

**Universidade Feevale
Mestrado Profissional em Tecnologia de Materiais
e Processos Industriais**

MAXIMILIAN DA ROSA BRETSCHEIDER

**PROJETO E SIMULAÇÃO DE PÁS PARA
AEROGERADOR HORIZONTAL DE PEQUENO PORTE**

**Novo Hamburgo
2018**

**Universidade Feevale
Mestrado Profissional em Tecnologia de Materiais
e Processos Industriais**

MAXIMILIAN DA ROSA BRETSCHNEIDER

**PROJETO E SIMULAÇÃO DE PÁS PARA
AEROGERADOR HORIZONTAL DE PEQUENO PORTE**

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Tecnologia de Materiais e Processos Industriais como requisito parcial para a obtenção do grau do título de Mestre em Tecnologia de Materiais e Processos Industriais.

Orientador: Prof. Dr. Moisés de Mattos Dias

Coorientador: Prof. Dr. Eduardo Luis Schneider

**Novo Hamburgo
2018**

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)

Bretschneider, Maximilian Da Rosa.

Projeto e simulação de pás para aerogerador horizontal de pequeno porte / Maximilian Da Rosa Bretschneider. – 2018.

92 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação (Mestrado Profissional em Tecnologia de Materiais e Processos Industriais) – Universidade Feevale, Novo Hamburgo-RS, 2018.

Inclui bibliografia.

“Orientador: Prof. Dr. Moisés de Mattos Dias; Coorientador: Prof. Dr. Eduardo Luis Schneider”.

1. Aerogerador. 2. Pás. 3. DFC. 4. Energia eólica. 5. Simulação numérica. I. Título.

CDU 621.548

Bibliotecária responsável: Amanda Fernandes Marques – CRB 10/2498

**Universidade Feevale
Mestrado Profissional em Tecnologia de Materiais
e Processos Industriais**

MAXIMILIAN DA ROSA BRETSCHEIDER

**PROJETO E SIMULAÇÃO DE PÁS PARA
AEROGERADOR HORIZONTAL DE PEQUENO PORTE**

Dissertação de mestrado aprovada pela banca examinadora em 31 de Agosto de 2017, conferindo ao autor o título de Mestre em Tecnologia de Materiais e Processos Industriais.

Componentes da Banca Examinadora

Prof. Dr. Moisés de Mattos Dias
Universidade Feevale

Prof. Dra. Angela Beatrice Dewes Moura
Universidade Feevale

Prof. Dr. Halston José Mozetic
Centro Universitário UniRitter

Prof. Dr. Lirio Schaeffer
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

“Se eu vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes.”

- Sir Isaac Newton.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a meus pais por terem investido boa parte de suas vidas na minha educação e pelo exemplo de perseverança ante as adversidades, à minha companheira por me apoiar e incentivar e acreditar em mim em momentos que eu mesmo tinha dificuldade em fazê-lo. Aos irmãos, perto e longe, que acompanharam e torceram e proporcionaram os momentos de renovação. Finalmente, aos colegas do Mestrado Profissional em Materiais e Processos Industriais pelo companheirismo e aos professores e orientadores pelos desafios impostos na construção do conhecimento. Direciono meus sinceros agradecimentos também à Secretaria do Desenvolvimento Econômico, Ciência e Tecnologia do Estado do Rio Grande do Sul pelos esforços para viabilizar o projeto de pesquisa e desenvolvimento do sistema híbrido para geração de energia a partir de fontes renováveis (solar, eólica e biogás) e à Universidade Feevale pela oportunidade de fazer parte deste grupo de pesquisa.

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo o projeto e simulação de pás para um aerogerador horizontal de pequeno porte, tendo como referência um gerador comercial adquirido pela universidade para compor um sistema de geração híbrido off-grid e suas exigências. Inicialmente foram contextualizados o cenário energético nacional e a capacidade brasileira de produção de energia eólica. Através de uma análise documental foram apresentados os conceitos de máquinas geradoras baseadas em energia eólica, suas partes e materiais de construção de acordo com as normativas vigentes e a bibliografia e por fim as equações para construção e equacionamento de cada uma das características da pá (ângulo de passo, comprimento de corda, posicionamento de aerofólios), referente a sua capacidade mecânica e suas propriedades aerodinâmicas, utilizando softwares do tipo CAD e tendo como alvo as diretrizes estabelecidas pelo projeto, serão projetadas pás de aerogeradores para aplicação semelhante, respeitando a capacidade do gerador e características climáticas locais. Para validar as peças projetadas, foi utilizado o software de simulação numérica computacional ANSYS Workbench 15 e serão realizados experimentos referentes ao desempenho dos modelos, a fim de atender as normas internacionais estabelecidas para o projeto destas máquinas.

Palavras-chave: aerogerador, pás, DFC, energia eólica, simulação numérica

ABSTRACT

This work contains the project and simulation of small wind turbine blades based on a commercially available turbine that was acquired by Feevale University as part of a hybrid off-grid system and its parts. It starts by contextualizing the current Brazilian energy situation and its wind energy production capabilities. Through bibliographical and documental analysis, the generator concepts, its parts and materials are presented, together with the normatives and governing equations for construction of each of its blade characteristics concerning its mechanical and aerodynamical capabilities. By using CAD software and aiming to satisfy the Project needs blades will be designed for a similar application respecting the generator capacity and overall characteristics as with the local wind resources. To validate the designed blades the CFD software package included in Ansys Workbench 15 will be used where different experiments will be run on both models concerning the international norms and regulations for such machines.

Keywords: Wind Turbine, Blades, CFD, wind energy, numerical simulation

LISTA DE SIGLAS E ABREVIações

A - área (m²)

ABEEÓLICA - Associação brasileira de energia eólica

c - comprimento de corda de um aerofólio

CAD – Computer Aided Drawing (Desenho Auxiliado por Computador)

Cl - coeficiente de sustentação

Cl_D - coeficiente de sustentação estipulado

Cl/Cd - resultante aerodinâmica

Cp - coeficiente de potência

DFC - Dinâmica de fluidos computacional

DOE - Department of Energy

E - Potencial energético (J)

GWEC - Conselho global de energia eólica

IEC - International electrotechnic commission

L - diâmetro do fluido (m)

m - massa de ar (kg)

m - vazão mássica (kg/s)

NASA - National Aeronautics and Space Administration

NREL - National Renewable Energy Laboratory

r - raio local do rotor do aerogerador

R - raio do rotor do aerogerador

Re - coeficiente de Reynolds

S - área do rotor do aerogerador (m²)

v - velocidade (m/s)

v₁ - velocidade a montante da pá

v₂ - velocidade instantânea na superfície do rotor

v₃ - velocidade a justante da pá

WWEA - World wind energy association

α - ângulo de ataque

α_D - ângulo de ataque estipulado

β - ângulo de passo

λ - coeficiente de velocidade da ponta da pá

ρ - densidade do ar (kg/m³)

μ - viscosidade (de um fluido)

ω - velocidade angular

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO	16
1.2. OBJETIVO GERAL	19
1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1. INTRODUÇÃO	21
2.2. AEROGERADORES HORIZONTAIS DE PEQUENO PORTE	22
2.3. NÚMERO DE PÁS NO AEROGERADOR COMERCIAL.....	25
2.4. CONSTRUÇÃO DOS MODELOS COMPUTACIONAIS.....	26
2.5. EQUACIONAMENTO DE AEROGERADORES.....	28
2.5.1. Potencial Energético.....	28
2.5.2. Equacionamento da Geometria das Pás.....	31
3 PARTE EXPERIMENTAL	44
3.1. ESPECIFICAÇÕES DO GERADOR DE REFERÊNCIA E NECESSIDADES DO PROJETO	44
3.2. DEFINIÇÃO DAS GEOMETRIAS DE ESTUDO	46
3.2.1. Pá do aerogerador de referência.....	45
3.2.2. Pá do aerogerador proposto.....	48
3.3. DOMÍNIO FLUIDODINÂMICO	55
3.4. METODOLOGIA.....	58
3.4.1. Processo de solução de problemas de DFC.....	57
3.4.2. Construção do domínio	59
3.4.3. Malha para análise da pá de referência	61
3.4.4. Malha para análise da pá proposta.....	67
3.5. PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO	72
4 RESULTADOS	74
4.1. DIFERENÇA ENTRE PERFIS AERODINÂMICOS	74
4.2. CONTORNOS DE VELOCIDADE E PRESSÃO	78
4.2.1. Aerofólio de referência na porção base da pá ($r=25\%$)	77

4.2.2. Aerofólio base (r=40%).....	80
4.2.3. Aerofólio primário (r=85%).....	82
4.2.4. Aerofólio da ponta da pá (r=95%).....	85
4.2.5. Distribuição dos contornos de pressão ao longo da pá.....	87
4.3. FORÇAS DE SUSTENTAÇÃO	90
5 CONCLUSÕES	92
REFERÊNCIAS.....	95

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama apresentando os dois tipos de aerogeradores comercialmente disponíveis.	16
Figura 2: Mapa do potencial eólico brasileiro.	18
Figura 3: Aerogerador horizontal de pequeno porte.	23
Figura 4: Modelo ideal de turbina eólica.	29
Figura 5: Distribuição de CP em função de $V3/V1$	32
Figura 6: Forças atuantes no aerofólio (MCCOSKER, 2012).	33
Figura 7: Coeficiente de potência para pás otimizadas para diferentes valores de X. ...	38
Figura 8: Descrição das sessões da pá de um aerogerador.	39
Figura 9: Aerogerador FD3.8-2.5kW	44
Figura 10: Gráfico de potência do gerador de referência.	45
Figura 11: Pás do Aerogerador de Referência (FD3.8-2.5kW).	46
Figura 12: FARO Scan Arm Quantum.	47
Figura 13: Perspectiva isométrica da geometria tridimensional do aerogerador de referência.	47
Figura 14: Detalhe da malha gerada automaticamente na porção de fixação da pá do aerogerador de referência.	48
Figura 15: Vistas da imagem adquirida através do scanner 3D.	48
Figura 16: Conjunto de aerofólios NREL S833, S834 e S835.	51
Figura 17: Posicionamento espacial dos aerofólios da pá do gerador proposto.	53
Figura 18: Vista isométrica da pá.	54
Figura 19: Vistas superior, lateral esquerda, lateral direita e inferior.	54
Figura 20: Domínio para análise fluidodinâmica computacional das pás.	57
Figura 21: Diagrama do processo de DFC.	60
Figura 22: Dimensões do domínio para os experimentos de DFC.	61
Figura 23: Vista isométrica do domínio para os experimentos de DFC.	62
Figura 24: Vistas da pá de referência reconstruída no software Ansys SpaceClaim 2016.	63
Figura 25: Perspectiva isométrica do modelo tridimensional reconstruído.	64
Figura 26: Detalhe (zoom) da base da pá do aerogerador mostrando a malha simplificada e organizada.	64
Figura 27: Geometria de referência na interface do Design Modeler.	65

Figura 28: Malha tridimensional do domínio gerada pelo Ansys Meshing.....	66
Figura 29: Detalhe da malha tridimensional na superfície da base do aerofólio.	66
Figura 30: Interface do Fluent e malha tridimensional compreendendo a pá de referência e domínio.....	67
Figura 31: Detalhe (zoom) da base da pá do aerogerador proposto.....	68
Figura 32: Malha tridimensional da pá proposta dentro da interface Design Modeler.	69
Figura 33: Malha tridimensional do domínio fluidodinâmico e pá do aerogerador proposto.	70
Figura 34: Detalhe do tamanho incremental dos elementos na base da pá.....	70
Figura 35: Interface do Fluent e malha tridimensional compreendendo a pá proposta e domínio.....	71
Figura 36: Comparação entre as duas malhas, a esquerda aerogerador de referência, a direita, aerogerador proposto.	72
Figura 37: Contorno de velocidade no aerofólio de referência, $r=25\%$	79
Figura 38: Contorno de velocidade no aerofólio proposto, $r=25\%$	79
Figura 39: Contornos de pressão no aerofólio proposto, $r=25\%$	80
Figura 40: Contornos de pressão no aerofólio proposto, $r=25\%$	80
Figura 41: Contornos de velocidade no aerofólio de referência, $r=40\%$	81
Figura 42: Contornos de velocidade do aerofólio proposto, $r=40\%$	82
Figura 43: Contornos de pressão do aerofólio de referência, $r=40\%$	83
Figura 44: Contornos de pressão do aerofólio proposto, $r=40\%$	83
Figura 45: Contornos de velocidade do aerofólio de referência, $r=85\%$	84
Figura 46: Contornos de velocidade do aerofólio proposto, $r=85\%$	84
Figura 47: Contornos de pressão do aerofólio de referência, $r=85\%$	85
Figura 48: Contornos de pressão do aerofólio proposto, $r=85\%$	85
Figura 49: Contornos e linhas de velocidade do aerofólio de referência, $r=95\%$	86
Figura 50: Contornos de velocidade do aerofólio proposto, $r=95\%$	87
Figura 51: Contornos de pressão do aerofólio de referência, $r=95\%$	88
Figura 52: Contornos de pressão do aerofólio proposto, $r=95\%$	88
Figura 53: Distribuição dos contornos de pressão na pá de referência.....	89
Figura 54: Distribuição dos contornos de pressão na pá proposta.....	89
Figura 55: Gráfico de diferença de rendimento entre os aerogeradores analisados.	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Família de Aerofólios NREL.	41
Tabela 2: Comparação entre aerofólios na posição $r=25\%$, aerogerador de referência e aerogerador proposto.....	75
Tabela 3: Comparação entre aerofólios $r=40\%$, aerogerador de referência e aerogerador proposto.....	75
Tabela 4: Comparação entre aerofólios na posição $r=85\%$, aerogerador de referência (a) e aerogerador proposto (b).	76
Tabela 5: Comparação entre aerofólios na posição $r=95\%$, aerogerador de referência (a) e aerogerador proposto (b).	77

LISTA DE EQUAÇÕES

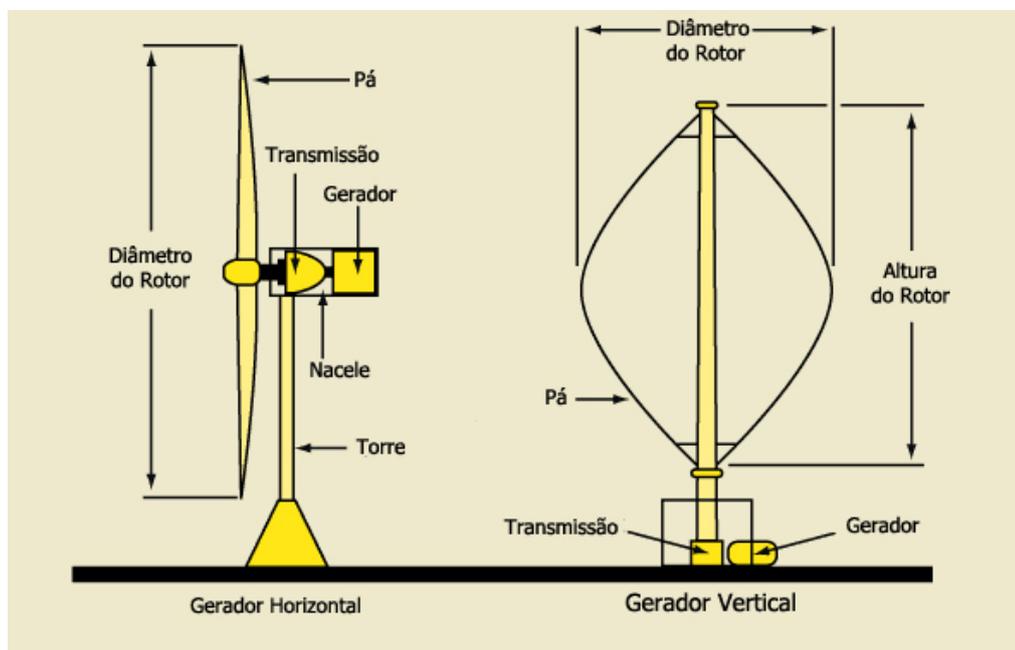
Equação 1: potencial energético.	29
Equação 2: Velocidade instantânea na superfície do rotor	30
Equação 3: Equação da vazão mássica	30
Equação 4: Equação da energia cinética	31
Equação 5: Integração do coeficiente de potência.....	31
Equação 6: Potencial energético do ar.....	31
Equação 7: Coeficiente de Reynolds	35
Equação 8: Ângulo de passo.....	36
Equação 9: Fator de velocidade da ponta da pá.....	36
Equação 10: Comprimento de corda.....	38
Equação 11: Coeficiente de potência do gerador de referência.....	49
Equação 12: Velocidade do vento estimada para o aerogerador proposto.....	51

1 INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

Aerogeradores são dispositivos mecânicos que convertem a energia cinética do vento em energia elétrica, através de um sistema de hélices que pode se apresentar de maneira horizontal ou vertical. O desenho aerodinâmico destas hélices, ou pás, é responsável pela eficiência na interação com a massa de ar e captação de energia. Quando o vento passa pelo rotor, a massa de ar gera empuxo e torque que são convertidos em energia. Estes dispositivos se apresentam comercialmente em dois formatos, turbinas eólicas horizontais e verticais (Figura 1), estas direções são determinadas pela posição do rotor em relação a torre.

Figura 1: Diagrama apresentando os dois tipos de aerogeradores comercialmente disponíveis.



Fonte: Adaptado de American Wind Energy Association, 2017.

Conforme norma internacional IEC-NORM 61400-2 (2013), geradores de pequeno porte horizontais são definidos como os que têm rotores com área de até 200 m² (Com diâmetro menor que 16m) Considerando uma média de 350 W/m², isto significa uma potência máxima de 70 kW. Nesse caso, a torre não pode ser mais alta que 20m. (IEC, 2013).

O conjunto de aerofólios (pás) compõe o rotor, que é o componente responsável por captar a energia cinética do vento e transmitir através de um eixo esta energia para o conjunto gerador. Os rotores mais utilizados para geração de energia elétrica são os de eixo horizontal do tipo hélice e normalmente compostos de três pás. Em casos extraordinários podem ser compostos por uma ou duas pás onde exista a disponibilidade de ventos com velocidades médias muito altas e também onde exista a possibilidade de geração de ruído acústico mais elevado sem que tal seja um incômodo.

A quantidade de pás influencia diretamente nos estudos aerodinâmicos, custo de produção e capacidade de captação de energia. Para este estudo serão considerados apenas geradores horizontais de três pás (AL-ABADI, 2014).

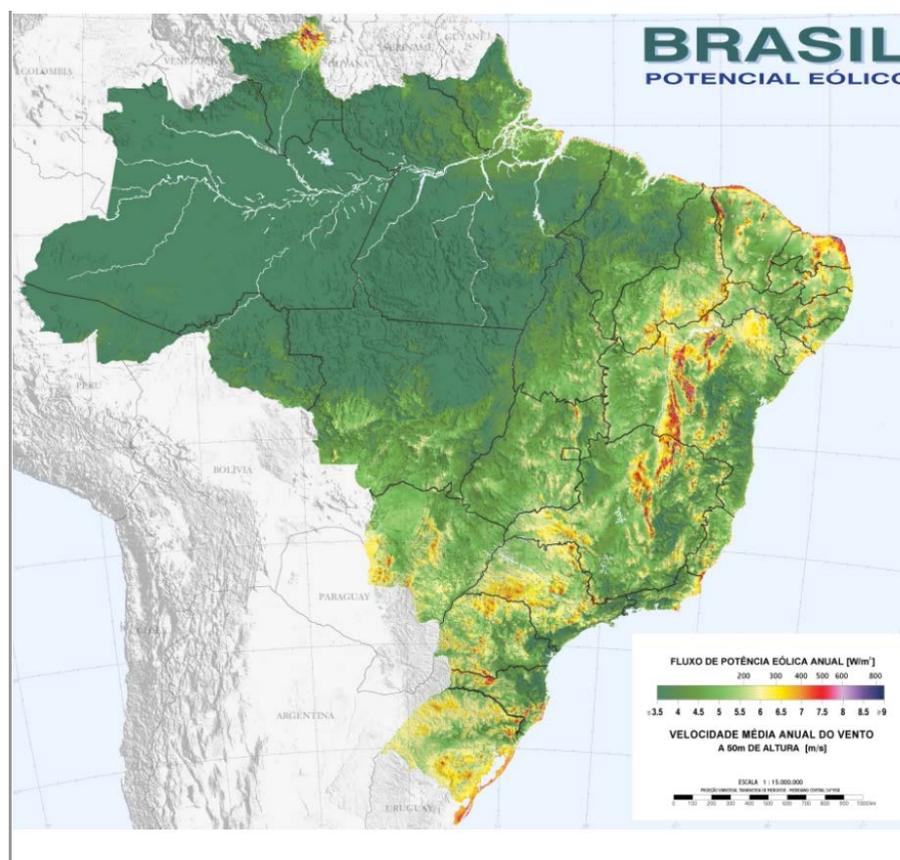
O crescimento populacional e a evolução tecnológica criam aumento significativo na demanda global por energia. Novas tecnologias surgem a todo o momento e, seja pela redução nos custos, pelo incentivo da indústria, por programas de inclusão digital ou pelo aumento do uso de aparelhos eletrônicos no dia a dia, a demanda global, conseqüentemente, cresce.

Para atender a demanda energética moderna de maneira sustentável, é importante que haja um aumento gradual, e até a substituição total, das fontes energéticas convencionais por energia limpa renovável. Geradores eólicos e painéis solares já são uma realidade na geração suplementar ou independente (*off-grid*) de energia em ambientes domésticos ou comerciais (WWEA, 2015).

Segundo o relatório anual do Conselho Global de Energia Eólica (GWEC) atualmente a produção combinada dos cinco continentes é de 369.705 MW com aerogeradores (GWEC, 2015), deste volume, a Ásia produz 141.973 MW, seguida pela Europa, produzindo 134.251 MW, destacam-se na produção e instalação de novas plantas China e Alemanha, líderes em produção e instalação não só em seus respectivos mercados mas também no contexto global (SAWIN, 2015). Anualmente, o Brasil é o único país da América Latina

com mais de 1MW de capacidade instalada, produzindo 5.962 MW anualmente (mais de 65% dos 8.568 MW produzidos cumulativamente pela América Latina e Caribe), liderando o mercado local, mas ainda muito além de sua capacidade plena, sua posição no ranking mundial de produtores de energia é o 10º lugar, produzindo 2% do total de energia elétrica oriunda de fonte eólica no mundo. Dos 9 países com maior produção eólica que o Brasil, apenas 2 são maiores em território (China e EUA) e população, fatores que determinam parcialmente a capacidade de produção e consumo de energia. Como apresentado na Figura 2, pelo Ministério de Minas e Energia (2001), o Brasil tem um grande potencial eólico inexplorado.

Figura 2: Mapa do potencial eólico brasileiro.



Fonte: Ministério de Minas e Energia (2001, p. 27)

O Brasil investiu na instalação de 2,7 GW de capacidade em 2015, ocupando neste ano a posição de 4º maior investidor global neste segmento, o que representa um crescimento de em relação aos anos anteriores (SAWIN,

2015), com investimentos de R\$ 116 bilhões planejados para 2015-2018 em geração de energia eólica, a previsão é de atingir a marca dos 22,4 GW (ABEEÓLICA, 2015). Há grande potencial para geração de energia eólica no Brasil, principalmente na região nordeste, onde poderia tornar-se a principal fonte de energia (MME, 2001), os estados sudeste e sul seguem como os maiores

Segundo o relatório da EPE, o Brasil consumiu em 2014, 473.393 GW , com a extensão territorial do Brasil como fator limitador (excluindo a possibilidade de plantas *offshore* em alto mar), há um potencial para gerar até 350 GW (MME, 2014), somente em energia eólica, quase 30% da demanda nacional anual combinada entre todos os setores , ou suprir totalmente a demanda anual do setor residencial , que foi de 132.049 GW em 2014 (EPE, 2015). É possível perceber que não há apenas um fator de preservação ambiental envolvido, mas também inúmeras oportunidades de negócio.

1.2. OBJETIVO GERAL

Projetar pás aerodinâmicas de um aerogerador de pequeno porte. Simular numericamente, através de softwares adequados, as características aerodinâmicas das pás e comparar os resultados com a simulação de um aerogerador disponível comercialmente.

1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Compreender os aspectos técnicos dos aerogeradores horizontais.
- Apresentar a situação da demanda e produção energética nacional e da baixa produção de energia eólica em relação a capacidade total.
- Apresentar as equações que determinam o potencial energético de um aerogerador e demonstram a quantidade de energia presente na massa de ar.
- Demonstrar o processo de construção do protótipo virtual, e as equações que definem as características aerodinâmicas das pás.
- Apresentar os parâmetros utilizados na simulação fluidodinâmica computacional (DFC) e a montagem do experimento.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. INTRODUÇÃO

Desde a antiguidade, a humanidade utiliza de energia disponível na natureza para realizar trabalho, como as rodas d'água utilizadas em moinhos de grãos, a energia eólica foi utilizada para diversos fins, desde movimentar barcos (através das velas) até moinhos de vento para o processamento de grãos e o bombeamento de água. O uso de geradores eólicos para prover energia elétrica tem sua origem documentada no início do século 20, em várias regiões da Europa, onde geradores criavam a possibilidade de ter energia independente da rede convencional (de distribuição extremamente restrita, na época) gerando desenvolvimento em consequência da criação de pequenas zonas de autonomia energética (parcial ou total) em regiões que antes não possuíam qualquer fonte energética (CLEVELAND, 2004).

Estas máquinas movidas a energia eólica tipicamente utilizavam uma construção similar aos mecanismos das velas navais, estruturas de madeira e tecido compondo uma superfície capaz de captar a movimentação do ar. De acordo com Hau (2006), na década de 1930 aerogeradores horizontais eram comuns em fazendas no interior dos estados unidos, onde sem alcance da distribuição convencional, operavam de maneira independente da rede. Estes geradores eram produzidos em aço de alta tenacidade e instalados no topo de torres com estrutura de madeira treliçada. Na década de 40, em diversos pontos da Europa, turbinas eólicas já geravam energia em conjunto com a rede elétrica, utilizando os mesmos materiais da aeronáutica, madeira e metal, em sua construção básica.

