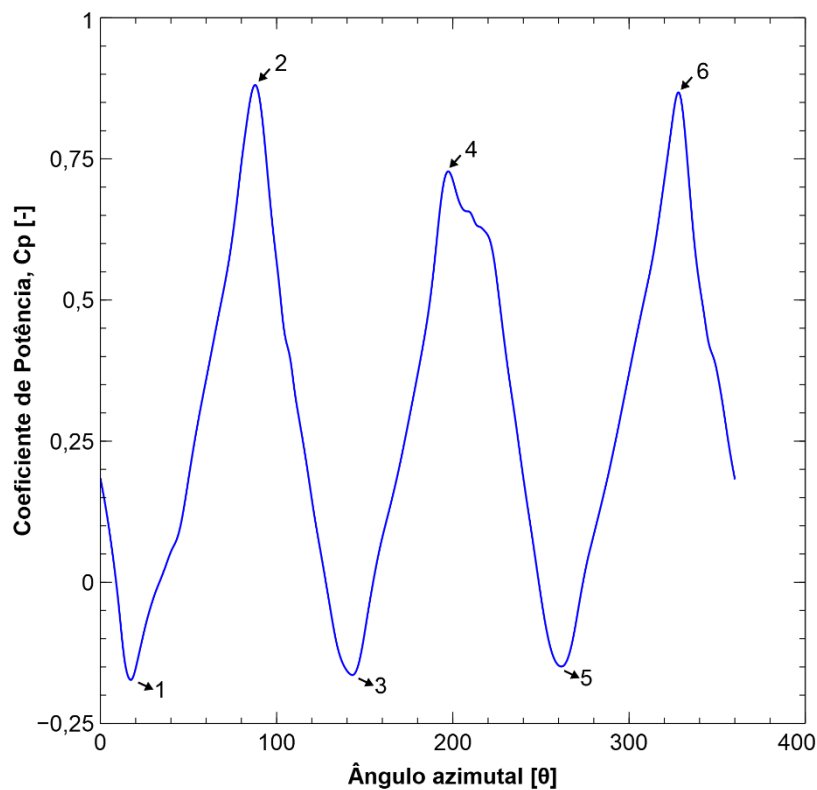
Se os vetores r_i^* são aproximadamente ortogonais entre si, o valor de τ_i fornece a decomposição percentual da variância no modelo, ou seja, cada termo da decomposição ANOVA representa a porcentagem da contribuição relativa para a variância global (RICCO; TURCO, 2013). Assim, valores menores de τ_i indicam termos desprezíveis; por sua vez, valores mais altos de τ_i revelam termos essenciais que devem ser mantidos no modelo estatístico.

DEZAN *et al.*, 2019 usaram o SS-ANOVA para a análise de seleção de parâmetros de aletas com geradores de vórtice em um estudo de transferência de calor. Por estas razões, o método SS-ANOVA representa uma técnica de triagem adequada para detectar variáveis importantes em um determinado conjunto de dados. Neste trabalho utilizamos esse método com a implementação realizada dentro do *software* ESTECO ModeFrontier (ESTECO, 2020). A formulação matemática da técnica e algumas aplicações de referência estão incluídos também na documentação do *software* (RICCO; TURCO, 2013).

4 RESULTADOS

Dado o exposto nas seções anteriores deste trabalho, o objetivo é realizar a análise de sensibilidade de uma turbina eólica de eixo vertical do tipo *Darrieus*, cujos parâmetros de entrada são variados de acordo com as faixas mostradas na Tabela 7 para $\lambda=2,63$ (valor máximo verificado para os dados experimentais, conforme Figura 17). Portanto, foi feita a simulação para a configuração padrão da turbina eólica *Darrieus* utilizada na validação numérica (ver Tabela 5), e o Coeficiente de Potência (C_p) instantâneo (para a última revolução simulada) é mostrado na Figura 25.

Figura 25 - Coeficiente de Potência Instantâneo C_p da Turbina Eólica de *Darrieus*.



Fonte: Autoria Própria (2020).

A partir da análise da Figura 25, observou-se que existem pontos de máximos e de mínimos para o C_p instantâneo. A Tabela 8 apresenta o detalhamento destes pontos.

Tabela 8 - Valores máximos e mínimos do C_p da Turbina Eólica *Darrieus*.

Pontos	Ângulo Azimutal (θ)	C_p
1	17,5°	-0,1729
2	88°	0,8809
3	143°	-0,1644
4	197,5°	0,7279
5	261,5°	-0,1493
6	328°	0,8680

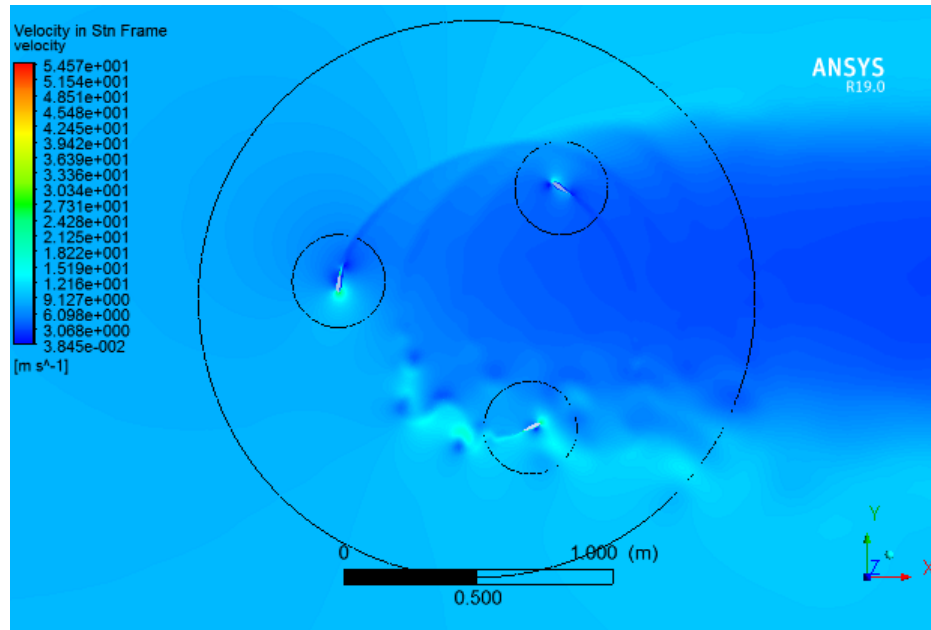
Fonte: Autoria Própria (2020).

Em relação ao ângulo azimutal (θ), adotou-se que a rotação acontece no sentido anti-horário e que a turbina parte de $\theta=0^\circ$ com a pá 1 na direção horizontal, conforme indicado na Figura 14 e na Figura 21. Assim, a Figura 26 e a

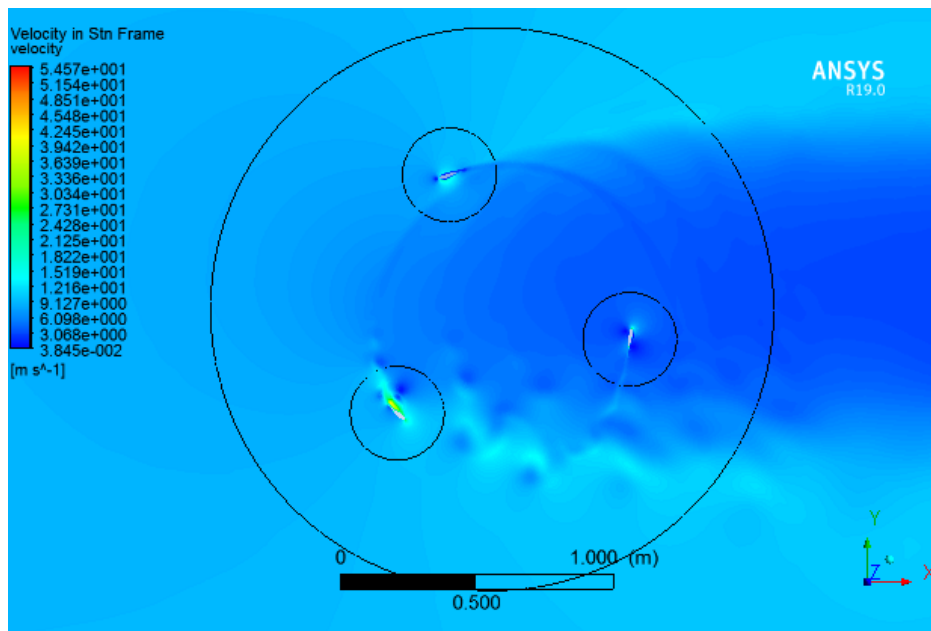
Figura 27 apresentam, respectivamente, os campos de velocidade e pressão para os pontos 2 e 3.

Figura 26 - Campo de velocidade para a configuração padrão da turbina eólica (Tabela 5).

(a) $\theta = 88^\circ$



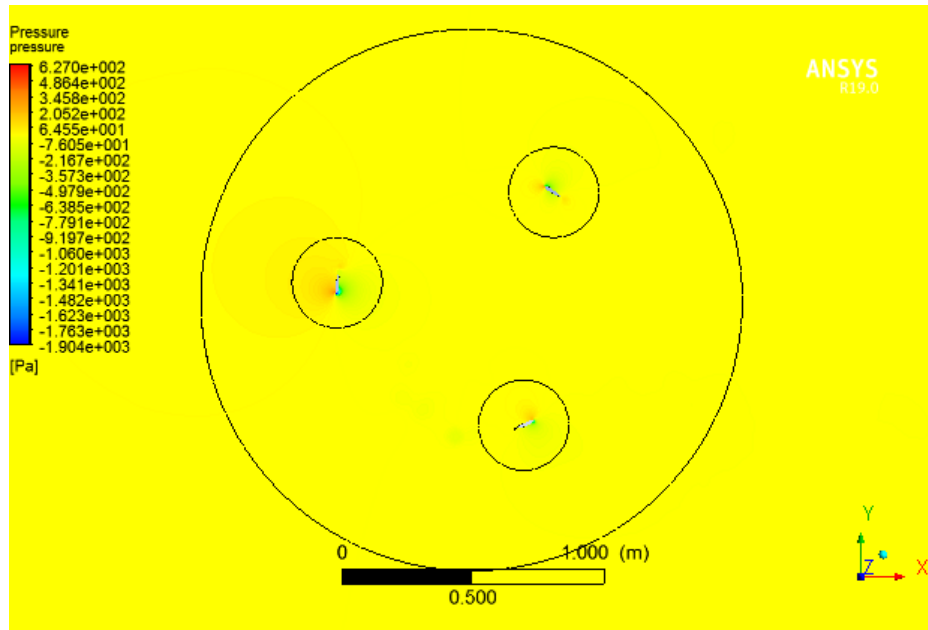
(b) $\theta = 143^\circ$



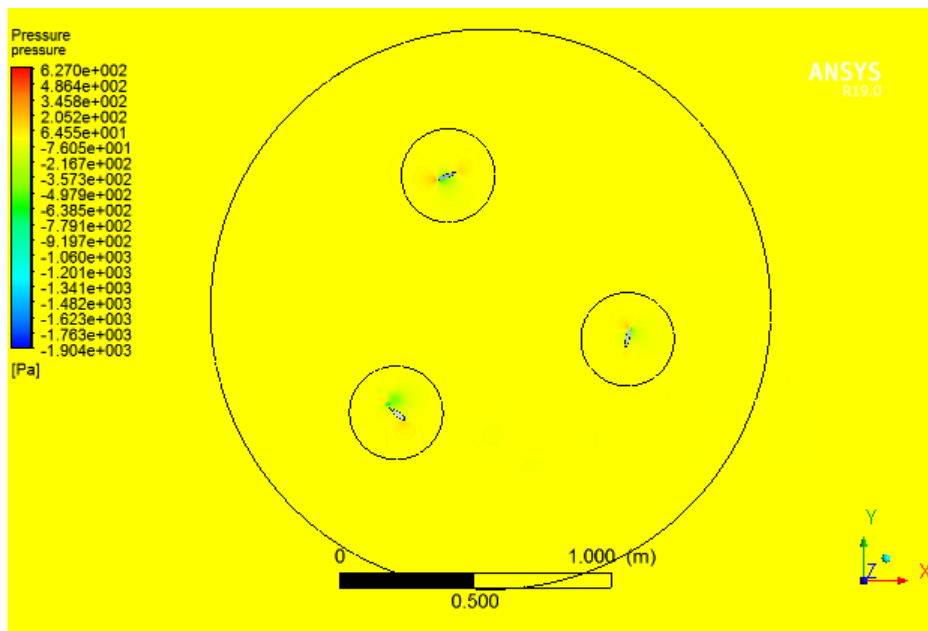
Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 27 - Campo de pressão para a configuração padrão da turbina eólica (Tabela 5).

