



CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSU
Mestrado em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial

Rodolfo Rodrigues Lopes

DESEMPENHO AERODINÂMICO DE ROTORES EÓLICOS UTILIZANDO
DUPLA-PÁ: UMA ANÁLISE POR DINÂMICA DOS FLUIDOS
COMPUTACIONAL (CFD)

Salvador
Outubro 2019

Rodolfo Rodrigues Lopes

DESEMPENHO AERODINÂMICO DE ROTORES EÓLICOS UTILIZANDO
DUPLA-PÁ: UMA ANÁLISE POR DINÂMICA DOS FLUIDOS
COMPUTACIONAL (CFD)

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação
Stricto Sensu Centro Universitário SENAI CIMATEC como
requisito para a obtenção do título de Mestre em Modelagem
Computacional e Tecnologia Industrial.

Área de conhecimento: Interdisciplinar

Orientador: Prof. Dr. Alex Álisson Bandeira Santos.

Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Luzia Aparecida Tofaneli

Salvador

Outubro 2019

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do Centro Universitário SENAI CIMATEC

L864d Lopes, Rodolfo Rodrigues

Desempenho aerodinâmico de rotores eólicos utilizando dupla-pá: uma análise por dinâmica dos fluidos computacional (CFD) / Rodolfo Rodrigues Lopes. – Salvador, 2019.

111 f. : il. color.

Orientador: Prof. Dr. Alex Álisson Bandeira Santos.
Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Luzia Aparecida Tofaneli.

Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial) – Programa de Pós-Graduação, Centro Universitário SENAI CIMATEC, Salvador, 2019.
Inclui referências.

1. Projeto aerodinâmico. 2. CFD (Computacional Fluid Dynamics). 3. Desempenho de pá eólica. 4. Dupla-pá. I. Centro Universitário SENAI CIMATEC. II. Santos, Alex Álisson Bandeira. III. Tofaneli, Luzia Aparecida. IV. Título.

CDD: 621.312136

CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC

Mestrado Acadêmico em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial

A Banca Examinadora, constituída pelos professores abaixo listados, aprova a Defesa de Mestrado, intitulada "DESEMPENHO AERODINÂMICO DE ROTORES EÓLICOS UTILIZANDO DUPLA-PÁ: UMA ANÁLISE POR DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)" apresentada no dia 31 de outubro de 2019, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Mestre em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial.



Orientador:

Prof. Dr. Alex Alisson Bandeira Santos

SENAI CIMATEC



Prof.ª Dr.ª Luzia Aparecida Tofaneli

Coorientadora:

SENAI CIMATEC

Membro Interno:



Prof. Dr. Ivan Costa da Cunha Lima

SENAI CIMATEC

Membro Externo



Prof. Dr. Maximilian Serguei Mesquita

UFES

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à Deus que me permitiu sonhar e realizar este objetivo pessoal. À minha esposa Rosa Karine Chagas de Jesus Lopes e filha Anya Vitória Chagas Lopes que me compreenderam durante os momentos em que estive concentrado para curso. Aos meus pais/professores João Rodrigues Neto e Maria Goretti Pereira Lopes Rodrigues, por sempre me incentivarem a adquirir mais conhecimento. Ao sogro João Carlos Gomes Chagas e sogra Maryluce de Jesus Chagas e familiares em geral que entenderam o desejo por se tornar mestre.

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho foi possível devido a orientação do professor Dr. Alex Állison Bandeira Santos, professora Dr^a. Luzia Aparecida Tofaneli e Msc Turan Dias Oliveira, que aceitaram o desafio e sempre com otimismo acreditaram nesta ideia. A todos os amigos do Curso de Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial do Centro Universitário Senai Cimatec que me ajudaram na busca por conhecimento durante a pesquisa e aos colegas da Ford Motor Company do Brasil que contribuíram direta ou indiretamente neste trabalho com ideias. É sempre bom aplicar os conhecimentos adquiridos na idealização de um projeto que venha a contribuir com o desenvolvimento tecnológico nacional.

“Good ideas are always crazy until they’re not”. (Elon Musk)

RESUMO

Com a previsão de crescimento na demanda por energia devido ao aumento de potência de equipamentos, automatizações industriais, eletrificação de automóveis, além do consumo pela população e etc, a geração de eletricidade através de turbinas eólicas pode ser considerada como parcela contribuidora dentre várias soluções à redução da taxa de crescimento do efeito estufa que é provocado pelo contínuo uso de fontes fósseis e não renováveis. Desta forma, no mundo, políticas públicas têm sido criadas para direcionar o desenvolvimento e buscar melhores níveis de eficiência, e conseqüentemente reduzir a emissão de gases poluentes. Contudo, as fabricantes destes equipamentos ao invés de realizarem melhorias nos atuais modelos, ao visarem redução de custo durante a geração de energia por equipamento, tem dispendido esforços para fazer equipamentos cada vez maiores, o que dificulta sua logística de transporte, além do aumento de peso. Dessa forma, este trabalho propõe comparar o rotor de uma Turbina Eólica de Eixo Horizontal (TEEH) até 6,3m de diâmetro com pá convencional, baseado no rotor da turbina NREL 5MW, disponibilizada pela National Renewable Energy Laboratory (NREL) dos Estados Unidos, em relação a duas propostas de dupla-pá inteiriça, uma com mesmo diâmetro e outra com diâmetro reduzido, esta última obtida com o auxílio da teoria aeronáutica de monoplaneo equivalente, como uma possível alternativa para sistemas de microgeração distribuída em cidades e equipamentos de menor porte. O trabalho proposto utiliza perfis finos com o objetivo de redução de arrasto e peso. Fez-se necessário o entendimento do comportamento entre perfis da dupla-pá, compreendendo seus limites e diferenças em relação as pás convencionais. A análise foi feita através da Fluidodinâmica Computacional (CFD, *Computational Fluid Dynamics*), utilizando o software ANSYS CFX 18.2, e o modelo de turbulência utilizado foi o SST (*Shear Stress Transport*). Como resultado a proposta de aerogerador com dupla-pá demonstra o potencial de tornar-se um conceito para produto, capaz de ampliar a geração de energia a partir da seleção adequada de seu local de instalação/aplicação.

Palavras-chave: projeto aerodinâmico; CFD; desempenho de pá eólica; dupla-pá.

ABSTRACT

The electricity forecast growth demand due to the increase of equipment's power, industrial automation, electrified vehicles, besides the population's consumption and etc., the generation of electricity through wind turbines can be considered as a contributing parcel among several solutions for reduction of the greenhouse growth rate that is caused by the continued use of fossil and non-renewable sources. Thus, in the world, public policies have been created to direct development, improvements of efficiency, and consequently reduce the emission of polluting gases. However, the companies that own this technology, instead of making improvements in the current models, aiming to reduce costs during power generation per equipment, has expended efforts to make equipment's increasing, which hinders their transport logistics, in addition the weight gain. Thus, this work is compare a rotor of the Horizontal Axis Wind Turbine type (HAWT) up to 6.3m of diameter using standard blade, based on wind turbine NREL 5MW made available by United States National Renewable Energy Laboratory (NREL) in relation to two proposals of entire double-blade, one with same diameter of standard and a second one as reduced length obtained by aeronautical equivalent monoplane theory, as a possible alternative for systems of distributed microgeneration in cities with small equipment size. This document proposed the usage of thin profiles as purposing of drag and weight reduction. Then, was necessary to understand double-blade profiles's behavior, including their limits and differences according to the standard design. The analysis was done through Computational Fluid Dynamics (CFD), using Ansys CFX 18.2 software, and the SST (Shear Stress Transport) turbulence model. As result of, the double-blade rotor proposed for wind turbine demonstrates potential to become a product, capable to extending power generation by properly selecting its installation site and/or application.

Keywords: Aerodynamic design; CFD; blade performance; double-blade.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Previsões das agências internacionais sobre o uso das fontes.....	18
Figura 2: Geração de energia elétrica por fonte no mundo (1970-2040) e no Brasil (2012-2016, mais o plano decenal para o Caso 1).....	19
Figura 3: Esboço de uma turbina eólica de eixo horizontal (TEEH).....	22
Figura 4: Evolução das turbinas eólicas para geração de energia elétrica.....	23
Figura 5: Capacidade mundial instalada anualmente de energia eólica.....	24
Figura 6: Capacidade mundial instalada cumulativamente de energia eólica.....	25
Figura 7: Capacidade instalada de energia eólica no Brasil conforme relatório GWEC 2018	25
Figura 8: TEEH posição de instalação.....	27
Figura 9: Alguns tipos de TEEV.....	28
Figura 10: Layout construtivo de uma turbina de eixo horizontal.....	28
Figura 11: Fundação para a torre de uma turbina: (a) ferragem e (b) pós concretagem para montagem.....	29
Figura 12: Tipos construtivos de torre: (a) Treliçada, (b) Concreto e (c) Metálica.....	30
Figura 13: Modelos de rotores de turbinas com controle de <i>pitch</i> : a. B75 Siemens e b. E126 Enercon.....	32
Figura 14: Componentes de pá de turbina eólica.....	33
Figura 15: Classificação das regiões de uma pá eólica.....	33
Figura 16: Forças atuando em um perfil aerodinâmico.....	33
Figura 17: Esboço do fluxo tubular de extração de energia por uma turbina eólica.....	34
Figura 18: Seção transversal do fluxo através do rotor.....	35
Figura 19: Fluxo de ar através do rotor.....	39
Figura 20: Comportamento dos coeficientes de potência e de empuxo.....	41
Figura 21: Trajetória de uma partícula de ar ao passar pelo disco do rotor.....	42
Figura 22: Crescimento da velocidade tangencial através da espessura do disco.....	43
Figura 23: Geometria para análise do Rotor TEEH dentro do fluxo tubular.....	43
Figura 24: Escoamento circulando o perfil aerodinâmica.....	47
Figura 25: Efeitos do elemento de pá no anel: (a) Velocidades e (b) esforços aerodinâmicos no perfil.....	48
Figura 26: Primeiro voo em uma aeronave movida com motor em 1903.....	50
Figura 27: Representação do "GAP".....	52

Figura 28: Representação do Ângulo de Stagger: (a) Positivo e (b) Negativo	52
Figura 29: Representação do ângulo de <i>decalagem</i> : (a) positiva e (b) negativa	53
Figura 30: Definição dos ângulos de inclinação e cone em uma turbina TEEH.....	58
Figura 31: Domínio unidimensional para aplicação do método dos volumes finitos.....	63
Figura 32: Definições e distancias num domínio unidimensional.....	63
Figura 33: Dimensões do hub utilizadas em metros	75
Figura 34: Estratégia dos domínios computacionais para análise	75
Figura 35: Dimensões dos domínios estacionário e rotacional	75
Figura 36: Imagem da malha no domínio estacionário (a) e rotacional (b)	77
Figura 37: Detalhes da malha gerada na parede do rotor (a) e perfis (b).....	77
Figura 38: Planos e seções de apresentação dos resultados	80
Figura 39: Resultados de convergência rotor com pá convencional e duplá-pá	82
Figura 40: % de redução de variação na convergência entre malhas para c_p	82
Figura 41: Gráficos de distribuição de torque na pá por malha	84
Figura 42: (a) Potência disponível no vento e (b) produzida nos rotores	85
Figura 43: Comparação dos rotores duplicados ao convencional	86
Figura 44: Comparação dos rotores por TSR.....	86
Figura 45: Gráficos de distribuição de torque na pá por velocidade do vento	87
Figura 46: Linhas de fluxo através do rotor	89
Figura 47: Linhas de fluxo da pá no rotor.....	90
Figura 48: Linhas de fluxo na pá.....	91
Figura 49: Distribuição de pressão total estacionária ao longo da pá.....	92
Figura 50: Distribuição de pressão: segmentos 0-20% à 20-40% da pá.....	93
Figura 51: Distribuição de pressão: segmentos 40-60% à 80-100% da pá.....	94
Figura 52: Distribuição de pressão: planos 20% a 40% da pá	95
Figura 53: Distribuição de pressão: planos 60% à 100% da pá	96
Figura 54: Gráficos do coeficiente de pressão nos planos selecionados 20%-40%	97
Figura 55: Gráficos do coeficiente de pressão nos planos selecionados 60% - 100%	98
Figura 56: Distribuição de velocidade: planos 20% e 60% da pá	99
Figura 57: Distribuição de velocidade: planos 80% a 100% da pá	100
Figura 58: Avaliação de pré-cone e ângulo de inclinação NREL 5MW	108
Figura 59: Avaliação de pré-cone e ângulo de inclinação turbina E1:20	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tipo de layouts de aeronaves	50
Tabela 2: Tipo de layout para biplanos variando o comprimento das asas.....	51
Tabela 3: Pá do rotor NREL 5MW	57
Tabela 4: Propriedades do equipamento turbina de vento base “NREL 5-MW”	57
Tabela 5: Dimensões da pá NREL 5MW e propostas conforme (CHIU, 2017)	60
Tabela 6: Valores das constantes do modelo $k - \varepsilon$	68
Tabela 7: Constantes $k - \omega$ e SST $k - \omega$ revisadas	69
Tabela 8: Variação de GAP para os pontos escolhidos no intervalo	70
Tabela 9: Conversão de pá convencional para dupla-pá equivalente	71
Tabela 10: Escolha do rotor com pá dupla equivalente	72
Tabela 11: Dados para geometria dos rotores em escala para o trabalho	73
Tabela 12: Identificação dos modelos simulados	74
Tabela 13: Malhas selecionadas para o estudo de convergência.....	78
Tabela 14: Condições de contorno utilizadas para convergência de malha.....	79
Tabela 15: Resultados das malhas na análise de convergência	81
Tabela 16: Parâmetros considerados no QBLADE	107

LISTA DE SÍMBOLOS

A_D	Área transversal no disco atuador	$[m^2]$
A_E	Área transversal na entrada do disco atuador	$[m^2]$
A_W	Área transversal na saída do disco atuador	$[m^2]$
a	Fator de indução axial	$[-]$
a'	Fator de indução tangencial	$[-]$
α	Ângulo de ataque	$[^\circ]$
b	Envergadura da superfície	$[m]$
b_{EQ}	Envergadura da superfície equivalente	$[m]$
β	Ângulo de montagem da pá no rotor (“ <i>pitch</i> ”)	$[^\circ]$
c_d	Coefficiente de arrasto do perfil aerodinâmico	$[-]$
c_l	Coefficiente de sustentação do perfil aerodinâmico	$[-]$
c_p	Coefficiente de potência	$[-]$
c_{pres}	Coefficiente de pressão	$[-]$
c_T	Coefficiente de empuxo (“ <i>trust</i> ”)	$[-]$
C_μ	Constante do modelo de turbulência $k - \varepsilon$	$[-]$
$C_{\varepsilon 1}$	Constante do modelo de turbulência $k - \varepsilon$	$[-]$
$C_{\varepsilon 2}$	Constante do modelo de turbulência $k - \varepsilon$	$[-]$
c	Corda do perfil aerodinâmico	$[m]$
ε	Dissipação turbulenta	$[m^2/s^2]$
k_p	Fator de proporção entre a asa e sua equivalente	$[-]$
k	Energia cinética turbulenta	$[m^2/s^2]$
D	Força de arrasto	$[N]$
δx_{we}	Distância entre as faces direita e esquerda do volume de controle	$[m]$
ϕ	Ângulo de fluxo	$[^\circ]$
G	Razão entre corda e GAP entre as asas	$[-]$

g	Aceleração da gravidade	$[m/s^2]$
L	força de sustentação	$[N]$
l	Comprimento	$[m]$
λ	Relação de velocidade na ponta da pá	$[-]$
λ_r	Relação de velocidade local no raio r	$[-]$
m	Massa	$[kg]$
\dot{m}	Taxa do fluxo de massa	$[kg/s]$
η_r	Eficiência do elemento da pá na extração de potência	$[-]$
μ	Relação entre um ponto na pá de raio r pelo R	$[-]$
μ_d	Viscosidade dinâmica	$[N \cdot s/m^2]$
μ_t	Viscosidade dinâmica turbulenta	$[N \cdot s/m^2]$
Ω	Velocidade de angular do rotor	$[rad/s]$
P_{Rotor}	Potência do rotor	$[W]$
$P_{Disp\ Vento}$	Potência disponível do vento	$[W]$
p_E	Pressão na entrada do fluxo do rotor	$[N/m^2]$
p_D^+	Pressão na entrada do disco atuador	$[N/m^2]$
p_D^-	Pressão na saída do disco atuador	$[N/m^2]$
p_W	Pressão na saída do fluxo do rotor	$[N/m^2]$
π	Pi	$[-]$
Q	Torque no rotor	$[N \cdot m]$
R	Raio do rotor	$[m]$
r	Raio local da pá	$[m]$
ρ	Massa específica	$[kg/m^3]$
σ	Solidez do rotor	$[-]$
T	Empuxo no rotor	$[N]$
Γ	Circulação total	$[m/(s \cdot rad)]$
t	Tempo	$[s]$

σ_k	Constante do modelo de turbulência $k - \varepsilon$	
σ_ε	Constante do modelo de turbulência $k - \varepsilon$	
θ	Ângulo de torção	[°]
U_D	Velocidade do ar no disco atuador	[m/s]
U_E	Velocidade de corrente livre (entrada do fluxo do rotor)	[m/s]
U_{ED}	Velocidade do ar na entrada do disco atuador	[m/s]
U_{SD}	Velocidade do ar na saída do disco atuador	[m/s]
U_W	Velocidade do ar na saída do fluxo do rotor	[m/s]
\vec{U}	Vetor tridimensional de velocidades (u, v, w)	[m/s]
ν	Viscosidade cinemática	[m ² /s]
W	Força do vento no perfil aerodinâmico	[N]
ω	Velocidade angular transmitida ao fluxo no rotor	[rad/s]
τ_x	Tensão cisalhante na direção x	[Pa]
u, v, w	Velocidades nas direções x, y e z, respectivamente	[m/s]
x, y, z	Direções cartesianas	[m]
$S_{Mx/y/z}$	Termos fonte de momento nas direções x, y ou z	[kg/(m ² s ²)]
S	Taxa de deformação	[1/s]

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	18
1.1.	JUSTIFICATIVA	18
1.2.	OBJETIVOS	20
1.3.	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO	21
2.	REFERENCIAL TEÓRICO	22
2.1.	AEROGERADORES	22
2.1.1.	EVOLUÇÃO HISTÓRICA	22
2.1.2.	ENERGIA EÓLICA – PRODUÇÃO E CAPACIDADE INSTALADA EM 2017: MUNDO E BRASIL	24
2.1.3.	CLASSIFICAÇÃO DOS AEROGERADORES	26
2.1.4.	TURBINAS EÓLICAS DE EIXO HORIZONTAL (TEEH)	26
2.1.5.	TURBINAS EÓLICAS DE EIXO VERTICAL (TEEV)	27
2.1.6.	PRINCIPAIS COMPONENTES DOS AEROGERADORES	28
2.1.6.1.	FUNDAÇÃO	29
2.1.6.2.	TORRE	29
2.1.6.3.	NACELE	30
2.1.6.4.	CAIXA DE ENGRENAGENS	31
2.1.6.5.	ROTOR	31
2.1.6.6.	PÁS	32
2.2.	AERODINÂMICA DE AEROGERADORES	33
2.2.1.	CONCEITO DO DISCO ATUADOR	34
2.2.2.	TEORIA DE MOMENTO LINEAR	38
2.2.3.	POTÊNCIA EÓLICA DISPONÍVEL	38
2.2.4.	COEFICIENTE DE POTÊNCIA	39
2.2.5.	LIMITE DE BETZ	40
2.2.6.	COEFICIENTE DE EMPUXO	41

2.2.7.	TEORIA DE DISCO DO ROTOR EM UMA TEEH.....	42
2.2.7.1.	ROTAÇÃO DE ESTEIRA E TEORIA DE MOMENTO ANGULAR	42
2.2.8.	TEORIA DE ELEMENTO DE PÁ	47
2.3.	AERONAVES.....	49
2.3.1.	HISTÓRIA DE PROJETO DE AERONAVES	49
2.3.2.	CONCEITOS DE AERONAVES BIPLANAS	51
2.3.3.	CARACTERÍSTICAS APLICADA EM BIPLANOS	51
2.3.3.1.	GAP.....	52
2.3.3.2.	STAGGER.....	52
2.3.3.3.	DECALAGEM	53
2.3.4.	DETERMINAÇÃO DE UM MONOPLANO EQUIVALENTE	53
2.4.	EQUAÇÕES DE CONSERVAÇÃO.....	54
2.5.	TRABALHOS ANTERIORES	56
3.	METODOLOGIA	61
3.1.	O MÉTODO NUMÉRICO	61
3.2.	MODELO DE TURBULÊNCIA	65
3.2.1.	MODELO $k - \varepsilon$	67
3.2.2.	MODELO SST.....	69
3.3.	MODELAGEM COMPUTACIONAL	70
3.3.1.	ANÁLISE DE TAMANHO DO ROTOR PARA O PROJETO	70
3.4.	GEOMETRIAS ESTUDADAS	74
3.5.	MALHA COMPUTACIONAL.....	76
3.6.	CONDIÇÕES DE CONTORNO	79
3.7.	RECURSO COMPUTACIONAL.....	79
3.8.	AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS	80
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	81
4.1.	RESULTADO DE CONVERGÊNCIA DE MALHA	81

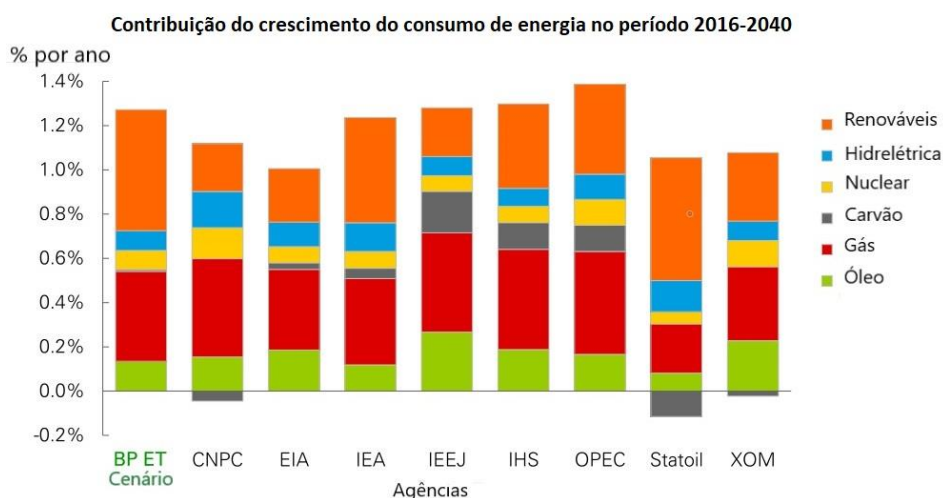
4.2.	GERAÇÃO DE POTÊNCIA NOS ROTORES.....	85
4.3.	DISTRIBUIÇÃO: TORQUE X VELOCIDADE DO VENTO	87
4.4.	COMPORTAMENTO DO ROTOR COM VENTO À 6,5M/S	88
4.4.1.	LINHAS DE FLUXO NO DOMÍNIO	88
4.4.2.	LINHAS DE FLUXO NA PÁ E NO HUB.....	90
4.4.3.	DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÃO NA PÁ	92
4.4.4.	DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÃO POR SEGMENTOS	93
4.4.5.	DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÃO NOS PLANOS	95
4.4.6.	COEFCIENTE DE PRESSÃO NAS SEÇÕES	97
4.4.7.	VELOCIDADE NOS PLANOS DE REFERÊNCIA EM UMA PÁ.....	98
	CONCLUSÃO.....	101
	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	103
	REFERÊNCIAS:	104
	APÊNDICE A	107

1. INTRODUÇÃO

1.1. JUSTIFICATIVA

A demanda por energia elétrica por consequência do aumento de potência em equipamentos eletrônicos, eletrificação veicular, maiores níveis de automação industrial e etc., tem provocado intensificação da geração de energia ano a ano por várias fontes geradoras, sejam elas fósseis e/ou renováveis, desestabilizando o equilíbrio energético do planeta, e contribuindo fortemente com fenômeno conhecido como aquecimento global. Dessa forma, a necessidade na utilização de fontes limpas – conhecidas como fontes renováveis –, tem gerado grandes discussões no mundo, onde agências internacionais tem publicado previsões sobre o consumo de energia a partir destas fontes para os próximos anos, conforme a Figura 1.

Figura 1: Previsões das agências internacionais sobre o uso das fontes.

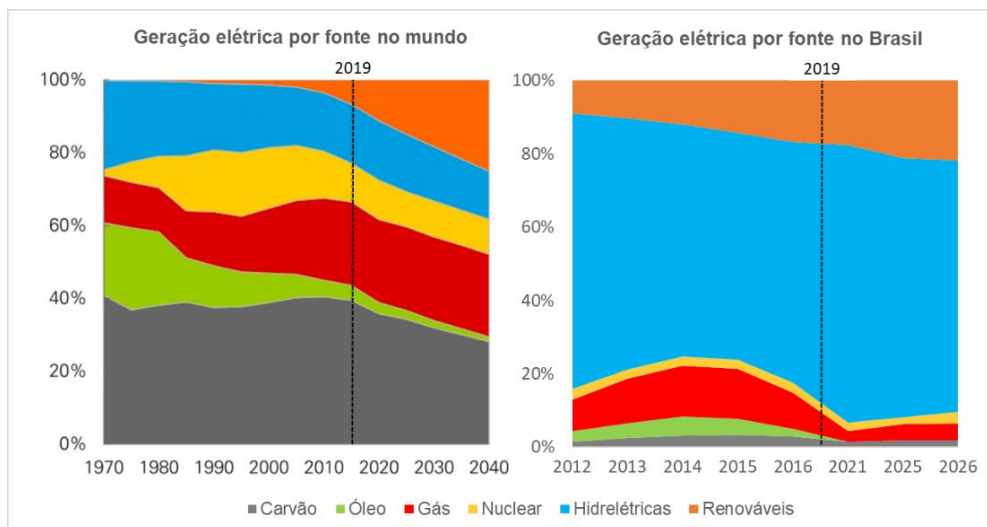


Fonte: modificado pelo autor a partir (BP ENERGY ECONOMICS, 2018)

Porém, de certa forma, políticas governamentais, novas tecnologias e demandas sociais irão alterar o modo de como a energia será produzida e consumida no futuro ao qual é impossível garantir precisão nestas previsões (BP ENERGY ECONOMICS, 2018; EPE, 2017). Com essa visão, como melhorar a eficiência destas tecnologias é um grande desafio para humanidade. Neste intuito, investimentos para aumentar a implantação de novas usinas de energias limpas tem sido aplicados, reduzindo assim o crescimento relativo do uso de fontes não renováveis (BP ENERGY ECONOMICS, 2018). A Figura 2 demonstra a distribuição de

geração elétrica no mundo e Brasil por fonte para os próximos anos. Nitidamente, as fontes renováveis tendem a crescer mais e tomar aproximadamente 25% do mercado.

Figura 2: Geração de energia elétrica por fonte no mundo (1970-2040) e no Brasil (2012-2016, mais o plano decenal para o Caso 1).



Fonte: modificado pelo autor a partir (BP ENERGY ECONOMICS, 2018), (EPE, 2017) e (EPE, 2018)

Correntemente algumas alternativas limpas vêm sendo utilizadas a partir de recursos naturais como luz solar, ventos, ondas marítimas, hidráulica e etc. Neste sentido, a ONU submeteu 17 objetivos durante o acordo de Paris em setembro de 2015, onde o objetivo 7 quer assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a custo razoável a energia para todos, promovendo um melhor balanço entre dimensões sociais, ambientais e econômicas do desenvolvimento sustentável (UNITED NATIONS, 2016). Partindo desde ponto o Brasil tem um papel importante desde que detém aproximadamente 41% de sua matriz energética proveniente de fontes renováveis (PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO (PNUD), 2015; UNITED NATIONS, 2017). E, através do Plano Decenal de Expansão de Energia 2017 a 2027, o Brasil planeja atingir 48% ao final do horizonte decenal de origem renovável. Sendo que o objetivo para o setor eólico é de aprimorar em 11,8GW na capacidade instalada (EPE, 2007). Considerando a capacidade instalada em 2016 de 7,63 à 10,1GW (EPE, 2017), seria um aumento em torno de 116% no aperfeiçoamento da matriz energética com a fixação de prazos para maior uso de energia de fontes renováveis.

A energia eólica neste caso é uma das principais tecnologias em crescimento, onde vêm sendo utilizada para extrair a potência dos ventos, para a geração de energia elétrica. Porém aerogeradores eólicos, durante parte de sua vida útil acabam ficando ociosos por insuficiente

deslocamento de massas de ar ao longo do dia. Portanto, para melhorar a capacidade de geração, fabricantes tem preferido aumentar as dimensões dos equipamentos do que realizar melhorias aerodinâmicas devido seu nível de eficiência. Assim, o esforço necessário para sua instalação tem sido gradativamente dificultado, além da logística para o transporte das peças. Pensando nisso este estudo propôs realizar um comparativo entre rotores de turbinas eólicas com modelo de pá baseada na construção utilizada pela NREL com 5MW, considerando substituir as pás convencionais por pás de perfil duplicado e mesmo sentido, chamadas de dupla-pá, verificando o potencial aumento da taxa de colheita durante a simulação ao considerar seu funcionamento a partir de determinada velocidade de vento, além de observar a oportunidade de redução de suas dimensões, atribuindo melhores condições durante seu transporte e instalação.

1.2. OBJETIVOS

O objetivo desse trabalho é analisar através de fluidodinâmica computacional (CFD) a aplicação do conceito de rotores com dupla-pá inteiriça em comparação a um com pá convencional utilizada em rotores de TEEH, baseado nos perfis aerodinâmicos de construção do modelo NREL 5MW; sendo uma dupla-pá de mesmo diâmetro, e outra com diâmetro reduzido. O coeficiente de potência por sua vez, será o principal resultado, sabendo que a intenção é entender o ganho, se significativo para justificar a continuidade em estudos futuros para a proposta e suas simulações com o equipamento completo, e possíveis otimizações.

Para atingir esse objetivo, etapas devem ser cumpridas, tais como: aquisição de conhecimentos, decisões de quais parâmetros são relevantes para a comparação e análise de resultados. Estas etapas podem ser de acordo com os seguintes objetivos específicos:

- Definir a máquina considerada modelo, para usar como projeto base NREL5MW;
- Propor a geometria do rotor com as variações de dupla-pá e reduzida;
- Determinar a estratégia de simulação e modelos de turbulência adequados ao escoamento;
- Simular aerodinamicamente o rotor de pá convencional e com as propostas em diferentes condições de operação;
- Analisar os resultados sob métricas aerodinâmicas e discutir sobre aprimoramentos para futuros trabalhos;

1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Este documento apresenta 4 capítulos e está estruturado da seguinte forma:

- Capítulo I – Introdução: Fornece a motivação, perspectivas de consumo e tipo de energia utilizada pelo mundo e suas fontes, e os objetivos do trabalho;
- Capítulo II – Referencial teórico: tipos de aerogeradores para a geração de energia elétrica e suas partes, e comentários sobre a história de aeronaves; Fundamentação teórica: Aerodinâmica de turbinas eólicas, cálculo de pá equivalente de aeronaves, além de uma revisão dos trabalhos realizados na área do tema abordado; Método de análise para a escolha do biplano equivalente, e descritivo sobre o método;
- Capítulo III – Metodologia: método de simulação, software e variáveis avaliadas
- Capítulo IV – Resultados e discussão;
- Conclusão – fornece resultados satisfatórios, além de conseguir simular a performance da proposta.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

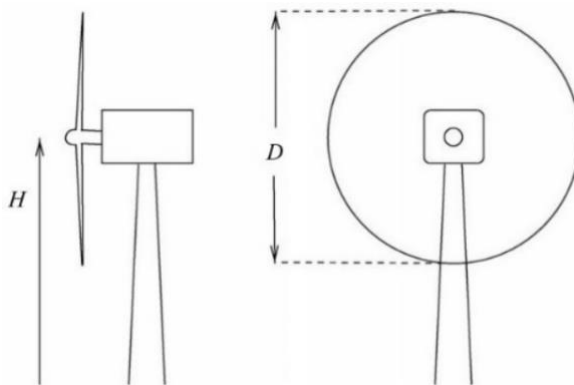
2.1. AEROGERADORES

2.1.1. EVOLUÇÃO HISTÓRICA

Com a necessidade de redução da utilização de fontes não renováveis à geração de eletricidade, moinhos de vento e de água (utilizados a mais de 3000 anos para moer grãos ou bombear água em sistemas de irrigação ou ajudar na drenagem em terras abaixo do nível do mar na Holanda décadas atrás (BURTON et al., 2011)), foram sendo adaptados gradualmente no início do século XX com rotores que, conectados a geradores assíncronos e pás, geravam eletricidade de forma limpa. Assim, sendo nomeadas de turbinas eólicas (HANSEN, 2008).

Entretanto, alguns países iniciaram esforços para desenvolver estes equipamentos quase 30 anos após a segunda guerra mundial, precisamente 1972, onde o interesse em turbinas eólicas para geração de energia elétrica foi estimulado a partir da crise do petróleo, pois desejavam depender cada vez menos desta fonte de energia. E assim, vários programas nacionais de pesquisa foram lançados para fomentar a utilização da energia eólica. A exemplo, o dinamarquês Johannes Juul, funcionário à época da empresa de serviços SEAS e ex-aluno de Paul la Cour, iniciou em seu país os estudos, onde lançou a turbina Gedser de 24m de diâmetro e capacidade para 200kW de potência, muito similar ao conceito atual de turbinas eólicas, porém fabricada em concreto e estruturas metálicas. Como exemplo na Figura 3 temos um esboço de turbina eólica.

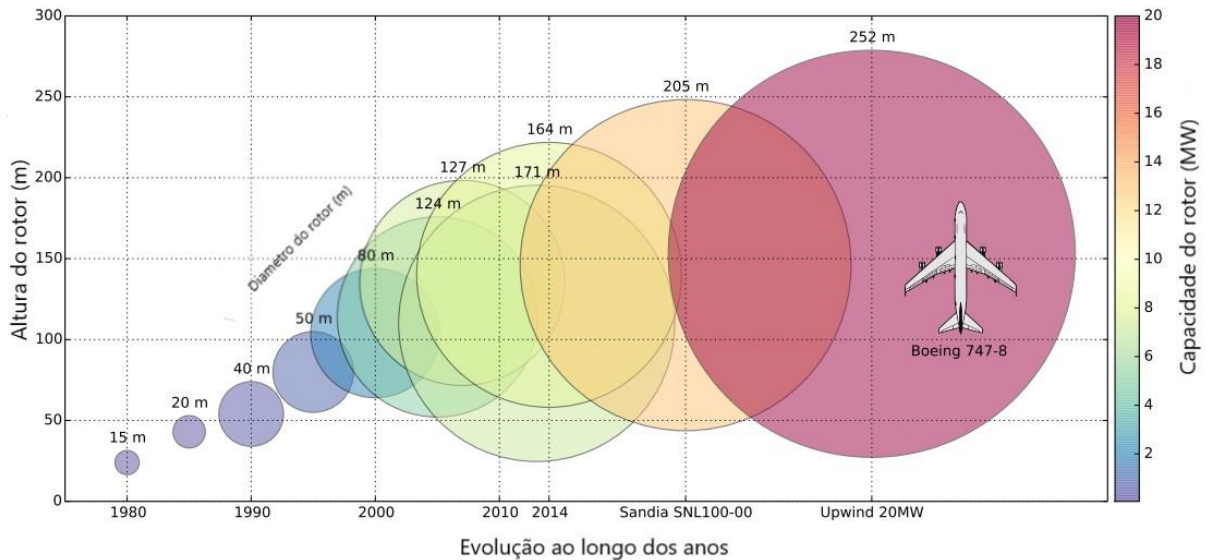
Figura 3: Esboço de uma turbina eólica de eixo horizontal (TEEH)



Fonte: (HANSEN, 2008), p.15

Com a evolução de pesquisas e desenvolvimento, já poderia ser observado que as dimensões de seus componentes como pás, rotores, torres e etc., tinham forte tendência de crescimento, principalmente após o início da década de 90, onde os projetos destes equipamentos tomaram proporções cada vez maiores, como mostra a Figura 4 a evolução e previsão da capacidade de geração nas turbinas eólicas .

Figura 4: Evolução das turbinas eólicas para geração de energia elétrica.



Fonte: modificado pelo autor a partir de (CHIU, 2017), p. 26

Conforme P. Chiu (2017), motivos técnicos e econômicos indicam menor custo de geração de energia elétrica a partir de turbinas maiores. E além disso, pode ser implementada em localidades com baixa média de velocidades de vento devido ao tamanho de suas pás. No entanto, essa decisão pode mudar, pois o crescimento dimensional dos equipamentos, pode afetar a durabilidade dos componentes.