No final dos anos 70, em decorrência da crise dos combustíveis fósseis e do começo dos movimentos em prol da consciência ambiental e sustentabilidade, a Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço (NASA – National Aeronautics and Space Administration) junto ao Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE – United States Department of Energy) inicia

o desenvolvimento de turbinas comerciais de grande porte, e é dado início ao uso de materiais tecnológicos como polímeros e compósitos, fruto dos avanços da corrida espacial (NASA, 1979). Os geradores de grande capacidade (megawatt) são construídos de utilizando metal, fibras ou mesmo madeira (HAU, 2006) em sua composição, enquanto geradores de pequeno porte modernos utilizam alumínio ou materiais compósitos (em sua maioria, fibra de vidro) em sua construção.

Os compósitos recebem esta nomenclatura por combinarem diferentes materiais em uma única matriz para usufruir da combinação de suas características ou de propriedades resultantes da combinação dos mesmos (CALLISTER e RETHWISCH, 2010).

Conforme SCHUBEL e CROSSLEY (2012), as pás dos aerogeradores passam por diversos ciclos de flexão, propriedade mecânica que deve ser observada pra que estas hélices não tenham contato acidental com a torre de sustentação do gerador horizontal, afim de evitar graves danos. O estudo de materiais compósitos através de ensaios mecânicos e simulações computacionais permite explorar as características de orientação das fibras, reforços estruturais e demais situações que podem afetar o desempenho e a segurança do gerador.

2.2. AEROGERADORES HORIZONTAIS DE PEQUENO PORTE

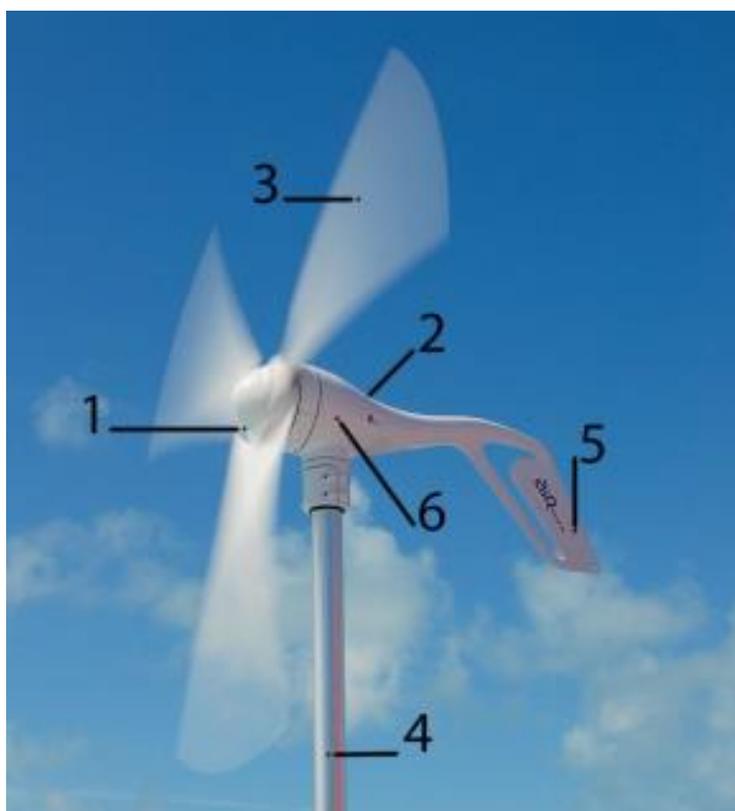
Aerogeradores são máquinas que transformam a energia cinética das correntes de ar atmosférico em energia mecânica e subsequentemente energia elétrica. São definidos como aerogeradores horizontais de pequeno porte, pela comissão eletrotécnica internacional, turbinas eólicas cujo rotor apresenta um diâmetro total menor que 16 m e uma capacidade menor que 70 kW, cujo rotor seja instalado de maneira perpendicular a torre, recebendo em sua face principal o fluxo de ar com o qual as pás irão interagir (IEC, 2013).

Estes devem possuir uma superfície de interação com o vento, uma maneira de controlar e transmitir as rotações do rotor para o motor-gerador

interno, uma torre de sustentação que suporte toda a estrutura. É importante também que o gerador possua pás desenhadas de maneira a fazer o maior aproveitamento possível das velocidades de vento disponíveis na região a ser instalado, e que estas sejam resistentes o suficiente para suportar as cargas aerodinâmicas, mecânicas e o desgaste do clima (radiação UV, variações de temperatura, poeira e demais condições naturais) (CAI, ZHU, *et al.*, 2012).

A Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC) através da norma 61400-2 determina os componentes do aerogerador conforme critério especificado internamente ou oriundo de outros corpos normativos (principalmente ISO). A Figura 3 mostra um aerogerador de pequeno porte e as partes que o constituem.

Figura 3: Aerogerador horizontal de pequeno porte.



Fonte: Adaptado de Wind Turbine Zone, 2017

1 – Cubo: O conjunto de pás fixado ao cubo forma o conjunto determinado rotor. A função deste é captar energia cinética do vento através das pás e transferi-la para os componentes do gerador.

2 – Nacele: Também conhecida como carenagem, possui base rotativa, em torno de um eixo horizontal instalada no topo da torre para permitir o ajuste da direção do rotor conforme direção do vento. A nacele também serve como base para a instalação do rotor com cubo e pás, o ajuste angular das pás, o leme, a engrenagem e transmissão mecânica, os circuitos eletrônicos e o gerador. Dependendo do projeto, o aerogerador de pequeno porte pode não apresentar alguns destes componentes.

3 – Pás: O conjunto das pás forma o rotor. Devido à necessidade de redução de peso, na maioria das vezes, as pás são confeccionadas em compósitos de fibra de vidro e resinas (HEIER, 2007), devido a grande estabilidade química. Existem ainda geradores com pás de alumínio ou outros metais. As pás dos aerogeradores têm perfis aerodinâmicos variados de forma a aumentar a sua eficiência na retirada da energia em determinada faixa de velocidade do vento. Elas podem ser constituídas de um único ou uma combinação de vários perfis (CERVERA, ARROYO e CASTRO, 2006).

4 – Torre: Oferece suporte ao conjunto motriz do aerogerador. Além de elevar o mecanismo a alturas mais favoráveis à captação da massa de ar nas velocidades ideais e menos perturbada por outras instalações urbanas ou vegetação e formações geográficas. Fatores determinantes para a altura da torre são o custo e o acréscimo real de energia obtido com a elevação do rotor. As torres podem ser construídas de diversos materiais, sendo mais comuns o aço em treliça ou estrutura tubular. Técnicas como o estaiamento reduzem o material da torre, mas exigem maior área disponível para instalação. É importante notar que pequenas diferenças na altura podem significar grande diferença na velocidade do vento, portanto é fator fundamental.

5 – Leme: É o mecanismo atuado pela massa de ar responsável por manter a face do rotor perpendicular a corrente principal de vento. Geradores de grande porte não possuem lemes, ao invés disso, utilizam sensores para detectar a direção do vento e motores para reposicionar o rotor, consumindo da própria energia para fazer estas correções.

6 – Acoplamentos e Gerador: A carenagem protege diversos componentes internos que juntos atuam convertendo a energia cinética do vento em energia elétrica. Controles complexos, sensores, freios mecânicos e

acoplamentos atuam em conjunto, coordenados por um painel de controle externo.

2.3. NÚMERO DE PÁS NO AEROGERADOR COMERCIAL

Das diversas configurações possíveis de aerogeradores, o aerogerador horizontal de três pás é o mais presente comercialmente, devido as peculiaridades deste formato. O aerogerador, conceitualmente, pode ter qualquer número de pás, inclusive, em uma análise preliminar das equações governantes destes aparatos é possível concluir que quanto maior o número de pás, maior a eficiência do aerogerador (SANDERSE, B, 2016). Estas equações, entretanto, desconsideram fatores além da captação e geração de energia, e muitas vezes são compostas por simplificações, no ambiente real, fatores como espaço, geração de ruído próximo a áreas urbanas, fenômenos aerodinâmicos e custo de produção tem impacto profundo na forma, tamanho e demais características do rotor (RERL, 2004).

Rotores de diferentes quantidades de pás exigem características específicas de projeto e atendem necessidades e condições climáticas específicas, zonas com grande velocidade de vento e pouca ou nenhuma presença humana (ou, onde o ruído não seja problema) comportam aerogeradores horizontais de uma única pá, que geralmente faz uso de um contrapeso para balancear seu movimento, ou de duas pás, como eram construídos aerogeradores a partir de rotores usados anteriormente na aviação (SCHUBEL e CROSSLEY, 2012).

Aerogeradores com um menor número de pás, precisam de velocidades maiores de vento para produzir energia, produzem um maior nível de ruído e são menos eficientes na produção de energia, pela redução do número de pás. A velocidade na ponta da pá é geometricamente superior a velocidade próxima a base do rotor, quanto maior a velocidade da ponta da pá, maior é a possibilidade do aumento no nível de ruído e turbulência e dificultando a produção de energia. Da mesma forma que hélices no rotor de um helicóptero, pás que apresentam uma velocidade maior que 80m/s necessitam de tratamento especial em sua

superfície pois estão sujeitas a rápida erosão pelo impacto das partículas suspensas no ar, esta necessidade, aliada ao desbalanço inerente das configurações com uma ou duas pás, torna a redução de custo negligenciável em relação a perda de eficiência geral (MCCOSKER, 2012).

Com um maior número de pás a eficiência teórica do aerogerador aumenta, entretanto, as pás têm de ser mais finas para serem eficientes aerodinamicamente nestas circunstâncias. Pás mais finas possuem menor resistência estrutural e estão mais sujeitas a flexionarem por conta da carga da massa de ar e ter uma colisão entre a ponta ou porção mais distante do rotor e a torre do próprio gerador, os estresses centrífugo e aerodinâmico também aumentam exponencialmente com o aumento da velocidade (GASCH e TWELE, 2002). Além disto, a passagem da pá pelo ar cria vórtices (especialmente na ponta) e demais distúrbios aerodinâmicos que precisam de determinado período de tempo para que o fluxo de ar se normalize. Um grande número de pás teria uma distância muito menor entre elas, fazendo com que os distúrbios de fluxo de ar não se normalizem entre a passagem das pás, no caso de geradores com três pás, o espaço entre elas é grande o suficiente para que haja um menor número de distúrbios aerodinâmicos nas mesmas circunstâncias, além disso, há um balanço inerente das massas rotativas nesta configuração (SIMON, 2012).

Não há corpo normativo que defina a quantidade de pás, entretanto as razões estruturais e aerodinâmicas demonstram que cada pá adicional aumenta muito pouco a eficiência total do gerador em relação a outras características e gera um grande aumento em custo (muitas vezes maior que o aumento de capacidade de geração), tornando mais eficiente a construção de um gerador maior ou de mais de um gerador, ao invés de um gerador com um grande número de pás (KAMINSKY, FILUSH, *et al.*, 2012).

2.4. CONSTRUÇÃO DOS MODELOS COMPUTACIONAIS

Para iniciar um projeto de simulação é necessário um complexo modelo geométrico-matemático, que apresente no ambiente virtual as mesmas características do protótipo real ou produto final a ser analisado.

Após a criação do modelo geométrico, para alcançar os melhores resultados, é necessário que o ambiente de simulação seja configurado com dados de qualidade. Uma simulação virtual não difere de outros experimentos laboratoriais onde a qualidade dos dados obtidos depende da utilização de boas amostras (modelos tridimensionais) e a preparação adequada do experimento (ambiente de simulação virtual) a ser conduzido (KEERTHANA, SRIRAMKRISHNAN, *et al.*, 2012).

Para as simulações fluidodinâmicas computacionais e análises de elementos finitos que envolvem aerogeradores, o método de prototipagem virtual é utilizado. Segundo (LIOU, 2007) protótipos virtuais representam o produto de maneira intangível, e são aplicados em situações nas quais a prototipagem física é impraticável, impossível ou ineficiente. Os protótipos virtuais apresentam maior flexibilidade que os projetos físicos para ajustes, pois permitem que alterações sejam feitas em um menor período de tempo e envolvendo menores custos.

Mesmo pequenas alterações em um protótipo físico podem acarretar em um grande custo, e acabam implicando muitas vezes em um novo protótipo, exigindo espaço físico de armazenagem para um controle de versão (BEER, 2015).

A prototipagem virtual, geralmente, precede a prototipagem física e em alguns casos (produtos de menor precisão ou valor agregado) elimina esta segunda, ou, no caso de produtos complexos ou de alto valor agregado, age de maneira complementar (BEER, 2015).

Através do uso de protótipos virtuais, é possível realizar alterações em tempo real, com um custo inferior em horas de trabalho e demais recursos e coleta facilitada de resultados. A fluidodinâmica computacional e a análise de elemento finito permitem que sejam explorados diferentes perfis aerodinâmicos e diferentes características individuais de um mesmo perfil, bem como as propriedades mecânicas das pás, carenagem e estrutura de sustentação do aerogerador (LAWRENCE, 2012). Com o uso destas ferramentas, é possível explorar materiais e formas das pás na obtenção de uma simulação precisa que possibilita a seleção e categorização das combinações estruturais possíveis afim de determinar, através da análise dos resultados das simulações, um conjunto ideal de características para atender as demandas de resistência mecânica,

facilidade de construção e eficiência do aerogerador horizontal, criando uma base de informação adequada para viabilizar a construção local de componentes mais eficientes.

As pesquisas de Digraskar (2010), Beyer (2012), Kaminsky (et al. 2012), Keerthana (KEERTHANA, SRIRAMKRISHNAN, *et al.*, 2012), McCosker (2012) e Al-Abadi (2014) demonstram como pequenas alterações aerodinâmicas podem gerar alterações benéficas na capacidade de geração de energia, seja por maior proveito do fluxo de ar presente, seja por menor estresse mecânico nos componentes através da otimização de escoamento.

2.5. EQUACIONAMENTO DE AEROGERADORES

É estimado que cerca de 2% da energia solar absorvida pela superfície seja fator gerador da corrente de ar. Apesar deste valor parecer pequeno, se calculado, ultrapassa em centenas de vezes a potência anual instalada nas centrais hidrelétricas globais (HAU, 2011).

Há uma diferença entre as correntes de ar de escala global e os ventos que se apresentam em pequena escala, pois estas massas de ar são afetadas diferentemente pelo relevo, altitude e pelos obstáculos construídos pelo homem. Entretanto, ambas as formas de apresentação dos ventos podem ser captadas na forma de energia cinética por aerogeradores, as equações apresentadas a seguir derivam das leis de conservação de energia, transferência de energia e massa e servem para estimar a potência e eficiência de máquinas eólicas rotativas (FOX et al. 2016).

Além de considerar o potencial energético teórico do vento, é necessário também coletar informações sobre o local de instalação das turbinas eólicas e das condições de vento na região para permitir a realização de um projeto mais eficiente, estas informações podem ser obtidas através de bancos de dados e levantamentos topográficos no local de interesse, bem como imagens aéreas, medições de instrumentos e dados de satélite (HAU, 2011).

2.5.1. Potencial Energético

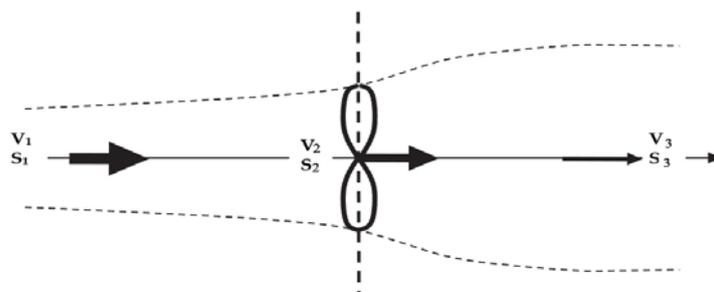
Para calcular a energia possível de ser extraída de uma determinada massa de ar por um aerogerador, deve-se calcular primeiro a quantidade de energia cinética contida na referida massa de ar, através da equação do potencial energético (1):

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

Onde E é a quantidade de energia, e m é a massa do ar determinada e v a velocidade da mesma. O pesquisador alemão Albert Betz (1919) criou postulados que demonstram, através dos princípios da conservação de massa e energia, o limite de eficiência de um aerogerador, da mesma forma que motores a combustão não fazem uso pleno da energia térmica (ciclo de Carnot) pois rejeitam parte do calor para o ambiente, o rotor do aerogerador também é incapaz de transformar todo o movimento da massa de ar em energia (RAGHEB e RAGHEB, 2011).

Através da análise da velocidade da massa de ar disponível (v_1), da velocidade resultante da interação com o rotor (v_2) e da velocidade da corrente de ar após a interação com o gerador (v_3) é possível observar o quanto desta energia cinética foi aproveitada e o quanto seguiu como fluxo natural de ar (RAGHEB e RAGHEB, 2011 e FOX, 2016). O diagrama pode ser visualizado abaixo (Figura 4):

Figura 4: Modelo ideal de turbina eólica.



Fonte: Adaptado de RAGHEB e RAGHEB (2011).

Ao interagir com o rotor, a velocidade do deslocamento da massa de ar é reduzida, transferindo a energia cinética do vento ao rotor que é convertida em energia mecânica através da rotação das pás.

A potência disponível pelo vento não pode ser totalmente aproveitada pela turbina eólica na conversão de energia elétrica (AL-ABADI, 2014). Para levar em conta esta característica física, é introduzido um índice denominado coeficiente de potência C_p , que pode ser definido como a fração da potência eólica disponível que é extraída pelas pás do rotor. O Coeficiente de Potência foi descrito por Betz e revisado por Schmitz (RAGHEB e RAGHEB, 2011 e MCCOSKER 2012) e tem como valor limite 59,3% (0,593), entretanto este valor é um ideal teórico que não se apresenta em condições reais, onde rolamentos, atrito e não-linearidade do fluxo de ar fazem com que a capacidade de geração seja reduzida, aerogeradores de pequeno porte reais atingem valores de C_p de 0,2 a 0,5 (RAGHEB e RAGHEB, 2011).

Respeitando os limites da transformação de energia, compreende-se que, nas relações entre v_1 e v_3 , se a velocidade do vento não for alterada ($v_1 = v_3$) nenhuma potência foi extraída da massa de ar, e se a velocidade do vento resultante for nula ($v_3 = 0$) há ausência de fluxo, portanto também é impossível que haja geração de energia (FOX, 2014). A velocidade instantânea do ar na superfície do rotor é determinada pela equação 2:

$$v_2 = v_3 - v_1 \quad (2)$$

A massa de ar é representada pela seguinte equação:

$$m = \rho A v_2 \quad (3)$$

Onde m é a massa de ar, determinada pela relação entre a densidade do ar (ρ), a área varrida pelo rotor (A) e a velocidade instantânea localizada no rotor (v_2).

Como a redução da pressão do ar é mínima a densidade do ar pode ser considerada constante (FOX, 2014). A energia cinética extraída pela turbina

eólica é a diferença entre a energia cinética a montante e a energia cinética a jusante do conjunto de pás, conforme apresentada na equação da energia cinética (4):

$$\dot{E}_{ex} = \frac{1}{2}m(v_1^2 - v_3^2) \quad (4)$$

Considerando a massa de ar, conforme apresentado na equação (2) e inserindo a velocidade no nível do rotor (v_2) conforme apresentado na equação (2) é possível integrar o coeficiente de potência, resultando na seguinte equação (CRESESB, 2008):

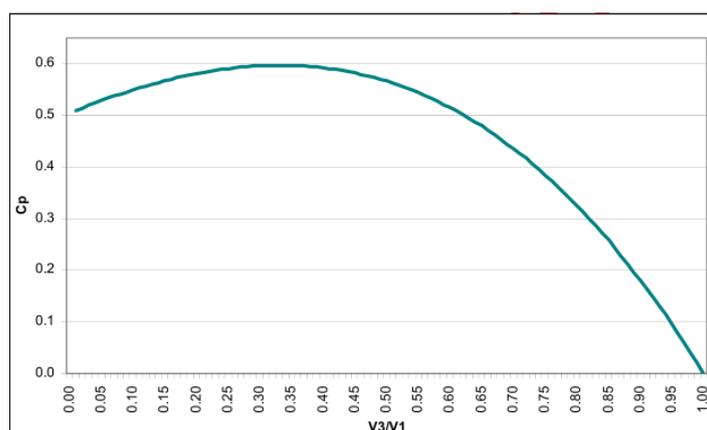
$$\dot{E}_{ex} = \frac{1}{2}\rho AV_1^3 \left\{ \frac{1}{2} \left[1 + \frac{v_3}{v_1} \right] \left[1 - \left(\frac{v_3}{v_1} \right)^2 \right] \right\} \quad (5)$$

Onde a potência do vento é determinada por $\frac{1}{2}\rho AV_1^3$ e o coeficiente de potência (doravante denominado apenas C_p) é determinado por $\left\{ \frac{1}{2} \left[1 + \frac{v_3}{v_1} \right] \left[1 - \left(\frac{v_3}{v_1} \right)^2 \right] \right\}$, a forma simplificada desta equação é descrita por MCOSKER (20121) como:

$$P_{vento} = C_p \frac{1}{2} \rho S V_1^3 \quad (6)$$

Segundo Betz, o limite máximo para o Coeficiente de Potência, respeitando as leis da transferência de massa e energia alcança, no máximo, 16/27 (59,3%) da energia disponível (FOX, 2014). A relação entre V_1 e V_3 determina o coeficiente de potência, e pode ser visualizada no gráfico a seguir (Figura 5):

Figura 5: Distribuição de CP em função de V3/V1.



Fonte: Adaptado de McCosker, 2012.

É possível assim, definindo o sistema da mesma forma que Betz, realizar um balanço energético e aferir a eficiência do aerogerador através da diferença entre as velocidades de entrada e saída do sistema (v_1 e v_3 , considerando v_2 a velocidade no instante do rotor), considerando que não haverá uma redução na densidade da massa de ar, apenas na velocidade, indicando assim que a energia cinética foi captada pelo rotor e armazenada como energia mecânica (FOX, 2014).

A seleção criteriosa dos aerofólios, as considerações quanto ao local de instalação do gerador e o dimensionamento do rotor mediante estas circunstâncias bem como a correta atenção aos demais componentes da transmissão e geração de energia também é responsável pela qualidade total do aerogerador (MCCOSKER, 2012), entretanto os demais componentes do sistema de geração de energia não são assunto deste trabalho.

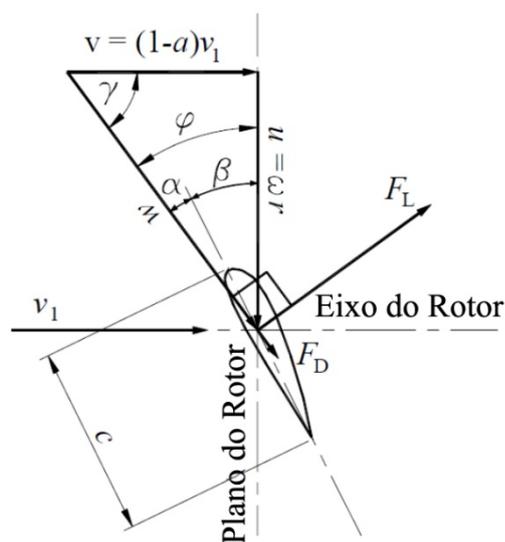
2.5.2. Equacionamento da Geometria das Pás

As pás do rotor de um aerogerador são as superfícies responsáveis pela captação da energia cinética da massa de ar em movimento, elas são construídas através do correto posicionamento de aerofólios em seções cruciais de sua extensão (MCCOSKER, 2012). O tamanho das pás, e conseqüentemente o tamanho do rotor, influencia diretamente no potencial de geração de energia do aerogerador, uma vez que rotores maiores são capazes de converter mais

energia (FOX, 2014). Aerogeradores de pequeno porte geralmente trabalham nas camadas da atmosfera mais próximas ao solo, o que limita sua eficiência, além disso, sofrem maior dificuldade para iniciar movimento quando consideradas as restrições impostas por rolamentos, caixas de transferências e pelo gerador em si (RAFUDDIN e SINGH, 2013).

Pás podem ser construídas através do dimensionamento de um único aerofólio, ou do posicionamento sistemático de diferentes aerofólios em sequência afim de extrair a maior eficiência considerando as características diferentes apresentadas entre a base a ponta da pá (AL-ABADI, 2014). Aerofólios são seções bidimensionais projetadas para provocar variações na direção e velocidade de um fluido durante seu escoamento, produzindo diferentes efeitos através da interação com o fluido (empuxo, sustentação, arrasto, estol) (FOX, 2014), as forças atuantes em um aerofólio, que serão utilizadas para o desenvolvimento deste projeto, são apresentadas na Figura 6, a seguir:

Figura 6: Forças atuantes no aerofólio (MCCOSKER, 2012).



Fonte: McCosker, 2012

Estas forças são descritas matematicamente na Teoria dos Elementos das Pás, originalmente desenvolvida por William Froude (1878), que consiste em um modelo matemático que divide a pá do aerogerador em inúmeras partes menores e então determina as forças atuantes em cada um destes elementos

individuais. A integração resultante destas forças induz o movimento rotacional que é por sua vez transferido ao eixo do gerador através do rotor, portanto a seleção criteriosa dos aerofólios é essencial para atingir o potencial máximo de geração de energia (FOX, MCDONALD, *et al.*, 2014).

Cada aerofólio possui características únicas que são obtidas através de equações matemáticas observando princípios da fluidodinâmica adaptados ao cenário específico de utilização: automóveis de competição, aviões, turbinas impulsoras de água, rotores de helicópteros e aerogeradores, entre outros (ANDERSON, 2016). Para construir as pás ou hélices do aerogerador, é necessário que sejam considerados os diversos fatores que regem o projeto deste tipo de equipamento. A eficiência do aerogerador depende da eficiência de seus componentes, o desenvolvimento e dimensionamento adequados de rolamentos, caixas de transferência, diversos mecanismos e componentes eletrônicos do gerador e dos controladores garantem a captação de energia e uma maior eficiência na geração (AL-ABADI, 2014). Sendo as pás os primeiros elementos do gerador que encontram a fonte de energia (vento), é importante que sejam adequadamente dimensionadas de acordo com a velocidade média dos ventos disponíveis na localidade de instalação, o tamanho total do rotor e a necessidade de produção energética (MCCOSKER, 2012).