(a) $\theta = 88^\circ$



(b) $\theta = 143^\circ$

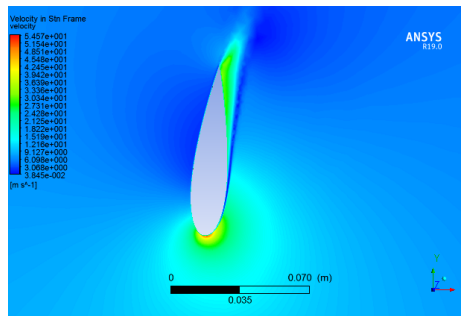


Fonte: Autoria Própria (2020).

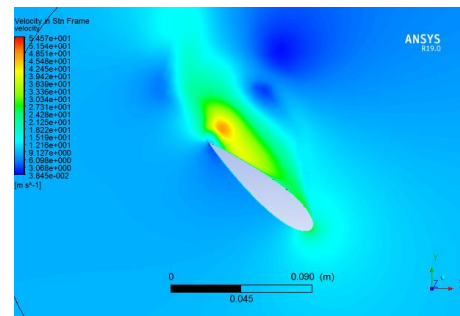
A Figura 28 e a Figura 29 apresentam, respectivamente, os campos de velocidade e pressão em detalhe para cada uma das pás da turbina.

Figura 28 - Campo de velocidade para as pás da turbina.

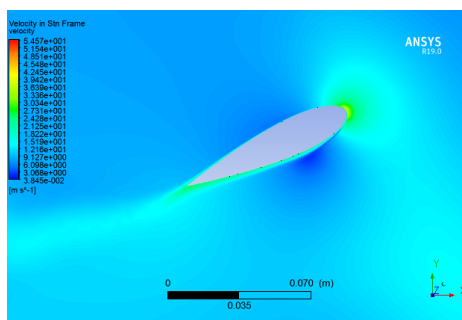
(a) Pá 1 - $\theta = 88^\circ$



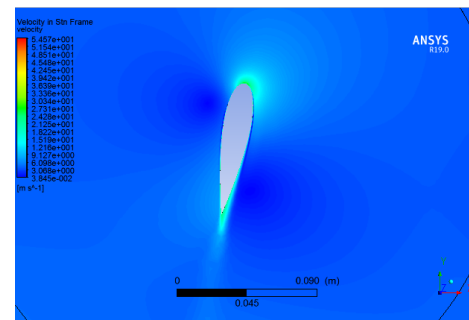
(b) Pá 1 - $\theta = 143^\circ$



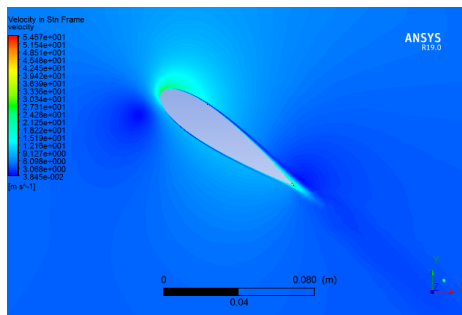
(c) Pá 2 - $\theta = 88^\circ$



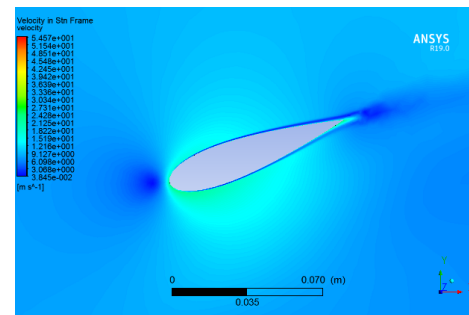
(d) Pá 2 - $\theta = 143^\circ$



(e) Pá 3 - $\theta = 88^\circ$



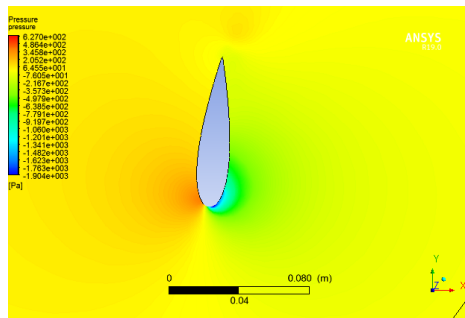
(f) Pá 3 - $\theta = 143^\circ$



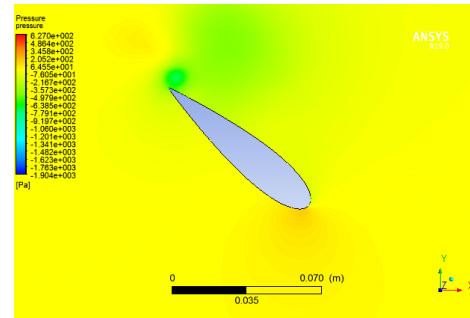
Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 29 - Campo de pressão para as pás da turbina.

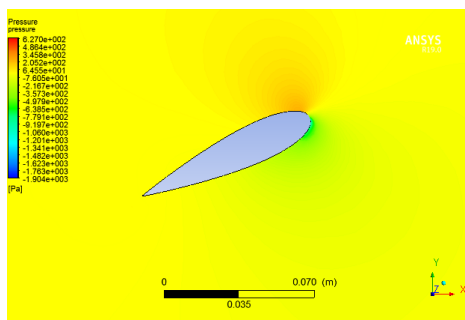
(a) Pá 1 - $\theta = 88^\circ$



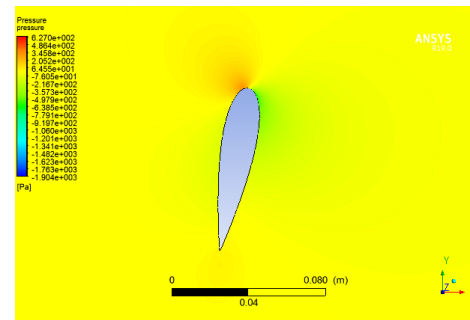
(b) Pá 1 - $\theta = 143^\circ$



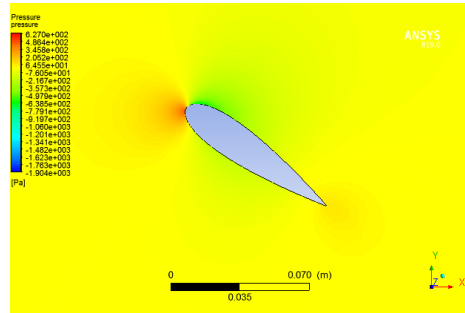
(c) Pá 2 - $\theta = 88^\circ$



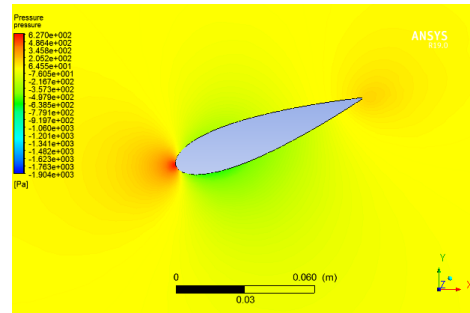
(d) Pá 2 - $\theta = 143^\circ$



(e) Pá 3 - $\theta = 88^\circ$



(f) Pá 3 - $\theta = 143^\circ$



Fonte: Autoria Própria (2020).

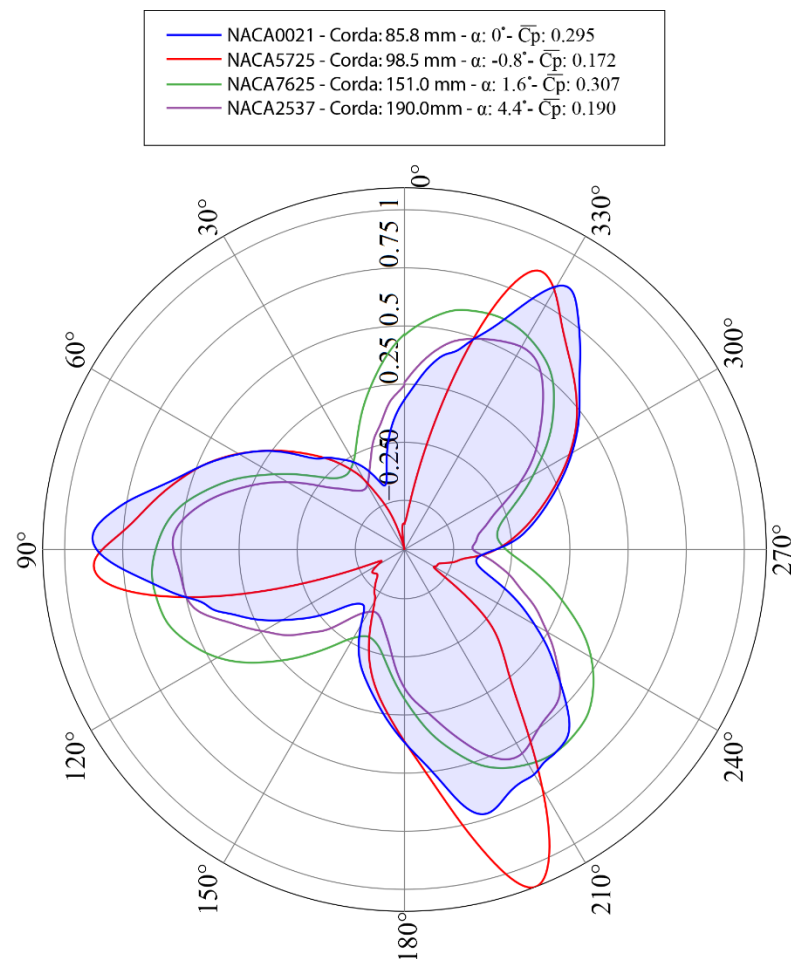
A partir das visualizações anteriores, é possível verificar que o valor mínimo de C_p na posição azimutal $\theta = 143^\circ$ se deve principalmente ao aumento das zonas de arrasto observadas na Figura 26b, e em detalhe no escoamento ao redor da pá 1 da turbina nessa posição, como mostra a Figura 28b. Além disso, devido a rotação da turbina, o arrasto proveniente da separação do escoamento na pá 2 (Figura 28c), causa uma esteira saindo do bordo de fuga dessa pá e consequentemente afeta o desempenho da pá 1, perturbando o escoamento que atinge o seu bordo de ataque.

Esse aspecto fenomenológico causado pela rotação da turbina era esperado, uma vez que, como apresentado na Seção 1.3 desse trabalho, a complexidade desse tipo de turbina é

atribuída à conversão instável de potência devido as grandes variações no ângulo de ataque e da velocidade relativa durante cada revolução da turbina. Além disso, outros aspectos que ressaltam essa complexidade no fenômeno são: a interação da esteira e da pá da turbina (como reportado nos campos de velocidade e pressão), efeitos de curvatura, forças centrífugas na camada limite e vórtices nas pontas das pás.

Todas as 100 configurações do DOE geradas usando o método *Uniform Latin Hypercube Sampling* (ULHS) foram simuladas usando as mesmas condições de contorno a fim de avaliar quais parâmetros e interações têm a maior influência sobre o coeficiente de potência. Essa avaliação é conduzida pela análise de sensibilidade através do método SS-ANOVA. Alguns dos resultados das configurações geradas pelo DoE ($\bar{C}_p$) são ilustrados na Figura 30.

Figura 30 - Comparação do C_p instantâneo e $\bar{C}_p$ para algumas configurações da turbina.



Fonte: Autoria Própria (2020).

Com o DoE contendo 100 configurações e os resultados da simulação de cada uma delas, foi possível realizar a análise de sensibilidade utilizando o método SS-ANOVA através

do *software* ESTECO ModeFrontier, para prever a influência dos parâmetros (variáveis de entrada) descritos na Tabela 7 sobre o coeficiente de potência ($\overline{C_p}$).

Inicialmente, como discutido na Seção 3.8 deste trabalho, é importante que seja garantida a qualidade do modelo submetido ao SS-ANOVA para certificar a consistência dos índices de contribuição. Uma ferramenta de diagnóstico útil para avaliar a qualidade do modelo é o índice de colinearidade, conforme discutido na seção 2.8. A Tabela 9 apresenta os valores máximo, médio e mínimo do índice de colinearidade dos parâmetros considerando as 100 configurações definidas para o DoE.