Existem alguns pontos negativos (AHMAD HEMAMI, 2011), dentre os quais destacam-se:

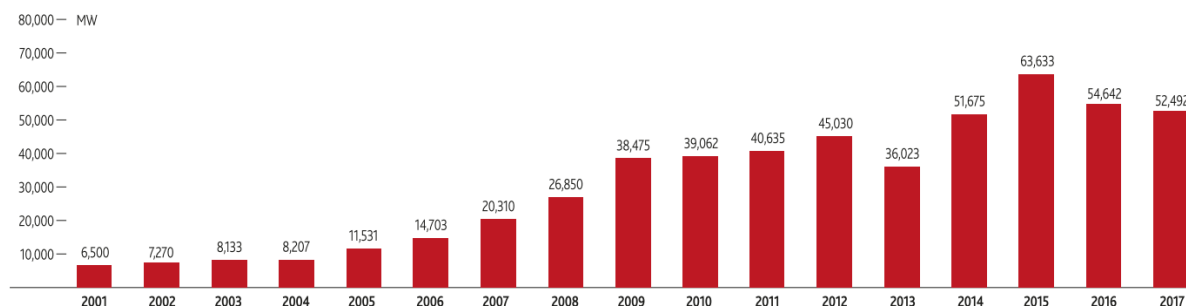
- Aumento de peso dos seus componentes, o que pode provocar incremento de custos no projeto para obter por exemplo, pás mais reforçadas devido a adição de materiais e/ou utilização de materiais mais nobres, evitando quebras por fadiga por efeito gravitacional, e desgaste devido ao aumento de área;

- Redução da eficiência aerodinâmica, com a utilização de perfis mais espessos na região da raiz das pás, que são considerados para ajudar no reforço estrutural daquele componente;
- Custos maiores com instalação do equipamento, devido necessitar de fundações maiores;
- Transporte segmentado dos componentes para que os veículos carregadores possam translada-los de forma segura e rápida, porém, a depender do segmento ou partes não-segmentadas, como as pás, veículos especiais realizam a operação com ajuda de veículos auxiliares. Entretanto faz parte do cálculo de custeio, distância do fabricante ao local de entrega, quanto distante é até as rodovias principais para escoamento da produção e o quão é difícil o acesso ao local de instalação e;
- Necessidade de instalação de linhas de transmissão para receber toda geração produzida por aquele(s) equipamento(s) durante seu funcionamento, ou seja, a depender do local, os custos do projeto, podem aumentar;

2.1.2. ENERGIA EÓLICA – PRODUÇÃO E CAPACIDADE INSTALADA EM 2017: MUNDO E BRASIL

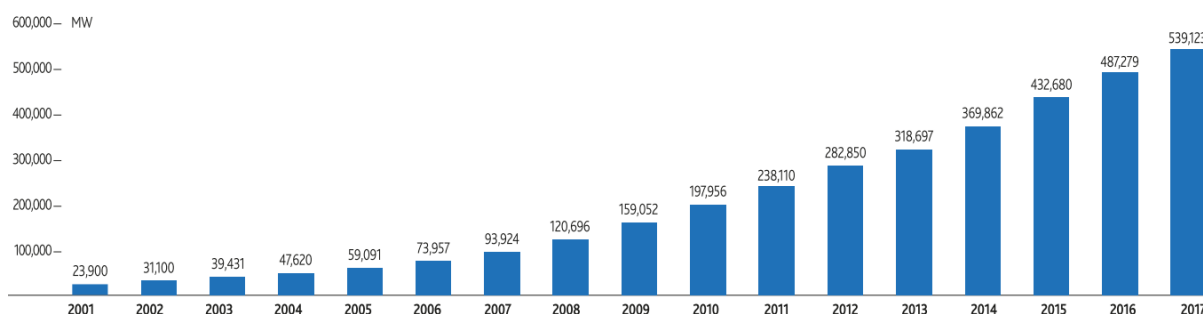
De acordo o relatório da *Global Wind Energy Council* (GWEC, 2018), equipamentos eólicos tem se difundido ainda mais ao passar dos anos, de 2001 a 2017. A capacidade instalada no mundo anualmente e acumulada cresceu pouco mais de oito vezes, conforme a Figura 5 e, 18 vezes conforme a Figura 6, respectivamente.

Figura 5: Capacidade mundial instalada anualmente de energia eólica



Fonte: *Global Wind Energy Report: Annual Market Update 2017* (GWEC, 2018), p. 20

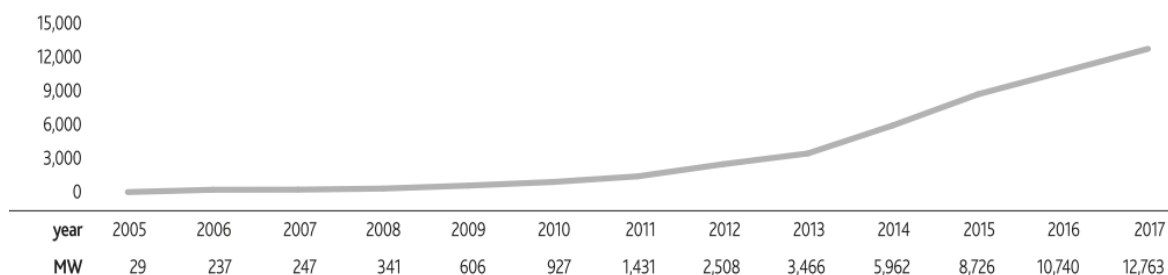
Figura 6: Capacidade mundial instalada cumulativamente de energia eólica



Fonte: Global Wind Energy Report: Annual Market Update 2017 (GWEC, 2018), p.20

Como relevância, a China permanece líder em instalação de aerogeradores sendo que em 2017 a geração de energia eólica atingiu 188,4GW instalados e gerou 305,7TWh, representando 4,8% da geração total de energia elétrica, versus 2015 que era 3,3%. Os Estados Unidos atingiram 89,1GW instalados e gerou 250GWh, sendo estes responsáveis por 6,3% da geração total de energia elétrica no país, no mesmo ano. A União europeia em 2017 também cresceu seu parque eólico para 168,7GW instalados, 336TWh, e 11,6% responsável pela demanda (GWEC, 2018). O Brasil, mesmo não sendo expressivo como a China, USA e União europeia, tem um dos maiores potenciais eólicos no mundo, o que excedem em três vezes as atuais necessidades do país. Atingiu a marca de quase 13GW instalados e gerou 42,3GWh em 2017, crescendo assim para 7,44% sua contribuição em sua matriz energética, que apesar de ter tido queda devido ao cenário econômico nacional, conseguiu investir US\$ 2,5 bilhões sendo que nos meses de agosto e setembro do mesmo ano, bateu recorde de geração, produzindo 10% e 11% nacionalmente, e no nordeste foi responsável por 60% da demanda já que seus reservatórios estavam com níveis abaixo do ideal (GWEC, 2018). A Figura 7 mostra a capacidade instalada em MW no Brasil.

Figura 7: Capacidade instalada de energia eólica no Brasil conforme relatório GWEC 2018



Fonte: Global Wind Energy Report: Annual Market Update 2017 (GWEC, 2018), p. 39

Com a evolução dos projetos, e o Brasil em meio ao clima de crise mundial, potenciais “*blackouts*” em sua rede, no auge da produção industrial, pleno emprego e seu potencial de consumo aumentando, a ANEEL aprovou em 17 de abril de 2012, o aprimoramento da Resolução Normativa número 482/2012, que estabeleceu as condições gerais para o acesso de microgeração (geradores instalados com potência $\leq 75\text{KW}$) e minigeração (potência entre $75\text{KW} < P \leq 5\text{MW}$), e que utilize cogeração qualificada, ou em ambos os casos, utilizem fontes renováveis, conectadas a rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras. Dessa forma, a partir da instalação destas pequenas unidades de geração, a unidade consumidora pode compensar o uso de energias a partir da distribuidora, com sua geração, reduzindo assim o valor de sua fatura de energia seja naquela unidade geradora, ou em outra de mesma propriedade. Assim, surgindo os modelos denominados de microgeração distribuída e minigeração distribuída.

2.1.3. CLASSIFICAÇÃO DOS AEROGERADORES

Existem vários modelos de turbinas eólicas em uso hoje em dia. Seus tipos podem ser baseados na rotação provocada pela sustentação (“*lift-type*”) ou pelo arrasto (“*drag-type*”), e sua classificação pelo posicionamento do eixo principal ligado ao rotor, como discutido a seguir.

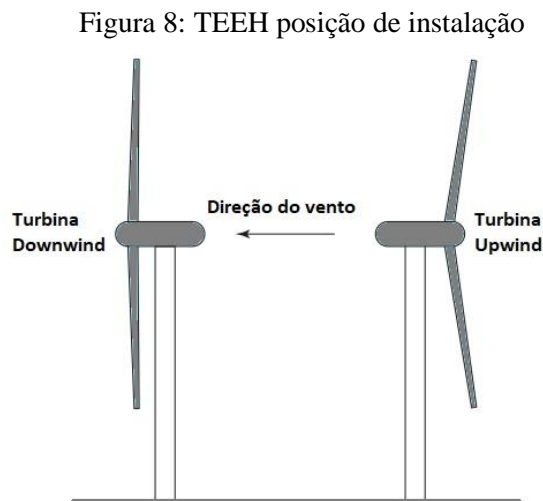
Cada tipo de turbina é projetado para conter propriedades específicas, caracterizadas com seu conceito. A exemplo, ter alto coeficiente de potência e alto torque de partida é recomendado, ao contrário de ter alta solidez que é o percentual de área preenchida pelas pás em relação ao círculo formado no funcionamento do equipamento (AHMAD HEMAMI, 2011), quanto maior, pior será a eficiência do equipamento.

2.1.4. TURBINAS EÓLICAS DE EIXO HORIZONTAL (TEEH)

Turbina Eólica de Eixo Horizontal é o conceito mais comum de aerogerador comercial instalado hoje no mundo, além de construção favorável em comparação as turbinas eólicas de eixo vertical (TEEV) (BURTON et al., 2011), discutidos no próximo tópico. Com variados tamanhos, e com boa eficiência, entretanto muito sensível à direção do vento, pois precisa estar com o eixo paralelo a sua direção. Assim, sendo necessário desenvolver controles para rotação

e mudança de direção para melhor aproveitamento. Além disso, possuem baixo torque de partida (AHMAD HEMAMI, 2011).

Outra característica desse tipo de turbina é sua classificação como rotor atrás da torre (*downwind*) e rotor à frente da torre (*upwind*), neste último evitando a turbulência causada pela torre durante a passagem do vento. Como mostra a Figura 8 o esboço dos tipos de TEEH:



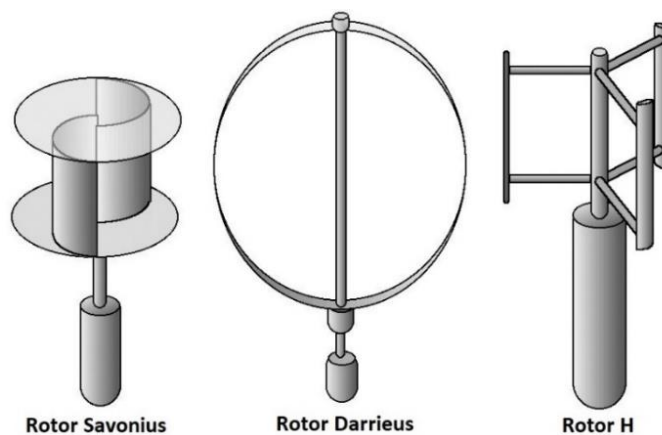
Fonte: modificado pelo autor a partir de (AHMAD HEMAMI, 2011), p. 49.

2.1.5. TURBINAS EÓLICAS DE EIXO VERTICAL (TEEV)

Estes equipamentos não dependem da direção do vento para ter eficiência, como também não necessitam de nacelle e componentes de geração no topo da sua torre (AHMAD HEMAMI, 2011), reduzindo seus custos de instalação e manutenção, e podem ser instalados em locais com ventos variados. Entretanto, como desvantagem possuem velocidade de rotação muito baixa, o que proporciona alto torque, logo uma maior robustez de seus componentes. Em algum momento tem uma ou parte de suas pás na posição *upwind*, e outrora *downwind*. O que provoca captação pulsada, podendo ser instaladas mais pás para suavizar este efeito.

Os modelos mais comuns são: Sarvonius, Darrieus e tipo H, mostrados na Figura 9; o modelo Sarvonius é composto por um eixo e longas pás, em formato semicilíndrico, e que pode ser instalada nas duas condições (vertical e horizontal); o Darrieus é baseado no princípio do acionamento diferencial, onde o vento ao passar pelas faces do corpo oco, cria um binário que rotaciona o conjunto, porém à baixas velocidades de vento não consegue iniciar sua rotação facilmente; e o tipo H, como o próprio nome diz, tem formato de H, com suas pás na vertical ligados por um segmento central ao eixo principal.

Figura 9: Alguns tipos de TEEV

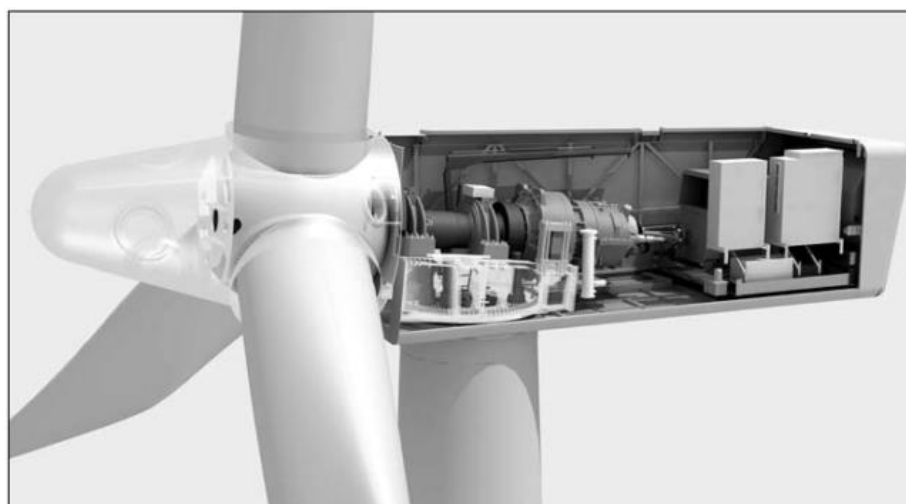


Fonte: modificado pelo autor a partir de grund-wissen¹

2.1.6. PRINCIPAIS COMPONENTES DOS AEROGERADORES

Os componentes descritos a seguir são os principais componentes de turbinas eólicas, entretanto, parte deles em alguns casos não são aplicáveis em algumas delas, portanto a ênfase será em componentes utilizados em TEEH, e mecânicos, tais como: fundação, torre, nacele, caixa de engrenagens, rotor e pás. A Figura 10, mostra o layout construtivo de uma turbina SIEMENS de eixo horizontal.

Figura 10: Layout construtivo de uma turbina de eixo horizontal



Fonte: (HANSEN, 2008), p. 06

¹ Disponível em: <https://www.grund-wissen.de/diplomarbeit/funktionsweisen-erneuerbarer-energietechnologien.html#quaschnig2007>; acesso em 15 de janeiro de 2019.

2.1.6.1. FUNDAÇÃO

Tal como executado na construção civil de edifícios, projetos que tenham grandes altura e quantidade de peso sobre a área pretendida, e esforços laterais provocados pelos ventos, precisam ter uma preparação para receber as cargas oriundas do projeto a ser montado. Essa etapa de preparação é chamada de fundação, que tem como função ser capaz de suportar todas as forças do vento (AHMAD HEMAMI, 2011) e compressão exercida ao solo, sem alterar os parâmetros de instalação, e/ou perder o posicionamentos e alinhamento entre suas partes. O solo no geral não tem uma resistência mecânica alta, e como as turbinas eólicas tem uma área pequena na base da torre, a fundação é feita com uma estrutura metálica e massa suficientemente grande para segurar toda a turbina, impedindo rotações, inclinações e/ou tombamento. As Figura 11.a/b mostram as etapas de preparação para uma fundação.

Figura 11: Fundação para a torre de uma turbina: (a) ferragem e (b) pós concretagem para montagem.



(a)

(b)

Fonte: (AHMAD HEMAMI, 2011), p. 72

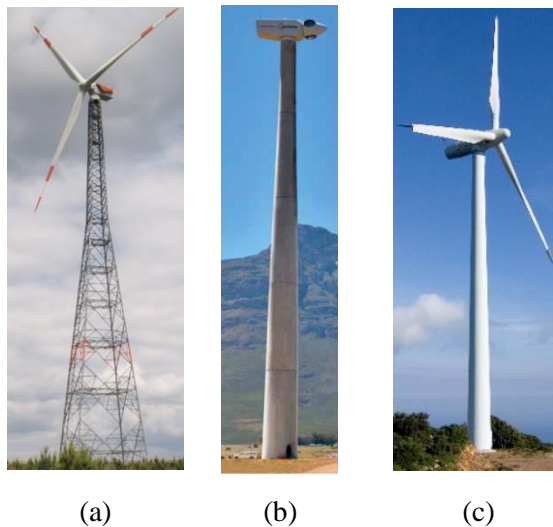
2.1.6.2. TORRE

A torre tem uma estrutura muito bem dimensionada para evitar falhas durante sua operação; sua função é sustentar todo o equipamento na altura de instalação além de resistir as:

- cargas aplicadas pela combinação de seus pesos, forças torcionais do sistema provocadas pelo controle de guinada da nacelle durante o direcionamento do rotor;
- forças aerodinâmicas devido ao arrasto provocado pela: rotação do rotor e da própria torre causado pelo vento em sua estrutura;
- além de vibrações as folgas durante os acoplamentos no ciclo de operação do rotor, caixa de engrenagens e gerador.

Comumente, é fabricada segmentada em estrutura tubular de seção cônica, o que facilita sua fabricação e transporte. Sua montagem é iniciada a partir dos fusos fixados na fundação conforme demonstrado na Figura 11.a. Mas, dependendo do projeto e solo a ser instalado, podem ser fabricadas em torres treliçadas ou de concreto. Possuem altura relacionada em 1 (AHMAD HEMAMI, 2011; HANSEN, 2008) a 1,5 (JONKMAN et al., 2009) vezes o diâmetro do rotor. As Figura 12.a/b/c mostram os tipos de construção de torre eólicas.

Figura 12: Tipos construtivos de torre: (a) Treliçada, (b) Concreto e (c) Metálica



Fonte: Brametal², Concrete Society of Southern Africa³ e EDF⁴ respectivamente

2.1.6.3. NACELE

Pode ser considerada um compartimento que serve para proteger todos os componentes elétricos e mecânicos (ex.: gerador, motores, sistemas de medição, caixa de engrenagens e sistema de freio da turbina) do equipamento e outros equipamentos conforme o projeto da turbina. Sua montagem é através de rolamento entre a nacele e a torre, liberando o movimento de guinada (*yaw*) (MALCOLM; HANSEN, 2006) da turbina, que ajuda na orientação para direcionar contra o vento; como também com o rotor, para o giro livre quando em funcionamento da turbina. Além disso, equilibra o sistema com seu peso como contrapeso em relação ao peso do rotor, conforme mostrado na Figura 10.

² Disponível em: <http://www.brametal.com.br/produto/3/> ; acessado em 26 de janeiro de 2019.

³ Disponível em: <https://concretesociety.co.za/images/stories/publications/CB%20issue%20144.pdf> ; acessado em 26 de janeiro de 2019.

⁴ Disponível em: <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/qu-est-ce-que-l-energie-eolienne>; acessado em 26 de janeiro de 2019.

2.1.6.4. CAIXA DE ENGRENAGENS

Dentre os componentes mecânicos de uma turbina eólica, a caixa de engrenagens é o mais pesado devido a quantidade de elementos mecânicos existentes como: engrenagens, eixos, rolamentos, mancais e etc. Pois ao contrário de caixas comuns onde se reduz a rotação a partir de um motor à combustão ou vapor para as rodas e pneus de veículos automotores, as turbinas eólicas estão entre os casos excepcionais onde a velocidade de rotação do rotor é menor que a velocidade do gerador. Portanto, uma caixa pode ampliar a rotação do rotor em até 75 vezes (ex.: 12:900 / 24:1800) para se tornar apropriada para o gerador (AHMAD HEMAMI, 2011), e em alguns casos 50-60 vezes (ex.: 20:1000 / 50:3000) (HANSEN, 2008). Dessa forma, para atingir ampliações desse porte, são utilizadas caixas planetárias (mais comum em turbinas), ou são adicionados mais pares de engrenagens na árvore.

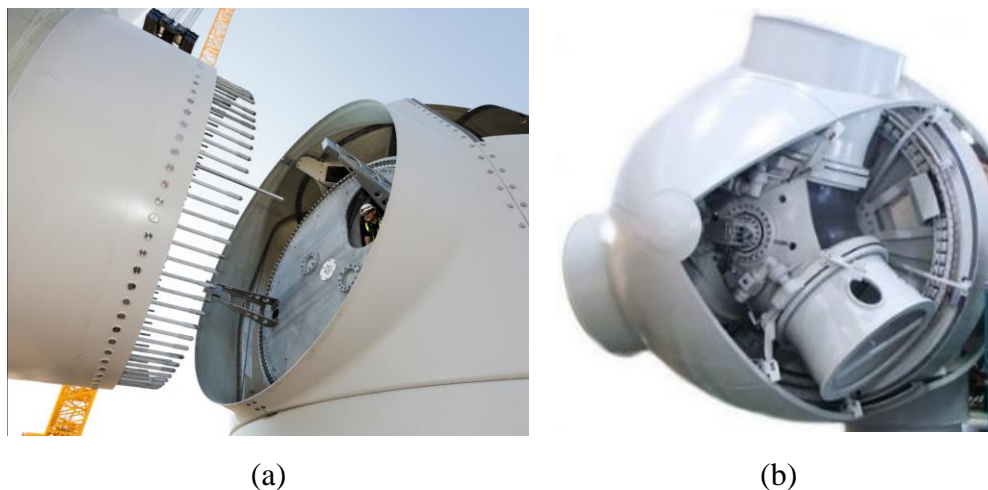
2.1.6.5. ROTOR

Em turbinas eólicas o rotor é composto pelo cubo e pás, este é fixado no eixo principal do equipamento, e ligado a caixa de engrenagens que por sua vez ligada aos geradores de energia elétrica. Já as pás podem ser consideradas como os principais elementos de uma turbina eólica, onde são as partes que capturam o vento, e conseqüentemente aplicam o torque em conjunto com o hub ao eixo. São projetadas com uma longarina principal para carga que suporta um revestimento aerodinâmico externo com leve torção longitudinalmente. Pode-se considerar a pá com único perfil aerodinâmico em toda sua extensão, porém não deve conter os mesmos valores de corda ao longo do seu comprimento. Esta estratégia é praticada por questões aerodinâmicas onde a ponta de uma pá deve acompanhar desde a sua raiz, uma redução progressiva para evitar problemas de peso, além de riscos de quebra devido ao esforço excessivo no engaste (raiz). Seu tamanho traduz a capacidade de colheita do vento e conseqüentemente a geração de potência elétrica. Quanto maiores, peso e resistência são características perseguidas pelos projetistas.

Hoje em dia, além da fixação tradicional por parafusos entre as pás e o cubo, pode se montá-los sem fixação direta quando existem controles de inclinação que variam o ângulo de instalação das pás (ângulo de *pitch*) em relação ao cubo, modificando a quantidade de força do vento na pá, alterando assim a disponibilidade de energia a ser captada a partir do vento,

conforme é mostra a Figura 13.a/b. Esse controle ajuda a minimizar as forças durante o início de operação da máquina (acelerando) e/ou em sua parada (desacelerando) (THOMSEN, 2009).

Figura 13: Modelos de rotores de turbinas com controle de *pitch*: a. B75 Siemens e b. E126 Enercon.



Fonte: Siemens⁵ e Enercon⁶ respectivamente

2.1.6.6. PÁS

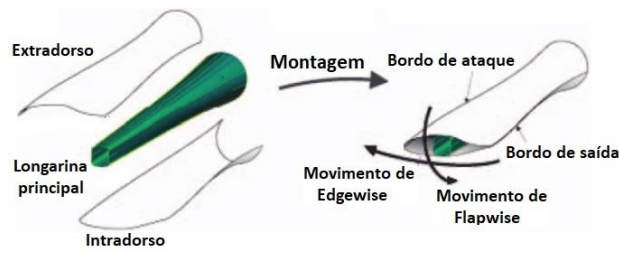
As pás são atualmente elementos em forma de casca que podem ser em camada única ou laminadas (tipo sanduiche), fabricadas de materiais compósitos de alto desempenho, com reforços internos quando requerido. Essa estrutura laminada tem sido bastante aceita pela condição de redução de peso, porém mantendo e/ou melhorando a rigidez a flexões altas, resistência e flambagem.

Os materiais mais comuns são reforçados com fibra de vidro (GFRP), e quando bem maiores, com fibras de carbono (CFRP), que tem sido cada vez mais empregada para redução de peso e consequente melhora na eficiência (THOMSEN, 2009). É requisito de projeto, que a pá deve ser suficientemente resistente para não colidir com a torre durante o carregamento operacional e extremo (estol). Para isso, a longarina em conjunto com a rigidez da cobertura externa, vide Figura 14, assegura que a forma do perfil aerodinâmico seja mantida tão estável quanto possível, mantendo o seu desempenho. A Figura 15 mostra a pá dividida em regiões.

⁵ Disponível em: https://www.siemens.com/press/pool/de/pressebilder/2012/photoneWS/300dpi/PN201209/PN201209-01_300dpi.jpg; acessado em 29 de janeiro de 2019.

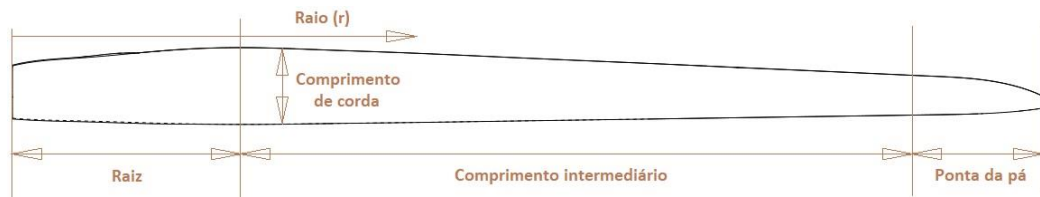
⁶ Disponível em: http://www.solaripedia.com/13/201/2017/enercon_e126_hub_assembly.html; acessado em 29 de janeiro de 2019.

Figura 14: Componentes de pá de turbina eólica



Fonte: Modificada pelo autor a partir de (THOMSEN, 2009), p. 10

Figura 15: Classificação das regiões de uma pá eólica

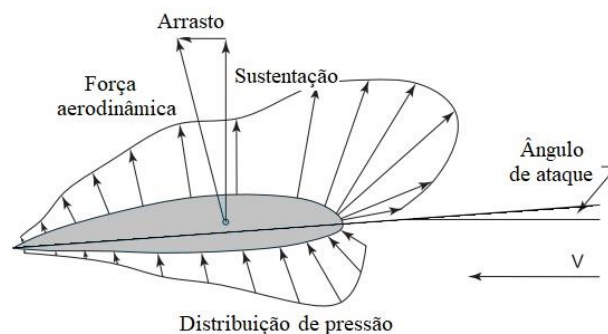


Fonte: Autor

2.2. AERODINÂMICA DE AEROGERADORES

Classicamente, turbinas eólicas são dispositivos que utilizam aerofólios para transformar energia cinética do vento em energia elétrica (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS, 2009) através da interação rotor-vento. Nas TEEH, máquinas *lift-type*, forças aerodinâmicas atuam sobre suas pás a partir da variação de velocidade relativa do vento, o que provocam o torque resultante como mostra a Figura 16.

Figura 16: Forças atuando em um perfil aerodinâmico



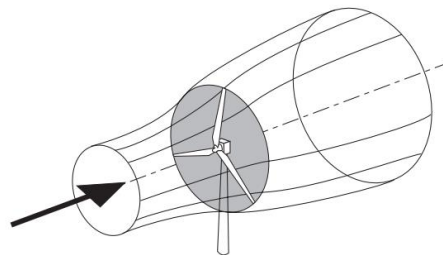
Fonte: Modificado pelo autor de (AHMAD HEMAMI, 2011), p. 40.

Em cada seção da pá, pode-se calcular a velocidade relativa do vento com o auxílio de cálculos trigonométricos a partir das velocidades aerodinâmicas, estimando a potência da

turbina e calculando as forças aerodinâmicas presentes em sua estrutura, como também, projetar outros componentes do equipamento.

Durante a passagem do vento através do disco formado pelo rotor, pode ser considerada que a passagem da massa de ar pelo rotor é separada da que não atravessa e não desacelera, gerando uma superfície limite contemplando o fluxo afetado, estendendo esta superfície antes e após a passagem pelo rotor, e formando uma estrutura tubular de fluxo de seção transversal circular, conforme mostra a Figura 17. Ambos, não tem cruzamento de ar, assim a taxa deste fluxo interno será a mesma ao longo do tubo e conforme atravessa o rotor, o fluxo de ar dentro do tubo desacelera gradualmente à montante devido a presença do rotor, ou seja, quando o ar chega ao disco do rotor sua velocidade já é menor do que a velocidade do vento no fluxo livre (BURTON et al., 2011), aumentando sua pressão estática, e consequentemente absorvendo parte de sua energia cinética. Após a passagem pelo rotor, a pressão é reduzida até que esteja menor do que a pressão atmosférica.

Figura 17: Esboço do fluxo tubular de extração de energia por uma turbina eólica



Fonte: (BURTON et al., 2011), p. 42

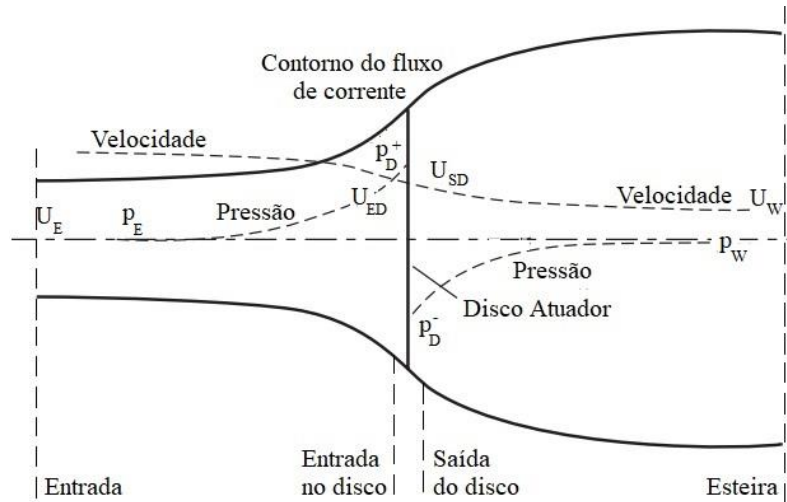
A jusante, enquanto trabalho ainda não é gerado, o fluxo vai se acomodando após o rotor com velocidade menor e pressão estática, e ao se distanciar do rotor vai formando a esteira que se normaliza com o ar fora do fluxo, obtendo o equilíbrio novamente.

2.2.1. CONCEITO DO DISCO ATUADOR

Acima é descrito apenas como funciona o mecanismo de extração da energia cinética do vento por uma turbina, porém não demonstra o que é feito com essa energia; e caso não seja aproveitada, pode voltar ao vento com turbulência e/ou dissipada termicamente devido atrito com o rotor. Entretanto, pode-se iniciar uma análise do comportamento aerodinâmico de turbinas eólicas sem qualquer projeto específico de turbina, apenas considerando o processo de

extração de energia através do mecanismo do disco atuador (BURTON et al., 2011), como mostra a Figura 18.

Figura 18: Seção transversal do fluxo através do rotor.



Fonte: Modificado pelo autor de (BURTON et al., 2011)

O disco atuador tem raio igual ao do rotor que permite a passagem do ar, e assume um volume de controle (V.C.) com o fluxo no formato de um tubo e o aerogerador, representado como um disco atuador uniforme, cria uma descontinuidade de pressão no escoamento de ar deste fluxo (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS, 2009). Algumas considerações devem ser assumidas neste modelo:

- fluido incompressível, homogêneo e escoamento em regime permanente;
- escoamento sem atrito (arrasto friccional);
- infinito número de pás;
- empuxo uniforme em toda a área do disco atuador;
- sem rotação na esteira;
- pressão estática nas seções E e W iguais a pressão estática ambiente não-perturbada.

Aplicando a conservação do momento linear ao V.C. que envolve todo o sistema, pode-se encontrar a força resultante sobre o conteúdo do V.C. Essa força é igual e oposta ao empuxo, T , que é a força do vento na turbina eólica. A partir da conservação do momento linear para um fluxo unidimensional, incompressível e invariante no tempo, o empuxo é igual e oposto à taxa de mudança do momento do fluxo de ar (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS, 2009):

$$T = U_E (\rho A_E U_E) - U_W (\rho A_W U_W) \quad (1)$$

onde, ρ é a densidade do ar, A a área transversal e U a velocidade, respectivamente às regiões, conforme a Figura 18.

Como a expansão à jusante (W) tem a mesma vazão mássica, \dot{m} , à montante (E) e nas regiões antes (ED) e depois do disco (SD), e do próprio disco (D), pode ser aplicada a equação de continuidade no V.C. por ser fluxo constante,

$\dot{m} = \rho A_E U_E = \rho A_{ED} U_{ED} = \rho A_D U_D = \rho A_{SD} U_{SD} = \rho A_W U_W$. Dessa forma, a equação (1), fica:

$$T = \rho A_D U_D (U_E - U_W) \quad (2)$$

O empuxo é positivo, então a velocidade atrás do rotor, U_W , é menor que a velocidade da corrente livre, U_E . Nenhum trabalho é feito em ambos os lados do rotor da turbina. Assim, a função Bernoulli pode ser usada em cada lado do fluxo tubular, dividindo em dois V.C.'s, à montante e à jusante do rotor respectivamente nas equações (3) e (4):

$$p_E + \frac{1}{2} \rho U_E^2 = p_D^+ + \frac{1}{2} \rho U_{ED}^2 \quad (3)$$

$$p_D^- + \frac{1}{2} \rho U_{SD}^2 = p_W + \frac{1}{2} \rho U_W^2 \quad (4)$$

onde as pressões são iguais à montante e após à jusante ($p_E = p_W$), e a velocidade antes do rotor e após permanece a mesma ($U_{ED} = U_{SD}$). A força de empuxo também pode ser expressada pelo somatório de forças em cada lado do disco atuador:

$$T = A_D (p_D^+ - p_D^-) \quad (5)$$

Subtraindo as equações (3) e (4), e substituindo em (5), teremos:

$$T = \frac{1}{2} \rho A_D (U_E^2 - U_W^2) \quad (6)$$

Igualando as equações (2) e (6), e o fluxo no disco atuador sendo $\rho A_D U_D$:

$$\rho A_D U_D (U_E - U_W) = \frac{1}{2} \rho A_D (U_E^2 - U_W^2)$$

$$U_D = \frac{(U_E^2 - U_W^2)}{2(U_E - U_W)} = \frac{(U_E + U_W)(U_E - U_W)}{2(U_E - U_W)}$$

$$U_D = \frac{(U_E + U_W)}{2} \quad (7)$$

ou seja, a velocidade no disco pode ser considerada uma média aritmética da entrada e saída do fluxo tubular.

Considerando que o disco atuador induz uma variação de velocidade na qual deve ser sobreposta na velocidade de corrente livre (BURTON et al., 2011), essa variação pode ser definida como o fator de indução axial, a , que é a diminuição fracionária na velocidade do vento entre a corrente livre e o fluxo tubular (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS, 2009),

$$a = \frac{U_E - U_D}{U_E} \quad (8)$$

assim,

$$U_D = U_E (1 - a) \quad (9)$$

ainda considerando substituir a equação (9) em (7), obtemos:

$$U_E (1 - a) = \frac{(U_E + U_W)}{2}$$

$$U_W = U_E (1 - 2a) \quad (10)$$

Da equação (9), aU_E é a velocidade induzida no rotor, caso em que a velocidade do vento no rotor é uma combinação da velocidade da corrente livre e da velocidade do vento

induzida. À medida que a cresce a partir de zero, a velocidade do vento atrás do rotor reduz intensamente, até que seja igual a zero quando $\lim_{a \rightarrow 1/2} [U_E (1 - 2a)] \Rightarrow 0$.

2.2.2. TEORIA DE MOMENTO LINEAR

O ar que passa através do disco sofre uma mudança drástica na velocidade, $U_E - U_W$ e uma taxa de mudança de momento igual à mudança na velocidade vezes o fluxo de massa. É exatamente igual e oposta a força de empuxo conforme equação (2).

$$\text{Taxa de Mudança de Momento} = |-T|$$

$$\text{Taxa de Mudança de Momento} = \rho A_D U_D (U_E - U_W) \quad (11)$$

substituindo a equação (9) e (10) em (11),

$$\text{Taxa de Mudança de Momento} = \rho A_D U_E (1 - a) \{U_E - [U_E (1 - 2a)]\} \quad (12)$$

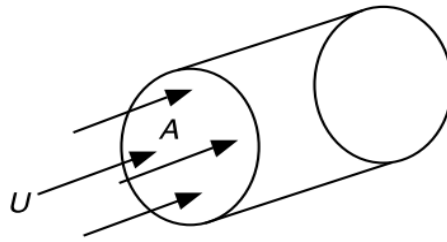
$$\text{Taxa de Mudança de Momento} = 2\rho A_D U_E^2 a (1 - a) \quad (13)$$

A força que causa esta mudança de momento vem inteiramente da diferença de pressão através do disco atuador porque o tubo de fluxo é completamente rodeado pelo ar à pressão atmosférica, o que dá força resultante nula.

2.2.3. POTÊNCIA EÓLICA DISPONÍVEL

Como ilustra a Figura 19, pode-se determinar o fluxo de massa de ar, dm/dt , através de um disco de rotor de área A e velocidade U .

Figura 19: Fluxo de ar através do rotor



Fonte: (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS, 2009), p. 33

Da equação de continuidade da mecânica de fluidos, a taxa de fluxo de massa é em função da densidade do ar, ρ , e velocidade do ar (assumindo uniforme), U , é dado por:

$$\frac{dm}{dt} = \rho AU \quad (14)$$

sabendo que no tubo de fluxo, a velocidade do vento é $U = U_E$.

Assim, considerando a equação (14), a potência do fluxo é dada por:

$$P_{\text{Disponível do Vento}} = \frac{1}{2} \rho AU_E^3 \quad (15)$$

Deve-se notar que a densidade de potência disponível do vento é proporcional à densidade do ar, como exemplo a nível do mar em 15°C é 1,225 kg/m³. A potência do vento é proporcional à área varrida pelo rotor, ou seja, o diâmetro do rotor ao quadrado para uma TEEH. E a densidade de energia eólica é proporcional ao cubo da velocidade do vento.

2.2.4. COEFICIENTE DE POTÊNCIA

Para calcular o c_p , deveremos dividir a potência gerada pela disponível, assim calculando o desempenho do rotor do aerogerador naquele tubo de fluxo. Assim,

$$c_p = \frac{P_{\text{Rotor}}}{P_{\text{Disponível do Vento}}} \quad (16)$$

sabendo que a potência do rotor, P_{Rotor} , é igual ao empuxo vezes a velocidade do disco (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS, 2009), ou pode ser também, a taxa de mudança de momento vezes a velocidade do disco. Desta forma, da equação (13) teremos:

$$P_{Rotor} = 2\rho A_D U_E^2 a(1-a)U_D = 2\rho A_D U_E^2 a(1-a)U_E(1-a)$$

$$P_{Rotor} = 2\rho A_D U_E^3 a(1-a)^2 \quad (17)$$

substituindo as equações (15) e (17) em (16),

$$C_P = \frac{2\varnothing A_D U_E^3 a(1-a)^2}{\frac{1}{2}\varnothing A_D U_E^3}$$

$$C_P = 4a(1-a)^2 \quad (18)$$

2.2.5. LIMITE DE BETZ

O limite de Betz é definido como o valor teórico obtido através da equação (18) para que seja atingida a máxima potência teórica possível de um rotor. É calculado a partir da derivada em relação ao fator de indução axial igualada a zero para obter o valor do coeficiente.

$$\frac{dC_P}{da} = 0 \quad (19)$$

assim, o fator de indução axial ideal é igual à, $a = 1/3$, ou seja, da equação (18),

$$C_{Pm\acute{a}x} = 16/27 \text{ ou } C_{Pm\acute{a}x} \cong 0,5926 \quad (20)$$

Quando o fator de indução axial está abaixo do limite de Betz, a turbina eólica não está captando todo o potencial eólico do vento. Mas, se o fator de indução axial estiver mais alto, o ar estará sendo desviado do rotor, reduzindo sua eficiência devido queda de pressão ao redor da turbina, permitindo que mais ar passe pela turbina, mas não o suficiente para compensar a falta de energia sendo extraída (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS, 2009).