De acordo com Van Der Horst (2015), turbinas eólicas de eixo horizontal operam como tendo característica principal seu coeficiente de sustentação (C_l), já geradores do tipo vertical podem ser movidos pela força da sustentação ou arrasto (este segundo com eficiência aerodinâmica muito inferior). Para que haja maior eficiência na operação de um aerogerador, da mesma maneira que nos aviões, deve-se estar atento a resultante aerodinâmica que é a relação entre os fatores de sustentação e arrasto (RAFUDDIN e SINGH, 2013).

Conforme a Teoria dos Elementos da Pá, as forças de sustentação e arrasto se relacionam de maneira perpendicular e a variação no ângulo de ataque do aerofólio faz com que ambas variem mantendo sua correlação (MANWELL, MCGOWAN e ROGERS, 2009). Em determinado momento, entretanto, é possível através da variação do ângulo de ataque obter a maior diferença entre levante e arrasto, para uma determinada velocidade de vento resultante. Para um aerogerador horizontal é interessante que haja o maior

levante possível e o menor arraste possível (KAMINSKY, FILUSH, *et al.*, 2012). Uma vez que o arrasto é uma força perpendicular a sustentação, portanto, indesejável.

Uma vez que aerogeradores horizontais são máquinas movidas por força de sustentação, os aerofólios utilizados devem ser preferencialmente posicionados no ângulo de ataque (α) que gere o maior coeficiente de sustentação e o menor coeficiente de arrasto para aquele determinado aerofólio. Instruções de uso do desenvolvedor do aerofólio costumam trazer não apenas este ângulo descrito, como também os valores do Coeficiente de Sustentação (C_l) e do Coeficiente de Arrasto (C_d) para este mesmo ângulo (MCCOSKER, 2012). A diferença entre os coeficientes de sustentação e arrasto (C_l/C_d) recebe o nome de resultante aerodinâmica.

O coeficiente de Reynolds (Re), número adimensional definido pela relação entre as forças inerciais e forças viscosas atuando em uma determinada superfície também deve ser levado em consideração, este, é apresentado na seguinte equação:

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu} \quad (7)$$

O coeficiente de Reynolds é utilizado para determinar o estado de escoamento de um determinado fluido, se a relação entre as forças resultar em um número elevado (que varia de acordo com as características de cada sistema), o fluxo é turbulento, valores baixos em relação a montante das forças esperadas no sistema caracterizam fluxo laminar (FOX, MCDONALD, *et al.*, 2014).

Diversos pesquisadores, como Munson (MUNSON, ROTHMAYER, *et al.*, 2012), Ávila (2013) e Fox (FOX, MCDONALD, *et al.*, 2014) Na prática, devido ao comportamento caótico inerente aos fluídos na natureza, é difícil determinar o coeficiente de Reynolds e este, sozinho, não garante a similaridade entre dois sistemas, ou a estabilidade de um determinado sistema que está sujeito a um ambiente complexo, ainda assim, é um guia importante e é largamente utilizado como referência.

A velocidade do vento e demais características devem ser consideradas no momento do projeto das pás e seleção das características dos aerofólios afim de alcançar a maior eficiência possível (RAGHEB e RAGHEB, 2011). Bancos de dados que contém informações sobre os aerofólios costumam descrever suas características para diversos valores de Re ou fornecer informações para que sejam calculadas.

A partir do conhecimento do ângulo de maior resultante aerodinâmica, pode-se obter o ângulo de passo (β) de cada seção da pá a partir da equação proposta por McCosker (2012), Apud. SOREN (2009) que tem como base as equações de Betz e a Teoria do Momento da Pá (Equação 8):

$$\beta_{(r)} = \frac{2}{3} \arctan\left(\frac{R}{\lambda r}\right) - \alpha_D \quad (8)$$

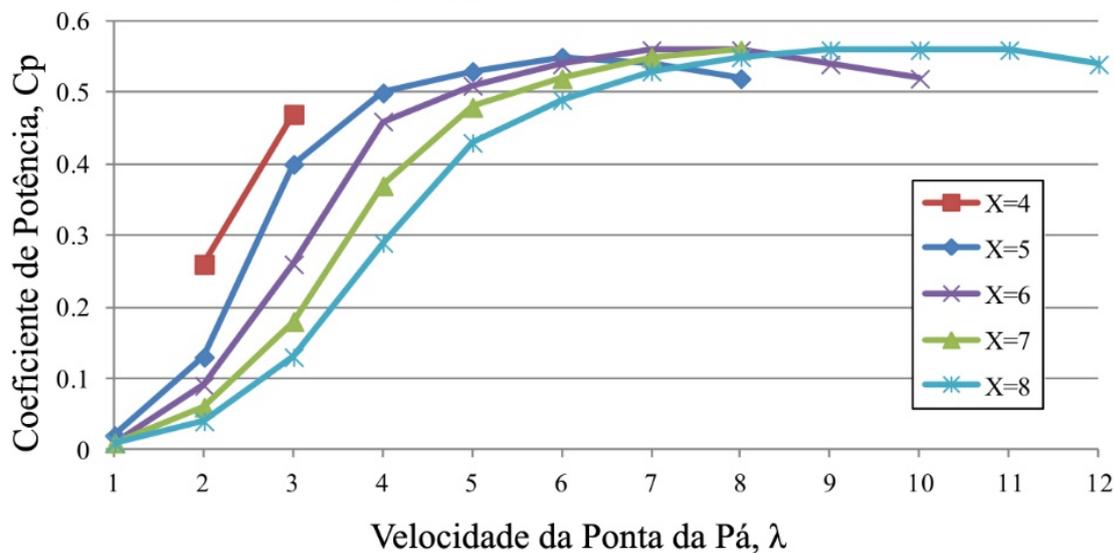
O ângulo de passo (β), em graus pode ser calculado para cada seção infinitesimal da pá, portanto $\beta_{(r)}$ representa o ângulo de passo (β) solucionado considerando uma distância específica do centro do rotor (r) em relação a seu raio total (R). É possível perceber que o ângulo de passo é atrelado ao diâmetro total do rotor, portanto seu valor é atrelado e restrito as dimensões físicas do projeto. O raio total do aerogerador, entretanto, não limita a seleção dos aerofólios que compõem a pá (SCHUBEL et al. 2012). Outros dois valores independentem do comprimento da pá e são valores a serem determinados no desenvolvimento da pá, são estes a taxa de velocidade da ponta da pá (λ), número adimensional que varia de 1 a 10 e o ângulo de ataque estipulado (α_D) que, para um projeto eficiente, tende a ser o ângulo de ataque de maior resultante aerodinâmica para o referido perfil (MCCOSKER, 2012). A taxa de velocidade da ponta da pá é a razão entre a velocidade tangencial da ponta da pá e a velocidade do vento incidente e apresentada por Schubel & Crossley (2012) como:

$$\lambda = \frac{\omega R}{v_1} \quad (9)$$

Onde a velocidade da ponta da pá (λ) é definida pela relação entre a velocidade radial (ω), o raio do rotor (R) e a velocidade do vento que irá atingir o rotor (v_1). Ainda segundo Schubel e Crossley (2012), índices de velocidade mais altos na ponta das pás implicam em perfis de asa menores, o que resulta num menor uso de materiais e custo de produção. Entretanto, as forças centrífugas e aerodinâmicas aumentam exponencialmente, isto implica em exigências especiais na fabricação para a preservação da estrutura. Conforme a velocidade aumenta, a aerodinâmica torna-se crítica, portanto um rotor desenvolvido visando grandes velocidades de vento tem torque mínimo em velocidades baixas, o que dificulta o início da rotação e dificuldade de partida (DUQUETTE e VISSER, 2003). Há também um aumento do ruído acústico com velocidades maiores, aproximadamente na ordem da sexta potência (OERLEMANS, SIJSTMA e LOPEZ, 2007), é importante ter o ruído como parâmetro para aerogeradores de pequeno porte, uma vez que estes são instalados muito mais próximos as residências.

Em turbinas modernas, o índice de velocidade na ponta das pás oscila entre 9 e 10 para rotores de duas hélices e pode variar entre 6 e 9 para três hélices, estes valores se provaram os mais eficientes para a produção de energia elétrica (MANWELL, MCGOWAN e ROGERS, 2009). Deve se considerar a velocidade de vento disponível para optar por uma determinada velocidade para a ponta da pá na fase de projeto, pois quanto maior a velocidade da ponta da pá, menor o ângulo de ataque necessário naquele ponto e maior a velocidade do vento necessária para produzir a mesma quantidade de energia. De acordo com as equações apresentadas a taxa de velocidade da ponta da pá e o ângulo de passo combinados, tem influência direta no Coeficiente de Potência do aerogerador, conforme a figura abaixo (Figura 7), visto que ambos são fatores essenciais na interação com a velocidade do ar (v_1):

Figura 7: Coeficiente de potência para pás otimizadas para diferentes valores de X.



Fonte: McCosker, 2012.

De acordo com Al-Abadi (2014), da mesma maneira que cada sessão infinitesimal da pá deve ser considerada de acordo com a teoria dos elementos da pá e calculada individualmente, é possível determinar a dimensão da linha de corda de um determinado aerofólio a partir dos dados adquiridos e dos dados de projeto, através da seguinte equação:

$$c(r) = \frac{16\pi R}{9BC_{l,d}} \cdot \frac{1}{\lambda \sqrt{\lambda^2 \left(\frac{r}{R}\right)^2 + \frac{4}{9}}} \quad (10)$$

Onde o comprimento da corda aerodinâmica (c), em metros, é calculado para cada fatia infinitesimal da pá, portanto (r) representa o ponto onde ao qual a equação se refere, em distância radial do centro do rotor, medido em metros. Os demais elementos envolvidos são o raio do rotor (R , em metros), o coeficiente de sustentação do aerofólio (adimensional) que está sendo usado na seção atual do cálculo, conforme definido pelo projeto da pá ($C_{l,d}$) e a velocidade da ponta da pá, também adimensional (λ).

Esta equação tem como base as teorias formuladas por Betz e Schmitz (GUNDHOFT, 2009) e tem como principais elementos o raio total do rotor

(medido do centro do rotor até a ponta da pá) e o Coeficiente de Sustentação do aerofólio selecionado para o desenho das pás, usualmente no seu ponto de maior eficiência (determinado pela relação Cl/Cd). Possuindo os dados do diâmetro do rotor, comprimento de corda e ângulo de passo do aerofólio definidos, basta solucionar as equações substituindo as variáveis para alcançar o dimensionamento ideal da pá, do ponto de vista aerodinâmico (MCCOSKER, 2012).

A teoria dos elementos da pá prevê que há um número infinito de aerofólios entre a base e a ponta da mesma, e que as equações devem ser solucionadas para cada ponto crítico de interesse da pá. A integração entre as sessões é essencial para o cálculo do desempenho total do rotor

É aceitável que haja um comprometimento aerodinâmico em algumas sessões da pá em prol da resistência estrutural adequada as cargas cinéticas e aerodinâmicas sob as quais o dispositivo irá operar, principalmente na seção base da pá que se conecta ao centro do rotor (MCCOSKER, 2012). A simplificação das sessões da pá pode resultar em perdas aerodinâmicas, principalmente se for simplificado o tamanho da corda e o ângulo de passo dos aerofólios. A NREL pesquisa aerofólios desde 1974 (REEL, 2004) para aplicações experimentais e comerciais e através dos relatórios diversos indica 3 posições da pá onde o aerofólio deve ser definido e equacionado, sendo elas (Figura 8):

Figura 8: Descrição das sessões da pá de um aerogerador.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

1. Root (“Base”): Esta seção se refere ao ponto onde a pá se fixa ao rotor (geralmente um acoplamento por flange ou seção plana retangular ou circular) até o ponto onde se apresenta o primeiro aerofólio definido, usualmente o ponto onde ocorre o comprimento máximo de corda possível após a transição entre a forma da fixação da pá no rotor e a forma do aerofólio. Esta seção recebe as menores velocidades rotacionais, apresentará o maior ângulo de passo e linha de corda, conforme a solução das equações já apresentadas.
2. Primary (“Primário”): Porção da asa que compreende o espaço entre o aerofólio base e o aerofólio da ponta, caso a asa seja composta por apenas dois aerofólios (base e ponta) esta região é puramente uma transição matemática entre a forma dos dois aerofólios. Algumas fontes bibliográficas chamam esta porção da asa de Outboard (“Externa”).
3. Tip (“Ponta”): Esta região localiza-se radialmente a 90% do comprimento total em relação ao ponto de fixação da pá no rotor. Este aerofólio é projetado para lidar com velocidades e coeficientes mais altos, geralmente apresenta o menor comprimento de corda da asa e pode apresentar ângulo de ataque próximo a 0 graus ou até mesmo inverso em relação a base da pá.

É do entendimento dos pesquisadores que são negligenciáveis as possíveis perdas quando o desenho técnico da topologia das pás é obtido através da transição da forma entre estes pontos, uma vez que as zonas críticas da pá recebam os cálculos adequados, há grande possibilidade de que as zonas de transição apresentem matemática aceitável, visto que a teoria dos elementos das pás assume que há integração e transição entre as seções infinitesimais da pá de acordo com Gundhoft (2009), Summer (2010), McCosker (2012) e Al-Abadi (2014). Grupos de aerofólios componentes da mesma pá são apresentados em sua nomenclatura técnica e na região que devem apresentar sua forma plena

(servindo como ponto de referência entre as transições), como exemplo, a tabela a seguir categoriza aerofólios NREL para uso em diferentes tamanhos de rotores (Tabela 1):

Tabela 1: Família de Aerofólios NREL.

Diâmetro	Categoria	Base	Primário	Ponta
1–3 m	Espesso	S835	S833	S834
3–10 m	Espesso	S823	-	S822
	Fino	S804	S801	S802
	Fino	S804	S801	S803
	Fino	S807	S805	S806
10–20 m	Fino	S807	S805A	S806A
	Fino	S808	S805A	S806A
	Espesso	S821	S819	S820
	Espesso	S811	S809	S810
20–30 m	Espesso	S814	S812	S813
	Espesso	S815	S812	S813
20–40 m	-	S814	S825	S826
	-	S815	S825	S826
	-	-	-	S829
30–50 m	Espesso	S818	S816	S817
	Espesso	S818	S830	S831
40–50 m	Espesso	S818	S830	S832
	Espesso	S818	S827	S828

Fonte: Adaptado de National Renewable Energy Laboratories, 2017.

Este conjunto de instruções indica que, para um rotor de diâmetro R , a partir de seu centro em direção a ponta, o primeiro aerofólio listado deve estar plenamente desenvolvido na sessão base (*Root*) da pá, correspondente a no máximo 40% da distância radial total, o seguinte deve ocupar a porção primária (*Primary*) da distância total e se apresentar plenamente aos 75% do comprimento da asa e por fim um último aerofólio deve se apresentar plenamente na ponta (*Tip*), aos 95% do diâmetro total do rotor (NREL, 2016). Testes extensos em túnel de vento sobre todas as características dos aerofólios que compõem uma determinada família ou grupo são utilizados junto de

simulações para determinar as combinações que devem apresentar maior resultado para determinadas condições de projeto (AL-ABADI, 2014).

O tipo de vento presente em baixa altitude possui uma característica naturalmente irregular por conta da geografia (árvores, pedras, diferenças de elevação do solo) ou do elemento humano (construções, postes, residências), a massa de ar em baixas altitudes é menos uniforme e carrega poeira e insetos, que eventualmente desgastam ou se depositam nas pás, aumentando a rugosidade de sua superfície, afetando o fluxo de ar com o qual interage. Estas alterações na superfície ocasionam distúrbios no fluido (aumento do número de Reynolds), o que interfere na quantidade de levante produzido e resulta na diminuição do Coeficiente de Potência. Sendo este tipo de aerogerador uma máquina impulsionada pelo levante aerodinâmico (FOX, MCDONALD, *et al.*, 2014), é essencial considerar o número de Reynolds na seleção de aerofólios e nos cálculos subsequentes, selecionando ângulos de ataque que apresentem resultantes aerodinâmicas satisfatórias na maioria das situações (KAMINSKY, FILUSH, *et al.*, 2012).

O movimento linear constante do fluido traz consigo características aerodinâmicas ideais, onde os aerofólios apresentam seu maior potencial (em se tratando de aerogeradores, Re é considerado baixo quando menor que 500.000) O fluxo laminar ocorre principalmente em maiores altitudes e em geradores de grande porte, onde a massa de ar encontra menos elementos causadores de desvios e turbulência. Idealmente, aparatos dependentes da fluidodinâmica para sua operação (barcos, aeronaves, aerogeradores, turbinas de diversos tipos) se beneficiam em sua maioria de fluxos lineares e baixa turbulência (LAIN, QUINTERO e LÓPEZ, 2010).

Na prática, devido ao comportamento caótico inerente aos fluidos na natureza, é difícil determinar o coeficiente de Reynolds e este, sozinho, não garante a similaridade entre dois sistemas, ou a estabilidade de um determinado sistema que está sujeito a um ambiente complexo, ainda assim, é um guia importante e é largamente utilizado como referência (FOX, MCDONALD, *et al.*, 2014).

Deve-se considerar que haverá condições mistas de comportamento dos fluidos no ambiente, como variações causadas por fenômenos

meteorológicos, novas construções próximas ao aerogerador e até mesmo os vórtices e demais fenômenos causados por outros geradores eólicos em proximidade (AVILA, FOLCH, *et al.*, 2013). O próprio rotor apresenta valores diferentes para o número de Reynolds em sua extensão (fruto da variação na velocidade angular, há uma tendência em haver um fluxo mais turbulento próximo ao centro do rotor do que na ponta da pá (KAMINSKY, FILUSH, *et al.*, 2012), portanto é importante considerar estas variações no projeto de equipamentos ou estruturas amplamente dependentes da fluidodinâmica.

Considerando estes fatores e os níveis atuais de precisão dos softwares de análise computacional como apresentados por Moaveni (2014) e Beer (2015) compreende-se que as ferramentas de simulação de elemento finito e simulações fluidodinâmicas desempenham um importante papel na geração de alternativas e redução dos custos de pesquisa e produção pela possibilidade de realizar testes preliminares sem a necessidade de deslocamento físico ou fabricação de protótipos complexos, permitindo que a construção de corpos de prova e modelos físicos em escala seja reservada para etapas mais avançadas do processo (HOWARD e MUSTO, 2014).

3 PARTE EXPERIMENTAL

3.1. ESPECIFICAÇÕES DO GERADOR DE REFERÊNCIA E NECESSIDADES DO PROJETO

A universidade Feevale, em parceria com empresas e investidores dos setores público e privado, está desenvolvendo o projeto de um sistema híbrido de geração de energia, composto por painéis solares, aerogerador e um gerador elétrico a combustão. Para efeito de estudo foram adquiridos componentes de fornecedores externos a serem usados como material de referência para a produção de painéis solares e aerogerador dentro da universidade.

De acordo com as diretrizes do projeto do qual este trabalho faz parte, há a necessidade de que o aerogerador tenha a capacidade de geração de 2,5 KW. Não são estabelecidos limites superior e inferior de potência, pois é previsto que variações na corrente de ar levem o gerador a produzir energia em quantidade variada (GUNDHOFT, 2009). A universidade optou pela compra de um equipamento modelo FD3.8-2.5kW da empresa Shandong Huaya LTDA (Figura 9), com as seguintes características relevantes para o projeto listadas e acompanhadas da Figura 10:

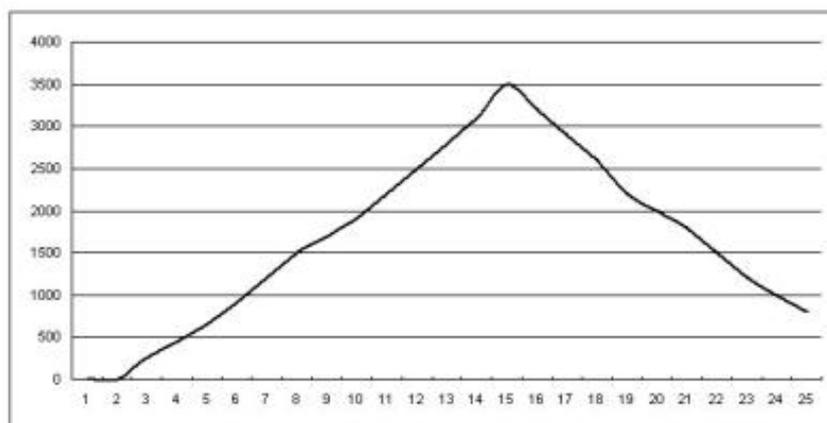
Figura 9: Aerogerador FD3.8-2.5kW



Fonte: Shandong Huaya LTD., (2016).

1. Potência Nominal: 2500 W @ 350 RPM
2. Potência Máxima: 3500 W
3. Diâmetro do Rotor: 3,8 m
4. Número de Pás: 3
5. Velocidade Inicial: 3 m/s
6. Velocidade de Potência Nominal: 12 m/s
7. Velocidade Máxima de Trabalho: 50 m/s
8. Área do Rotor: 11,3 m²
9. Altura da Torre: 8 a 15 m
10. Torque Inicial (produzido): 1,5 Nm

Figura 10: Gráfico de potência do gerador de referência.



Fonte: Shandong Huaya LTD, 2016.

Aerogeradores comerciais possuem sua potência descrita de duas maneiras, sua potência média de trabalho, ou potência nominal e seu potencial máximo de trabalho, ou potência máxima, ambas foram apresentadas no gráfico anterior (Figura 10). Como a velocidade dos ventos não é constante e varia conforme altitude, clima e demais características, nem sempre a energia potencial para a qual o rotor e gerador foram desenvolvidos é efetivamente proporcionada. Deve-se ter isto em consideração na hora de selecionar um determinado rotor ou aerogerador para compor o elemento suplementar de um

sistema híbrido ou efetivamente usar um aerogerador como fonte única de geração de energia (SCHUBEL e CROSSLEY, 2012).

3.2. DEFINIÇÃO DAS GEOMETRIAS DE ESTUDO

3.2.1. Pá do aerogerador de referência

O aerogerador FD3.8-2.5kW possui pás aerodinâmicas com raio do rotor (R) de 1,9 metros, comprimento de corda 0,22 m na base e 0,086 m na ponta da pá e variação de 24,2 graus no ângulo de passo (β) (Figura 21). A nomenclatura ou especificações técnicas dos aerofólios não constam em nenhum dos manuais fornecidos pelo fabricante aos autores (SHANDONG HUAYA LTD, 2016), portanto a aquisição das superfícies tridimensionais foi realizada através do uso de um scanner 3D FARO ARM Quantum (Figura 12), com precisão de até 0,02mm e com o limite de área escaneada limitado apenas por recursos computacionais (FARO LTD., 2017) esta ferramenta permitiu que as partes do aerogerador de referência fossem digitalizadas e analisadas individualmente (Figura 11) com equipamento específico (Figura 12).

Figura 11: Pás do Aerogerador de Referência (FD3.8-2.5kW)



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Figura 12: FARO Scan Arm Quantum.



Fonte: FARO Ltd., 2017

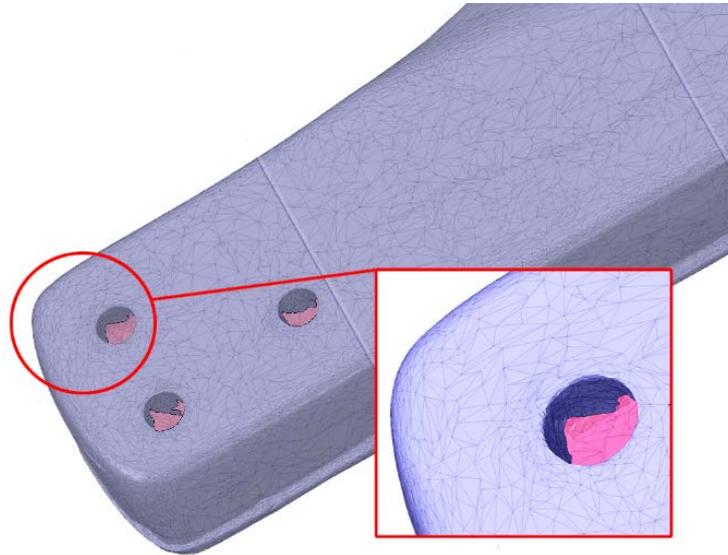
Figura 13: Perspectiva isométrica da geometria tridimensional do aerogerador de referência.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017

A superfície tridimensional gerada imediatamente pelo scanner 3D (Figura 13) não pode ser importada diretamente para o software Ansys Workbench, não apenas a malha tem número de elementos extremamente alto devido a precisão do scanner, mas também uma superfície extremamente caótica, conforme pode-se observar na figura a seguir (Figura 14).

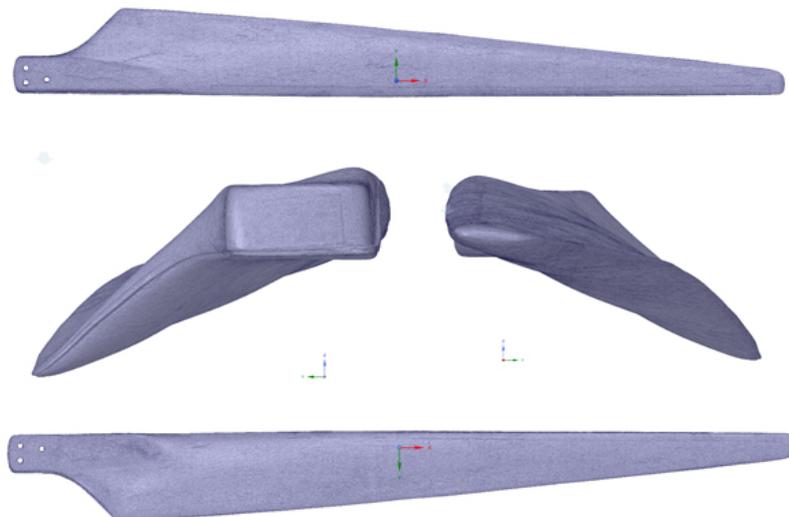
Figura 14: Detalhe da malha gerada automaticamente na porção de fixação da pá do aerogerador de referência.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

A figura a seguir (figura 15) mostra a vista superior, lateral esquerda e lateral direita da pá do aerogerador de referência conforme adquirida pelo scanner 3D. Posteriormente esta geometria terá de ser reprocessada e simplificada para o experimento de simulação (MOAVENI, 2014).