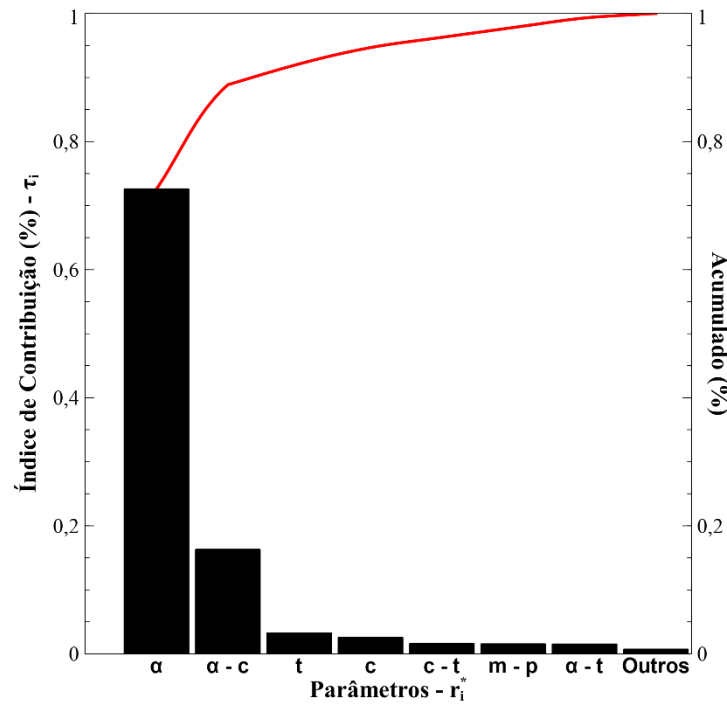
Tabela 9 - Índices de Colinearidade dos parâmetros submetidos ao método SS-ANOVA para o DoE com 100 casos.

Índice de Colinearidade	Parâmetros	Valor
Máximo	α - c	1,1113
Mínimo	α - p	1,0334
Médio	-	1,0674

Fonte: Autoria Própria (2020).

Como os índices de colinearidade são muito próximos a 1, é possível afirmar a consistência dos resultados de contribuição das variáveis de entrada, e suas possíveis interações, sobre o Coeficiente de Potência médio $\overline{C_p}$, conforme apresentados na Figura 31.

Figura 31 - Ranqueamento dos efeitos principais e de interação das variáveis de entrada sobre o Coeficiente de Potência $\overline{C_p}$.



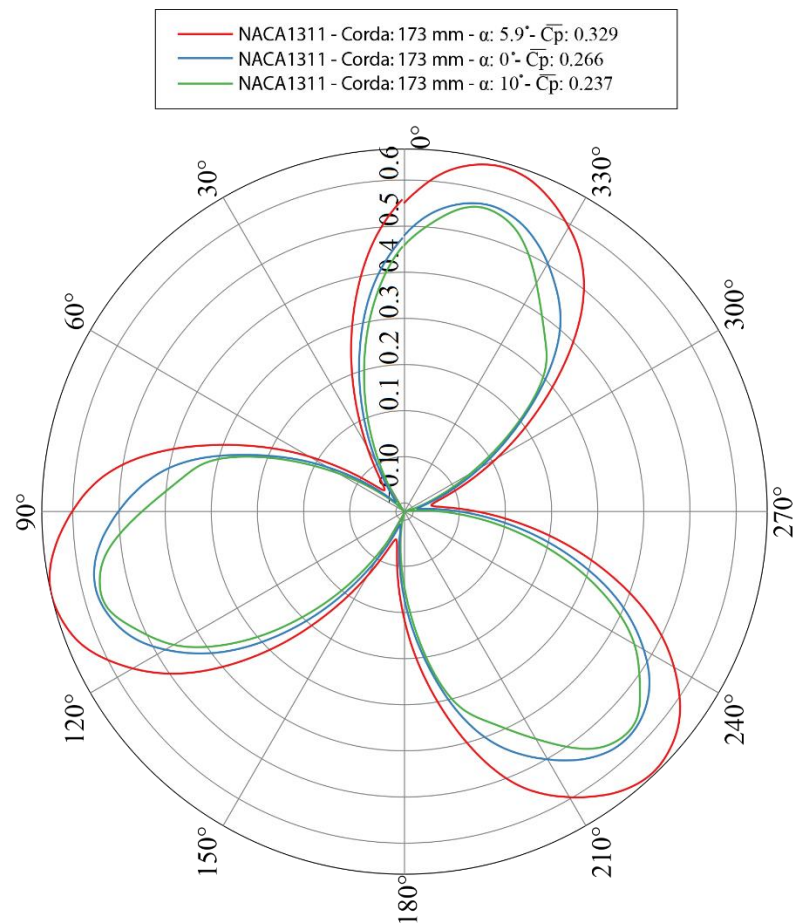
Fonte: Autoria Própria (2020).

Os resultados mostram que o índice de contribuição do ângulo de incidência (α) sobre o coeficiente de potência médio foi o maior entre os demais, com contribuição de 73%. Outra contribuição significativa é devido à interação do ângulo de incidência (α) e a corda do perfil (c), apresentando um índice de 16%. Portanto, o impacto da parametrização de dígitos NACA-4 sobre o coeficiente de potência é pequeno, afinal, a soma da contribuição dos parâmetros inerentes à parametrização é de apenas 4%.

Para demonstrar o efeito do ângulo de incidência em C_p e, conseqüentemente em $\overline{C_p}$, a Figura 32 mostra o resultado das simulações para o um mesmo perfil NACA com a mesma corda (c) e diferentes valores de ângulo de incidência (α). Essa escolha se deu pelo fato de uma dessas configurações ter apresentado o maior $\overline{C_p}$ no DoE, e as demais serem apenas testes variando os valores dos ângulos de incidência para mostrar a influência desse parâmetro no $\overline{C_p}$.

Pode-se observar na Figura 32 que o aumento do ângulo de incidência (α) não necessariamente indica o aumento no valor de $\overline{C_p}$, sugerindo um ponto de inflexão para a obtenção de um valor máximo.

Figura 32 - C_p e $\overline{C_p}$ para turbina com NACA1311 com $c = 173\text{mm}$ e diferentes ângulos de incidência, α .

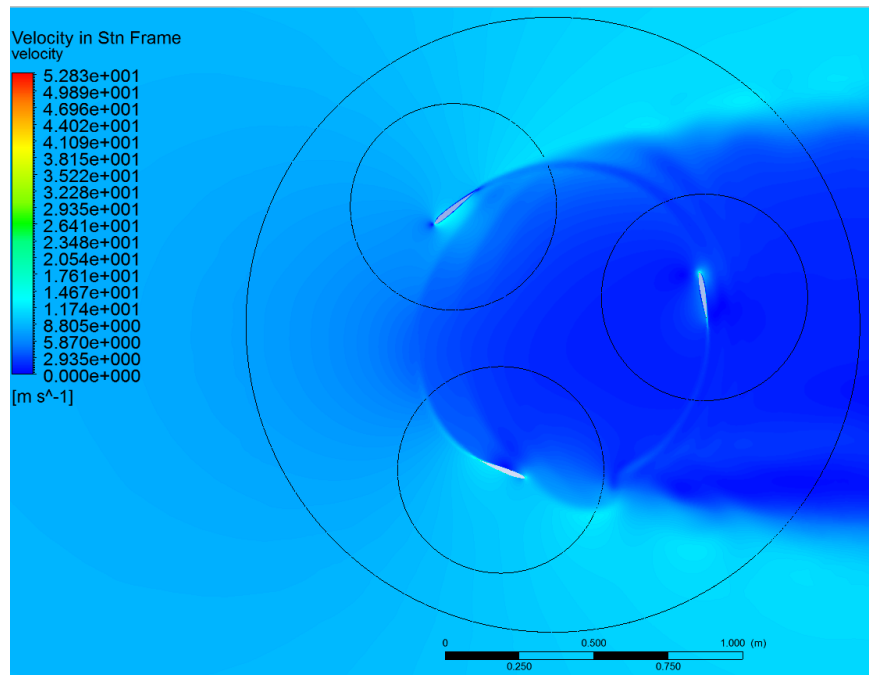


Fonte: Autoria Própria (2020).

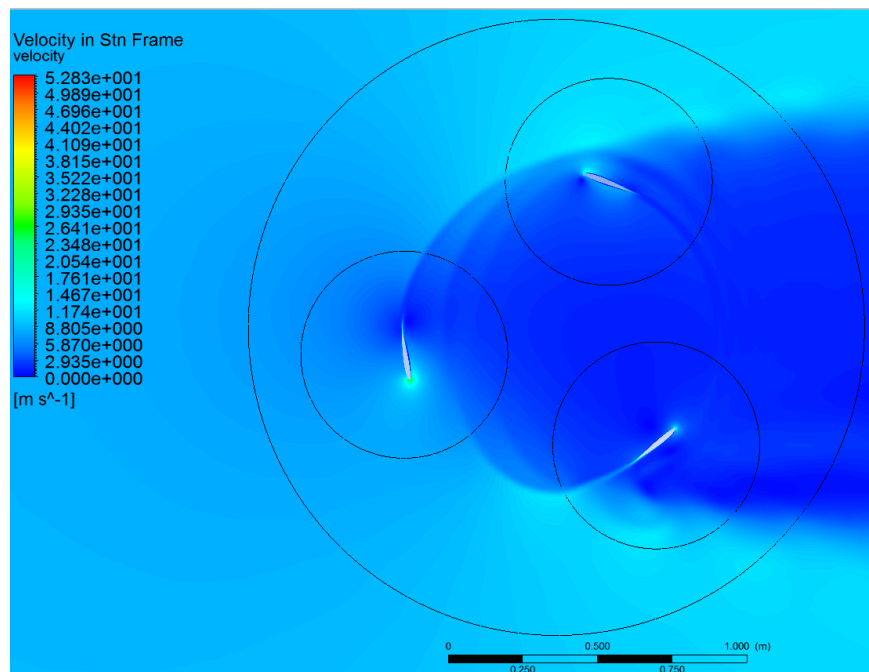
Para uma análise mais detalhada do impacto do ângulo de incidência (α) no C_p , a Figura 33 e a Figura 34 mostram os campos de velocidade para as duas primeiras configurações mostradas na Figura 32, em seus respectivos pontos de C_p mínimo e máximo.

Figura 33 – Campo de velocidade para NACA1311 com $c = 173\text{mm}$ 3 $\alpha = 5,9$.

(a) No ponto de mínimo C_p , $\theta = 45^\circ$.



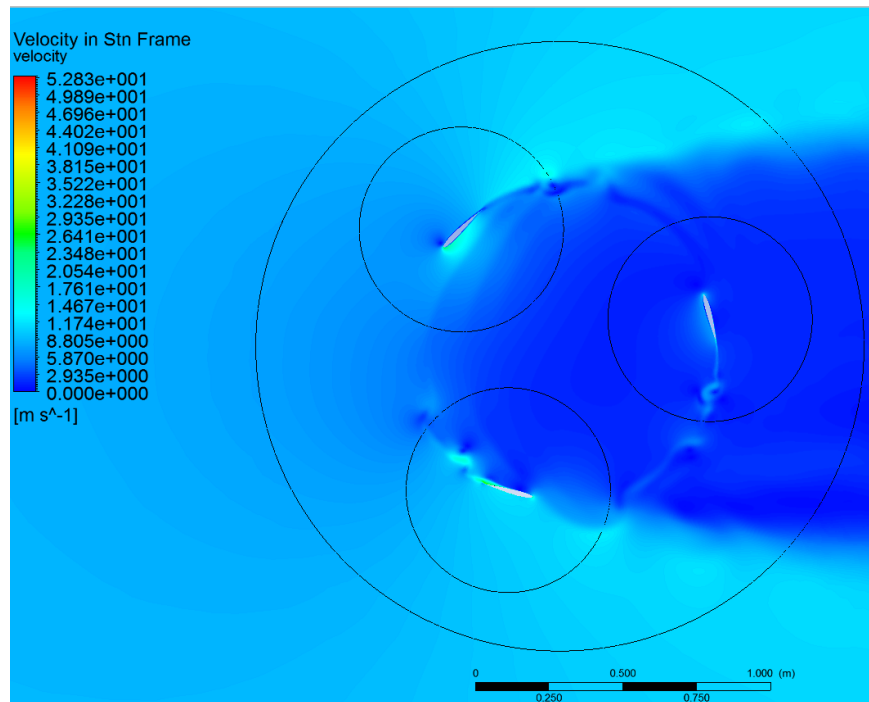
(b) No ponto de máximo C_p , $\theta = 105^\circ$.