2.2.6. COEFICIENTE DE EMPUXO

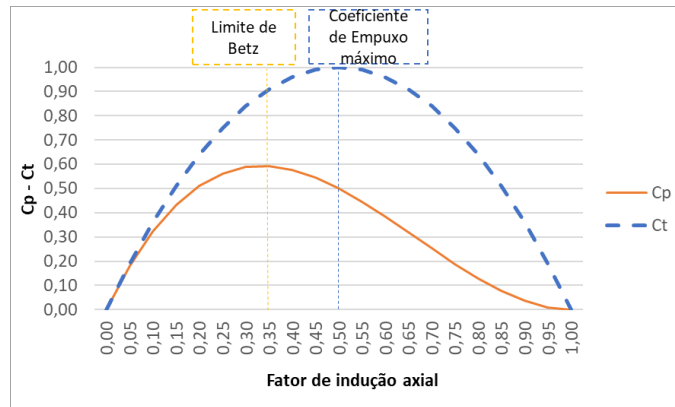
O coeficiente de empuxo pode ser capaz de demonstrar o carregamento axial que o fluxo impele no rotor durante a captação de energia e queda de pressão, ou seja, quanto as linhas de corrente do fluido divergem devido à desaceleração do fluido no disco atuador. De certa forma pode-se utiliza-lo para ajudar no projeto estrutural da torre e seus reforços. Da equação (2), teremos,

$$C_T = \frac{\text{Empuxo no Rotor}}{\text{Força Dinâmica}} = \frac{\rho A_D U_D (U_E - U_W)}{\frac{1}{2} \rho U_D^2 A_D} = \frac{2 \rho A_D U_E^2 a (1-a)}{\frac{1}{2} \rho U_E^2 A_D}$$

$$C_T = 4a(1-a) \quad (21)$$

e para valores de $a \geq 1/2$, a velocidade a jusante $U_W = U_E (1-2a)$ tende a zero, ou até valores negativos (BURTON et al., 2011). Conforme mostra a Figura 20 os coeficientes de potência e de empuxo.

Figura 20: Comportamento dos coeficientes de potência e de empuxo



Fonte: Autor

Dessa forma, observasse que o limite de Betz não possui relação geométrica com o aerogerador, sendo relacionado somente com a captura de energia da corrente de ar pelo rotor, ou seja, não serve para se projetar as pás do mesmo. Na prática, três efeitos levam a diminuição do coeficiente de potência: rotação na esteira atrás do rotor; número finito de pás e arrasto aerodinâmico não nulo (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS, 2009).

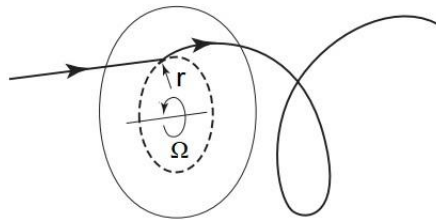
2.2.7. TEORIA DE DISCO DO ROTOR EM UMA TEEH

A conversão da energia extraída do vento em energia utilizável é dependente do projeto da turbina (BURTON et al., 2011). Seu funcionamento ocorre com a diferença de pressão através do disco gerado pelo rotor ao rotacionar com velocidade Ω em torno de seu eixo, além de perpendicular à direção do vento. Parte desta energia é coletada devido à perda de momento axial após a passagem pelo disco do rotor, provocando reações como empuxo e um torque na direção da rotação devido ao gerador instalado no interior da nacela exercer um torque reativo ao fluxo de ar que mantém constante a velocidade de rotação. Esse torque dinâmico no gerador assim é convertido em energia elétrica.

2.2.7.1. ROTAÇÃO DE ESTEIRA E TEORIA DE MOMENTO ANGULAR

Como consequência do torque de reação provocado pelo equipamento, o fluxo de ar gira em direção oposta à do rotor, ganhando momento angular e assim, na esteira do disco do rotor, as partículas de ar são compostas em componente de velocidade axial, e tangencial à direção de rotação, como mostra a Figura 21, o que significa um aumento em sua energia cinética que é compensada pela queda de pressão estática do ar na esteira (BURTON et al., 2011). Porém, o fluxo deixa o rotor em forma de espiral, onde seu poder energético é reduzido, o que sugere boas práticas em projetos de parques eólicos para distância entre as turbinas de 3-5 diâmetros do rotor para reestabelecer o fluxo (BURTON et al., 2011).

Figura 21: Trajetória de uma partícula de ar ao passar pelo disco do rotor

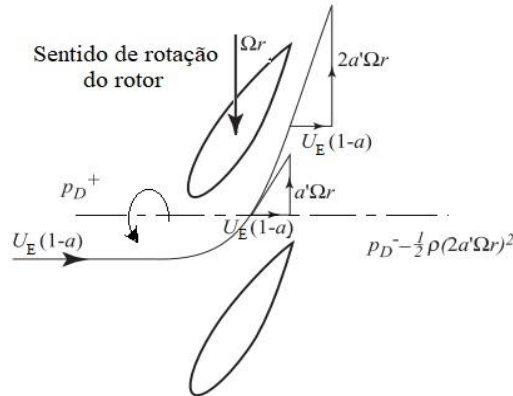


Fonte: (BURTON et al., 2011), p. 47

O fluxo é rotacionado ao passar pelo disco, modificando sua velocidade tangencial através do fator de indução de fluxo tangencial a' , mantendo sua rotação constante ao atravessar a esteira. A Figura 22 mostra em uma distância r do eixo de rotação do disco, as componentes de velocidade axial (constante) e tangenciais ao passar pelo rotor. Conforme se

aproxima da raiz, aumenta a solidez e altos valores de velocidade tangencial são provocados; ou seja, em qualquer posição radial do disco e sua velocidade induzida também varia.

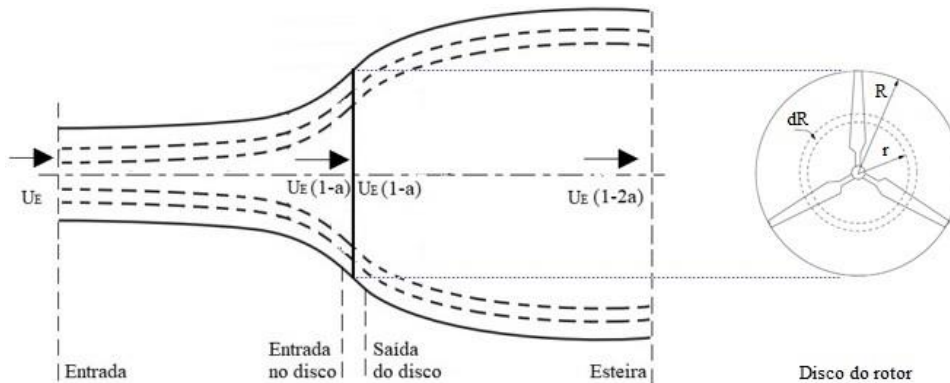
Figura 22: Crescimento da velocidade tangencial através da espessura do disco



Fonte: Modificado pelo autor

Discretizando o disco do rotor conforme a Figura 23, onde as componentes: velocidade axial é reduzida pela força axial atuante no anel, e a velocidade tangencial é provocada pelo torque atuante no rotor. Estas são em função do raio dr , assumindo que cada anel seja independente e apenas naquela no fluxo que passa por ele (BURTON et al., 2011).

Figura 23: Geometria para análise do Rotor TEEH dentro do fluxo tubular



Fonte: Autor

A geração de energia cinética rotacional na esteira a partir de uma área de anel, $2\pi r dr$, no fluxo tubular, resulta em menos extração de energia pelo rotor do que seria esperado sem rotação de esteira (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS, 2009). E assumindo que a velocidade angular transmitida, ω , à corrente de fluxo seja menor que a velocidade angular do rotor, Ω , então $p_W = p_E$. Assim, utilizando a equação de energia no disco, pode-se calcular a

diferença de pressão no disco, onde a velocidade angular do ar em relação à pá aumenta de Ω para $\Omega + \omega$. Mantendo a velocidade axial constante, assim:

$$p_2 - p_3 = \rho \left(\Omega + \frac{1}{2} \omega \right) \omega r^2 \quad (22)$$

da equação (22), o empuxo no elemento anular dT em função de dr é,

$$dT = (p_2 - p_3) dA = \left[\rho \left(\Omega + \frac{1}{2} \omega \right) \omega r^2 \right] 2\pi r dr \quad (23)$$

Conforme Manwell, McGowan e Rogers (2009) o fator de indução de fluxo tangencial é definido como $a' = \omega/2\Omega$, assim, substituindo na equação (23), a componente tangencial de empuxo no plano do rotor para aquela área $2\pi r dr$ é,

$$dT = \left[\rho \left(\Omega + \frac{1}{2} \omega \right) \omega r^2 \right] 2\pi r dr = \left[\rho (\Omega + a' \Omega) 2a' \Omega r^2 \right] 2\pi r dr$$

$$dT = 2a'(1+a') \rho \Omega^2 r^2 2\pi r dr \quad (24)$$

lembrando da equação (13), podemos considerar a componente axial do empuxo em função de dr para ser calculado o empuxo,

$$dT = 2\rho U_E^2 a(1-a) dA_D$$

$$dT = 2\rho U_E^2 a(1-a) 2\pi r dr \quad (25)$$

ao igualar as duas expressões (24) e (25) para o empuxo, teremos a relação de velocidade local λ_r^2 , que é a relação de velocidade do rotor para à velocidade do fluxo de ar naquele raio r . Assim,

$$\int a'(1+a') \rho \Omega^2 r^2 \int \pi r dr = \int \rho U_E^2 a(1-a) \int \pi r dr$$

$$a'(1+a') \Omega^2 r^2 = U_E^2 a(1-a)$$

$$\frac{\Omega^2 r^2}{U_E^2} = \lambda_r^2 \quad (26)$$

e para o raio do rotor R , pode ser definida a relação de velocidade na ponta da pá (*Tip Speed Ratio* - TSR) para a velocidade do fluxo livre de vento como $\lambda = \Omega R / U_E$. Ou seja, de Manwell, McGowan e Rogers (2009), teremos a relação $\lambda_r = \lambda r / R$.

O torque no anel é igual a relação de mudança de momento angular do ar que atravessa o disco do rotor, que é o produto do fluxo de massa, mudança de velocidade tangencial e raio daquele anel.

$$dQ = \rho U_E (1-a) dA_D \times 2\Omega r a' \times r$$

$$dQ = 2\rho U_E (1-a) a' \Omega r^2 2\pi r dr \quad (27)$$

Dessa forma, com a equação (27), poder-se definir o incremento de potência,

$$dP = \Omega dQ \quad (28)$$

assim, a potência total extraída do vento por desaceleração é, também, determinada pela taxa de variação do momento axial dada pela equação (13).

$$dP = 2\rho U_E^3 a(1-a)^2 2\pi r dr \quad (29)$$

igualando as equações (29) com (28) temos,

$$\int \rho U_E^3 a(1-a)^2 \int \pi r dr = \int \rho U_E (1-a) a' \Omega^2 r^2 \int \pi r dr$$

$$a(1-a) = a' \frac{\Omega^2 r^2}{U_E^2} \quad (30)$$

substituindo na equação (30), com a relação de velocidade local, λ_r , teremos,

$$a(1-a) = a' \lambda_r^2 \quad (31)$$

Para obter a potência gerada em cada elemento, deve substituir a resolução da equação (31) na equação (29) o termo $a' \Omega^2 r^2$, e conseqüentemente $a(1-a)$:

$$\begin{aligned} dP &= 2\rho U_E (1-a) a' \Omega^2 r^2 2\pi r dr = 2\rho U_E (1-a) U_E^2 a(1-a) 2\pi r dr \\ dP &= 2\rho U_E^3 (1-a) a' \lambda_r^2 2\pi r dr \\ dP &= \left(\frac{1}{2} \rho U_E^3 dA \right) 4a'(1-a) \lambda_r^2 \end{aligned} \quad (32)$$

observando o termo entre parênteses da equação (32), e relembrando a equação (15) temos a potência disponível do vento, e o segundo termo é a eficiência do elemento da pá na extração de potência:

$$\eta_r = 4a'(1-a) \lambda_r^2 \quad (33)$$

Se evidenciar a potência no elemento de pá em função de λ_r ,

$$dP = \frac{1}{2} \rho U_E^3 A \left[\frac{8}{\lambda^2} a'(1-a) \lambda_r^3 d\lambda_r \right] \quad (34)$$

dessa forma, o c_p pode ser dado pela equação (32) em função do r com (15)

$$\begin{aligned} \frac{dC_p}{dr} &= \frac{\left(\frac{1}{2} \rho U_E^3 \pi r dr \right) 8a'(1-a) \lambda_r^2}{\frac{1}{2} \rho U_E^3 \pi R^2} = \frac{8(1-a) a' r \left(\lambda r / R \right)^2}{R^2} dr \\ dC_p &= 8(1-a) a' \lambda^2 \frac{r^3}{R^3} \frac{dr}{R} \\ \frac{dC_p}{d\mu} &= 8(1-a) a' \lambda^2 \mu^3 \end{aligned} \quad (35)$$

onde $\mu = r/R$.

A equação (35) pode ser integrada para determinar o coeficiente de potência do disco para uma dada relação de velocidade na ponta da pá, λ , e o fator de indução axial na máxima condição, $a = 1/3$ e, $a' = a(1-a)/\lambda^2 \mu^2$ seu resultado será o mesmo da equação (18), obtendo o mesmo valor do limite de Betz:

$$C_p = \int_0^1 8(1-a) \left[\frac{a(1-a)}{\lambda^2 \mu^2} \right] \lambda^2 \mu^3 d\mu$$

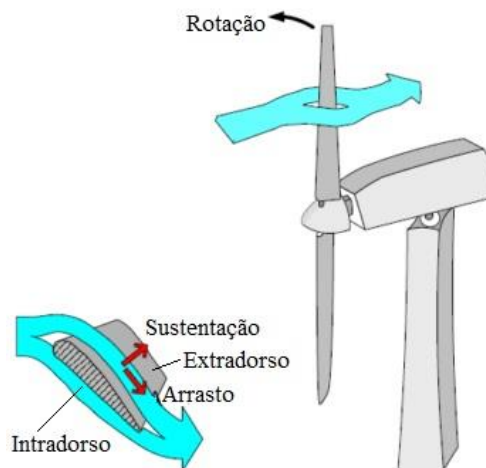
$$C_p = \int_0^1 8a(1-a)^2 \mu d\mu \Rightarrow \left[4a(1-a)^2 \mu^2 \right]_0^1$$

$$C_p = 4a(1-a)^2 \quad (36)$$

2.2.8. TEORIA DE ELEMENTO DE PÁ

Durante o escoamento, o fluxo cobre o perfil aerodinâmico, onde parte do fluido circula sobre o elemento pelo extradorso, e a outra parte envolve seu intradorso, conforme a Figura 24 mostra em um elemento de pá.

Figura 24: Escoamento circulando o perfil aerodinâmica

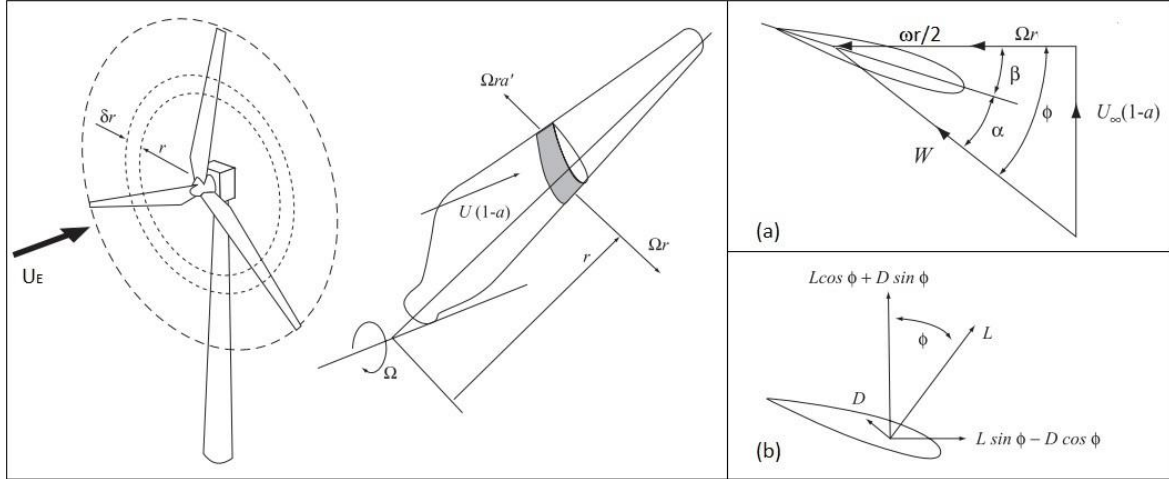


Fonte: modificado a partir de Rocha (2008)

Desta forma, uma resultante é gerada a partir da força de sustentação e da força de arrasto. Onde a sustentação é perpendicular ao fluxo de ar, e está relacionada a diferença de

pressão estática entre o intradorso e o extradorso. E a de arrasto é paralela ao fluxo, e definida com a relação entre o perfil do elemento e o escoamento, assim conforme mostra a Figura 25.

Figura 25: Efeitos do elemento de pá no anel: (a) Velocidades e (b) esforços aerodinâmicos no perfil



Fonte: modificado pelo autor a partir de Burton et al. (2011), p. 61 e 62

As forças de sustentação e arrasto em um elemento de pá podem ser calculadas em função das características aerodinâmicas dos aerofólios que compõem a pá, podendo ser expressas em função dos coeficiente de sustentação c_l e arrasto c_d , e ângulo de ataque α . Ignorando a componente de velocidade no escoamento radial e o efeito tridimensional (BURTON et al., 2011), não há interação entre os elementos da pá.

Assim, a pá é dividida em n elementos para definir o conceito de velocidade relativa, que é a soma vetorial da velocidade axial do vento no rotor, $U_E(1-a)$, e a velocidade tangencial no plano de rotação, como mostra a Figura 25.a. A componente tangencial, é a soma das velocidades de rotação da pá e sua velocidade induzida. Onde, $a' = \omega/2\Omega$.

$$U_t = \Omega r + \frac{\omega r}{2} = \Omega r + \Omega a' r$$

$$U_t = \Omega r(1 + a') \quad (37)$$

conforme a Figura 22, pode-se considerar $U_t = \frac{U_E(1-a)}{\tan \phi}$, portanto, para a velocidade relativa, $W = \sqrt{U_a^2 + U_t^2}$, podemos obter:

$$W = \sqrt{U_E^2 (1-a)^2 + \Omega^2 r^2 (1+a')^2} \quad (38)$$

ou

$$W = \sqrt{U_E^2 (1-a)^2 \left(1 + \frac{1}{\tan^2 \phi}\right)} \quad (39)$$

Analisando a Figura 25, obtém-se o ângulo de fluxo ϕ pela soma dos ângulos de ataque α e de montagem da pá no rotor, β . Como também, relacionando a velocidade relativa, conforme (38), com as velocidades axial e tangencial no plano de rotação do rotor; obtendo:

$$\sin \phi = \frac{U_E (1-a)}{W} \quad (40)$$

$$\cos \phi = \frac{\Omega r (1+a')}{W} \quad (41)$$

O ângulo de ataque em geral, varia com o raio em uma pá real, e a soma das forças em cada elemento de pá é igual a somatório das forças atuantes na pá. Mostra-se então que as forças de sustentação e arrasto atuantes em um elemento com corda, c e raio, r , são:

$$\delta L = \frac{1}{2} \rho W^2 c C_L \delta r \quad (42)$$

$$\delta D = \frac{1}{2} \rho W^2 c C_D \delta r \quad (43)$$

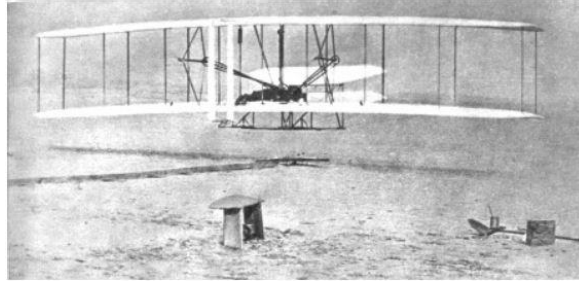
2.3. AERONAVES

2.3.1. HISTÓRIA DE PROJETO DE AERONAVES

Os irmãos Wright (Orville e Wilbur), construíram em 1899 o primeiro modelo biplano dirigido por uma pipa de corda como o passo inicial para que em 1901 pudessem realizar o primeiro voo tripulado sobre trilhos, com 12 (doze) segundos de duração, a uma velocidade de

12km/h. Já em 1903, foi construído um novo projeto para realização do primeiro voo utilizando um motor, como mostra a Figura 26 (HARRINGTON, EDWIN Y GALVEZ, [s.d.]).

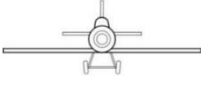
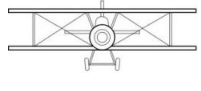
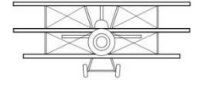
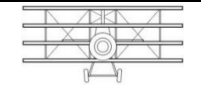
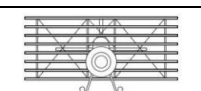
Figura 26: Primeiro voo em uma aeronave movida com motor em 1903.



Fonte: (HARRINGTON, EDWIN Y GALVEZ, [s.d.]), p. 131

A partir daí estudos aeronáuticos tiveram seu início, o que foram sendo aprimorados e aplicados ao redor do mundo em aeronaves cada vez mais modernas e eficientes, além de suas asas com variadas formas e geometrias. Como exemplos temos os tipos de layout utilizados na época, como mostra a Tabela 1:

Tabela 1: Tipo de layouts de aeronaves

Desenho ⁷	Nomenclatura	Quantidade de superfícies de sustentação
	Monoplano	01
	Biplano	02
	Triplano	03
	Quadriplano	04
	Multiplano	≥05

Fonte: Autor

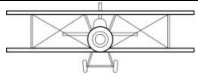
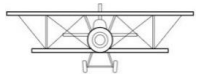
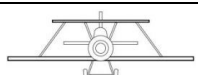
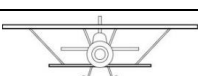
Como o foco deste trabalho é avaliar a proposta de um projeto de pá eólica utilizando duas superfícies de sustentação, será apenas concentrado nas variações de geometrias de aeronaves biplanas, para adaptação em um projeto de turbinas eólicas do tipo TEEH.

⁷ Disponíveis e acessados em 10 de março de 2019 às 20:52h: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Monoplano>

2.3.2. CONCEITOS DE AERONAVES BIPLANAS

Aeronave de configuração biplana não tem sido muito utilizada no mundo atual como foi até a metade do século XX, entretanto percebe-se que grande quantidade desse tipo de aeronave ainda está em operação nas diversas áreas (irrigação, competições de manobras, encontros de aeronaves antigas e etc.). Esta seção apresenta os principais conceitos de construção e mostra quais características podem ser avaliadas em um projeto de aeronaves biplanas, como também mostra algumas expressões matemáticas que podem ser utilizadas para a conversão de uma aeronave biplana para monoplana equivalente de forma simplificada (RODRIGUES, 2014), onde suas características aerodinâmicas podem ser obtidas (MUNK, 1923a). Na Tabela 2, pode ser observada a construção destas aeronaves via as proporções do comprimento de sua envergadura.

Tabela 2: Tipo de layout para biplanos variando o comprimento das asas.

Desenho ⁸	Nomenclatura	Descrição
	Comum	Asa superior e inferior iguais.
	Asas Desiguais	Com asa inferior menor que a de cima e possuindo montantes.
	Sesquiplano	Com asa inferior muito menor e não possui montantes.
	Sesquiplano Invertido	Inversa ao conceito Sesquiplano.

Fonte: Autor

2.3.3. CARACTERÍSTICAS APLICADA EM BIPLANOS

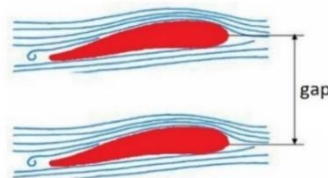
De acordo com Rodrigues (2014), existem três parâmetros que podem variar alterando o posicionamento dos perfis em um determinado plano; são eles: *Gap*, *Stagger* e *Decalagem*.

⁸ <https://pt.wikipedia.org/wiki/Biplano> acessado em 24/08/2018 às 20:52h

2.3.3.1. GAP

O *gap* é a distância vertical entre as asas de um biplano, medida perpendicularmente ao eixo longitudinal da aeronave. E, é representado pela relação *gap/corda*, geralmente ≤ 1 . O fator principal a ser levado em conta nesta relação é a interferência do escoamento gerado em cada uma das asas, ou seja, um compromisso entre distância e a questão estrutural das asas influenciam diretamente para minimizar que o efeito da asa superior interfira na inferior e vice-versa. Dessa forma, na prática é sugerido que o *gap* seja próximo de 1 (RODRIGUES, 2014). A Figura 27 mostra o *gap* entre duas asas.

Figura 27: Representação do "GAP"

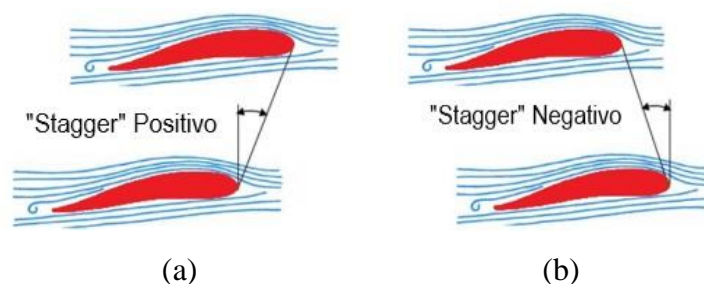


Fonte: modificado pelo autor a partir de Rodrigues (2014)

2.3.3.2. STAGGER

O *stagger* – também conhecido por escalonamento – representa o quanto o bordo de ataque da asa superior está deslocado em relação ao bordo de ataque da inferior. Assim, estando a asa superior à frente da inferior, este é positivo, mas se o inverso, negativo. Sua representação pode ser pela relação *stagger/corda* (CHIU, 2017) ou simplesmente por ângulo (RODRIGUES, 2014) como mostra a Figura 28.

Figura 28: Representação do Ângulo de Stagger: (a) Positivo e (b) Negativo



Fonte: modificado pelo autor a partir de Rodrigues (2014)

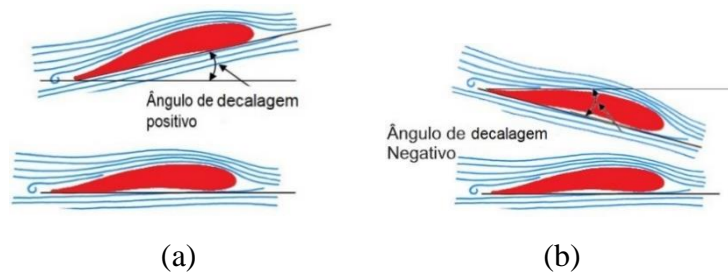
Conforme Rodrigues (2014), as vantagens aerodinâmicas do *stagger* geralmente são muito pequenas, um biplano pode ter o ângulo simplesmente para facilitar a visão do piloto ou então para prover uma maior facilidade para se ter acesso a cabine de comandos ou ao compartimento de carga.

2.3.3.3. DECALAGEM

A decalagem é a diferença entre os ângulos de incidência das asas de um biplano. É considerada positiva quando o ângulo de incidência da asa superior for maior que o ângulo de incidência da asa inferior da aeronave. Ao contrário, é negativo, conforme a Figura 29.

Conforme Rodrigues (2014), o ângulo de decalagem é em geral pequeno, na ordem de 1° ou 2° , e seu principal objetivo é melhorar as características de estol da aeronave biplana, pois a asa superior ao conter sua decalagem positiva tenderá a estolar antes da asa inferior já que seu ângulo de incidência é maior. Se os aerofólios de controles da aeronave estiverem posicionados na asa inferior, estes ainda terão comandos para recuperar a aeronave de uma possível situação de estol, já que a asa inferior ainda estará em condições normais de voo.

Figura 29: Representação do ângulo de *decalagem*: (a) positiva e (b) negativa.



Fonte: modificado pelo autor a partir de Rodrigues (2014)

2.3.4. DETERMINAÇÃO DE UM MONOPLANO EQUIVALENTE

A formulação matemática que envolve uma extensa série de cálculos e aproximações para definição das características aerodinâmicas de uma aeronave biplana, necessitam de tempo e dedicação para a análise (RODRIGUES, 2014). Neste trabalho, não será avaliada a aerodinâmica de aeronaves, mas será utilizado o modelo simplificado proposto (MUNK, 1923b; RODRIGUES, 2014), que permite converter uma asa dupla em uma simples, chamado de

monoplano equivalente que possua a mesma forma em planta da asa com os mesmos valores de corda e proporcione o mesmo desempenho final do biplano em questão.

O cálculo da envergadura do monoplano equivalente pode ser realizado a partir da aplicação da equação (44).

$$b_{EQ} = k \times b \quad (44)$$

sendo b , a envergadura das asas do biplano e o parâmetro k depende diretamente do valor do “gap” e da envergadura das asas do biplano como observado na Equação (45).

$$k = \sqrt{\left(1,8 \times \frac{G}{b}\right) + 1} \quad (45)$$

Como mencionado anteriormente, o “gap” deve ser próximo de uma corda como forma de se evitar a interferência dos vórtices, bem como o menor possível para um melhor compromisso durante o dimensionamento estrutural dos seus elementos de ligação entre as asas.

Ter mais de uma asa, não significa dizer que será obtido o dobro do desempenho aerodinâmico naquela aeronave, pois existem interferências entre vórtices, o aumento do arrasto e o aumento do peso estrutural, proporcionam um aumento efetivo bem menor do que o inicialmente esperado.

Nessa condição, uma aeronave de asa monoplana equivalente, terá maior envergadura, além de favorecer a resolução dos cálculos de desempenho por ter superfície única.

2.4. EQUAÇÕES DE CONSERVAÇÃO

O princípio de conservação da massa em um fluido newtoniano compressível em função do tempo num volume de controle infinitesimal, pode ser descrito conforme as equações de transporte (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007) de (46) a (49) abaixo:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U}) = 0 \quad (46)$$

$$\frac{\partial (\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \vec{U}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \nabla \cdot (\mu \nabla u) + S_{Mx} \quad (47)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \bar{U}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \nabla \cdot (\mu \nabla v) + S_{My} \quad (48)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w \bar{U}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \nabla \cdot (\mu \nabla w) + S_{Mw} \quad (49)$$

a equação (46) é conhecida como equação da continuidade. E as equações (47) a (49), são conhecidas como equações de Navier-Stokes. Onde, p é a pressão, \bar{U} é o vetor tridimensional de velocidades, formado pelas componentes (u, v, w) , ρ a massa específica e μ é a viscosidade dinâmica do fluido. E S_M , são termos das fontes geradoras de momento.

É notória a comunização entre as equações (47) a (49). Se introduzir uma variável genérica ϕ , a forma conservativa para todas as equações de escoamento; temperatura, concentração de poluente e etc., pode ser escrita na forma da equação (50).

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\phi\bar{U}) = \nabla \cdot (\Gamma\nabla\phi) + S_\phi \quad (50)$$

que é a de transporte para a propriedade ϕ , com Γ como seu coeficiente de difusão e S_ϕ , o termo fonte genérico. Os termos presentes na equação (50) (e também nas equações (47) a (49)) podem ser interpretados da seguinte forma:

Taxa de crescimento de Φ do elemento fluido	+	Quantidade de fluxo de Φ fora do elemento fluido	=	Taxa de crescimento de Φ por difusão	+	Taxa de incremento de Φ devido a fontes.
--	---	---	---	---	---	---

Assim baseado na equação (50), teremos a integração de um V.C. considerando:

$$\int_{v.c.} \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} dV + \int_{c.v.} \nabla \cdot (\rho\phi\bar{u}) dV = \int_{v.c.} \nabla \cdot (\Gamma grad\phi) dV - \int_{v.c.} S_\phi dV \quad (51)$$

As integrais de volume no segundo termo no lado esquerdo, o termo convectivo, e no primeiro termo no lado direito, o termo difusivo, são reescritas como integrais sobre toda a superfície delimitadora do volume de controle usando o método de divergência de Gauss (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). Para um vetor a este teorema dá,

$$\int_{v.c.} \nabla(a) dV = \int_A n.a dA \quad (52)$$

A interpretação física de $n.a$ é o componente do vetor a na direção do vetor n normal ao elemento da superfície dA . Assim, a integral da divergência de um vetor a mais de um volume é igual ao componente de a na direção normal à superfície que limita o volume somado (integrado) sobre toda a superfície delimitadora A . Aplicando o teorema da divergência de Gauss, equação (51) pode ser escrito da seguinte forma:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\int_{v.c.} \rho \phi dV \right) + \int_{c.v.} n.(\rho \phi u) dA = \int_{v.c.} n.(\Gamma grad \phi) dA - \int_{v.c.} S_\phi dV \quad (53)$$

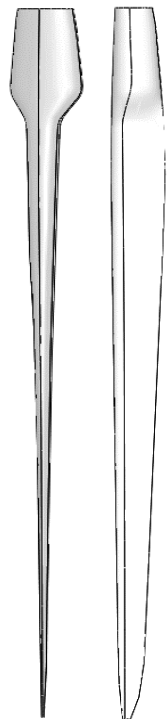
A ordem de integração e diferenciação foi alterada no primeiro termo no lado esquerdo de (53) para ilustrar seu significado físico. Este termo significa a taxa de alteração da quantidade total de propriedade do fluido ϕ no volume de controle. O produto $n.\rho\phi u$ expressa o componente de fluxo da propriedade devido ao escoamento ao longo do vetor normal externo n , então o segundo termo no lado esquerdo de (53), o termo convectivo, portanto é a taxa líquida de diminuição da propriedade do fluido ϕ do elemento fluido devido à convecção.

2.5. TRABALHOS ANTERIORES

O modelo de turbina eólica de NREL 5MW tem sido utilizado em trabalhos de pesquisa e melhoria continua na área de eólica, seja *onshore* ou *offshore*, por ter especificações de referência do *Wind & Hydropower Technologies Program*, apoiado pelo departamento de energia americano (DOE) e outros departamentos ao redor do mundo. Dessa forma, para a construção da pá NREL 5MW, foram utilizados os dados dos perfis aerodinâmicos, sua posição, ângulo de torção e espessura em cada seção transversal, conforme a especificação de Jonkman et al. (2009), como mostra a Tabela 3. Essas informações foram retiradas do tutorial do software QBLADE v.0963⁹, desenvolvido em código aberto para projetos de turbinas eólicas, utilizando o método *Blade Element Momentum* (BEM) em TEEH (MARTEN; WENDLER, 2013).

⁹ Disponível em: <http://q-blade.org/>; acessado em 24 de março de 2019.

Tabela 3: Pá do rotor NREL 5MW

NREL 5MW (monopá)							
Seção	Raio (m)	Distribuição (%)	Torção (°)	Espessura (%)	Corda (m) & Vistas		Perfil
1	1,5000	2%	13,0800	100	3,2		Cylinder1
2	2,8667	5%	13,0800	100	3,5420		Cylinder1
3	5,6000	9%	13,0800	100	3,8540		Cylinder1
4	8,3333	13%	13,0800	100	4,1670		Cylinder2
5	9,4500	15%	13,0800	100	4,2945		Cylinder2
6	11,7500	19%	13,0800	40	4,5570		DU40_A17
7	13,8600	22%	13,0800	40	4,6059		DU40_A17
8	15,8500	25%	11,4800	35	4,6520		DU35_A17
9	19,9500	32%	10,1620	35	4,4580		DU35_A17
10	22,0500	35%	10,1620	35	4,3510		DU35_A17
11	24,0500	38%	9,0110	30	4,2490		DU30_A17
12	25,2000	40%	9,0110	30	4,1811		DU30_A17
13	28,1500	45%	7,7950	25	4,0070		DU25_A17
14	31,5000	50%	7,7950	25	3,7954		DU25_A17
15	32,2500	51%	6,5440	25	3,7480		DU25_A17
16	36,3500	58%	5,3610	21	3,5020		DU21_A17
17	40,4500	64%	4,1880	21	3,2560		DU21_A17
18	44,5500	71%	3,1250	64	3,0100		NACA64_A17
19	48,6500	77%	2,3190	64	2,7640		NACA64_A17
20	52,7500	84%	1,5260	64	2,5180		NACA64_A17
21	56,1667	89%	0,8630	64	2,3130		NACA64_A17
22	58,9000	93%	0,3700	64	2,0860		NACA64_A17
23	61,6333	98%	0,1060	64	1,4190		NACA64_A17
24	63,0000	100%	0,1060	64	0,7000		NACA64_A17

Fonte: Autor

Portanto, o modelo de turbina eólica NREL 5MW foi considerado para a proposta deste trabalho como base, e além disso, considerou as análises já disponíveis em Chiu (2017). Na Tabela 4, temos dados de especificação da turbina NREL 5MW:

Tabela 4: Propriedades do equipamento turbina de vento base “NREL 5-MW”

Orientação do rotor, configuração	<i>Upwind</i> de 3 pás
Controle	Velocidade variável, <i>pitch</i> coletivo
Sistema de potência	Caixa de engrenagens de múltiplo estágio
Diâmetro do Rotor / hub / Altura do hub	126m / 3m / 90m
Velocidades: mínima, nominal, corte	3m/s, 11,4m/s, 25m/s
Rotação: mínima, nominal/corte	6,9 rpm, 12,1 rpm
Hub à torre, Inclinação do eixo, pré-cone	5m, 5°, 2.5°

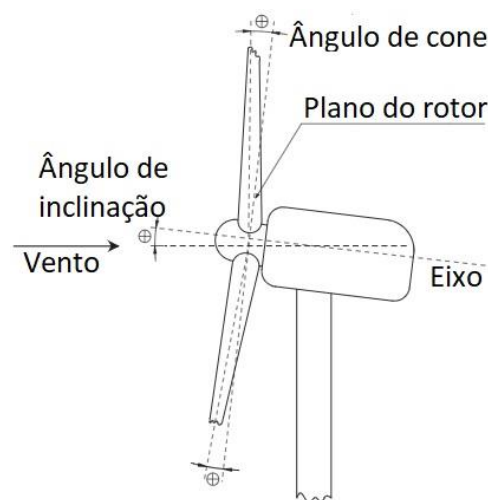
Fonte: Jonkman et al. (2009)

Conforme Annoni et al. (2017), em grandes turbinas existe o risco de colisão entre as pás e a torre, provocados pelo estol devido ao efeito de flexão nas pás impelido pela força do vento, portanto, os ângulos de inclinação do eixo do rotor e pré-cone – vide Figura 30 – são utilizados no projeto do rotor para melhorar a condição de espaçamento, garantindo o funcionamento da turbina, além de estabelecer melhora na produção de potência no parque como um todo ao redirecionar o fluxo para as outras turbinas.