Figura 15: Vistas da imagem adquirida através do scanner 3D.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

A simplificação de algumas formas é parte importante dos processos de simulação afim de orientar a montagem do experimento e restringir o número de variáveis (POZRIKIDIS, 2016), portanto a topologia adquirida através do processo de digitalização foi reconstruída em softwares do tipo CAD para gerar um arquivo com formato e malha ideais para o uso no Ansys Workbench, coincidindo com o formato dos sólidos tridimensionais que representam a pá do aerogerador proposto.

3.2.2. Pá do aerogerador proposto

O aerogerador apresentado neste projeto tem como referência uma turbina eólica horizontal disponível comercialmente, produzido pela empresa Shandong Huaya LTDA, capaz de gerar 2,5 kW através de um rotor composto de 3 pás de fibra de vidro que transferem a energia cinética da massa de ar através de um conjunto redutor a um gerador elétrico. O motor-gerador, os componentes de transmissão, a torre e a carenagem do aerogerador foram mantidos, contudo foram projetadas novas pás para fins de pesquisa.

A partir da listagem das propriedades do aerogerador, as variáveis da equação (6) foram substituídas pelos valores declarados pelo fabricante afim de que sejam encontradas variáveis de projeto (como o resultado de C_p e λ) para estas dimensões e estes possam ser utilizados para o desenvolvimento de um novo projeto. Um dado importante não informado pelo fabricante é o coeficiente de potência do aerogerador, que foi obtido através da solução da equação (6), conforme:

$$2500 = C_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot 11,3 \cdot (12)^3 \therefore C_p = 0.20 \quad (11)$$

Assim verificou-se que este aerogerador de referência possui uma eficiência de 33,72% em relação ao limite estabelecido pela lei de Betz ($C_p = 0.593$), portanto encontra-se abaixo dos valores convencionalmente encontrados em aerogeradores mais modernos de acordo com Schubel e Crossley (2012), McCosker (2012) e Al-Abadi (2014). Não pertence ao escopo deste trabalho

analisar a razão determinante da eficiência do aerogerador de referência, o cálculo é realizado apenas para efeito comparativo a partir dos dados fornecidos pelo fabricante. É de comum acordo entre pesquisadores que fatores determinantes para a eficiência de um aerogerador incluem (mas não se limitam a) a seleção dos aerofólios, local de instalação, qualidade dos componentes geradores, forma das pás e do rotor, qualidade da superfície das pás, entre outros (HAU, 2006; HAYMAN, 2008; MCCOSKER 2012 e AL-ABADI, 2014).

O tamanho do gerador eólico pode ser o primeiro fator de restrição em um projeto de gerador de pequeno porte para áreas urbanas, pois o plano diretor de muitas cidades limita a altura máxima que uma determinada construção pode atingir, e, em alguns países, também exige uma determinada área mínima livre ao redor da máquina para a instalação de um aerogerador. Dados mostram que quanto maior a altitude, maior a velocidade do vento e portanto, maior o potencial de geração de energia (MCCOSKER, 2012).

Uma segunda restrição se dá a velocidade de rotação da turbina e a geração de ruído. Um grande número de rotações por minuto implica em maior velocidade radial das pás, o que implica na possibilidade do aerogerador ter a região da ponta da pá com velocidade muito elevada mesmo que a velocidade tangencial, próxima a base, seja considerada adequada ao projeto. Isto pode ocasionar quantidades de ruído, muitas vezes, acima dos limites aceitáveis em áreas urbanas (OERLEMANS, SIJSTMA e LOPEZ, 2007). A velocidade da ponta da pá também influencia no projeto no que se refere ao ângulo de passo e as demais equações onde o número de Reynolds for de importância (AL-ABADI, 2014).

A equação do potencial energético (6) do vento permite que sejam definidas as variáveis do coeficiente de potência (C_p), da velocidade do ar (v_1) e a área do rotor (S). O coeficiente de potência, conforme apresentado por Gundhoft (2009) e McCosker (2012), tem um limite de 0,593 (em acordo com os postulados de Betz), entretanto turbinas eólicas não-ideais alcançam valores entre 0,4 e 0,5 (AL-ABADI, 2014). Considerando que há uma potência alvo (2,5kW), uma mesma área de rotor e o coeficiente de potência indicando aproveitamento mais próximo ao ideal, decorrente da solução correta do conjunto de equações governantes da construção da pá, é possível redefinir a

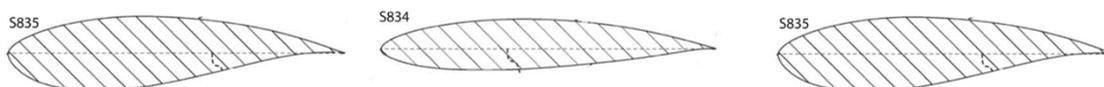
velocidade do vento necessária para a geração da mesma quantidade de energia (GUNDHOFT, 2009):

$$P_{vento}(2500W) = 0.4 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,2754 \cdot 11.3 \cdot v_1^3 \therefore v_1 = 9,53 \text{ m/s}^2 \quad (12)$$

Solucionando a equação de potencial energético do vento (6) é possível constatar que esta dimensão de rotor comercial é capaz de gerar a potência nominal do equipamento com velocidades de 9,53 m/s², considerando um coeficiente de potência maior decorrente da idealização teórica das equações, materiais e formas (OERTEL, ASFAW, *et al.*, 2010). A cautelosa seleção dos componentes e fatores de projeto não limitados pela dimensão física total do rotor (aerofólios, ângulos de passo e comprimento de corda) é determinante para que se obtenha a maior eficiência possível do modelo virtual (MCCOSKER, 2012).

Para a construção do rotor é importante selecionar um perfil aerodinâmico adequado as necessidades do projeto de aerogeradores, com grande resultante aerodinâmica e comportamento mais próximo do ideal na sessão da pá que ocupa. A NREL (2016), em seu relatório intitulado *The S833, S834, and S835 Airfoils* (SOMERS, 2002) apresentou um conjunto de aerofólios de baixo ruído e grande resultante aerodinâmica para pás de aerogeradores de pequeno porte. Este conjunto composto pelos aerofólios S833, S834 e S835 mostrou-se ideal para uso em aerogeradores com rotores entre 3 e 10 metros (Figura 16).

Figura 16: Conjunto de aerofólios NREL S833, S834 e S835.



Fonte: Adaptado de SOMERS (2002), 2017.

Utilizando as instruções apresentadas por SOMERS (2002) para o uso destes aerofólios, é necessário que as equações de comprimento de corda sejam solucionadas para as posições 40% (raiz, aerofólio S835), 85% (primário,

aerofólio S833) e 95% (ponta, aerofólio S834) afim de serem obtidos os valores essenciais para assegurar o desempenho do modelo. De acordo com Schubel e Crossley (2012), aerogeradores horizontais de três pás apresentam a maior eficiência com λ entre 6 e 9. Maiores valores de velocidade da ponta da pá resultam em menores ângulos de passo, entretanto, estes mesmos valores exigem maior velocidade do vento para operação e geram mais ruído e turbulência. Partindo do valor mínimo ideal (6), e analisando os dados expostos por McCosker (2012), é prudente realizar o projeto considerando índices de velocidade da ponta da pá maiores, pois não há perdas significativas em velocidades correspondentes a valores λ menores que o previsto e há maior linearidade do torque gerado pelo rotor (MCCOSKER, 2012).

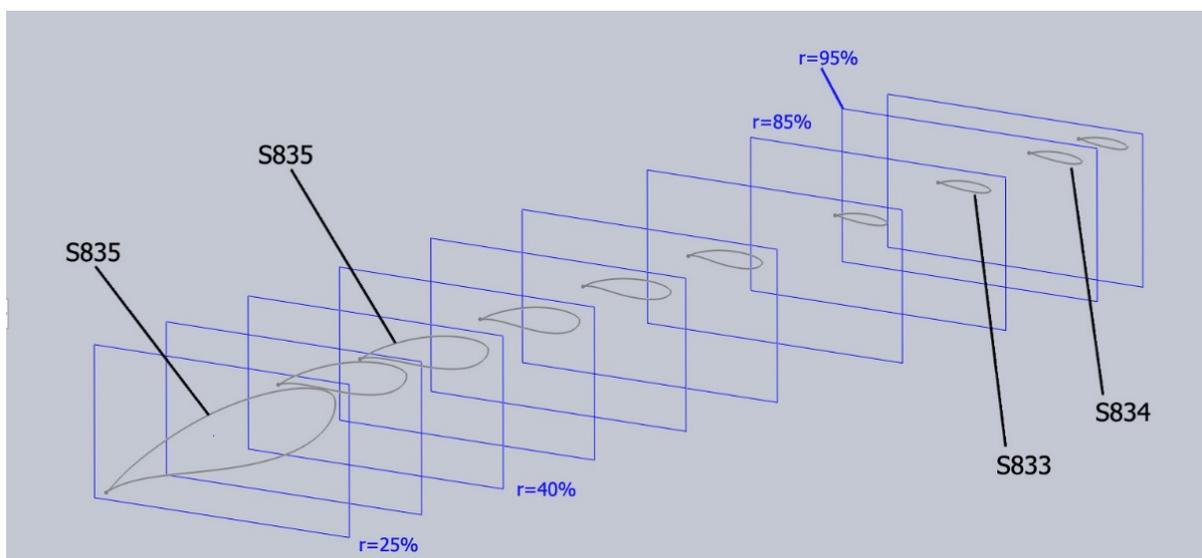
Considerando um índice de velocidade da ponta da pá intermediário entre os valores apresentados onde $\lambda = 7$, soluciona-se para ângulo de passo e comprimento de corda nas sessões conforme estipulado pelo conjunto de aerofólios NREL (2016) selecionado (SOMERS, 2002) e apresentado por McCosker (2012), é possível perceber que este fator de velocidade da pontada pá apresenta uma curva mais gradual de geração de energia que se estende até o valor limítrofe (9).

A solução das equações (6), (8) e (10) conforme apresentado por Gundhoft (2009), McCosker (2012) e Al-Abadi (2014) para passo e linha de corda nas seções indicadas por Somers (2002) se deu através de uma planilha elaborada para inserção e solução dos dados no software Excel 2016 uma vez que cada seção infinitesimal da pá pode ser calculada com os mesmos dados de entrada, foi utilizada esta ferramenta para permitir a solução facilitada das diferentes seções de aerofólio, de maneira similar a apresentada por (MCCOSKER, 2012).

As instruções do uso e posicionamento dos aerofólios NREL conforme apresentados por SOMERS (2002) determinam apenas 3 seções críticas para a solução dos cálculos e emprego da forma definida dos aerofólios, entretanto, para maior qualidade da geometria tridimensional, (SCHUBEL e CROSSLEY, 2012), houve a divisão da pá em 10 seções para possibilitar a construção da geometria, por restrições da ferramenta Loft do software SolidWorks (HOWARD e MUSTO, 2014).

A partir destes resultados foi possível projetar a pá do aerogerador a fim de gerar referência para a modelagem tridimensional. A Figura 23 apresenta uma vista em perspectiva da pá do aerogerador com as sessões críticas (SOMERS 2002) demarcadas junto dos aerofólios utilizados e os resultados das equações (8) e (10) solucionados e inseridos em cada sessão. As sessões críticas devem ocorrer respectivamente a 40%, 85% e 95% do raio total do rotor medido a partir de seu centro, o que não necessariamente representa o comprimento total da pá (MCCOSKER, 2012), a partir deste desenho preliminar, foi possível iniciar a modelagem tridimensional da peça (Figura 17).

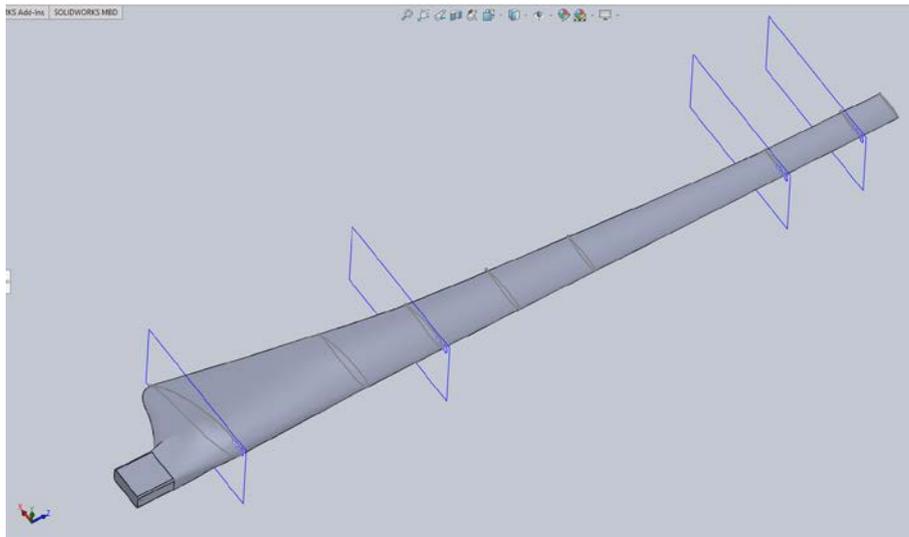
Figura 17: Posicionamento espacial dos aerofólios da pá do gerador proposto.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

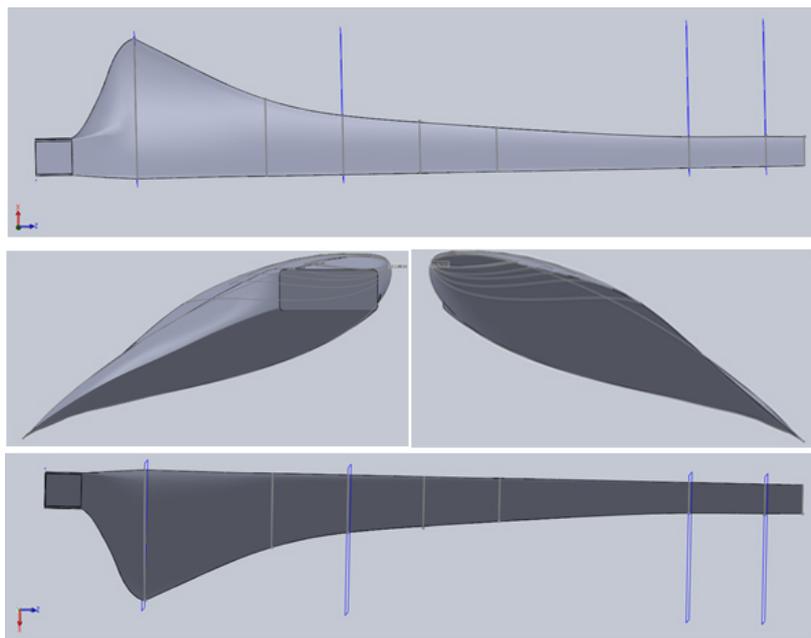
Utilizando o software de desenho assistido por computador (CAD) SolidWorks 2016, foi realizado o posicionamento das sessões da pá no espaço, conforme o resultado das equações, e geradas as sessões infinitesimais intermediárias a fim de completar a construção do sólido geométrico necessário para que sejam realizadas simulações tridimensionais (Figuras 18 e 19).

Figura 18: Vista isométrica da pá.



Fonte: elaborado pelo autor, 2017.

Figura 19: Vistas superior, lateral esquerda, lateral direita e inferior.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Das divisões realizadas, os pontos de destaque (marcados por planos em azul, nas imagens) correspondem, da base para a ponta da pá, nas posições locais (referidas em relação a porcentagem do raio local r) onde se estabelece o primeiro aerofólio na pá de referência ($r=25\%$) e nas posições estabelecidas por

SOMERS (2002) no uso de seus aerofólios, respectivamente $r=40\%$, $r=85\%$ e $r=95\%$.

Como apresentado anteriormente, o projeto do aerogerador proposto apresenta as medidas do aerogerador de referência, portanto a base do gerador e a pá do mesmo tem as mesmas medidas, bem como o ponto de apresentação plena do primeiro aerofólio ($r=25\%$) para fins de comparação (DIGRASKAR, 2010).

3.3. DOMÍNIO FLUIDODINÂMICO

Para o desenvolvimento de aerofólios e suas aplicações bem como para o desenvolvimento de carenagens e estruturas onde é necessário avaliar o comportamento das mesmas em relação a uma massa de ar em movimento, é normalmente necessário um túnel de vento. Dentro do túnel de vento as peças são posicionadas afim de que possam ser observadas e mensuradas as características necessárias e realizada a coleta dos dados com a maior precisão possível, para isto é importante o posicionamento correto do objeto a ser estudado em relação a massa de ar para que os fenômenos possam ser observados em sua totalidade sem interferência ou situações atípicas. Chama-se domínio o volume finito de fluido que interage com o objeto de estudo, no caso de um aerofólio em um túnel de vento, o domínio é todo o espaço de ar dentro do túnel, exceto pelo próprio volume ocupado pelo aerofólio (SHAFFARCZYK, 2014).

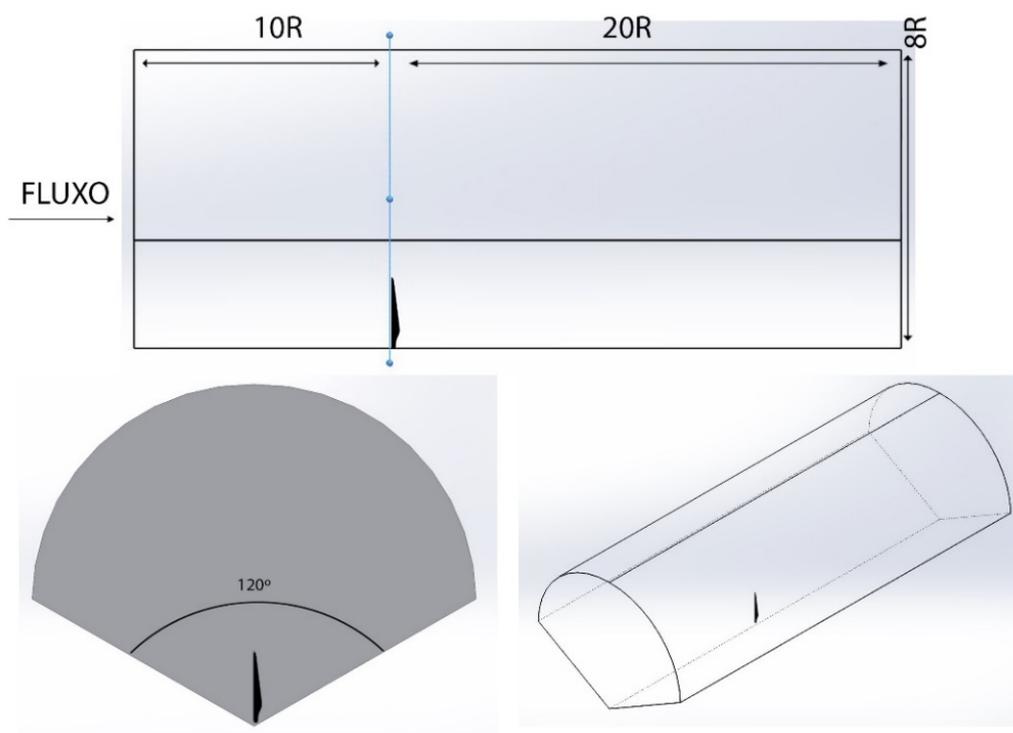
O comportamento de um fluido dentro de um espaço confinado (túnel de vento, encanamento, etc.) é diferente do mesmo livre em condições atmosféricas (sem paredes delimitadoras), onde as barreiras físicas não criam interações desnecessárias, alterações no comportamento do fluido ou turbulência indesejada (FOX, MCDONALD, *et al.*, 2014).

Para que o fluxo de ar se normalize entre a pá que está sendo testada o limite físico do túnel de vento, este é construído com dimensões muito maiores do que o objeto de estudo. (MUNSON, ROTHMAYER, *et al.*, 2012).

Na simulação fluidodinâmica computacional o mesmo acontece, deve se construir um volume de controle representando o fluido e excluir deste volume o volume ocupado pelo objeto a ser testado (AL-ABADI, 2014). Este domínio deve ser completamente sólido (no que diz respeito ao seu aspecto como modelo tridimensional) (KEERTHANA, SRIRAMKRISHNAN, *et al.*, 2012), no software ANSYS Workbench 15 é possível determinar todas as características do domínio antes do início da simulação, da mesma forma que na operação de um túnel de vento convencional tais como as velocidades do ar, densidade do mesmo, temperatura, modelo de turbulência a ser solucionado e demais características necessárias para a simulação (LAWRENCE, 2012).

O domínio para análise do rotor do aerogerador tem de ser cilíndrico, para representar adequadamente a área varrida pelas pás, e ter comprimento e zonas posterior e anterior a superfície dos aerofólios conforme o estabelecido pelos estudos aerodinâmicos tradicionais. AL-ABADI (2014) Descrevem um modelo de domínio para simulação fluidodinâmica computacional que atende as especificações necessárias e reduz o tempo de processamento assumindo a simetria do elemento de análise, considerando que o sólido representa uma fatia de um rotor que foi dividido igualmente entre a área varrida pelo número de pás, com dimensões anterior e posterior ao bordo de ataque dos aerofólios determinada pela medida do raio total do rotor (R), estas dimensões foram determinadas para garantir que não haja interação entre o fluido em análise e os limites do domínio (BEYER, 2012), conforme a figura (20) a seguir.

Figura 20: Domínio para análise fluidodinâmica computacional das pás.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Para alcançar os dados necessários nos testes de aerogeradores, AL-ABADI (2014) mostra que o domínio tem como referência para suas dimensões o raio do rotor e pode ser construído de maneira simplificada ao se utilizar de um modelo de uma única pá e em formato de leque de 120° a partir do centro do rotor, solucionando a análise para uma única pá e replicando o mesmo resultado para as demais, pois o rotor é um objeto simétrico. Além do formato de leque, o domínio precisa ter $10R$ (onde R é o raio do rotor, neste caso, $1,9\text{ m}$) de distância entre a entrada de ar e a pá para que a simulação possa estabelecer que o fluido atingiu escoamento plenamente desenvolvido, e $20R$ após a pá, para que se possa analisar o comportamento do fluido após interagir com o rotor. No sentido perpendicular a pá, a distância é resultante de uma derivação de 60° para ambos os lados, tendo o aerofólio como centro. O limite superior deve ter $8R$ em relação ao centro do rotor para que não existam interferências nos cálculos referentes ao comportamento do fluxo de ar da ponta da pá.

3.4 METODOLOGIA

Para a realização dos experimentos de Dinâmica de Flúidos Computacional (DFC) analisando a pá do aerogerador de referência e realizando levantamento de dados para comparação com a pá proposta nesse trabalho nas mesmas condições, é necessário que dois processos diferentes sejam utilizados para a geração das geometrias tridimensionais de estudo. Para a pá do aerogerador FD3.8-2.5Kw foi realizada a aquisição da superfície através de um scanner tridimensional (modelo FaroArm, fabricado pela 3D Systems) e em seguida reconstruído em software CAD (Ansys SpaceClaim 2016) para gerar geometria em formato compatível com o software de análise Ansys Workbench e seus módulos DFC, para o gerador proposto, a solução dos cálculos conforme apresentados por Gundhoft (2009), McCosker (2012) e Al-Abadi (2014) e a construção no SolidWorks 2016 (software do tipo CAD) geraram geometria compatível com os requisitos para a simulação. O domínio utilizado em ambas as pás foi também, gerado no software SolidWorks 2016.

3.4.1. Processo de solução de problemas de DFC

O processo de simulação realiza um número de iterações para simular o fluxo de ar atmosférico sobre a pá do aerogerador. Conforme práticas citadas na bibliografia, o processo não é interativo, portanto o número de passos a serem calculados e simulados deve ser definido (MOAVENI, 2014) visando a convergência dos resultados e a geração de volume suficiente de dados para análise (KEERTHANA, SRIRAMKRISHNAN, *et al.*, 2012). Entretanto estes valores variam conforme a dimensão e complexidade dos experimentos de DFC. É possível continuar os cálculos a partir de resultados anteriores caso não haja convergência, haja intenção de modificar os cálculos ou sejam necessários mais dados, este processo, entretanto é lento, visto que consome grande número de recursos computacionais (HIRSCH, 2008). A dinâmica de flúidos computacional

tem um fluxograma comum a todos os métodos de solução e consiste em 3 etapas, pré-processamento, resolução e pós-processamento.

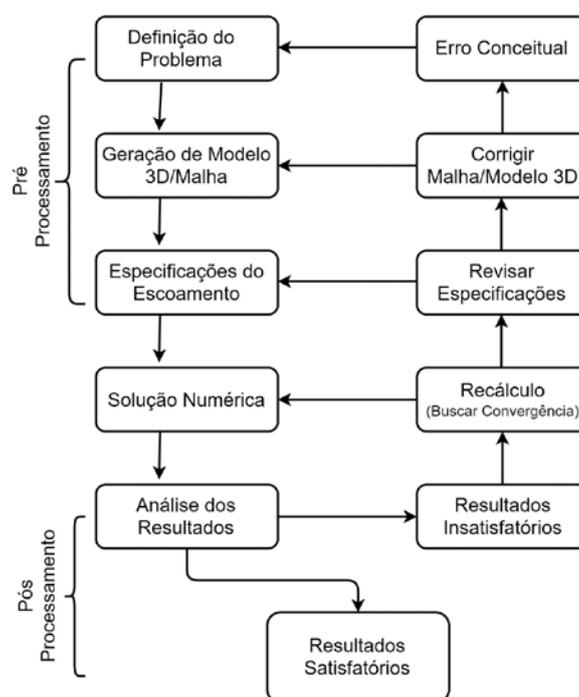
O pré-processamento consiste na aquisição de dados, a definição da entrada de dados que irá alimentar o programa (*solver*) e a concepção do escopo do problema que definirá as fronteiras entre as regiões sólidas e o escoamento. Nesta etapa é adquirido ou gerado o modelo geométrico e, subsequentemente a malha de elementos geométricos discretizados que será utilizada pelo software para solucionar as equações. Esta é a etapa que contém a entrada de dados sobre o fenômeno a ser tratado, as propriedades dos fluídos e as condições de contorno adequadas a fronteira do domínio. Há de se determinar também os parâmetros de simulação (duração, número de iterações, precisão e demais fatores).