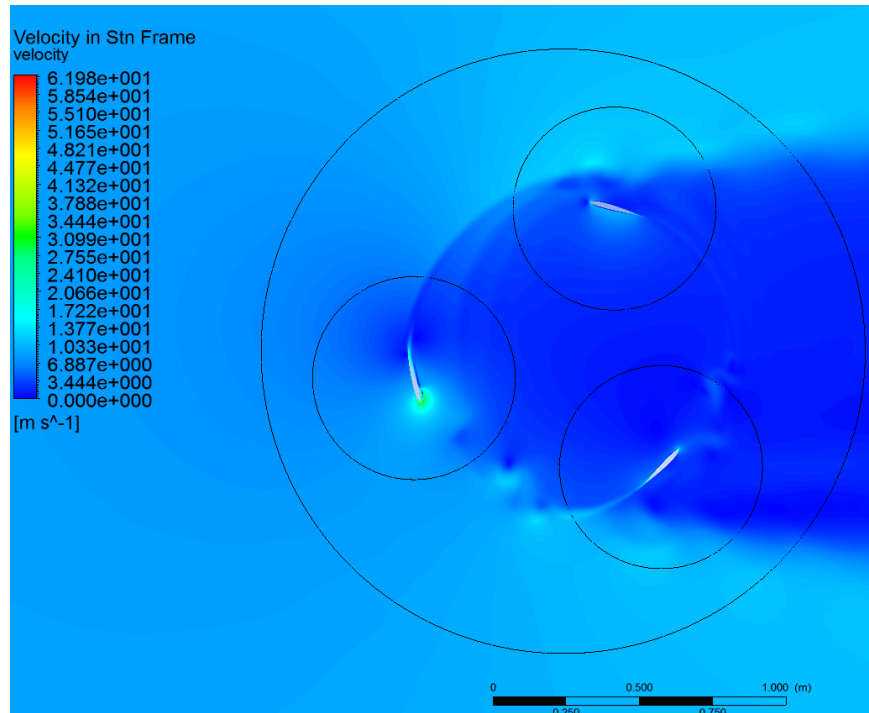
Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 34 - Campo de velocidade para NACA1311 com $c = 173\text{mm}$ 3 $\alpha = 0$.

(a) No ponto de mínimo C_p , $\theta = 45^\circ$.



(b) No ponto de máximo C_p , $\theta = 105^\circ$.



Fonte: Autoria Própria (2020).

Comparando os campos de velocidade, é possível observar que para $\alpha = 0$ existem regiões de esteiras mais evidentes no escoamento do que para $\alpha = 5,9$, caracterizando o efeito

stall sobre as pás da turbina eólica. Este efeito é preponderante para a diminuição no C_p e $\overline{C_p}$ para a configuração com $\alpha = 0$. Para o perfil avaliado, que é assimétrico, aumentar o ângulo de incidência reduz a possibilidade de separação do escoamento, causando um aumento na força de sustentação e, conseqüentemente, um aumento na eficiência aerodinâmica. Quando o ângulo de incidência é zero ou muito alto, o escoamento se separa, causando uma esteira mais proeminente na borda de fuga do perfil aerodinâmico, diminuindo a sustentação do perfil e, conseqüentemente, aumentando a força de arrasto. Esta esteira tem impacto no desempenho das demais pás durante a rotação da turbina eólica, uma vez que o escoamento que atinge o bordo de ataque das outras pás é bastante perturbado, muito diferente daquele incidente a montante da turbina eólica.

Para cada perfil definido pela parametrização NACA de 4 dígitos, o ângulo de incidência que permite maior e menor eficiência aerodinâmica é diferente, uma vez que esta parametrização permite a criação de diferentes perfis simétricos e assimétricos. Em todos os casos, o ângulo de incidência influencia diretamente o escoamento ao redor de cada perfil e também o escoamento durante a rotação da turbina causando um efeito de interação entre as pás.

Desta forma, é possível perceber que a ampla faixa operacional considerada para o parâmetro ângulo de incidência comparada às pequenas faixas operacionais dos parâmetros geométricos do perfil contribuiu para seu maior impacto no $\overline{C_p}$, conforme revelado pela análise de sensibilidade.

Embora a influência dos parâmetros geométricos da parametrização do NACA 4 dígitos sobre o $\overline{C_p}$ seja pequena (4%), não é possível dizer que sejam irrelevantes, afinal, muitos aspectos do fenômeno físico estão associados à geometria do perfil aerodinâmico.

Embora o ângulo de ataque tenha sido o parâmetro significativamente mais influente sobre o Coeficiente de potência, em comparação aos parâmetros associados ao NACA 4 dígitos, é de interesse um melhor detalhamento dos impactos destes os aspectos aerodinâmicos sobre o desempenho de conversão da turbina eólica. Desta forma, inicialmente, o ângulo de ataque foi retirado na análise considerando a amostra com 100 configurações. Esta abordagem resultou em índices de colinearidades inadequados para garantir a robustez do método SS-ANOVA. Assim, foi gerado um DoE complementar com mais 92 casos, totalizando um DoE com 192 casos. A Tabela 10 apresenta os valores máximos, médios e mínimos do índice de colinearidade dos parâmetros para o DoE com 192 casos.

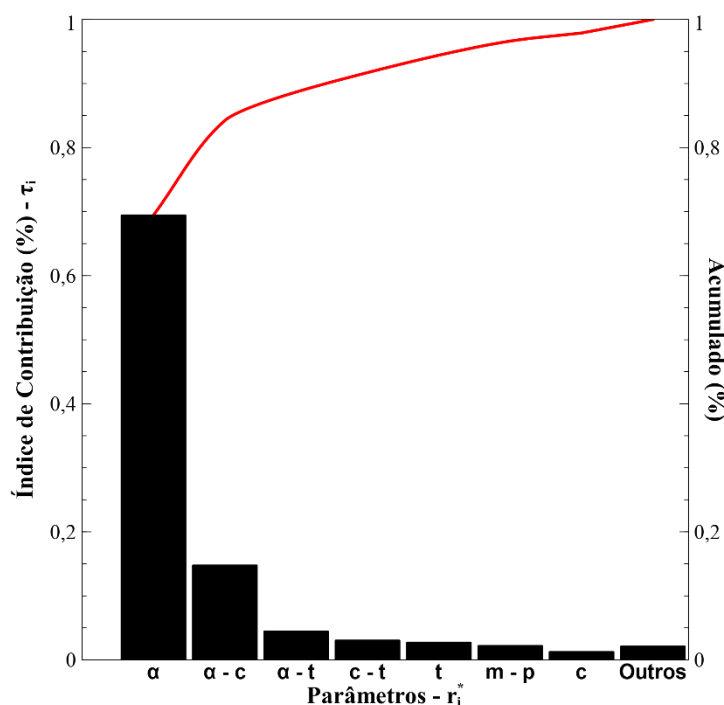
Tabela 10 - Índices de Colinearidade dos parâmetros submetidos ao SS-ANOVA para o DoE com 192 casos.

Índice de Colinearidade	Parâmetros	Valor
Máximo	m	1,1698
Mínimo	m - t	1,0274
Médio	-	1,0897

Fonte: Autoria Própria (2020).

Como os índices de colinearidade são muito próximos a 1, é possível afirmar a consistência dos índices de contribuição apresentados na Figura 35.

Figura 35 - Ranqueamento dos efeitos principais e de interação das variáveis de entrada sobre o Coeficiente de Potência $\overline{C_p}$ para o DoE com 192 casos.



Fonte: Autoria Própria (2020).

A partir do DoE com 192 casos, os principais resultados mostram que o índice de contribuição do ângulo de incidência (α) sobre o coeficiente de potência continua sendo o maior entre os demais, com contribuição de 69%. A outra contribuição significativa continua sendo a combinação do parâmetro ângulo de incidência (α) e corda do perfil (c), apresentando um índice de 15%. A contribuição referente a combinação dos parâmetros ângulo de incidência (α) e

espessura do perfil (t) aumentou para esse DoE, apresentando um índice de contribuição de 4%. No entanto, também se observa que o impacto da parametrização de dígitos NACA-4 no coeficiente de potência aumenta para 6%. De uma forma geral, os resultados mostrados na Figura 35 corroboram com aqueles discutidos na Figura 31.

Realizando uma análise de sensibilidade com o método SS-ANOVA considerando os mesmos 192 casos, entretanto retirando da análise o ângulo de incidência, é possível analisar a contribuição da corda do perfil (c), o arqueamento do perfil (m), a posição do arqueamento (p) e a espessura (t). A Tabela 11, mostra os índices de colinearidade considerando a amostra sem o ângulo de incidência, mostrando adequado valor para este critério.

Tabela 11 - Índices de Colinearidade dos parâmetros submetidos ao SS-ANOVA para o DOE com 192 casos (excluindo o ângulo de incidência).

Índice de Colinearidade	Parâmetros	Valor
Máximo	p	1,0824
Mínimo	c	1,0113
Médio	-	1,0450

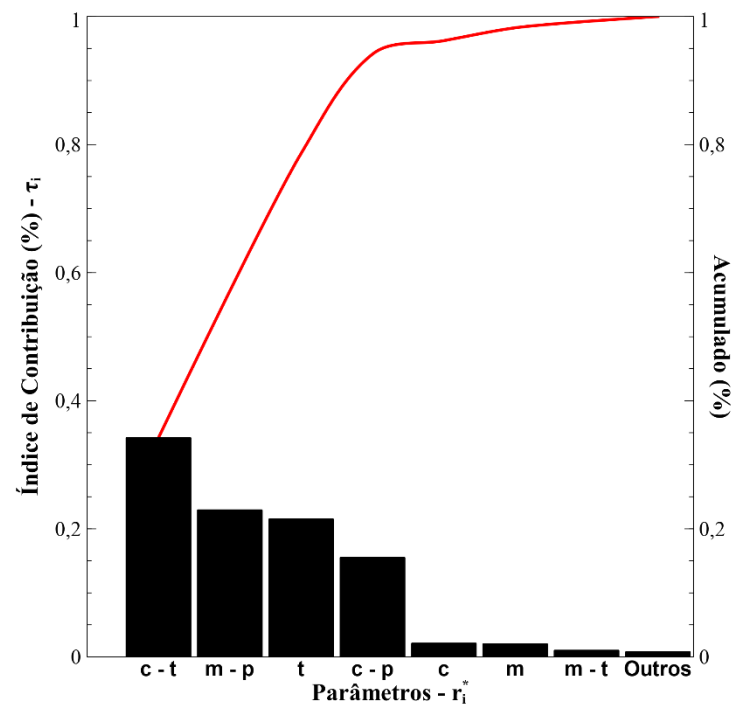
Fonte: Autoria Própria (2020).

Nessa nova análise, seguindo os critérios de qualidade já apresentados, os índices de contribuição de cada parâmetro no $\overline{C_p}$ são mostrados na Figura 36.

Os resultados mostrados na Figura 36, contribuem para compreender que a parametrização NACA 4 dígitos é relevante para a turbina eólica, afinal, dois dos índices de contribuição mais significativos mostrados na Figura 36 são a combinação do arqueamento (m) e a posição do arqueamento (p), com uma contribuição de 23% no $\overline{C_p}$, e o índice de contribuição da espessura (t) com contribuição de 21% no $\overline{C_p}$.

Com o DOE contendo 192 casos, a configuração que apresentou o maior valor para $\overline{C_p}$ é descrita na Tabela 12.

Figura 36 - Ranqueamento dos efeitos de interação das variáveis de entrada, exceto o ângulo de incidência, sobre o Coeficiente de Potência $\overline{C_p}$.



Fonte: Autoria Própria (2020).