Ali M. Abdelsalam (2013) também confirmou que com a aplicação do ângulo de inclinação a geração de potência da turbina é reduzida, porém aumenta significativamente a produção no parque eólico em relação a equipamentos utilizados sem essa inclinação por ter alta significância na recuperação da esteira, e o ganho na recuperação de energia a jusante da turbina aumenta com o aumento do ângulo de inclinação, especialmente na região próxima da esteira. Com isso, o efeito de carregamento no equipamento aumenta, onde para Plumley et al. (2014) se faz necessário o controle de *pitch* em equipamentos com alta capacidade de geração para a regulação da velocidade, reduzindo as cargas na turbina, aumentando sua vida útil.

Como o objetivo deste trabalho é comparar o rotor com diferentes conceitos de pás, estes ângulos não serão considerados, já que em simulações utilizando o QBLADE v0.963, apresentaram redução da eficiência menor que 1% quando considerando os ângulos de projeto, conforme evidenciado no APÊNDICE A.

Figura 30: Definição dos ângulos de inclinação e cone em uma turbina TEEH



Fonte: Modificado pelo autor a partir do IEC¹⁰.

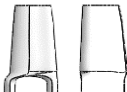
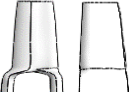
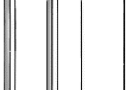

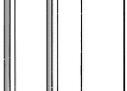

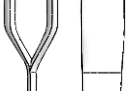
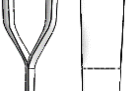
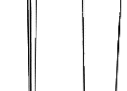

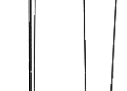

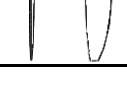
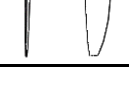
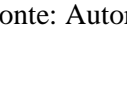

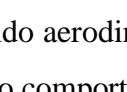
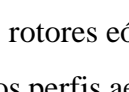
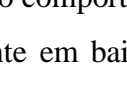
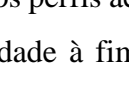
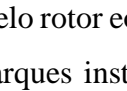
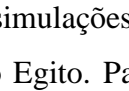
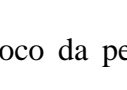
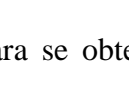
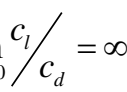
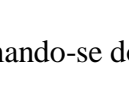
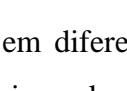
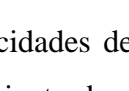
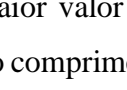
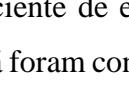
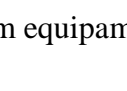
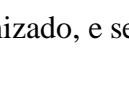

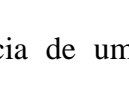
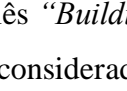
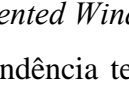
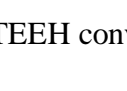
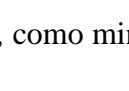




¹⁰ Disponível em: *Wind turbine generator systems – part 13: Measurement of mechanical loads. Report IEC/TS 61400-13.*

Schubel e Crossley (2012), fizeram uma revisão detalhada para o projeto de pás de turbinas eólicas, descrevendo sobre a predominância de turbinas TEEH com três pás, além de comentar que o limite de Betz dificilmente poderia ser superado, observando o que pode ser feito para reduzir o efeito de perda de eficiência. E confirma quanto maior a relação de velocidade de ponta pá (TSR), maior será a eficiência, porém do contrário, produz um rotor com alta solidez. Os projetos atuais de turbinas com três pás tem valores de TSR ideal entre 6 e 9, e coeficiente de potência teórico máximo, $c_{p_{máx}} \leq 50\%$, também confirmado por Hau (2013).

Ragheb e Selig (2011) descreveram sobre a utilização de perfis aerodinâmicos múltiplos na região da raiz em pás de turbinas eólicas ao invés dos atuais perfis espessos que tem baixa capacidade de produzir alta sustentação, além de apresentar características de estol mais agudas devido a carga e fadiga aerodinâmica. Assim, realizaram uma análise com sete variações de perfis múltiplos, sobre seu número de Reynolds, resultando em aumentos da relação c_l / c_d , e sustentação com aumentos em até 82% para $c_l / c_{d_{Max}}$. Já para maiores ângulos de ataque, houve grande redução na sustentação de c_l / c_d que em $c_l / c_{d_{Max}}$. Além das maiores taxas de sustentação e resistência ao arrasto e coeficientes de sustentação, espera-se que essas configurações de múltiplos elementos ofereçam melhor desempenho de partida devido ao maior torque de partida e também maior eficiência da lâmina em condições de operação ideais.

P. Chiu (2017) realizou análises comparativas através do projeto de pás com sessão duplicada na raiz em duas condições de corda (constante e linear), baseado na NREL 5MW da Tabela 3, onde substituiu os perfis em $r/R= 15\%$ à 40% por perfis mais finos e iguais ao da sessão à $r/R= 50\%$ da NREL, conforme mostra a Tabela 5, o que gerou melhora nos coeficientes de potência e empuxo de 0,86% e 3,63%, respectivamente quando o TSR varia entre 4 e 7,55. Para Rosenberg, Selvaraj e Sharma (2014) e Gaunaa et al. (2012), ao realizar melhorias na região da raiz com a troca de perfis espessos por finos, a geração total de energia em equipamentos de grande porte pode atingir resultados entre 5 à 8% melhores, e até 30% (ROTH-JOHNSON; WIRZ; LIN, 2014), a resistência à flexão na ponta da pá em relação a uma pá convencional de mesma massa. Investigações aerodinâmicas também demonstraram melhores desempenhos com perfis finos por terem maiores relações de $c_l / c_{d_{Max}}$ em comparação com aerofólios de espessura padrão em turbinas eólicas (15 a 30% da corda).

Tabela 5: Dimensões da pá NREL 5MW e propostas conforme (CHIU, 2017)

Dados em comum					Biplanos de P. Chui				
Seção	Raio (m)	Distribuição ao raio (%)	Torção (°)	Espessura (%)	Corda (m) & Desenhos		Perfis		
					Única "CTE" [2]	Interp. "Linear" [2]	Inferior	Superior	
1	1,5000	2%	13,0800	100	3,2000		3,2000		Cylinder1
2	2,8667	5%	13,0800	100	3,5420		3,5420		Cylinder1
3	5,6000	9%	13,0800	100	3,8540		3,8540		Cylinder1
4	8,3333	13%	13,0800	100	4,1670		4,1670		Cylinder2
5	9,4500	15%	0,0000	100	3,7954		4,2945		DU25_A17
6	11,7500	19%	0,0000	40	3,7954		4,2424		DU25_A17
7	13,8600	22%	0,0000	40	3,7954		4,1946		DU25_A17
8	15,8500	25%	0,0000	35	3,7954		4,1496		DU25_A17
9	19,9500	32%	0,0000	35	3,7954		4,0568		DU25_A17
10	22,0500	35%	0,0000	35	3,7954		4,0093		DU25_A17
11	24,0500	38%	0,0000	30	3,7954		3,9640		DU25_A17
12	25,2000	40%	0,0000	30	3,7954		3,9380		DU25_A17
13	28,1500	45%	0,0000	25	3,7954		3,8712		DU25_A17
14	31,5000	50%	0,0000	25	3,7954		3,7954		DU25_A17
15	32,2500	51%	6,5440	25	3,7480		3,7480		DU25_A17
16	36,3500	58%	5,3610	21	3,5020		3,5020		DU21_A17
17	40,4500	64%	4,1880	21	3,2560		3,2560		DU21_A17
18	44,5500	71%	3,1250	64	3,0100		3,0100		NACA64_A17
19	48,6500	77%	2,3190	64	2,7640		2,7640		NACA64_A17
20	52,7500	84%	1,5260	64	2,5180		2,5180		NACA64_A17
21	56,1667	89%	0,8630	64	2,3130		2,3130		NACA64_A17
22	58,9000	93%	0,3700	64	2,0860		2,0860		NACA64_A17
23	61,6333	98%	0,1060	64	1,4190		1,4190		NACA64_A17
24	63,0000	100%	0,1060	64	0,7000		0,7000		NACA64_A17

Fonte: Autor.

Na literatura há trabalhos estudando aerodinâmica de rotores eólicos através de CFD. Sayed, Kandil e Shaltot (2012) estudaram o comportamento dos perfis aerodinâmicos ao longo do comprimento da pá, em fluxo constante em baixa velocidade à fim de obter viabilidade econômica com máxima potência gerada pelo rotor eólico. As simulações ocorreram com dados de velocidades de vento em diferentes parques instalados no Egito. Para tanto, a relação de escorregamento máxima, c_l / c_d , foi o foco da pesquisa para se obter a máxima potência

naquele equipamento, ou seja, quando $\lim_{c_d \rightarrow 0} \frac{c_l}{c_d} = \infty$, aproximando-se do limite de Betz. Além

disso, diferentes perfis foram analisados em diferentes velocidades de ventos e ângulos de ataque, onde a escolha era baseada no maior valor do coeficiente de escorregamento. Neste trabalho, os perfis e seu ângulo ao longo do comprimento da pá foram considerados ótimos para as simulações devido a NREL 5MW ser um equipamento otimizado, e ser disponibilizado para estudos e produção científica.

Heo et al. (2016) estudaram por CFD a influência de uma Turbina Eólica de Construção Aumentada (TECA) – em inglês “*Building Augmented Wind Turbine (BAWT)*” –, com instalação adaptada entre edifícios; considerada uma tendência tecnológica com várias vantagens em comparação com a turbina TEEH convencional, como minimização da perda de

transmissão elétrica e custo de construção para a fonte de energia distribuída usando edifícios existentes, ou seja, eliminação da torre. Como resultado após variações de velocidade de vento e ângulos de fluxo, a potência é aumentada em até 41% devido ao efeito de concentração causando pela aceleração da velocidade do vento entre os edifícios, como um difusor ou duto. Como consequência, o limite de Betz de 0,593 é excedido por obter maior potência disponível a aceleração do vento que atravessa a mesma área do rotor.

3. METODOLOGIA

Para análise de um fluxo em torno de um rotor eólico, neste trabalho, foi considerado o escoamento como permanente (*steady-state*), ou seja, sem variação no tempo; embora o fluxo nesta aplicação apresente zonas de turbulência nos bordos de fuga das pás, o que ocasionaria um comportamento transiente, assim um modelo que demonstra a média temporal dessa turbulência irá simplificá-lo para caso permanente.

O atrito gerado entre o fluxo e as superfícies do rotor pode gerar pontos de aquecimento, o que provoca a geração de energia térmica através do mecanismo de dissipação viscosa, o que pode alterar as propriedades termodinâmicas do fluido naquela região. Todavia, esse efeito será desconsiderado nas simulações. Alterações de temperatura em qualquer região do domínio também serão desconsideradas por terem variações irrelevantes. Dessa forma contribuindo ao regime permanente.

Conforme Ferziger e Peric (2002), se calcularmos o número de Mach para o caso estudado neste trabalho, poderia afirmar que para a máxima velocidade na ponta da pá no rotor sob a velocidade do som, $Ma < 0,3$, o que pode caracterizar um fluido em escoamento com comportamento incompressível.

3.1. O MÉTODO NUMÉRICO

A Fluidodinâmica Computacional (CFD) analisa problemas que envolvem escoamentos fluidos, transferência de calor e fenômenos associados a reações químicas através de simulações utilizando computação (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). É uma técnica consolidada e com aplicação em diversas áreas, tais como: industrial (máquinas rotativas, turbinas, queimadores, trocadores de calor e etc.), automotiva, estudos aerodinâmicos/geração

de energia (turbinas eólicas), entre outros. Pode-se considerar como técnica vital no projeto de produtos e processos.

Quando comparamos os custos de prototipagem e testes para validação de produtos versus uma análise em CFD, observa-se a vantagem em comparação a um experimento complexo, mesmo não sendo tão distante, porém, é bastante eficiente a partir de experiência consolidada. No entanto, não quer dizer que o método substitui completamente testes experimentais (MALISKA, 2004).

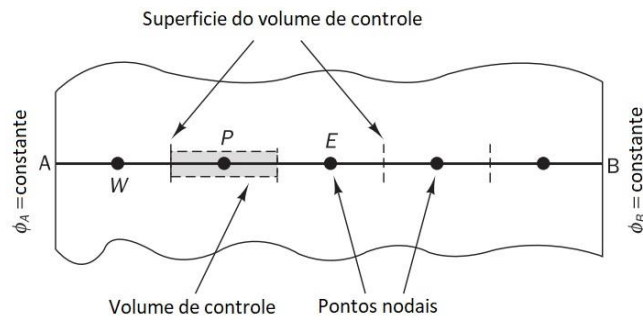
Existem três distintas técnicas de solução numérica: diferenças finitas, volumes finitos e elementos finitos. O método de diferenças finitas pode ser considerado como o mais utilizado entre os pacotes comerciais devido exigir menor capacidade computacional (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007), porém não é tão flexível por requerer aplicação em malhas estruturais o que restringe seu uso (JIRI BLAZEK, 2015).

Para CFD, o mais comum é o método de volumes finitos, por ser mais flexível a aplicação em soluções de malhas estruturais ou não-estruturais, o que o torna mais adequado a simulação em escoamentos internos ou externos em geometrias complexas (JIRI BLAZEK, 2015). No pacote ANSYS 18.2 utilizado neste trabalho com solver CFX para a resolução do problema utiliza a metodologia de solução pelo método de volumes finitos, com um algoritmo inerente a sua definição padrão que acopla as variáveis velocidade e pressão de forma interligada já que uma interfere diretamente na outra. Com isso o modelo de Rhie e Chow (1983) é aplicado a cada ponto de integração, obtendo uma expressão para a velocidade de advecção.

Os resultados são obtidos por resolução computacional utilizando métodos numéricos a partir de aproximações algébricas das equações de conservação de Navier-Stokes em três etapas:

- **Pré-processamento:** que é iniciado com a criação da geometria e sua região de fluxo, isto é, a definição do domínio para a execução dos cálculos. Consequentemente, a geração de malha a partir do método numérico de volumes finitos que discretiza as equações das leis de conservação primeiramente dividindo o domínio físico em um número arbitrário de volumes de controle (V.C.) poliédricos (JIRI BLAZEK, 2015). Para demonstração, temos um domínio unidimensional ilustrado na Figura 31.

Figura 31: Domínio unidimensional para aplicação do método dos volumes finitos

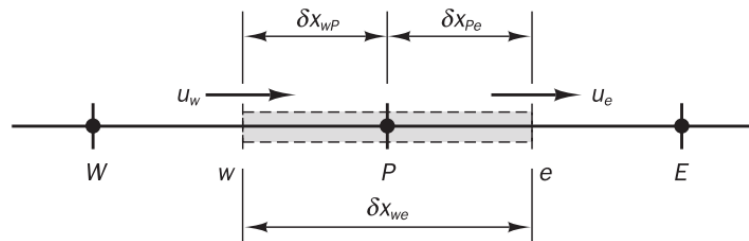


Fonte: Versteeg e Malalsekera (2007), p. 116.

Os contornos dos V.C. são posicionados nos pontos médios entre nós adjacentes (W e E quando envolvem o ponto genérico P) a partir da definição de seus pontos nodais determinados entre as extremidades A e B do domínio unidimensional. Ou seja, o V.C. envolve o seu respectivo nó.

A face oeste do V.C. demonstrado é denominada w e a face leste é denominada e . As distâncias entre os nós W à P e P à E são identificadas por δx_{WP} e δx_{PE} respectivamente. Da mesma forma para, a face w e o ponto P , e o ponto P à face e são chamadas por δx_{wP} e δx_{Pe} , respectivamente. O comprimento total do V.C. é $\Delta x = \delta x_{we}$, conforme mostra a Figura 32.

Figura 32: Definições e distancias num domínio unidimensional



Fonte: Versteeg e Malalsekera (2007), p. 116

Por fim, a física e os fenômenos químicos necessários para reproduzir o caso são selecionados. Além de definição das propriedades do fluido e as condições de contorno nos elementos os quais coincidem ou tocam a superfície do domínio. Assim, a solução para o escoamento é definida nos nós dentro de cada V.C.

A acuracidade do resultado é dependente do número de elementos na malha gerada (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

- **Processamento:** em linhas gerais, o algoritmo numérico consiste nos seguintes passos:

Integração das equações de conservação no escoamento através dos V.C. do domínio em equações algébricas, que distingue o método de volume finito de todas as outras técnicas de CFD. As declarações resultantes expressam a conservação (exata) de propriedades para cada elemento de tamanho finito. Essa relação entre o algoritmo numérico e o princípio de conservação física constitui o porquê de sua utilização em relação ao método de elementos finitos. A conservação de uma variável de fluxo geral ϕ , ou seja, um componente de velocidade ou entalpia, dentro de um volume de controle finito pode ser expresso como um balanço entre os vários processos que tendem a aumentar ou diminuir (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

- Discretização das equações algébricas através de um V.C. no ponto P demonstrado na Figura 31, que é a chave do método dos volumes finitos. O que expressa a capacidade do CFD conter recursos para o tratamento dos principais fenômenos de transporte: convecção (transporte devido ao fluxo de fluidos) e difusão (transporte devido a variações de ponto a ponto) bem como para as fontes (associados à criação ou destruição de ϕ) em função do tempo. A partir disso, abordagem iterativa é necessária para contemplar os fenômenos físicos subjacentes por serem complexos e não lineares (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). Dessa forma, pela equação (53) aplicada no exemplo da Figura 31 teremos as equações discretizadas:

$$(\rho u A \phi)_e - (\rho u A \phi)_w = \left(\Gamma A \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_e - \left(\Gamma A \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_w \quad (54)$$

$$(\rho u A)_e - (\rho u A)_w = 0 \quad (55)$$

- Solução das equações algébricas por método iterativo. Ou seja, as equações são montadas para cada nó e resolvidas de forma direta. Os cálculos são efetuados no centroide dos V.C. da malha, o que ocorre por meio de interpolação para que os valores das extremidades do V.C. sejam abrangidos. Com isso, para cada V.C. existe uma equação algébrica que depende do número de nós vizinhos ao elemento.

- **Pós-processamento:** é a etapa onde analisa os resultados através de recursos gráficos. Tal como no pré-processamento, o pós-processamento tem evoluído com a melhora no desempenho das estações de trabalho. Muitas das quais possuem excelentes recursos gráficos, os principais pacotes de CFD são agora equipados com ferramentas versáteis de visualização de dados. Tais como: exibição de geometria de domínio e grade, gráficos de vetores, contorno de linha e sólidos, gráficos de superfície 2D e 3D, rastreamento de partículas e visualização de manipulação (conversão, rotação, dimensionamento etc.), além de exportação de dados para manipulação adicional externa ao código (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

3.2. MODELO DE TURBULÊNCIA

A maioria dos escoamentos em problemas de engenharia são caracterizados como turbulentos, o que para as equações de continuidade e momento se torna um desafio. Dessa forma, quanto mais complexo é o escoamento, a análise via técnicas de CFD se torna mais aplicável como moderna prática de engenharia (TU; YEOH; LIU, 2013).

Um regime turbulento pode ser descrito por um comportamento randômico e caótico das moléculas de um fluido. E para auxiliar na resolução de problemas neste ambiente caótico, as variáveis do escoamento são decompostas em médias e partes flutuantes, o que resulta no aparecimento de termos extras nas equações (47) a (49) de Navier-Stokes, originando as equações de Navier-Stokes com Médias de Reynolds (RANS) (JIRI BLAZEK, 2015).

Assim, abaixo temos a representação das equações RANS de (56) à (58):

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \bar{U}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \nabla \cdot (\mu \nabla u) + \left[-\frac{\partial(\rho \overline{u'^2})}{\partial x} - \frac{\partial(\rho \overline{v'u'})}{\partial y} - \frac{\partial(\rho \overline{w'u'})}{\partial z} \right] + S_{Mx} \quad (56)$$

$$\frac{\partial(\rho V)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \bar{U}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \nabla \cdot (\mu \nabla v) + \left[-\frac{\partial(\rho \overline{v'u'})}{\partial x} - \frac{\partial(\rho \overline{v'^2})}{\partial y} - \frac{\partial(\rho \overline{v'w'})}{\partial z} \right] + S_{My} \quad (57)$$

$$\frac{\partial(\rho W)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w \vec{U}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \nabla \cdot (\mu \nabla w) + \left[-\frac{\partial(\rho \overline{u'w'})}{\partial x} - \frac{\partial(\rho \overline{v'w'})}{\partial y} - \frac{\partial(\rho \overline{w'^2})}{\partial z} \right] + S_{Mz} \quad (58)$$

Nelas, \vec{U} é o vetor tridimensional de velocidades médias, formado pelas componentes (u, v, w) . (u', v', w') são as flutuações das velocidades, p é a pressão, ρ a massa específica e μ é a viscosidade do fluido. S_{Mx} , S_{My} e S_{Mz} são eventuais termos das fontes geradoras de momento.

“Naturalmente, devido ao procedimento de cálculo da média, nenhuma informação detalhada pode ser obtida sobre as estruturas turbulentas”. (JIRI BLAZEK, 2015).

Para que um modelo de turbulência seja útil em um código CFD de propósito geral, ele deve ter ampla aplicabilidade, ser preciso, simples e econômico de ser executado. Os modelos de turbulência baseados nas equações RANS, requerem menos recurso computacional, contendo precisão suficiente para boa parte das aplicações de engenharia (TU; YEOH; LIU, 2013). Sua classificação é com base no número de equações de transporte adicionais, as quais devem ser resolvidas juntamente (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

Bai e Wang (2016) condensaram em seu estudo sobre quais métodos são utilizados para simular o escoamento ao redor de pás em TEEH, considerando duas abordagens para validar o uso de modelos de turbulência como: função de parede (y^+ , distância adimensional do primeiro nó à parede, tal como explica Gharbi et al. (2010), além de ser é muito popular, econômico, robusto e com boa precisão, entretanto esse modelo pode ser inadequado em situações de *low-Reynolds number*, tornando as suposições subjacentes as funções de parede inválidas) e modelo proximidade de parede. Seus resultados foram considerados aceitáveis para *SST*, que é um modelo aprimorado que combina a modelagem $k-\varepsilon$ para regiões mais externas e $k-\omega$ para regiões próximas às superfícies. Além de demonstrar bom alinhamento com resultados experimentais em performance aerodinâmica, ambos em TEEH. Já $k-\varepsilon$, apresentou resultados considerados insatisfatórios. E o $k-\omega$, que também é um modelo de duas equações foi considerado usual para simular forças aerodinâmicas.

Bulat e Bulat (2013) realizaram detalhada revisão da aplicação prática de modelos de turbulência disponíveis nos pacotes de software ANSYS 6 e 11, – com *solvers* Fluent e CFX, respectivamente – analisando principalmente fluxos subsônicos e transônicos, auxiliando no estudo de motores a jato de ar em relação a uma ampla faixa de velocidade e altitude. Onde descrevem sobre alguns modelos de turbulência que são largamente utilizados para uma

variedade de problemas de engenharia e foram considerados em sua pesquisa, tais como: $k - \varepsilon$ (padrão, realizável e RNG), SST $k - \omega$ (padrão e de transição). O $k - \varepsilon$ realizável em relação ao padrão, é um método melhorado que calcula a viscosidade turbulenta, e a equação para a relação de dissipação com melhor previsão das características da camada limite em grandes gradientes de pressão, separação e recirculação de fluxos. O RNG, utiliza o método matemático *Re-normalisation Group*, que tem maior acurácia na simulação de fluxos em cavidades rotativas. O modelo $k - \omega$ é similar ao $k - \varepsilon$, pois utiliza a equação de turbulência da relação de dissipação de energia ao invés da equação de dissipação, assim descrevendo bem os fluxos próximos à superfície estudada, porém tem sensibilidade a fluxos externos à superfície em condições iniciais de turbulência. O SST é um modelo integrado entre o $k - \varepsilon$ e o $k - \omega$, que tem boa acurácia com a adição de equações de transporte, resultando em boa transição entre as camadas de gradientes médios de pressão.

Assim, baseado na pesquisa, foi observado que existem vários modelos de turbulência, entretanto, sua aplicação está diretamente condicionada a natureza do escoamento estudado durante as simulações. Além disso, a capacidade computacional disponível deve ser levada em conta para obter os resultados, portanto neste trabalho foram considerados apenas os dois modelos padrão de turbulência – $k - \varepsilon$ e o SST –, para o procedimento de convergência de malha, visando obter soluções mais estáveis nas simulações, com oportunidade de redução no tempo de processamento e boa acuracidade entre as variações propostas de rotores.

3.2.1. MODELO $k - \varepsilon$

Proposto na década de 70, $k - \varepsilon$ é um modelo de viscosidade turbulenta de duas equações usado no cálculo de equações de transporte para determinar a energia cinética da turbulência (k) e sua taxa de dissipação (ε). É amplamente utilizado em diversos problemas de engenharia, com precisão razoavelmente boa, seja com malhas estruturadas ou não estruturadas, e principalmente, por não necessitar de uma grande capacidade de processamento (JIRI BLAZEK, 2015; VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

A viscosidade turbulenta (μ_t) é dependente dos termos de k (energia cinética turbulenta) e ε (dissipação turbulenta), o modelo em questão, destes dois parâmetros é demonstrado através da Equação (59).

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (59)$$

onde C_μ é uma constante dimensional.

O modelo $k - \varepsilon$ usa as equações de transporte para k e ε conforme demonstrado nas equações (60) e (61).

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k \vec{U}) = \text{div} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \text{grad} k \right] + 2\mu_t S_{ij} \cdot S_{ij} - \rho \varepsilon \quad (60)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho \varepsilon \vec{U}) = \text{div} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \text{grad} \varepsilon \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t S_{ij} \cdot S_{ij} - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (61)$$

Os termos de tensões de Reynolds são tidos como proporcionais a uma viscosidade cinemática, de forma análoga ao conceito original de viscosidade. Estes termos são contabilizados como exposto pela (62).

$$-\overline{\rho u_i u_j} = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} = 2\mu_t S_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (62)$$

onde,

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{se } i \neq j \\ 1 & \text{se } i = j \end{cases} \quad (63)$$

onde $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, σ_k , σ_ε e C_μ são constantes do modelo com valores que se ajustam a uma ampla faixa de fluxo turbulento, conforme mostra a Tabela 6.

Tabela 6: Valores das constantes do modelo $k - \varepsilon$

	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	σ_k	σ_ε	C_μ
Valor	1,44	1,92	1,00	1,30	0,09

Fonte: Versteeg e Malalsekera (2007)

3.2.2. MODELO SST

Modelos desenvolvido por Menter (1994), após perceber que $k - \varepsilon$ não era satisfatório quando próximo às superfícies. Por isso, sugeriu um modelo híbrido usando a transformação de $k - \varepsilon$ ao modelo $k - \omega$ - desenvolvido por Wilcox (1988) – para proximidade da superfície, e $k - \varepsilon$ *standard* para a região turbulenta longe da superfície (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). As equações de k são as mesmas de $k - \omega$, conforme as equações (64) e (65), mas as de ε foram transformadas para equações de ω ao serem substituídas por $\varepsilon = \omega k$. Isso nos leva à equação (66):

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (pk\bar{U}) = \nabla \cdot \left[\left(\nu + \frac{\mu_t}{\sigma_{k1}} \right) \nabla k \right] + P_k - \beta' \rho k \omega \quad (64)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \nabla \cdot (p\omega\bar{U}) = \nabla \cdot \left[\left(\nu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega 1}} \right) \nabla \omega \right] + \alpha_1 \frac{\omega}{k} P_k - \beta_1 \rho \omega^2 \quad (65)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \nabla \cdot (p\omega\bar{U}) = \nabla \cdot \left[\left(\nu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega 2}} \right) \nabla \omega \right] + \alpha_2 \frac{\omega}{k} P_k - \beta_2 \rho \omega^2 + 2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega 2} \omega} \frac{\partial k}{\partial x_a} \frac{\partial \omega}{\partial x_a} \quad (66)$$

As constantes para o modelo SST $k - \omega$ são dispostas como:

Tabela 7: Constantes $k - \omega$ e SST $k - \omega$ revisadas

	σ_{k1}	β'	α_1	β_1	$\sigma_{\omega 1}$	$\sigma_{\omega 2}$	α_2	β_2
Valor	1,0	0,09	5/9	0,075	2,0	1,17	0,44	0,083

Fonte: Versteeg e Malalsekera (2007)

3.3. MODELAGEM COMPUTACIONAL

3.3.1. ANÁLISE DE TAMANHO DO ROTOR PARA O PROJETO

De forma análoga ao cálculo de monoplane equivalente discutido anteriormente, se utilizar a teoria em rotores eólicos TEEH, pode-se sugerir um comprimento reduzido para um rotor com dupla-pá a partir de um rotor convencional, mantendo as mesmas dimensões de corda, com base nas equações (44) e (45).

Para a condição de GAP foi considerado o máximo valor recomendado de uma corda em diferentes pontos dentro do intervalo de 1m até 126m de diâmetro com base na referência NREL 5MW (JONKMAN et al., 2009). Dessa forma foi gerada a equação (67), para encontrar o valor de GAP proporcional a envergadura escolhida.

$$GAP = c_{Máx} b / 126 \quad (67)$$

onde $c_{Máx}$ é o valor da máxima corda utilizada na pá do rotor e b é o valor do diâmetro observado no intervalo proposto acima para o GAP calculado. Assim, a Tabela 8 foi gerada:

Tabela 8: Variação de GAP para os pontos escolhidos no intervalo

Diâmetro do Rotor (m)	1	12,6	32	63	126
GAP baseado na corda proporcional (m)	0,0369	0,4652	1,1630	2,3260	4,6520

Fonte: Autor

Com as equações (44) e (45) e os valores para GAP da Tabela 8, foram calculados os valores para auxiliar na conversão entre rotores com pás convencionais à duplas e seu percentual de redução do diâmetro, conforme mostra a Tabela 9.

Tabela 9: Conversão de pá convencional para dupla-pá equivalente

GAP baseado no ϕ					Rotor Convencional										Rotor Duplicado equivalente
1	12,6	32	63	126	ϕ de teste										
0,04	0,47	1,16	2,33	4,65	01 Corda										
k					b					% de acréscimo no diâmetro					b
Fator de proporção					(m)										(m)
k1	k2	k3	k4	k5	EM1	EM2	EM3	EM4	EM5	0,04	0,465	1,163	2,326	4,652	
1,03	1,36	1,76	2,28	3,06	1,0	1,4	1,8	2,3	3,1	3,3%	35,5%	75,9%	127,7%	206,2%	1,0
1,01	1,12	1,27	1,49	1,86	3,4	3,8	4,3	5,1	6,3	1,0%	11,6%	27,1%	49,4%	86,1%	3,4
1,01	1,09	1,21	1,39	1,69	4,5	4,9	5,4	6,3	7,6	0,7%	8,9%	21,0%	38,9%	69,1%	4,5
1,01	1,08	1,18	1,34	1,61	5,3	5,7	6,3	7,1	8,5	0,6%	7,6%	18,1%	33,8%	60,6%	5,3
1,01	1,07	1,16	1,31	1,56	5,9	6,3	6,9	7,7	9,2	0,6%	6,9%	16,4%	30,8%	55,5%	5,9
1,01	1,06	1,15	1,29	1,53	6,3	6,7	7,3	8,1	9,6	0,5%	6,4%	15,4%	29,0%	52,6%	6,3
1,00	1,04	1,11	1,21	1,39	9,1	9,5	10,1	11,0	12,6	0,4%	4,5%	10,9%	20,8%	38,6%	9,1
1,00	1,04	1,09	1,18	1,34	10,7	11,1	11,7	12,6	14,3	0,3%	3,8%	9,3%	18,0%	33,5%	10,7
1,00	1,04	1,09	1,17	1,31	11,6	12,0	12,6	13,5	15,2	0,3%	3,5%	8,6%	16,7%	31,2%	11,6
1,00	1,03	1,08	1,16	1,30	12,2	12,6	13,2	14,1	15,8	0,3%	3,4%	8,2%	15,9%	29,9%	12,2
1,00	1,03	1,08	1,15	1,29	12,6	13,0	13,6	14,5	16,3	0,3%	3,3%	8,0%	15,4%	29,0%	12,6
1,00	1,03	1,07	1,14	1,26	14,2	14,6	15,2	16,2	17,9	0,2%	2,9%	7,1%	13,8%	26,1%	14,2
1,00	1,03	1,07	1,14	1,26	14,3	14,7	15,3	16,3	18,0	0,2%	2,9%	7,1%	13,7%	25,9%	14,3
1,00	1,01	1,04	1,07	1,14	28,1	28,5	29,1	30,1	32,0	0,1%	1,5%	3,7%	7,2%	13,9%	28,1
1,00	1,01	1,03	1,07	1,13	29,7	30,1	30,7	31,7	33,6	0,1%	1,4%	3,5%	6,8%	13,2%	29,7
1,00	1,01	1,03	1,07	1,13	29,8	30,2	30,8	31,8	33,7	0,1%	1,4%	3,5%	6,8%	13,2%	29,8
1,00	1,01	1,03	1,07	1,13	30,0	30,4	31,0	32,0	33,9	0,1%	1,4%	3,4%	6,8%	13,1%	30,0
1,00	1,01	1,03	1,07	1,13	31,0	31,4	32,0	33,0	34,9	0,1%	1,3%	3,3%	6,5%	12,7%	31,0
1,00	1,01	1,03	1,06	1,12	31,6	32,0	32,6	33,6	35,5	0,1%	1,3%	3,3%	6,4%	12,5%	31,6
1,00	1,01	1,03	1,06	1,12	32,0	32,4	33,0	34,0	35,9	0,1%	1,3%	3,2%	6,3%	12,3%	32,0
1,00	1,01	1,02	1,03	1,07	59,0	59,4	60,0	61,1	63,0	0,1%	0,7%	1,8%	3,5%	6,9%	59,0
1,00	1,01	1,02	1,03	1,07	60,9	61,3	61,9	63,0	65,0	0,1%	0,7%	1,7%	3,4%	6,7%	60,9
1,00	1,01	1,02	1,03	1,07	62,0	62,4	63,0	64,1	66,1	0,1%	0,7%	1,7%	3,3%	6,5%	62,0
1,00	1,01	1,02	1,03	1,06	62,6	63,0	63,6	64,7	66,7	0,1%	0,7%	1,7%	3,3%	6,5%	62,6
1,00	1,01	1,02	1,03	1,06	63,0	63,4	64,0	65,1	67,1	0,1%	0,7%	1,6%	3,3%	6,4%	63,0
1,00	1,00	1,01	1,02	1,03	121,9	122,3	122,9	124,0	126,0	0,0%	0,3%	0,9%	1,7%	3,4%	121,9
1,00	1,00	1,01	1,02	-	123,9	124,3	124,9	126,0	-	0,0%	0,3%	0,8%	1,7%	-	123,9
1,00	1,00	1,01	-	-	125,0	125,4	126,0	-	-	0,0%	0,3%	0,8%	-	-	125,0
1,00	1,00	-	-	-	126,1	126,5	-	-	-	0,0%	0,3%	-	-	-	126,1

Fonte: Autor

Ao calcular “% de acréscimo no diâmetro” para um rotor com pá convencional, na qual dividiu em zonas para facilitar a visualização e o entendimento de cada coluna respectiva ao valor do GAP. Dessa forma, a legenda de cores se dá por: verde ($\geq 10\%$), amarelo ($\geq 05\%$) e vermelho ($< 05\%$). Assim, na Tabela 9 é observado que quanto menor o diâmetro, maior será a oportunidade de redução no seu tamanho. Onde o resultado pode ser mais relevante a partir de rotores com diâmetros menores que 32m.

Para a escolha do diâmetro equivalente em um rotor com dupla-pá foi considerado o valor mínimo a ser estudado igual a 5% na redução do diâmetro entre um rotor convencional e um com dupla-pá, como mostrado na Tabela 10 (em azul) para GAP=0,47, $k_2=1,07$ e consequentemente redução aproximada de 6,9%. Ou seja, um rotor com dupla-pá com aproximadamente 5,9m, a partir de um com 6,3m de diâmetro, no qual seria vinte vezes menor do que o NREL 5MW, podendo ser considerado nesta dimensão para microgeração distribuída.

Ao contrário, para rotores com diâmetros maiores do que 6,3m é observado que o efeito de redução do comprimento vai sendo reduzido, o que sua simples duplicação pode ser considerada suficiente, tal como no trabalho de P. Chiu (2017) que apresentou melhora na eficiência do rotor apenas duplicando a região da raiz.

Dessa forma, todo o desenvolvimento das geometrias foi executado a partir destas dimensões, assim a dupla-pá equivalente com aproximadamente 2,8m, e a pá convencional com 3,0m de comprimento.