A etapa de solução é completamente dependente dos dados estabelecidos no pré-processamento pois é completamente automatizada nos softwares comerciais (BEER, 2015). A geometria é gerada internamente ou importada de um software de desenho auxiliado por computador (CAD) que gere dados adequados e compatíveis com o software que será utilizado para os cálculos. A precisão e os requisitos computacionais dos problemas de dinâmica de fluídos estão diretamente ligados a qualidade dos dados inseridos no software de simulação e a qualidade e quantidade de células da malha tridimensional (FOX, MCDONALD, *et al.*, 2014). Quanto maior o número de elementos ou complexidade da malha, maior o tempo de processamento de dados (e maior a precisão da solução), é necessário, entretanto, haver equilíbrio entre o volume de dados e o custo da operação em relação a tempo e maquinário para se obter os resultados necessários. Para otimizar o uso de recursos existem algoritmos que permitem que as malhas sejam refinadas em zonas de maior interesse ou onde há maior interação entre as fronteiras. O conhecimento do usuário é determinante na etapa de pré-processamento e dele depende diretamente a resolução (BEER, 2015).

A etapa de resolução é onde as equações diferenciais são integradas na região de interesse por métodos matemáticos de aproximação (método dos Volumes Finitos) acontece a conversão das integrais em equações algébricas que são solucionadas iterativamente (BEER, 2015).

A etapa de pós-processamento é quando o usuário tem acesso aos dados oriundos da solução. Nos programas de computador estão incluídas ferramentas para análise (emissão de relatórios, gráficos, animações e demais ferramentas de visualização complementares) (DILL, 2011). Este grande número de facilidades presentes nos programas de DFC atuais é importante para que haja entendimento por parte do operador sobre o problema. A solução gerada, a consistência do esquema numérico, a compreensão do caso estudado e a comparação dos resultados com a realidade técnica é essencial para a solução correta do problema (FOX, MCDONALD, *et al.*, 2014). A imagem a seguir (figura 21) apresenta as etapas para solucionar problemas de DFC na forma de um fluxograma.

Figura 21: Diagrama do processo de DFC.



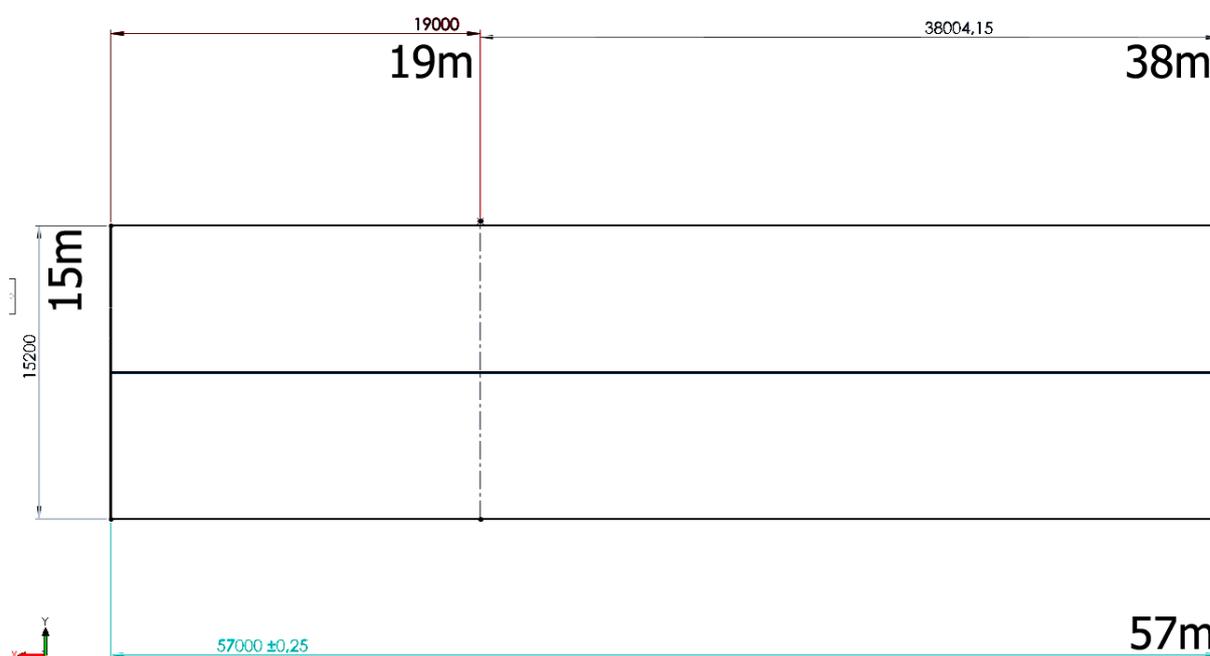
Fonte: Adaptado de BEER (2015), 2017.

3.4.2. Construção do domínio

A construção do domínio a ser utilizado para os experimentos em ambas as pás segue as práticas apresentadas por (AL-ABADI, 2014), sendo posteriormente aplicado a cada uma das diferentes geometrias geradas.

O domínio deve compreender a atmosfera ao redor do aerogerador, tendo o raio total (R) como medida principal, o que resulta em um domínio sempre proporcional ao aerogerador analisado (AL-ABADI, 2014). Para a construção do domínio foi utilizado o software SolidWorks 2016, que gera arquivos em formatos compatíveis com o pacote de softwares Ansys Workbench 15. A imagem a seguir (figura 22) mostra o domínio e suas respectivas dimensões.

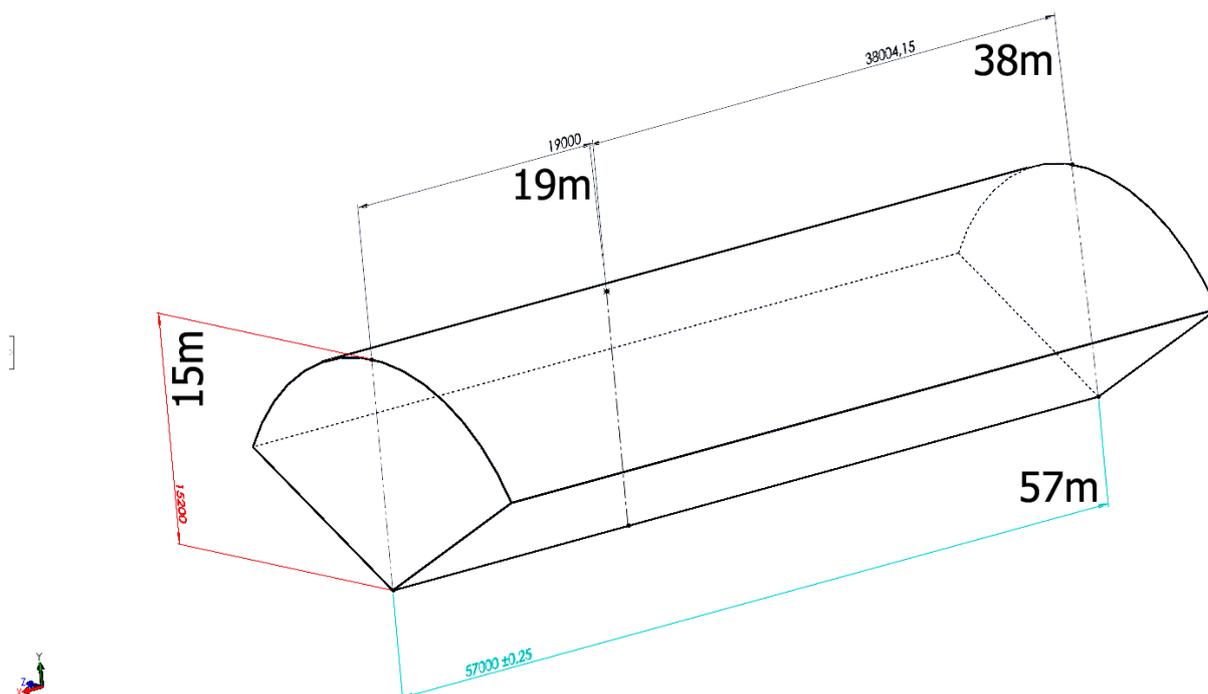
Figura 22: Dimensões do domínio para os experimentos de DFC.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Uma vez que a pá do aerogerador tem um comprimento limite de 1,9 metros, conforme o estabelecido por (AL-ABADI, 2014) e pesquisas anteriores (BEYER, 2012), é necessário que a altura do domínio seja de 15,2 m (8 R, sendo $R=1,9$ m), que a distância entre a entrada do fluido e a pá seja de 19 m (10 R) e posterior a pá, conseqüentemente 38 m (20R), o comprimento total do domínio é de 57 m (30 R). A Figura 23, a seguir mostra o domínio em perspectiva, com as medidas relativas.

Figura 23: Vista isométrica do domínio para os experimentos de DFC.



Fonte: Elaborado pelo autor.

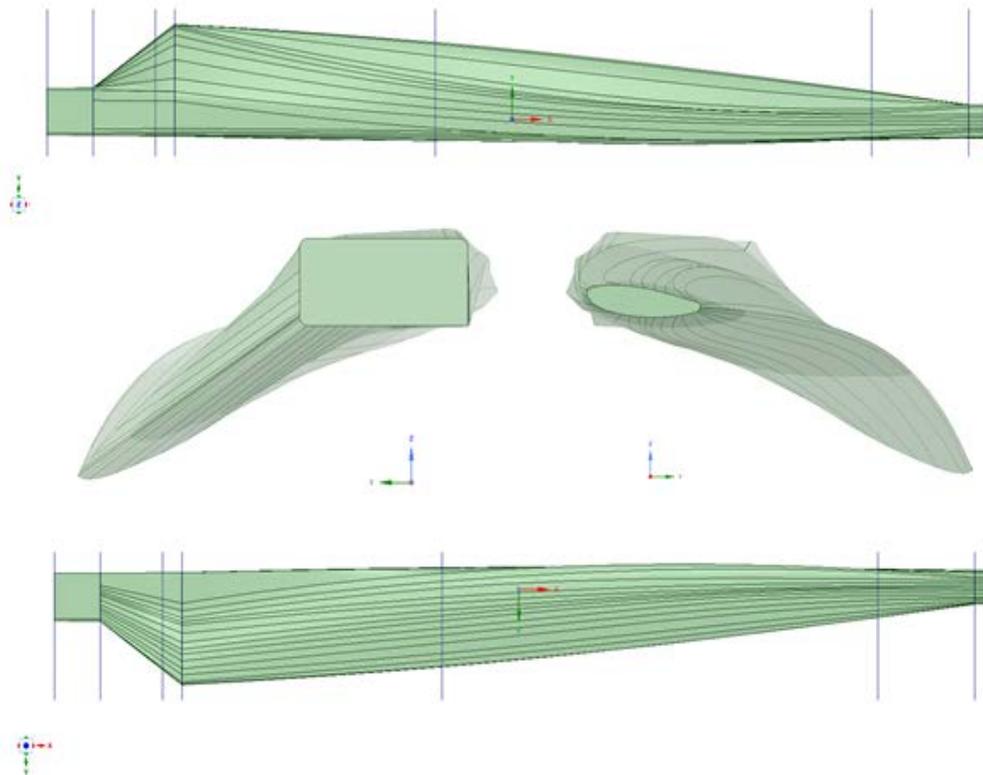
O domínio representa 1/3 de um cilindro (em proporção ao diâmetro do rotor), uma vez que serão analisadas as propriedades aerodinâmicas de uma única pá que compõe um conjunto de 3 pás simétricas. A simulação do rotor completo não está no escopo deste trabalho, entretanto Hirsch (2008), Digraaskar (2010), Al-Abadi (2014) e Fox (2014) demonstram que é possível assumir que o resultado para o conjunto completo pode ser obtido a partir desta simplificação e que as simplificações são parte do estudo para a previsão de fluxos fluidodinâmicos uma vez que estes possuem um grande número de equações complexas que exigem grande capacidade de processamento para serem solucionados.

3.4.3. Malha para análise da pá de referência

O modelo tridimensional a ser utilizado pelo software de DFC deve receber adequações em relação a topologia de referência adquirida automaticamente, pois esta possui número desnecessariamente elevado de elementos tridimensionais que não estão organizados conforme as zonas de

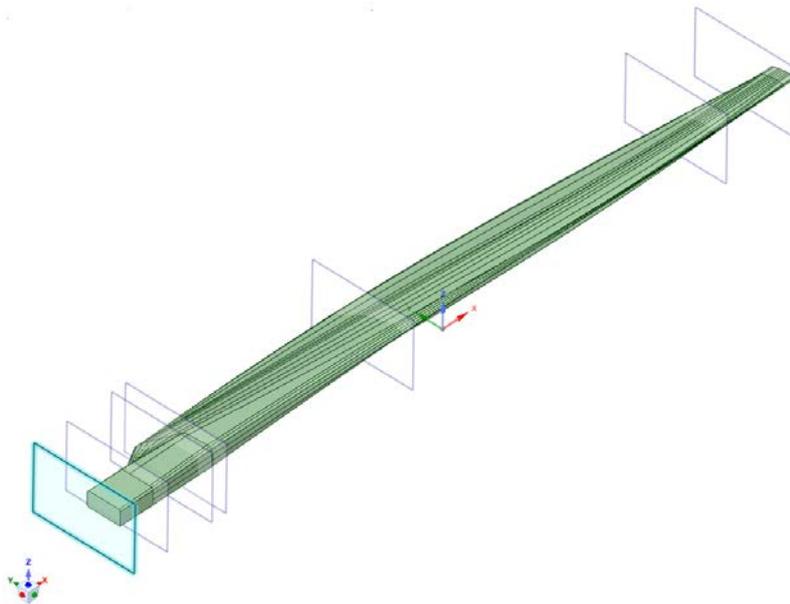
maior interesse para a execução dos cálculos, gerando densidade irregular na malha tridimensional (BEER, 2015). O software Ansys SpaceClaim 2016 foi utilizado para o processo de simplificação e organização da malha, reduzindo o número e densidade de elementos para estabelecimento de condições favoráveis ao experimento (LAWRENCE, 2012) através da técnica de retopologia, onde a superfície tridimensional é reconstruída com um número menor de elementos. As formas simplificadas ainda mantêm as dimensões e ângulos do modelo original e podem ser visualizadas nas imagens (figura 24 e 25) a seguir:

Figura 24: Vistas da pá de referência reconstruída no software Ansys SpaceClaim 2016.



Fonte: elaborado pelo autor.

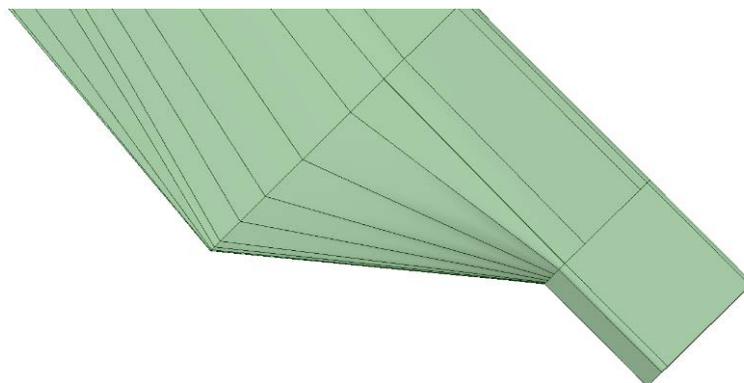
Figura 25: Perspectiva isométrica do modelo tridimensional reconstruído.



Fonte: elaborado pelo autor, 2017.

A figura 26 (abaixo) mostra que foram omitidos os pontos de fixação da pá no rotor. Este nível de simplificação diminui o uso de recursos computacionais e reduz a complexidade do experimento em uma área onde não há interesse aerodinâmico (KAMINSKY, FILUSH, *et al.*, 2012). As forças mecânicas e suas interações no mecanismo de simulação não estão compreendidas no escopo deste trabalho e, portanto, não serão apresentadas nos modelos ou discutidas no decorrer dos experimentos.

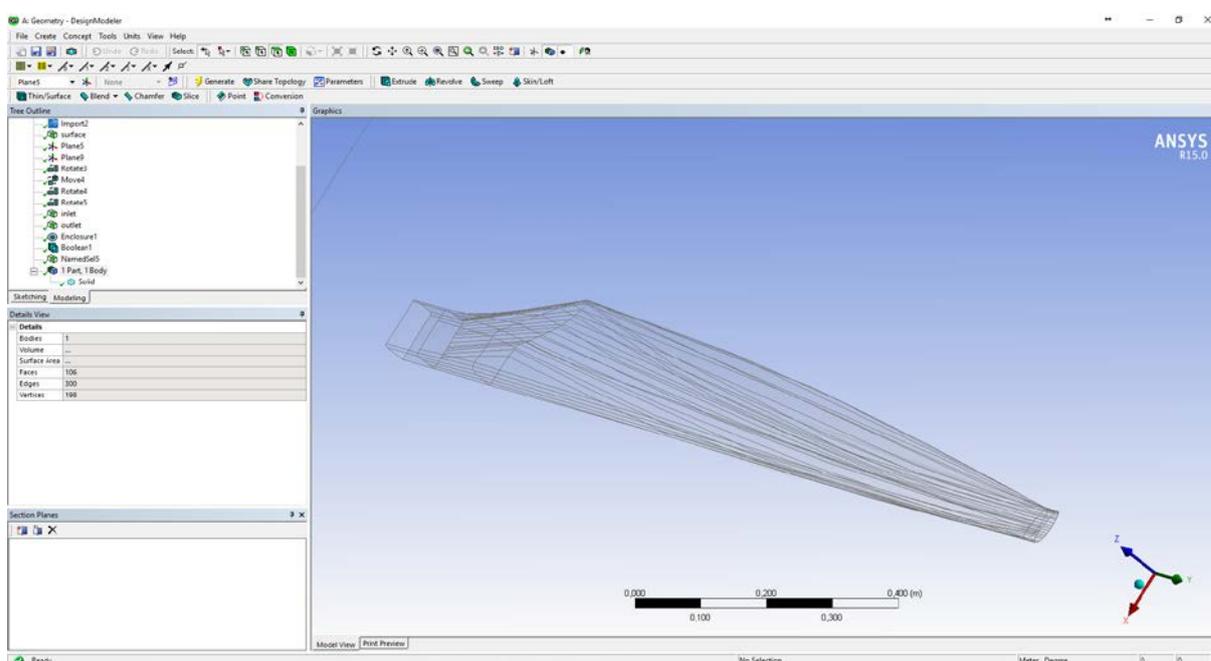
Figura 26: Detalhe (zoom) da base da pá do aerogerador mostrando a malha simplificada e organizada.



Fonte: elaborado pelo autor, 2017.

A partir da malha reconstruída de maneira apropriada para a realização do experimento de simulação fluidodinâmica é possível importar os dados para o software Ansys Workbench 15 e iniciado o processo de discretização e conversão da geometria para a realização dos experimentos. Este processo ocorre em duas etapas, a primeira é a verificação da geometria (módulo Design Modeler), conforme apresentado na figura 27, a seguir:

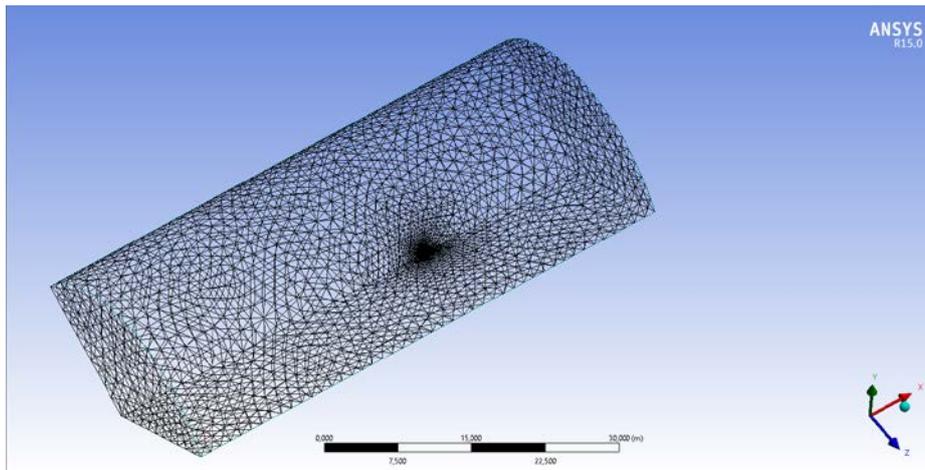
Figura 27: Geometria de referência na interface do Design Modeler.



Fonte: elaborado pelo autor, 2017.

Após o processo de verificação o volume de controle é integrado a geometria de referência e os dados são exportados para o módulo Meshing, para conversão da geometria de engenharia para a geometria de cálculo de volumes finitos. O resultado é um sólido multifacetado (malha não-estruturada) gerado a partir da introdução de critérios de discretização tais como tamanho mínimo e máximo, formato (tetraedro, hexaedro) e demais características para que o software faça a reconstrução através de um algoritmo interno (figura 28).

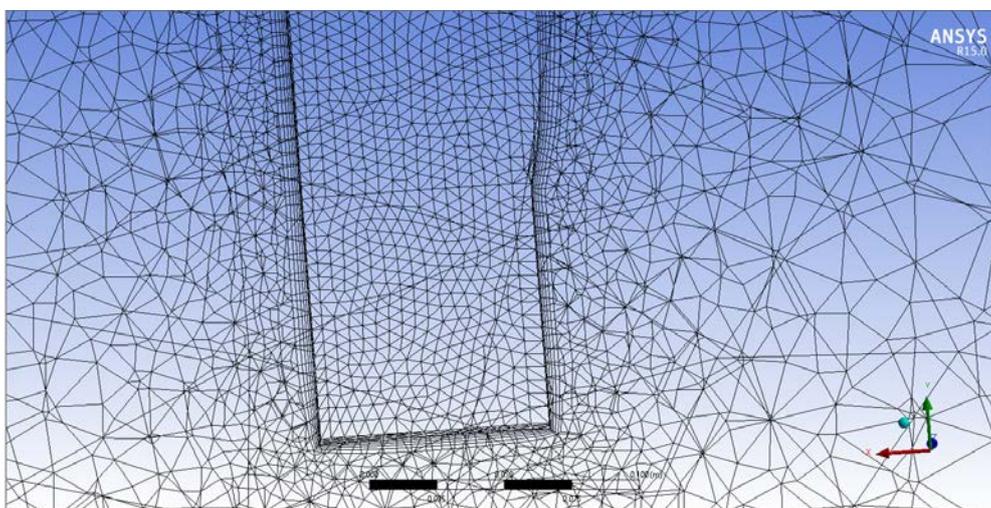
Figura 28: Malha tridimensional do domínio gerada pelo Ansys Meshing.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

A figura 29 mostra a malha tridimensional do domínio e pá conforme gerada pelo software, é possível perceber o aumento de densidade no contorno da pá, o software permite que, através da determinação prévia de zonas no momento da importação da geometria (Módulo Design Modeler), parâmetros sejam estabelecidos para obtenção de maior densidade (e, portanto, maior precisão) próximo a regiões de maior interesse. A progressão entre a camada de prisma e escala no tamanho dos elementos da malha pode ser vista em detalhe a seguir.

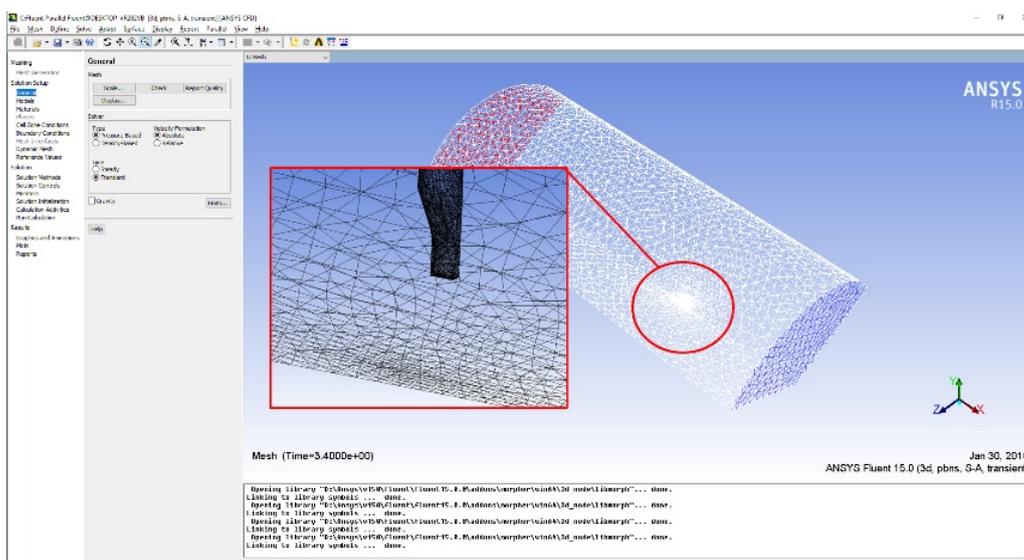
Figura 29: Detalhe da malha tridimensional na superfície da base do aerofólio.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Uma vez que a malha encontra-se estruturada adequadamente para o experimento, conforme os critérios estabelecidos anteriormente (FOX, MCDONALD, *et al.*, 2014), é exportada para o módulo Fluent, software para DFC que irá aplicar as equações selecionadas a todos os pontos da malha e gerar os resultados a serem analisados. A interface do Fluent segue o padrão dos outros módulos e apresenta a malha com as zonas de interesse codificadas por cor, a cor azul marca os pontos definidos como zona de entrada (*velocity inlet*) e a zona demarcada pela cor vermelha a saída (*pressure outlet*), estabelecendo o fluxo de ar na direção do bordo de ataque dos aerofólios (BEER, 2015). A figura 30 apresenta a interface do módulo Fluent e a interface entre a pá e o domínio destacada em detalhe.