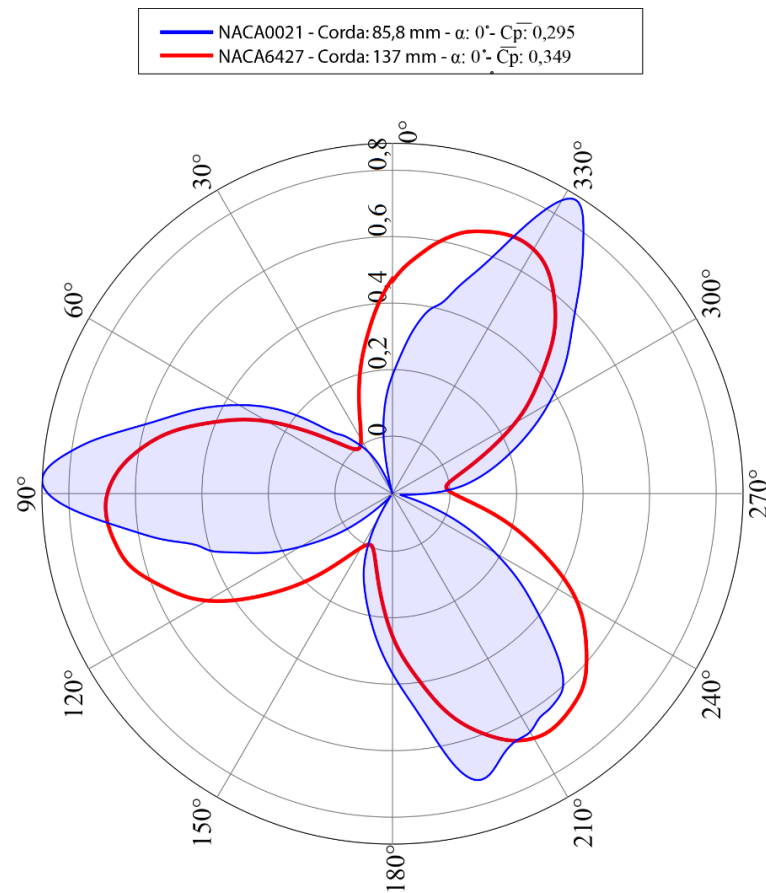
Tabela 12 - Configuração da Turbina com maior $\overline{C_p}$ da amostra.

Parâmetro	Valor
Ângulo de incidência (α)	0°
Corda do perfil (c)	137mm
Arqueamento do perfil (m)	6
Posição do arqueamento (p)	4
Espessura do perfil (t)	27
Perfil Aerodinâmico	NACA6427

Fonte: Autoria Própria (2020).

Para a configuração dada na Tabela 12, os valores do coeficiente de potência instantâneo (C_p) e $\overline{C_p}$, são mostrados na Figura 37 em comparação com o modelo de validação (Tabela 5).

Figura 37 - C_p e $\overline{C_p}$ para a turbina NACA6427, $c = 137\text{mm}$ e $\alpha = 0^\circ$ em comparação com o modelo de validação.

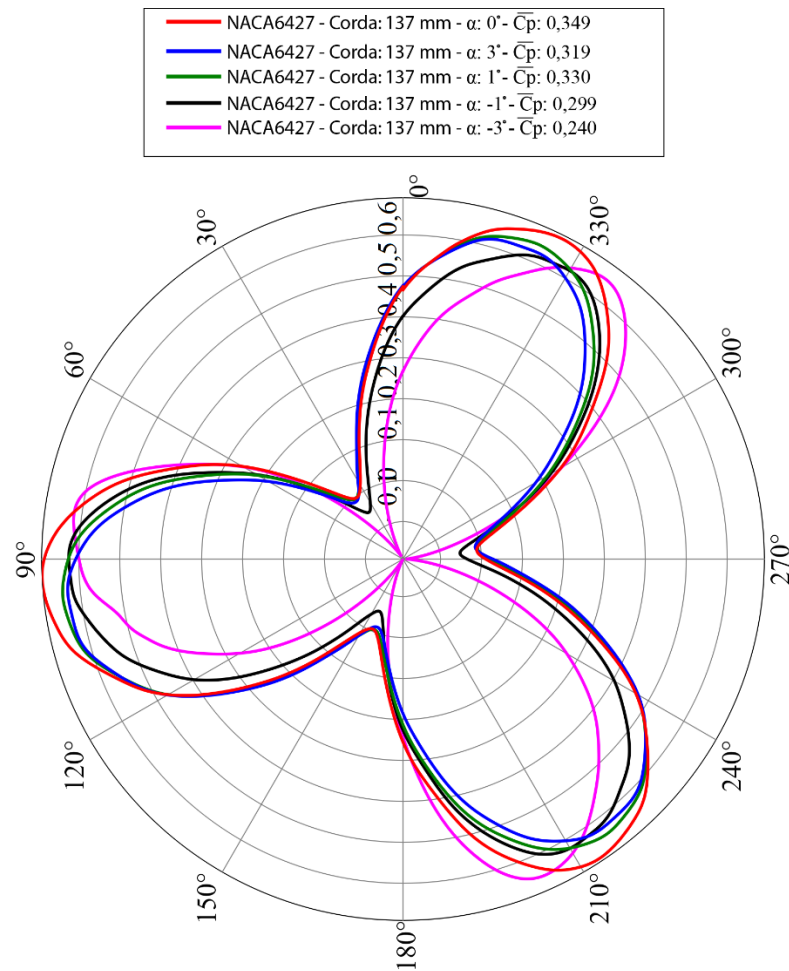


Fonte: Autoria Própria (2020).

Na Figura 37, é possível observar que o $\overline{C_p}$ é maior para a configuração dada na Tabela 12, perfil assimétrico, visto que os valores do coeficiente de potência instantâneo, C_p , quase não assumem valores negativos em seus pontos de mínimo e a área correspondente aos valores positivos é maior do que aquele referente ao perfil NACA 0021 (perfil simétrico).

A influência do ângulo de incidência (α) sobre o $\overline{C_p}$ para o perfil do DoE com o maior $\overline{C_p}$ do DoE, é mostrado na Figura 38.

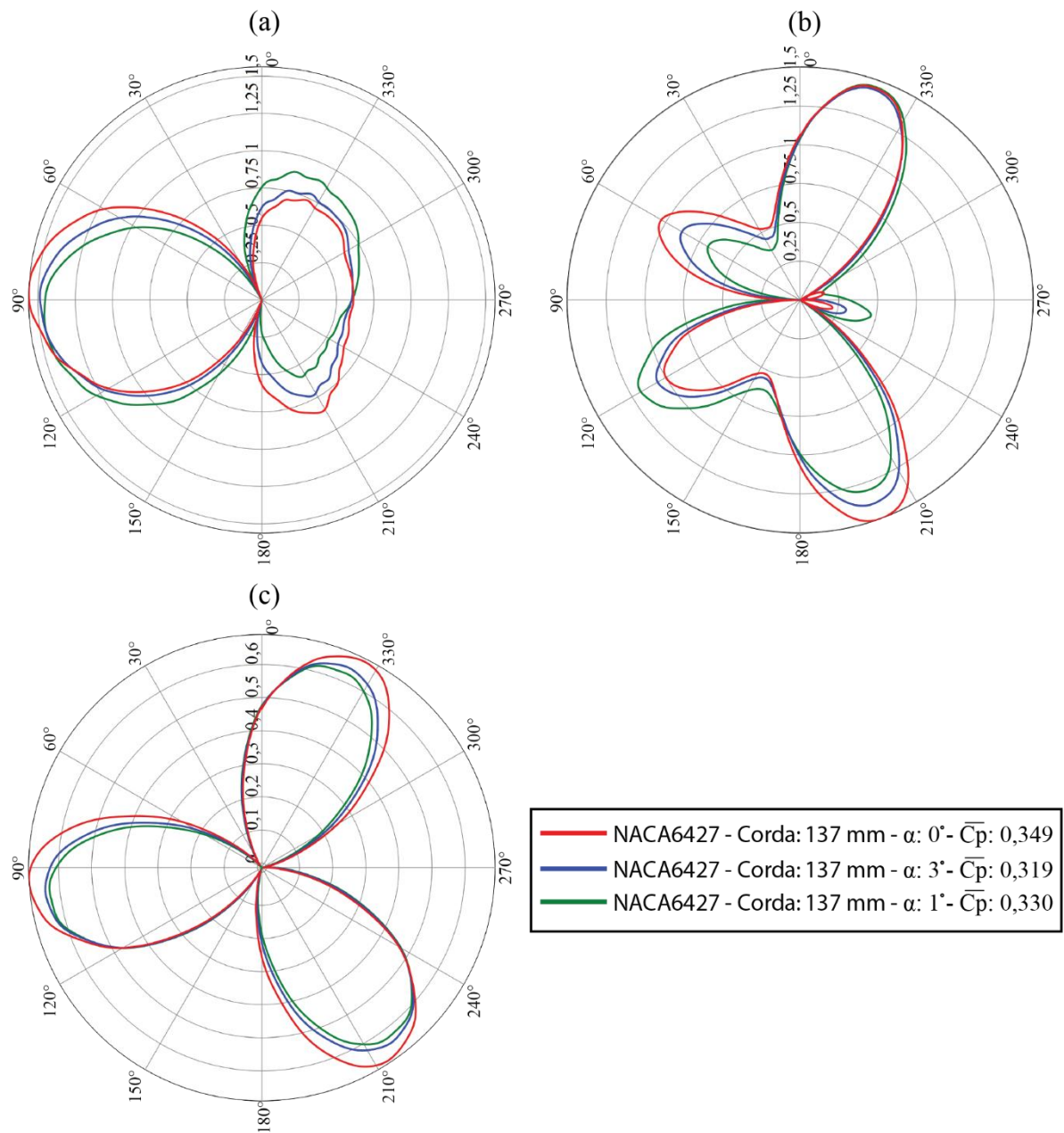
Figura 38 - C_p e $\overline{C_p}$ para turbina com NACA6427 com $c = 137\text{mm}$ e diferentes ângulos de incidência, α .



Fonte: Autoria Própria (2020).

Na Figura 38 é possível observar que o aumento do ângulo de incidência (α) resulta em uma diminuição no valor de $\overline{C_p}$. Quando os ângulos de incidência são negativos, também há um decréscimo no valor de $\overline{C_p}$ e, nesses casos, encontramos os modelos com o menor $\overline{C_p}$. O impacto aerodinâmico sobre o coeficiente de potência instantâneo C_p e o $\overline{C_p}$ das turbinas, foi discutido considerando as curvas do coeficiente de sustentação (C_l) e do coeficiente de arrasto (C_d). A Figura 39 mostra as curvas de C_l , C_d em comparação com a curva de C_p .

Figura 39 – Comparação do efeito dos coeficientes aerodinâmicos no coeficiente de potência. (a) Coeficiente de sustentação, C_l ; (b) Coeficiente de arrasto, C_d ; (c) Coeficiente de potência, C_p .



Fonte: Autoria Própria (2020).

A partir dos resultados mostrados na Figura 39, foi elaborada a Tabela 13 que compila os valores médios dos coeficientes aerodinâmicos ($\overline{C_l}$ e $\overline{C_d}$), a eficiência aerodinâmica média ($\overline{C_l}/\overline{C_d}$) e o coeficiente de potência médio ($\overline{C_p}$) para as configurações apresentadas na Figura 39.

Tabela 13 – Compilação dos coeficientes médios para a análise da contribuição da variação do ângulo de incidência (α) no coeficiente de potência médio ($\overline{C_p}$).

Ângulo de Incidência (α)	$\overline{C_l}$	$\overline{C_d}$	$\overline{C_l}/\overline{C_d}$	$\overline{C_p}$
0°	0,75025	0,72023	1,04168	0,349
1°	0,72552	0,69746	1,04023	0,330
3°	0,72347	0,71325	1,01433	0,319

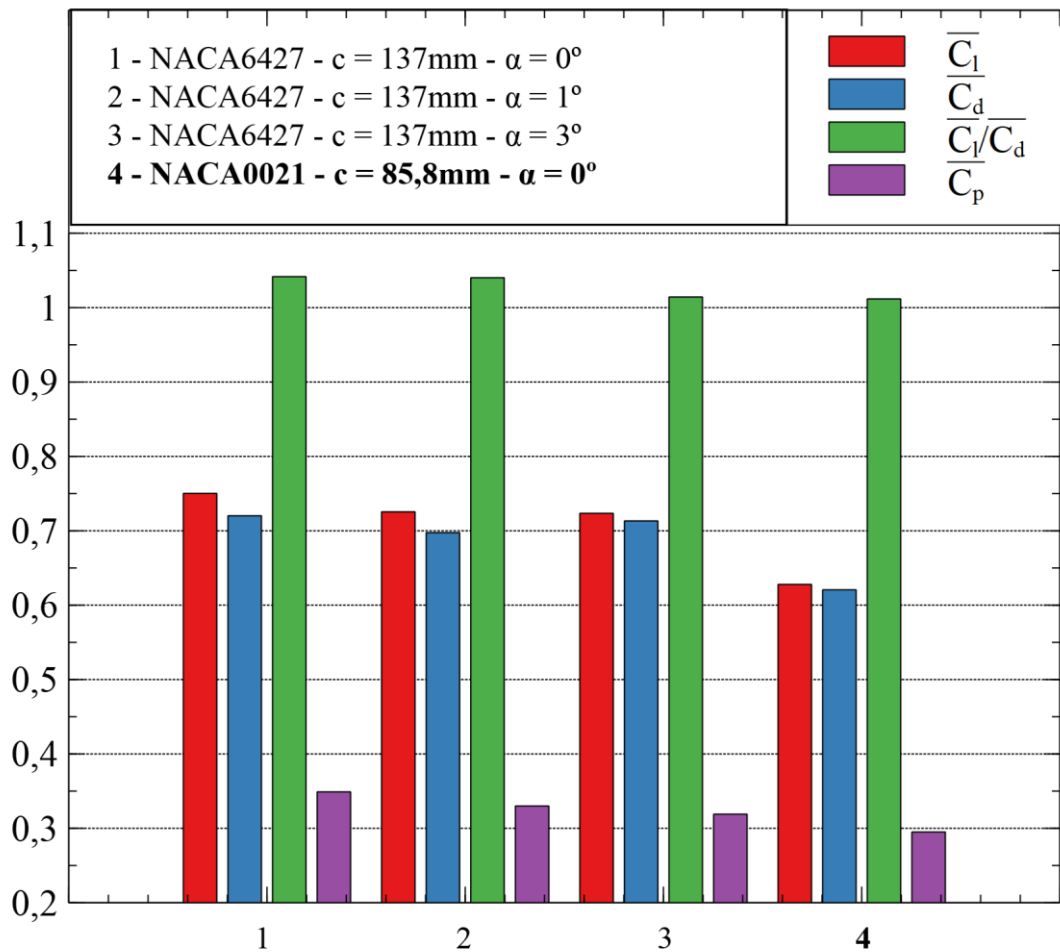
Fonte: Autoria Própria (2020).