Tabela 10: Escolha do rotor com pá dupla equivalente

GAP baseado no Ø					Rotor Convencional										Rotor Duplicado equivalente
1	12,6	32	63	126	Ø de teste										
0,04	0,47	1,16	2,33	4,65	Ø1 Corda										
k Fator de proporção					b (m)					% de acréscimo no diâmetro					b (m)
k1	k2	k3	k4	k5	EM1	EM2	EM3	EM4	EM5	0,04	0,465	1,163	2,326	4,652	
1,03	1,36	1,76	2,28	3,06	1,0	1,4	1,8	2,3	3,1	3,3%	35,5%	75,9%	127,7%	206,2%	1,0
1,01	1,12	1,27	1,49	1,86	3,4	3,8	4,3	5,1	6,3	1,0%	11,6%	27,1%	49,4%	86,1%	3,4
1,01	1,09	1,21	1,39	1,69	4,5	4,9	5,4	6,3	7,6	0,7%	8,9%	21,0%	38,9%	69,1%	4,5
1,01	1,08	1,18	1,34	1,61	5,3	5,7	6,3	7,1	8,5	0,6%	7,6%	18,1%	33,8%	60,6%	5,3
1,01	1,07	1,16	1,31	1,56	5,9	6,3	6,9	7,7	9,2	0,6%	6,9%	16,4%	30,8%	55,5%	5,9
1,01	1,06	1,15	1,29	1,53	6,3	6,7	7,3	8,1	9,6	0,5%	6,4%	15,4%	29,0%	52,6%	6,3
1,00	1,04	1,11	1,21	1,39	9,1	9,5	10,1	11,0	12,6	0,4%	4,5%	10,9%	20,8%	38,6%	9,1
1,00	1,04	1,09	1,18	1,34	10,7	11,1	11,7	12,6	14,3	0,3%	3,8%	9,3%	18,0%	33,5%	10,7
1,00	1,04	1,09	1,17	1,31	11,6	12,0	12,6	13,5	15,2	0,3%	3,5%	8,6%	16,7%	31,2%	11,6
1,00	1,03	1,08	1,16	1,30	12,2	12,6	13,2	14,1	15,8	0,3%	3,4%	8,2%	15,9%	29,9%	12,2
1,00	1,03	1,08	1,15	1,29	12,6	13,0	13,6	14,5	16,3	0,3%	3,3%	8,0%	15,4%	29,0%	12,6
1,00	1,03	1,07	1,14	1,26	14,2	14,6	15,2	16,2	17,9	0,2%	2,9%	7,1%	13,8%	26,1%	14,2
1,00	1,03	1,07	1,14	1,26	14,3	14,7	15,3	16,3	18,0	0,2%	2,9%	7,1%	13,7%	25,9%	14,3
1,00	1,01	1,04	1,07	1,14	28,1	28,5	29,1	30,1	32,0	0,1%	1,5%	3,7%	7,2%	13,9%	28,1
1,00	1,01	1,03	1,07	1,13	29,7	30,1	30,7	31,7	33,6	0,1%	1,4%	3,5%	6,8%	13,2%	29,7

Fonte: Autor

Os perfis aerodinâmicos, sua sequência, posição e torção, seguiram a estratégia em proporção a construção da NREL 5MW para a pá convencional, e para as propostas de dupla-pá seguiu conforme P. Chiu (2017) para os perfis e espessura dos mesmos, repetindo a mesma torção da NREL 5MW, como mostra a Tabela 11.

Tabela 11: Dados para geometria dos rotores em escala para o trabalho

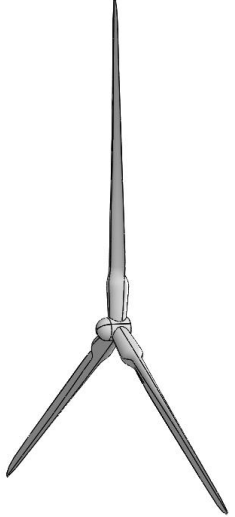
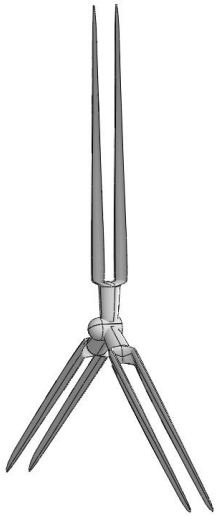
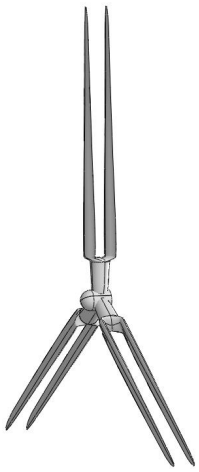
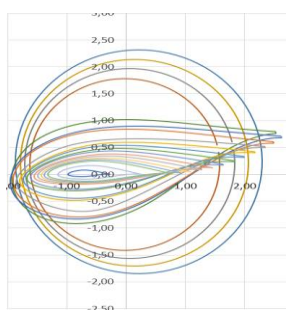
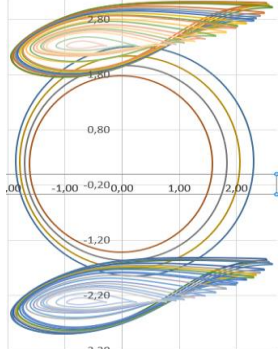
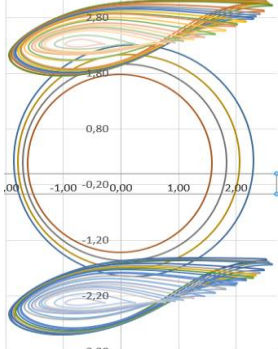
Dados em comum				Convencional				Dupla-pá						
Seção	Corda (m)	Distribuição (%)	Torção	Espessura (%)	Raio (m)	Desenho	Perfis	Espessura (%)	Normal		Equivalente		Perfil	
									Raio (m)	Desenho	Raio (m)	Desenho	Inferior	Superior
1	0,1600	2%	13,080	100	0,0750		Cylinder1	100	0,0750		0,0699		Cylinder1	
2	0,1771	5%	13,080	100	0,1433		Cylinder1	100	0,1433		0,1335		Cylinder1	
3	0,1927	9%	13,080	100	0,2800		Cylinder1	100	0,2800		0,2608		Cylinder1	
4	0,2084	13%	13,080	100	0,4167		Cylinder2	100	0,4167		0,3881		Cylinder2	
5	0,2147	15%	13,080	100	0,4725		Cylinder2	25	0,4725		0,4401		DU25_A17	DU25_A17
6	0,2279	19%	13,080	40	0,5875		DU40_A17	25	0,5875		0,5472		DU25_A17	DU25_A17
7	0,2303	22%	13,080	40	0,6930		DU40_A17	25	0,6930		0,6455		DU25_A17	DU25_A17
8	0,2326	25%	11,480	35	0,7925		DU35_A17	25	0,7925		0,7381		DU25_A17	DU25_A17
9	0,2229	32%	10,162	35	0,9975		DU35_A17	25	0,9975		0,9291		DU25_A17	DU25_A17
10	0,2175	35%	10,162	35	1,1025		DU35_A17	25	1,1025		1,0269		DU25_A17	DU25_A17
11	0,2125	38%	9,011	30	1,2025		DU30_A17	25	1,2025		1,1200		DU25_A17	DU25_A17
12	0,2091	40%	9,011	30	1,2600		DU30_A17	25	1,2600		1,1736		DU25_A17	DU25_A17
13	0,2004	45%	7,795	25	1,4075		DU25_A17	25	1,4075		1,3109		DU25_A17	DU25_A17
14	0,1898	50%	7,795	25	1,5750		DU25_A17	25	1,5750		1,4669		DU25_A17	DU25_A17
15	0,1874	51%	6,544	25	1,6125		DU25_A17	25	1,6125		1,5019		DU25_A17	
16	0,1751	58%	5,361	21	1,8175		DU21_A17	21	1,8175		1,6928		DU21_A17	
17	0,1628	64%	4,188	21	2,0225		DU21_A17	21	2,0225		1,8837		DU21_A17	
18	0,1505	71%	3,125	64	2,2275		NACA64_A17	64	2,2275		2,0747		NACA64_A17	
19	0,1382	77%	2,319	64	2,4325		NACA64_A17	64	2,4325		2,2656		NACA64_A17	
20	0,1259	84%	1,526	64	2,6375		NACA64_A17	64	2,6375		2,4565		NACA64_A17	
21	0,1157	89%	0,863	64	2,8083		NACA64_A17	64	2,8083		2,6157		NACA64_A17	
22	0,1043	93%	0,370	64	2,9450		NACA64_A17	64	2,9450		2,7429		NACA64_A17	
23	0,0710	98%	0,106	64	3,0817		NACA64_A17	64	3,0817		2,8702		NACA64_A17	
24	0,0350	100%	0,106	64	3,1500		NACA64_A17	64	3,1500		2,9339		NACA64_A17	

Fonte: Autor

3.4. GEOMETRIAS ESTUDADAS

Como demonstrado na Tabela 11, três tipos diferentes de rotor TEEH foram montados a partir das condições anteriormente citadas, contendo três pás em cada, dispostas à 120° uma das outras em um *hub* central, que foram utilizados para desenvolver as avaliações aerodinâmicas através de simulações em CFD. Por simplicidade, a torre e a nacele não foram considerados nas avaliações uma vez que o trabalho é sobre a comparação de rotores com diferentes conceitos de pás. Os rotores foram identificados conforme a Tabela 12:

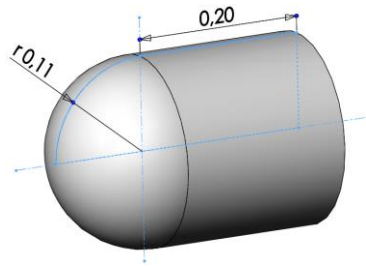
Tabela 12: Identificação dos modelos simulados

Modelos de rotor	“A” Convencional	“B” Dupla-pá	“C” Dupla-pá equivalente
Desenho 3D			
Seções da pá (m)			

Fonte: Autor

Conforme a Figura 33, a geometria do hub foi desenhada de forma simples e funcional para que durante a solução utilizando CFD, auxiliar na geração de malha na etapa de pré-processamento, o que reduz razoavelmente o tempo de execução das análises no processamento, e conseqüentemente no pós-processamento.

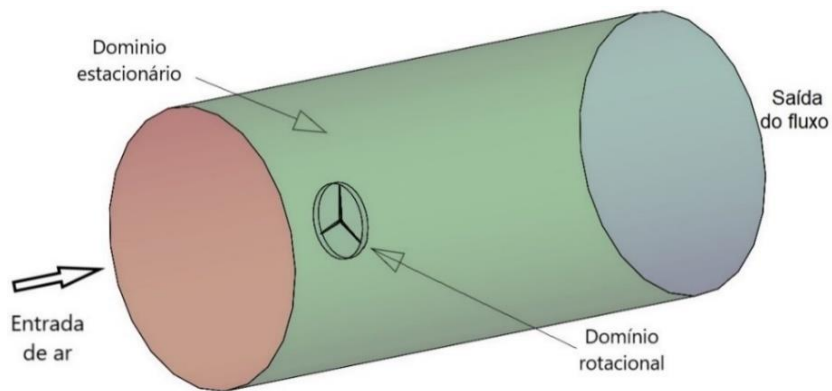
Figura 33: Dimensões do hub utilizadas em metros



Fonte: Autor

O domínio computacional foi dividido em dois componentes, chamados de domínio estacionário e rotacional, o último onde encontra-se localizado o rotor, conforme a Figura 34. A entrada de ar é demonstrada pelo sentido da seta na face destacada em vermelho.

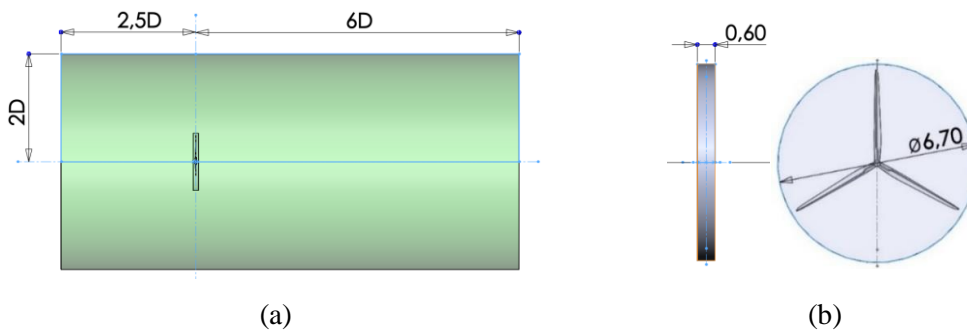
Figura 34: Estratégia dos domínios computacionais para análise



Fonte: Autor

A seguir, temos as dimensões dos domínios, onde para o estacionário está proporcional ao diâmetro do rotor, e para o rotacional ligeiramente maior do que o rotor, como mostra a Figura 35.

Figura 35: Dimensões dos domínios estacionário e rotacional



(a)

(b)

Fonte: Autor

3.5. MALHA COMPUTACIONAL

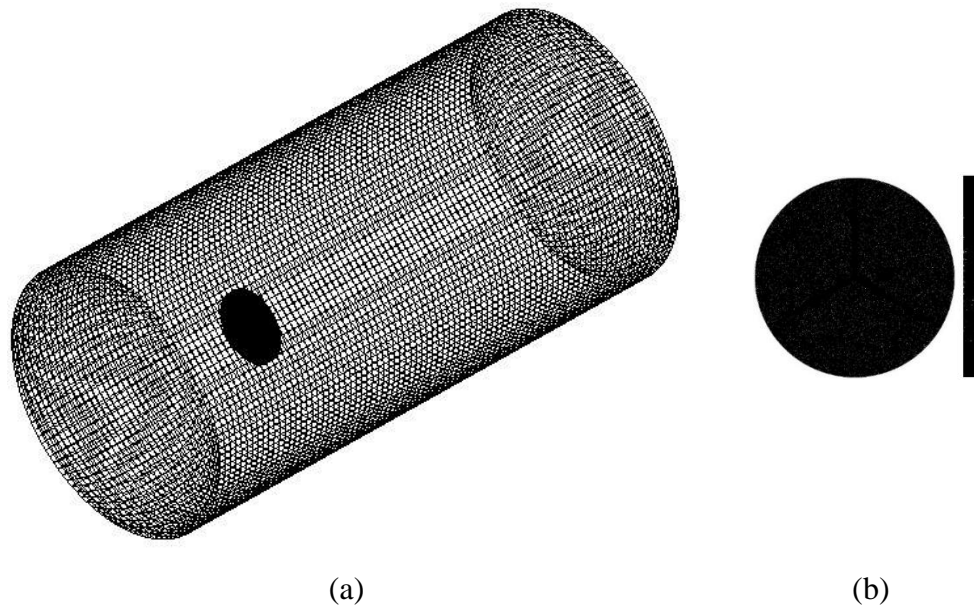
Após a definição das geometrias e domínio a serem estudados, o próximo passo do pré-processamento é a geração da malha computacional para as geometrias. O método CFD, requer subdividir o domínio em pequenos elementos não sobrepostos para resolver a física do fluxo contido no domínio. Os fluxos de fluidos essenciais que são descritos em cada um destes elementos são geralmente resolvidos numericamente, de modo que os valores discretos das propriedades de fluxo, tais como velocidade, pressão, temperatura e outros parâmetros de transporte de interesse, são determinados. Isso produz a solução de CFD ao problema de fluxo que está sendo resolvido (TU; YEOH; LIU, 2013).

O número de elementos na malha influencia fortemente a precisão de uma solução de CFD contida no domínio computacional. Tal como descreve Cai et al. (2016), para o controle de convergência, a malha precisa ser refinada cada vez mais na região da superfície das pás, pois malhas mais grosseiras podem não ser eficazes para casos como separação do fluxo na superfície dentre outros fenômenos menores conforme a física do equipamento. Ou seja, quanto mais refinada a malha, melhor será sua precisão para obter solução. A solução também é influenciada por outros fatores, como o tipo do elemento, a ordem de precisão do método numérico e a adequação das técnicas escolhidas para a física do problema. Além disso, a precisão de uma solução é também dependente das limitações impostas pelos custos computacionais (TU; YEOH; LIU, 2013).

Dessa forma, no presente trabalho foram construídas as malhas rotacional e estacionária individualmente, para redução do tempo de sua construção durante o processamento a cada configuração. O domínio rotacional foi refinado com ênfase no rotor em seu interior com malha não estruturada tetraédrica. E o domínio estacionário utilizou uma malha estruturada, conforme mostra nas Figura 36 e 37.

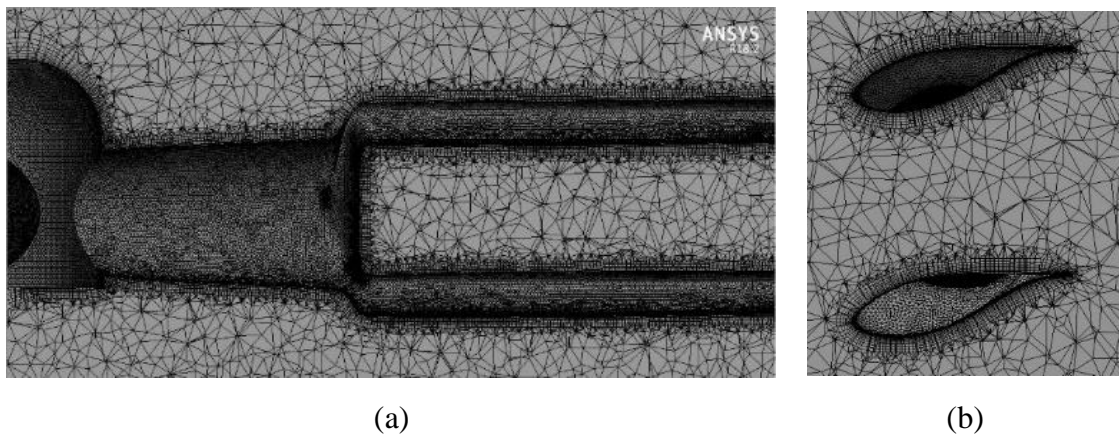
Para entender sobre o melhor desempenho na malha associado a capacidade computacional disponível, foi realizada análises de convergência conforme anteriormente mencionado, utilizando os métodos $k - \varepsilon$ e SST no rotor da dupla-pá, “B”, por ser a geometria mais complexa, e partir dos resultados, a configuração de malha escolhida foi replicada às outras geometrias.

Figura 36: Imagem da malha no domínio estacionário (a) e rotacional (b)



Fonte: Autor

Figura 37: Detalhes da malha gerada na parede do rotor (a) e perfis (b)



Fonte: Autor

Como direcional inicial o cálculo de convergência de malha, Celik et al. (2008) sugere em seu procedimento para se obter uma avaliação aceitável da malha que para cálculos em duas ou três dimensões, o tamanho do elemento médio entre no mínimo três malhas distintas, seja considerado o fator $>1,3$. Porém, conforme o manual de *Mesh Generation in CFD* (2018), para obter resultados bons em análises de fluxo externo, seria preciso subdividir o domínio com tamanho de elemento em torno de 0,1% do comprimento da corda do menor perfil de uma asa. Após as primeiras construções de malha, o menor tamanho de elemento gerado foi equivalente a 5,7% da menor corda, o que pode ser considerado como razoável para análises aerodinâmicas.

Portanto, as malhas foram avaliadas e o fator de Celik recalculado até que obtivesse valores o mais próximos possível do recomendado.

Com a conclusão da solução, sua avaliação foi baseada em condições especiais estabelecidas no pré-processamento, tal como erro residual de $10e^{-4}$ e/ou até que os resultados de simulação estivessem constantes (aqui, tratado o coeficiente de pressão, c_p , por se tratar de um atributo do rotor) e, atingisse desbalanceamento da solução <1%, conforme sugerido em (“Mesh Generation in CFD”, 2018). A ortogonalidade foi observada principalmente devido a geometria nos últimos perfis utilizados com cambagem e bordo de fuga com menor espessura, o que gera maior dificuldade na subdivisão da geometria da dupla-pá devido sua torção de projeto e ter perfis mais finos desde a duplicação na raiz.

Devido às limitações computacionais, não foi possível reduzir ainda mais o tamanho do elemento (<3mm) para aprimorar a região de bordo de ataque e de fuga nas pás, o que dificultou na primeiras tentativas, além de não obter o resíduo como definido, porém a solução foi considerada constante desde que suas últimas 50 iterações não tivessem variação maior que <2,5% no valor de c_p . Neste trabalho, foram observadas cinco condições de malhas e não apenas três para observar o comportamento das soluções, deixando a análise mais robusta.

Na geração das malhas, foi utilizado o programa Meshing do pacote ANSYS 18.2. E como resultado foram obtidos os valores para o estudo de convergência conforme mostrados na Tabela 13, onde o número de nós variou entre 2,8 a 9,5 milhões, e 12 a 29 milhões para elementos.

Tabela 13: Malhas selecionadas para o estudo de convergência.

Malha	Tamanho do elemento no domínio rotacional ¹¹ (mm)	Nº de nós	Nº de elementos	Tamanho médio no domínio rotacional (mm)	Razão entre as malhas
1	3,0	9,54E+06	2,93E+07	7,65	-
2	4,0	5,47E+06	1,78E+07	9,60	1,25
3	5,0	4,04E+06	1,47E+07	12,06	1,26
4	6,0	3,43E+06	1,34E+07	13,48	1,12
5	8,0	2,82E+06	1,21E+07	15,34	1,14

Fonte: Autor

¹¹ O tamanho de configuração para o elemento no domínio estacionário é de 20mm para todos os casos.

3.6. CONDIÇÕES DE CONTORNO

Para as configurações da simulação, o regime foi considerado permanente, e variações de temperatura não foram consideradas, ou seja, a condição de modelo isotérmico foi definida.

No funcionamento do rotor foram considerados os mesmos parâmetros utilizados na NREL 5MW (JONKMAN et al., 2009) para a máxima condição de geração de potência à zero grau de ângulo de instalação das pás, β (*pitch*), onde o fator de velocidade na ponta da pá, TSR (“*Tip Speed Ratio*”) é igual à 7 (para o de raio de 63m), rotação fixa de 12,1rpm e vento de 11,4m/s.

Para a primeira simulação no rotor com diâmetro de 6,3m, foi mantido o mesmo TSR, e velocidades de vento menores a 11,4m/s, e tentando repetir as mesmas condições que na NREL 5MW, assim conforme dados do atlas eólico brasileiro a (NEIVA et al., 2017) uma velocidade de 5,7m/s (50%) poderia ser atingida, obtendo uma rotação de 121rpm conforme a equação (26). A Tabela 14, mostra as condições de contorno:

Tabela 14: Condições de contorno utilizadas para convergência de malha

<i>Superfície de contorno</i>	<i>Condição especificada</i>
<i>Velocidade do vento</i>	5,7m/s
<i>Rotação nominal do rotor</i>	121rpm
<i>Pressão na saída do domínio</i>	1atm

Fonte: Autor

Na Figura 34, são mostradas as condições de contorno de entrada e saída do fluxo. As superfícies do rotor foram consideradas como parede sem escorregamento (“*no slip wall*”) e toda a superfície lateral nos domínios foi considerada como parede de livre escorregamento (“*free slip wall*”), ou seja, atrito nulo. A massa específica do ar foi de 1,185 kg/m³ e viscosidade de 18,31x10⁻⁶ Pa.s.

3.7. RECURSO COMPUTACIONAL

A geração de malhas e simulações neste trabalho foram realizadas em uma estação de trabalho móvel, modelo Dell Precision 15 7520, com processador quadri-core Intel i7-6820HQ, CPU 2,7GHz e 32Gb de memória RAM. Nas simulações de forma geral, a relação entre

memória RAM e tamanho da malha ocorreram na seguinte proporção: um milhão de elementos da malha para cada um gigabyte de memória RAM.

A disponibilidade da máquina, assim como a licença do software ANSYS CFX 18.2 foram cortesia e apoio de uma empresa situada no polo petroquímico de Camaçari-Ba.

3.8. AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

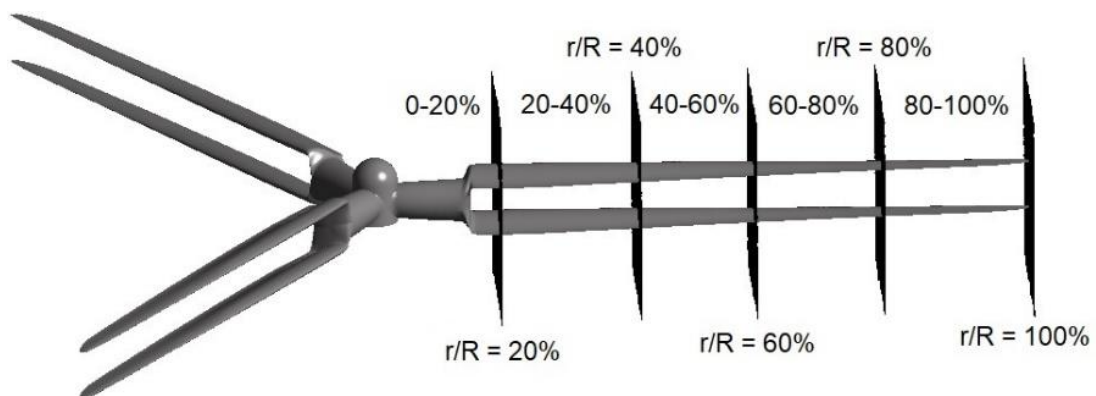
A partir da metodologia apresentada neste capítulo, serão avaliados e observados os resultados da solução no pós-processamento. Portanto, a visualização de parâmetros acerca do escoamento como perfis de velocidade, pressão e linhas de corrente, além de realização de cálculos para elaboração de gráficos comparativos entre os modelos como objeto de estudo neste trabalho. A abordagem dos resultados será apresentada no capítulo a seguir.

A simulação será analisada em cada geometria proposta de forma individual, conforme estratégia mostrada na Figura 38, que contempla os planos e os segmentos onde serão apresentados os resultados de parte das análises em uma das pás do rotor e, axial e radial em relação ao eixo de rotação.

Nestes planos, os perfis de velocidade, pressão e linhas de corrente. Em termos quantitativos serão elaborados gráficos do coeficiente de pressão naqueles perfis de interseção entre as regiões em relação ao eixo X e eixo Y. Com os resultados poder-se-ão avaliar o comportamento dos rotores propostos em comparação com o convencional.

Além disso, os resultados do estudo de convergência de malha abordado no item 3.5 Malha computacional, serão mostrados no capítulo de resultados sendo baseados no coeficiente de potência do rotor.

Figura 38: Planos e seções de apresentação dos resultados



Fonte: Autor

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. RESULTADO DE CONVERGÊNCIA DE MALHA

Ao estabelecer um estudo de caso utilizando CFD, entender se as soluções encontradas descrevem a física do domínio com qualidade, principalmente quando não há dados experimentais para sua validação, é de fato um desafio; e mitigar ou eliminar potenciais erros é o objetivo principal do refinamento de malha a partir de um nível mais grosseiro, até que determinada propriedade física não apresente alteração apreciável. Dessa forma, a geometria utilizada para o estudo de convergência foi a “B” (dupla-pá) conforme a Tabela 12, por ter uma região bifurcada e perfis de menor espessura desde a raiz, ou seja, a geometria mais complexa.

A análise foi feita através da variação do coeficiente de potência, c_p (por ser um atributo do rotor durante seu funcionamento), de uma malha em relação a outra. A Tabela 15 mostra os resultados do estudo através dos modelos de turbulências, $k - \varepsilon$ e SST, embora o primeiro seja utilizado em várias aplicações de engenharia, e apresente resultados razoáveis nestes, conforme Bai e Wang (2016) não demonstra boa qualidade nas soluções para TEEH, e o segundo mostra forte relação em aplicações 3D para dados experimentais, além de ser mais adequado as geometrias estudadas por obter a solução conforme a proximidade de parede média de $y^+ < 140$. Contudo, como complemento a análise de convergência, foi avaliada também a geometria “A” (convencional) de forma comparativa para o valor de c_p para o refinamento.

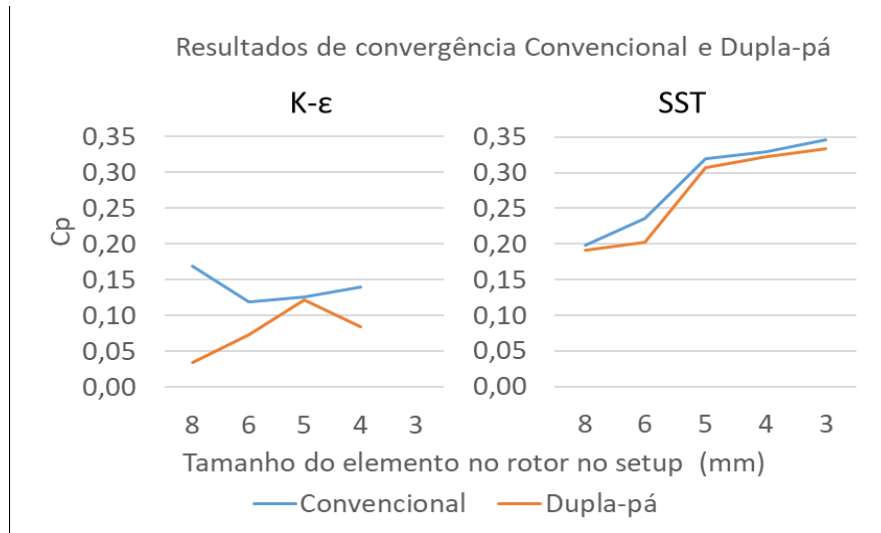
Tabela 15: Resultados das malhas na análise de convergência

Geometria	Malha	Tamanho do elemento no domínio rotacional (mm)	Nº de nós	Nº de elementos	Tamanho médio no domínio rotacional (mm)	c_p (k- ε)	c_p (SST)
"A"	1	3,0	6,13E+06	2,20E+07	10,38	-	0,3460
	2	4,0	3,80E+06	1,41E+07	12,53	0,1398	0,3300
	3	5,0	3,10E+06	1,26E+07	14,47	0,1256	0,3203
	4	6,0	2,46E+06	1,13E+07	16,78	0,1188	0,2024
	5	8,0	2,23E+06	1,08E+07	17,82	0,1697	0,1911
"B"	1	3,0	9,54E+06	2,93E+07	7,65	-	0,3344
	2	4,0	5,47E+06	1,78E+07	9,60	0,0844	0,3227
	3	5,0	4,04E+06	1,47E+07	12,06	0,1213	0,3065
	4	6,0	3,43E+06	1,34E+07	13,48	0,0738	0,2024
	5	8,0	2,82E+06	1,21E+07	15,34	0,0350	0,1911

Fonte: Autor

A Figura 39 mostra os resultados gerados da convergência de malha nas geometrias “A” e “B”, onde são observados os dois modelos de turbulência supracitados, no qual o SST apresentou melhores resultados e uma tendência de estabilização entre malhas desde de 5mm de tamanho de elemento configurado no domínio rotacional. Assim, utilizado na apresentação dos resultados.

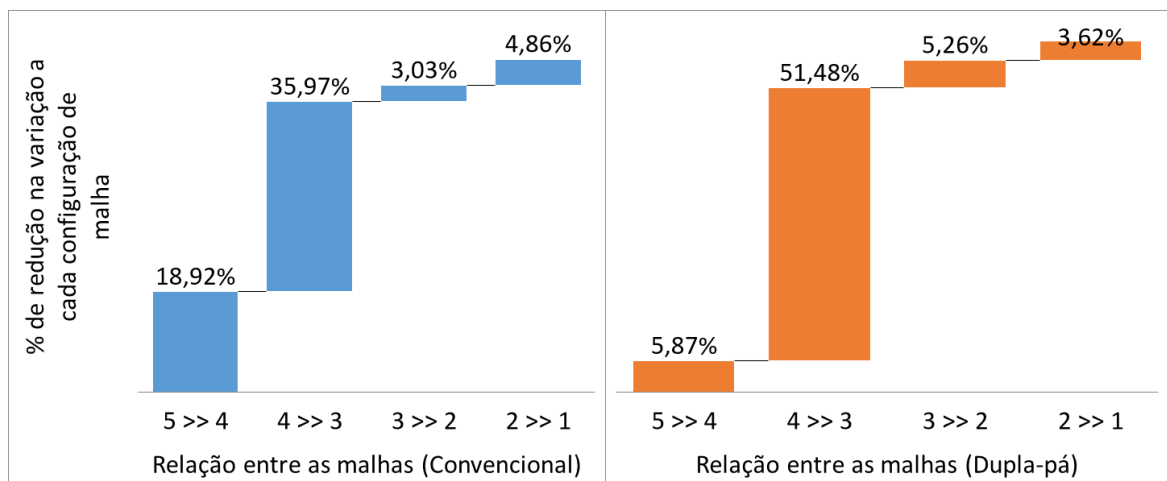
Figura 39: Resultados de convergência rotor com pá convencional e duplá-pá



Fonte: Autor.

A partir da Figura 39, considerando os resultados do modelo de turbulência SST para cada rotor avaliado (“A” e “B”), tem-se conforme a Figura 40, a redução percentual de variação nos resultados do c_p a cada refinamento das malhas em relação à anterior.

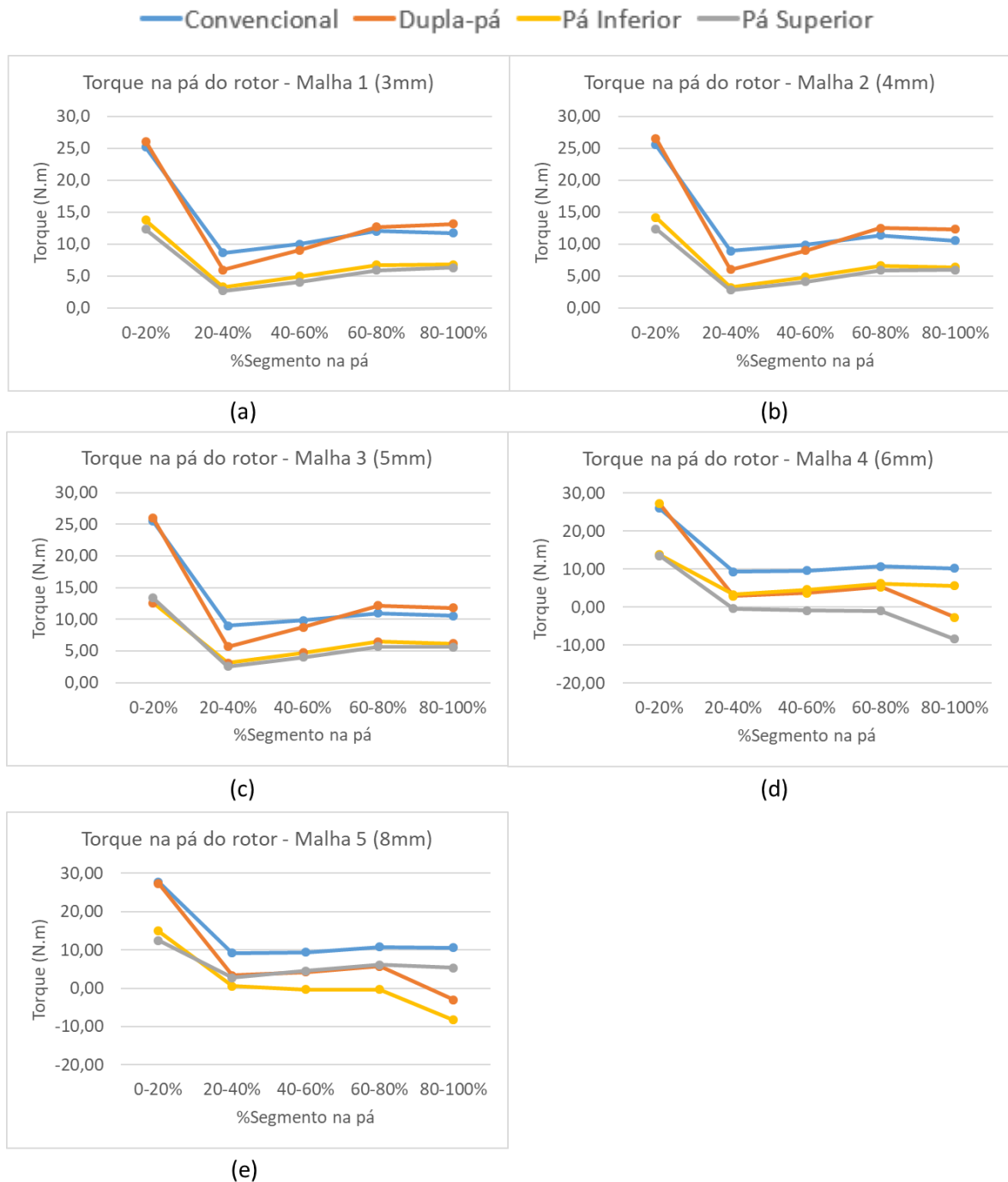
Figura 40: % de redução de variação na convergência entre malhas para c_p



Fonte: Autor

Para complementar a avaliação, para cada malha, uma pá de cada rotor foi dividida em cinco segmentos iguais e avaliado o seu comportamento em relação ao torque gerado, onde pode-se verificar que nas malhas 1, 2 e 3, os resultados na geometria “B” obtém melhores valores nos segmentos a partir de $r/R=50\%$, o que faz sentido pois é nesta região que a duplicação ocorre considerando as mesmas espessura e corda da geometria “A”. Na parte cilíndrica da raiz, não há diferença apreciável por ser a mesma geometria em ambas. E nas malhas 4 e 5, os resultados evidenciam que as malhas apresentam condições mais grosseiras ao ter o valor de torque negativo. Outro ponto importante é que a maior parcela do torque não se encontra na ponta da pá, e sim na região da raiz ao início da pá devido a espessura dos perfis utilizados ser maior do que no meio e na ponta. Como mostra a Figura 41.

Figura 41: Gráficos de distribuição de torque na pá por malha



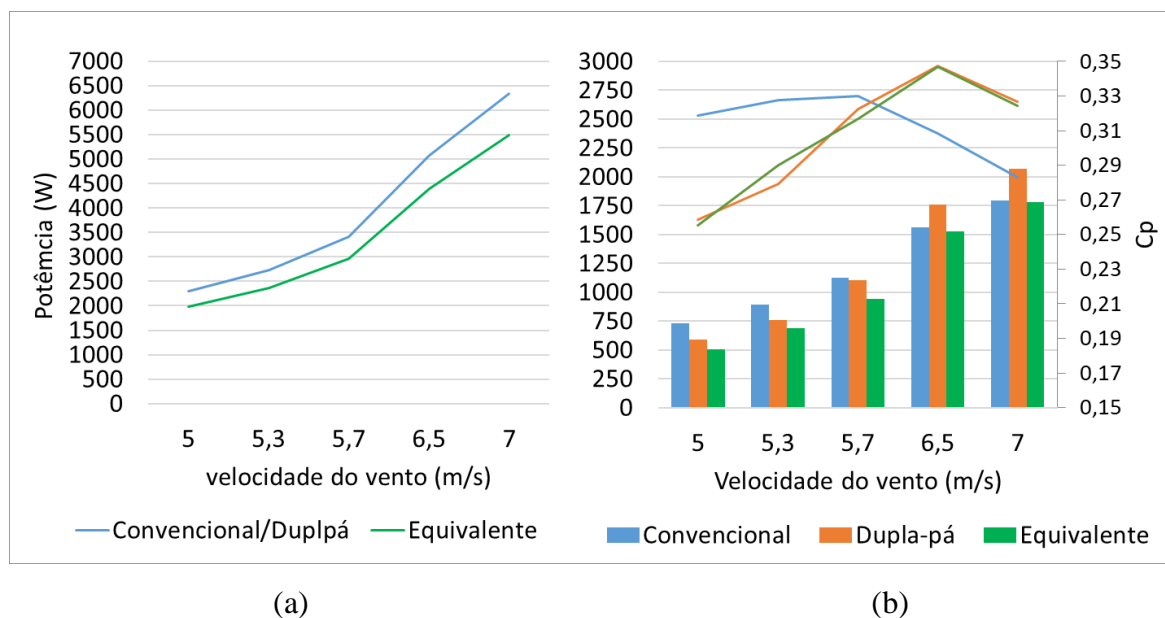
Fonte: Autor.