Figura 30: Interface do Fluent e malha tridimensional compreendendo a pá de referência e domínio.



Fonte: elaborado pelo autor, 2017.

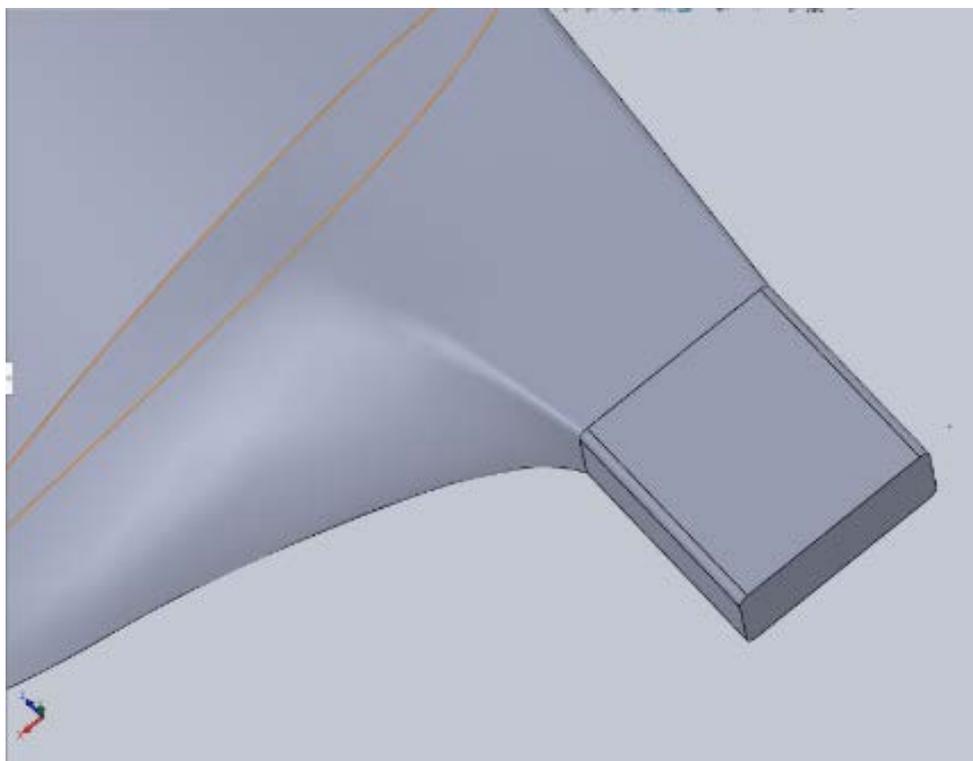
A malha discretizada contendo o conjunto formado pelo domínio e a pá do aerogerador de referência é composta de 202.521 nodos e 872.618 elementos, majoritariamente tetraédricos. O número maior de elementos é decorrente da complexidade inerente da malha tridimensional que é obtida através do scanner 3D e do processo de reconstrução (BEER, 2015). Uma vez que o controle da quantidade total de nodos e elementos em uma malha do tipo

não-estruturada é dado pelos dados de entrada, estas informações garantem a semelhança na distribuição da densidade da malha e qualidade dos resultados conforme Digraskar (2010), McCosker (2012) e Al-Abadi (2014).

3.4.4. Malha para análise da pá proposta

A compatibilidade da malha gerada matematicamente, diferente da aquisição tridimensional, permite que haja um nível de detalhe maior transferido para o software de análise, mesmo após o processo de simplificação (BEER, 2015). O modo de construção da geometria difere da aquisição e reconstrução dos volumes tridimensionais, gerando superfícies tridimensionais orientadas matematicamente, o que resulta em uma suavidade maior nas formas como pode ser observado no detalhe (Figura 31). A porção base responsável pela estrutura de fixação recebeu o mesmo tratamento da pá do gerador de referência, sendo também omitida.

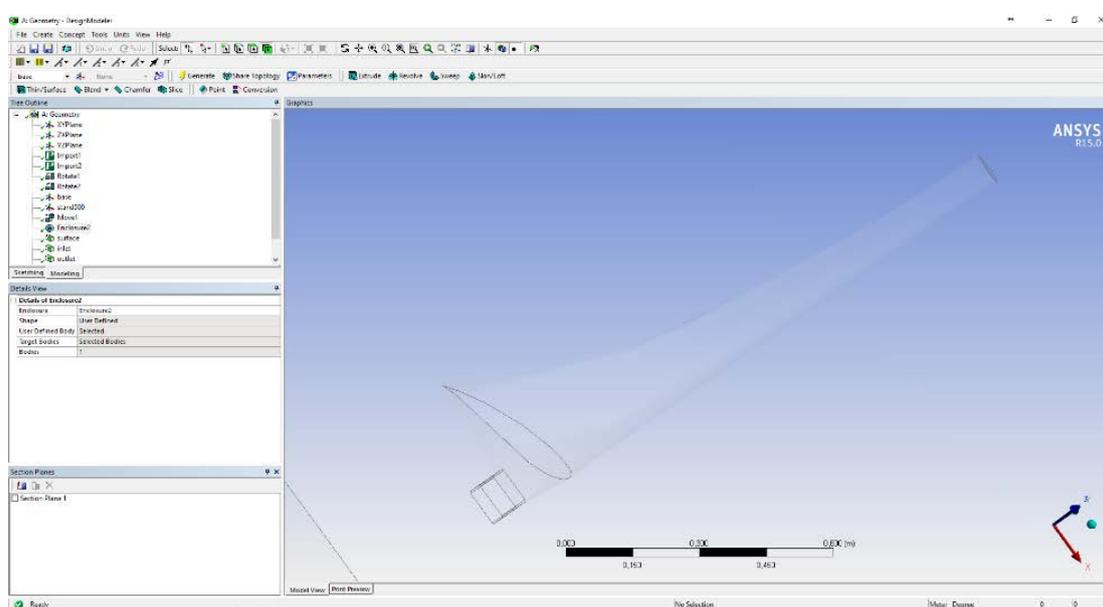
Figura 31: Detalhe (zoom) da base da pá do aerogerador proposto.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

A seleção e determinação dos fatores não limitados pelas dimensões gerais do aerogerador (raio total do rotor) é essencial para o desempenho das pás (MCCOSKER, 2012), o experimento de DFC entretanto é constituído das mesmas etapas e exige que a geometria tridimensional seja submetida aos mesmos procedimentos para comparação válida dos resultados (LAWRENCE, 2012). A primeira etapa é novamente transpor a geometria para o Ansys Workbench 15, dentro do módulo Design Modeler (Figura 32).

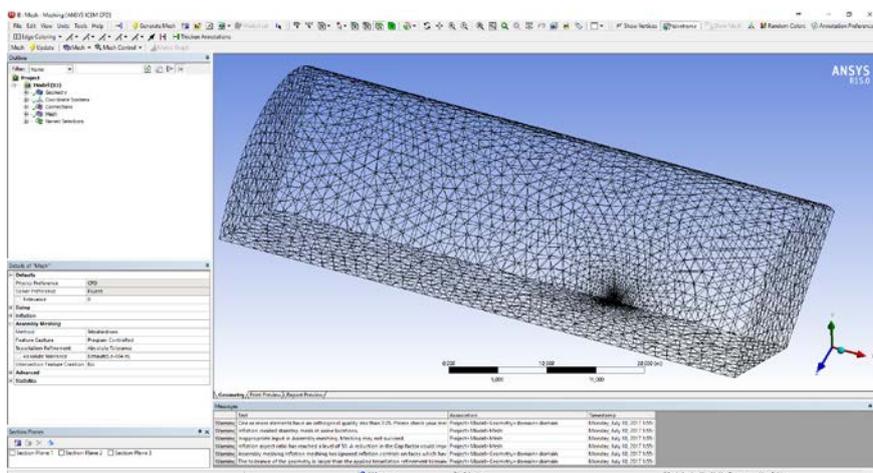
Figura 32: Malha tridimensional da pá proposta dentro da interface Design Modeler.



Fonte: elaborado pelo autor, 2017.

Na figura 32 é possível observar o benefício na geometria tridimensional gerada de maneira puramente matemática, uma vez que o sólido exportado possui um pequeno número de elementos e divisões, o que reduz a necessidade e uso de recursos computacionais (LAWRENCE, 2012). Após o estabelecimento da geometria para o experimento, a próxima etapa é iniciar a construção da malha discretizada.

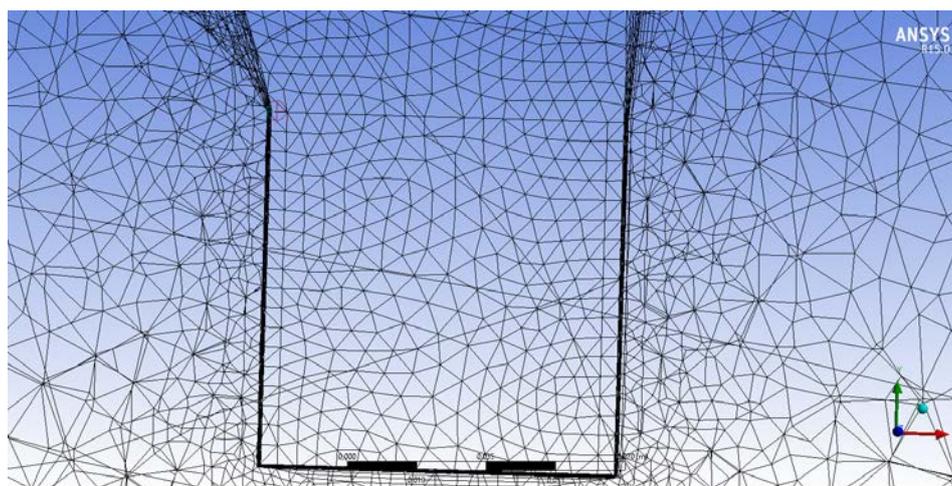
Figura 33: Malha tridimensional do domínio fluidodinâmico e pá do aerogerador proposto.



Fonte: elaborado pelo autor, 2017.

A figura 33 mostra a malha tridimensional do domínio e pá conforme gerada pelo software, é possível perceber maior número de elementos no contorno da pá, induzindo assim um maior número de cálculos e maior precisão no ponto de maior interesse do domínio por parte do software. A progressão entre a camada de prisma e escala no tamanho dos elementos da malha pode ser vista em detalhe na figura 34 (a seguir).

Figura 34: Detalhe do tamanho incremental dos elementos na base da pá.



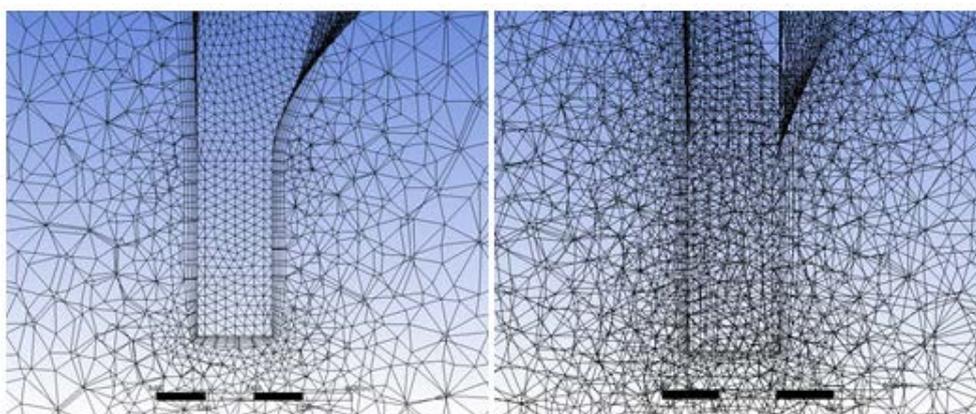
Fonte: elaborado pelo autor, 2017.

conforme (BEER, 2015). Para isto foram utilizados parâmetros para a geração da Camada de Prisma, malha que utiliza crescimento controlado para geração gradual de elementos simétricos e proporcionais a partir de um limite pré-estabelecido pelo pesquisador (neste caso, a superfície da asa, onde encontra-se a camada de fluxo laminar) para que não haja desperdício de recursos computacionais e de tempo realizando menor número de cálculos de grande precisão em áreas de menor interesse (limites do domínio, compostos por elementos maiores).

3.5 PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO

O projeto tridimensional é inserido no pacote de aplicativos ANSYS Workbench 15 e utilizando as ferramentas nativas é convertido através de algoritmos matemáticos na forma de malha poligonal a ser utilizada nas simulações. Para a análise das pás, tanto a pá do gerador proposto quanto a pá do gerador de referência foram inseridas no software e submetidas aos mesmos parâmetros do algoritmo de construção (*meshing*) da malha de elementos finitos. As malhas tridimensionais resultantes do processo podem ser vistas comparativamente na figura a seguir (Figura 36):

Figura 36: Comparação entre as duas malhas, a esquerda aerogerador de referência, a direita, aerogerador proposto.



Fonte: elaborado pelo autor, 2017.

Ainda que o número total de polígonos seja diferente por conta das diferentes geometrias, é possível observar que o software gerou malhas com

geometrias similares devido a inserção criteriosa dos parâmetros para a geração da malha tridimensional a partir das topologias tridimensionais.

As malhas utilizadas receberam as mesmas configurações quanto as condições de contorno, a simulação possui uma única fase constituída de ar atmosférico. O ar foi configurado como gás ideal com temperatura de 288 K, com pressão de 0 Pa, densidade de 1.225 kg/m^3 e velocidade de 10 m/s. Foi utilizado o modelo de equação de turbulência Spalart-Allmaras de uma única equação, conforme recomendado por pesquisas anteriores (DIGRASKAR, 2010; MCOSKER, 2012; AL-ABADI, 2014; FOX, 2014). A saída do domínio possui pressão de 0 Pa, não oferecendo resistência alguma ao fluxo. As paredes do domínio e a superfície da pá foram configuradas como sólidos conforme as opções padrões do software (LAWRENCE, 2012).

A configuração para a geração da malha de elementos foi orientada para construir elementos tetraédricos, com elementos prismáticos distribuídos de maneira uniforme em toda a superfície exposta as condições de contorno, em 5 camadas com uma razão de crescimento de 20%. Os dados inseridos para o cálculo fazem parte do banco de dados disponível no software Ansys Workbench 15 no que diz respeito às características dos fluídos nas condições normais de temperatura e pressão. A velocidade de entrada foi definida utilizando parâmetros meteorológicos (ABEEÓlica, 2015 *apud* MME, 2014) e experimentos anteriores (DIGRASKAR, 2010) como referência. Ela reflete as condições do local de instalação, conforme recomendado por Hau (2006), Schubel e Crossley (2012) e AL-ABADI (2014). O fabricante do aerogerador estabelece que a condição para a geração dos 2.5KW de potência nominal são ventos de 12m/s, entretanto as pesquisas de Schubel e Crossley (2012) e McCosker (2012) demonstram a importância dos experimentos e medições realizados nas condições de instalação do aerogerador, uma vez que estas são mutáveis e apresentam a capacidade real de geração de energia (MANWELL, MCGOWAN e ROGERS, 2009) A simulação de ambos os geradores nas mesmas condições obedece as práticas estabelecidas em inúmeros experimentos similares, conforme apresentado por Oertel (OERTEL, ASFAW, *et al.*, 2010), Digraskar (2010) e Summer (SUMMER, WATTERS e MASSON, 2010).

4 RESULTADOS

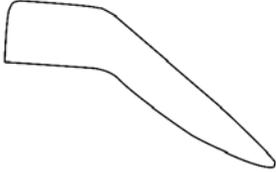
Sendo aerogeradores máquinas que operam principalmente em decorrência da sustentação gerada nas pás (FOX, MCDONALD, *et al.*, 2014), apresentam-se a seguir os resultados das simulações fluidodinâmicas computacionais. A primeira parte da análise consiste no levantamento entre as diferenças de geometria dos aerofólios utilizados, ângulos de ataque e dimensões físicas das pás.

Foram analisadas as características de distribuição de pressão e velocidade do ar nas superfícies das sessões de aerofólios destacadas por Somers (2002) a fim de comparar as características dos diferentes desenhos das pás e mensurar os resultados das forças de sustentação para indicar dados que indiquem o potencial e geração de energia.

4.1. DIFERENÇA ENTRE PERFIS AERODINÂMICOS

O pesquisador Somers (2002) estabelece que os aerofólios S-835, S-833 e S-834 devem ocupar plenamente desenvolvidos as posições equivalentes a 40%, 85% e 95% do raio total do rotor. O aerogerador de referência não traz em seus manuais os aerofólios utilizados, mas apresenta como característica um aerofólio parcialmente desenvolvido presente junto com a porção estrutural da pá na posição $r=25\%$. A seguir são comparadas as seções correspondentes a 25%, 40%, 85% e 95% da pá em vista de corte e as características destes aerofólios (Tabela 2).

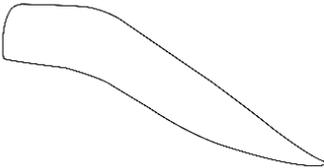
Tabela 2: Comparação entre aerofólios na posição $r=25\%$, aerogerador de referência e aerogerador proposto.

	Referência	Proposto S835
Aerofólio $r=25\%$		
Ângulo de Passo (β)	29,3°	25,67°
Comprimento de Corda (c)	0,22 m	0,37 m

Fonte: elaborado pelo autor, 2017.

É compreensível que a porção raiz da pá seja comprometida em sua aerodinâmica em um trecho que compreende habitualmente 10% (SCHUBEL e CROSSLEY, 2012) do comprimento total. Pode-se observar que o aerofólio de referência possui ainda resquícios da porção estrutural (HAU, 2006), provavelmente uma necessidade imposta pelo material de construção do aerogerador referido (fibra de vidro). Os autores optaram por utilizar o aerofólio S-835 plenamente desenvolvido neste ponto para observar o impacto desta seção na eficiência total da pá em relação a suas características aerodinâmicas (AL-ABADI, 2014). A Tabela 3, a seguir, apresenta as vistas comparativas na posição $r=40\%$.

Tabela 3: Comparação entre aerofólios $r=40\%$, aerogerador de referência e aerogerador proposto.

	Referência	Proposto S835
Aerofólio $r=40\%$		
Ângulo de Passo (β)	16,5°	7,16°
Comprimento de Corda (c)	0,16m	0,14m

Fonte: elaborado pelo autor, 2017.

Na posição $r=40\%$ é possível observar que ainda não há desenvolvimento pleno do aerofólio na pá de referência, sua forma ainda é afetada pela porção estrutural (Tabela 3). Na pá proposta pelos pesquisadores observando as instruções de Somers (2002) e considerando a ausência de instruções sobre os aerofólios do equipamento de referência, esta posição também foi salientada para fins comparativos e apresenta um aerofólio plenamente formado. As características aerodinâmicas diferem em decorrência do comprimento de corda, que é de 0,16m na referência e 0,14 no gerador proposto, bem como o ângulo de ataque (α), particular de cada aerofólio e ajustado conforme determinado conceitualmente pelo projetista (AL-ABADI, 2014). Há uma grande diferença entre os ângulos de passo, entretanto dada a superfície diferente do aerofólio, conforme pode ser observado na Tabela 4, a seguir:

Tabela 4: Comparação entre aerofólios na posição $r=85\%$, aerogerador de referência (a) e aerogerador proposto (b).

	Referência	Proposto S833
Aerofólio $r=85\%$		
Ângulo de Passo (β)	6,2°	0,39°
Comprimento de Corda (c)	0,086m	0,077m

Fonte: elaborado pelo autor, 2017.

A porção ocupada pelo aerofólio primário é a que compreende o maior comprimento da pá conforme apresentado por McCosker (2012), ambas as pás apresentam aerofólios plenamente desenvolvidos nessa posição (Tabela 4) e possuem características bastante distintas, principalmente em relação ao comprimento de corda e ângulo de passo (β). A pá de referência apresenta um aerofólio com características que tendem a simetria enquanto a pá proposta apresenta o aerofólio S833 com características bastante distintas entre sua porção superior e inferior. Aerofólios simétricos tendem a apresentar menor

diferença de pressão entre as superfícies superior e inferior, de acordo com BEYER (2012), CUMMINS (CUMMINS, MASON, *et al.*, 2015) e ANDERSON (2016), tendendo a apresentar coeficiente de sustentação (Cl) menor, o que é indesejável para aerogeradores (VAN DER HORST, 2015). A tabela 5 apresenta as características do segmento final de medição ($r=95\%$).

Tabela 5: Comparação entre aerofólios na posição $r=95\%$, aerogerador de referência (a) e aerogerador proposto (b).

	Referência	Proposto S834
Aerofólio $r=95\%$		
Ângulo de Passo (β)	5,1°	-0,27°
Comprimento de Corda (c)	0,059 m	0,076 m

Fonte: elaborado pelo autor, 2017.

No segmento da ponta da pá, correspondente aos 5% finais do comprimento total há uma diferença significativa no ângulo de passo (β), que ainda é positivo na pá de referência (5,1°) e se apresenta negativo na pá do gerador proposto (-0,27°) conforme apresenta a comparação de dados na Tabela 5. O ângulo de passo é uma função que envolve o ângulo de ataque estabelecido pelo projeto do aerofólio (α) e demais características do aerofólio combinadas com as características definidas no momento do projeto do rotor (equações 6, 8 e 10). O aerofólio de referência encontra-se com simetria quase total não apenas entre a parte superior e inferior, bem como apresenta grande similaridade entre os bordos de ataque e bordo de fuga.

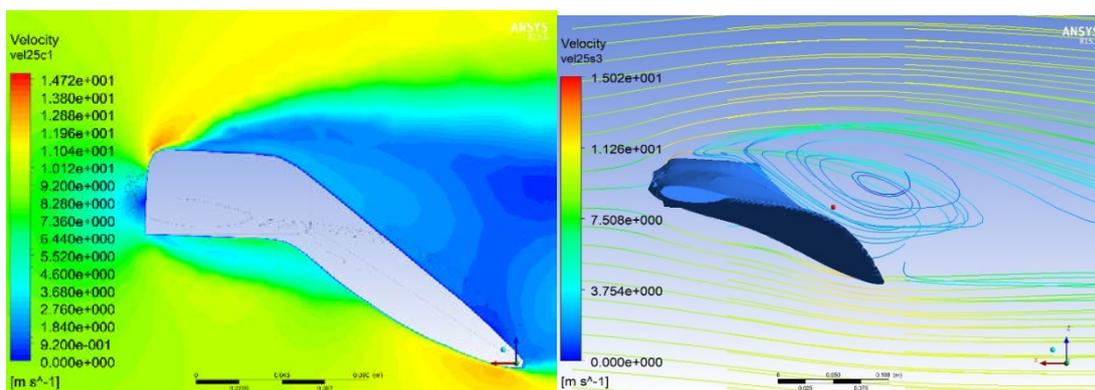
4.2. CONTORNOS DE VELOCIDADE E PRESSÃO

A simulação fluidodinâmica realizada no software Ansys Workbench permite através do módulo de pós-processamento CFD-Post que sejam feitas visualizações dos modelos tridimensionais junto de representações gráficas das variações de velocidade e pressão para a compreensão visual dos problemas matemáticos de DFC e a interpretação das características aerodinâmicas. Os resultados das sessões consideradas determinantes de acordo com pesquisas anteriores (SOMERS, 2002; GUNDHOFT, 2010; MCCOSKER 2012 e AL-ABADI, 2014) serão discutidos a seguir.

4.2.1. Aerofólio de referência na porção base da pá ($r=25\%$)

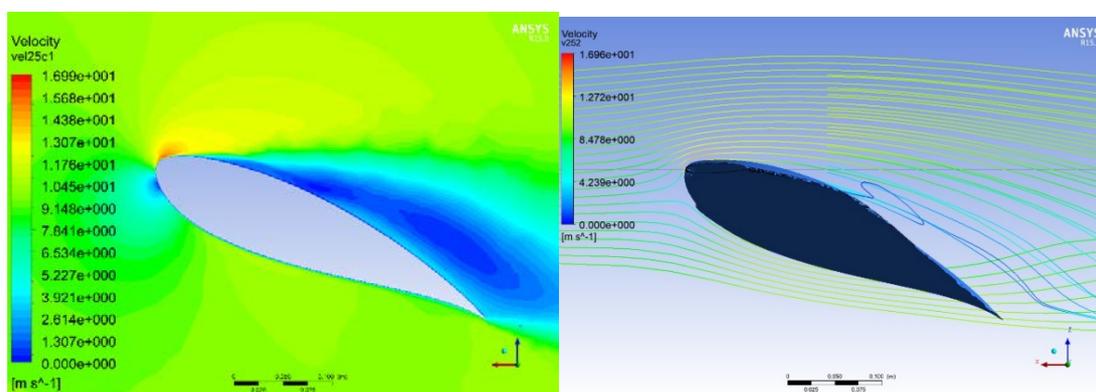
Ao observar os contornos de velocidade de ambos os perfis aerodinâmicos, é possível ver que há separação do fluxo na porção superior do aerofólio de referência, indicando turbulência e, por conta da forma do bordo de ataque (que se apresenta não-ideal por provável razão estrutural) há regiões de baixa velocidade na parte inferior do aerofólio. A diferença de velocidade nas posições superior e inferior do aerofólio é determinante para a geração de uma diferença de pressão, o que induz sustentação (ANDERSON, 2016). A pá do gerador proposto apresenta nesta seção uma variação maior de velocidade entre as porções superiores e inferiores do aerofólio, além da ausência de zonas de separação do fluxo, que se mantem com tendência ao comportamento contínuo e laminar, gerando assim maior diferença de pressão e conseqüentemente maiores forças aerodinâmicas resultantes (FOX, MCDONALD, *et al.*, 2014), estas características são apresentadas nas figuras 37 e 38.

Figura 37: Contorno de velocidade no aerofólio de referência, $r=25\%$.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Figura 38: Contorno de velocidade no aerofólio proposto, $r=25\%$.