Considerando os resultados na Figura 39 e na Tabela 13, é possível observar que nesse caso a variação do ângulo de incidência (α), tem um impacto substancial no coeficiente de potência médio ($\overline{C_p}$) de uma turbina *Darrieus*. Esse impacto observado, corrobora com o alto índice de contribuição do ângulo de incidência (α) no $\overline{C_p}$ revelados pela análise de sensibilidade usando o SS-ANOVA. Também é possível concluir que o aumento do coeficiente de sustentação médio ($\overline{C_l}$), aliado à um coeficiente de arrasto médio ($\overline{C_d}$), que seja o menor quanto possível, de modo que a eficiência aerodinâmica média ($\overline{C_l}/\overline{C_d}$) seja o maior possível, provoca o aumento do coeficiente de potência médio ($\overline{C_p}$).

Embora o ângulo de incidência (α) apresente um índice de contribuição no $\overline{C_p}$ maior que os outros parâmetros geométricos considerados nesse trabalho, não se pode desprezar os efeitos aerodinâmicos, caracterizados pelos parâmetros NACA, sobre o $\overline{C_p}$. Um exemplo disso é quando comparamos a configuração com o maior $\overline{C_p}$ encontrada na amostra e o modelo de validação, que mesmo tendo o mesmo ângulo de incidência (α), a diferença no coeficiente de potência são significativas em função dos parâmetros geométricos (corda e parametrização NACA 4 dígitos).

A Figura 40 mostra o comparativo das configurações analisadas anteriormente e o modelo de validação (Tabela 5), em relação aos coeficientes aerodinâmicos e quanto ao coeficiente de potência médio ($\overline{C_p}$).

Figura 40 - Comparativo quanto aos coeficientes aerodinâmicos e $\overline{C_p}$.



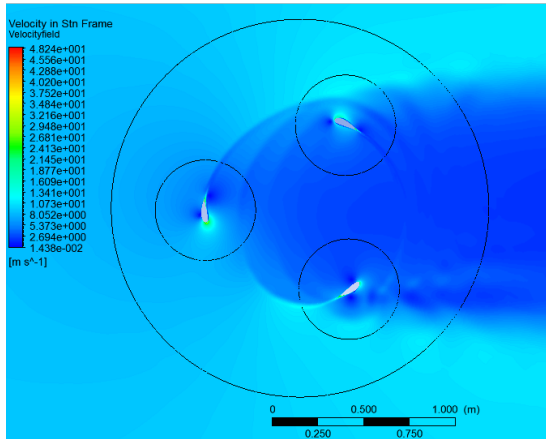
Fonte: Autoria Própria (2020).

Embora os modelos 1 e 4 da Figura 40 possuam o mesmo ângulo de incidência (α), a mudança no valor da corda (c) e nos parâmetros do perfil NACA, também refletem no comportamento aerodinâmico da turbina *Darrieus*. Ainda na Figura 40, podemos confirmar novamente a importância do aumento do coeficiente de sustentação médio ($\overline{C_l}$), aliado ao aumento da eficiência aerodinâmica média ($\overline{C_l/C_d}$) para o aumento do coeficiente de potência médio ($\overline{C_p}$).

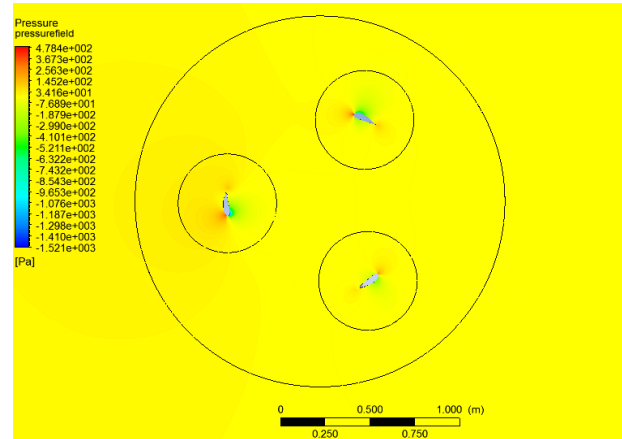
Com intuito de visualizar os fenômenos aerodinâmicos devido ao escoamento através da turbina eólica, a Figura 41 à Figura 44 mostram os campos de velocidade e pressão para as configurações 1 e 4 da Figura 40, em uma posição da turbina que corresponda a um coeficiente de potência instantâneo (C_p) máximo e uma posição que corresponda a um C_p mínimo.

Figura 41 - Ponto de máximo C_p para a configuração 1 mostrada na Figura 40.

(a) Campo de velocidade – $\theta = 95^\circ$.



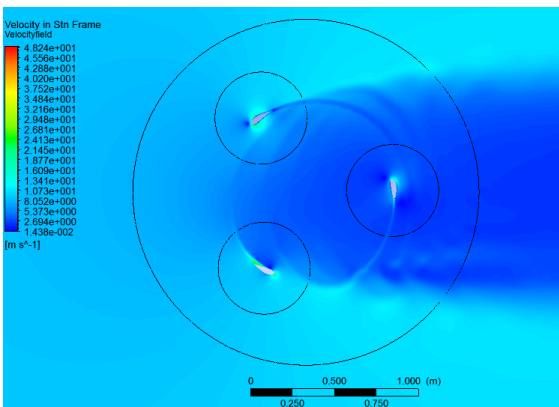
(b) Campo de pressão - $\theta = 95^\circ$



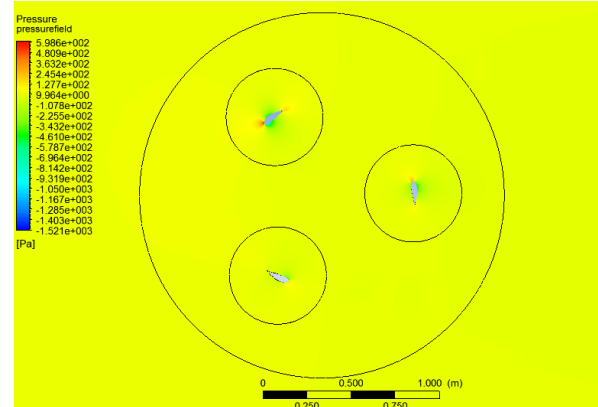
Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 42 – Ponto de mínimo C_p para a configuração 1 mostrada na Figura 40.

(a) Campo de velocidade – $\theta = 155^\circ$.



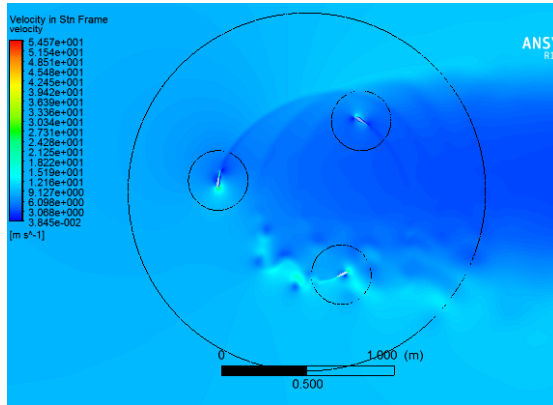
(b) Campo de pressão - $\theta = 155^\circ$.



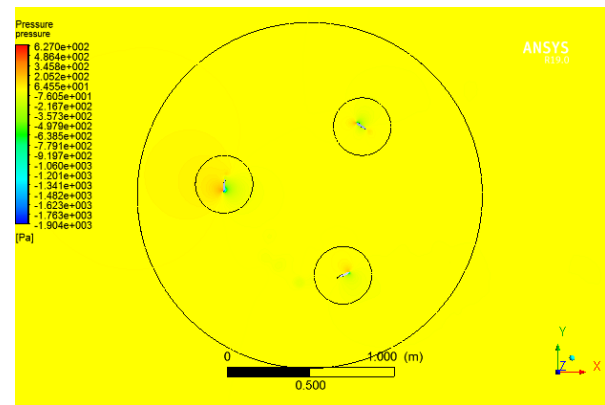
Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 43 - Ponto de máximo C_p para a configuração 4 mostrada na Figura 40.

(a) Campo de velocidade – $\theta = 88^\circ$.



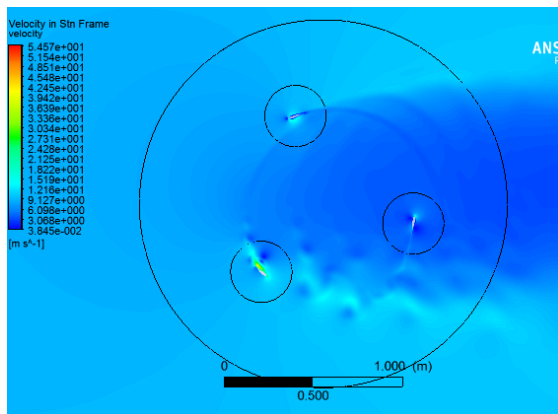
(b) Campo de pressão - $\theta = 143^\circ$.



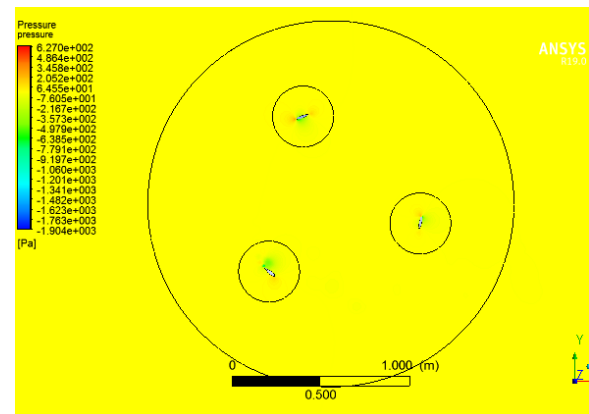
Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 44 - Ponto de mínimo C_p para a configuração 4 mostrada na Figura 40.

(a) Campo de velocidade – $\theta = 88^\circ$.



(b) Campo de pressão - $\theta = 143^\circ$.