Portanto, a partir da Figura 40 e Figura 41, pode-se confirmar uma estabilização às soluções das malhas testadas, onde considerando o tempo de processamento e o delta entre as malhas 3 >> 2 em e 2 >> 1, a malha 2 foi escolhida para avaliação dos resultados subsequentes, inclusive sendo reproduzida também na geometria “C”.

4.2. GERAÇÃO DE POTÊNCIA NOS ROTORES

Com a rotação nos rotores constante em 121rpm, as simulações foram executadas em diferentes velocidades de vento, o que resulta na variação da potência mecânica gerada a partir da disponível – com base na equação (15) –, obtendo o coeficiente de potência, c_p . Como mostra a Figura 42.a é fato que as geometrias “A” e “B” (linha azul) tem maior disponibilidade de potência do que em “C” (linha verde). Já na Figura 42.b mostra a potência gerada (barra) por cada rotor e o seu c_p (linha) naquela velocidade de vento observada.

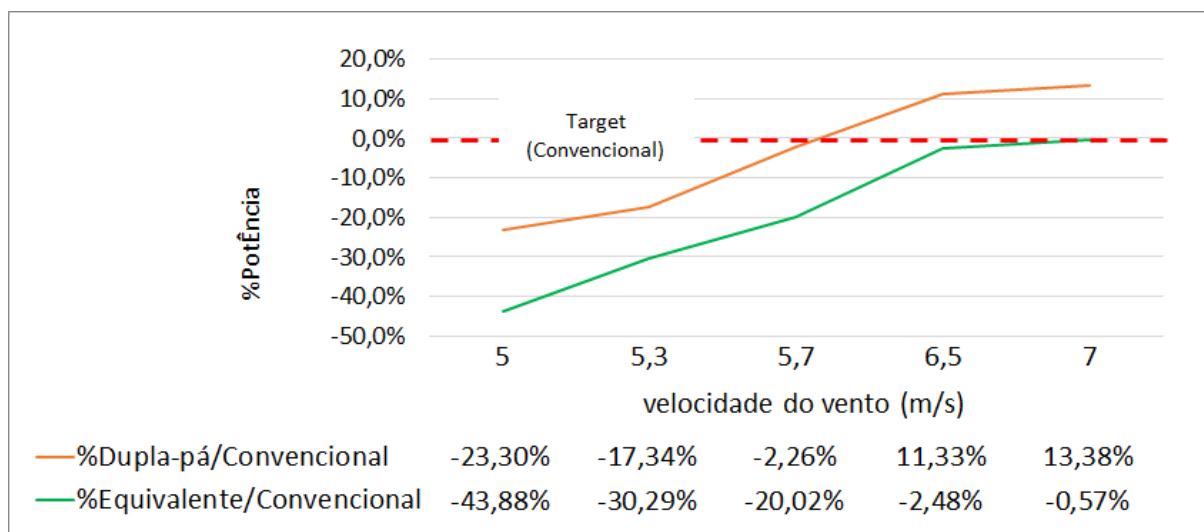
Figura 42: (a) Potência disponível no vento e (b) produzida nos rotores



Fonte: Autor

Ao analisar o comportamento dos rotores pela potência mecânica relativa entre eles, onde as geometrias “A” e “B” possuem o mesmo diâmetro, “B” apresenta melhor eficiência para ventos acima de 5,7m/s, consequentemente gerando maior potência em relação a “A”. E para “C” que tem menor diâmetro, ao estar sob o efeito de ventos com velocidade acima 6,5m/s tende a produzir resultado similar em relação a “B”, mesmo sob disponibilidade de potência menor, ou seja, a duplicação tem efeito positivo em determinada faixa de velocidade de vento. Dessa forma, ao comparar as geometrias, é observado razoável compromisso na duplicação, principalmente em “C”, que teve seu diâmetro reduzido em 6,7% em relação a “A” e “B”, conforme a premissa apresentada no item 3.3.1 Análise de tamanho do rotor para o projeto. Como mostra a Figura 43.

Figura 43: Comparação dos rotores duplicados ao convencional

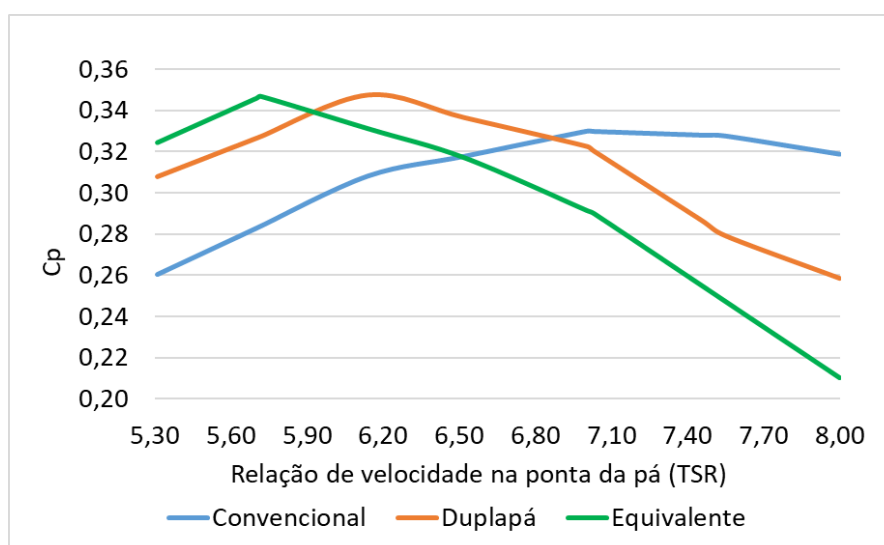


Fonte: Autor

Se apresentar os resultados em função da taxa de velocidade na ponta das pás (TSR), o c_p das geometrias “B” e “C” atingiu valores superiores quando o TSR em relação a “A”, está $<7,0$ e $<6,5$, respectivamente. No geral, os resultados ao refinar ainda mais a malha, a confiança nos valores é ampliada, pois o método CFD pode fornecer uma boa abordagem numérica para simular a aerodinâmica do rotor de uma turbina eólica.

Alguns valores foram interpolados para c_p e TSR para complementar a Figura 44, uma vez que o TSR está em função do raio do rotor, com rotação fixa e diferentes velocidades de vento, o que gerava alguns intervalos ao apresentar no mesmo gráfico as geometrias estudadas.

Figura 44: Comparação dos rotores por TSR

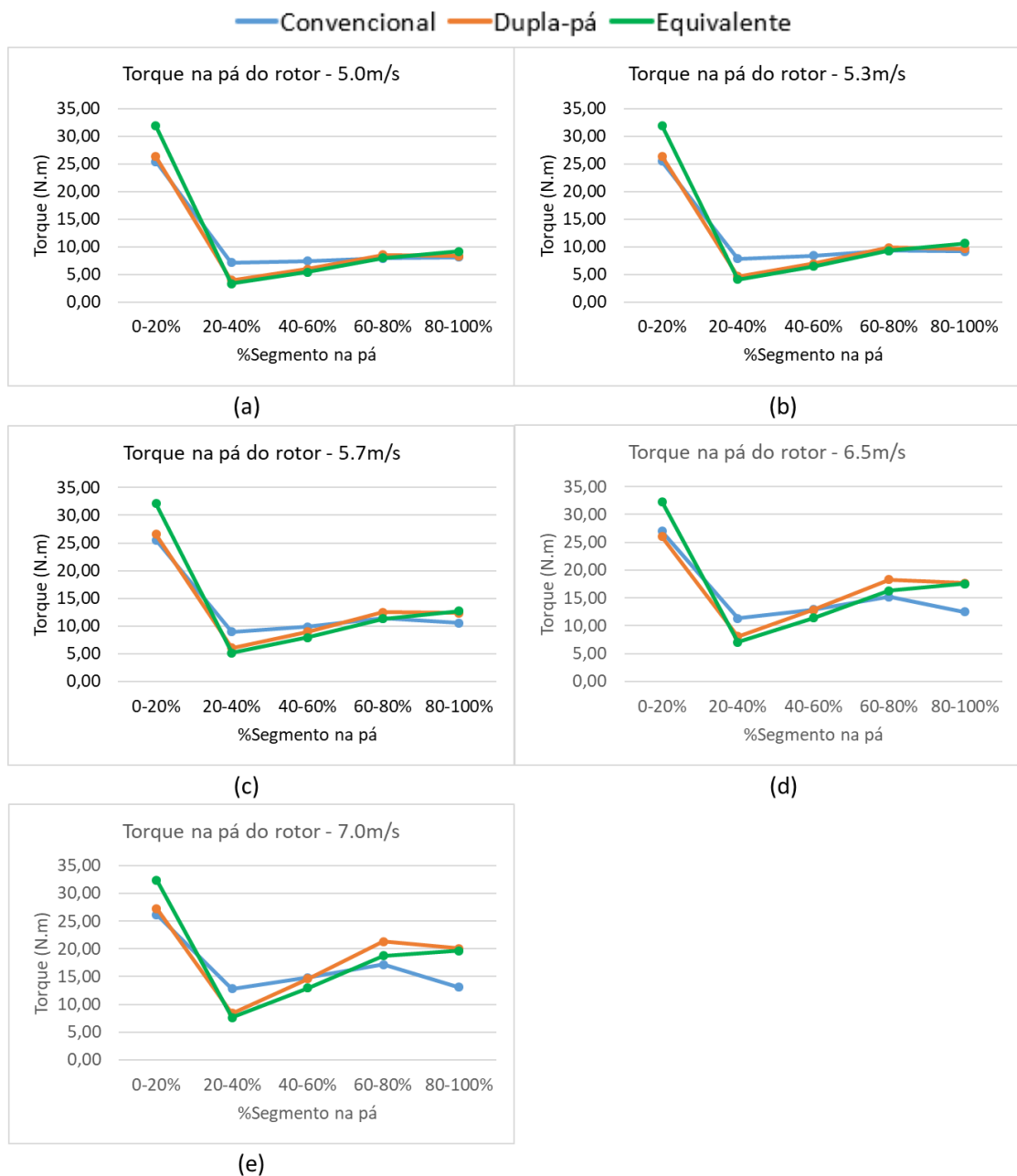


Fonte: Autor

4.3. DISTRIBUIÇÃO: TORQUE X VELOCIDADE DO VENTO

Considerando o mesmo método para gerar a Figura 41, foi executado para entender o comportamento da geração de torque em relação a velocidade instantânea nas geometrias. Onde “C” nas mesmas condições de rotação e velocidade de vento de “A” e “B”, tem comportamento similar a ”B”, porém com torque maior no segmento 0-20% de raio devido ao aumento na solidez ao ter as mesmas dimensões de corda em diâmetros menores. Como mostra a Figura 45.

Figura 45: Gráficos de distribuição de torque na pá por velocidade do vento



Fonte: Autor

4.4. COMPORTAMENTO DO ROTOR COM VENTO À 6,5M/S

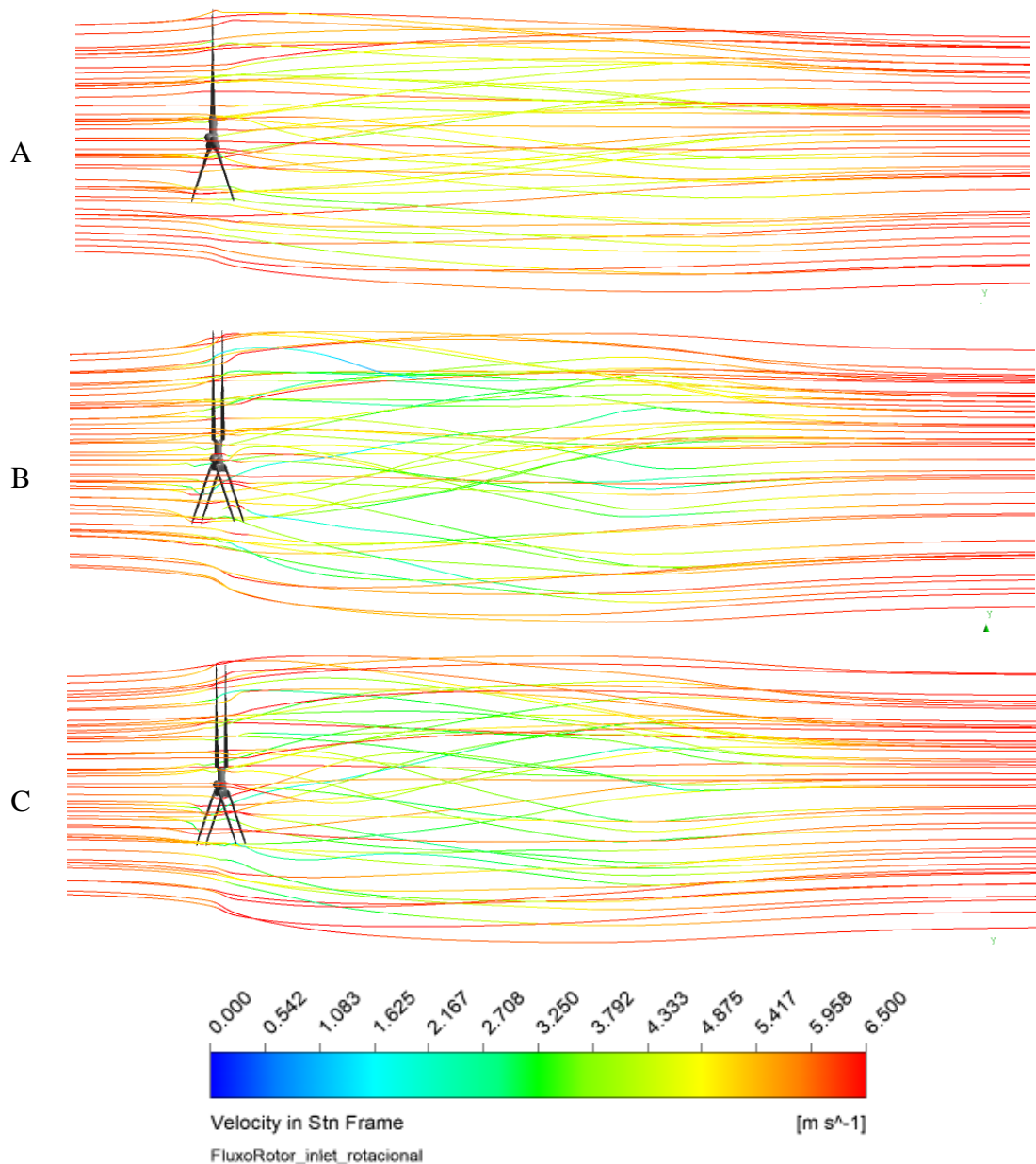
Considerando as velocidades simuladas, as análises a seguir são concentradas na velocidade de vento à 6,5m/s, pois é a partir desta que a geometria “B” tem melhora na eficiência para geração de potência, e a “C” praticamente consegue igualar-se a “A” conforme a premissa apresentada para duplicação e redução no comprimento à uma dupla-pá equivalente. Os resultados poder-se-iam atingir melhores condições para as variações de dupla-pá conforme o domínio tivesse sido mais refinado, o que não ocorreu devido as limitações computacionais. No entanto, podem ser avaliados conforme descrito a seguir.

4.4.1. LINHAS DE FLUXO NO DOMÍNIO

Conforme a Figura 46, assumindo que o fluxo de ar afetado pelos rotores permaneça separado do que não passa pelo rotor e não desacelera (fluxo livre), podem ser observadas as linhas de corrente da parcela afetada pela passagem nos rotores com a legenda variando a velocidade do fluxo de zero à 6,5m/s (velocidade do fluxo livre). Dessa forma, os rotores exercem a extração de energia cinética a partir da energia disponível durante a passagem do fluxo; à montante com uma desaceleração leve durante a chegada do fluxo devido a presença do rotor, e à jusante para compensar a extração da energia cinética, ocorre o aumento da pressão estática naquela região o que amplia a desaceleração do vento ainda mais. A extração ocorre devido o atrito do fluxo nas pás dos rotores. Com isso, a geometria “A” demonstra ter menor capacidade de extração quando comparada aos rotores com dupla-pá pelo efeito visual de distanciamento entre as linhas de corrente, já que perturba o fluxo uma vez; quanto mais divergentes as linhas à jusante, menor a velocidade. Com o distanciamento do fluxo, a pressão recupera continuamente ao nível atmosférico.

Em “C”, ocorre a mesma condição, porém devido sua maior solidez em menor diâmetro as linhas de fluxo estão divergentes como em “B”, porém parecem atingir a mesma intensidade que na geometria “A” conforme a legenda por causa da redução da área superficial. Como mostra a Figura 46.

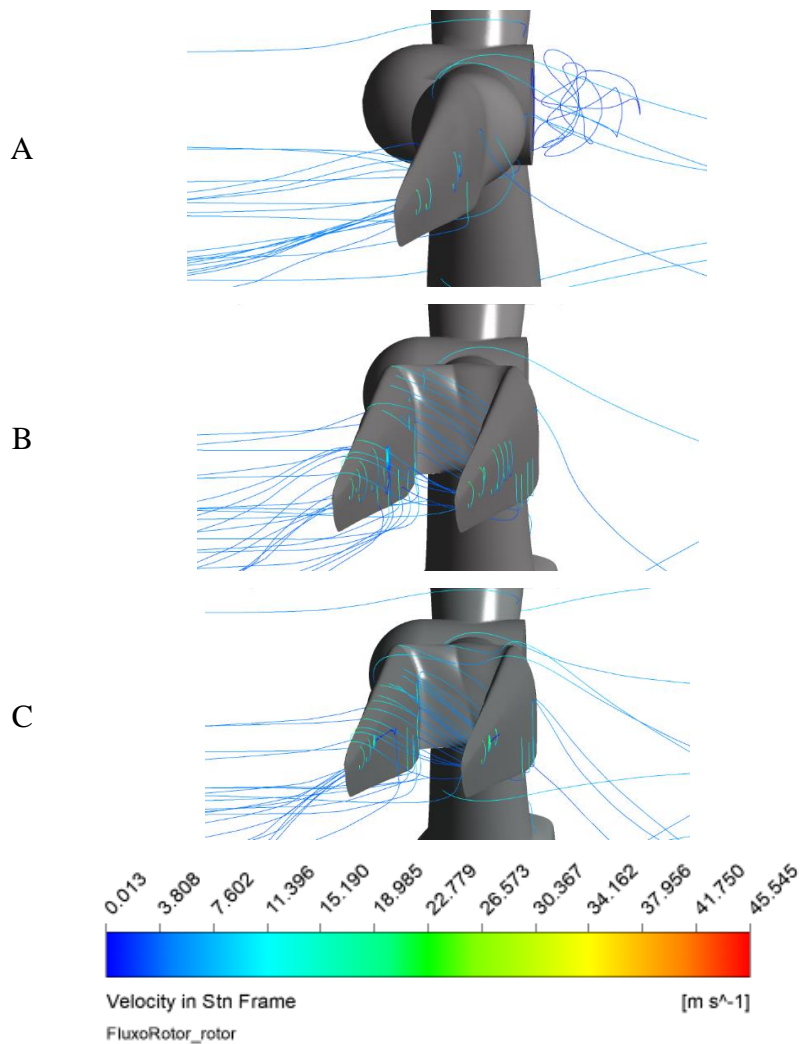
Figura 46: Linhas de fluxo através do rotor



Fonte: Autor

Na dupla-pá, conforme mostra a Figura 47, a passagem do fluxo é dividida entre a primeira metade (superfície aerodinâmica à montante) e a segunda (superfície aerodinâmica à jusante), ou seja, uma segunda parcela de energia cinética é extraída na mesma pá, provocando mais redução da pressão estática e conseqüentemente nova desaceleração no fluxo em relação à rotores com a geometria “A”. É possível observar também que na geometria “A”, após a passagem do fluxo através do hub, aparecem linhas cruzadas, mostrando um fluxo aleatório, o que não ocorre com as outras geometrias. Isso é provocado pela limitação computacional ao não ser possível refinar ainda mais a região para obter solução mais adequada a física do estudo.

Figura 47: Linhas de fluxo da pá no rotor



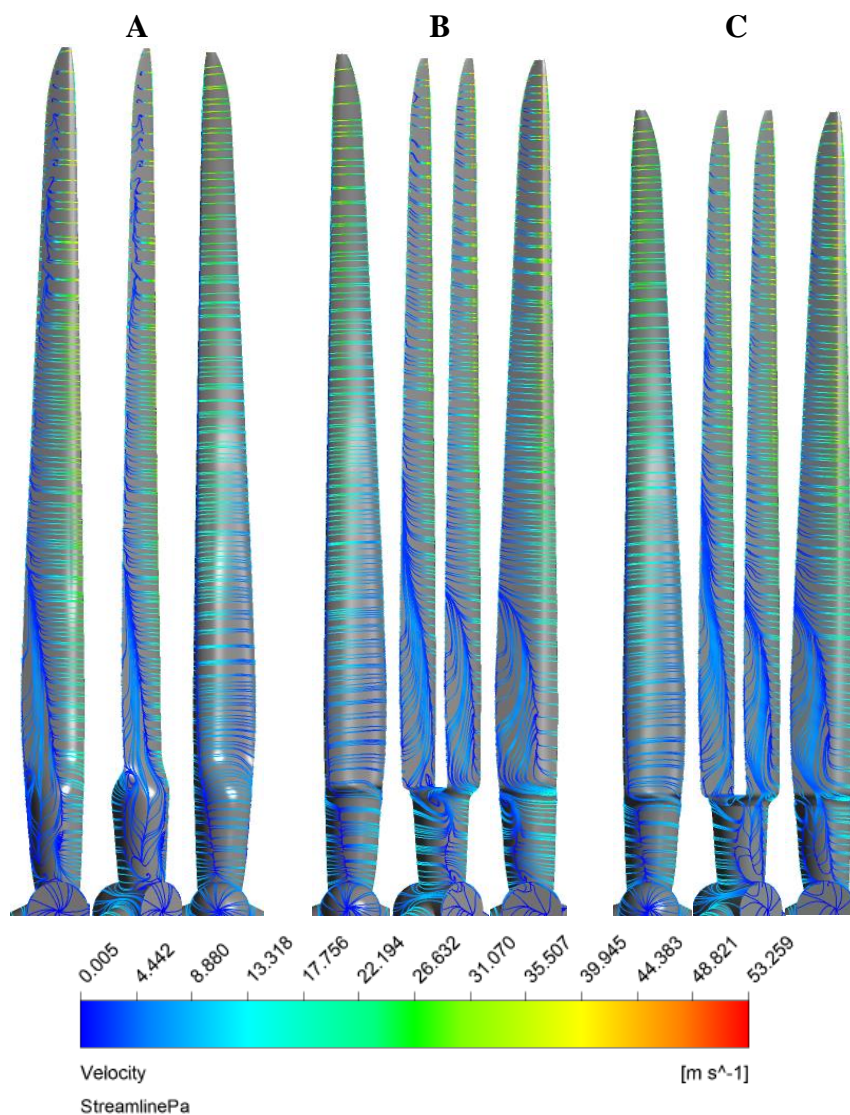
Fonte: Autor

4.4.2. LINHAS DE FLUXO NA PÁ E NO HUB

Outra forma de avaliação é simular o campo de fluxo nas pás e investigar suas diferenças em relação ao descolamento da camada limite. Assim, observar as linhas de fluxo na superfície da pá e distribuição de pressão de cada seção é importante. A Figura 48 mostra três vistas: superfície superior, superfície a 45° no eixo longitudinal da pá (bordo de fuga) e superfície inferior. Onde, é visto que o bordo de fuga na geometria “A” e na superfície superior da pá à jusante de “B”, o descolamento ocorre até aproximadamente a seção $r/R=40\%$ e 30% , respectivamente. Porém em “A”, mostra uma área de descolamento do fluxo menor na superfície próximo à raiz, devido ter a borda de fuga mais espessa na transição da região cilíndrica ao início dos perfis aerodinâmicos, ao contrário de “B” que tem bordas mais finas e

que piora a condição e ampliam o descolamento por apresentar redução da pressão nessa região, assim aparecendo recirculação do fluxo com mais intensidade. Além disso, em “B”, na superfície superior da pá à montante também ocorre o descolamento até $r/R=50\%$, o que prejudica a geração de torque também naquela região. Assim, justificando o menor valor de torque dentro as seções 20-50% em relação a “A” (Figura 45). Para “C” é similar a “B”, porém com seções menos eficientes entre 20-60%. O que explica transferência de torque ainda menor nestas seções da geometria. Tal efeito pode estar sendo ocasionado pela combinação de três condições: troca dos perfis espessos por mais finos, reduzindo a influência na zona de maior de pressão no perfil por ter menor região de arrasto próximo ao ponto de estagnação, a geometria desenvolvida para a duplicação da raiz ao início dos perfis, o que pode estar gerando contrafluxo na zona de separação, o que observa o descolamento de forma curva e o baixo TSR (6,14).

Figura 48: Linhas de fluxo na pá

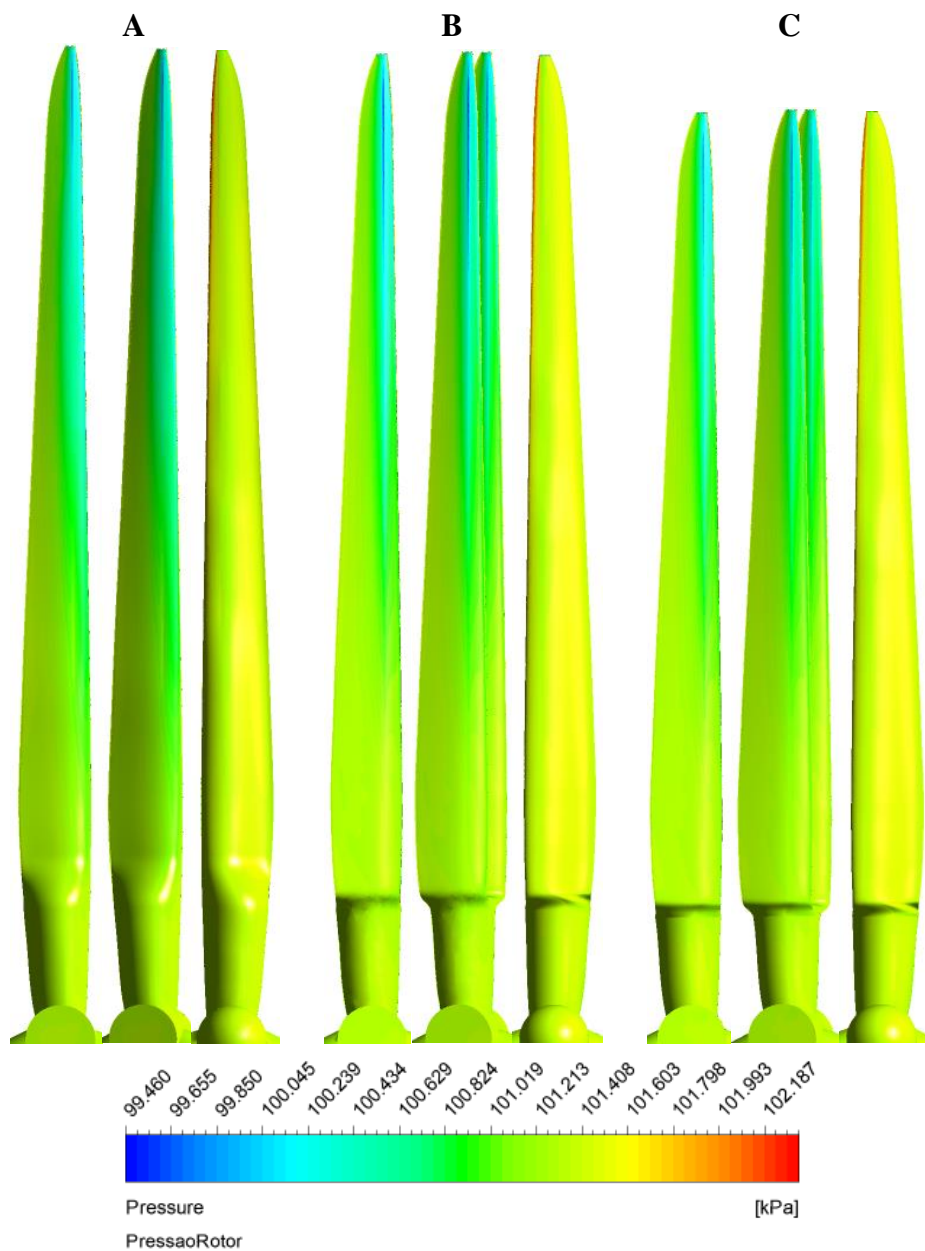


Fonte: Autor

4.4.3. DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÃO NA PÁ

A Figura 49 mostra três vistas: superfície superior, superfície a 45° no eixo longitudinal da pá (bordo de ataque) e superfície inferior, para a distribuição de pressão ao longo das pás. Onde é observado uma região de pressão mais baixa nas superfícies superior das pás nos rotores em “B” e “C”, devido a duplicação ser exatamente igual nas superfícies, ou seja, considera os mesmos perfis e espessuras da geometria “A” desde $r/R=50\%$ até a ponta. Vale observar também, os segmentos mostrados na Figura 50 e seções na Figura 51 a seguir.

Figura 49: Distribuição de pressão total estacionária ao longo da pá

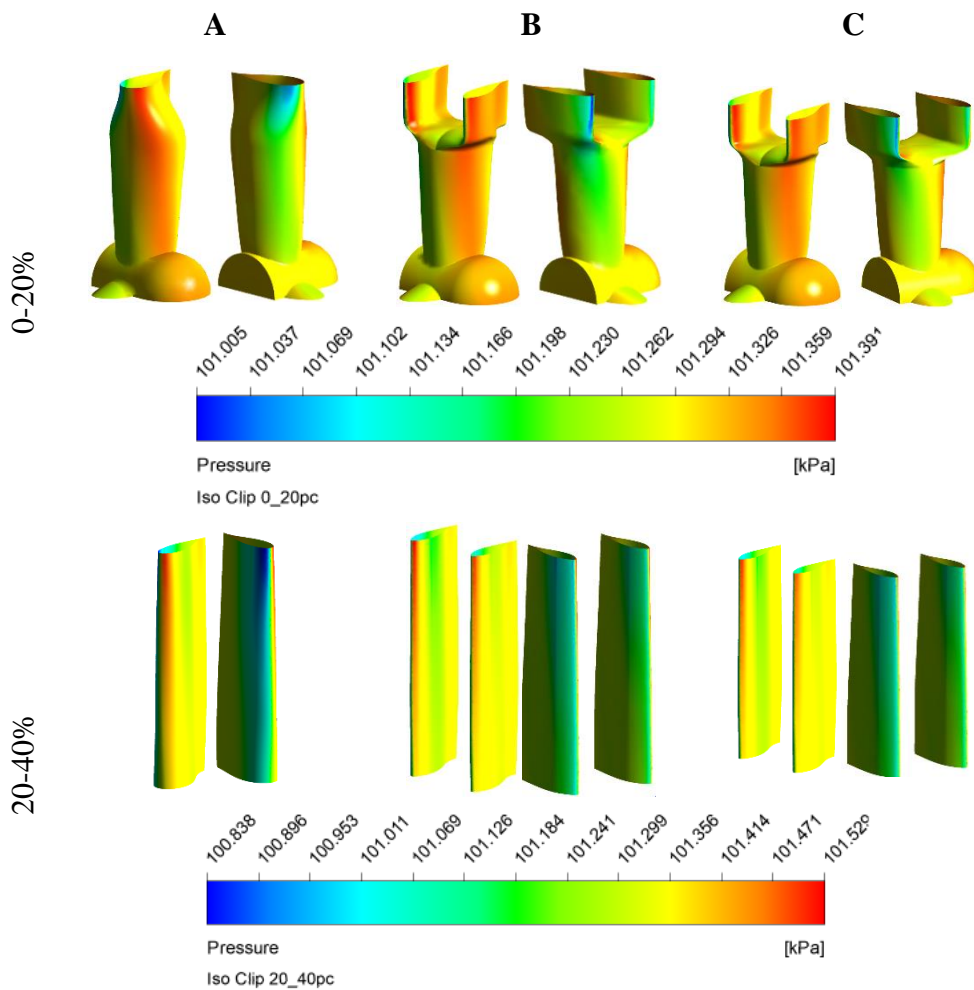


Fonte: Autor

4.4.4. DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÃO POR SEGMENTOS

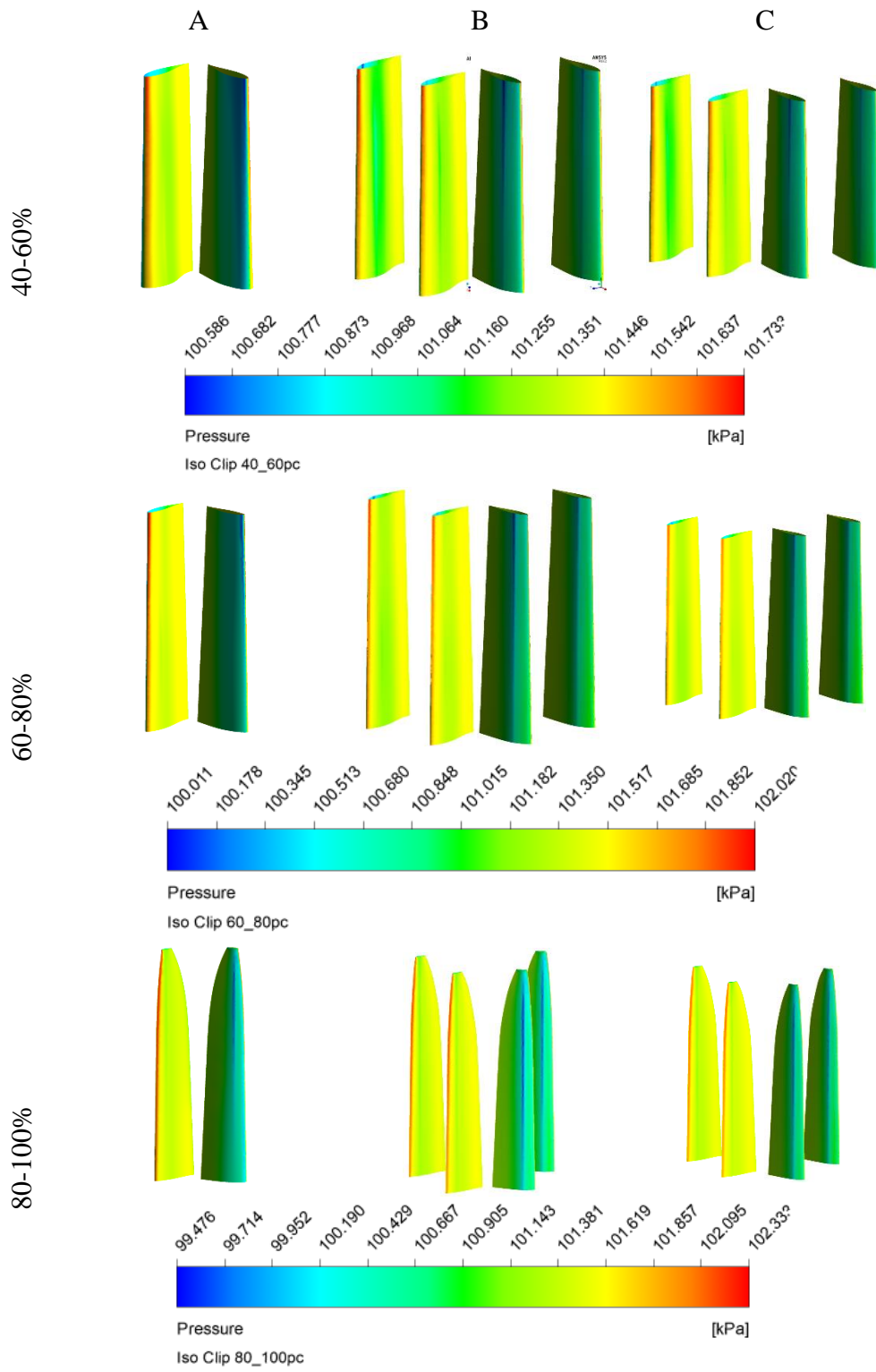
A Figura 50 e 51, mostra a distribuição da pressão disposta na superfície para os segmentos 0-20% à 20-40% e 40-60% à 80-100%, respectivamente, dando ênfase nas vistas do bordo de ataque na superfície inferior onde ocorrem as maiores pressões e no bordo de ataque na superfície superior onde acontece o aumento da velocidade do fluxo. As superfícies superiores nas duplas-pás estão com valores de pressão menores do que na convencional até $r/R=40\%$. Mesmo efeito descrito sobre a troca dos perfis mais espessos por mais finos, e acaba reduzindo o delta de pressão entre as superfícies. Já para 60-80% à 80-100%, ocorre exatamente o contrário, devido seus segmentos duplicados serem exatamente iguais aos da convencional, naturalmente superam o perfil único.