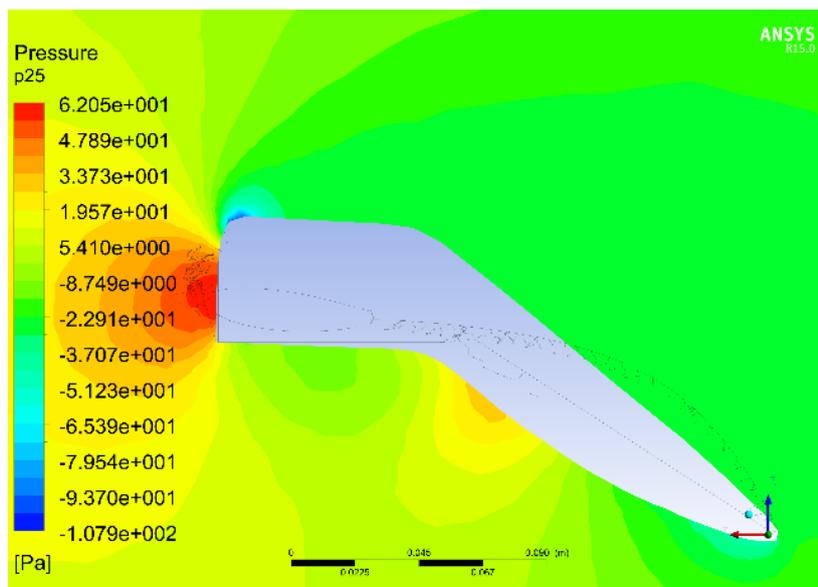


Fonte: elaborado pelo autor, 2017.

Contornos de altíssima pressão relativa indicam pontos de estagnação de velocidade (ANDERSON, 2016) que causam possíveis distúrbios no fluxo laminar e no estabelecimento dos fenômenos viscosos. A pá do aerogerador de referência, por conter ainda resíduos da geometria da estrutura de fixação nesta seção e grande ângulo de passo, apresenta um comportamento que tende a geração de arrasto, com dois pontos de estagnação, situados no bordo de ataque e na região média da parte inferior da pá (figura 39), que condizem com a análise dos contornos de velocidade apresentando turbulência e outras características não ideais para a geração de sustentação (ANDERSON, 2016) ou para o funcionamento da pá do aerogerador (AL-ABADI, 2014). O aerofólio S835 utilizado pelos pesquisadores nesta seção de maneira preservada (Figura 40), sem interferência da geometria estrutural, apresenta uma única zona de alta

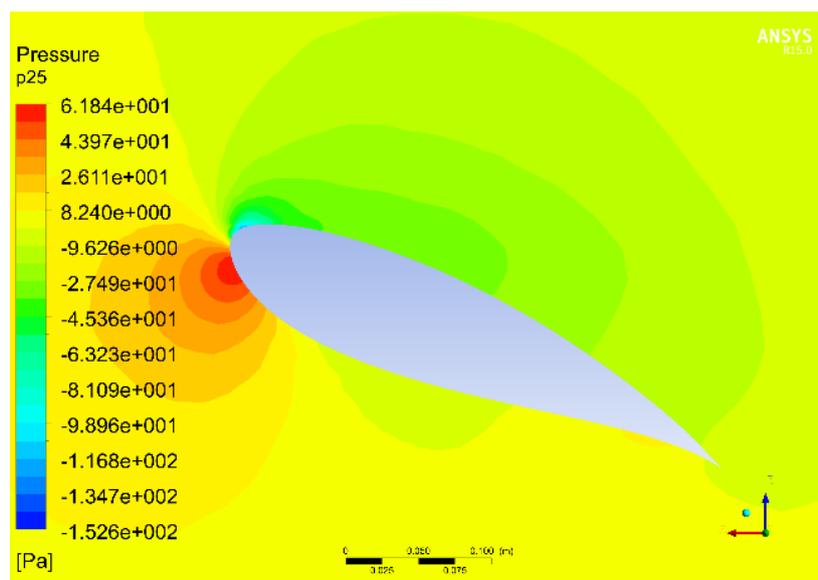
pressão e uma zona análoga de baixa pressão na parte superior do bordo de fuga do aerofólio, caracterizando a operação de força de sustentação definida (CUMMINS, MASON, *et al.*, 2015) comportamento desejável no funcionamento do gerador de energia eólica (FOX, MCDONALD, *et al.*, 2014).

Figura 39: Contornos de pressão no aerofólio proposto, $r=25\%$.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Figura 40: Contornos de pressão no aerofólio proposto, $r=25\%$.

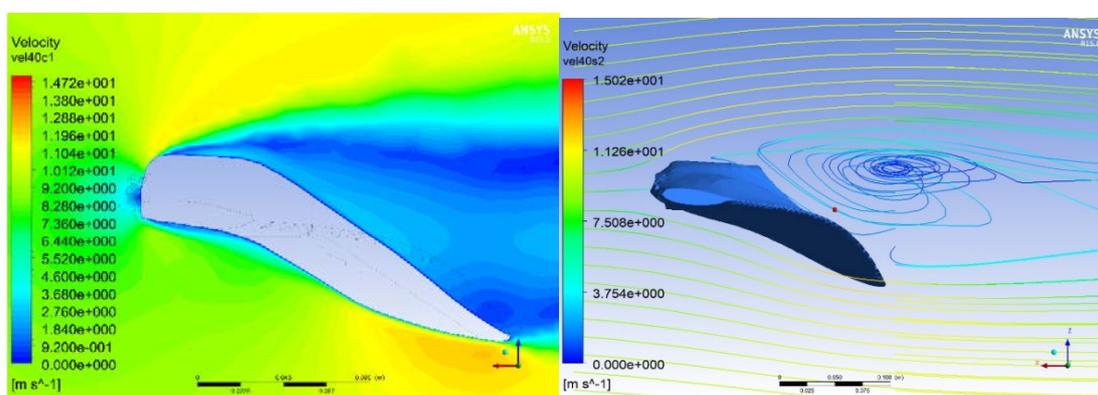


Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

4.2.2. Aerofólio base (r=40%)

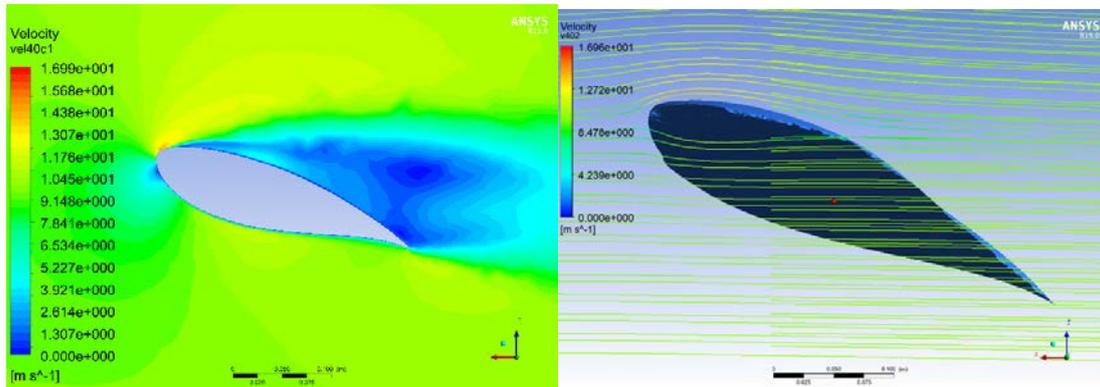
Nesta posição, os elementos aerodinâmicos da pá encontram-se livres de possíveis interferências causadas pelo centro do rotor ou torre (zonas que induzem turbulência por sua forma não-aerodinâmica), é interessante portanto que esta seção apresente características aerodinâmicas refinadas (SCHUBEL e CROSSLEY, 2012) uma vez que não há mais comprometimentos estruturais a partir deste ponto, a qualidade dos elementos aerodinâmicos é imprescindível (MCCOSKER, 2012). O aerofólio que se apresenta nesta porção da pá de referência (Figura 41) possui características definidas e uma suavização dos contornos de velocidade na parte superior do bordo de fuga, removendo a zona de turbulência presente anteriormente (MUNSON, ROTHMAYER, *et al.*, 2012). A pá do aerogerador proposto (Figura 42) na mesma porção, apresenta o aerofólio S835 plenamente desenvolvido (SOMERS, 2002) com zonas de velocidade diferencial definidas, entretanto há o surgimento de fluxo turbulento na porção superior do bordo de fuga, indicando um vórtice turbulento. A diferença de velocidade entre os pontos superior da pá de referência (Figura 41) é de maior proporção que na pá do gerador proposto (Figura 42), sugerindo neste ponto maior diferença de pressão teórica no eixo responsável pela sustentação (FOX, MCDONALD, *et al.*, 2014), entretanto o aerofólio de referência neste ponto apresenta grande variação de velocidade na parte superior do bordo de ataque, o que cria a redução da pressão no mesmo ponto, de acordo com os princípios estabelecidos por Bernoulli (ANDERSON, 2016).

Figura 41: Contornos de velocidade no aerofólio de referência, r=40%.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Figura 42: Contornos de velocidade do aerofólio proposto, $r=40\%$

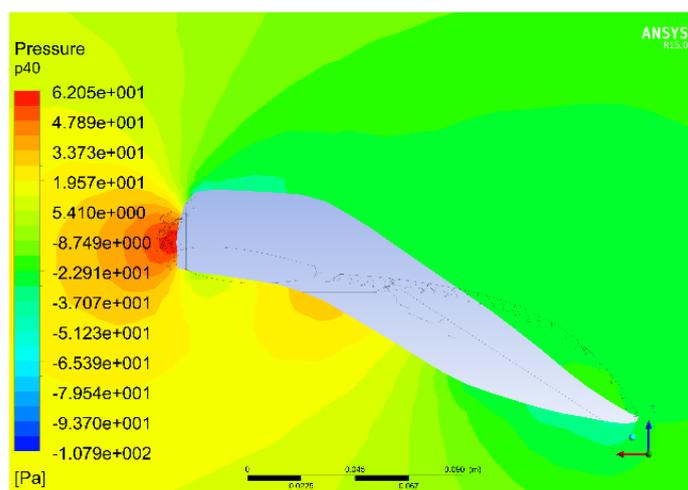


Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

A pá do gerador de referência (Figura 43) ainda apresenta consequências da irregularidade do fluxo na seção anterior, o elevado ângulo de passo causa provável separação de fluxo, o que resulta em um vórtice indesejável no bordo de fuga (ANDERSON, 2016), aliado a este fator há a presença de pontos de baixa e alta pressão em pontos simetricamente opostos da pá, indicando possível conflito na distribuição dos vetores de sustentação e arraste (KAMINSKY, FILUSH, *et al.*, 2012).

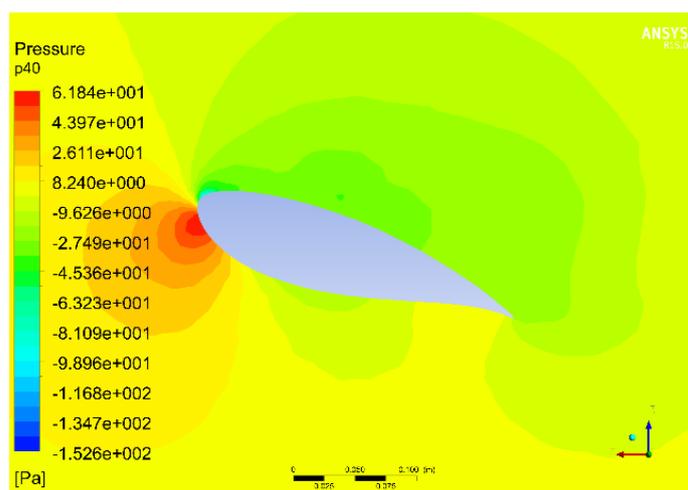
No aerogerador proposto (figura 44) o aerofólio S835 se apresenta com características esperadas, ainda que os contornos de velocidade na mesma seção indiquem um princípio de separação de fluxo, os contornos de pressão apresentam características ideais e definidas (ANDERSON, 2016), como a separação clara entre a porção superior e inferior do aerofólio no bordo de fuga e a definição clara de duas zonas de pressão, maior e menor, na parte inferior e superior do aerofólio, indicando a direção da força de sustentação resultante (FOX, MCDONALD, *et al.*, 2014).

Figura 43: Contornos de pressão do aerofólio de referência, $r=40\%$.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Figura 44: Contornos de pressão do aerofólio proposto, $r=40\%$.



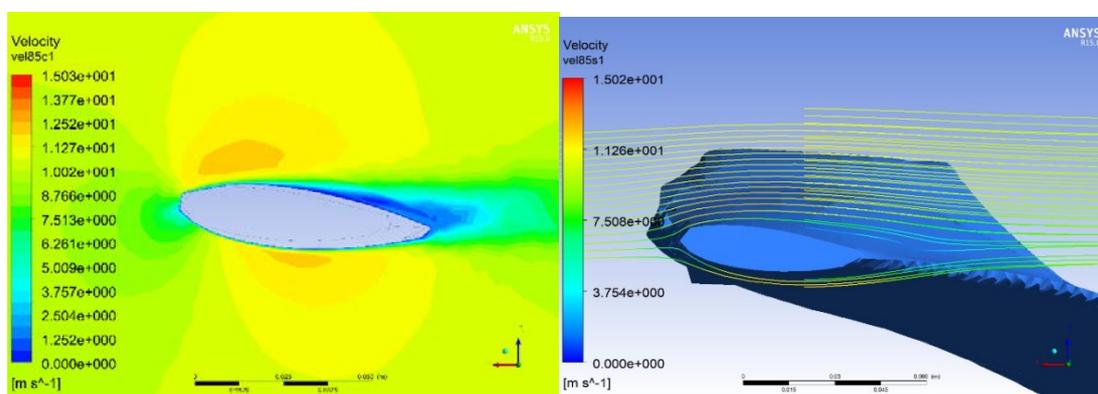
Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

4.2.3. Aerofólio primário ($r=85\%$)

O aerofólio primário se apresenta plenamente desenvolvido em ambas as pás, no aerogerador de referência (figura 45), mantém-se as características de velocidade similares as do aerofólio Base ($r=40\%$), indicando que as propriedades e forças atuantes terão também comportamento similar entre as duas porções (KAMINSKY, FILUSH, *et al.*, 2012). No aerofólio proposto para esta seção (figura 46), é possível observar a forma do aerofólio S833 em sua

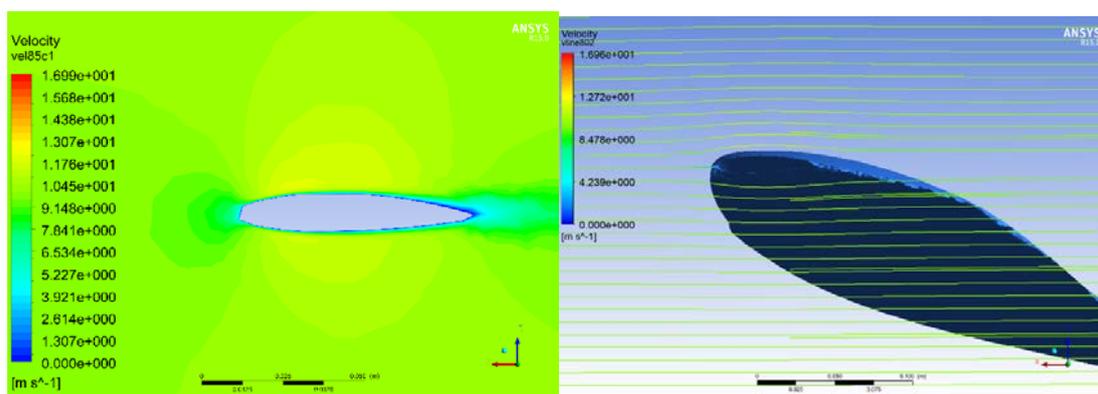
plenitude, conforme estabelecido por Somers (2002). O aerofólio encontra-se quase paralelo ao fluxo, apresentando ângulo de passo muito próximo a 0, situação que faz com que a diferença entre as velocidades das porções superior e inferior do aerofólio sejam reduzidas mas ambas ainda mantêm uma relação onde a velocidade do ar na parte inferior do aerofólio é inferior, evidenciando assim o comportamento das forças de sustentação (ANDERSON, 2016). O comportamento de ambas as pás em relação as diferenças entre a parte superior e inferior do aerofólio é resultado esperado decorrente da redução do ângulo de passo (FOX, MCDONALD, *et al.*, 2014).

Figura 45: Contornos de velocidade do aerofólio de referência, $r=85\%$.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Figura 46: Contornos de velocidade do aerofólio proposto, $r=85\%$.

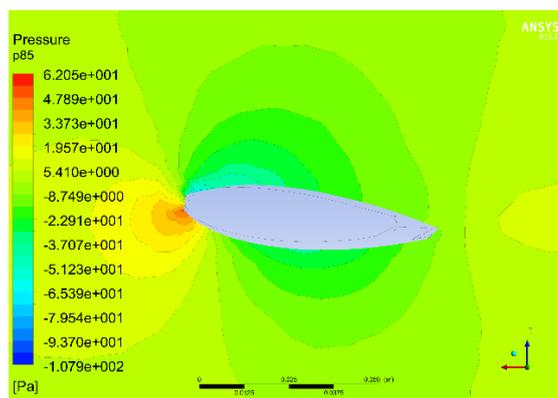


Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

A porção do aerofólio primário apresenta uma pequena área de baixa pressão na parte superior do bordo de ataque do aerofólio de referência

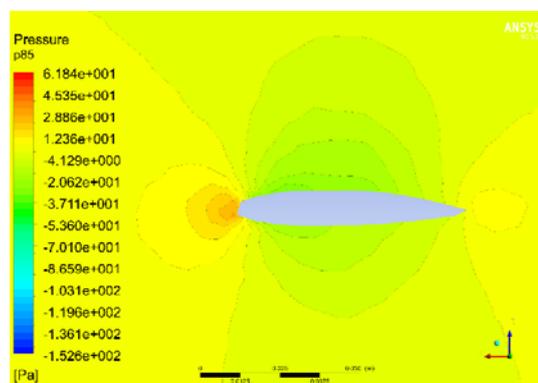
correspondente a zona de alta pressão diretamente abaixo, entretanto ainda há uma grande proximidade nos valores de pressão entre a parte superior e inferior do mesmo (Figura 47) não apenas em relação aos valores absolutos de pressão, mas também na distribuição dos contornos sobre a seção da pá. O gerador proposto apresenta, nesta seção, uma grande similaridade entre a porção superior e inferior da pá (figura 48), em relação aos contornos de pressão, ainda que apresente valores diferenciados. Isto se deve ao paralelismo da linha de corda em relação ao plano da velocidade de entrada no bordo de ataque (ANDERSON, 2016). Ainda é possível observar que os contornos de pressão se distribuem de maneira assimétrica (DIGRASKAR, 2010), fazendo que uma área de superfície maior da porção superior do aerofólio apresente menor pressão, indicando novamente a permanência do comportamento das forças de sustentação (KAMINSKY, FILUSH, *et al.*, 2012).

Figura 47: Contornos de pressão do aerofólio de referência, $r=85\%$.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Figura 48: Contornos de pressão do aerofólio proposto, $r=85\%$.

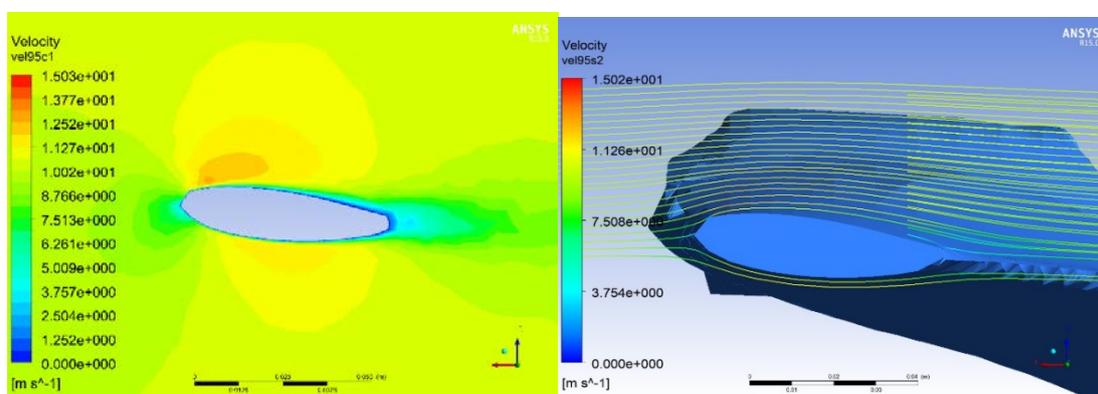


Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

4.2.4. Aerofólio da ponta da pá (r=95%)

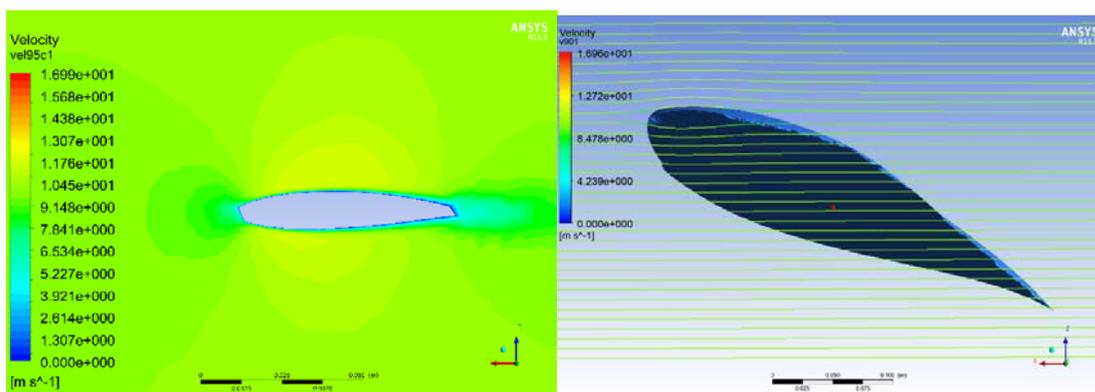
São notáveis as diferenças de comportamento desta seção da pá em relação a aerodinâmica por consequência das diferentes abordagens geométricas. A pá do gerador de referência apresenta um aerofólio com ângulo de passo muito similar ao da seção anterior, ainda apresentando valor positivo ($5,1^\circ$), há similaridade nos contornos de velocidade do ar em zonas análogas, mas a proporção ainda estabelece velocidades menores na parte inferior do aerofólio (Figura 49). Há grande similaridade entre os contornos de velocidade, fruto da redução no ângulo de passo, entretanto o aerogerador proposto (Figura 50) apresenta ângulo de passo negativo. A pá proposta apresenta menor variação entre os contornos de velocidade ao longo do eixo da corda do aerofólio, comportamento também existente na porção anterior, indicando grande similaridade entre ambos os aerofólios Primário e da região da Ponta, o que indica um comportamento linear da pá. O aerofólio do gerador de referência apresenta maior diferença entre velocidades da porção superior e da inferior (Figura 49) enquanto o aerofólio proposto (Figura 50) apresenta maior homogeneidade na distribuição dos contornos, gerando maior linearidade na distribuição e possivelmente atuação das forças fluidodinâmicas (FOX, MCDONALD, *et al.*, 2014).

Figura 49: Contornos e linhas de velocidade do aerofólio de referência, r=95%.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Figura 50: Contornos de velocidade do aerofólio proposto, $r=95\%$.



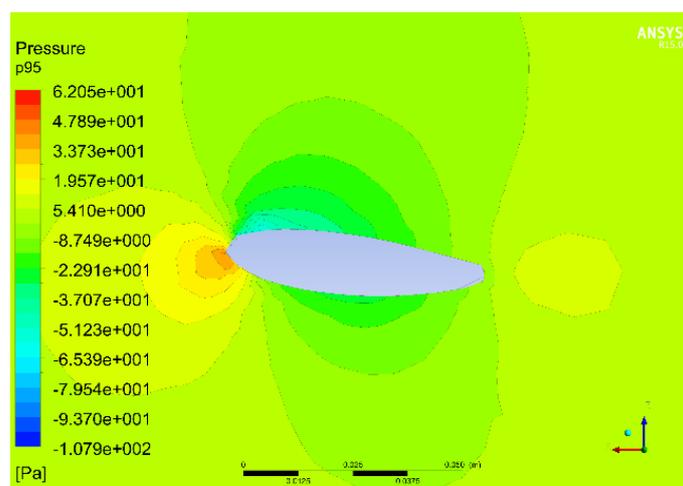
Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Como apresentado pelos contornos de velocidade do aerogerador de referência, o comportamento da geometria em relação a pressão também guarda relação com a sessão anterior, onde há diferenciação das zonas de pressão bem definida (DIGRASKAR, 2010), com uma zona de baixa pressão e alta velocidade na parte superior do bordo de ataque (Figura 51), há também apresentação de pontos de simetria entre contornos de pressão no segmento restante, o que pode influenciar na direção da resultante aerodinâmica (AL-ABADI, 2014).

O aerofólio S834 na pá proposta (Figura 52) têm uma menor diferença evidente entre os valores absolutos de pressão, como esperado há a presença de uma zona de alta pressão no bordo de fuga

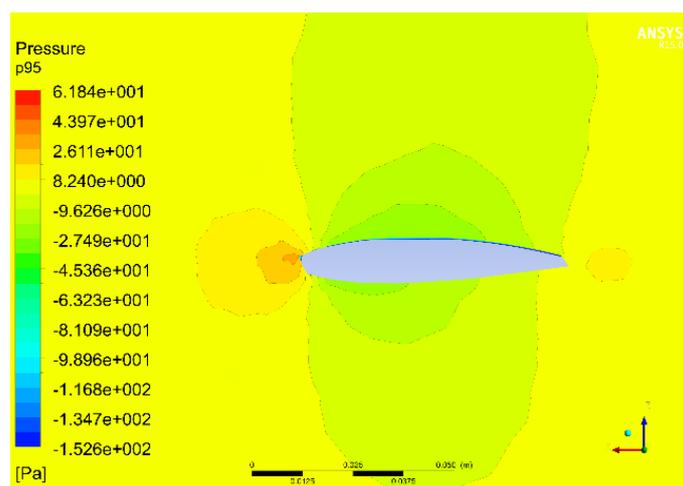
É possível observar diferentes contornos de alta pressão em ambos os aerofólios, além da zona de alta pressão esperada no bordo de ataque. Estes contornos se apresentam em posições diferentes em decorrência do ângulo de passo (ANDERSON, 2016). No aerofólio de referência (figura 15) esta zona se encontra junto ao bordo de ataque enquanto no aerofólio proposto há uma porção do bordo de fuga que apresenta maior pressão que o ponto oposto na metade superior do mesmo (figura 16), o posicionamento desta zona de pressão no aerofólio S835 acarreta na redução no contorno de baixa pressão na parte inferior do aerofólio, fazendo com que a distribuição de pressão entre a metade superior e inferior seja significativamente diferente, ainda que a diferença entre os valores absolutos médios seja pequena.