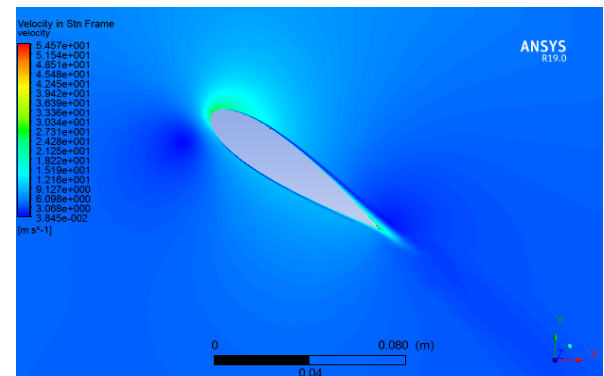
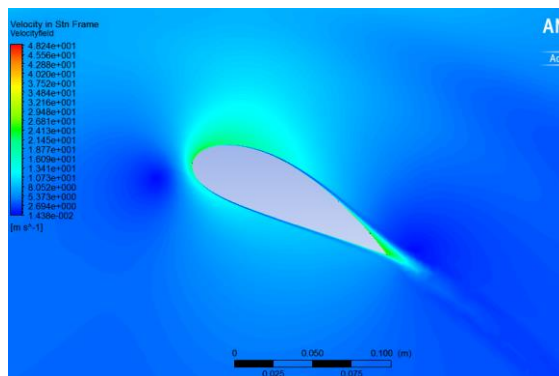
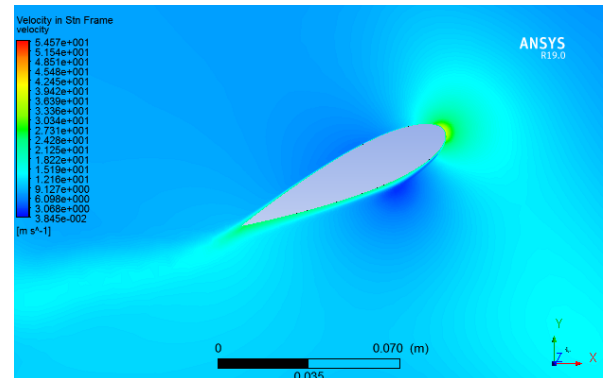
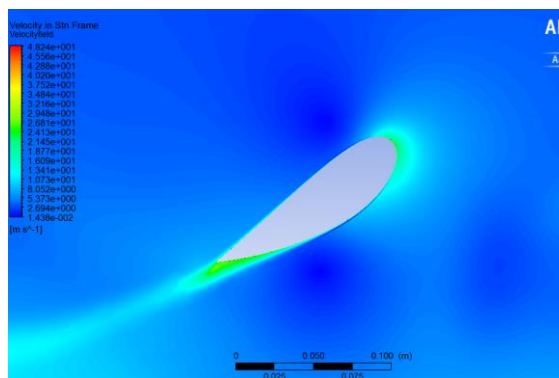
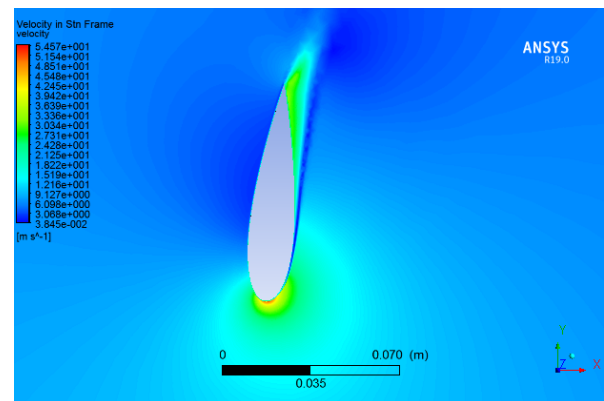
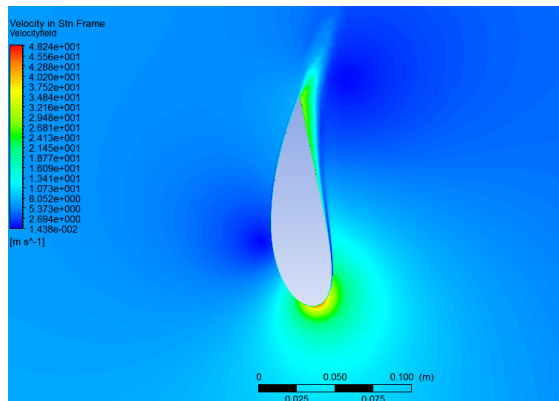
Fonte: Autoria Própria (2020).

Analisando da Figura 41 à Figura 44, é possível notar que nos pontos de máximo e mínimo C_p o escoamento é mais instável para a configuração 4 da turbina (modelo de validação) do que para a configuração com maior C_p da amostra. Esse escoamento instável diminui a eficiência aerodinâmica média ($\overline{C_l}/\overline{C_d}$) da turbina e, conseqüentemente, o valor de $\overline{C_p}$. De forma mais detalhada, é apresentando uma comparação do escoamento em cada pá individualmente nesses mesmos pontos.

Figura 45 - Comparação do escoamento das pás das turbinas no ponto de máximo C_p .

(a) NACA6427 – $c = 137\text{mm}$ – $\alpha = 0^\circ$.

(b) NACA0021 – $c = 85,8\text{mm}$ – $\alpha = 0^\circ$.

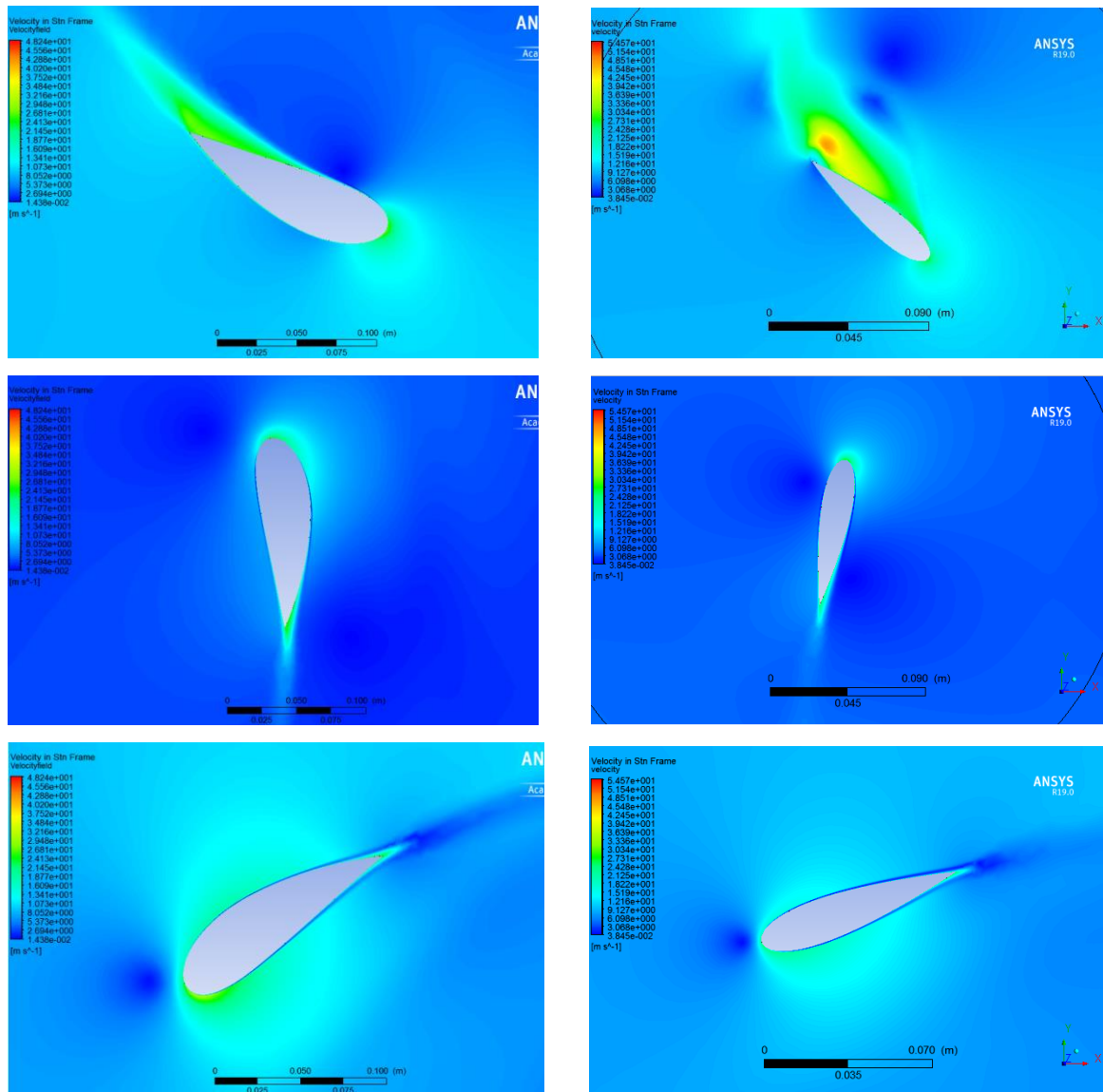


Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 46 -Comparação do escoamento das pás das turbinas no ponto de mínimo C_p .

(a) NACA6427 – $c = 137\text{mm}$ – $\alpha = 0^\circ$.

(b) NACA0021 – $c = 85,8\text{mm}$ – $\alpha = 0^\circ$.



Fonte: Autoria Própria (2020).

Nota-se nas Figuras 45 e 46 que o arrasto nas pás da turbina usada como modelo de validação (NACA0021 – $c = 85,8\text{mm}$ – $\alpha = 0^\circ$) é maior tanto no ponto de máximo, quanto no ponto de mínimo C_p , e a sustentação é menor para esses mesmos pontos quando comparada a turbina com configuração NACA6427 – $c = 137\text{mm}$ – $\alpha = 0^\circ$. Assim, a configuração de turbina NACA6427 – $c = 137\text{mm}$ – $\alpha = 0^\circ$, apresenta o maior $\overline{C_p}$ no campo amostral e também maior que a turbina padrão usada para fins de validação (NACA 0021) e amplamente utilizada em estudos correlatos.

5 CONCLUSÕES E FUTUROS TRABALHOS

Nesse trabalho foi apresentada a análise de sensibilidade dos parâmetros geométricos de uma turbina eólica do tipo *Darrieus*, usando o método SS-ANOVA, por meio da geração de um *Design* de Experimentos (DoE). Os parâmetros geométricos submetidos à análise de sensibilidade foram: o ângulo de ataque (α), a espessura do perfil aerodinâmico (t), o arqueamento máximo do perfil (m), a posição do arqueamento (p) e a corda do perfil (c), os quatro últimos são relacionados ao perfil aerodinâmico.

Os resultados mostram que o índice de contribuição do ângulo de incidência (α) sobre o coeficiente de potência médio $\overline{C_p}$ foi o maior entre os demais, com contribuição de 69%. Outra contribuição significativa foi a combinação do parâmetro ângulo de incidência (α) e corda do perfil (c), apresentando um índice de 15%. A contribuição referente a combinação dos parâmetros ângulo de incidência (α) e espessura do perfil (t), apresenta um índice de 4% e por fim, o impacto da parametrização NACA-4 dígitos no coeficiente de potência médio é de 6%.

A análise considerando somente a parametrização NACA-4 dígitos e a corda do perfil mostrou que dois dos índices de contribuição mais significativos são a combinação do arqueamento (m) e a posição do arqueamento (p), com uma contribuição de 23% no $\overline{C_p}$ e a espessura (t), com uma contribuição de 21% no $\overline{C_p}$.

Por intermédio do estudo do estudo aerodinâmico das turbinas, concluiu-se que o aumento do coeficiente de sustentação médio ($\overline{C_l}$), aliado à um coeficiente de arrasto médio ($\overline{C_d}$), que seja o menor quanto possível, de modo que a eficiência aerodinâmica média ($\overline{C_l}/\overline{C_d}$) seja o maior possível, provoca o aumento do coeficiente de potência médio ($\overline{C_p}$).

Por fim, dentro das configurações testadas, podemos destacar a turbina que apresentou o maior $\overline{C_p}$, sendo ela, NACA6427 – c = 137mm – $\alpha = 0^\circ$, com um $\overline{C_p}$ igual à 0,349, 18,3% maior que o $\overline{C_p}$ da turbina inicial (NACA0021 – c = 85,8mm – $\alpha = 0^\circ$ - $\overline{C_p} = 0,295$).

Para trabalhos futuros, podemos listar algumas sugestões:

- Treinar uma Superfície de Resposta considerando o DoE, com intuito de submeter os parâmetros geométricos a um processo de otimização;
- Realizar a análise de sensibilidade dos parâmetros geométricos para diferentes TSR's;
- Submeter outros parâmetros a análise de sensibilidade, como: Número de pás e diâmetro da turbina;

- Utilizar parametrização geométrica diretamente através das equações constitutivas para a construção dos perfis NACA 4 Dígitos.