Figura 50: Distribuição de pressão: segmentos 0-20% à 20-40% da pá



Fonte: Autor

Figura 51: Distribuição de pressão: segmentos 40-60% à 80-100% da pá

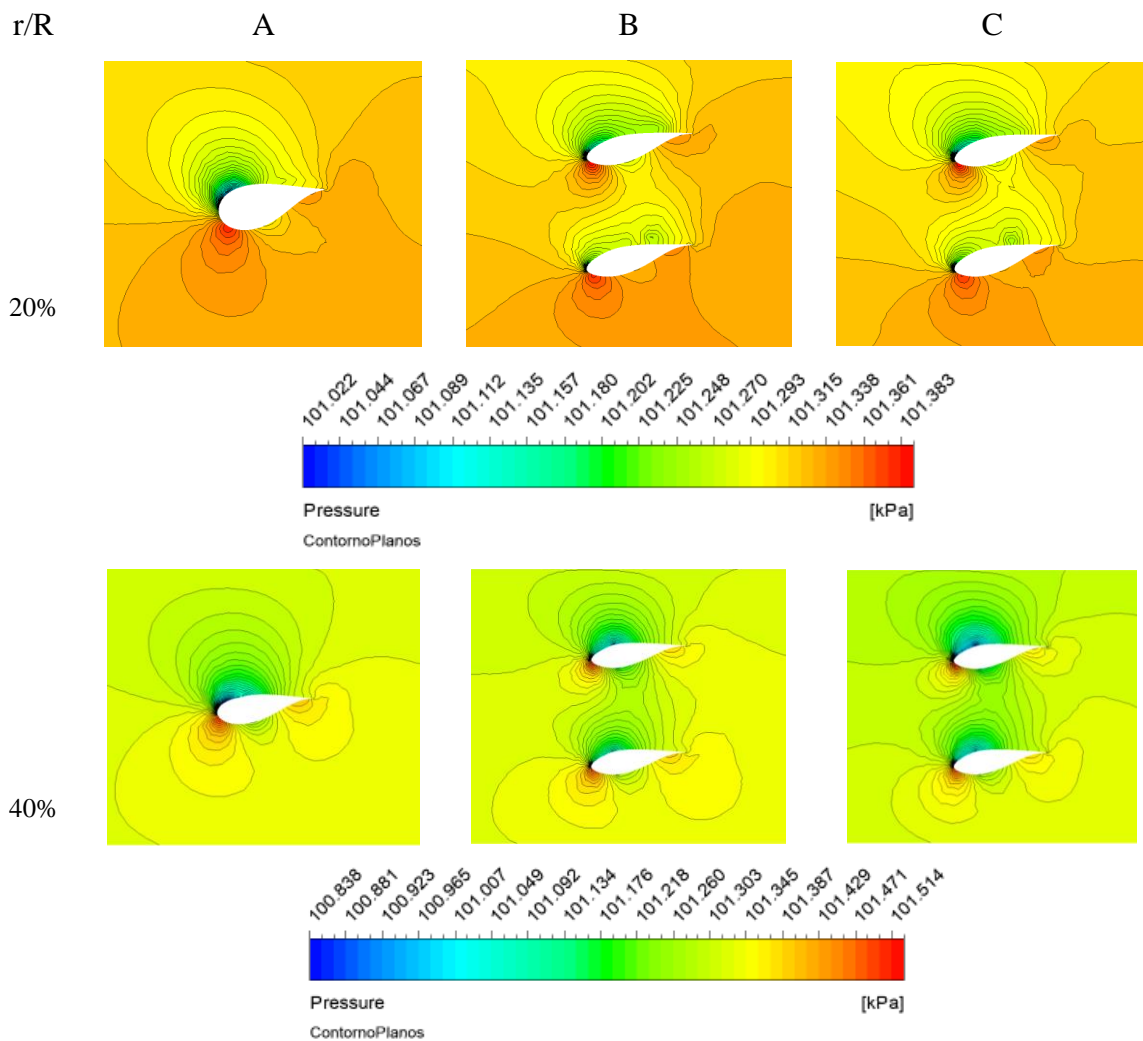


Fonte: Autor

4.4.5. DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÃO NOS PLANOS

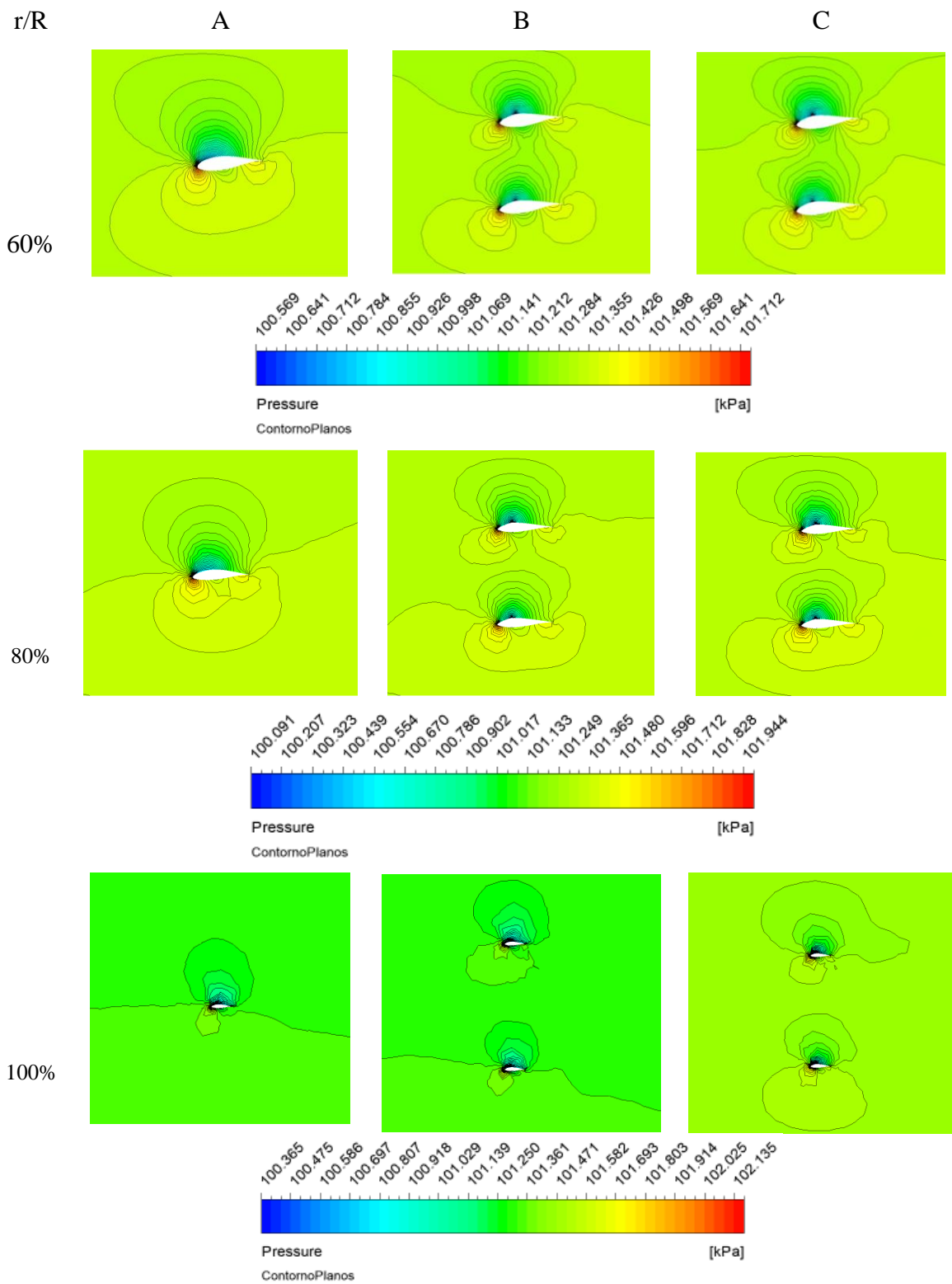
De forma análoga a seção anterior, o mesmo comportamento da pressão pode ser evidenciado nas seções transversais – como mostra a Figura 52 e Figura 53 – ao comparar as três geometrias. É mostrado também que nas seções de “B” e “C”, há menor pressão ao longo dos perímetros inferiores em ambos os perfis – à montante ou à jusante – nas seções de 20% e 40% em relação “A”. Nas outras seções de “B” e “C” é possível ver que a duplicação está trabalhando com a combinação das pressões em ambas as superfícies, o que está justificando melhores valores de torque – na Figura 45 para 6,5m/s – conforme a premissa deste trabalho.

Figura 52: Distribuição de pressão: planos 20% a 40% da pá



Fonte: Autor

Figura 53: Distribuição de pressão: planos 60% à 100% da pá



Fonte: Autor

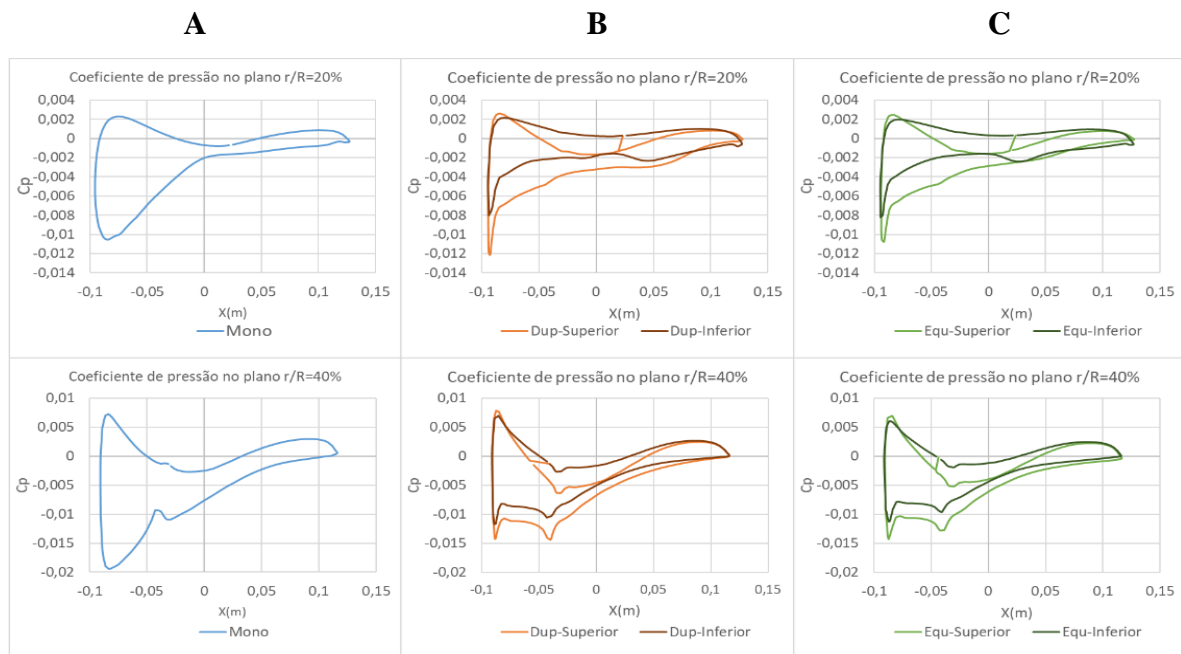
4.4.6. COEFICIENTE DE PRESSÃO NAS SEÇÕES

Na Figura 54 e 55, está representado o coeficiente de pressão de forma gráfica para as mesmas seções da Figura 52, calculados a partir da equação (68). É observado também, que dentre as seções 40%, 60% e 80%, no bordo de ataque na superfície superior onde tem as pressões menores, não ocorre um pico como na seção correspondente da pá convencional, que além da questão da troca de espessura, os perfis podem não estar sendo bem subdivididos na condição de malha durante a etapa de pré-processamento devido a capacidade computacional. Essa parcela, poderia ser mais um ponto a contribuir no desenvolvimento das geometrias e principalmente no desempenho nas avaliações.

$$c_{pres} = \frac{p - p_{est}}{\frac{1}{2} \rho U_E^2} \quad (68)$$

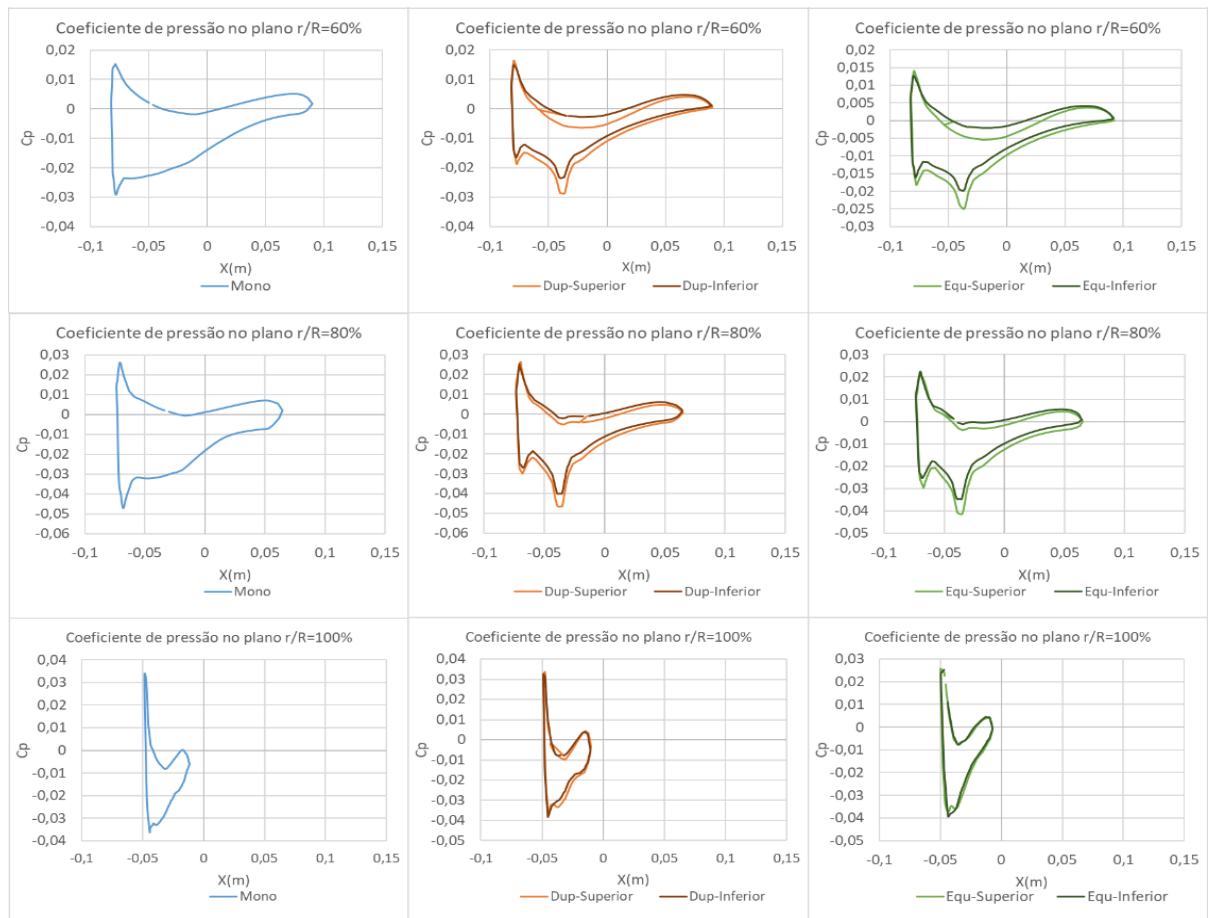
onde c_{pres} é o coeficiente de pressão no perfil estudado e p_{est} , a pressão estática no domínio.

Figura 54: Gráficos do coeficiente de pressão nos planos selecionados 20%-40%



Fonte: Autor

Figura 55: Gráficos do coeficiente de pressão nos planos selecionados 60% - 100%

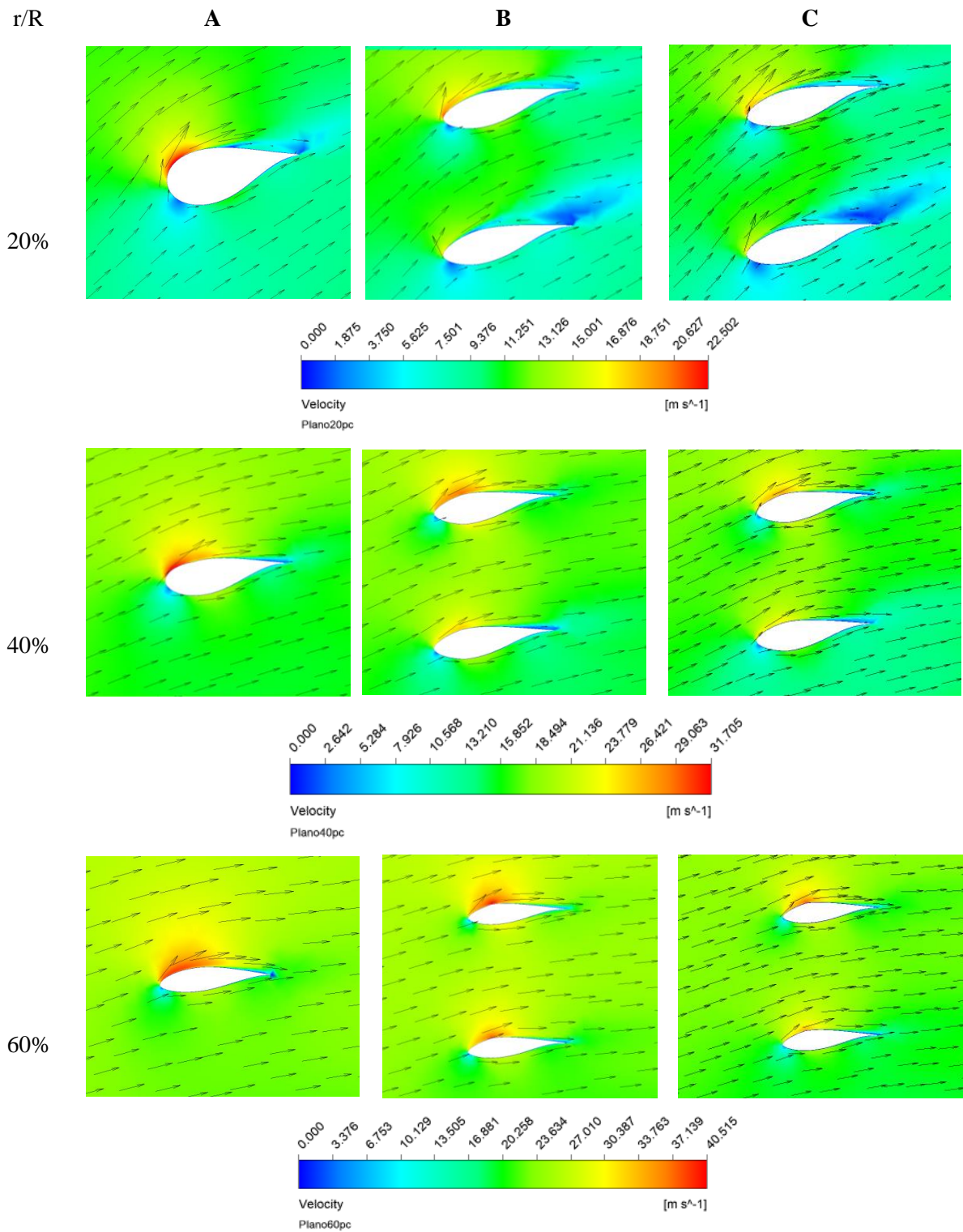


Fonte: Autor

4.4.7. VELOCIDADE NOS PLANOS DE REFERÊNCIA EM UMA PÁ

Realizando análise análoga a da seção 4.4.3 Distribuição de pressão na pá, as seções foram tratadas sobre a condição da distribuição de velocidade do fluxo em torno dos perfis, além da visualização de vetores evidenciando a direção do fluxo a cada plano, como mostram as Figura 56 e 57. A princípio, o efeito do GAP com valor em toda duplicação que é igual a máxima corda do projeto entre os perfis, demonstra que o fluxo não está sofrendo influência na duplicação em qualquer uma das seções para a velocidade de 6,5m/s, tal como estão dispostos os vetores. O fluxo passa através de cada perfil seja, na pá convencional ou dupla-pá sem que seja desviado a ponto de influenciar o segundo perfil.

Figura 56: Distribuição de velocidade: planos 20% e 60% da pá

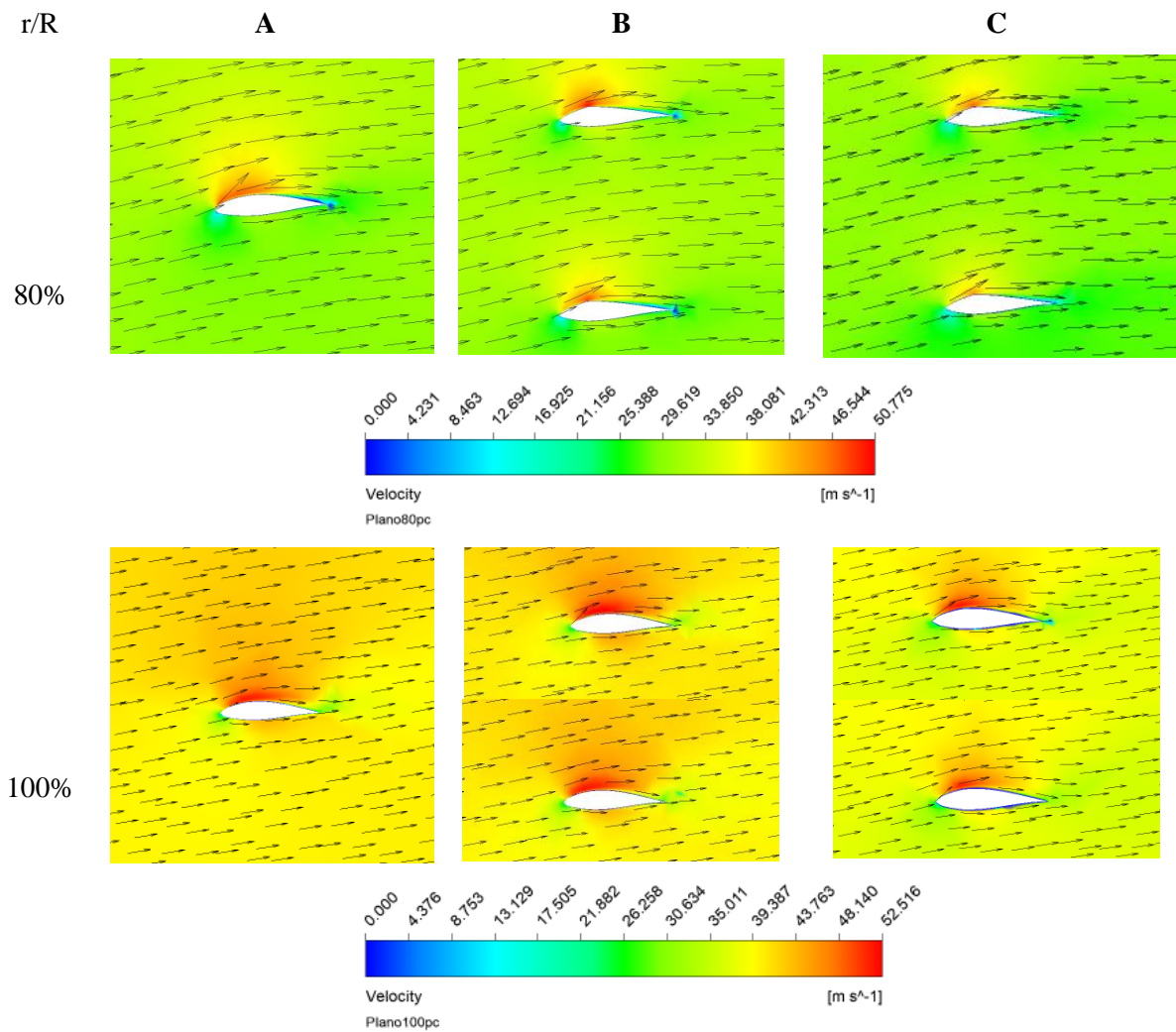


Fonte: Autor

Como é demonstrado pela Figura 56 é possível observar que o ângulo de ataque nos perfis a 20%, 40% e 60% pode estar mais crítico que para a Figura 57 nos perfis a 80% e 100%. Por projeto nestes três primeiros planos, os perfis tem os maiores ângulos de instalação (*pitch*)

em relação ao plano de rotação do rotor, porém é também onde ocorrem as menores velocidades devido a sua localização em relação ao raio, portanto a velocidade relativa do vento pode ser pouco influenciada pela parcela tangencial da velocidade. O que provoca o descolamento da camada limite nas superfícies superior de cada configuração das geometrias, conforme já comentado nas seções anteriores. Onde, pode reduzir a circulação do fluxo, a sustentação do perfil e conseqüentemente o aumento do seu arrasto em ambas as geometrias, porém com mais intensidade nas “B” e “C”. Esse efeito pode estar ocorrendo devido a troca dos perfis espessos pelos mais finos, o que tem deixado os bordos de ataque mais agudos, ou seja, menos arredondados. Pode-se concluir que nas primeiras seções das geometrias com duplas-pás o efeito de estol pode estar ocorrendo.

Figura 57: Distribuição de velocidade: planos 80% a 100% da pá



Fonte: Autor

CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou os resultados de uma análise comparativa entre rotores eólicos, através de simulações via CFD. O modelo de turbulência SST foi utilizado após o estudo de convergência de malha ter demonstrado valores com pequenas variações conforme o refino desta em relação ao modelo $k - \varepsilon$, além de confirmar ser um modelo mais interessante para estudos que demandam análises com proximidade de superfícies aerodinâmicas, conforme identificado em pesquisa. Três geometrias de rotores eólicos TEEH foram simuladas, uma com 6,3m de diâmetro e pás convencionais baseadas no projeto base da NREL 5MW, a segunda com duplas-pás e mesmo diâmetro e uma equivalente também com duplas-pás, porém com seu diâmetro reduzido em 6,7%. Ambos os rotores estudados foram construídos com ângulo de *Pitch* igual a zero graus para reduzir a solidez ao máximo, que pode contribuir para redução de arrasto durante seu início da operação, e aqui apresenta bons resultados durante a operação para a geração de potência.

Equipamentos que venham utilizar duplas-pás com o controle de *Pitch* podem variar o *Stagger* sob influência do vento resultante na pá, a depender dos perfis aerodinâmicos utilizados e desde o início da operação até a velocidade máxima permitida de projeto para reduzir carregamentos no equipamento, auxiliando no seu projeto dimensional.

Com a comparação entre as geometrias estudadas, resultados interessantes para geração de potência foram observados sobre o comportamento dos rotores com duplas-pás em relação ao com pás convencionais, entretanto obteve vantagens para valores específicos de TSR, ou seja, valores menores que estão em função de velocidades mais altas. A partir de 6,5m/s a geometria “B” atingiu coeficiente de potência de 0,3476, correspondendo a 11,33% acima da geometria “A”, e “C” que embora tivesse uma disponibilidade de potência 13,25% menor, devido o rotor equivalente com diâmetro 6,7% menor, demonstrar capacidade de extrair um coeficiente de potência de 0,3467, sendo apenas 2,48% abaixo da geração da “A”. Dessa forma, sendo considerada válida a premissa de obter um rotor com pá de comprimento reduzido com similar capacidade de geração de potência, porém com específica condição de vento. Estes resultados, poder-se-iam melhorar conforme maior refino da malha, o que ajudaria na composição das forças nos perfis mais finos no projeto.

Para a duplicação em toda a superfície, conforme proposto em “B” e “C”, o projeto ainda requer avaliações mais profundas em relação as variáveis aerodinâmicas como sustentação e arrasto dos perfis escolhidos, como também questões estruturais para

oportunamente gerar um produto com condições de produção em massa no futuro. Outro ponto importante sobre o conceito da duplicação já era uma preocupação de P.Chiu em seu trabalho; a região de duplicação que demonstrou alterar a separação da camada limite do fluxo na superfície superior dos estágios das duplas-pás. E que quanto mais próxima da raiz maior a solidez, sendo possível que uma dupla-pá com a bifurcação iniciando em um raio maior ao atual, mantendo a proporção do *GAP* em relação aos perfis mais próximos da ponta das pás para evitar interferências entre os fluxos nas superfícies aerodinâmicas à montante e à jusante, nos planos a partir de $r/R=50\%$ para velocidade e pressão, venha a ter redução significativa na geração de vórtices, como demonstrado nos resultados para a dupla-pá inteiriça, podendo contribuir para redução de ruído daquele sistema.

SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Como proposta futura, pode-se realizar simulações com o equipamento completo, ou seja, considerando nacelle e torre, e com oportunidade com aplicações como turbinas eólica de construção aumentada (TECA) por favorecer o aumento da velocidade de vento quando aplicado entre edifícios ou construções de grande porte, típico do efeito de difusor que facilitaria a implementação de pás duplicadas. Dessa forma, seria possível a otimização da captura de maior parcela da potência disponível.

Sobre a proposta de geometria “C”, a redução da pá a partir de sua duplicação pode ser estudada em futuras oportunidades para averiguar se continua válida para uma família de curvas de potência, além de verificar sua eficácia ao utilizar a teoria aeronáutica em turbinas cada vez menores, onde o fator de redução aumenta exponencialmente a partir deste ponto estudado neste trabalho, podendo fazer valer como orientação a novos projetos de equipamentos residenciais ou em unidades rurais de pequeno porte para micro geração com razoável capacidade de geração de potência. Inclusive podendo adaptar a teoria a turbinas eólicas em definitivo.

REFERÊNCIAS:

- AHMAD HEMAMI. **Wind Turbine**. 1. ed. [s.l.] Cengage Learning, 2011.
- ALI M. ABDELSALAM, V. R. Effect of the tilt angle on the wind turbine performance and wakes. **The Eighth Asia-Pacific Conference on Wind Engineering**, v. 6, n. 2011, p. 978–981, 2013.
- ANNONI, J. et al. Evaluation Tilt for Wind Farms. **American Control Conference (ACC)**, **2017**, n. June, 2017.
- BAI, C. J.; WANG, W. C. Review of computational and experimental approaches to analysis of aerodynamic performance in horizontal-axis wind turbines (HAWTs). **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 63, p. 506–519, 2016.
- BP ENERGY ECONOMICS. 2018 BP Energy Outlook 2018 BP Energy Outlook. p. 125, 2018.
- BULAT, M. P.; BULAT, P. V. Comparison of turbulence models in the calculation of supersonic separated flows. **World Applied Sciences Journal**, v. 27, n. 10, p. 1263–1266, 2013.
- BURTON, T. et al. **Wind Energy Handbook**. [s.l: s.n.].
- CAI, X. et al. Unsteady aerodynamics simulation of a full-scale horizontal axis wind turbine using CFD methodology. **Energy Conversion and Management**, v. 112, p. 146–156, 2016.
- CHIU, P. **Aerodynamics and optimal design of biplane wind turbine blades**. [s.l.] University of California, 2017.
- EPE. **Plano Decenal de Energia 2030** BrasíliaEPE, , 2007. Disponível em: <<http://epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Decenal-de-Expansao-de-Energia-2026>>
- EPE. **Anuário estatístico de energia elétrica 2017 - ano base 2016**. [s.l.] EPE, 2017. v. 1
- EPE. Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2018 no ano base de 2017. p. 249, 2018.
- FERZIGER, J. H.; PERIC, M. **Computational Methods for Fluid Dynamics**. [s.l: s.n.].
- GAUNAA, M. et al. Quantification of the Effects of Using Slats on the Inner Part of a 10MW Rotor. **2012 European Wind Energy Association Conference 2012**, v. 1803, n. December 2011, p. 1–12, 2012.
- GHARBI, N. EL et al. Effect of near-wall treatments on airflow simulations. 2010.
- GWEC. Global Wind Energy Report: Annual Market Update 2017. p. 72, 2018.
- HANSEN, M. O. L. **Aerodynamics of Wind Turbines**. 2. ed. London: Earthscan, 2008.
- HARRINGTON, EDWIN Y GALVEZ, G. **Historia de los inventos**. 5ª ed. [s.l.] Sucesos N 12ª,

[s.d.].

HAU, E. **Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics**. Third ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013.

HEO, Y. G. et al. CFD study on aerodynamic power output of a 110 kW building augmented wind turbine. **Energy and Buildings**, v. 129, p. 162–173, 2016.

ISMAIL B. CELIK, URMILA GHIA, PATRICK J. ROACHE, C. J. F. Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications. **Journal of Fluids Engineering**, v. 130, n. 7, p. 078001, 2008.

JIRI BLAZEK. **Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications**. Third Edit ed. [s.l.] Elsevier, 2015.

JONKMAN, J. et al. Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development. n. February, 2009.

MALCOLM, D. J.; HANSEN, A. C. WindPACT Turbine Rotor Design Study WindPACT Turbine Rotor Design Study. **National Renewable Energy Laboratory**, n. April, 2006.

MALISKA, C. R. **Transferência de Calor e Mecânica dos Flúídos Computacional**. 2ed rev. e ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

MANWELL, J. F.; MCGOWAN, J. G.; ROGERS, A. L. **Wind Energy Explained**. 2nd. ed. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2009.

MARTEN, D.; WENDLER, J. QBLADE: an open source tool for design and simulation of horizontal and vertical axis wind turbines. **International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering**, v. 3, n. 3, p. 264–269, 2013.

Mesh Generation in CFD. 2018.

MUNK, M. M. **General Biplane Theory - Report 151**National Advisory Committee for Aeronautics, 1923a.

MUNK, M. M. **General Theory of Thin Wing Sections**National Advisory Committee for Aeronautics, 1923b.

NEIVA, A. C. DE B. et al. **Atlas do potencial eólico brasileiro**. 1ª ed. [s.l.] CEPEL, 2017.

PLUMLEY, C. et al. Comparison of individual pitch and smart rotor control strategies for load reduction. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 524, n. 1, 2014.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO (PNUD). **Acompanhando a agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável: subsídios iniciais do Sistema das Nações Unidas no Brasil sobre a identificação de indicadores nacionais referentes aos objetivos de desenvolvimento sustentável**. Brasília: PNUD, 2015.

RAGHEB, A.; SELIG, M. Multi-Element Airfoil Configurations for Wind Turbines. **29th**

- AIAA Applied Aerodynamics Conference**, n. June, p. 1–13, 2011.
- RHIE, C. M.; CHOW, W. L. Numerical study of the turbulent flow past an airfoil with trailing edge separation. **AIAA Journal**, v. 21, n. 11, p. 1525–1532, 1983.
- ROCHA, R. V. **Simulação de Aerogerador em uma Bancada Experimental**. [s.l.] Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.
- RODRIGUES, L. E. M. J. **Fundamentos da engenharia aeronáutica aplicações ao projeto sae-aerodesign**. 1a. ed. Salto/SP: [s.n.].
- ROSENBERG, A.; SELVARAJ, S.; SHARMA, A. A novel dual-rotor turbine for increased wind energy capture. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 524, n. 1, 2014.
- ROTH-JOHNSON, P.; WIRZ, R. E.; LIN, E. Structural design of spars for 100-m biplane wind turbine blades. **Renewable Energy**, v. 71, p. 133–155, 2014.
- SAYED, M. A.; KANDIL, H. A.; SHALTOT, A. Aerodynamic analysis of different wind-turbine-blade profiles using finite-volume method. **Energy Conversion and Management**, v. 64, p. 541–550, 2012.
- SCHUBEL, P. J.; CROSSLEY, R. J. Wind turbine blade design. **Energies**, v. 5, n. 9, p. 3425–3449, 2012.
- THOMSEN, O. T. Sandwich Materials for Wind Turbine Blades — Present and Future. **Journal of Sandwich Structures & Materials**, v. 11, n. 1, p. 7–26, jan. 2009.
- TU, J.; YEOH, G.-H.; LIU, C. **Computational Fluid Dynamics: a practical approach**. 2nd. ed. Amsterdam and Boston: Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2013.
- UNITED NATIONS. **The Sustainable Development Goals Report 2016**. [s.l.] UN, 2016.
- UNITED NATIONS. **Tier Classification for Global SDG Indicators**, 2017. Disponível em: <[https://unstats.un.org/sdgs/files/Tier Classification of SDG Indicators_20 April 2017_web.pdf](https://unstats.un.org/sdgs/files/Tier%20Classification%20of%20SDG%20Indicators_20%20April%202017_web.pdf)>
- VERSTEEG, H. .; MALALASEKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics**. 2nd. ed. London: [s.n.].