Figura 51: Contornos de pressão do aerofólio de referência, $r=95\%$.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Figura 52: Contornos de pressão do aerofólio proposto, $r=95\%$.

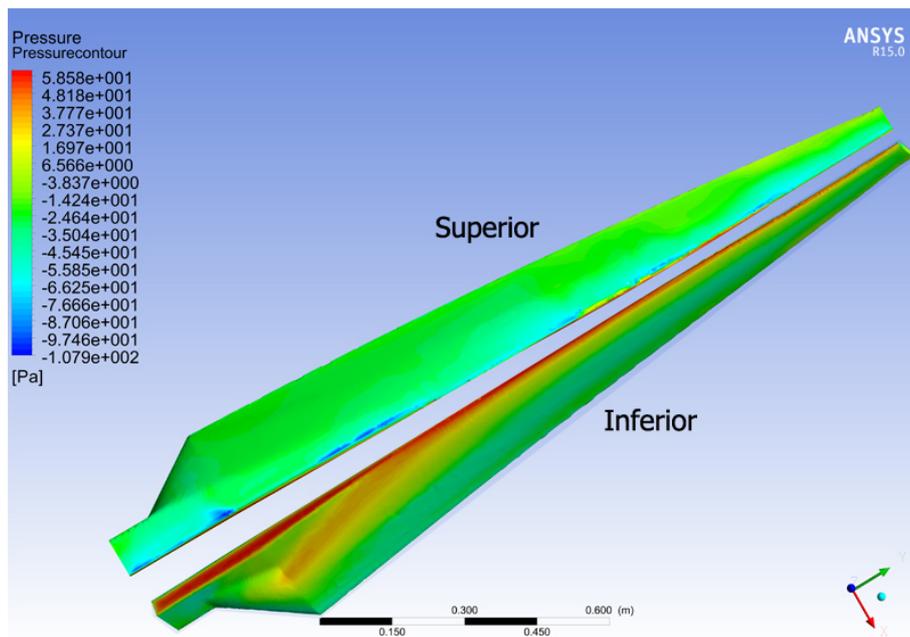


Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

4.2.5. Distribuição dos contornos de pressão ao longo da pá

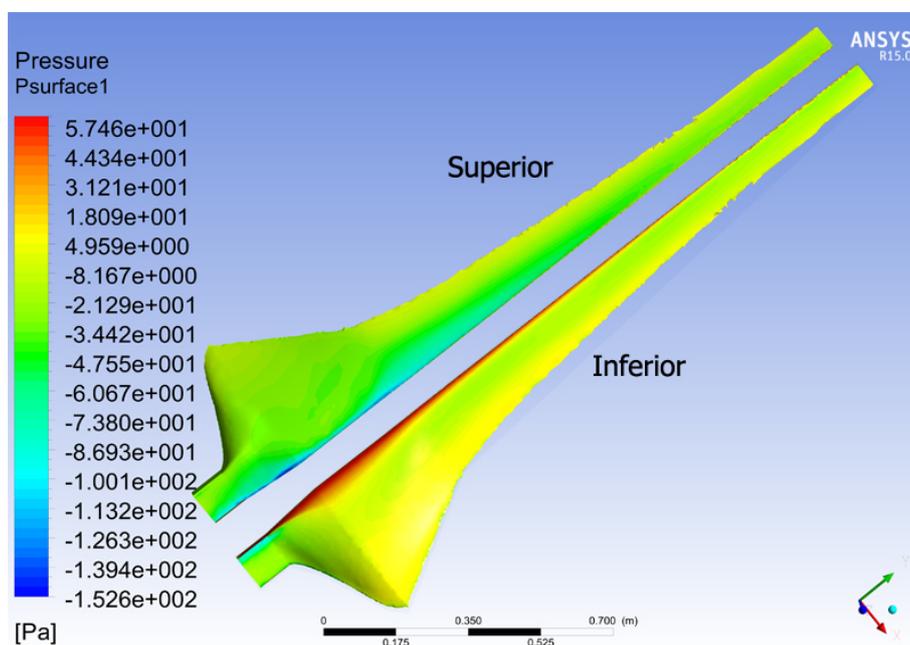
Uma vez que as características das pás, de acordo com a teoria dos elementos das pás, se apresentam na integração entre as diferentes sessões (CUMMINS, MASON, *et al.*, 2015), cabe a análise da distribuição dos contornos de pressão na superfície aerodinâmica, visto que cada aerofólio no volume tridimensional influencia a porção anterior e posterior ao mesmo (ANDERSON, 2016). As figuras 53 e 54 apresentam a distribuição de pressão na pá de referência e na topologia proposta pelos pesquisadores, respectivamente.

Figura 53: Distribuição dos contornos de pressão na pá de referência.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Figura 54: Distribuição dos contornos de pressão na pá proposta.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

É possível observar nos resultados que há uniformidade na distribuição dos contornos de pressão na porção superior de ambas as pás, entretanto a pressão diferencial é maior na pá construída neste trabalho que na topologia de

referência. A porção inferior de ambas as estruturas apresenta contornos de pressão bastante distintos, tendo a pá de referência grande parte da superfície interior apresentando valores de pressão muito próximos da superfície superior, já a topologia proposta apresenta distribuição de pressão com diferença significativa em relação a porção superior e homogeneidade na distribuição, com todo o bordo de fuga da pá apresentando valores aproximados.

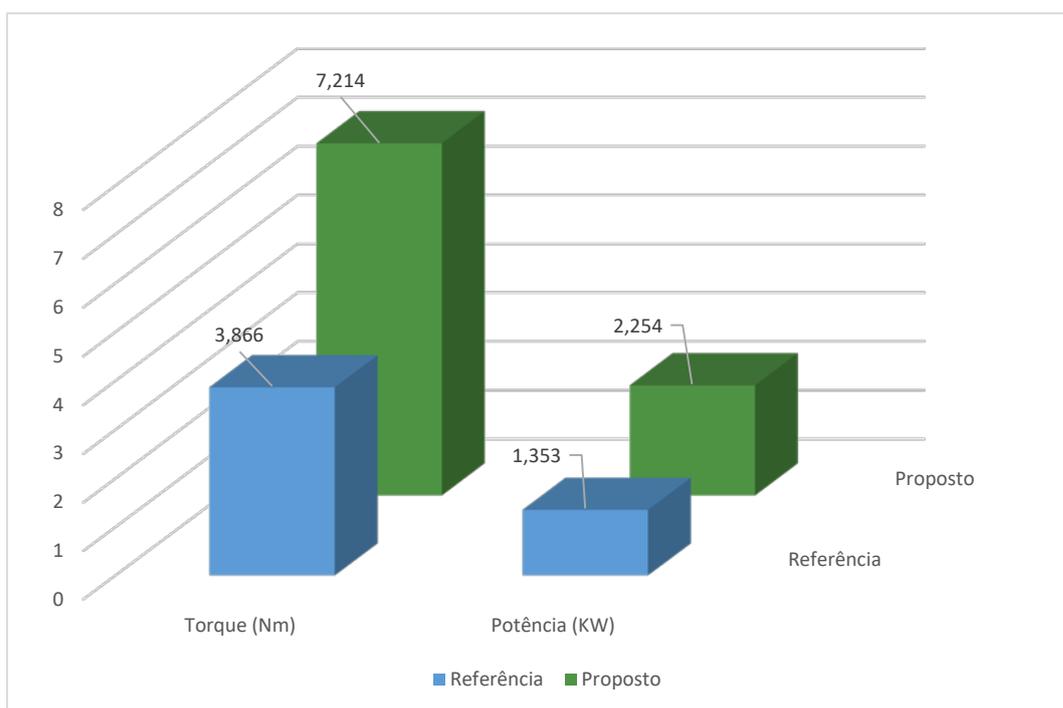
4.3. FORÇAS DE SUSTENTAÇÃO

O software Ansys Workbench 15 tem condições de monitorar e gerar relatórios precisos das forças atuantes em planos e eixos, conforme determinado pelo operador no módulo Fluent (LAWRENCE, 2012). Para efeito de comparação entre as duas pás deste trabalho, foram gerados relatórios de torque no eixo perpendicular ao fluxo de ar do aerogerador, indicando assim o resultado da integração das forças de sustentação atuantes ao longo da pá.

De conhecimento das equações para cálculo de potência em máquinas elétricas (FITZGERALD, KINGSLEY e UMANS, 2005), é possível calcular a potência gerada pelo rotor, uma vez que os demais componentes do gerador (transmissão e motor-gerador) serão equivalentes. A pá do aerogerador de referência apresentou ao longo de sua extensão forças de sustentação de 3,866 Nm, enquanto a pá do aerogerador proposto apresentou forças de sustentação na ordem de 7,214 Nm, um acréscimo de 87% em relação a referência. Quanto a potência, portanto, há a capacidade de gerar 1.353 W (1,35 kW) nestas condições com a pá de referência e 2.254 W (2,254 kW) com o uso da geometria proposta pelos pesquisadores.

Há uma diferença de 87% nas forças de sustentação ao longo da pá e que resulta em uma maior capacidade de geração de energia, portanto, do gerador proposto em relação a pá do gerador de referência (Figura 55).

Figura 55: Gráfico de diferença de rendimento entre os aerogeradores analisados.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Estas diferenças provêm das características aerodinâmicas, posicionamento e seleção criteriosa dos aerofólios e estabelecimento das demais características (DIGRASKAR, 2010; SCHUBEL *et al.* 2012; MCCOSKER, 2012; AL-ABADI, 2014). Este valor pode ainda variar, contudo, pois algumas simplificações foram aplicadas a simulação e este cálculo desconsidera perdas de transmissão, atrito ou deficiências diversas nos componentes do gerador e demais fatores inerentes a geração de energia (FOX, MCDONALD, *et al.*, 2014), contudo, sendo ambas as pás projetadas para o mesmo conjunto gerador há uma tendência que a diferença percentual de energia entre elas mantenha-se proporcional (FITZGERALD, KINGSLEY e UMANS, 2005).

5 CONCLUSÕES

Esta dissertação utilizou de métodos de construção e análise de aerofólios, pás e rotores de aerogeradores para estimar o potencial de um conjunto de pás de aerogerador de pequeno porte comercial e comparar este com um conjunto de pás construído para a aplicação específica do sistema gerador nas imediações da Universidade Feevale. Para isto, foi utilizado o levantamento de dados atmosférico realizado pelo Ministério de Minas e Energia (MME, 2014), e utilizadas as instruções e práticas das diversas bibliografias.

Para a construção das pás, foi utilizado o conjunto de aerofólios proposto por Somers (2002) com respeito a forma e posicionamento, cujas demais dimensões foram concebidas através do equacionamento conforme apresentado por Gundhoft (2009), McCosker (2012) e Al-Abadi (2014). Nenhuma das dimensões excedeu de maneira exacerbada as dimensões do aerogerador de referência, o que corrobora para o entendimento de que foram adequadas apenas características essenciais e o objetivo de manter o projeto dentro das mesmas dimensões do aerogerador de referência foi atingido satisfatoriamente.

Para a execução dos experimentos de DFC, foram utilizadas como referência as pesquisas e experimentos descritos por HIRSCH (2008), Digraskar (2010), Al-Abadi (2014) e Beer (2014), onde a análise dos resultados aerodinâmicos respeita as considerações de Fox (*et al.* 2014), Cummins (*et al.* 2015). Anderson (2016).

A opção dos pesquisadores de manter a plenitude da forma dos aerofólios inalteradas na porção raiz da pá, sem interferência das formas estruturais presentes no aerogerador de referência proporcionou a obtenção de características aerodinâmicas mais próximas dos ideais teóricos e refletiram na apresentação de forças aerodinâmicas de maior intensidade no conjunto da pá. A distribuição homogênea dos contornos de pressão, a preservação do fluxo laminar e a observação criteriosa do equacionamento resultaram em um aumento de 87% no torque do eixo perpendicular ao fluxo de ar, na velocidade de operação selecionada,

logrando êxito ao constatar geração de potência similar a potência nominal do equipamento comercial nas condições de operação locais.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para o desenvolvimento de pesquisas posteriores, sugere-se o estudo dos ângulos de passo nas seções primária e ponta da pá, uma vez que estes pontos apresentaram baixo diferencial de pressão nas condições estabelecidas, afim de verificar a possibilidade de aumento da eficiência da geometria da pá. Há também a possibilidade de utilização dos mesmos modelos tridimensionais para a realização de simulações de características mecânicas da pá, no intuito de encontrar os materiais e processos adequados a preservação dos aerofólios próximos ao ponto de fixação garantindo assim a concretização de um protótipo que retenha maior similaridade com as características satisfatórias do modelo virtual.

Existe também a possibilidade de ampliar as análises fluidodinâmicas computacionais ao conjunto de pás na forma do rotor, compreendendo modelos de turbulência mais complexos a fim de validar a eficiência do gerador como um todo e das pás em condições de trabalho mais próximas do ambiente real.

REFERÊNCIAS

- ABEEÓLICA. Associação Brasileira de Energia Eólica. **Associação Brasileira de Energia Eólica**, 11 Agosto 2015. Disponível em: <[http://www.portalabeeolica.org.br/index.php/noticias/3787-governo-vai-investir-r\\$-186-bilh%C3%B5es-em-energia.html](http://www.portalabeeolica.org.br/index.php/noticias/3787-governo-vai-investir-r$-186-bilh%C3%B5es-em-energia.html)>. Acesso em: 10 Junho 2016.
- ADAMS, V.; ASKENAZI, A. **Building Better Products with Finite Element Analysis**. 1ª. ed. [S.l.]: OnWord Press, v. I, 1998.
- AL-ABADI, A. **Novel Strategies for Aerodynamic Performance Improvement of Wind Turbines in Turbulent Flow**. Technischen Fakultät der Friedrich-Alexander-Universität. Erlangen. 2014.
- ANDERSON, J. **Fundamentals of Aerodynamics**. 6ª. ed. Nova Iorque, Estados Unidos: McGraw-Hill Educational, v. I, 2016.
- ASHWILL, T. D. Materials and Innovations for Large Blade Structures. **50th AIAA Structures, Structural Dynamics & Materials Conference**, Palm Springs, Maio 2009.
- AVILA, M. et al. A Parallel CFD Model for Wind Farms. **Procedia Computer Science**, 2013. 2157 - 2166.
- BAZILEVS, Y. et al. **Leading the Wind Energy Research through Advanced Computer Modeling**. National Institute of Standards and Technology. Gaithersburg, p. 1-9. 2007.
- BEER, G. **Advanced Numerical Simulation Methods: From CAD Data Directly to Simulation Results**. 1ª. ed. Boca Raton, Estados Unidos: CRC Press, v. I, 2015.
- BEYER, F. **Optimization and Simulation of Flow over Wind Turbines**. Nurenberg, Alemanha: Alexander Universitaet Erlangen-Nuernberg, v. I, 2012.
- CAI, X. et al. Structural Optimization Design of Horizontal-Axis Wind Turbine. **Energies**, Basel, Suíça, 16 Novembro 2012. 4683-4696.
- CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials Science and Engineering - An Introduction**. 8ª. ed. Hoboken, Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc., v. I, 2010.

CERVERA, R. A.; ARROYO, R. L.; CASTRO, R. R. **INTERFACE FOR THE MODELING AND SIMULATION OF A WIND TURBINE AIRFOIL**. 1ª. ed. Celaya: Instituto Tecnológico de Celaya, v. I, 2006.

CLEVELAND, C. J. **Encyclopedia of Energy**. 1ª. ed. Amsterdam, Holanda: Elsevier, v. I, 2004.

CUMMINS, R. M. et al. **Applied Computational Aerodynamics: A Modern Engineering Approach**. 1ª. ed. Cambridge: Cambridge University Press, v. I, 2015.

DIGRASKAR, D. A. **Simulations of Flow Over Wind Turbines**. 1ª. ed. Massachusetts, Estados Unidos: University of Massachusetts, v. I, 2010.

DILL, E. H. **The Finite Element Method for Mechanics of Solids with ANSYS Applications**. 1ª. ed. Londres: CRC Press, v. I, 2011.

DUQUETTE, M. M.; VISSER, K. D. Numerical Implications of Solidity and Blade Number on Rotor Performance of Horizontal-Axis Wind Turbines. **Journal of Solar Energy Engineering** , Nova Iorque, Estados Unidos, 26 Novembro 2003. 425-432.

EPE. **Consumo Nacional por Classe - 1995-2014**. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília. 2015.

FARO LTD. 3D Measuring Technology from FARO. **Measuring Arm - Faro ScanArm**, 2017. Disponível em: <<http://www.faro.com/products/metrology/faro-scanarm/overview>>. Acesso em: 09 Agosto 2017.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, J. C.; UMANS, S. D. **Electric Machinery**. 6ª. ed. Columbus, Estados Unidos: McGraw-Hill, v. I, 2005.

FOX, R. W. et al. **INTRODUÇÃO A MECÂNICA DOS FLUÍDOS**. 8ª. ed. Rio de Janeiro: LTC Ltda., v. I, 2014.

FRAUNHOFER IWU. **Incremental Sheet Metal Forming**. Fraunhofer Institute for Machine Tools and Forming Technology IWU. Chemnitz, Alemanha. 2015.

GASCH, R.; TWELE, G. **Wind Power Plants**. 1ª. ed. Berlim , Alemanha: Solarpraxis, v. I, 2002.

GREEN, D. W.; WINANDY, J. E.; KRETSCHMANN, D. E. **Wood as an Engineering Material**. 1ª. ed. Madison, Estados Unidos: U.S. Department of Agriculture, v. I, 1999.

GUNDHOFT, S. **Wind Turbines**. 2^a. ed. Aarhus, Dinamarca: University College of Aarhus , v. I, 2009.

GURIT AG. **Materials for Wind Turbine Blades**. Gurit Holding AG. Wattwill, Suíça. 2015.

GWEC. **Global Wind Report: Anual Market Update 2015**. Global Wind Energy Council. Bruxelas, Bélgica. 2015.

HANCOCK, M. **Wooden Wind Turbine Blades**. Wind Energy Institute. Flensburg, Alemanha. 2014.

HAU, E. **Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics**. 2^a. ed. Berlim, Alemanha: Sprinter-Verlag, v. I, 2006.

HAYMAN, B. E. A. Materials Challenges in Present and Future Wind Energy. **MRS Bulletin**, Abril 2008. 343-353.

HIRSCH, C. **Numerical Computation of Internal and External Flows: The Fundamentals of Computational Fluid Dynamics**. 2^a. ed. Oxford, Inglaterra: Butterworth-Heinemann, v. I, 2008.

HOWARD, W.; MUSTO, J. **Introduction to Solid Modeling Using SolidWorks 2014**. 1^a. ed. Nova Iorque: McGraw Hill, v. I, 2014.

IEC. **IEC 61400-2: Small wind turbines**. International Electrotechnical Commission. Londres, Inglaterra. 2013.

KAMINSKY, C. et al. **A CFD Study of Wind Turbine Aerodynamics**. 2012 ASEE North Central Section Conference. Washington, Estados Unidos: ASEE. 2012.

KAMINSKY, C. et al. **A CFD Study of Wind Turbine Aerodynamics**. Cincinnati: American Society for Engineering Education. 2012. p. 12 a 18.

KEERTHANA, M. et al. Aerodynamic Analysis Of A Small Horizontal Axis Wind Turbine Using Cfd. **Journal of Wind and Engineering**, Chennai, Julho 2012. 14-28.

LAIN, S.; QUINTERO, B.; LÓPEZ, Y. U. Aeromechanical Evaluation of Large HAWT's Blades. **Journal of Scientific & Industrial Research**, Cali, Colombia, Fevereiro 2010. 142-145.

LAWRENCE, K. **ANSYS Workbench Tutorial Release 14**. 1^a. ed. Mission: SDC Publications, v. I, 2012.

LIOU, F. W. **Rapid Prototyping and Engineering Applications: A Toolbox for Prototype Development**. 1ª. ed. Missouri-Rolla: CRC Press, v. I, 2007.

MANWELL, J. G.; MCGOWAN; ROGERS, A. L. **Wind Energy Explained – Theory, Design and Application**. 1ª. ed. Hoboken, Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc., v. I, 2009.

MCCOSKER, J. **Design and Optimization of a Small Wind Turbine**. Faculty of Rensselaer Polytechnic Institute. Hartford, Estados Unidos. 2012.

MME. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**. Ministério de Minas e Energia. Brasília. 2001.

MME. **Energia Eólica no Brasil e no Mundo**. Ministério de Minas e Energia. Brasília. 2014.

MOAVENI, S. **Finite Element Analysis: Theory and Application with ANSYS**. 4ª. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, v. I, 2014.

MUNSON, B. R. et al. **Fundamentals of Fluid Mechanics**. 7ª. ed. Hoboken, Estados Unidos: John Wiley & Sons, v. I, 2012.

NASA. **Classical Aerodynamic Theory**. 1ª. ed. Moffet Field: NASA - Scientific and Technical Information Branch, v. I, 1979.

NREL. Wind Turbine Airfoil Families. **NWTC Information Portal**, 2016. Disponível em: <<https://wind.nrel.gov/airfoils/AirfoilFamilies.html>>. Acesso em: 15 Maio 2016.

OERLEMANS, S.; SIJSTMA, P.; LOPEZ, B. Location and Quantification of Noise Sources on a Wind Turbine. **Journal of Sound and Vibration**, Amsterdam, Holanda, 6 Fevereiro 2007. 869-883.

OERTEL, H. et al. **Prandtl-Essentials of Fluid Mechanics**. 3ª. ed. Nova Iorque, Estados Unidos: Springer, v. I, 2010.

POZRIKIDIS, C. **Fluid Dynamics: Theory, Computation, and Numerical Simulation**. 3ª. ed. Nova Iorque, Estados Unidos: Springer, v. 1, 2016.

RAFUDDIN, A. M.; SINGH, R. K. Blade Design and Performance Testing of a Small Wind Turbine Rotor for Low Wind Speed Applications. **Renewable Energy**, Cambridge, Estados Unidos, 07 Agosto 2013. 812-819.

RAGHEB, M.; RAGHEB, A. Wind Turbines Theory - The Betz Equation and Optimal Rotor Tip Speed Ratio. In: CARRIVEAU, R. **Fundamental and**

Advanced Topics in Wind Power. 1^a. ed. Rijeka, Croácia: INTECH, v. I, 2011. Cap. 2, p. 19-38.

RERL. **Wind Turbine Noise Issues.** Renewable Energy Research Laboratory. Amherst, Estados Unidos. 2004.

SANDERSE, B. **Aerodynamics of wind turbine wakes.** Energy Research Centre of Netherlands. Petten, Holanda. 2016.

SAWIN, J. L. **Renewables Global Status Report 2015.** REN 21 - Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. Paris, França. 2015.

SCHUBEL, P. J.; CROSSLEY, R. J. Wind Turbine Blade Design. **Energies**, Basel, Suíça, 6 Setembro 2012. 3425-3449.

SCHUBEL, P. J.; CROSSLEY, R. J. Wind Turbine Blade Design. **Energies**, Basel, Suíça, 6 Setembro 2012. 3425-3449.

SHAFFARCZYK, A. P. **Introduction to Wind Turbine Aerodynamics.** 1^a. ed. Nova Iorque, Estados Unidos: Springer, v. I, 2014.

SHANDONG HUAYA LTD. 2.5kw Wind Turbine - Fixed Pitch Wind Turbine. **Wind Turbine Manufacture - Shandong Huaya Co. LTD**, 2016. Disponível em: <http://www.huayaturbine.com/te_product_a/2008-04-09/21.shtml>. Acesso em: 11 Março 2017`.

SHANDONG HUAYA LTD. 2.5Kw Wind Turbine - Fixed Pitch Wind Turbine. **Shandong Huaya Industry Co LTD**, 2016. Disponível em: <http://www.huayaturbine.com/te_product_a/2008-04-09/21.shtml>. Acesso em: 11 Março 2017.

SIMON, D. **Static Balancing of The Cal-Poly Wind Turbine Rotor.** California Polytechnic State University. San Luis Obispo, Estados Unidos. 2012.

SOMERS, D. M. **The S833, S834, and S835 Airfoils.** National Renewable Energy Laboratory. Port Matilda, Estados Unidos. 2002.

SUMMER, J.; WATTERS, C. S.; MASSON, C. CFD in Wind Energy: The Virtual, Multiscale Wind Tunnel. **energies**, Basel, Suíça, 17 Maio 2010. 989-1013.

TIMBER TOWER GMBH. **Timber Tower Product Brochure.** Timber Tower GMBH. Hannover, Alemanha. 2015.

ULRICH, K. T.; EPPINGER, S. D. **Product Design and Development.** 1^a. ed. Londres: McGraw Hill, v. I , 2000.

VAN DER HORST, S. **Airfoil Design for Vertical Axis Wind Turbines**. Delft University of Technology. Delft, Holanda. 2015.

VAN RIJSWIJK, K. **Vacuum Infusion Technology for Anionic Polyamide-6 Composites**. Universiteit Delft. Haveka, Holanda. 2007.

WORLDSTEEL. **Steel Solutions in The Green Economy**. World Steel Association. Bruxelas, Bélgica. 2015.

WWEA. **2015 Small Wind World Report Summary**. World Wind Energy Association. Bonn, Alemanha, p. 3 - 10. 2015.

ZIJIE, W. **Bamboo Laminate Composite on Wind Turbine Blade Application**. Manchester University. Manchester, Inglaterra. 2011.