REFERÊNCIAS

- ABBEÓLICA. [S. l.: s. n.], 2019. Disponível em: www.abeeolica.org.br. 2019.
- ABDALRAHMAN, G.; MELEK, W.; LIEN, F. S. Pitch angle control for a small-scale Darrieus vertical axis wind turbine with straight blades (H-Type VAWT). **Renewable Energy**, [S.l.], v. 114, n. November, p. 1353–1362, 2017.
- AMANO, R. S.; SUNDEN, B. **Computational fluid dynamics and heat transfer: emerging topics**. [S. l.]: WIT Press, 2011.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA- ANEEL. [S. l.: s. n.], 2019. Disponível em: www.aneel.gov.br.
- ANSYS FLUENT THEORY GUIDE- SYS. **Fluent theory guide**. ANSYS Inc., USA, vol. 15317, no. November, p. 724–746, 2013.
- AMERICAN WIND ENERGY ASSOCIATION- AWEA. [S. l.: s. n.], 2018. Disponível em: www.awea.org.
- BAI, C. J.; LIN, Y. Y.; LIN, S. Y.; WANG, W. C. Computational fluid dynamics analysis of the vertical axis wind turbine blade with tubercle leading edge. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, [S. l.], v. 7, n. 3, p. 033124, 2015.
- BALDUZZI, F.; BIANCHINI, A.; MALECI, R.; FERRARA, G.; FERRARI, L. Critical issues in the CFD simulation of Darrieus wind turbines. **Renewable Energy**, [S. l.], v. 85, p. 419–435, 2016.
- BATES, S. J.; SIENZ, J.; LANGLEY, D. S. Formulation of the audze-eglais uniform latin hypercube design of experiments. **Advances in Engineering Software**, [S. l.], v. 34, p. 493–506, 2003.
- BAUSAS, M. D.; DANAIO, L. A. M. The aerodynamics of a camber-bladed vertical axis wind turbine in unsteady wind. **Energy**, [S. l.], v. 93, p. 1155–1164, 2015.
- ÇELİK, D.; MERAL, M. E. A flexible control strategy with overcurrent limitation in distributed generation systems. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, [S. l.], v. 104, n. May 2018, p. 456–471, 2019.
- CELIK, I. B.; GHIA, U.; ROACHE, P. J.; FREITAS, C. J.; COLEMAN, H.; RAAD, P. E. Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications. **Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME**, [S. l.], v. 130, n. 7, p. 0780011–0780014, 2008.

CHEN, Q.; ZUO, L.; WU, C.; BU, Y.; HUANG, Y.; CHEN, F.; CHEN, J. Supply adequacy assessment of the gas pipeline system based on the Latin hypercube sampling method under random demand. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, [S. l.], v. 71, n. July, p. 102965, 2019.

CHEN, W. H.; CHEN, C. Y.; HUANG, C. Y.; HWANG, C. J. Power output analysis and optimization of two straight-bladed vertical-axis wind turbines. **Applied Energy**, [S. l.], v. 185, p. 223–232, 2017.

CLARICH, A.; RUSSO, R.; FATEH, N. Multi-objective optimization of a strip-fin microchannel heatsink: Integration comsol multiphysics with modefrontier. **Esteco North America**, [S. l.], 2014.

DEZAN, D. J.; YANAGIHARA, J. I.; JENOVENCIO, G.; SALVIANO, L. O. Parametric investigation of heat transfer enhancement and pressure loss in louvered fins with longitudinal vortex generators. **International Journal of Thermal Sciences**, [S. l.], v. 135, n. July 2017, p. 533–545, 2019.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA- EPE. **Plano nacional de energia 2030: projeções**. [S. l.: s. n.], 2019. Disponível em: www.epe.gov.br.

ESTECO. ModeFrontier. [S.l.: s.n., 200-]. Disponível em: www.esteco.com.

GHASEMIAN, M.; ASHRAFI, Z. N.; SEDAGHAT, A. A review on computational fluid dynamic simulation techniques for Darrieus vertical axis wind turbines. **Energy Conversion and Management**, [S.l.], v. 149, p. 87–100, 2017.

GU, C. **Smoothing spline ANOVA models**. New York: Springer-Verlag, 2013.

HAMEED, M. S. Evaluation of aerodynamic forces over a vertical axis wind turbine blade through CFD analysis. **Journal of Applied Mechanical Engineering**, [S.l.], v. 2, n. 1, p. 1–5, 2013.

HASHEM, I.; MOHAMED, M. H. Aerodynamic performance enhancements of H-rotor Darrieus wind turbine. **Energy**, [S. l.], v. 142, n. ..., p. 531–545, 2018.

HEAM, C. J. **The dynamics of coastal models**. [S. l.]: Cambridge University Press, 2008.

HELWIG, N. E.; MA, P. Smoothing spline ANOVA for super-large samples: Scalable computation via rounding parameters. **Statistics and its Interface**, [S.l.], v. 9, n. 4, p. 433–444, 2016.

HOSSAIN, J. **WWEA technical committee**. [S. l.: s. n.], 2014. Disponível em: <https://wwindea.org/>.

JAFARYAR, M.; KAMRANI, R.; GORJI-BANDPY, M.; HATAMI, M.; GANJI, D. D. Numerical optimization of the asymmetric blades mounted on a vertical axis cross-flow wind turbine. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, [S. l.], v. 70, n. ..., p. 93–104, 2016.

KC, A.; WHALE, J.; URMEE, T. Urban wind conditions and small wind turbines in the built environment: a review. **Renewable Energy**, [S. l.], v. 131, n. ..., p. 268–283, 2019.

KENNY, Q. Y. Orthogonal column latin hypercubes and their application in computer experiments. **Journal of the American Statistical Association**, [S. l.], v. ..., n. ..., p. 1430–1439, 1998.

KUMAR, R.; RAAHEMIFAR, K.; FUNG, A. S. A critical review of vertical axis wind turbines for urban applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 89, n. September 2016, p. 281–291, 2018.

LI, C.; ZHU, S.; XU, Y. L.; XIAO, Y. 2.5D large eddy simulation of vertical axis wind turbine in consideration of high angle of attack flow. **Renewable Energy**, [S. l.], v. 51, n. ..., p. 317–330, 2013.

LI, K. Asymptotic Optimality for C_p , CL , Cross-Validation and Generalized Cross-Validation: Discrete Index Se. **The Annals of Statistics**, [S. l.], v. 15, n. ..., p. 958–975, 1987.

LU, X.; HUANG, J.; SONG, L.; LI, J. An improved geometric parameter airfoil parameterization method. **Aerospace Science and Technology**, [S. l.], v. 78, n. ..., p. 241–247, 2018.

MARTINEZ, M. A. *et al.* Wind turbine tower collapse due to flange failure: Fem and doe analysis. **Engineering Failure Analysis**, [S. l.], v. 104, n. ..., p. 932–949, 2019.

MENTER, F. *et al.* A correlation-based transition model using local variables: Part i — model formulation. **ASME-GT2004-53452**, [S. l.], v. 4, n. ..., p. 57–67, 2004.

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

MUKESH, R.; LINGADURAI, K.; SELVAKUMAR, U. Airfoil shape optimization using non-traditional optimization technique and its validation. **Journal of King Saud University - Engineering Sciences**, [S. l.], v. 26, n. 2, p. 191–197, 2014.

NACCACHE, G.; PARASCHIVOIU, M. Parametric study of the dual vertical axis wind turbine using CFD. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, [S. l.], v. 172, noNovember 2017, p. 244–255, 2018.

NAVID, A.; KHALILARYA, S.; ABBASI, M. Diesel engine optimization with multi-objective performance characteristics by non-evolutionary Nelder-Mead algorithm:sobol sequence and latin hypercube sampling methods comparison in DoE process. **Fuel**, [S. l.], v. 228, n. April, p. 349–367, 2018.

NAZEMIAN, M.; NESHAT, E.; SARAY, R. K. Effects of piston geometry and injection strategy on the capacity improvement of waste heat recovery from rcci engines utilizing doe metohd. **Applied Thermal Engineering**, [S. l.], v. 152, n. ..., p. 52–66, 2019.

RACITI CASTELLI, M.; ENGLARO, A.; BENINI, E. The Darrieus wind turbine: proposal for a new performance prediction model based on CFD. **Energy**, [S. l.], v. 36, n. 8, p. 4919–4934, 2011.

REZAEIHA, A.; KALKMAN, I.; BLOCKEN, B. 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**, [S. l.], v. 107, n. ..., p. 373–385, 2017.

REZAEIHA, A.; MONTAZERI, H.; BLOCKEN, B. Characterization of aerodynamic performance of vertical axis wind turbines: Impact of operational parameters. **Energy Conversion and Management**, [S. l.], v. 169, n. May, p. 45–77, 2018a.

REZAEIHA, A.; MONTAZERI, H.; BLOCKEN, B. Towards accurate CFD simulations of vertical axis wind turbines at different tip speed ratios and solidities: guidelines for azimuthal increment, domain size and convergence. **Energy Conversion and Management**, [S. l.], v. 156, n. October 2017, p. 301–316, 2018b.

RICCO, L.; TURCO, A. Smoothing spline ANOVA for variable screening. **Dolomites Research Notes on Approximation**, [S. l.], v. 6, p. 130–139, 2013.

RICHARDSON, L. F.; GAUNT, J. A. The deferred approach to the limit. **Philos. Trans. R. Soc.**, London, v. ..., n. ..., p. 299–361, 1927.

RICHARDSON, L. F. The approximate arithmetical solution by finite differences of physical problems involving differential equations, with an application to the stresses in a masonry dam. **Philos. Trans. R. Soc.** London, v. ..., n. ..., p. 307–347, 1910.

ROY, S.; BRANGER, H.; LUNEAU, C.; BOURRAS, D.; PAILLARD, B. Design of an offshore three-bladed vertical axis wind turbine for wind tunnel experiments. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON OFFSHORE MECHANICS AND ARCTIC ENGINEERING - OMAE, numero do evento, 2017, Lugar de Realização do evento. **Proceedings...** [S. l.], 2018. v. 10, 2018.

SAWYER, S.; DYRHOLM, M. **Global wind energy report: annual market update 2017**. [S. l.: s. n.], 2018. Disponível em: www.gwec.net.

SIMÃO FERREIRA, C.; VAN KUIK, G.; VAN BUSSEL, G.; SCARANO, F. Visualization by PIV of dynamic stall on a vertical axis wind turbine. **Experiments in Fluids**, [S. l.], v. 46, n. 1, p. 97–108, 2009.

SRANPAT, C.; UNSAKUL, S.; CHOLJARARUX, P.; LEEPHAKPREEDA, T. CFD-based Performance Analysis on Design Factors of Vertical Axis Wind Turbines at Low Wind Speeds. **Energy Procedia**, [S. l.], v. 138, n. ..., p. 500–505, 2017.

STOUT, C.; ISLAM, S.; WHITE, A.; ARNOTT, S.; KOLLOVOZI, E.; SHAW, M.; DROUBI, G.; SINHA, Y.; BIRD, B. Efficiency Improvement of vertical axis wind turbines with an upstream deflector. **Energy Procedia**, [S. l.], v. 118, n. ..., p. 141–148, 2017.

TESCIONE, G.; RAGNI, D.; HE, C.; SIMÃO FERREIRA, C. J.; VAN BUSSEL, G. J. W. Near wake flow analysis of a vertical axis wind turbine by stereoscopic particle image velocimetry. **Renewable Energy**, [S. l.], v. 70, n. ..., p. 47–61, 2014.

TRIVELLATO, F.; RACITI CASTELLI, M. On the Courant-Friedrichs-Lewy criterion of rotating grids in 2D vertical-axis wind turbine analysis. **Renewable Energy**, [S. l.], v. 62, n. ..., p. 53–62, 2014.

TUMMALA, A.; VELAMATI, R. K.; SINHA, D. K.; INDRAJA, V.; KRISHNA, V. H. A review on small scale wind turbines. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [S. l.], v. 56, n. ..., p. 1351–1371, 2016.

VACCARI, R. F.; MARTINS, J. R.; RESSEL, F. D. A.; ROMERO, O. J. Study of turbulence in concentric annular. **Latin American Journal of Energy Research**, [S. l.], v. 4, n. 2, p. 23–32, 2017.

VAN HOOFF, T.; BLOCKEN, B.; AANEN, L.; BRONSEMA, B. A venturi-shaped roof for wind-induced natural ventilation of buildings: Wind tunnel and CFD evaluation of different design configurations. **Building and Environment**, [S. l.], v. 46, n. 9, p. 1797–1807, 2011.

WAHBA, G. **Spline models for observational data**. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1990.

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

WANG, Q. et al. Statistical design of experiment (doe) based development and optimization of db213 in situ thermosensitivel gel for intranasal delivery. **International Journal of Pharmaceutics**, [S. l.], v. 539, n. ..., p. 50–57, 2018.

YANG, A. S. et al. Doe-fem based design improvement to minimize thermal errors of a high speed spindle system. **Thermal Science and Engineering Progress**, [S. l.], v. 8, n. ..., p. 525–536, 2018.

ZHANG, F.; CHENG, L.; WU, M.; XU, X.; WANG, P.; LIU, Z. Performance analysis of two-stage thermoelectric generator model based on Latin hypercube sampling. **Energy Conversion and Management**, [S. l.], v. 221, n. July, p. 113159, 2020.