APÊNDICE A

Influência dos ângulos de projeto pré-cone e ângulo de inclinação:

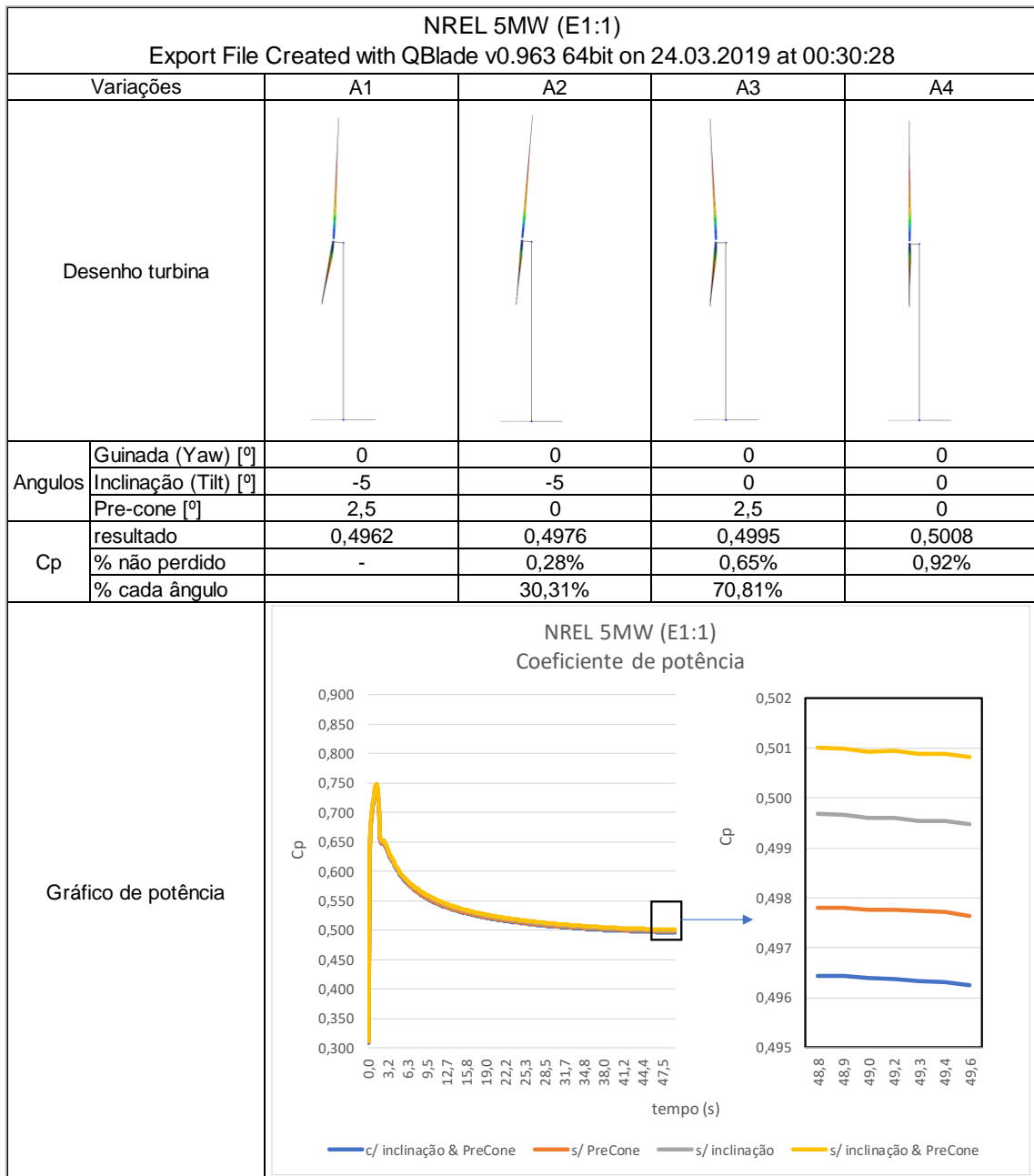
Como resultado, a simulação apresentou eficiência no rotor NREL 5MW com os ângulos de pré-cone e de inclinação em relação ao mesmo sem os ângulos, apresentou redução <1%. Essas simulações foram executadas utilizando os parâmetros conhecidos, conforme a Tabela 16:

Tabela 16: Parâmetros considerados no QBLADE

<i>Parâmetros de entrada</i>	<i>Condição especificada rotor 126m / 6,3m</i>
<i>Velocidade do vento</i>	11,4m/s / 5,7m/s
<i>Rotação nominal do rotor</i>	12,1rpm / 121rpm
<i>TSR</i>	7
<i>Altura do rotor</i>	90m / 9m

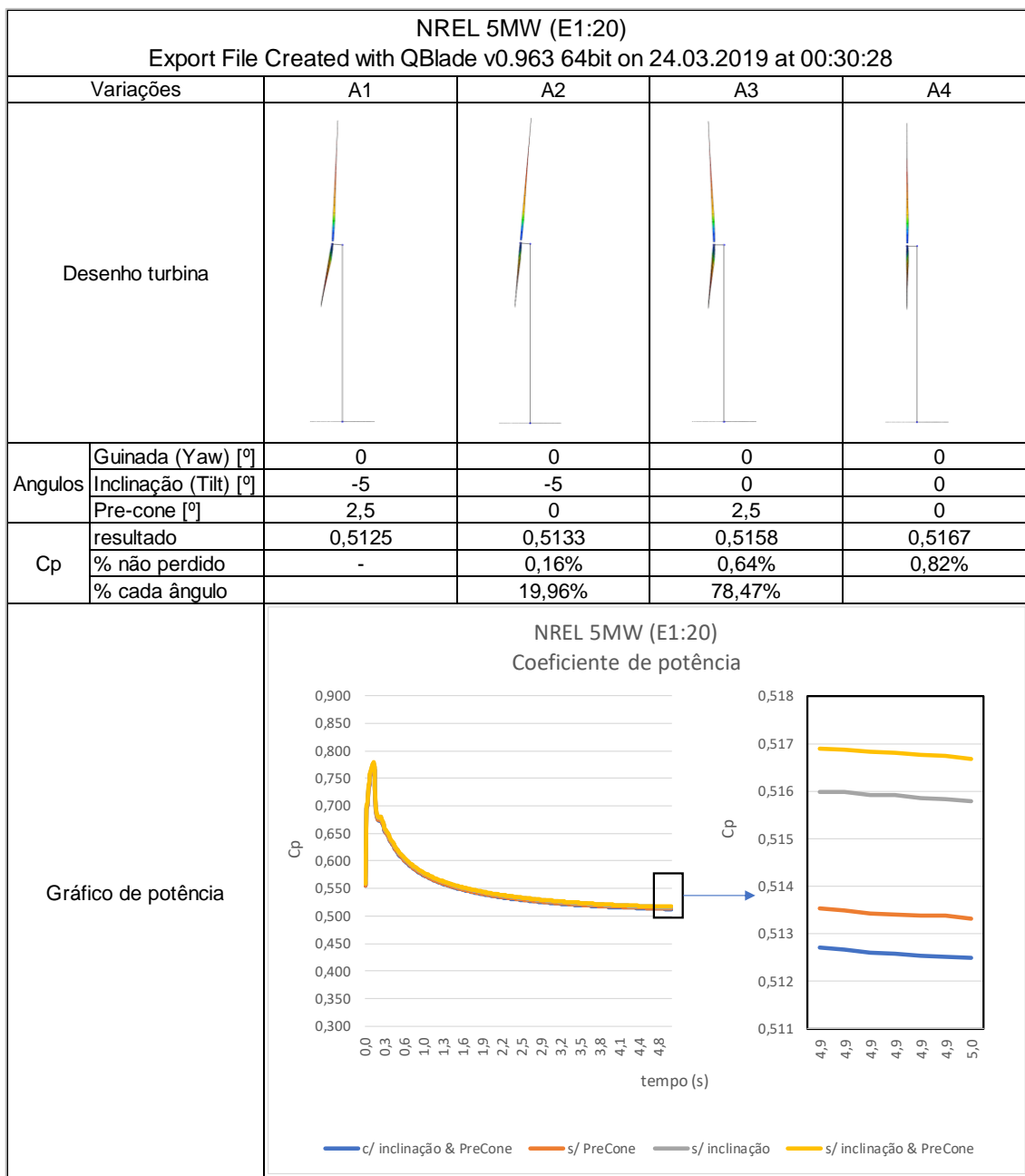
Fonte: Autor

Figura 58: Avaliação de pré-cone e ângulo de inclinação NREL 5MW



Fonte: Autor

Figura 59: Avaliação de pré-cone e ângulo de inclinação turbina E1:20



Fonte: Autor

Dados dos perfis utilizados para construção dos modelos estudados:

Cicular1 Perfil 0,5		Cicular2 Perfil 0,35		DU40_A17 (DU99W405LM)		DU35_A17 (DU99W350LM)		DU30_A17 (DU97W300LM)		DU25_A17 (DU91W2250LM)		DU21_A17 (DU93W210LM)		NACA64_A17 (NACA646180)	
X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	0,9966	0,0047	0,9966	0,0039	0,9966	0,0034	0,9966	0,0031	0,9966	0,0030	1,0000	0,0000
0,9990	0,0314	0,9990	0,0314	0,9896	0,0069	0,9896	0,0060	0,9896	0,0054	0,9896	0,0052	0,9896	0,0052	0,9900	0,0034
0,9961	0,0627	0,9961	0,0627	0,9823	0,0092	0,9823	0,0082	0,9823	0,0074	0,9823	0,0072	0,9823	0,0072	0,9800	0,0061
0,9911	0,0937	0,9911	0,0937	0,9748	0,0115	0,9748	0,0104	0,9748	0,0095	0,9748	0,0093	0,9748	0,0093	0,9700	0,0088
0,9843	0,1243	0,9843	0,1243	0,9671	0,0140	0,9671	0,0128	0,9671	0,0116	0,9671	0,0113	0,9671	0,0114	0,9600	0,0114
0,9755	0,1545	0,9755	0,1545	0,9590	0,0166	0,9590	0,0152	0,9590	0,0137	0,9590	0,0135	0,9590	0,0135	0,9500	0,0139
0,9649	0,1841	0,9649	0,1841	0,9507	0,0193	0,9507	0,0176	0,9507	0,0159	0,9507	0,0156	0,9507	0,0157	0,9400	0,0165
0,9524	0,2129	0,9524	0,2129	0,9422	0,0220	0,9422	0,0201	0,9422	0,0181	0,9422	0,0178	0,9422	0,0180	0,9300	0,0190
0,9382	0,2409	0,9382	0,2409	0,9333	0,0249	0,9333	0,0227	0,9333	0,0204	0,9333	0,0201	0,9333	0,0203	0,9200	0,0216
0,9222	0,2679	0,9222	0,2679	0,9243	0,0278	0,9243	0,0254	0,9243	0,0227	0,9243	0,0224	0,9243	0,0226	0,9100	0,0242
0,9045	0,2939	0,9045	0,2939	0,9149	0,0309	0,9149	0,0282	0,9149	0,0251	0,9149	0,0248	0,9149	0,0250	0,9000	0,0267
0,8853	0,3187	0,8853	0,3187	0,9053	0,0341	0,9053	0,0311	0,9053	0,0275	0,9053	0,0272	0,9053	0,0274	0,8750	0,0332
0,8645	0,3423	0,8645	0,3423	0,8954	0,0374	0,8954	0,0340	0,8954	0,0300	0,8954	0,0297	0,8954	0,0299	0,8500	0,0396
0,8423	0,3645	0,8423	0,3645	0,8853	0,0408	0,8853	0,0371	0,8853	0,0325	0,8853	0,0323	0,8853	0,0325	0,8250	0,0460
0,8187	0,3853	0,8187	0,3853	0,8749	0,0443	0,8749	0,0402	0,8749	0,0352	0,8749	0,0349	0,8749	0,0351	0,8000	0,0523
0,7939	0,4045	0,7939	0,4045	0,8642	0,0480	0,8642	0,0434	0,8642	0,0378	0,8642	0,0376	0,8642	0,0378	0,7750	0,0586
0,7679	0,4222	0,7679	0,4222	0,8533	0,0518	0,8533	0,0468	0,8533	0,0406	0,8533	0,0403	0,8533	0,0405	0,7500	0,0647
0,7409	0,4382	0,7409	0,4382	0,8422	0,0557	0,8422	0,0502	0,8422	0,0434	0,8422	0,0431	0,8422	0,0433	0,7250	0,0706
0,7129	0,4524	0,7129	0,4524	0,8307	0,0597	0,8307	0,0537	0,8307	0,0462	0,8307	0,0459	0,8307	0,0461	0,7000	0,0763
0,6841	0,4649	0,6841	0,4649	0,8190	0,0639	0,8190	0,0573	0,8190	0,0491	0,8190	0,0488	0,8190	0,0490	0,6750	0,0818
0,6545	0,4755	0,6545	0,4755	0,8071	0,0681	0,8071	0,0610	0,8071	0,0521	0,8071	0,0517	0,8071	0,0519	0,6500	0,0870
0,6243	0,4843	0,6243	0,4843	0,7948	0,0725	0,7948	0,0648	0,7948	0,0551	0,7948	0,0547	0,7948	0,0548	0,6250	0,0920
0,5937	0,4911	0,5937	0,4911	0,7823	0,0770	0,7823	0,0686	0,7823	0,0581	0,7823	0,0577	0,7823	0,0578	0,6000	0,0966
0,5627	0,4961	0,5627	0,4961	0,7696	0,0815	0,7696	0,0725	0,7696	0,0612	0,7696	0,0608	0,7696	0,0609	0,5750	0,1009
0,5314	0,4990	0,5314	0,4990	0,7566	0,0862	0,7566	0,0765	0,7566	0,0643	0,7566	0,0639	0,7566	0,0640	0,5500	0,1048
0,5000	0,5000	0,5000	0,5000	0,7433	0,0909	0,7433	0,0806	0,7433	0,0675	0,7433	0,0670	0,7433	0,0671	0,5250	0,1083
0,4686	0,4990	0,4686	0,4990	0,7300	0,0957	0,7300	0,0846	0,7300	0,0706	0,7300	0,0701	0,7300	0,0701	0,5000	0,1114
0,4373	0,4961	0,4373	0,4961	0,7167	0,1005	0,7167	0,0887	0,7167	0,0737	0,7167	0,0732	0,7167	0,0732	0,4750	0,1139
0,4063	0,4911	0,4063	0,4911	0,7033	0,1052	0,7033	0,0927	0,7033	0,0768	0,7033	0,0763	0,7033	0,0762	0,4500	0,1160
0,3757	0,4843	0,3757	0,4843	0,6900	0,1100	0,6900	0,0967	0,6900	0,0798	0,6900	0,0793	0,6900	0,0792	0,4400	0,1167
0,3455	0,4755	0,3455	0,4755	0,6767	0,1147	0,6767	0,1006	0,6767	0,0828	0,6767	0,0823	0,6767	0,0822	0,4300	0,1172
0,3159	0,4649	0,3159	0,4649	0,6633	0,1193	0,6633	0,1045	0,6633	0,0857	0,6633	0,0852	0,6633	0,0851	0,4200	0,1177
0,2871	0,4524	0,2871	0,4524	0,6500	0,1240	0,6500	0,1083	0,6500	0,0886	0,6500	0,0881	0,6500	0,0880	0,4100	0,1180
0,2591	0,4382	0,2591	0,4382	0,6367	0,1285	0,6367	0,1121	0,6367	0,0915	0,6367	0,0909	0,6367	0,0908	0,4000	0,1182
0,2321	0,4222	0,2321	0,4222	0,6233	0,1330	0,6233	0,1159	0,6233	0,0943	0,6233	0,0937	0,6233	0,0936	0,3900	0,1183
0,2061	0,4045	0,2061	0,4045	0,6100	0,1375	0,6100	0,1195	0,6100	0,0970	0,6100	0,0964	0,6100	0,0963	0,3800	0,1182
0,1813	0,3853	0,1813	0,3853	0,5967	0,1419	0,5967	0,1231	0,5967	0,0997	0,5967	0,0991	0,5967	0,0989	0,3700	0,1180
0,1577	0,3645	0,1577	0,3645	0,5833	0,1462	0,5833	0,1267	0,5833	0,1023	0,5833	0,1016	0,5833	0,1014	0,3600	0,1176
0,1355	0,3423	0,1355	0,3423	0,5700	0,1505	0,5700	0,1301	0,5700	0,1049	0,5700	0,1041	0,5700	0,1039	0,3500	0,1172
0,1147	0,3187	0,1147	0,3187	0,5567	0,1546	0,5567	0,1334	0,5567	0,1073	0,5567	0,1065	0,5567	0,1063	0,3400	0,1166
0,0955	0,2939	0,0955	0,2939	0,5433	0,1586	0,5433	0,1366	0,5433	0,1097	0,5433	0,1089	0,5433	0,1085	0,3300	0,1159
0,0778	0,2679	0,0778	0,2679	0,5300	0,1625	0,5300	0,1398	0,5300	0,1121	0,5300	0,1111	0,5300	0,1107	0,3200	0,1152
0,0619	0,2409	0,0619	0,2409	0,5167	0,1662	0,5167	0,1428	0,5167	0,1143	0,5167	0,1133	0,5167	0,1128	0,3100	0,1143
0,0476	0,2129	0,0476	0,2129	0,5033	0,1698	0,5033	0,1456	0,5033	0,1165	0,5033	0,1153	0,5033	0,1147	0,3000	0,1134
0,0351	0,1841	0,0351	0,1841	0,4900	0,1732	0,4900	0,1484	0,4900	0,1185	0,4900	0,1172	0,4900	0,1165	0,2900	0,1123
0,0245	0,1545	0,0245	0,1545	0,4767	0,1765	0,4767	0,1510	0,4767	0,1205	0,4767	0,1190	0,4767	0,1181	0,2800	0,1111
0,0157	0,1243	0,0157	0,1243	0,4633	0,1796	0,4633	0,1534	0,4633	0,1224	0,4633	0,1207	0,4633	0,1196	0,2700	0,1099
0,0089	0,0937	0,0089	0,0937	0,4500	0,1825	0,4500	0,1557	0,4500	0,1242	0,4500	0,1223	0,4500	0,1209	0,2600	0,1085
0,0039	0,0627	0,0039	0,0627	0,4367	0,1852	0,4367	0,1578	0,4367	0,1258	0,4367	0,1237	0,4367	0,1220	0,2500	0,1070
0,0010	0,0314	0,0010	0,0314	0,4233	0,1877	0,4233	0,1598	0,4233	0,1273	0,4233	0,1250	0,4233	0,1229	0,2400	0,1055
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,4100	0,1900	0,4100	0,1616	0,4100	0,1287	0,4100	0,1261	0,4100	0,1237	0,2300	0,1038
0,0010	-0,0314	0,0010	-0,0314	0,3967	0,1921	0,3967	0,1632	0,3967	0,1300	0,3967	0,1270	0,3967	0,1242	0,2200	0,1020
0,0039	-0,0627	0,0039	-0,0627	0,3833	0,1940	0,3833	0,1647	0,3833	0,1311	0,3833	0,1277	0,3833	0,1245	0,2100	0,1001
0,0089	-0,0937	0,0089	-0,0937	0,3700	0,1956	0,3700	0,1659	0,3700	0,1321	0,3700	0,1283	0,3700	0,1246	0,2000	0,0981
0,0157	-0,1243	0,0157	-0,1243	0,3567	0,1971	0,3567	0,1669	0,3567	0,1329	0,3567	0,1286	0,3567	0,1245	0,1900	0,0959
0,0245	-0,1545	0,0245	-0,1545	0,3433	0,1983	0,3433	0,1677	0,3433	0,1335	0,3433	0,1286	0,3433	0,1241	0,1800	0,0937
0,0351	-0,1841	0,0351	-0,1841	0,3300	0,1992	0,3300	0,1683	0,3300	0,1340	0,3300	0,1284	0,3300	0,1235	0,1700	0,0913
0,0476	-0,2129	0,0476	-0,2129	0,3167	0,1999	0,3167	0,1686	0,3167	0,1342	0,3167	0,1278	0,3167	0,1227	0,1600	0,0888
0,0619	-0,2409	0,0619	-0,2409	0,3033	0,2003	0,3033	0,1686	0,3033	0,1342	0,3033	0,1271	0,3033	0,1217	0,1500	0,0861
0,0778	-0,2679	0,0778	-0,2679	0,2900	0,2004	0,2900	0,1685	0,2900	0,1340	0,2900	0,1260	0,2900	0,1205	0,1400	0,0833
0,0955	-0,2939	0,0955	-0,2939	0,2767	0,2002	0,2767	0,1680	0,2767	0,1335	0,2767	0,1247	0,2767	0,1191	0,1300	0,0803
0,1147	-0,3187	0,1147	-0,3187	0,2633	0,1998	0,2633	0,1672	0,2633	0,1328	0,2633	0,1231	0,2633	0,1174	0,1200	0,0772
0,1355	-0,3423	0,1355	-0,3423	0,2500	0,1989	0,2500	0,1662	0,2500	0,1317	0,2500	0,1213	0,2500	0,1156	0,1100	0,0739
0,1577	-0,3645	0,1577	-0,3645	0,2369	0,1978	0,2369	0,1648	0,2369	0,1304	0,2369	0,1193	0,2369	0,1135	0,1000	0,0703
0,1813	-0,3853	0,1813	-0,3853	0,2242	0,1964	0,2242	0,1632	0,2242	0,1287	0,2242	0,1170	0,2242	0,1113	0,0950	0,0685
0,2061	-0,4045	0,2061	-0,4045	0,2118	0,1946	0,2118	0,1613	0,2118	0,1267	0,2118	0,1146	0,2118	0,1090	0,0900	0,0666
0,2321	-0,4222	0,2321	-0,42												

Cicular1 Perfil 0,5		Cicular2 Perfil 0,35		DU40_A17 (DU99W405LM)		DU35_A17 (DU99W350LM)		DU30_A17 (DU97W300LM)		DU25_A17 (DU91W2250LM)		DU21_A17 (DU93W210LM)		NACA64_A17 (NACA646180)	
X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
0,5627	-0,4961	0,5627	-0,4961	0,0908	0,1520	0,0908	0,1216	0,0908	0,0887	0,0908	0,0773	0,0908	0,0735	0,0300	0,0369
0,5937	-0,4911	0,5937	-0,4911	0,0830	0,1469	0,0830	0,1172	0,0830	0,0848	0,0830	0,0737	0,0830	0,0702	0,0250	0,0335
0,6243	-0,4843	0,6243	-0,4843	0,0755	0,1416	0,0755	0,1126	0,0755	0,0808	0,0755	0,0701	0,0755	0,0669	0,0200	0,0297
0,6545	-0,4755	0,6545	-0,4755	0,0684	0,1362	0,0684	0,1079	0,0684	0,0768	0,0684	0,0665	0,0684	0,0635	0,0175	0,0277
0,6841	-0,4649	0,6841	-0,4649	0,0616	0,1305	0,0616	0,1031	0,0616	0,0727	0,0616	0,0629	0,0616	0,0602	0,0150	0,0255
0,7129	-0,4524	0,7129	-0,4524	0,0552	0,1247	0,0552	0,0982	0,0552	0,0687	0,0552	0,0593	0,0552	0,0568	0,0125	0,0232
0,7409	-0,4382	0,7409	-0,4382	0,0492	0,1187	0,0492	0,0932	0,0492	0,0645	0,0492	0,0557	0,0492	0,0535	0,0100	0,0207
0,7679	-0,4222	0,7679	-0,4222	0,0435	0,1125	0,0435	0,0881	0,0435	0,0604	0,0435	0,0521	0,0435	0,0501	0,0090	0,0196
0,7939	-0,4045	0,7939	-0,4045	0,0381	0,1062	0,0381	0,0829	0,0381	0,0563	0,0381	0,0486	0,0381	0,0468	0,0080	0,0185
0,8187	-0,3853	0,8187	-0,3853	0,0331	0,0998	0,0331	0,0776	0,0331	0,0522	0,0331	0,0450	0,0331	0,0436	0,0070	0,0172
0,8423	-0,3645	0,8423	-0,3645	0,0285	0,0932	0,0285	0,0723	0,0285	0,0481	0,0285	0,0415	0,0285	0,0403	0,0060	0,0160
0,8645	-0,3423	0,8645	-0,3423	0,0242	0,0865	0,0242	0,0669	0,0242	0,0440	0,0242	0,0380	0,0242	0,0372	0,0050	0,0146
0,8853	-0,3187	0,8853	-0,3187	0,0202	0,0797	0,0202	0,0615	0,0202	0,0400	0,0202	0,0346	0,0202	0,0340	0,0040	0,0130
0,9045	-0,2939	0,9045	-0,2939	0,0166	0,0728	0,0166	0,0560	0,0166	0,0360	0,0166	0,0313	0,0166	0,0309	0,0030	0,0113
0,9222	-0,2679	0,9222	-0,2679	0,0134	0,0657	0,0134	0,0505	0,0134	0,0321	0,0134	0,0280	0,0134	0,0279	0,0020	0,0092
0,9382	-0,2409	0,9382	-0,2409	0,0105	0,0586	0,0105	0,0450	0,0105	0,0283	0,0105	0,0248	0,0105	0,0248	0,0018	0,0086
0,9524	-0,2129	0,9524	-0,2129	0,0079	0,0515	0,0079	0,0395	0,0079	0,0245	0,0079	0,0216	0,0079	0,0217	0,0015	0,0080
0,9649	-0,1841	0,9649	-0,1841	0,0057	0,0441	0,0057	0,0338	0,0057	0,0208	0,0057	0,0185	0,0057	0,0186	0,0013	0,0073
0,9755	-0,1545	0,9755	-0,1545	0,0039	0,0358	0,0039	0,0276	0,0039	0,0173	0,0039	0,0156	0,0039	0,0156	0,0010	0,0066
0,9843	-0,1243	0,9843	-0,1243	0,0024	0,0259	0,0024	0,0207	0,0024	0,0137	0,0024	0,0126	0,0024	0,0125	0,0008	0,0057
0,9911	-0,0937	0,9911	-0,0937	0,0012	0,0167	0,0012	0,0140	0,0012	0,0101	0,0012	0,0094	0,0012	0,0092	0,0005	0,0047
0,9961	-0,0627	0,9961	-0,0627	0,0004	0,0094	0,0004	0,0081	0,0004	0,0061	0,0004	0,0057	0,0004	0,0054	0,0004	0,0042
0,9990	-0,0314	0,9990	-0,0314	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0003	0,0036
1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	0,0004	-0,0097	0,0004	-0,0082	0,0004	-0,0060	0,0004	-0,0057	0,0004	-0,0044	0,0002	0,0030
				0,0012	-0,0174	0,0012	-0,0143	0,0012	-0,0102	0,0012	-0,0097	0,0012	-0,0073	0,0001	0,0021
				0,0024	-0,0262	0,0024	-0,0209	0,0024	-0,0141	0,0024	-0,0136	0,0024	-0,0100	0,0000	0,0000
				0,0039	-0,0349	0,0039	-0,0275	0,0039	-0,0181	0,0039	-0,0174	0,0039	-0,0127	0,0001	-0,0021
				0,0057	-0,0428	0,0057	-0,0336	0,0057	-0,0222	0,0057	-0,0210	0,0057	-0,0153	0,0002	-0,0030
				0,0079	-0,0501	0,0079	-0,0396	0,0079	-0,0263	0,0079	-0,0247	0,0079	-0,0178	0,0003	-0,0036
				0,0105	-0,0572	0,0105	-0,0455	0,0105	-0,0305	0,0105	-0,0284	0,0105	-0,0204	0,0004	-0,0042
				0,0134	-0,0643	0,0134	-0,0513	0,0134	-0,0348	0,0134	-0,0321	0,0134	-0,0231	0,0005	-0,0047
				0,0166	-0,0713	0,0166	-0,0571	0,0166	-0,0393	0,0166	-0,0358	0,0166	-0,0257	0,0008	-0,0057
				0,0202	-0,0781	0,0202	-0,0628	0,0202	-0,0438	0,0202	-0,0396	0,0202	-0,0284	0,0010	-0,0066
				0,0242	-0,0848	0,0242	-0,0685	0,0242	-0,0485	0,0242	-0,0434	0,0242	-0,0311	0,0013	-0,0073
				0,0285	-0,0914	0,0285	-0,0741	0,0285	-0,0533	0,0285	-0,0473	0,0285	-0,0338	0,0015	-0,0080
				0,0331	-0,0979	0,0331	-0,0797	0,0331	-0,0581	0,0331	-0,0511	0,0331	-0,0365	0,0018	-0,0087
				0,0381	-0,1043	0,0381	-0,0853	0,0381	-0,0631	0,0381	-0,0549	0,0381	-0,0392	0,0020	-0,0092
				0,0435	-0,1106	0,0435	-0,0909	0,0435	-0,0681	0,0435	-0,0587	0,0435	-0,0419	0,0030	-0,0112
				0,0492	-0,1168	0,0492	-0,0964	0,0492	-0,0732	0,0492	-0,0623	0,0492	-0,0445	0,0040	-0,0127
				0,0552	-0,1229	0,0552	-0,1018	0,0552	-0,0783	0,0552	-0,0660	0,0552	-0,0471	0,0050	-0,0140
				0,0616	-0,1289	0,0616	-0,1072	0,0616	-0,0834	0,0616	-0,0696	0,0616	-0,0496	0,0060	-0,0152
				0,0684	-0,1347	0,0684	-0,1125	0,0684	-0,0886	0,0684	-0,0732	0,0684	-0,0521	0,0070	-0,0162
				0,0755	-0,1403	0,0755	-0,1177	0,0755	-0,0938	0,0755	-0,0767	0,0755	-0,0546	0,0080	-0,0171
				0,0830	-0,1458	0,0830	-0,1228	0,0830	-0,0990	0,0830	-0,0801	0,0830	-0,0571	0,0090	-0,0180
				0,0908	-0,1511	0,0908	-0,1278	0,0908	-0,1041	0,0908	-0,0836	0,0908	-0,0595	0,0100	-0,0188
				0,0989	-0,1562	0,0989	-0,1326	0,0989	-0,1092	0,0989	-0,0869	0,0989	-0,0619	0,0125	-0,0205
				0,1075	-0,1611	0,1075	-0,1373	0,1075	-0,1143	0,1075	-0,0902	0,1075	-0,0642	0,0150	-0,0221
				0,1163	-0,1658	0,1163	-0,1419	0,1163	-0,1192	0,1163	-0,0934	0,1163	-0,0665	0,0175	-0,0235
				0,1255	-0,1703	0,1255	-0,1462	0,1255	-0,1241	0,1255	-0,0965	0,1255	-0,0687	0,0200	-0,0248
				0,1351	-0,1746	0,1351	-0,1504	0,1351	-0,1289	0,1351	-0,0995	0,1351	-0,0708	0,0250	-0,0271
				0,1450	-0,1786	0,1450	-0,1544	0,1450	-0,1335	0,1450	-0,1024	0,1450	-0,0728	0,0300	-0,0291
				0,1553	-0,1824	0,1553	-0,1582	0,1553	-0,1380	0,1553	-0,1051	0,1553	-0,0748	0,0350	-0,0309
				0,1659	-0,1860	0,1659	-0,1618	0,1659	-0,1423	0,1659	-0,1077	0,1659	-0,0766	0,0400	-0,0326
				0,1768	-0,1893	0,1768	-0,1652	0,1768	-0,1463	0,1768	-0,1101	0,1768	-0,0783	0,0450	-0,0341
				0,1882	-0,1923	0,1882	-0,1683	0,1882	-0,1502	0,1882	-0,1124	0,1882	-0,0799	0,0500	-0,0355
				0,1998	-0,1950	0,1998	-0,1711	0,1998	-0,1537	0,1998	-0,1144	0,1998	-0,0813	0,0550	-0,0368
				0,2118	-0,1974	0,2118	-0,1737	0,2118	-0,1569	0,2118	-0,1163	0,2118	-0,0826	0,0600	-0,0380
				0,2242	-0,1995	0,2242	-0,1759	0,2242	-0,1598	0,2242	-0,1179	0,2242	-0,0838	0,0650	-0,0392
				0,2369	-0,2013	0,2369	-0,1778	0,2369	-0,1621	0,2369	-0,1193	0,2369	-0,0848	0,0700	-0,0403
				0,2500	-0,2027	0,2500	-0,1793	0,2500	-0,1640	0,2500	-0,1205	0,2500	-0,0856	0,0750	-0,0414
				0,2633	-0,2037	0,2633	-0,1804	0,2633	-0,1653	0,2633	-0,1213	0,2633	-0,0862	0,0800	-0,0424
				0,2767	-0,2044	0,2767	-0,1811	0,2767	-0,1659	0,2767	-0,1219	0,2767	-0,0867	0,0850	-0,0434
				0,2900	-0,2046	0,2900	-0,1814	0,2900	-0,1660	0,2900	-0,1223	0,2900	-0,0869	0,0900	-0,0443
				0,3033	-0,2045	0,3033	-0,1813	0,3033	-0,1655	0,3033	-0,1223	0,3033	-0,0869	0,0950	-0,0452
				0,3167	-0,2040	0,3167	-0,1808	0,3167	-0,1644	0,3167	-0,1221	0,3167	-0,0868	0,1000	-0,0460
				0,3300	-0,2031	0,3300	-0,1800	0,3300	-0,1629	0,3300	-0,1216	0,3300	-0,0864	0,1100	-0,0476
				0,3433	-0,2019	0,3433	-0,1788	0,3433	-0,1609	0,3433	-0,1208	0,3433	-0,0859	0,1200	-0,0491
				0,3567	-0,2004	0,3567	-0,1772	0,3567	-0,1586	0,3567	-0,1198	0,3567	-0,0852	0,1300	-0,0504
				0,3700	-0,1986	0,3700	-0,1753	0,3700	-0,1558	0,3700	-0,1186	0,3700	-0,0843	0,1400	-0,0517
				0,3833	-0,1964	0,3833	-0,1731	0,3833	-0,1527	0,3833	-0,1171	0,3833	-0,0832	0,1500	-0,0529
				0,3967	-0,1938	0,3967	-0,1707	0,3967	-0,1493	0,3967	-0,1154	0,3967	-0,0820	0,1600	-0,0540
				0,4100	-0,1910	0,4100	-0,1679	0,4100	-0,1457	0,4100	-0,1134	0,4100	-0,0806	0,1700	-0,0550
				0,4233	-0,1878	0,4233	-0,1648	0,4233	-0,1418	0,4233	-0,1112	0,4233	-0,0791	0,1800	-0,0559
				0,4367	-0,1844	0,4367	-0,1614	0,4367	-0,1377	0,4367	-0,1088	0,4367	-0,0774	0,1900	-0,0568
				0,4500	-0,18										

Cicular1 Perfil 0,5		Cicular2 Perfil 0,35		DU40_A17 (DU99W405LM)		DU35_A17 (DU99W350LM)		DU30_A17 (DU97W300LM)		DU25_A17 (DU91W2250LM)		DU21_A17 (DU93W210LM)		NACA64_A17 (NACA646180)	
X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
				0,5833	-0,1269	0,5833	-0,1087	0,5833	-0,0857	0,5833	-0,0686	0,5833	-0,0489	0,3000	-0,0623
				0,5967	-0,1205	0,5967	-0,1030	0,5967	-0,0807	0,5967	-0,0641	0,5967	-0,0457	0,3100	-0,0625
				0,6100	-0,1141	0,6100	-0,0972	0,6100	-0,0757	0,6100	-0,0595	0,6100	-0,0424	0,3200	-0,0626
				0,6233	-0,1076	0,6233	-0,0914	0,6233	-0,0707	0,6233	-0,0548	0,6233	-0,0391	0,3300	-0,0626
				0,6367	-0,1010	0,6367	-0,0856	0,6367	-0,0657	0,6367	-0,0500	0,6367	-0,0358	0,3400	-0,0626
				0,6500	-0,0945	0,6500	-0,0797	0,6500	-0,0608	0,6500	-0,0453	0,6500	-0,0324	0,3500	-0,0625
				0,6633	-0,0881	0,6633	-0,0739	0,6633	-0,0559	0,6633	-0,0406	0,6633	-0,0291	0,3600	-0,0623
				0,6767	-0,0816	0,6767	-0,0681	0,6767	-0,0511	0,6767	-0,0359	0,6767	-0,0257	0,3700	-0,0620
				0,6900	-0,0753	0,6900	-0,0624	0,6900	-0,0463	0,6900	-0,0313	0,6900	-0,0225	0,3800	-0,0617
				0,7033	-0,0690	0,7033	-0,0567	0,7033	-0,0416	0,7033	-0,0268	0,7033	-0,0193	0,3900	-0,0613
				0,7167	-0,0629	0,7167	-0,0512	0,7167	-0,0370	0,7167	-0,0224	0,7167	-0,0162	0,4000	-0,0608
				0,7300	-0,0569	0,7300	-0,0458	0,7300	-0,0326	0,7300	-0,0182	0,7300	-0,0132	0,4100	-0,0601
				0,7433	-0,0510	0,7433	-0,0405	0,7433	-0,0282	0,7433	-0,0142	0,7433	-0,0104	0,4200	-0,0594
				0,7566	-0,0454	0,7566	-0,0354	0,7566	-0,0240	0,7566	-0,0104	0,7566	-0,0077	0,4300	-0,0585
				0,7696	-0,0401	0,7696	-0,0306	0,7696	-0,0201	0,7696	-0,0069	0,7696	-0,0053	0,4400	-0,0576
				0,7823	-0,0352	0,7823	-0,0262	0,7823	-0,0165	0,7823	-0,0038	0,7823	-0,0031	0,4500	-0,0566
				0,7948	-0,0305	0,7948	-0,0220	0,7948	-0,0131	0,7948	-0,0010	0,7948	-0,0011	0,4750	-0,0539
				0,8071	-0,0262	0,8071	-0,0181	0,8071	-0,0100	0,8071	0,0014	0,8071	0,0006	0,5000	-0,0509
				0,8190	-0,0223	0,8190	-0,0146	0,8190	-0,0072	0,8190	0,0035	0,8190	0,0021	0,5250	-0,0475
				0,8307	-0,0187	0,8307	-0,0113	0,8307	-0,0046	0,8307	0,0053	0,8307	0,0033	0,5500	-0,0440
				0,8422	-0,0154	0,8422	-0,0085	0,8422	-0,0024	0,8422	0,0067	0,8422	0,0044	0,5750	-0,0403
				0,8533	-0,0125	0,8533	-0,0059	0,8533	-0,0004	0,8533	0,0079	0,8533	0,0052	0,6000	-0,0365
				0,8642	-0,0099	0,8642	-0,0036	0,8642	0,0013	0,8642	0,0088	0,8642	0,0058	0,6250	-0,0326
				0,8749	-0,0076	0,8749	-0,0017	0,8749	0,0028	0,8749	0,0094	0,8749	0,0062	0,6500	-0,0286
				0,8853	-0,0056	0,8853	0,0000	0,8853	0,0040	0,8853	0,0097	0,8853	0,0064	0,6750	-0,0246
				0,8954	-0,0039	0,8954	0,0013	0,8954	0,0049	0,8954	0,0099	0,8954	0,0065	0,7000	-0,0207
				0,9053	-0,0025	0,9053	0,0024	0,9053	0,0056	0,9053	0,0097	0,9053	0,0064	0,7250	-0,0168
				0,9149	-0,0013	0,9149	0,0032	0,9149	0,0060	0,9149	0,0094	0,9149	0,0061	0,7500	-0,0131
				0,9243	-0,0004	0,9243	0,0038	0,9243	0,0062	0,9243	0,0088	0,9243	0,0057	0,7750	-0,0095
				0,9333	0,0003	0,9333	0,0041	0,9333	0,0062	0,9333	0,0080	0,9333	0,0052	0,8000	-0,0061
				0,9422	0,0007	0,9422	0,0041	0,9422	0,0060	0,9422	0,0071	0,9422	0,0046	0,8250	-0,0031
				0,9507	0,0009	0,9507	0,0039	0,9507	0,0056	0,9507	0,0061	0,9507	0,0039	0,8500	-0,0004
				0,9590	0,0008	0,9590	0,0034	0,9590	0,0049	0,9590	0,0049	0,9590	0,0032	0,8750	0,0019
				0,9671	0,0005	0,9671	0,0027	0,9671	0,0040	0,9671	0,0037	0,9671	0,0023	0,9000	0,0035
				0,9748	-0,0001	0,9748	0,0018	0,9748	0,0029	0,9748	0,0024	0,9748	0,0014	0,9100	0,0040
				0,9823	-0,0008	0,9823	0,0006	0,9823	0,0016	0,9823	0,0011	0,9823	0,0005	0,9200	0,0044
				0,9896	-0,0018	0,9896	-0,0007	0,9896	0,0001	0,9896	-0,0002	0,9896	-0,0004	0,9300	0,0046
				0,9966	-0,0030	0,9966	-0,0021	0,9966	-0,0016	0,9966	-0,0015	0,9966	-0,0014	0,9400	0,0047
														0,9500	0,0046
														0,9600	0,0043
														0,9700	0,0038
														0,9800	0,0030
														0,9900	0,0019
														1,0000	0,0000